

УРАВНЕНИЕ СИЛЫ ПРИ РЕЗАНИИ ХРУПКОГО МЕТАЛЛА (чугуна)

А. М. РОЗЕНБЕРГ и Ю. А. РОЗЕНБЕРГ

1. Предварительные соображения

Уравнение силы резания при резании пластичного металла было выведено на основании равенства удельных работ пластической деформации при равенстве деформации [1]. Это положение является следствием четвертой (энергетической) теории прочности. Естественно, что это положение не может быть использовано для вывода уравнения силы при резании хрупкого металла, разрушение которого не сопровождается сколько-нибудь значительными пластическими деформациями.

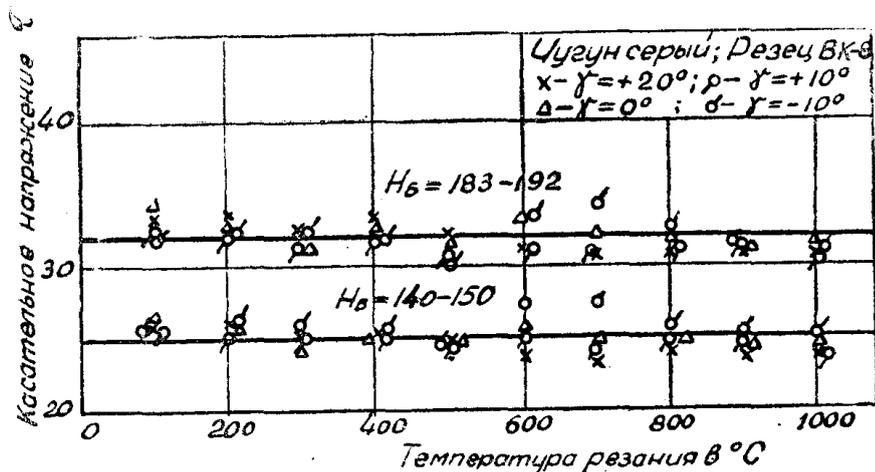
Изучение процесса резания такого хрупкого металла, как серый чугун, показывает, что процесс отделения стружки здесь протекает путем хрупкого сдвига (скола) под определенным для каждого частного случая углом к направлению движения резца. Это позволяет нам предположить, что сила резания будет определяться сопротивлением металла скалыванию (хрупкому сдвигу) в плоскости, где напряжение сдвига является наибольшим.

Кроме этого, в отличие от случая резания пластичного металла, когда напряжение в зоне сдвига являлось функцией степени пластической деформации, а в ряде случаев могло зависеть и от скорости деформации, при резании хрупких металлов напряжение сдвига должно быть постоянным для данного обрабатываемого металла.

Таким образом, в основу вывода уравнения силы при резании хрупкого металла мы положили условие постоянства максимального касательного напряжения и независимость его от геометрии инструмента, размеров срезаемого слоя, скорости резания.

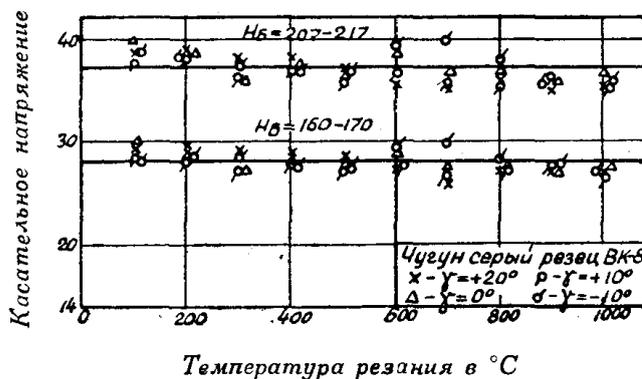
Это условие, положенное в основу вывода, прежде всего, конечно, требовало экспериментальной проверки. Такая проверка была проведена в работе Ю. А. Розенберга [2]. В этой работе при резании серых чугунов различной твердости от $H_B = 140$ до $H_B = 217$ в широком диапазоне изменялись режимы резания: скорость резания от 2 до 550 м/мин, подача от 0,0482 до 0,93 мм/об, глубина резания от 0,5 до 5 мм, передний угол резца от $+20^\circ$ до -10° . В опытах измерялись силы резания, а также путем использования специального микроскопа определялось в процессе резания положение плоскости сдвига, по которой стружка отделялась от обрабатываемого куска металла, то есть плоскости максимальных касательных напряжений. Проведенные опыты позволили определить силы на передней грани резца и рассчитать значения касательных напряжений в плоскости сдвига. В результате большого числа опытов было подтверждено положение о независимости касательного напряжения τ в плоскости сдвига от переднего угла резца, размеров срезаемого слоя и скорости резания для чугуна постоянной твердости. Это положение иллюстрируется фиг. 1 и 2, на которых представлены зависимости касательного напряжения τ от переднего угла γ , твердости чугуна H_B и температуры на передней грани резца, а

значит, и скорости резания. Фиг. 1 и 2 показывают, что, пренебрегая некоторым рассеиванием опытных точек, которое является результатом, с одной стороны, ошибок опытов, с другой стороны, неизбежного колебания твердости чугуна даже в пределах одной болванки, можно говорить о постоянстве касательных напряжений в плоскости сдвига. Кроме того, этими же опытами устанавливается прямая пропорциональность между касательным напряжением и твердостью обрабатываемого чугуна.



Фиг. 1

В этой же работе было показано равенство касательных напряжений при резании и при сжатии в момент разрушения. Процесс сжатия был взят для определения касательных напряжений потому, что при сжатии хрупкого металла обычно разрушение осуществляется путем сдвига, т. е. подобно



