



Формула (1) по своей физической сущности дает возможность рассчитать силу, приложенную на передней грани реза.

Кроме сил, приложенных на передней грани и осуществляющих процесс деформации стружки, имеются еще силы, расположенные на задней грани, являющиеся результатом упруго-пластического контакта задней грани в узком участке ее, граничащем с режущей кромкой, с поверхностью резания. Силы на задней грани не зависят от толщины срезаемого слоя и угла резания и их величина тем относительно менее заметна в сравнении с силами на передней грани, чем больше толщина срезаемого слоя и больше угол резания. При определении силы резания аналитическим путем следовало бы к значению силы  $P_1$ , рассчитанной по уравнению (1), прибавлять силу, расположенную на задней грани в направлении скорости резания. Но в большинстве случаев при применяемых в практике подачах и толщинах среза величина этой добавки очень мала. Представляло интерес определить, начиная с каких подач можно пренебречь силой на задней грани ввиду ее относительной малости.

### Методика эксперимента

Опыты проводились на токарном станке. Для опытов были взяты следующие марки сталей:

1. Сталь 10.
2. Сталь 4.
3. Сталь ШХ15.
4. Сталь 30ХГС.
5. Сталь 9ХС.

Стандартный химический состав этих сталей следующий (табл. 1).

Таблица 1

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni
10	0,05—0,15	0,35—0,65	0,17—0,37	—	—
4	0,18—0,27	0,4—0,7	0,12—0,35	—	—
ШХ-15	0,95—1,1	0,2—0,4	0,15—0,35	1,3—1,65	<0,2
30ХГС	0,25—0,35	0,8—1,1	0,9—1,2	0,8—1,1	
9ХС	0,85—0,95	0,3—0,6	1,2—1,6	0,95—1,25	<0,3

Таким образом, для опытов были взяты стали различного химического состава. Стали 10 и 4 являются обычными углеродистыми, ШХ—15 шарикоподшипниковая сталь, 9ХС—инструментальная, 30ХГС—легированная конструкционная сталь.

Указанные стали имели следующие твердости по Бринелю (табл. 2).

Таблица 2

Марка стали	10	4	ШХ15	30ХГС	9ХС
Твердость	110—116	132	199—204	198	197—202

Все стали перед опытами были подвергнуты отжигу или нормализации для выравнивания структуры. По болванкам как вдоль, так и по поперечному сечению было проведено измерение твердости, чтобы убедиться в однородности механических качеств в пределах каждой данной болванки. От каж-

дой болванки отрезался кусок, из которого изготавливались образцы для сжатия.

Резание осуществлялось резцами с пластинками из твердых сплавов Т15К6. Резцы имели следующую геометрию:

Передний угол  $20^\circ, 10^\circ, 0^\circ, -10^\circ$ .  
 Задние углы  $10^\circ$ .  
 Угол наклона режущей кромки  $0^\circ$ .  
 Главный угол в плане  $75^\circ$ .  
 Вспомогательный угол в плане  $15^\circ$ .  
 Радиус закругления носика  $0,5$  мм.  
 Передняя грань плоская.

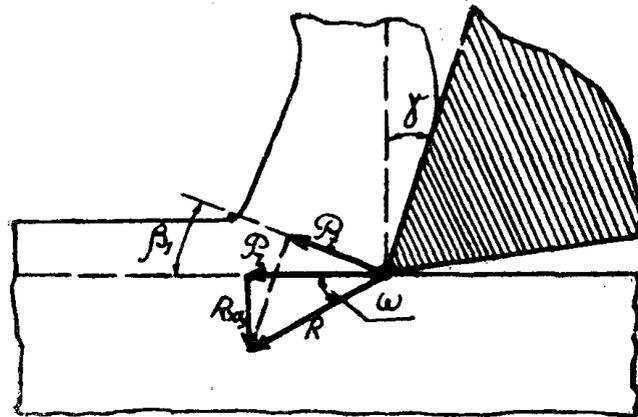
Резцы доводились пастой карбида бора перед каждым опытом и применялись только в остром состоянии без заметных следов затупления и выкрашивания режущих кромок.

Опыты проводились при столь высоких скоростях резания, при которых отсутствует нарост на резце.

