

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СТРУЖКОЛОМА ТОКАРНОГО РЕЗЦА

В. А. ЗЕМЛЯНСКИЙ

Для устойчивого дробления стружки на резцах со стружколомами необходимо, чтобы геометрические параметры последних назначались в соответствии с режимами резания, геометрией резцов, механическими свойствами обрабатываемых материалов и т. д. Существующие рекомендации представляют собой частные зависимости, полученные эмпирической обработкой опытных данных и в силу своего частного характера не могут удовлетворять запросам производства.

Ниже кратко излагаются положения, на основании которых разработана методика расчета стружколомов и приведены материалы экспериментальной и заводской проверки рекомендаций.

При обработке металлов резанием срезаемый металл претерпевает значительные пластические формоизменения, в результате которых он упрочняется. От соотношения между величинами деформаций и пластических возможностей обрабатываемого материала в зоне резания зависит форма образующейся стружки и ее механические свойства.

В одних условиях (обработка хрупких металлов, при режимах, обуславливающих повышенные усадки стружки и низкие температуры резания) деформации, получаемые стружкой, превышают пластические возможности ее материала и имеет место устойчивое дробление даже на резце с плоской передней гранью. В других (обработка пластических металлов, при режимах малой усадки стружки и высоких температур) деформации стружки не исчерпывают пластических возможностей материала в зоне резания, и образуется непрерывная малоизогнутая стружка.

Материал сливной стружки по своим механическим качествам ничем принципиально не отличается от исходного материала. На диаграммах растяжения образцов из стружки также имеется прямолинейный участок, характерный для упругого деформирования и криволинейный — для пластического. Количественные различия в упрочненности материала стружки ($\sigma_b = 53 \div 58 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 3 \div 6\%$ для образцов из ст. 3, $v = 185 \text{ м/мин}$, $s = 0,35 \text{ мм/об}$) по сравнению с исходными ($\sigma_b = 38 \div 40 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 26 \div 28\%$). Для дробления стружки с такими механическими качествами (материал упрочнен, но еще способен претерпевать некоторые формоизменения без разрушения), очевидно, необходимо дополнительно деформировать уже образовавшуюся стружку с таким расчетом, чтобы исчерпать пластические возможности ее материала. Эту роль и выполняют стружколомы.

Рассматривается процесс деформирования стружки на резце со стружколомом в виде наклонного уступа при режимах, соответствующих образованию на резце с плоской передней гранью, непрерывной малоизогнутой, т. е. сливной стружки.

Геометрические параметры стружколома, подлежащие расчету: h , ψ , τ (рис. 1). Ставится задача — установить влияние этих трех параметров на процесс деформирования стружки на стружколоме и определить их оптимальные значения.

При работе резца со стружколомом стружка в своем движении упирается сначала в стружколом, затем в деталь и т. д. При каждом таком соприкосновении стружка претерпевает определенные формоизменения, т. е. деформируется; изменяя величины этих деформаций, можно управлять процессом дробления, доводя ее до излома.

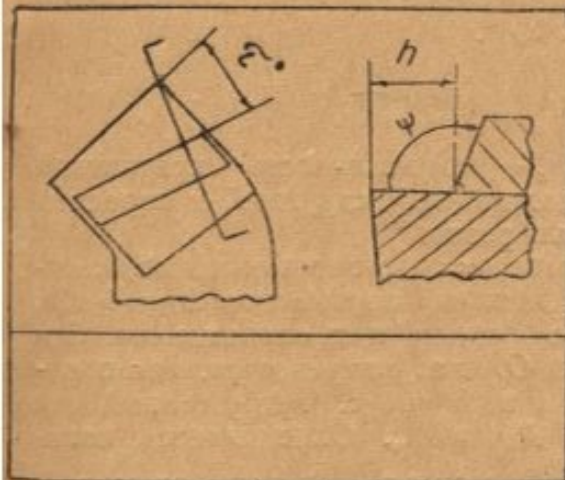


Рис. 1. Геометрические параметры стружколома в виде наклонного уступа.

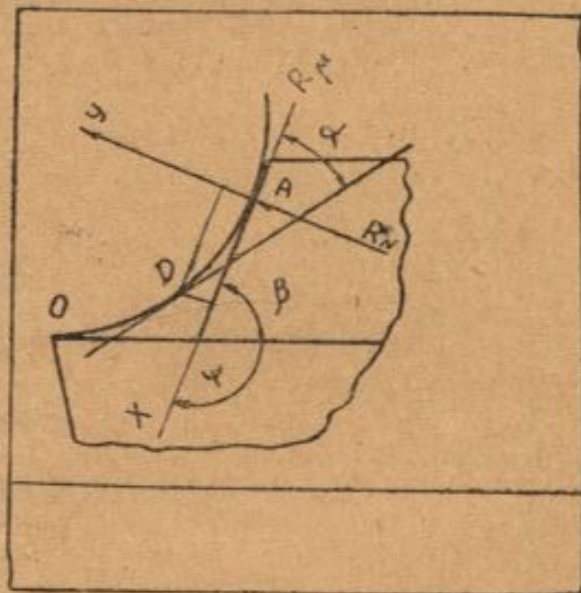


Рис. 2. К расчету сил, деформирующих стружку.