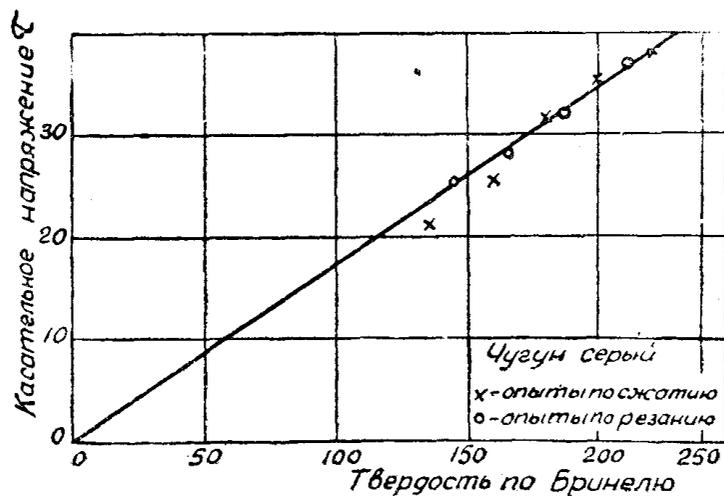
Фиг. 2

тому, как и при резании хрупкого металла, в то время как при растяжении возможно разрушение отрывом. Сжатию подвергались образцы с отношением высоты к диаметру $\frac{h_0}{d_0} = 2$, фиксировалась нагрузка Q в момент возникновения хрупких сдвигов, по этой нагрузке с учетом поперечного сечения f образца в момент разрушения определялось напряжение σ , по которому рассчитывалось касательное напряжение, причем

$$\sigma = \frac{Q}{f},$$

$$\tau = \frac{\sigma}{2}.$$

Сопоставление касательных напряжений при резании и сжатии приведено на фиг. 3, которая указывает на равенство этих напряжений, а также



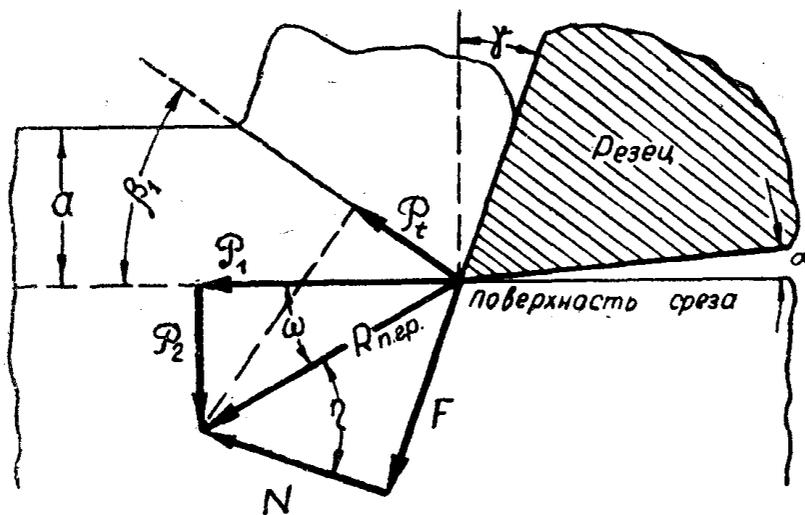
Фиг. 3

на их прямую пропорциональность твердости чугуна. По фиг. 3 связь между τ и H_B может быть выражена зависимостью

$$\tau = 0,174 H_B. \quad (1)$$

2. Вывод уравнения силы резания

Показав действительность наших предпосылок, перейдем к выводу уравнения силы резания, осуществляющей срезание и деформацию стружки, то есть силы, приложенной на передней грани резца.



Фиг. 4

На фиг. 4 представлены силы и углы, характеризующие механику процесса резания. Здесь

- F — сила трения на передней грани,
- N — нормальная сила на передней грани,
- R — равнодействующая всех сил на передней грани,
- P_t — составляющая, производящая хрупкий сдвиг,
- β_1 — угол, определяющий положение плоскости сдвига,

P_1 — главная сила резания,
 η — угол трения стружки по резцу,
 a — толщина срезаемого слоя,
 b — ширина срезаемого слоя.

Во всех случаях резания хрупкого металла для силы, производящей сдвиг, может быть написано следующее выражение

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

С другой стороны,

$$P_t = P_1 \frac{\cos(\omega + \beta_1)}{\cos \omega},$$

отсюда

$$P_1 = \tau ab \frac{\cos \omega}{\sin \beta_1 \cos(\omega + \beta_1)}$$

и так как $\omega = \eta - \gamma$, то

$$P_1 = \tau ab \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\sin \beta_1 \cos(\eta + \beta_1 - \gamma)}. \quad (2)$$

Таким же образом для составляющей P_2 найдем

$$P_2 = \tau ab \frac{\sin(\eta - \gamma)}{\sin \beta_1 \cos(\eta + \beta_1 - \gamma)}. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) показывают, что для определения составляющих P_1 и P_2 при известных τ, a, b, γ нужно знать углы β_1, η . В приложении к вязкому металлу угол β_1 можно было бы определить, измерив усадку стружек. В приложении к хрупкому металлу это невозможно. Непосредственное измерение угла β_1 в процессе резания затруднительно и требует специальной аппаратуры. Поэтому мы подойдем иным путем к определению неизвестных в уравнениях (2) и (3).

Работа Ю. А. Розенберга [2] показала, что угол трения η является функцией температуры на передней грани и переднего угла γ

$$\eta = f(t^\circ, \gamma).$$

С другой стороны, угол β_1 в свою очередь зависит от η и γ . Таким образом, углы η и β_1 зависят от переднего угла γ и температуры на передней грани и при их постоянных значениях не зависят от скорости резания, размеров срезаемого слоя и твердости чугуна. Это доказано большим числом экспериментов, проведенных с широким диапазоном изменения режимов резания. Поэтому имеется возможность выразить тригонометрические множители в уравнениях (2) и (3) некоторыми коэффициентами, которые будут изменяться с изменением температуры на передней грани резца и с изменением переднего угла.

Кроме этого касательное напряжение τ может быть выражено через твердость согласно зависимости (1). Тогда

$$P_1 = 0,174 H_B \cdot abk_1,$$

$$P_2 = 0,174 H_B \cdot abk_2.$$

Вместо толщины и ширины среза можно поставить подачу s и глубину резания t .