В опытах измерялись три составляющие силы резания  $P_z, P_x, P_y$ , продольная усадка стружки  $\zeta$ , уширение стружки  $\frac{b_1}{b}$ , где  $b$  ширина среза,  $b_1$ —ширина срезанной стружки.

По этим величинам рассчитывались для каждого опыта значения относительного сдвига  $\varepsilon$ , угла  $\beta_1$ , определяющего положение плоскости максимальных касательных напряжений, касательного напряжения  $\tau$ , коэффициента трения  $\mu$  и угла трения  $\gamma$ .

Расчет проводился по следующим зависимостям (фиг. 1):



Фиг. 1

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\frac{b}{b_1} \zeta - \sin \gamma},$$

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma),$$

$$\mu = \operatorname{tg}(\omega + \gamma),$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{R_{xy}}{P_z},$$

$$R_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2},$$

$$\eta = \operatorname{arctg} \mu,$$

$$\tau = P_t \frac{\sin \beta_1}{ab} = P_t \frac{\sin \beta_1}{s.t},$$

$$P_t = \frac{P_z}{\cos \omega} \cdot \cos (\omega + \beta_1).$$

Усадка стружки  $\zeta$  для подстановки в уравнение (1) рассчитывалась по выражению

$$\zeta = \zeta_l \frac{b}{b_1},$$

где  $\zeta_l = \frac{l_0}{l}$  — продольная усадка,

$b$  — ширина среза,

$b_1$  — ширина снятой стружки.

Силы на задней грани не учитывались и не выбрасывались из показаний динамометра. Опыты на токарном станке проводились при глубине резания  $t = 3$  мм и подачах  $s = 0,30$  мм/об, 0,15 и 0,07 мм/об. Отношение глубины резания к подаче выбиралось большим, чтобы не получить значительного искажения формы поперечного сечения снятой стружки в сравнении с сечением срезаемого слоя.

Для определения физико-механических характеристик обрабатываемого материала производилось сжатие образцов под прессом Гагарина. По результатам сжатия получились значения  $\sigma_0$  и  $n$ . Для уменьшения влияния трения на торцах сжимаемых образцов на напряженное состояние отношение первоначальной высоты сжимаемого образца  $h_0$  к его диаметру  $d_0$  было взято  $\frac{h_0}{d_0} = 2,5$  и сжатие осуществлялось в специальной направляющей гильзе.

Результаты опытов по резанию располагались экспериментальными точками на графиках  $\tau\varepsilon = f(\varepsilon)$ .

На этих же графиках по опытам сжатия строилась кривая

$$A_{\omega t} = \frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n\varepsilon}{1.5}} - 1 \right\}. \quad (2)$$

Отклонения экспериментальных точек из опытов по резанию от кривой, проведенной по уравнению (2), характеризовали отклонение экспериментально полученных значений силы резания  $P_z$  от результатов теоретического расчета силы по уравнению (1) и давали возможность судить о точности и пригодности уравнения (1). Так как при расчете напряжения сдвига при резании  $\tau$  силы на задней грани не исключались из сил, замеренных динамометром, то расположение экспериментальных точек на графике  $\tau\varepsilon = f(\varepsilon)$  давало возможность судить о том, возможно ли при расчете силы резания по уравнению (1) пренебрегать силами на задней грани реза.

## Результаты опытов

Опытами по сжатию были определены физико-механические характеристики сталей—условный предел текучести  $\sigma_0$  и показатель политропы напряжения  $n$ . Значения этих величин для испытываемых сталей были получены следующие (табл. 3).

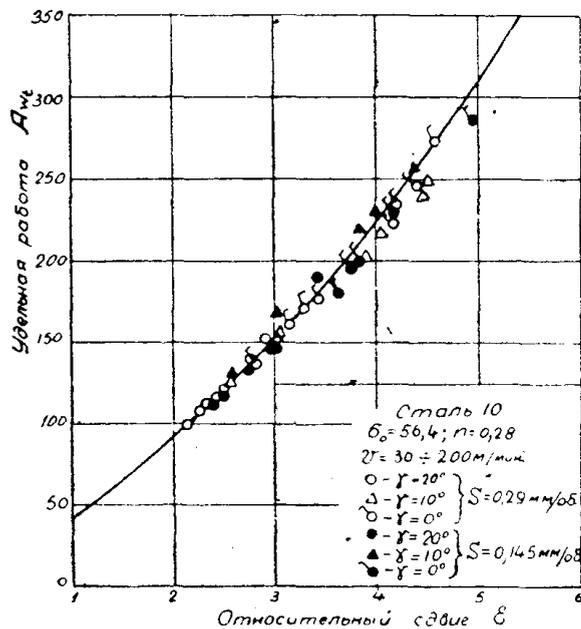
Таблица 3

Марка стали	$\sigma_0$	$n$
Сталь 10	56,4	0,280
" 4	62	0,250
" ШХ 15	83,8	0,270
" 30ХГС	84,5	0,230
" 9ХС	94,5	0,155