Управление процессом дробления практически осуществляется за счет изменения параметров стружколома. Кроме того, как установлено наблюдениями, величина деформации стружки на стружколоме определяет весь последующий процесс. Поэтому ограничим наши исследования процессом деформирования стружки в рабочей зоне стружколома между точками O и A (рис. 2), памятуя, что деформирование и сам излом могут происходить и за точкой A вне стружколома.

В месте касания стружки уступа стружколома (точка A , рис. 2) на нее действуют: сила нормального давления R_N и сила трения $R_p = \mu R_N$ где μ — коэффициент трения стружки о поверхность уступа. Величина изгибающего момента для внутренних точек отрезка OA равна

$$M = xR_N - yR_p = R_N(x - y\mu). \quad (1)$$

Положение точки с M_{\max} определяется дифференцированием (1) по x

$$1 - \frac{dy}{dx}\mu = 0, \text{ где } \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Наибольший изгибающий момент будет у вершины резца (точка O , $\alpha = \beta$) при

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} (180 - \psi) = \frac{1}{\mu}. \quad (2)$$

В дальнейшем рассматривается этот случай (2).

В точке O материал стружки получает наибольшие деформации от изгиба и по мере перемещения к точке A разгружается. В точке A $M = 0$. Изгиб стружки на стружколоме является упруго пластическим, поэтому в точке A стружка имеет остаточную кривизну. Анализ величины пружинения с помощью уравнения теоремы о разгрузке [1] показал, что заменой действительной кривой OA на дугу окружности, при относительной деформации материала стружки от изгиба $\epsilon > 4\%$ (0,04), вносится погрешность на величину радиуса изгиба не более 5%. В дальнейшем кривую OA принимаем за дугу окружности, и радиус опорной поверхности стружки выражаем через параметры стружколома (рис. 3) *.

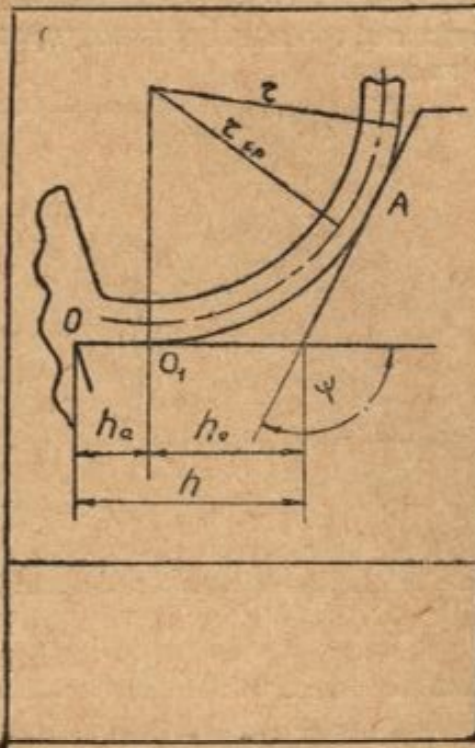


Рис. 3. К определению радиуса изгиба стружки.

где h_a — протяженность контактной площади между стружкой и передней гранью резца.

При $r = \text{const}$ возможно множество сочетаний параметров h и ψ (3), найдем среди них оптимальное. Отрезок OA рассматривается, как плоский кривой брус, нагруженный силами R_N и R_μ . Определяется изгибающий момент M и сила сжатия N для точек дуги OA , как для кривого бруса постоянной кривизны [2]:

$$r = (h - h_a) \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}, \quad (3)$$

где h_a — протяженность контактной площади между стружкой и передней гранью резца.

