

Расчет и исследование параметров силовой напряженности процессов механической обработки материалов

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Кленов О.С.**, канд. техн. наук
Харьковский национальный экономический университет (Украина)

Произведен упрощенный расчет и анализ параметров силовой напряженности процесса резания материалов с учетом закономерностей стружкообразования при резании

Введение. Повышение эффективности механической обработки деталей машин является одним из основных направлений развития современного машиностроения и создания конкурентоспособной продукции. Для его реализации важно располагать фундаментальными знаниями о потенциальных возможностях процессов механической обработки и путях их практического использования [1–3]. Вместе с тем, в настоящее время теория обработки материалов резанием в полной мере математически не формализована, что не позволяет решить ряд сложных задач по оптимизации параметров процессов резания материалов в плане повышения их производительности, снижения энергоемкости и улучшения качества обработки. В связи с этим, представляется важным и актуальным обоснование технологических возможностей обработки материалов резанием лезвийными и абразивными инструментами на основе теоретического анализа закономерностей осуществления процесса стружкообразования при резании.

Цель работы – определение условий снижения силовой напряженности процесса резания.

Основные результаты исследований. Рассмотрим расчетную схему параметров стружкообразования при резания (рис. 1) первоначально для нулевого переднего угла режущего инструмента. Как известно, при резании материала с толщиной среза a образование стружки происходит в результате периодических сдвигов элементов обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига OA , расположенной под определенным углом β к направлению движения инструмента. Угол β называется условным углом сдвига материала и определяется из условия достижения в плоскости сдвига наибольшего касательного напряжения τ :

$$\tau = \frac{P \cdot \cos(\beta + \psi)}{a \cdot b} \cdot \sin \beta, \quad (1)$$

где P – равнодействующая силы резания, Н; ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ($\operatorname{tg} \psi = f$ – коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов); a , b – толщина и ширина среза, м.

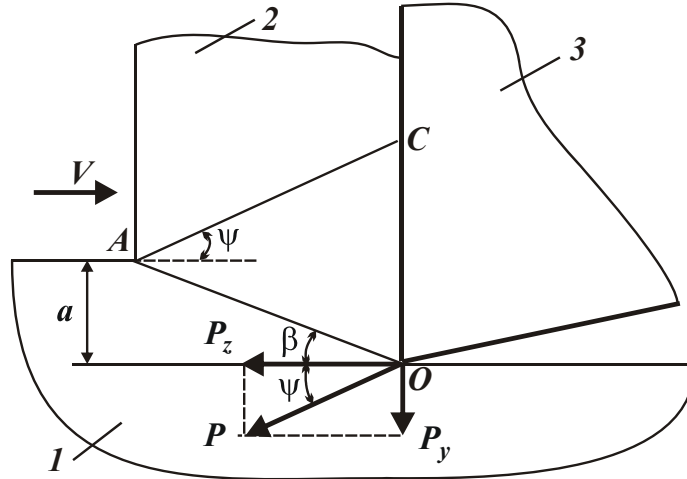


Рис. 1. Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующаяся стружка; 3 – режущий инструмент.

Подчиняя зависимость (1) необходимому условию экстремума от угла β , т.е. $\tau'_{\beta} = 0$, определим экстремальное значение угла β :

$$\beta = 45^{\circ} - \frac{\psi}{2}. \quad (2)$$

При $\psi = 0$ условный угол сдвига материала $\beta = 45^{\circ}$, что соответствует напряженному состоянию прямолинейного образца при его одноосном сжатии силой P . С увеличением условного угла трения ψ угол сдвига материала β уменьшается и принимает значения меньше 45° . Подставляя зависимость (2) в (1) и принимая касательное напряжение τ равным пределу прочности на сдвиг обрабатываемого материала $\tau_{сдв}$, определим равнодействующую силы резания P , а также тангенциальную P_z и радиальную $P_y = f \cdot P_z$ составляющие силы резания:

$$P = \frac{a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{\sin^2 \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{(1 - \sin \psi)}, \quad (3)$$

$$P_z = P \cdot \cos \psi = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)}; \quad (4)$$

$$P_y = P \cdot \sin \psi = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin \psi}{(1 - \sin \psi)}. \quad (5)$$