На фиг. 2 для стали 10 нанесена теоретическая кривая по уравнению (2), причем по оси абсцисс нанесены величины относительного сдвига, по оси ординат—удельная работа деформации сдвига  $A_{wt}$  в  $\text{кгмм/мм}^3$ . Относительный сдвиг при сжатии рассчитывался по уравнению

$$\varepsilon = 1,5 \ln \frac{h_0}{h}$$

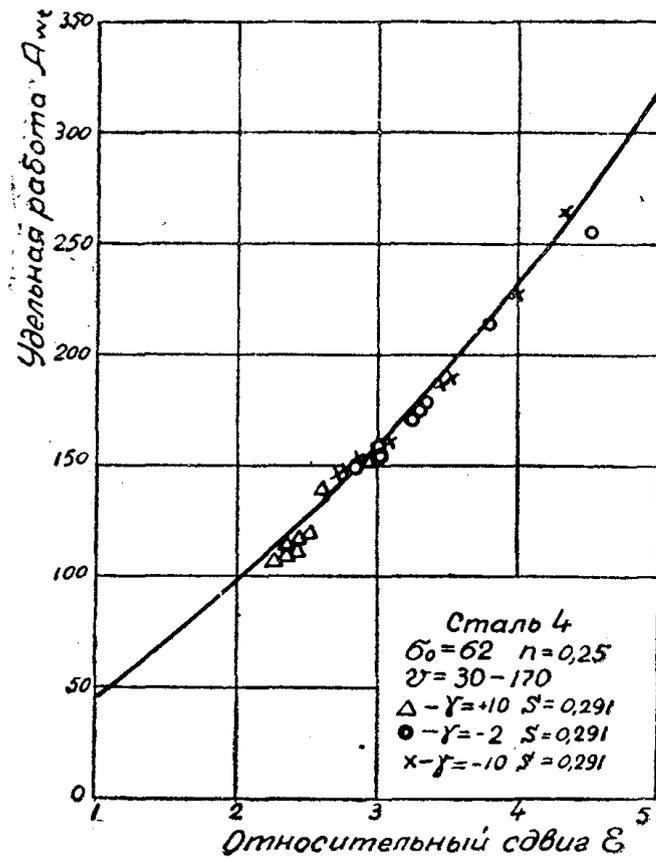
На этой же фигуре нанесены экспериментальные точки из опытов по резанию. Для каждого опыта рассчитывались величины  $\tau$ ,  $\varepsilon$  и  $A_{wt} = \tau\varepsilon$  [1], что и дало возможность все результаты опытов по резанию расположить в координатах  $\varepsilon - A_{wt}$ .