При $r = \text{const}$ возможно множество сочетаний параметров h и ψ (3), найдем среди них оптимальное. Отрезок OA рассматривается, как плоский кривой брус, нагруженный силами R_N и R_μ . Определяется изгибающий момент M и сила сжатия N для точек дуги OA , как для кривого бруса постоянной кривизны [2]:

$$M = R_N r_{cp} \sin \alpha - R_\mu r_{cp} (1 - \cos \alpha) = R_N r_{cp} [\sin \alpha - \mu (1 - \cos \alpha)] = R_N r_{cp} m \quad (4)$$

$$N = R_N (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) = R_N n. \quad (5)$$

При $r = \text{const}$, независимо от сочетаний параметров h и ψ , величина изгибающего момента в точке O $M = \text{const}$ при прочих равных условиях. Отсюда представляется возможным выбрать оптимальный угол ψ по наименьшим значениям реакции R_N и силе сжатия стружки у вершины резца N_0 из (4) и (5) с подстановкой вместо α угла $\beta = 180 - \psi$ (рис. 2).

$$R_N = \frac{M_0}{r_{cp}} \frac{1}{m}; \quad (4a)$$

$$N_0 = \frac{M_0}{r_{cp}} \frac{n}{m}. \quad (5a)$$

Анализом этих формул установлено, что значения $N_{0 \min}$ и $R_{N \min}$ имеют место при угле наклона уступа $\psi_{\text{опт}}$, найденным из уравнения (2).

Параметр h определяется из условия дробления стружки на резце со стружколомом. Способность материала стружки, как и всякого металла, к пластическому формоизменению возможно оценить численно количеством механической работы, поглощенной единицей объема де-

* Подробнее в [4].

формируемого металла до момента излома, т. е. площадью диаграммы «деформации — направления» [2, 3]. Стружколом вызывает в стружке деформации сжатия и изгиба от сил $M(4)$ и $N(5)$. Определяется мощность $N_{стр}$, затрачиваемая на деформирование стружки этими силами (дано без выводов)

$$N_{стр} = \frac{\omega F \varepsilon}{2} \left(\sigma^{xx} + \frac{n}{m} \sigma^{xxx} \right) \quad (6)$$

или через режимы резания с уточнением размерности

$$N_{стр} = \frac{1}{120} v s t \varepsilon \left(\sigma^{xx} + \frac{n}{m} \sigma^{xxx} \right) \frac{кгж}{сек}. \quad (6a)$$

Здесь W — скорость схода стружки;

F — фактическая площадь поперечного сечения стружки;

ε — коэффициент относительной деформации стружки при изгибе на стружколоме [4]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{2r}{a'} - 1}; \quad (7)$$

a' — фактическая толщина стружки;

$$\sigma^{xx} = \frac{2}{\varepsilon^2} \int_0^{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \sigma_x d\delta d\delta \text{ — осредненное}$$

значение напряжений в материале стружки при изгибе.

$$\sigma^{xxx} = \frac{2}{\varepsilon^2} \int_0^{\varepsilon} \sigma_x \varepsilon d\varepsilon \text{ — тоже при сжатии.}$$

Например, для идеально пластичных тел $\sigma^{xx} = \sigma^{xxx} = \sigma_s$; для идеально-упругих $\sigma^{xx} = \frac{1}{3} \sigma_{max}$, $\sigma^{xxx} = \frac{2}{3} \sigma_{max}$.

Пусть имеем случай устойчивого дробления с наименьшими деформациями $\varepsilon_{кр}$, что соответствует работе, затрачиваемой на деформирование единичного объема стружки на стружколоме U' . Значение $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$ соответствует излому на сходе стружки с уступа от перегиба. Из формулы (6) имеем

$$U' = \frac{N_{стр}}{\omega F} = \frac{\varepsilon}{2} \left(\sigma^{xx} + \frac{n}{m} \sigma^{xxx} \right).$$

Отсюда критическое значение $\varepsilon_{кр}$, определяющее устойчивое дробление стружки с наименьшими деформациями,

$$\varepsilon_{кр} = \frac{2U'}{\sigma^{xx} + \frac{n}{m} \sigma^{xxx}}. \quad (8)$$

При увеличении ε дробление наблюдается более интенсивное, как это видно из рисунков 4 и 5, где показан характер изменения дробления стружки при увеличении степени деформации на стружколоме за счет параметров h (рис. 4) и ψ (рис. 5). С некоторых $\varepsilon \gg \varepsilon_{кр}$ имеет место излом стружки от сжатия у вершины резца с возникновением вибраций.



Предельную степень деформации, соответствующую появлению вибраций или излому стружки от сжатия у вершины резца, обозначим $\epsilon_{пр}$.

