

КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕЖУЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЗЦА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОЯВЛЕНИЕ ВИБРАЦИИ СПИД ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЗАНИИ

Исследование распределения контактных напряжений при резании металлов — очень сложная и трудоемкая задача. Это объясняется малым размером площадки контакта стружки с резцом, высокими контактными давлениями, а также температурой на поверхности контакта и т. д.

Напряжения, возникающие в зоне резания, рассматриваются как распределение напряжений на контактных поверхностях резца, т. е. напряжения, которые образуются на передней и задней поверхностях резца. Эти напряжения, выражающиеся неодинаковыми функциями, зависят от внешних факторов процесса резания, в частности от свойств материала заготовки и резца, от условий резания и многих других причин.

§ 1. Напряжения на передней поверхности резца

Экспериментальные работы [1, 2] показали, что нормальные напряжения в зоне контакта стружки с передней поверхностью распределяются очень неравномерно.

По данным В. Каттвинкеля, нормальные напряжения в точке отрыва стружки от передней поверхности равны нулю и по мере приближения к режущей кромке возрастают и достигают максимума непосредственно у самой режущей кромки.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные В. Каттвинкеля, полученные при свободном резании свинца с передним углом резца $\gamma = -5^\circ$.

Для сравнения можно привести также данные Г. С. Андреева, В. М. Заварцовой, Чандрашекарана и Капура. Элюра, полученная Чандрашекараном и В. Капуром, отличается от остальных эпюр (рис. 2, 3) наличием пологого участка, который начинается достаточно далеко от режущей кромки. Аналогичный результат был получен Такеямой и Усуи [3]. На участках, примыкающих к точке отрыва, контактные напряжения, по данным [4], очень низки (рис. 4).

Анализируя все эти кривые, приходим к заключению, что в точке отрыва стружки от передней поверхности контактные давления резко па-

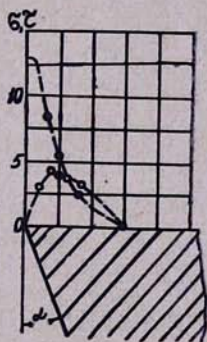


Рис. 1. Кривые контактных напряжений на передней поверхности резца (В. Каттвинкель) $\gamma = -5^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, свинец $V = 24$ м/мин., $a = 0,5$ мм.

дают. Особенно наглядно это видно на рис. 3. Однако никто из перечисленных исследователей не приводит методику, по которой измерялась длина контакта стружки с резцом, что имеет существенное значение. Только В. М. Полетиком [4] дано подробное исследование данного вопроса. Он определил длину контакта стружки с передней поверхностью резца двумя способами:

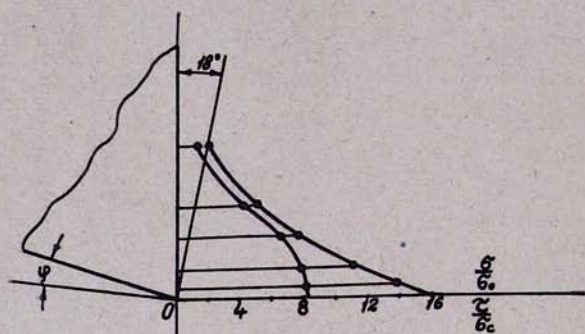


Рис. 2. Эпюры контактных напряжений на передней поверхности резца (Г. С. Андреев, В. М. Заварцова).

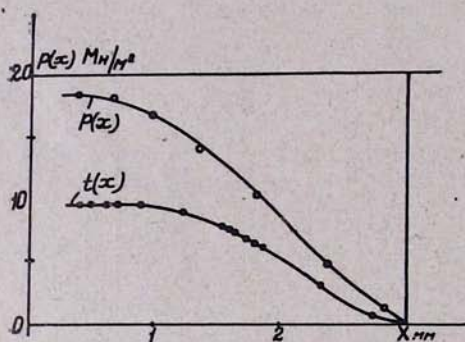


Рис. 3. Кривые распределения контактных напряжений на передней поверхности инструмента при $\gamma=10^\circ$ (Чандрасекарн, В. Канур).