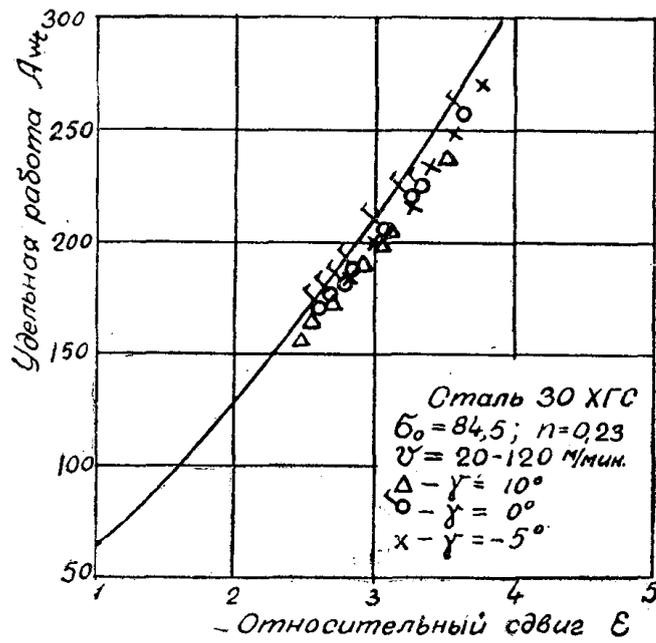
Фиг. 2

Опыты были проведены при трех различных передних углах и двух подачах и при скоростях резания, изменяющихся в пределах от 30 до 200 м/мин. График показывает, что экспериментальные точки хорошо расположились относительно теоретической кривой, что подтверждает правильность уравнения (1) для расчета силы резания.

На фиг. 3 дан такой же график для стали 4, который показывает столь же хорошее расположение экспериментальных точек относительно кривой. На фиг. 4, 5 и 6 те же результаты представлены для сталей 30ХГС (фиг. 4), ШХ15 (фиг. 5) и 9ХС (фиг. 6). Для этих трех сталей, обладающих более высокими механическими свойствами, чем две первые, и характеризующихся

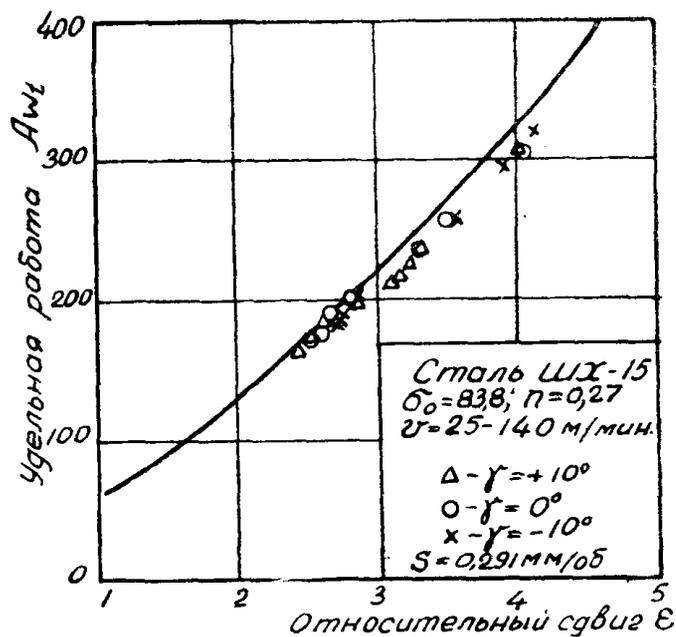


Фиг. 3



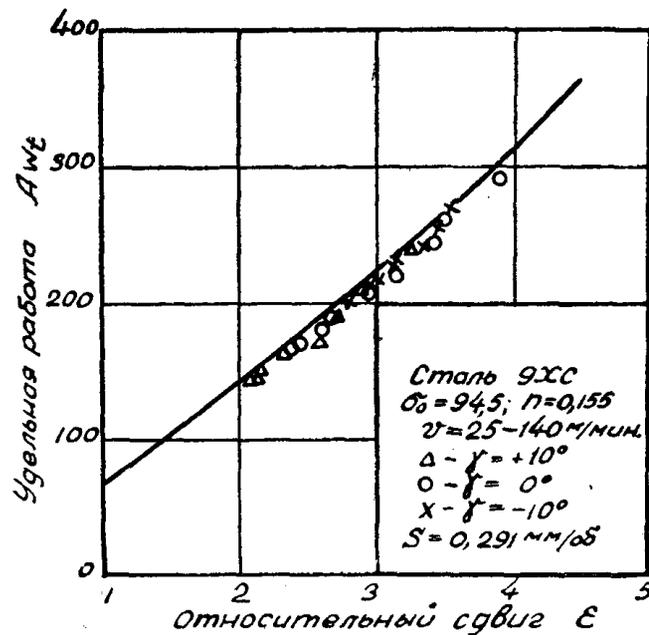
Фиг. 4

значительно более высокими удельными работами при резании, опытные точки расположились в среднем на 4—7% ниже теоретических кривых. в то же время полностью копируя их очертания.