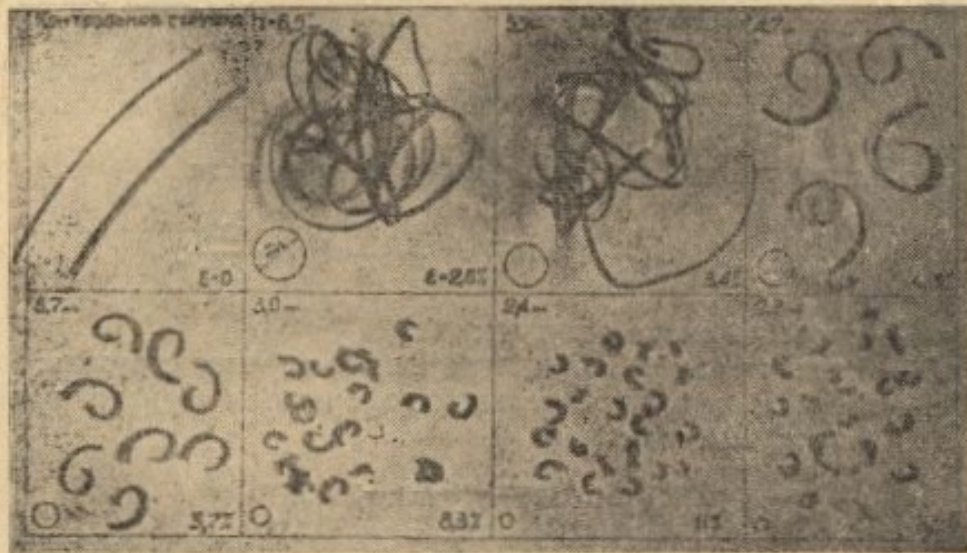


Рис. 4. Влияние коэффициента ϵ на степень измельчения стружки при изменении параметра h ($\psi=130^\circ, s=0,25$ мм/об, $v=146$ м/мин).

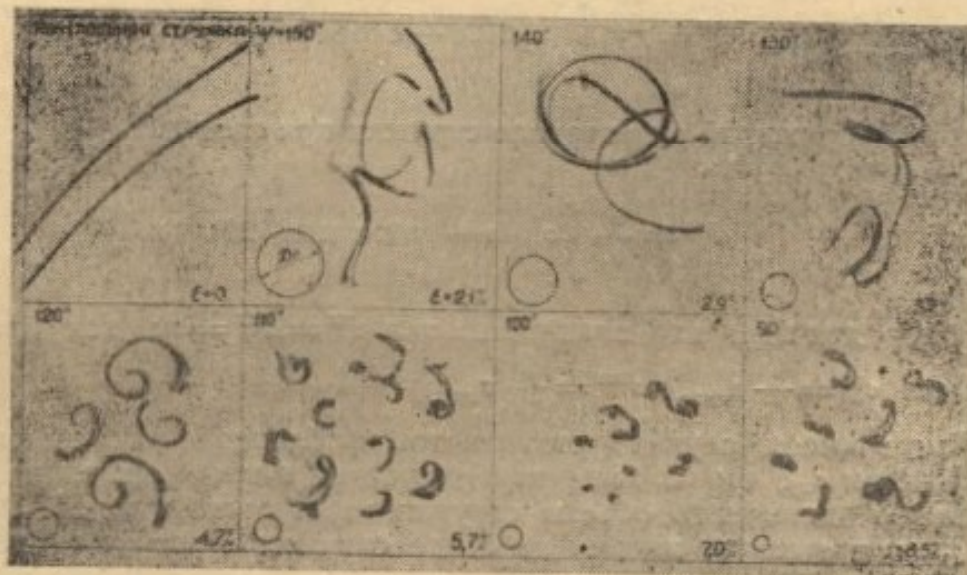


Рис. 5. Влияние коэффициента ϵ на степень измельчения стружки при изменении параметра ψ ($h=5$ мм, $s=0,25$ мм/об, $v=146$ м/мин).

Такой излом имеет место, когда величина силы сжатия (5а) больше «несущей способности» сечения стружки

$$F\sigma_s \leq N_s = \frac{M_0}{r_{ср}} \cdot \frac{\pi}{t} = \frac{F\epsilon\sigma^{xxx}}{2} \cdot \frac{\pi}{t},$$

откуда

$$\epsilon_{пр} = \frac{\sigma_s}{\sigma^{xxx}} \cdot \frac{2t}{\pi}. \quad (9)$$

Как следует из анализа формул (8) и (9), интервал значений $\epsilon_{кр} \rightarrow \epsilon_{пр}$, определяющий зону устойчивого дробления, зависит не только от механических свойств материала стружки в момент деформирования на стружколоме ($\sigma_s, U', \sigma^{xx}, \sigma^{xxx}$), но и от угла ψ и коэффициента

трения μ (4) и (5). Анализ формул (8) и (9) показал, что при $\psi_{\text{опт}}$ (2) зона $\varepsilon_{\text{кр}} + \varepsilon_{\text{пр}}$ должна быть наиболее широка.

В таблице 1 приведены экспериментальные значения коэффициентов трения стружки об уступ стружколома из различных материалов при обработке углеродистых сталей и соответствующие им значения $\psi_{\text{опт}}$ (2).

