

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Л. М. СЕДОКОВ

(Представлено профессором доктором А. М. Розенбергом)

На величину сил, возникающих в процессе резания металлов, влияет большое число факторов, так или иначе изменяющих условия протекания этого сложного явления. В результате ряда теоретических и экспериментальных работ установлено, что в конечном счете различные условия процесса резания влияют на величину сил двояко: а) через изменение угла сдвигов и коэффициента трения на передней грани резца; б) через изменение величины касательных напряжений в плоскости сдвигов.

Уравнение для определения главной составляющей силы резания в общем виде может быть записано так:

$$P_1 = \tau k_1 ab. \quad (1)$$

Здесь

τ — касательные напряжения в плоскости сдвигов;

k_1 — безразмерный коэффициент;

a — толщина среза;

b — ширина среза.

Анализируя теоретические уравнения для определения силы резания, предложенные И. А. Тиме, К. А. Зворыкиным, А. Бриксом, Т. Н. Лоладзе, А. М. Розенбергом, Н. Н. Зоревым и другими, можно заметить, что авторы дают различные выражения зависимости для определения величины касательных напряжений и коэффициента k_1 .

Поскольку величину касательных напряжений можно рассчитать по физико-механическим характеристикам обрабатываемого металла с учетом его упрочняемости в процессе происходящей при резании пластической деформации, целесообразно подробно рассмотреть безразмерную величину k_1 , которая численно равна удельной силе резания при условии, если касательные напряжения в плоскости сдвигов равны единице.

Назовем эту основную безразмерную характеристику динамики процесса резания металлов коэффициентом резания. На основании схемы сил, действующих на передней грани резца, представленной на фиг. 1,

$$P_1 = \tau \frac{ab}{\sin \beta_1};$$

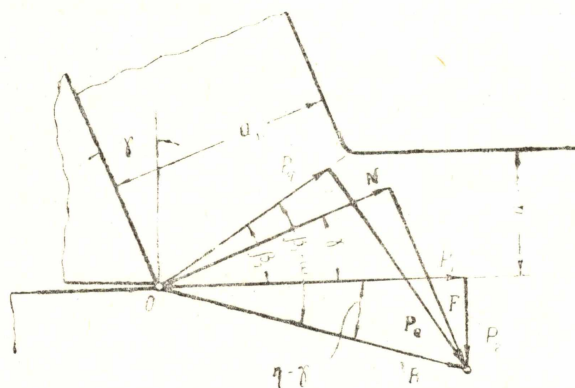
$$P_1 = \tau \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\sin \beta_1 \cos(\beta_1 + \eta - \gamma)} \cdot ab;$$

$$k_1 = \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\sin \beta_1 \cos(\beta_1 + \eta - \gamma)} = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 + \eta - \gamma). \quad (2)$$

Таким образом, коэффициент резания k_1 является функцией геометрии инструмента (γ), условий трения на передней грани ($\mu = \operatorname{tg} \eta$) и степени происходящей пластической деформации, определяемой через усадку стружки и угол сдвигов β_1 .

Исследуя полученные динамические зависимости, Н. Н. Зорев [1], А. М. Розенберг и Л. А. Хворостухин [2, 3] получили одинаковые экспериментальные связи между коэффициентом трения, усадкой стружки и передним углом резца [4].

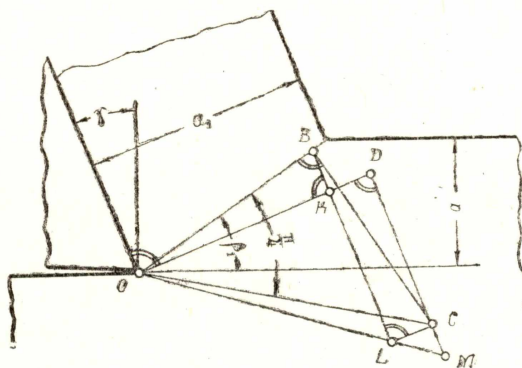
Прямая связь между углом сдвигов и коэффициентом трения при постоянном переднем угле резца, на наш взгляд, свидетельствует о наличии прямой связи между силой резания и деформацией металла в процессе резания. Поэтому мы поставили перед собой задачу найти аналитическое выражение связи коэффициента резания k_1 со степенью пластической деформации, происходящей при снятии стружки.