Фиг. 5

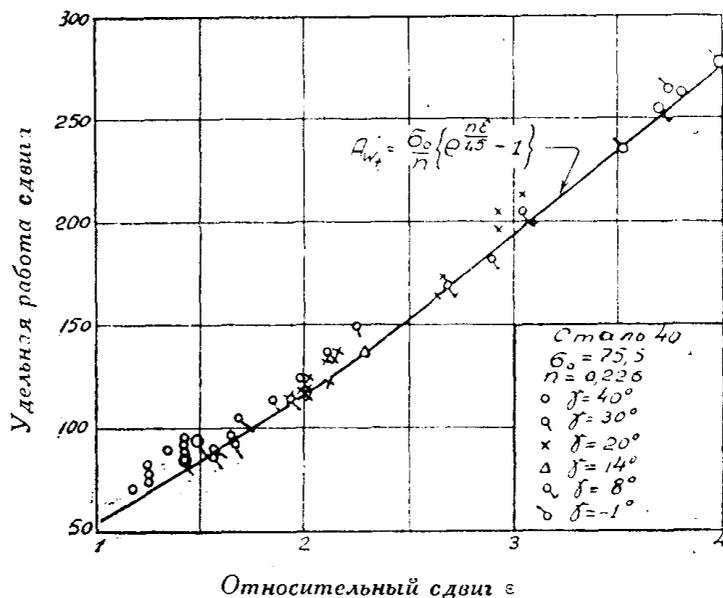
Все указанные опыты были проведены при несвободном резании, и приведенные графики показывают, что уравнение (1) в достаточной степени хорошо удовлетворяет и этому виду процесса резания.



Фиг. 6

Если мы сравним полученные графики с результатами работы А. М. Розенберга и А. Н. Еремина, проведенной на микроскоростях по стали 40 [1], то мы можем заметить следующее обстоятельство. Опытные точки по резанию на микроскоростях расположились немного выше (на 3—4%) теорети-

ческой кривой (фиг. 7), на высоких же скоростях резания нами получены результаты, которые дали опытные точки, расположившиеся для мягких сталей на кривой, для более твердых немного ниже (на 4—7%) теоретической кривой. Можно предположить, что некоторое снижение опытных точек здесь связано с влиянием температуры в зоне сдвига на механические характеристики обрабатываемого металла. При микроскоростях температура в зоне сдвига равна комнатной, так как все тепло, выделяющееся в результате деформации, успевает рассеиваться, при высоких же скоростях рассеивание тепла тем менее возможно, чем выше скорость резания, причем количество выделившегося тепла в единице объема деформируемого металла будет тем больше, чем больше удельная работа деформации  $A_{wt}$ . Мы и замечаем, что для наиболее мягкой стали 10, для которой удельные работы являются наименьшими, а значит и температура в зоне сдвига более низка, чем для



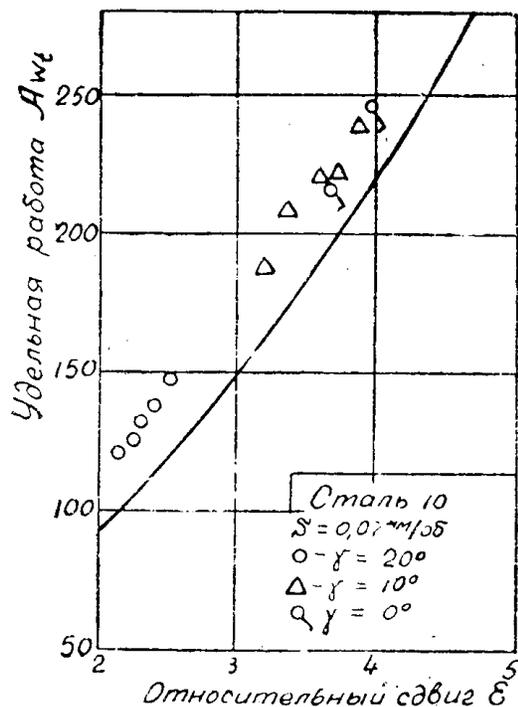
Фиг. 7

более твердых сталей, характеризующихся более значительными удельными работами, опытные точки расположились непосредственно на кривой; для стали 4 они же несколько сдвинуты вниз относительно кривой, для еще более прочных сталей опытные точки отклоняются от кривой вниз еще несколько значительнее. Это и есть, повидимому, проявление влияния температуры в зоне сдвига стружки на механические характеристики металла и на касательное напряжение при резании. Это влияние очень невелико, несмотря на то, что температуры в зоне сдвига могут быть достаточно высокими и достигать 500—700°. Если бы влияние температуры было значительным, мы не могли бы получить близкого расположения результатов, полученных на высоких скоростях относительно кривой, так как эта кривая построена по опытам статического сжатия при комнатной температуре.