Таблица 1

Материал уступа	μ	$\mu_{\text{ср}}$	$\psi_{\text{опт}}^{\circ}$
Сталь У7, $R_c = 58 \rightarrow 62$	0,5 \rightarrow 0,9 (1,2)	0,8	130
Т15К6	0,45 \rightarrow 0,65 (0,87)	0,52	120
Минералокерамика	0,35 \rightarrow 0,63	0,48	115

Экспериментально установлено, что при $\psi_{\text{опт}}$ зона дробления стружки по ε наиболее широка (рис. 6), вибрация резца и силы резания при этом наименьшие (рис. 7) и наилучшее качество обработанной поверхности (рис. 8). (Графики на рис. 7 и 13 построены по осциллограммам усилий резания).

Устойчивость дробления и направление схода стружки со стружколома зависят от угла τ , точнее, от положения основания уступа стружколома относительно направления схода стружки. Направление схода стружки на резце с плоской передней гранью зависит от геометрии резца, режимов резания и т. д.

Разобьем силы, определяющие направление схода стружки, на две группы — давление срезаемого металла на переднюю грань резца и силы, вызванные подпором вновь образующейся стружки.

1. Давление срезаемого металла на переднюю грань резца совпадает по направлению с вектором относительной скорости резания. Проекцию этой силы на переднюю грань резца обозначим вектором P .

2. Силы, вытесняющие стружку с передней грани, представим приложенными к режущим участкам лезвий в плоскости передней грани q .

Отношение проекций этих сил (P и q) на оси MM и NN определяют угол между осью NN и направлением схода стружки — угол i .

$$\operatorname{tg} i = \frac{P_m + \Sigma q_m}{P_n + \Sigma q_n} \quad (10)$$

Поскольку соотношение между P и q и закон распределения q точно не установлен, формулу (10) упростим. Величиной P пренебрегаем и принимаем $q = \text{const}$. Тогда для резца с прямолинейными режущими кромками из (10) получим (рис. 9)

$$\operatorname{tg} i = \frac{1}{\frac{t}{s \sin' \varphi} + \operatorname{ctg}(\varphi + \varepsilon_1)} \quad (10a)$$

Результаты экспериментальной проверки формулы (10a) даны на рис. 10. Здесь угол i определялся по фотографиям, полученным в процессе резания.

Экспериментально установлено, что устойчивое дробление стружки с наименьшими ε обеспечивается при выборе $\tau = i \pm 4^{\circ}$, где i вычислено по формуле (10a).

Как следует из формул (8) и (9), интервал численных значений $\varepsilon_{\text{кр}} + \varepsilon_{\text{пр}}$ зависит прежде всего от механических свойств материала

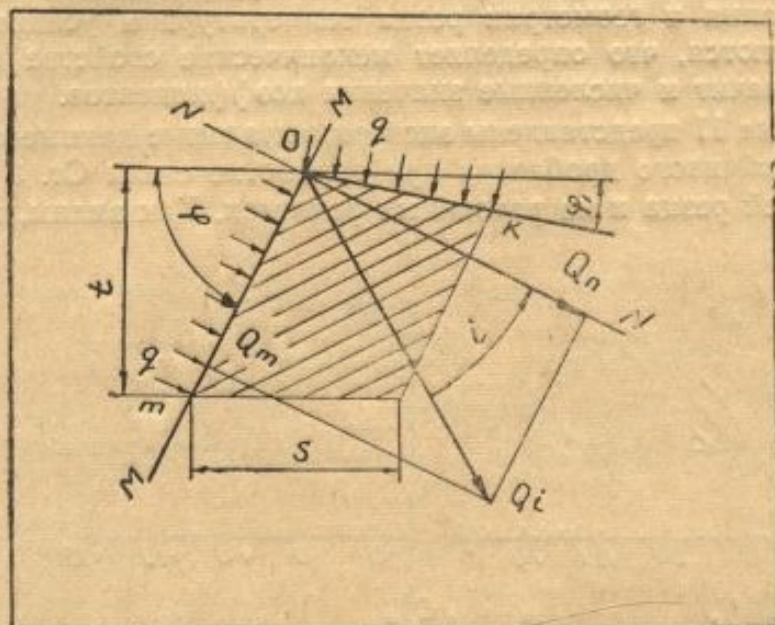


Рис. 9. Схема сил, определяющих направление схода стружки.