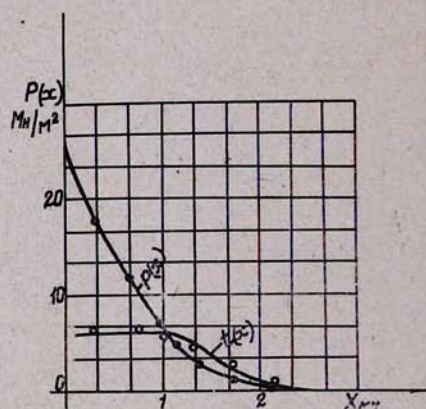


Рис. 4. Эпюры контактных напряжений σ и τ на передней поверхности резца при резании свинца $\gamma=10^\circ$, $a=0,475$, $b=3$ мм, $V=0,025$ см/сек (М. Ф. Полетика).

- по отпечатку износа на резце,
- по щели между стружкой и резцом.

Первый способ общезвестен и дает несколько заниженные значения длины контакта, так как при резании свинца даже непрочный полимер изнашивается слабо [4].

Второй способ точнее первого, ибо он позволяет определить границу контакта не по результату взаимодействия стружки с резцом, а непосредственно как точку, на которой стружка покидает резец.

Таким образом, распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений на передней поверхности схематически можно представить в виде кривых $\sigma(X)$ и $\tau(X)$ (рис. 5). Начало системы координат в этом случае находится в точке передней поверхности инструмента, удаленной от режущей кромки на расстояние «В», равное ширине контакта стружки с передней поверхностью [5].

В. Каттвинкель в работе [6] предлагает определить $\sigma = \sigma(X)$:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{B^n} X^n. \quad (1)$$

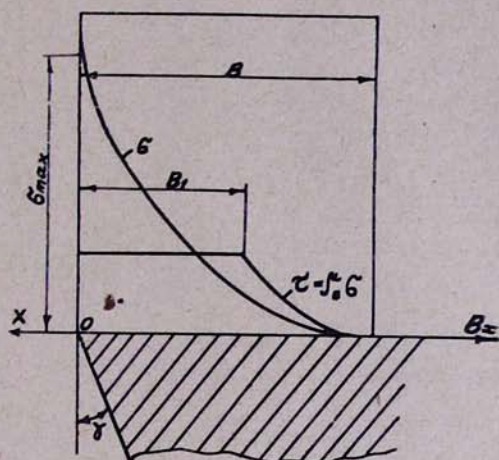


Рис. 5. Схема нормальных и касательных напряжений по Н. Н. Зореву.

При $X = B$ $\sigma(X) = \sigma_{\max}$, т. е. нормальное напряжение достигает максимума (точка O), при $X = 0$ $\sigma(X) = 0$, т. е. нормальное напряжение достигает минимума (точка A_0).

Касательные напряжения в точке O, в зависимости от нормальных напряжений, возрастают ограниченным образом до определенного предела. Это объясняется тем, что при достижении касательных напряжений величины, равной величине сопротивления сдвига материала τ_s , дальнейшее возрастание τ становится невозможным. Кривая касательных напряжений $\tau = \tau(X)$, согласно рис. 5, представляется в виде системы уравнений

$$\tau(X) = \begin{cases} \mu \frac{\sigma_{\max}}{B^n} X^n = \mu \sigma & \text{при } B_1 \leq X < B \\ \tau_s & \text{при } B_1 > X \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Если напряжение внешнего трения $\mu \sigma$ станет равным τ_s , то внешнее скольжение стружки сразу же будет заменено внутренними сдвигами материала стружки. Следовательно, самый нижний контактный слой стружки затормозится, а вышележащие слои обеспечат движение струж-

ки за счет вторичной контактной пластической деформации [5]. Таким образом, μ начинает возрастать. Полагая, что напряжение на плоскости сдвига распределяется равномерно, средний коэффициент трения μ между стружкой и передней поверхностью резца можно определить следующим уравнением [5]:

$$\mu = \frac{\tau_s}{\sigma_{\max}} = \left(1 + \frac{nB_1}{B}\right). \quad (3)$$

Ширина B контакта стружки с передней поверхностью соответственно разделяется на два участка:

- 1) участок внутреннего скольжения B_1 и
- 2) участок внешнего скольжения $B - B_1$.