$$P_1 = 0,174 H_B \cdot s \cdot t \cdot k_1, \quad (4)$$

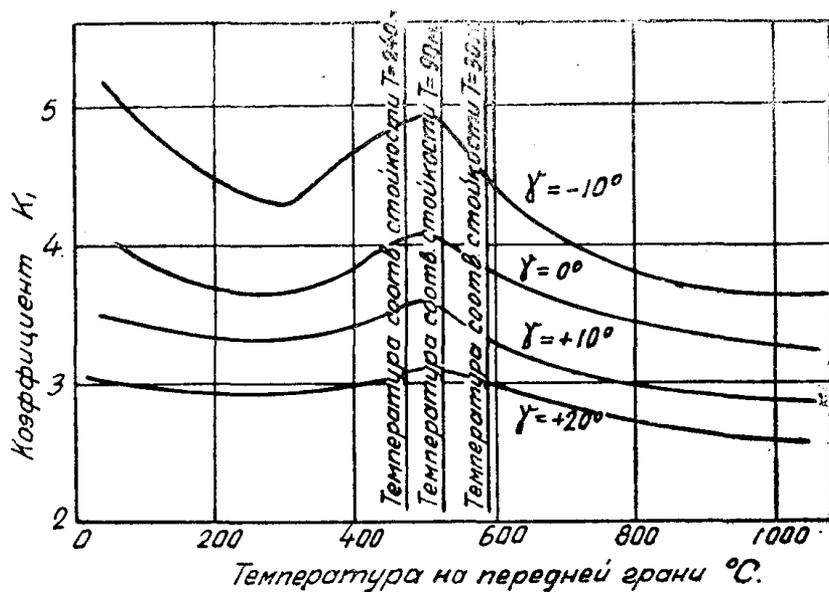
$$P_2 = 0,174 H_B \cdot s \cdot t \cdot k_2. \quad (5)$$

Здесь

$$k_1 = \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\sin \beta_1 \cdot \cos(\eta + \beta_1 - \gamma)},$$

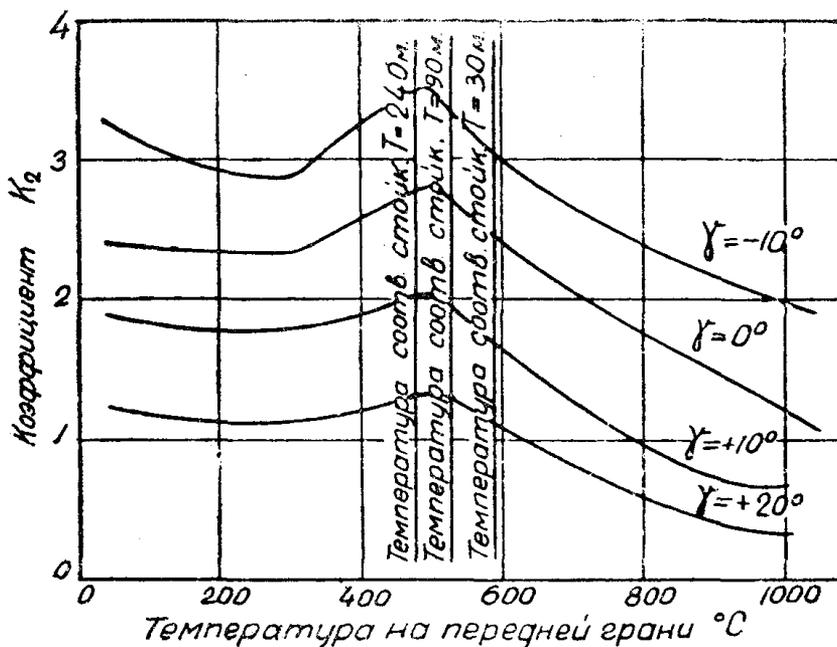
$$k_2 = \frac{\sin(\eta - \gamma)}{\sin \beta_1 \cdot \cos(\eta + \beta_1 - \gamma)}.$$

Для коэффициентов k_1 и k_2 приведены графики на фиг. 5 и 6, построенные по результатам многочисленных экспериментов. Фиг. 5 и 6 показывают, что коэффициенты k_1 и k_2 зависят от температуры на передней грани



Фиг. 5

реза и переднего угла реза и совершенно не зависит от сечения срезаемого слоя и твердости чугуна. Для того, чтобы по фиг. 5 и 6 взять значение k_1 и k_2 , нужно знать температуру на передней грани реза. Температура



Фиг. 6

зависит от скорости резания, переднего угла реза и размеров сечения срезаемого слоя. Но исследования, проведенные Ю. А. Розенбергом, показали, что режимы одинаковых стойкостей при работе сплава ВК-8 по чугуну соответствуют примерно одинаковым температурам, что иллюстрируется табл. 1. В этой таблице режимы одинаковых стойкостей взяты по данным справочника „Режимы скоростного резания“ [Машгиз, 1950 г.], а температуры измерены опытным путем.

Таблица 1

НБ	s мм/об	t мм	T=30 минут		T=90 минут		T=240 минут	
			v м/мин	Температура	v м/мин	Температура	v м/мин	Температура
207—217	0,2	3	79	620	63	560	52	490
”	0,6	3	58	610	47	520	38,5	495
183—192	0,2	3	92	560	74	500	60	460
”	0,6	3	68	580	55	510	45	470
160—170	0,2	3	112	590	90	520	73	470
”	0,6	3	82	595	66	540	54	490
140—150	0,2	3	140	590	112	550	92	505
”	0,6	3	103	620	83	537	68	485
220	0,24	4	60,5	570	49	510	40	450
”	”	3	64	576	51,5	520	42	460
”	”	2	67	580	55	515	45	475
”	”	1	74,5	575	60	510	48,5	460
Средняя температура			—	590	—	525	—	475

На основании этого на фиг. 5 и 6 приведены прямые температур, соответствующих при работе сплавом ВК-8 стойкостям 30, 90 и 240 минут. Таким образом, ориентируясь на желаемую стойкость, можно из фиг. 5 и 6 взять соответствующие значения величин k_1 и k_2 .

Фиг. 5 и 6 показывают, что в пределах стойкостей от 30 до 240 минут значения k_1 и k_2 изменяются очень незначительно, что позволяет взять для них некоторые средние. Эти средние для различных передних углов будут следующие (табл. 2).

Таблица 2

γ	k_{1cp}	k_{2cp}
-10°	4,7	3,25
0°	3,95	2,6
10°	3,45	1,85
20°	3,05	1,2

Если ориентироваться на эти средние значения, то ошибка при расчете сил не будет превышать $\pm 5\%$, но следует представлять, что дальнейшее развитие твердых сплавов и введение в эксплуатацию таких, которые позволят обрабатывать чугун при более высоких, чем это позволяет сплав ВК-8, скоростях резания, а значит и температурах, сдвинет линии постоянных стойкостей в область более высоких температур, что поведет к уменьшению коэффициентов k_1 и k_2 и к снижению сил резания.