Фиг. 1. Схема сил, действующих на передней грани режущего инструмента.

Определение направления равнодействующей силы

Ниже предлагается графический метод определения направления равнодействующей силы по известному направлению плоскости сдвигов. Проведем из точки O (фиг. 2) линию под углом 45° к плоскости



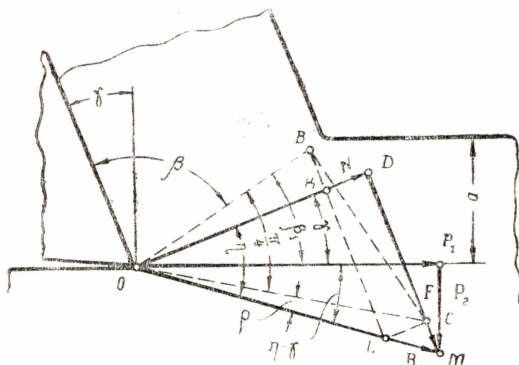
Фиг. 2. Схема процесса стружкообразования и графическое определение направления равнодействующей силы по известному направлению плоскости сдвигов.

сдвигов. Из произвольной точки B , лежащей в плоскости сдвигов OB , проведем нормаль к этой плоскости, которая даст пересечение с ранее проведенной линией в точке C . Если теперь из точки C провести нормаль к передней грани, а из точки B параллель к ней, то мы получим их точку пересечения L , а линия OL по нашему предположению должна совпадать с направлением равнодействующей силы.

Понятно, что такое построение является формальным, но оно позволяет получить аналитическую связь всех безразмерных характеристик динамики процесса резания металлов, а проведенная проверка по экспериментальным материалам в широком диапазоне изменения условий резания дала вполне удовлетворительные результаты.

Аналитическая связь безразмерных характеристик динамики процесса резания

На фиг. 3 приведена схема сил, действующих на передней грани резца, построенная по предлагаемому методу. Из этой схемы можно легко получить связь между коэффициентом трения на передней грани, углом сдвигов и передним углом резца



$$\mu = 1 - \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma), \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{1 - \mu + \operatorname{tg} \gamma}{1 - \operatorname{tg} \gamma + \mu \operatorname{tg} \gamma}. \quad (4)$$

Согласно построению

$$\beta_1 + \eta - \gamma = \frac{\pi}{4} + \rho. \quad (5)$$

Фиг. 3. Связь между плоскостью сдвигов и направлением сил, действующих на передней грани режущего элемента.

Следовательно, дополнительный к $\frac{\pi}{4}$ угол ρ может быть выражен так:

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) - \operatorname{tg}^2(\beta_1 - \gamma)}{2 - \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) + \operatorname{tg}^2(\beta_1 - \gamma)} \quad (6)$$

или

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\mu - \mu^2}{2 - \mu + \mu^2}.$$

Полученные зависимости означают, что при любой комбинации параметров резания, но при постоянстве коэффициента трения на передней грани сумма углов $(\beta_1 + \eta - \gamma)$ и все безразмерные характеристики динамики процесса резания металлов остаются постоянными. Угол трения и угол ρ являются функциями только разности углов β_1 и γ . Их величина будет одной и той же для любых значений β_1 и γ , если разница между ними останется неизменной. Поэтому разность $(\beta_1 - \gamma)$ следует считать одной из основных характеристик процесса стружкообразования. Можно ввести понятие о коэффициенте действия, который связан с углом действия по Тиме (см. фиг. 3) и указанной разностью углов:

$$\lambda = \operatorname{ctg} \beta = \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma). \quad (7)$$