Как видно, равнодействующая силы резания P тем меньше, чем меньше параметры a , v , $\tau_{сдв}$ и ψ (или больше условный угол сдвига материала β). Такой же закономерности подчиняются и составляющие силы резания P_z и P_y . При этом $P_z > P_y$, т.к. коэффициент резания

$$K_{рез} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg} \psi} > 1. \quad (6)$$

Используя зависимость (4), можно определить условное напряжение резания $\sigma = P_z / (a \cdot v)$:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)}. \quad (7)$$

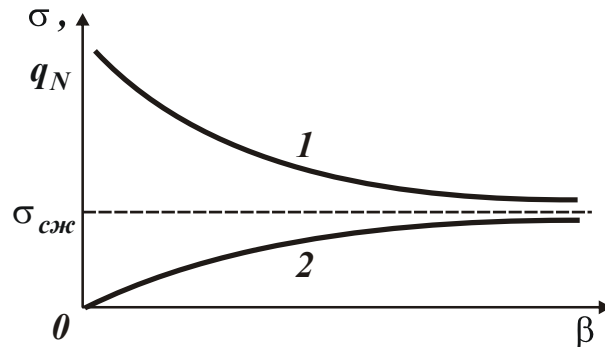


Рис. 2. Зависимости условного напряжения резания σ (1) и нормального контактного напряжения q_N (2), возникающего на передней поверхности инструмента, от условного угла сдвига материала β .

Графически зависимость (7) представлена на рис. 2. С увеличением условного угла сдвига материала β условное напряжение резания σ непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к значению $\sigma_{сж} \approx 2\tau_{сдв}$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м². Следовательно, в пределе (при $\sigma \rightarrow \sigma_{сж}$) напряженное состояние процесса резания соответствует напряженному состоянию и условию разрушения прямолинейного образца при его одноосном сжатии.

Как следует из рис. 2, условное напряжение резания σ всегда больше предела прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$. С физической точки зрения данное условие невыполнимо, т.к. $\sigma_{сж}$ – это наибольшее напряжение рассматриваемого материала и поэтому условное напряжение резания σ не может превышать $\sigma_{сж}$. В связи с этим возникает вопрос, что собой представляет условное напряжение резания σ , в чем его физическая сущность. Данное напряжение и названо условным, поскольку в реальной действительности оно не существует. Превышение σ над $\sigma_{сж}$ означает то, что оно должно действовать на большей площади, чем площадь поперечного сечения среза $a \cdot v$. Очевидно, на площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента, которая, как правило, в несколько раз превышает площадь поперечного сечения среза $a \cdot v$. Поэтому определим истинные напряжения, действующие на передней поверхности инструмента. Для этого на рис. 1 проведем линию АС, параллельную направлению равнодействующей силы резания P и очерчивающую, по физической сути, границу контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента. Исходя из такого представления процесса стружкообразования при резании, длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента l равна длине отрезка ОС. Определим длину l на основе теоремы синусов для косоугольного треугольника ОАС:

$$\frac{OC}{\sin \angle A} = \frac{OA}{\sin \angle C}, \quad (8)$$

где $OA = \frac{a}{\sin \beta}$; $\angle A = \beta + \psi = 45^\circ + \frac{\psi}{2}$;

$$\angle C = 180^\circ - \angle A - \angle O = 180^\circ - \left(45^\circ + \frac{\psi}{2}\right) - (90^\circ - \beta) = 90^\circ - \psi.$$

После преобразований зависимости (8), имеем:

$$l = a \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\psi}{2}\right)}{\cos \psi}. \quad (9)$$

Таблица 1

Расчетные значения l/a

ψ , град	0	10	20	30	40	50	60
β , град	45	40	35	30	25	20	15
l/a	1	1,21	1,52	2,0	2,8	4,3	7,4

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (9) значения l/a для различных значений условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ψ и соответственно условного угла сдвига материала β . Как видно, отношение l/a может изменяться в пределах от 1 до 7,4 при изменении условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ψ от 0 до 60° , т.е. в диапазоне реальных значений. Чем больше угол ψ , тем больше длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента l . Полученные теоретические результаты согласуются с известными экспериментальными данными [4].