Обычно все наиболее употребительные в машиностроении чугуны с твердостью от 140 до 220 единиц обрабатываются твердым сплавом с передним углом $\gamma = 10^\circ$. Исследования, проведенные А. К. Байкаловым [3],

показали, что передний угол $+10^\circ$ при скоростном резании чугунов является оптимальным с точки зрения стойкости инструмента. Для этого оптимального переднего угла мы будем иметь частные значения уравнений для сил резания

$$P_1 = 0,6 H_B st, \quad (6)$$

$$P_2 = 0,322 H_B st. \quad (7)$$

3. Влияние сил на задней грани реза на силы резания

Все приведенные выше уравнения для сил резания как общего вида (2), (3), (4), (5), так и частные (6) и (7) дают возможность рассчитать составляющие сил на передней грани реза.

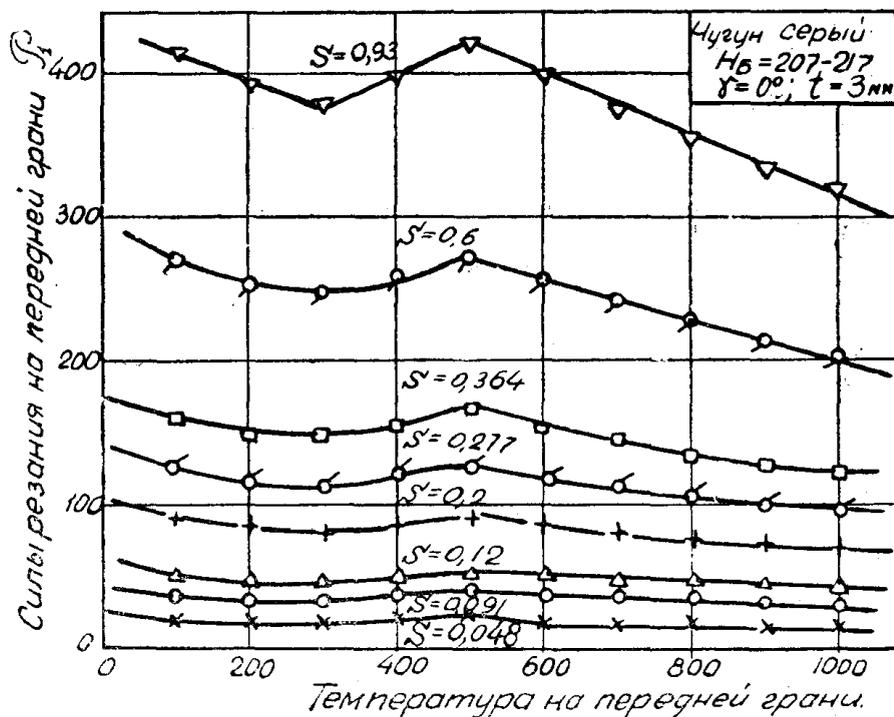
Кроме сил на передней грани, в процессе резания имеют место еще силы на задней грани инструмента, и в практике нас интересуют суммарные силы

$$P_z = P_1 + P_1' \text{ и } R_{xy} = P_2 + P_2',$$

где P_1' и P_2' — силы, приложенные на задней грани реза в направлении соответственно сил P_1 и P_2 , а сила R_{xy} является геометрической суммой составляющих P_x и P_y .

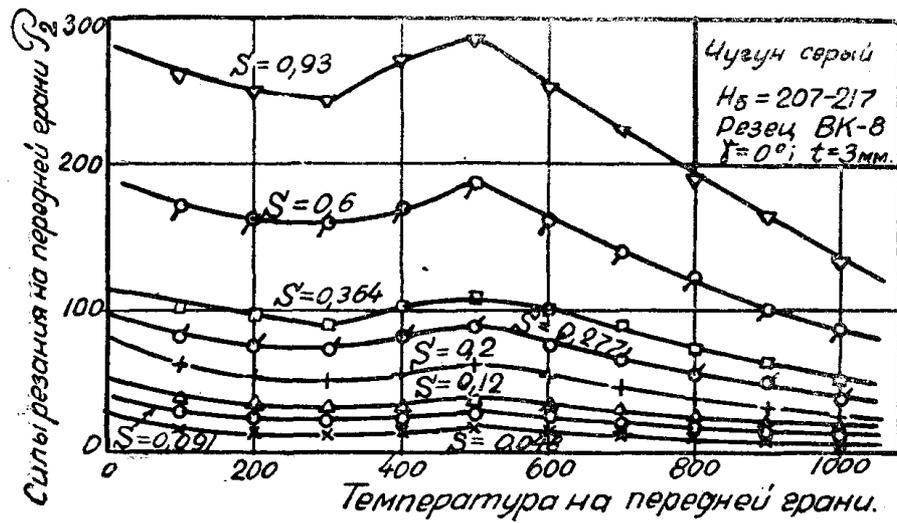
Сила P_2' является нормальной, P_1' — силой трения на том участке задней грани, которая имеет соприкосновение с поверхностью резания.

На остром резае силы на задней грани сравнительно невелики, но если при обработке вязкого металла они совершенно незначительны в сравнении с силами на передней грани и в ряде случаев ими можно пренебрегать,