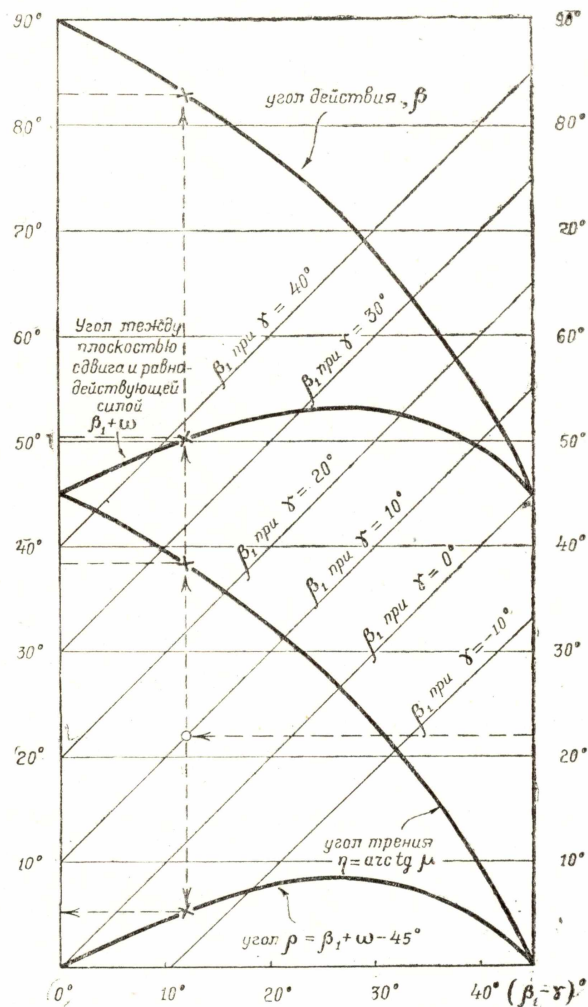
На фиг. 4 показана связь между углами, характеризующими процесс стружкообразования.

На основании схемы сил (фиг. 1)

$$P_2 = \tau \kappa_2 ab.$$

$$N = \tau \kappa_N ab$$

$$F = \tau \kappa_F ab.$$



Фиг. 4. Связь между углами, характеризующими процесс стружкообразования.

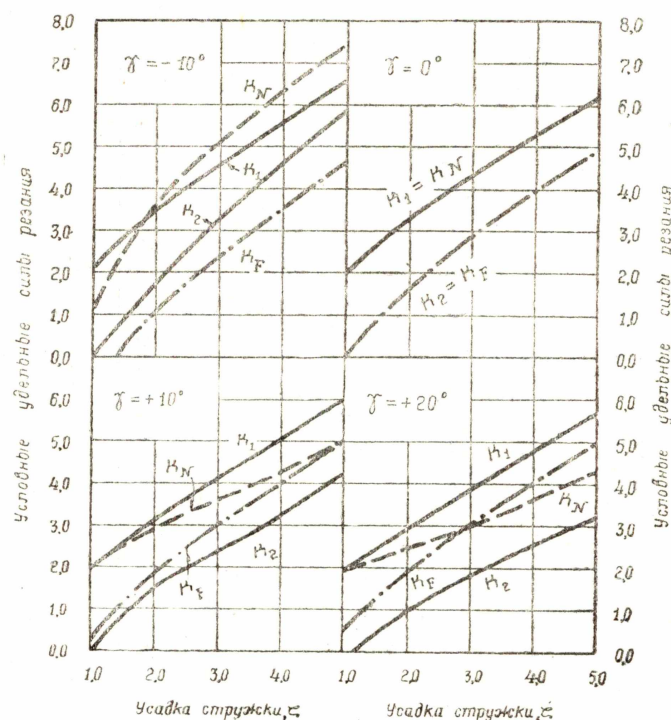
Значения безразмерных характеристик κ_2 , κ_N и κ_F , учитывая также (2), (3) и (5), могут быть аналитически связаны только с углами β_1 и γ :

$$\kappa_2 = \left[\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \rho \right) \right] \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \rho - \beta_1 \right), \quad (8)$$

$$\kappa_N = \kappa_1 \frac{\cos \left(\frac{\pi}{4} + \rho - \beta_1 + \gamma \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{4} + \rho - \beta_1 \right)}. \quad (9)$$

$$K_F = K_1 \frac{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \rho - \beta_1 + \gamma \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{4} + \rho - \beta_1 \right)}. \quad (10)$$

На фиг. 5 приведены графики зависимости указанных характеристик от усадки стружки.