Зная параметр l , не сложно определить нормальное контактное напряжение q_N , возникающее на передней поверхности инструмента:

$$q_N = \sigma \cdot \frac{a}{l} \approx \sigma_{сж} \cdot \cos \psi = \sigma_{сж} \cdot \sin 2\beta . \quad (10)$$

Из зависимости (10) следует, что нормальное контактное напряжение q_N меньше предела прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$. Для сравнения на рис. 2 показан характер изменения параметров q_N и σ в зависимости от угла β . Как видно, параметры q_N и σ с увеличением угла β асимптотически приближаются к значению $\sigma_{сж}$. При этом условное напряжение резания σ принимает значения больше $\sigma_{сж}$, а нормальное контактное напряжение q_N , наоборот, меньше $\sigma_{сж}$.

Кроме нормального контактного напряжения q_N , на передней поверхности инструмента действует касательное контактное напряжение q_τ , определяемое отношением радиальной составляющей силы резания P_y к площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента. Исходя из рис. 1, оно может быть выражено через нормальное контактное напряжение q_N :

$$q_\tau = q_N \cdot \operatorname{tg} \psi = \sigma_{сж} \cdot \sin \psi . \quad (11)$$

Очевидно, $q_\tau < q_N$, т.к. $\operatorname{tg} \psi < 1$. Равнодействующая контактного напряжения q , возникающего на передней поверхности инструмента, равна

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж} . \quad (12)$$

Следовательно, на передней поверхности инструмента действует равномерно распределенная нагрузка с плотностью, равной преде-

лу прочности на сжатие обрабатываемого материала, т.е.
 $q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж}$.

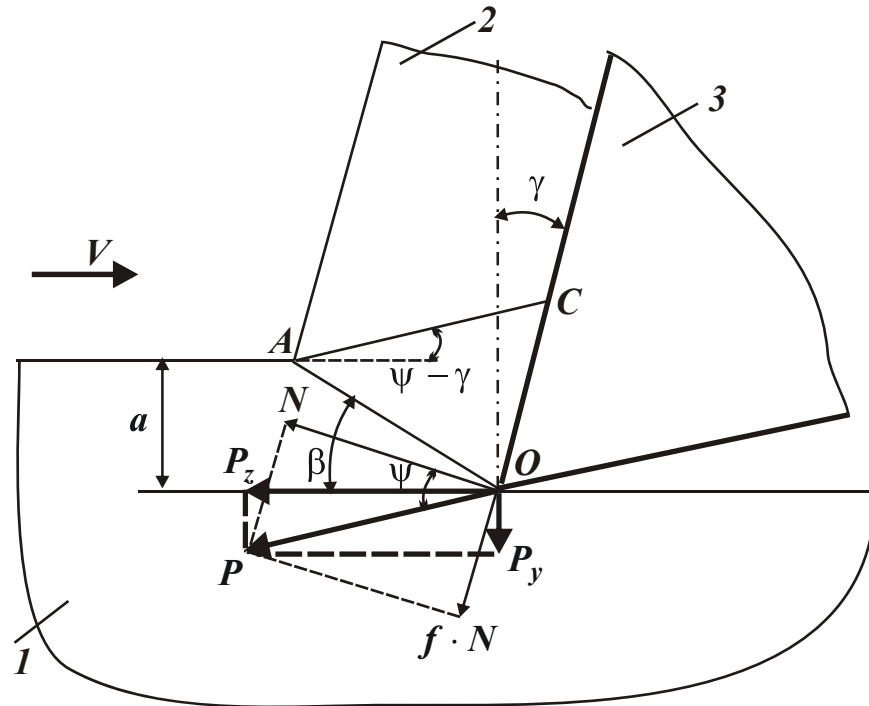


Рис. 3. Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующаяся стружка; 3 – режущий инструмент.

Полученные выше теоретические решения справедливы при резании инструментом с передним углом γ , равным нулю. В связи с этим важно получить более общее решение, охватывающее весь возможный диапазон изменения переднего угла инструмента, т.е. $\gamma < 0$, $\gamma = 0$ и $\gamma > 0$. Для этого рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 3, справедливую для случая $\gamma > 0$. Нетрудно видеть, что в этом случае роль угла ψ выполняет угол $(\psi - \gamma)$. Для отрицательного переднего угла инструмента вместо угла ψ необходимо рассматривать угол $(\psi + \gamma)$. Исходя из этого, для положительного переднего угла инструмента γ во все вышеприведенные зависимости вместо угла ψ необходимо подставить угол $(\psi - \gamma)$. Тогда зависимости (2)–(7) примут вид:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}; \quad (13)$$

$$P = \frac{a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\sin^2 \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (14)$$

$$P_z = P \cdot \cos(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{cd\theta}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{cd\theta}}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right)}; \quad (15)$$

$$P_y = P \cdot \sin(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{cd\theta} \cdot \sin(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (16)$$

$$K_{рез} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\psi - \gamma)}; \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{cd\theta}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot \tau_{cd\theta}}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right)}. \quad (18)$$