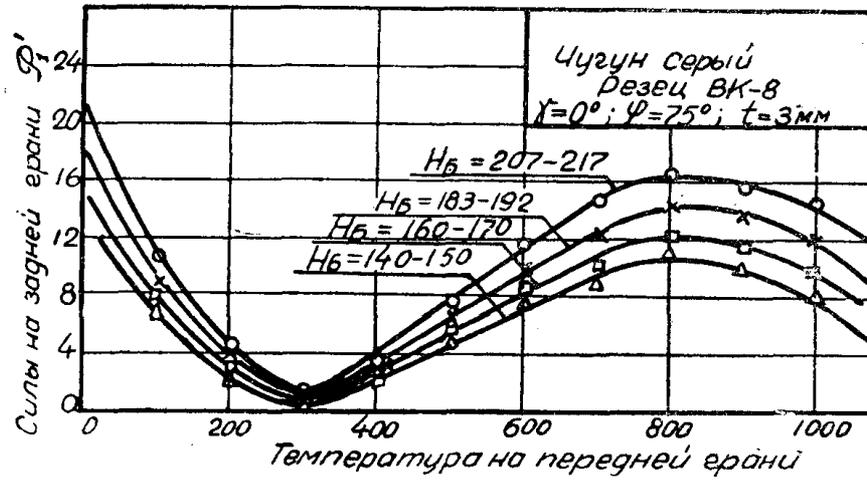


Фиг. 7

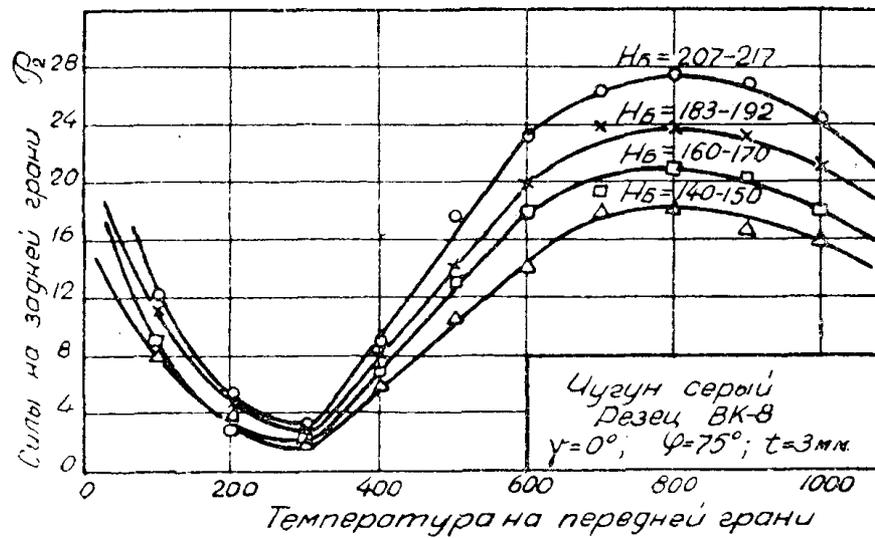
то при резании хрупкого металла и в частности чугуна доля их в общих силах резания довольно значительна. Это следует и из рассмотрения фиг. 7, 8, 9 и 10, на которых представлены экспериментальные закономерности изменения сил на передней и задней гранях для различных подач в зависимости от температуры.



Фиг. 8



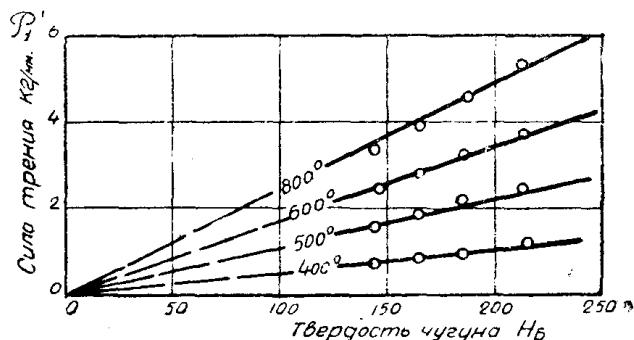
Фиг. 9



Фиг. 10

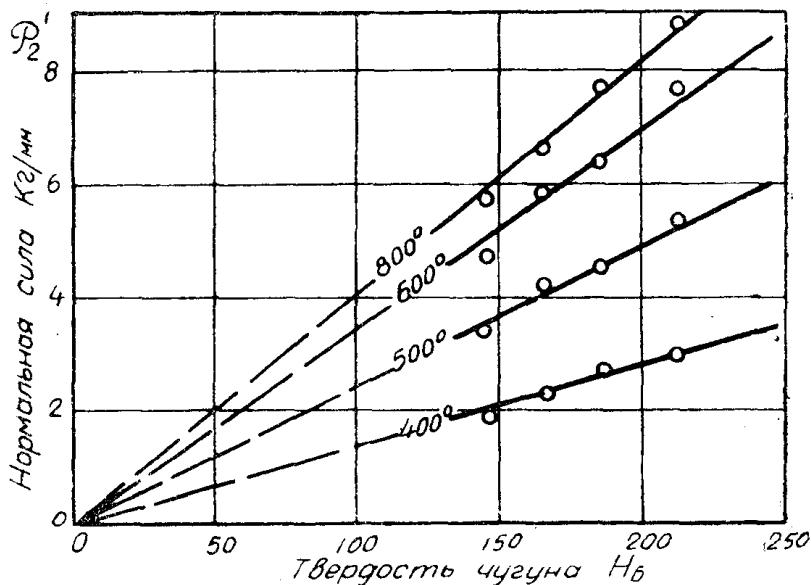
Так же, как и при резании вязких металлов, здесь силы на задней грани не зависят от переднего угла реза и толщины срезаемого слоя и прямо пропорциональны ширине срезаемого слоя и твердости обрабатываемого металла, так как они являются силами упруго-пластического контакта узкой полоски задней грани с поверхностью резания.

Воспользовавшись фиг. 9 и 10, можно представить зависимость сил на задней грани от твердости чугуна при постоянной температуре. Это сделано на фиг. 11 и 12. Здесь силы даны на единицу длины режущей кромки.



Фиг. 11

Фиг. 11^а и 12 показывают, что, несмотря на достаточно сложную закономерность изменения сил на задней грани от температуры, при постоянной температуре силы на задней грани прямо пропорциональны твердости чугуна.



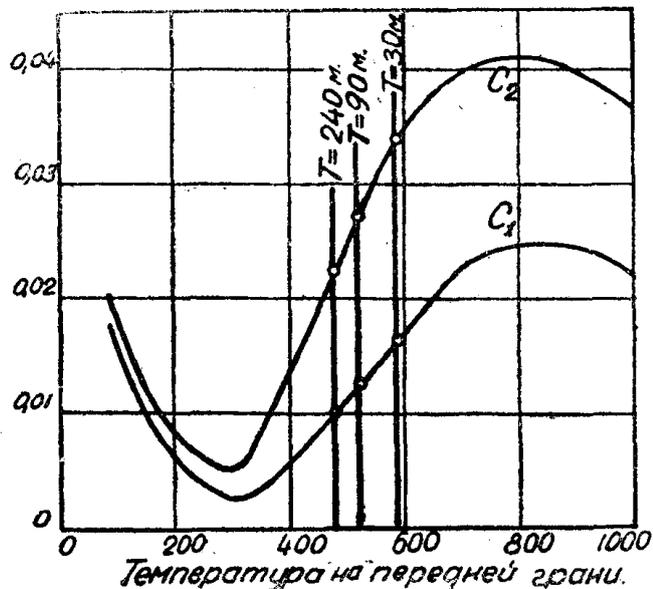
Фиг. 12

Силы на задней грани могут быть выражены следующими закономерностями

$$P_1' = C_1 H_B b = C_1 H_B \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (8)$$

$$P_2' = C_2 H_B b = C_2 H_B \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (9)$$

В этих уравнениях толщина срезаемого слоя отсутствует, так как она не оказывает влияния на силы на задней грани. C_1H_B и C_2H_B — это удельные силы, приходящиеся на 1 мм длины площадки контакта задней грани и поверхности резания. Эти значения, так же как коэффициенты C_1 и C_2 ,



Фиг. 13

зависят от температуры. Значения C_1 и C_2 , полученные из большого количества опытов, проведенных при различных подачах, передних углах, глубинах резания и скоростях резания, даны в табл. 3 и на фиг. 13.