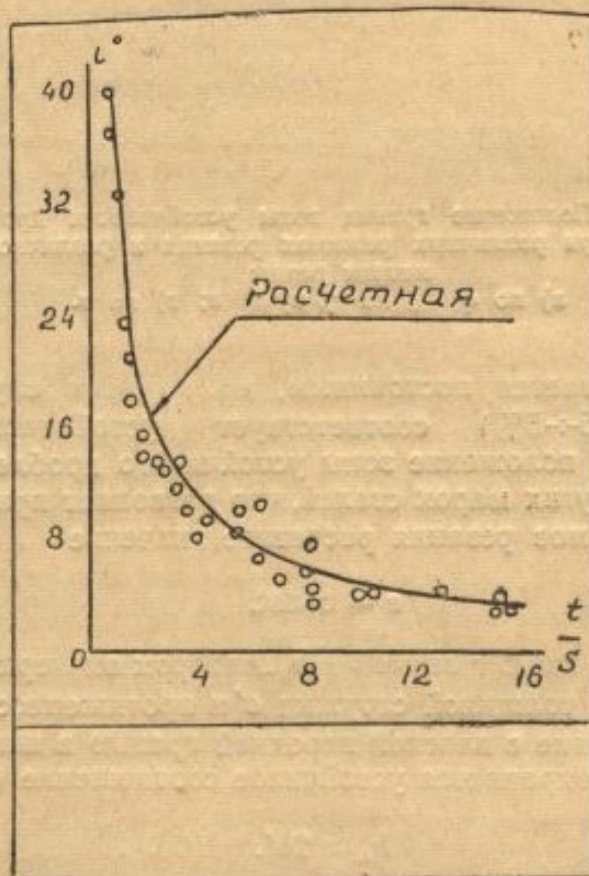


Рис. 10. Зависимость угла схода стружки от отношения t/s ($s = 0,17 \div 0,8$ мм/об, $t = 0,5 \div 2,5$ мм, $v = 140 \div 180$ м/мин, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $\gamma = 7^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, ст. 3).

стружки в момент ее деформирования на стружколоме. С изменением режимов резания и геометрии резца температура и усадка стружки также изменяются, что определяет механические свойства материала стружки, а значит и численные значения коэффициентов.

На рисунке 11 представлены экспериментальные данные о положении зоны устойчивого дробления при обработке стали Ст. 3 с различной геометрией резца и на различных режимах. Как видим, положение

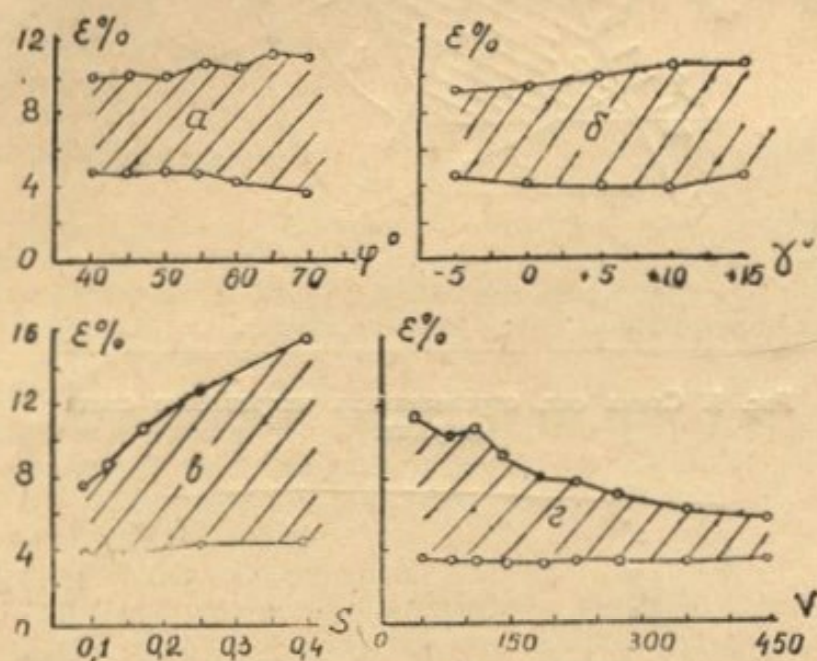


Рис. 11. Положение границ зоны устойчивости дробления стружки при различных режимах резания и различной геометрии резца:

а) по φ ; б) по γ ; в) по s ; г) по v .

границ зоны не остается постоянным, но во всех случаях интервал $\epsilon = 0,045 \div 0,05$, (4,5÷5%) соответствует устойчивому дроблению стружки. Подобное положение зоны устойчивого дробления характерно и при обработке других марок сталей, что позволяет принимать в широких пределах режимов резания расчетное значение

$$\epsilon = \text{const.}$$

В формулу (3) входит значение h_a . Автором экспериментально установлено, что между толщиной стружки a' и протяженностью контактной площадки h_a на резце с плоской передней гранью в широких пределах режимов резания сохраняется устойчивое соотношение (рис. 12)

$$h_a \approx 2a'.$$

На резце со стружколомом при устойчивом дроблении стружки $\epsilon = \epsilon_{кр}$ размеры контактной площадки сокращаются до соотношения

$$h_a \approx 1,5a'.$$

При этом наблюдается уменьшение сил резания на резце со стружколомом при $\epsilon < \epsilon_{кр}$ на 5÷8%, как следствие уменьшения площади тре-

ния, а значит и работы при трении стружки о резец (рис. 13). При $\epsilon > \epsilon_{пр}$ силы резания возрастают за счет увеличения мощности деформации стружки на стружколоме (6).