Полученная зависимость (13) для определения условного угла сдвига материала β совпадает с известной зависимостью проф. Зворыкина К.А. [5], установленной еще в 1870 году аналитически несколько иным методом. Как следует из зависимости (13), с увеличением положительного переднего угла инструмента γ условный угол сдвига материала β увеличивается, что приводит к уменьшению силы резания. Этим показано, что увеличение переднего угла инструмента γ как бы нивелирует отрицательное влияние условного угла трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ψ на силовую напряженность процесса резания. Зависимость (13) представим в виде $(\psi - \gamma) = 90^\circ - 2\beta$, тогда $\operatorname{tg}(\psi - \gamma) = \operatorname{ctg} 2\beta$ и с учетом зависимости (17), получим:

$$K_{рез} = \operatorname{tg} 2\beta. \quad (19)$$

Следовательно, коэффициент резания $K_{рез}$ вполне однозначно определяется условным углом сдвига материала β : чем он больше, тем больше $K_{рез}$ и выше эффективность процесса резания.

Выразим условное напряжение резания σ , определяемое зависимостью (18), через коэффициент резания $K_{рез}$. Для этого в зависимости (18) преобразуем функцию $\operatorname{tg} x = \operatorname{tg} \left[45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right]$ на основе тригонометрического соотношения:

$$\operatorname{tg} 2x = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} x}{1 - \operatorname{tg}^2 x}. \quad (20)$$

Разрешая данное соотношение относительно tgx , приходим к квадратному уравнению:

$$tg^2 x + \frac{2}{tg 2x} \cdot tgx - 1 = 0. \quad (21)$$

Его решение:

$$tgx = -\frac{1}{tg 2x} \pm \sqrt{\frac{1}{tg^2 2x} + 1}. \quad (22)$$

Принимая в зависимости (22) знак “+”, окончательно получим

$$tgx = \frac{tg 2x}{\sqrt{1 + tg^2 2x} + 1}. \quad (23)$$

Рассматривая $x = 45^0 - \frac{(\psi - \gamma)}{2}$ с учетом зависимости (23), имеем

$$tg 2x = tg \left[90^0 - (\psi - \gamma) \right] = ctg(\psi - \gamma) = K_{рез}; \quad (24)$$

$$tgx = tg \left[45^0 - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right] = \frac{tg 2x}{\sqrt{1 + tg^2 2x} + 1} = \frac{K_{рез}}{\sqrt{1 + K_{рез}^2} + 1}. \quad (25)$$

Подставляя зависимость (25) в (18), окончательно получим зависимость для определения условного напряжения резания

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2} \right). \quad (26)$$

Как видно, коэффициент резания $K_{рез}$ неоднозначно влияет на условное напряжение резания σ . При значениях $K_{рез} < 1$ подкоренное выражение можно принять приблизительно равным единице, тогда зависимость (26) упростится и примет вид:

$$\sigma = \frac{4 \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}}. \quad (27)$$

В этом случае коэффициент резания $K_{рез}$ оказывает однозначное влияние на σ : чем больше $K_{рез}$, тем меньше σ и тем выше эффективность процесса резания. В случае $K_{рез} > 1$ условное напряжение резания σ с увеличением $K_{рез}$ также будет уменьшаться, однако, с меньшей интенсивностью, чем в случае $K_{рез} < 1$. При $K_{рез} \gg 1$ выражение, входящее в скобки зависимости (18), станет приблизительно равным $K_{рез}$. Тогда зависимость (18) упростится и примет вид:

$$\sigma = 2\tau_{сдв} \approx \sigma_{сж} . \quad (28)$$

Следовательно, в этом случае условное напряжение резания σ принимает значение, близкое к значению предела прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{сж}$, и в принципе процесс стружкообразования при резании подчиняется закономерностям деформирования прямолинейного образца при его растяжении. В случае $\gamma < 0$ в зависимости (2)–(7) необходимо подставить вместо угла ψ угол $(\psi + \gamma)$:

$$\beta = 45^{\circ} - \frac{(\psi + \gamma)}{2}; \quad (29)$$

$$P = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}; \quad (30)$$

$$P_z = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^{\circ} - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}; \quad (31)$$

$$P_y = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin(\psi + \gamma)}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}; \quad (32)$$

$$K_{рез} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\psi + \gamma)}; \quad (33)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^{\circ} - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}. \quad (34)$$