Таблица 3

Температура на передней грани	C_1	C_2
100	0,016	0,018
200	0,0068	0,008
300	0,0024	0,005
400	0,005	0,014
500	0,0113	0,0248
600	0,017	0,035
700	0,0226	0,040
800	0,0245	0,041
900	0,0244	0,040
1000	0,022	0,037

Для ориентировки на режимы скоростного резания на фиг. 13 отмечены линии стойкостей в 30, 90 и 240 минут. Для режимов, соответствующих этим стойкостям, коэффициенты C_1 и C_2 получают следующие значения (табл. 4)

Таблица 4

Стойкость	C_1	C_2
30 минут	0,0165	0,0337
90 "	0,0125	0,0270
240 "	0,0100	0,0223

Как показывают фиг. 9 и 10 и табл. 3, силы на задней грани с изменением температуры (т. е. скорости резания) претерпевают значительные изменения. Если же обратиться к режимам скоростного резания в пределах стойкостей от 30 до 240 минут, то здесь изменения будут очень незначительные. Поэтому для режимов скоростного резания можно принять некоторые средние значения коэффициентов:

$$C_1 = 0,014 \text{ и } C_2 = 0,027.$$

4. Уравнения общих сил резания

Силы резания P_z , расположенные в направлении скорости резания, R_{xy} — в направлении, перпендикулярном к поверхности резания, являются суммой сил, расположенных на передней и задней гранях реза

$$P_z = P_1 + P'_1,$$

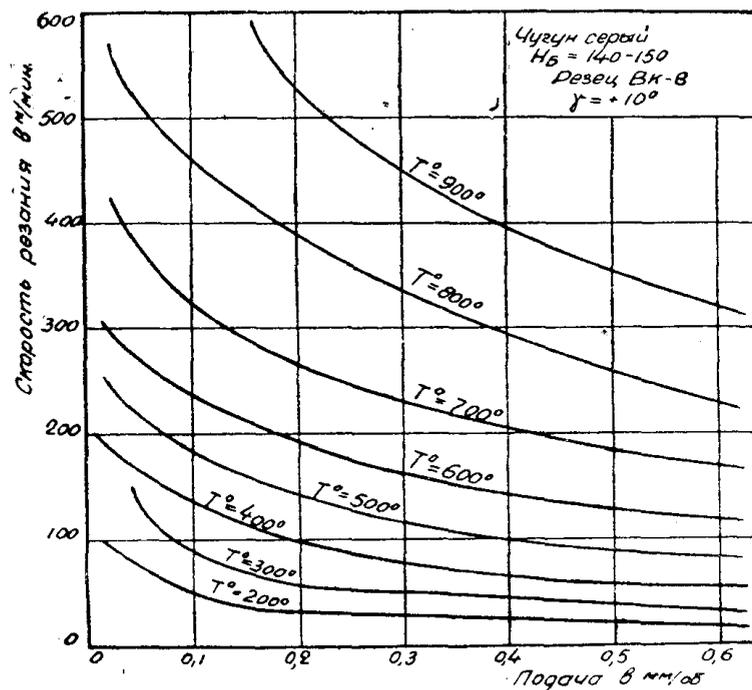
$$R_{xy} = P_2 + P'_2,$$

поэтому при резании серого чугуна

$$P_z = 0,174 H_B s t k_1 + C_1 H_B \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (10)$$

$$R_{xy} = 0,174 H_B s t k_2 + C_2 H_B \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (11)$$

Здесь k_1, k_2 являются функцией переднего угла и температуры, c_1, c_2 — функцией температуры. Чтобы иметь возможность от режима резания (v, s, t, γ) перейти к температуре, нами даны графики, по которым можно

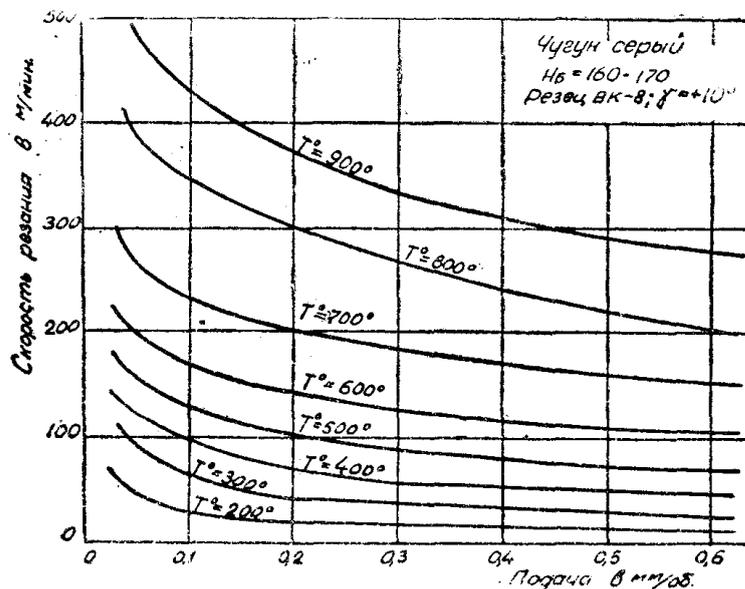


Фиг. 14

определить температуру на передней грани (фиг. 14—17). Графики эти даны для переднего угла 10° , как оптимального.