Фиг. 5. Зависимость коэффициентов K_1 , K_2 , K_N , K_F от усадки стружки.

Проверка полученных зависимостей по экспериментальным материалам

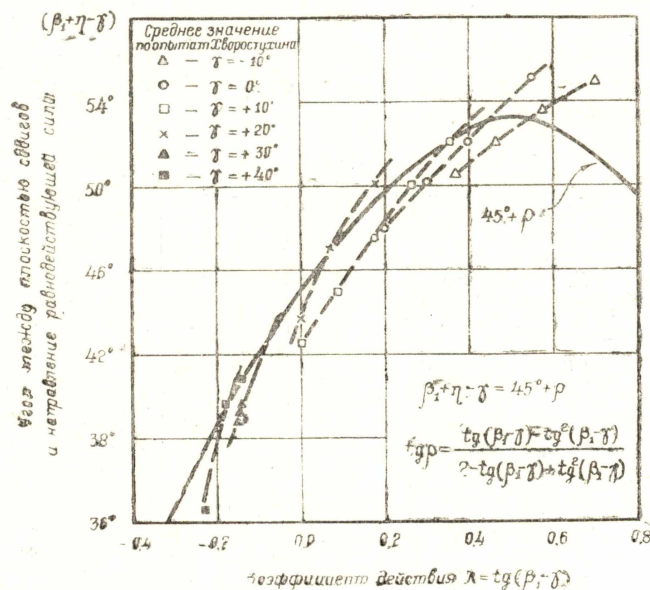
Полученные аналитические выражения, связывающие между собой различные безразмерные характеристики динамики процесса резания металлов, требуют тщательной и всесторонней экспериментальной проверки, в результате которой надлежит установить, какова разница между фактическими и расчетными значениями указанных величин и каковы пределы практического применения полученных зависимостей.

Зависимость для коэффициента трения (3) проверена по материалам ряда исследователей [3, 4, 5, 8, 9, 10 и 11] в широком диапазоне изменения почти всех условий резания. Результаты проверки показали, что уравнение (3) удовлетворительно описывает зависимость между коэффициентом трения на передней грани, углом сдвигов и передним углом режущего элемента [14]. Эта зависимость пригодна и для случая пластического сжатия, когда $\gamma = 0$, угол сдвигов 45° , коэффициент трения на торцах образца будет равен нулю. При наличии трения на торцах угол сдвигов можно определить по уравнению (4).

Более или менее значительный разброс экспериментальных точек объясняется, на наш взгляд, возможными ошибками в эксперименталь-

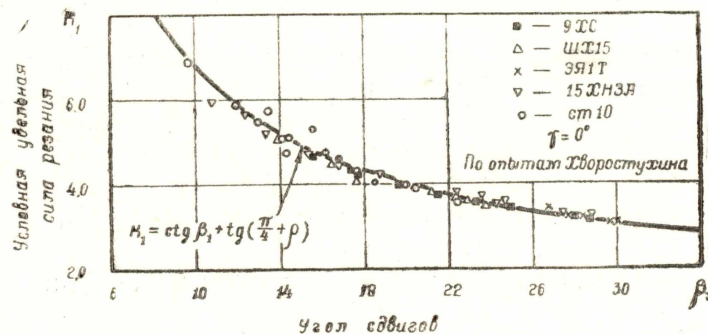
ном определении среднего значения коэффициента трения на передней грани режущего элемента по трем экспериментальным значениям составляющих силы резания, когда имеющиеся ошибки опыта могут накладываться.