Как видно, с увеличением отрицательного переднего угла γ условный угол сдвига материала β , составляющие силы резания P_z и P_y , равнодействующая силы резания P и условное напряжение резания σ увеличиваются, т.е. процесс резания протекает с более высокой силовой напряженностью, чем в случае $\gamma > 0$. Коэффициент резания $K_{рез} = P_z/P_y$ в этом случае может быть как больше, так и меньше единицы. Известно, например, что при абразивной обработке, характеризующейся отрицательными передними углами режущих кромок инструмента, коэффициент резания $K_{рез} = P_z/P_y$ меньше единицы, а при лезвийной обработке, осуществляемой инструментами с положительными передними углами, больше единицы.

Определим длину контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента l для случая $\gamma > 0$ на основе рис. 3. Аналогично рис. 1 (для случая $\gamma = 0$), длина l равна отрезку ОС. Отрезок

АС должен быть параллельным равнодействующей силы резания P . Для расчета длины l рассмотрим косоугольный треугольник ОАС и воспользуемся теоремой синусов:

$$\frac{OC}{\sin \angle A} = \frac{OA}{\sin \angle C}, \quad (35)$$

где $OA = \frac{a}{\sin \beta}$; $\angle A = \beta + (\psi - \gamma) = 45^\circ + \frac{(\psi - \gamma)}{2}$;

$$\angle C = 180^\circ - \angle A - \angle O = 180^\circ - [\beta + (\psi - \gamma)] - [(90^\circ - \beta) + \gamma] = 90^\circ - \psi.$$

После преобразований зависимости (35), имеем:

$$l = a \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right)}{\cos \psi}. \quad (36)$$

Из зависимости (36) следует, что с увеличением переднего угла инструмента γ длина контакта образующей стружки с передней поверхностью инструмента l уменьшается.

Определим нормальное q_N и касательное q_τ контактные напряжения, возникающие на передней поверхности инструмента. Для этого необходимо знать нормальную составляющую силы резания N (рис. 3), действующую на передней поверхности инструмента. Между составляющими силы резания P_z, N и $f \cdot N$ существует связь:

$$P_z = N \cdot \cos \gamma + f \cdot N \cdot \sin \gamma, \quad (37)$$

откуда
$$N = \frac{P_z}{\cos \gamma + f \cdot \sin \gamma}. \quad (38)$$

Тогда нормальное контактное напряжение $q_N = N / v \cdot l$, возникающее на передней поверхности инструмента, с учетом соотношения $\operatorname{tg} \psi = f$ примет вид:

$$q_N = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos^2 \psi}{\cos(\psi - \gamma)}. \quad (39)$$

Соответственно касательное контактное напряжение $q_\tau = q_N \cdot \operatorname{tg} \psi$ опишется зависимостью:

$$q_N = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos \psi \cdot \sin \psi}{\cos(\psi - \gamma)}. \quad (40)$$

Равнодействующая контактного напряжения q , возникающего на передней поверхности инструмента, равна

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos \psi}{\cos(\psi - \gamma)} = \frac{\sigma_{сж}}{\cos \gamma + f \cdot \sin \gamma}. \quad (41)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные по зависимости (41) значения $q/\sigma_{сж}$ для случая $\psi = 30^\circ$.

Таблица 2

Расчетные значения $q/\sigma_{сж}$

γ , град	0	10	20	30
$q/\sigma_{сж}$	1	0,92	0,88	0,87

Из табл. 2 следует, что с увеличением переднего угла инструмента γ отношение $q/\sigma_{сж}$ уменьшается, однако несущественно, т.е. фактически на передней поверхности инструмента действует равномерно распределенная нагрузка с плотностью, приблизительно равной пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала, т.е. тогда $q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж}$.

Выводы. В работе на основе предложенной упрощенной расчетной схемы стружкообразования при резании получены аналитические зависимости основных параметров силовой напряженности процесса резания. Это позволило теоретически обосновать основные направления снижения силовой напряженности процесса резания и соответственно повышения точности, качества и производительности обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
3. Зорев Н.Н. Вопросы механики процессов резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.
4. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.