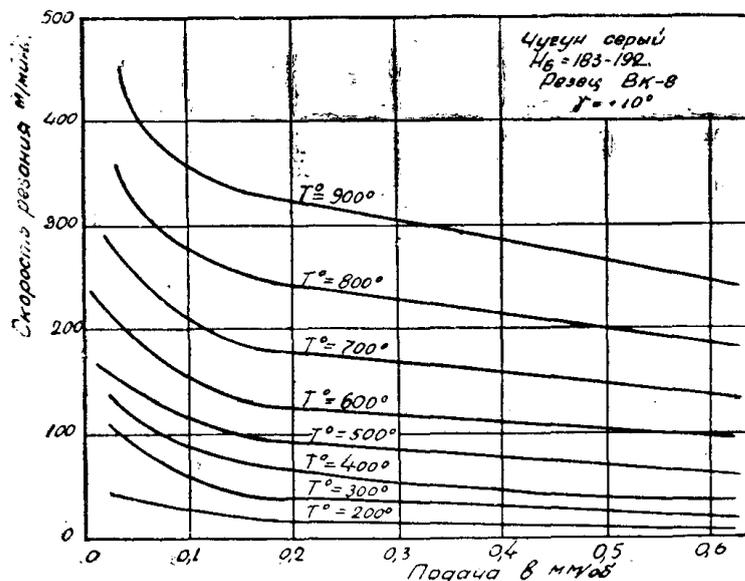
В уравнениях (10) и (11) первые слагаемые в правой части имеют строгий физический смысл и выведены из условия постоянства касательного

напряжения в плоскости сдвига. Вторые слагаемые выведены чисто экспериментальным путем, так как физические основы для расчета сил на задней грани до сего времени недостаточно ясны. Следует отметить, что экспериментально полученные зависимости для сил на задней грани в некоторой



Фиг. 15

степени могут быть физически объяснены и обоснованы. Так, например, вполне логичным является отсутствие зависимости сил на задней грани от переднего угла резца и от толщины срезаемого слоя, так как эти силы не принимают участия в процессе отделения и деформации срезаемого слоя.



Фиг. 16

Если уравнения (10) и (11) переписать для случая применения режимов скоростного резания чугуна с оптимальным передним углом $\gamma = 10^\circ$, то они примут вид

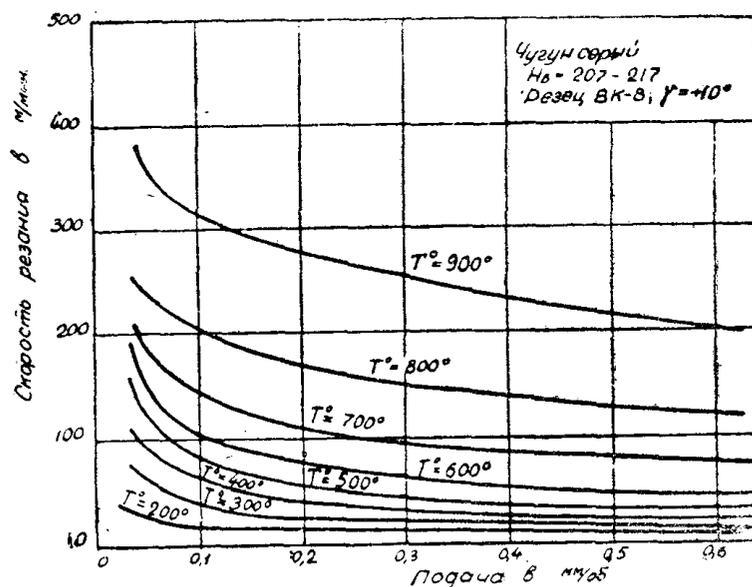
$$P_z = 0,6 H_B s t + 0,014 H_B \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (12)$$

$$R_{xy} = 0,322 H_{Bst} + 0,027 H_B \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (13)$$

В приложении к этим частным зависимостям не представляет затруднения оценить сравнительную величину сил на задней грани и решить вопрос, начиная с каких подач можно пренебречь их величиной. Соотношение сил на задней и передней грани выразится следующим образом.

$$\frac{P_1'}{P_1} = \frac{0,0234}{s \cdot \sin \varphi} = \frac{0,0234}{a},$$

$$\frac{P_2'}{P_2} = \frac{0,084}{s \cdot \sin \varphi} = \frac{0,084}{a}.$$



Фиг. 17

С увеличением подачи доля сил на задней грани уменьшается, а с уменьшением угла в плане φ увеличивается.

Если поставить условие точности расчета сил в пределах 10%, то при угле в плане $\varphi \geq 45^\circ$ можно силами на задней грани пренебречь при расчете силы P_z при подачах, превышающих $s = 0,33$ мм/об, при расчете силы R_{xy} при подачах, превышающих $s = 1,2$ мм/об. В этих случаях можно пользоваться лишь первым слагаемым в уравнениях (12) и (13).

5. Составляющие P_x и P_y при резании серого чугуна

При процессе свободного резания составляющие P_x в направлении движения подачи и P_y в направлении радиуса обрабатываемого изделия могут быть получены как

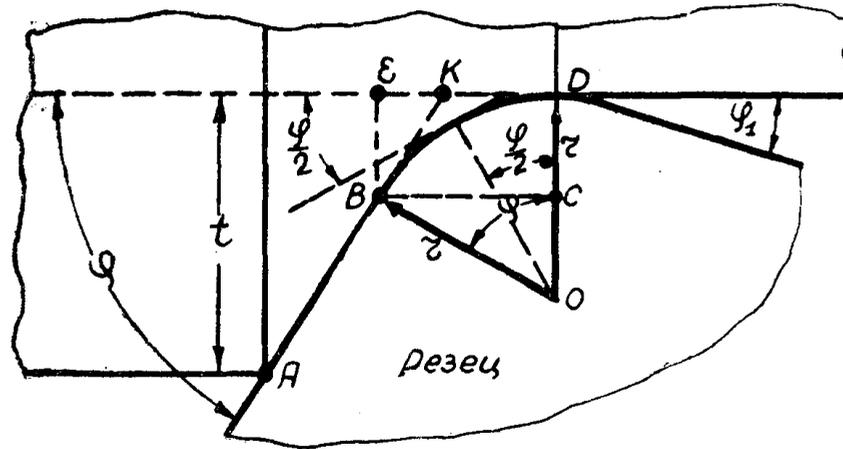
$$P_x = R_{xy} \cdot \sin \varphi,$$

$$P_y = R_{xy} \cdot \cos \varphi.$$

При процессе несвободного резания эти зависимости не дают правильных результатов, так как в этом случае составляющая R_{xy} не расположена точно в плоскости нормальной к главной режущей кромке, а отклоняется от нее ввиду влияния несвободного схода стружки и ввиду наличия радиуса закругления носика резца, имеющего переменный угол в плане.