Большое значение в динамике процесса резания имеет зависимость (5). Выявлению связи входящих в нее углов посвящены многие работы [1, 5, 6, 7]. Предложено несколько формул, но ни одна из них не дает удовлетворительного совпадения с экспериментальными результатами в широком диапазоне изменения параметров процесса резания [7]. На фиг. 6 приведено сопоставление зависимости (5) со



Фиг. 6. Расчетное и среднее фактическое значение угла между направлением равнодействующей силы и плоскостью сдвигов по опытам Л. А. Хворостухина [8].

средними значениями угла между плоскостью сдвигов и направлением равнодействующей силы по опытам Л. А. Хворостухина [3] для передних углов в диапазоне от -10 до $+40^\circ$ при обработке ряда сталей, меди и алюминия. Из приведенного графика видно удовлетвори-



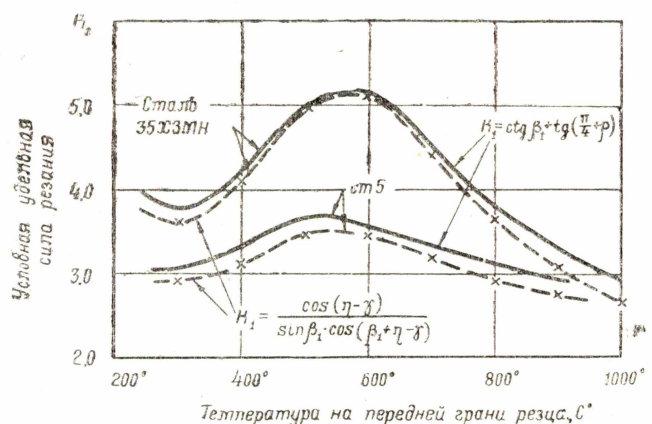
Фиг. 7. Расчетные и фактические значения условной удельной силы резания по опытам Л. А. Хворостухина [8], $\lambda = 0^\circ$.

тельное совпадение расчетных и фактических значений для всех случаев в изменения коэффициента действия от $-0,25$ до $+0,7$.

Зависимость для коэффициента резания κ_1 , который может быть назван условной удельной силой резания, (2) с учетом (5) и (6) так же подробно проверена по материалам ряда исследований, проведенных в различное время и с различными целями. На фиг. 7 приведено сопоставление расчетных и фактических значений коэффициента резания κ_1 по опытам Л. А. Хворостухина [3] при обработке пяти сталей.

В случае, если имеется экспериментальная зависимость сил резания и усадки стружки от температуры резания, можно сравнить расчетную и фактическую связь коэффициента резания κ_1 и температуры резания. Такое сравнение по материалам Н. Н. Зорева [1] приведено на фиг. 8.

Приведенные материалы доказывают надежность полученных зависимостей для расчета коэффициента резания. Разница между расчетными и фактическими значениями этой характеристики динамики



Фиг. 8. Расчетная и экспериментальная зависимость условной удельной силы резания от температуры резания по опытам Н. Н. Зорева (сталь 5 и 35ХЗМН) [6].

процесса резания не превышает 5—8%, то есть полностью укладывается в пределы возможных ошибок опытов.

Здесь также важно отметить, что стали, отнесенные Н. Н. Зоревым [5] к различным группам по влиянию на коэффициент трения, дали хорошее совпадение с едиными расчетными значениями (см. фиг. 8).

Результаты проведенной проверки полученных динамических зависимостей, материалы которой в настоящей статье приводятся только частично ввиду ограничения размеров статьи, показывают, что во всем многообразии условий резания не найдено каких-либо границ практического применения этих зависимостей, за исключением микроскоростей, которые применяются только в лабораторных условиях.