Установленные закономерности процесса дробления стружки на резце со стружколомом позволяют разработать рекомендации по расчету геометрических параметров стружколомов.

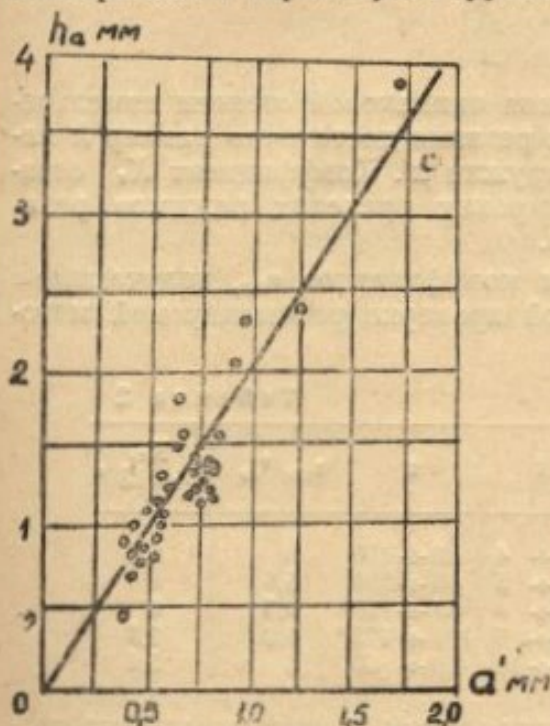


Рис. 12. Соотношение между толщиной стружки и длиной контактной площадки на резце с плоской передней гранью ($s=0,08 \div 0,8$ мм/об, $t=0,5 \div 4$ мм, $v=58 \div 450$ м/мин, $\gamma=7^\circ$, $\phi=60^\circ$, ст. 3).

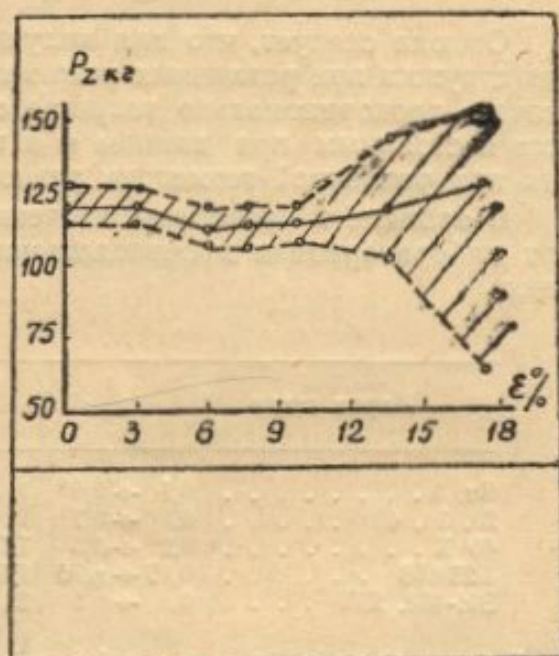


Рис. 13. Зависимость составляющей силы резания P_z от степени деформации стружки на стружколоме. ($s=0,25$ мм/об, $t=2,5$ мм, $v=86$ м/мин, $\tau=0$, $\phi=130^\circ$, ст. 3).

Угол между плоскостью передней грани резца и плоскостью уступа стружколома ϕ (рис. 1) следует назначать по коэффициенту трения стружки об уступ стружколома (2) (табл. 1). Угол между главной режущей кромкой и основанием уступа τ следует назначать в зависимости от требуемого характера дробления и направления отвода стружки по (10а):

- а) для устойчивости дробления — $\tau = i \pm 4^\circ$;
- б) для устойчивого завивания с отводом стружки в сторону обрабатываемой поверхности — $\tau = i - (8 \div 15)^\circ$;
- в) при обработке вязких сталей и для большего измельчения стружки — $\tau = i + (5 \div 10)^\circ$, но при этом возможно повреждение обработанной поверхности детали стружкой и большая вероятность возникновения вибраций.