Можно предложить следующий приближенный метод для учета указанных особенностей несвободного процесса резания.

Наличие радиуса закругления у носика резца создает у него переменный угол в плане, в результате чего действительное среднее значение угла в плане, определяющее положение составляющей R_{xy} оказывается меньше номинального угла в плане φ .



Фиг. 18

Из фиг. 18 можно видеть, что режущую кромку резца можно разбить на два участка: участок AB —прямолинейный и наклоненный к направлению подачи под углом в плане φ и участок BD —криволинейный, средний угол в плане которого можно принять за $\frac{\varphi}{2}$. Отсюда

$$\varphi_{cp} = \frac{AB \varphi + BD \frac{\varphi}{2}}{AB + BD};$$

$$AB = AK - BK; AK = \frac{t}{\sin \varphi};$$

$$BK = \frac{BE}{\sin \varphi}; BE = CD = OD - OC = r(1 - \cos \varphi),$$

где r —радиус закругления.

Тогда

$$AB = \frac{t - r(1 - \cos \varphi)}{\sin \varphi},$$

$$\varphi_{cp} = \frac{BD = r \varphi, \left(\frac{t}{r} + \cos \varphi - 1 \right) \frac{1}{\sin \varphi} + \frac{\varphi}{2}}{\frac{t}{r} + \cos \varphi - 1 \over \varphi \sin \varphi} + 1. \quad (14)$$

Как следует из уравнения (14), среднее значение угла в плане зависит от отношения $\frac{t}{r}$ и чем меньше это отношение, тем меньше φ_{cp} при данном φ .

Поэтому

$$\frac{v_{AB}}{v_{BC}} = \frac{\sin(\varphi_{cp} + \varphi_1 - \psi)}{\sin \psi} = \frac{2t}{s \cdot \sin \varphi_{cp}}$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin(\varphi_{cp} + \varphi_1)}{\frac{2t}{s \sin \varphi_{cp}} + \cos(\varphi_{cp} + \varphi_1)} \quad (15)$$

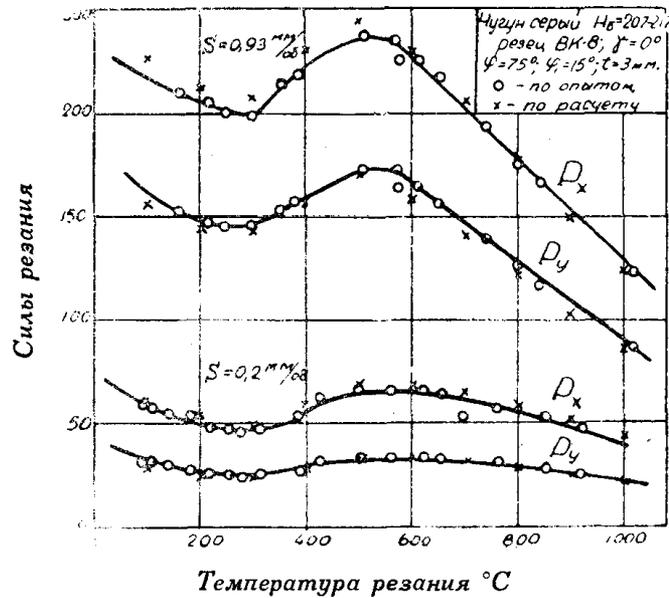
Определив по уравнениям (14) и (15) углы φ_{cp} и ψ и зная величину R_{xy} , можно определить составляющие P_x и P_y по зависимостям

$$P_x = R_{xy} \cdot \cos(\psi + 90^\circ - \varphi_{cp}) = R_{xy} \cdot \sin(\varphi_{cp} - \psi) \quad (16)$$

$$P_y = R_{xy} \cdot \sin(\psi + 90^\circ - \varphi_{cp}) = R_{xy} \cdot \cos(\varphi_{cp} - \psi) \quad (17)$$

Естественно, что уравнения (16) и (17) дают приближенное вычисление сил P_x и P_y , так как нами при выводах не учтено влияние ряда дополнительных условий: влияния сил, возникающих на вспомогательной режущей кромке, переменность переднего угла и толщины стружки на закругленной части режущей кромки и т. д.

Несмотря на это, уравнения (16) и (17) дают хорошее совпадение с результатом непосредственного измерения сил P_x и P_y .



Фиг. 20

На фиг. 20 даны для двух отношений $\frac{t}{s}$ как экспериментальные, так и расчетные значения сил, причем разница между ними не превосходит 5%, что можно считать вполне допустимым.

6. Влияние затупления реза на силы резания

Затупление твердосплавных резцов при скоростном резании чугуна протекает в основном путем износа задней грани с постепенным уширением фаски износа. Передняя грань почти не претерпевает изменения, поэтому при затуплении силы резания растут в основном за счет сил на задней грани, растущих с увеличением фаски износа. Именно по этим причинам по мере затупления составляющие P_x и P_y возрастают значительно, чем P_z ,

так как в составляющих P_x и P_y имеется большая доля сил на задней грани, чем в составляющей P_z . По этим же причинам при резании с малыми подачами силы с затуплением растут относительно значительнее, чем при резании с большими подачами. Мы не приводим здесь результатов исследований по влиянию затупления на силы резания, так как эти результаты очень многообразны. Опыты показывают, что увеличение сил резания с возрастанием износа резца по задней грани зависит от величины износа, от переднего угла резца, от величины подачи, от скорости резания. Не представляется возможным в настоящее время дать достаточно простые закономерности, при помощи которых можно было бы учесть влияние всех перечисленных факторов на возрастание сил резания при износе и затуплении резца. Поэтому можно лишь указать, что при оптимальном износе по задней грани с шириной фаски износа в 1 мм составляющая P_z возрастает на 15—30%, причем тем больше, чем меньше подача, составляющие P_x и P_y возрастают на 20—100% и опять-таки тем больше, чем меньше подача. При меньших значениях фаски износа имеет место пропорционально меньшее возрастание сил резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг А. М. и Еремин А. Н. Теоретическое уравнение силы резания. Статья помещена в настоящем сборнике.
 2. Розенберг Ю. А. Исследование процесса резания серого чугуна. Автореферат диссертации. Томск, 1952.
 3. Байкалов А. К. Оптимальная геометрия резцов при скоростном точении серого чугуна. Автореферат диссертации. Томск, 1953.
-