Коэффициент резания и относительный сдвиг

Как было показано выше, коэффициент резания достаточно точно определяется по формуле

$$\kappa_1 = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \rho \right).$$

Этот коэффициент можно рассматривать как удельную работу резания при условии, что касательные напряжения в плоскости сдвигов всегда равны единице. Учитывая исследования А. М. Розенберга и А. Н. Еремина [4], можно эту условную удельную работу резания представить состоящей из двух частей: а) условной удельной работы пластической деформации (κ_ε) и б) условной удельной работы трения (κ_μ)

$$\kappa_1 = \kappa_\varepsilon + \kappa_\mu$$

$$\kappa_\varepsilon + \kappa_\mu = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \rho \right).$$

Как показали А. М. Розенберг и А. Н. Еремин [4], удельная работа пластической деформации при резании

$$A_{wp} = \tau \varepsilon = \tau [\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma)].$$

Следовательно,

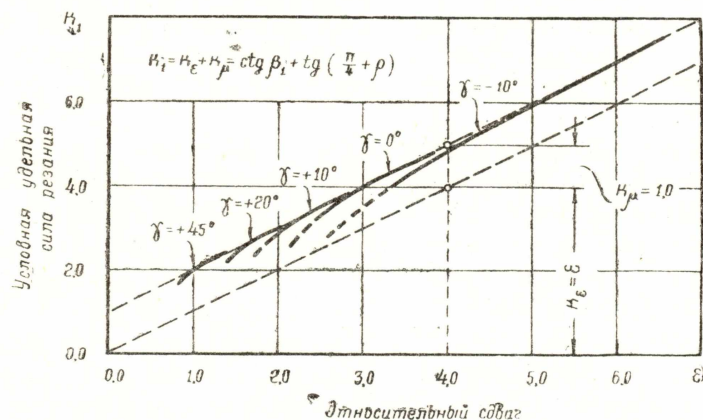
$$\kappa_\varepsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma) = \varepsilon. \quad (11)$$

Тогда условная удельная работа трения может быть определена по зависимости

$$\kappa_\mu = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \rho \right) - \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma). \quad (12)$$

Это выражение можно также получить на основании кинематического анализа образования сливной стружки [12].

На фиг. 9 представлена зависимость κ_1 , κ_ε и κ_μ от величины относительного сдвига. Оказалось, что коэффициент κ_μ стремится к еди-



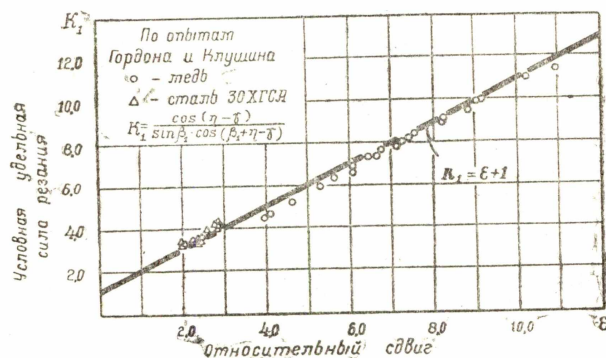
Фиг. 9. Зависимость коэффициентов κ_1 , κ_ε и κ_μ от величины относительного сдвига.

нице. Последующая проверка по экспериментальным материалам также показала, что значение относительного сдвига для данного переднего угла резца практически не встречается меньше такой величины, которая соответствует значительному снижению κ_μ .

Следовательно, условная удельная работа трения на передней грани резца почти всегда равна единице. Тогда можем записать

$$\kappa_1 = \kappa_\varepsilon + \kappa_\mu = \varepsilon + 1. \quad (13)$$

Поскольку выражение (13) является упрощением ранее полученных зависимостей для коэффициента резания, оно было дополнительно подробно проверено по материалам исследователей и получило весьма удовлетворительное подтверждение [13]. На фиг. 10 приведены в качестве примера результаты проверки указанной зависимости по материалам Гордона и Клушина [11]. Зависимость (13) хорошо совпадает с результатами опытов для всех режимов резания, дающих изменение относительного сдвига от 2,0 до 11,0.



Фиг. 10. Расчетные $K_1 = (\epsilon + 1)$ и фактические значения условной удельной силы резания по опытам М. Б. Гордона и М. И. Клушина [16].

На основании вышеизложенного нами рекомендуется следующее уравнение для расчета главной составляющей силы резания

$$P_1 = \tau(\epsilon + 1)ab. \quad (14)$$

Закключение

В настоящей работе получены аналитические выражения для основных безразмерных характеристик динамики процесса резания, которые вполне удовлетворительно подтверждаются многочисленными экспериментами, проведенными в широком диапазоне изменения условий резания.