Размер h — расстояние от главной режущей кромки у вершины резца до основания уступа следует определять по фактической толщине стружки a' . Из формул (3) и (7) определим h :

$$h = a' \left[\frac{\frac{1}{\epsilon} + 1}{2 \operatorname{tg} \frac{\phi}{2}} \right] + h_a. \quad (12)$$

Как указано выше, в широких пределах режимов резания можно принять $\epsilon = \text{const}$ и $h_a = 1,5a'$. Это позволит упростить формулу (12)

$$h = a' \left[\frac{\frac{1}{\epsilon} + 1}{2 \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}} + 1,5 \right] = a' K_{\epsilon}. \quad (12a)$$

Отсюда следует, что для получения одинаковой степени измельчения стружки при различных режимах резания достаточно размер h назначать пропорционально толщине стружки a' . Коэффициент K_{ϵ} остается постоянным при данном ψ в широких пределах режимов резания при различной геометрии резцов.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов $\epsilon_{кр}$, полученные при лабораторной и производственной проверке рекомендуемой методики

Таблица 2

Марка стали	ϵ	t	v	$\epsilon_{кр} \%$	K_{ϵ} $\psi = 130^\circ$
Ст. 3	0,1 ÷ 0,6	1 ÷ 4	58 ÷ 450	5	6,4
20, 35, 40	0,1 ÷ 0,7	1 ÷ 5	60 ÷ 250	5,5	6
40 X	0,2 ÷ 0,5	1,5 ÷ 4	62 ÷ 150	5,5	6
X23H18	0,17 ÷ 0,76	1,5 ÷ 5	100 ÷ 175	3,8	7,8
ЭИ-481, Я1Т	0,2 ÷ 0,5	2 ÷ 10	20 ÷ 60	5	5,4

Примечание: Здесь и в таблице 3 даны режимы, в пределах которых проводилась проверка.

Процесс дробления стружки на других видах стружколомов (радиусная канавка, прямоугольный уступ и т. п.) также подчиняется ука-

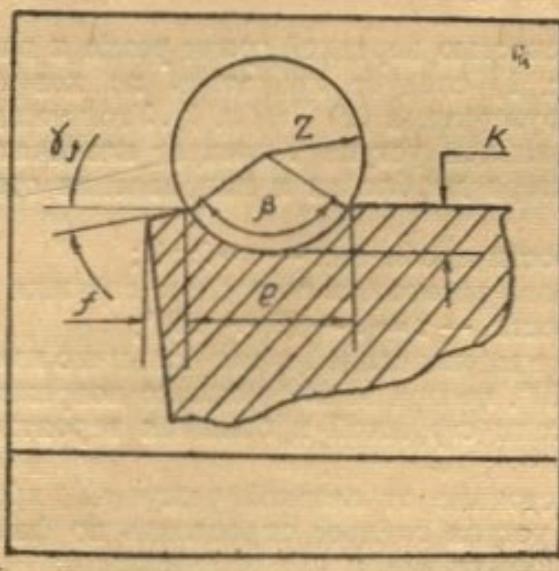


Рис. 14. Геометрические параметры стружколома в виде радиусной канавки.

занным закономерностям, и геометрические параметры этих стружколомов также могут быть рассчитаны.

Например, для стружколома в виде радиусной канавки (рис. 14) теоретическими исследованиями установлены следующие оптимальные соотношения между геометрическими параметрами:

$$r = \frac{a'}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon} + 1 \right) = a' K'_\varepsilon,$$

$$l = (0.75 + 1) r \text{ (при } \beta_{\text{пр}} = 45 + 60^\circ),$$

$$f = 0.5 a',$$

$\gamma_f = -5^\circ$ (при обработке углеродистых сталей).

Если канавка изготавливается параллельно главному лезвию с постоянной глубиной $f = \text{const}$, $r = \text{const}$, $l = \text{const}$, то при $\frac{t}{s} < 3 + 4$ дробление переходит в устойчивое завивание из-за схода стружки не под прямым углом к оси канавки. Значения коэффициентов $\varepsilon_{\text{кр}}$ и K'_ε для резцов со стружколомами в виде канавки даны в таблице 3.

Таблица 3

Марка стали	s	t	v	$\varepsilon_{\text{кр}}$	K'_ε
20, 35, 40	0,1 + 0,7	1 + 5	80 + 220	12	4,6
45	0,15 + 1,3	1 + 5	24 + 180	14	4
40X 40XBA	0,16 + 1,8	1 + 5	14 + 180	14	4

Установленные автором закономерности процесса дробления стружки на резце со стружколомом подтверждаются экспериментальными данными ряда исследователей. Разработанная методика расчета параметров стружколомов для резцов с различной геометрией при различных режимах обработки сталей проверялась в производственных условиях и дала положительные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Ильюшин. Пластичность. Гостехиздат, 1948.
2. Н. М. Беляев. Сопротивление материалов. Гостехиздат, 1953.
3. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Т. II, изд-во «Красное Знамя», 1941
4. В. А. Землянский. К вопросу о стружкодроблении. «Вестник машиностроения», 1953, № 12.