Эти участки легче наблюдаются по отпечаткам на передней поверхности резца, в виде поперечного риска и продольного бороздка. Интегрируя уравнение (2) в пределах от $X=0$ до $X=B-B_1$, получим значение касательной силы F_b :

$$F_b = \int_0^{B-B_1} \tau(X) b \cdot dx = \int_0^{B-B_1} \mu b \frac{\sigma_{\max}}{B^n} X^n dx = \mu b \frac{\sigma_{\max}(B-B_1)^{n+1}}{(n+1)B^n}. \quad (4)$$

Согласно уравнению (2), при $X = B - B_1$,

$$\tau = \mu \frac{\sigma_{\max}}{B^n} (B - B_1)^n, \quad (5)$$

В зоне $X = B_1$ $\tau = \tau_s$, поэтому

$$\tau_s = \mu \frac{\sigma_{\max}}{B^n} (B - B_1)^n. \quad (6)$$

Учитывая это, уравнение (4) преобразуется:

$$F_b = \frac{b\tau_s}{n+1} (B + B_1). \quad (7)$$

Касательная сила, действующая на участке внутренних пластических сдвигов, будет

$$F_s = bB_1\tau_s. \quad (8)$$

Полная касательная сила F равняется:

$$F = F_s + F_b = \frac{Bb\tau_s}{n+1} \left(1 + \frac{B_1}{B}\right). \quad (9)$$

Таким образом, удельная касательная нагрузка q_F получится:

$$q_F = \frac{F}{Bb} = \frac{\tau_s \left(1 + n \frac{B_1}{B}\right)}{n+1}. \quad (10)$$

Так как $\frac{1+n \frac{B_1}{B}}{n+1}$ изменяется мало, то q_F зависит в основном от τ_s .

Для определения нормальной силы N , действующей на передней поверхности, интегрируем уравнение (1) в пределах от $x=0$ до $x=B$

$$N = \int_0^B b\tau(x) dx = b \int_0^B \frac{\tau_{\max}}{B^n} x^n dx = \frac{Bb\tau_{\max}}{n+1}. \quad (11)$$

Отсюда удельная нормальная нагрузка q_N будет

$$q_N = \frac{N}{B \cdot b} = \frac{\tau_{\max}}{n+1}. \quad (12)$$

Для определения удельных нормальных и касательных нагрузок (10), (12) на передней поверхности резца допустим, что элементарные силы распределяются на длине контакта резца по закону треугольника (рис. 6).

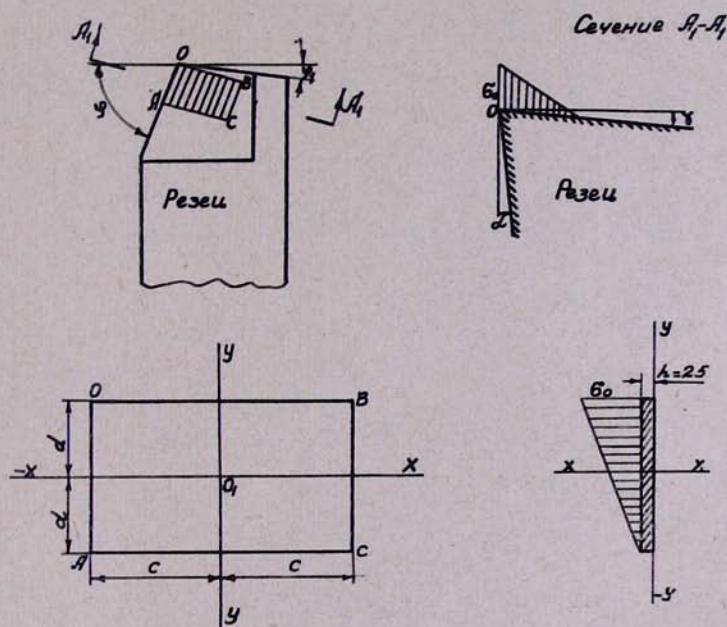


Рис. 6. Распределение элементарных сил на длине контакта резца.

Закон изменения давления σ_n будет

$$\sigma_n = \frac{\sigma_0(z+d)}{2d}. \quad (13)$$

Для определения значения площадки контакта передней части резца со стружкой ($2c$ и $2d$) проведен ряд опытов на двух материалах: сталь У8А и железо Армко на строгальном станке 7М36.

Режимы резания при изменении скоростей в диапазоне $V=3-36$ м/мин остаются постоянными ($S=0,5$ мм/дв. ход, $t=1$ мм). Гео-

метрия режущей части резца, оснащенной твердым сплавом Т5К10, имеет следующие основные параметры: $\gamma = 10^\circ$, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 6^\circ$.