Общее влияние температуры на напряжение при резании сталей можно оценить в 10% снижения касательного напряжения, что полностью отвергает представление о скоростном резании, как о резании металла, размягченного температурой в зоне деформации стружки. Незначительность влияния температуры позволяет использовать уравнение (1) для расчета сил резания при высоких скоростях с определением физико-механических характеристик обрабатываемого металла  $\sigma_0$  и  $n$  опытами по статическому сжатию при комнатной температуре. Отклонение опытных точек от теоретической кривой на 4—7% можно считать вполне допустимым для практических расчетов.

Опыты по стали 10 проведены нами с тремя подачами 0,07 мм/об, 0,15 мм/об и 0,29 мм/об. Различные подачи были взяты со специальной целью выявления влияния сил на задней грани на силу  $P_z$ , замеряемую динамометром. Так как по своей природе силы на задней грани не зависят от толщины среза, то есть в данном случае от подачи, то при расположении опытных точек по резанию в графике  $A_{wt} = f(\epsilon)$ , если мы будем для расчета  $A_{wt}$  использовать силу  $P_z$ , замеренную динамометром (без учета сил на задней грани), мы по существу для каждой подачи должны получить свое расположение экспериментальных точек, причем чем меньше подача, тем относительно выше должны расположиться экспериментальные точки при одних и тех же значениях относительного сдвига. То же самое можно сказать и относительно влияния переднего угла. Экспериментальные точки для больших передних углов должны были бы расположиться выше, чем для малых, так как при увеличении переднего угла силы на задней грани, не зависящие от переднего угла, становятся более заметными в сравнении с силами на передней грани, уменьшающимися с увеличением переднего угла.

Фиг. 2 показывает, что при подачах 0,145 и 0,29 мм/об указанного расположения опытных точек заметить нельзя. Это обстоятельство указывает на то, что силы на задней грани настолько малы, что уже при подаче



Фиг. 8

0,15 мм ими можно пренебрегать при расчете силы резания. Конечно, это верно в приложении к острому резу, не изношенному по задней грани, так как с нарастанием износа по задней грани и силы на задней грани будут возрастать по абсолютным своим значениям.

На фиг. 8 представлены результаты опытов по стали 10 с подачами  $S = 0,07 \text{ мм/об}$ . Здесь уже экспериментальные точки расположились значительно выше (на 20—15%) теоретической кривой. Это явилось результатом того, что при очень малой подаче, силы на задней грани стали заметными в сравнении с силами на передней грани, что и создало превышение экспериментальных точек, так как при расчете удельных работ мы

из сил, измеренных динамометром, не исключали силы на задней грани резца.

Все эти опыты показывают, что при подачах больших, чем 0,15 мм/об можно силу резания рассчитывать по уравнению (1), не учитывая сил на задней грани, при меньших же подачах этот расчет будет давать тем более заниженное значение силы резания, чем меньше подача. Это не является недостатком уравнения (1), так как оно по своей физической сущности не может учитывать сил на задней грани, ибо природа сил на передней и задней гранях совершенно различна. Можно рекомендовать для приблизительного учета сил на задней грани при подачах порядка 0,05—0,15 мм/об увеличивать силу, полученную по уравнению (1), на 15—20%.

### Общие выводы

Проведенное исследование показало:

1. Уравнение (1) может применяться для расчета силы резания как при свободном, так и при несвободном резании, как при низких, так и при высоких скоростях резания.

2. При подачах, превышающих 0,15 мм/об, нет практической необходимости учитывать силы на задней грани при расчете главной составляющей силы для острого резца.

3. При расчете силы по уравнению (1) усадку стружки следует рассчитывать с учетом уширения стружки.

$$\zeta = \zeta_1 \cdot \frac{b}{b_1}$$

4. Температура в зоне сдвига оказывает очень незначительное влияние на напряжение в процессе резания металлов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг А. М. и Еремин А. Н. Теоретическое уравнение силы резания. Статья помещена в настоящем сборнике.

---