В результате анализа взаимосвязи этих характеристик получена единая для любых условий резания зависимость коэффициента резания от степени пластической деформации (13) и новое, весьма простое уравнение для определения главной составляющей силы резания (14). Согласно этому уравнению сила резания зависит от сопротивления обрабатываемого металла пластической деформации (через величину касательных напряжений в плоскости сдвигов при данной степени пластической деформации металла, превращаемого в стружку); степени пластической деформации (величины относительного сдвига); объема снимаемого слоя металла при прохождении резцом пути, равного единице.

Если нам известна усадка стружки и передний угол режущего элемента, а следовательно, степень пластической деформации (ϵ) и угол сдвигов β_1 , то на основании полученных в настоящей работе зависимостей можно рассчитать:

1. Среднюю величину коэффициента трения на передней грани по уравнению (3) или по графикам на фиг. 4.
2. Угол между плоскостью сдвигов и направлением равнодействующей силы по зависимостям (5) и (6) или по графикам на фиг. 4 и 6.
3. Угол между направлением скорости резания и направлением

равнодействующей силы по зависимости (5) и (6) и графикам на фиг. 4 и 6.

4. Коэффициент резания k_1 , входящий в уравнение для определения силы резания в общем виде (1), по зависимостям (2) и (13) или по графикам на фиг. 5 и 9.

5. Коэффициент k_2 , входящий в уравнение для определения горизонтальной составляющей силы резания, по зависимости (8) или по графику на фиг. 5.

6. Коэффициент k_N , входящий в уравнение для определения нормальной силы на передней грани режущего элемента, по зависимости (9) или по графику на фиг. 5.

7. Коэффициент k_F , входящий в уравнение для определения силы трения на передней грани, по зависимости (10) или по графику на фиг. 5.

Рассчитав величину касательных напряжений в плоскости сдвигов по физико-механическим характеристикам обрабатываемого металла, зная поперечное сечение среза и соответствующие безразмерные характеристики динамики процесса резания, можно достаточно надежно рассчитать величину сил, действующих на передней грани режущего элемента, а именно:

- а) главную составляющую силы резания— P_1 ;
- б) горизонтальную составляющую силы резания— P_2 ;
- в) нормальную силу— N ;
- г) силу трения— F ;
- д) силу, действующую в плоскости сдвигов— P_τ ;
- е) силу, действующую нормально к плоскости сдвигов— P_n и
- ж) равнодействующую силу R .

ЛИТЕРАТУРА

1. Зорев Н. Н. Исследование элементов механики процесса резания, Машгиз 1952.
2. Розенберг А. М. и Хворостухин Л. А. Уравнение силы резания при скоростном точении стали „Вестник машиностроения“, № 1, 1954.
3. Хворостухин Л. А. Расчет сил при скоростном резании на основе физико-механических характеристик металлов, Автореферат диссертации, Томск, 1953.
4. Розенберг А. М., Еремин А. Н. Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
5. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
6. Merchant M. E., Mechanics of the Metal Cutting Process, „Journal of Applied Physics“, № 6, vol. 16, 1945.
7. Shaw M. C., Cook N. H. and Finnie J., The Shear—Angle Relationship in Metal Cutting, Transactions of the ASME, vol. 75, № 2, 1953.
8. Зимин Ю. П. Исследование процесса скоростного резания сталей, Автореферат диссертации, Томск, 1948.
9. Обухов П. Н. Исследование процесса силового резания сталей. Автореферат диссертации, Томск, 1955.
10. Еремин А. Н. Физическая сущность явлений при резании сталей, Машгиз, 1951.
11. Клушин М. И. Резание металлов, Машгиз, 1953.
12. Седоков Л. М. Кинематический анализ процесса образования сливной стружки. Известия Томского политехнического института, том 85, 1957.
13. Седоков Л. М. Уравнение для расчета силы резания, Томск, 1956.
14. Седоков Л. М. О расчете коэффициента трения при резании металлов „Станки и инструмент“, № 2, 1958.