Исследования дали возможность непосредственно определить размеры площадки контакта ($2c \times 2d$) по первому способу, которые дали возможность определить σ_0 . Определение σ_0 производится следующим образом: фиксируются динамометрические показания силы резания, а затем на микроскопе определяется размер площадки контакта передней части резца со стружкой. После определения этих величин определяем силу стружкообразования $R'_{стр.}$ и с помощью уравнения (14) находим σ_0 на поверхности резца

$$\sigma_0 = \frac{R'_{стр.}}{F_1} = \frac{R'_{стр.}}{4cd}. \quad (14)$$

Для определения основных параметров, входящих в уравнение (13), допустим, что пластинка в основном деформируется по осям z и y . В заданной системе координат прогиб пластины (ω_n) будет выражаться по методу Галеркина [7]

$$\omega_n = \frac{1}{2} \omega_0 \left(1 + \frac{\cos \pi y}{c} \right) \cos \pi \frac{(z+d)}{2d}, \quad (15)$$

где элементарный прогиб пластины ω_0 определяется как приложенное к элементу пластины давление σ_n , которое должно находиться в равновесии с внутренними силами Q_z , Q_y и изгибающими моментами M_z , M_y .

Спроектируем систему сил на оси z и y , имея в виду, что здесь решается плоско напряженная задача, где условия равновесия определяются

$$Q_z = -\frac{\partial M_z}{\partial z} - \frac{\partial M_{zy}}{\partial y}; \quad Q_y = -\frac{\partial M_y}{\partial y} - \frac{\partial M_{zy}}{\partial z}. \quad (16)$$

Следовательно,

$$\sigma_n = \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial Q_z}{\partial z}. \quad (17)$$

Преобразуя формулы (16) и (17) и учитывая, что толщина пластины h , а следовательно, и жесткость D не зависят от y и z , получим, что

$$\frac{\sigma_n}{D} = \frac{\partial^4 \omega_n}{\partial y^4} + \frac{2\partial^4 \omega_n}{\partial y^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \omega_n}{\partial z^4}. \quad (18)$$

Уравнение (18) есть дифференциальное уравнение прогиба пластины в окончательном его виде, выведенное в декартовой системе координат. Подставляя уравнение (15) в (18), получим

$$\frac{\sigma_n}{D} = \frac{\omega_0 \pi^4}{2} \left[\frac{1}{C^4} \cos \frac{\pi y}{c} + \frac{1}{2c^2 d^2} \cos \frac{\pi y}{c} + \right.$$

$$+ \frac{1}{16d^4} \left(1 + \cos \frac{\pi y}{c} \right) \Big] \cos \frac{(z+d)\pi}{2d}. \quad (19)$$

Согласно [8], умножаем уравнение (19) на выражение $\left(1 + \frac{\cos \pi y}{c} \right) \cdot \cos \frac{\pi(z+d)}{2d} dz dy$ и, интегрируя в пределах от $-c$ до $+c$ и $-d$ до $+d$, получим значения элементарного прогиба ω_0

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \int_{-pc-d}^{+c-d} \frac{\tau_n}{D} \left(1 + \cos \frac{\pi y}{c} \right) \cos \pi \frac{(z+d)}{2d} dz dy = \\ &= \frac{\tau_n d^4}{Eh^3} \cdot \frac{192(1-\mu^2)}{\pi^5} \cdot \frac{1}{\frac{3}{16} + \frac{d^2}{2c^2} + \frac{d^4}{c^4}}, \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)}.$$

Напряжения в направлении y, z определяются как

$$\sigma_y = \frac{6M_y}{h^2}; \quad \sigma_z = \frac{6M_z}{h^2}; \quad \tau_{zy} = \frac{6M_{zy}}{h^2}. \quad (21)$$

Значения M_y, M_z, M_{zy} , определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_y &= -D \left[\frac{\partial^2 \omega_n}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega_n}{\partial z^2} \right], \\ M_z &= -D \left[\frac{\partial^2 \omega_n}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega_n}{\partial y^2} \right], \\ M_{zy} &= -D (1-\mu) \frac{\partial^2 \omega_n}{\partial y \partial z}. \end{aligned} \quad (22)$$

Подставляя частное производное функции ω_n в уравнение (22), получим, что

$$\begin{aligned} M_y &= -\frac{D\omega_0}{2} \pi^2 \cos \frac{(z+d)\pi}{2d} \left[\frac{1}{c^2} \cos \frac{\pi y}{c} + \mu \frac{1}{4d^2} \left(1 + \cos \frac{\pi y}{c} \right) \right], \\ M_z &= -\frac{D\omega_0}{2} \pi^2 \cos \frac{(z+d)\pi}{2d} \left[\frac{1}{4d^2} \left(1 + \cos \frac{\pi y}{c} \right) + \mu \frac{1}{c^2} \cos \frac{\pi y}{c} \right], \\ M_{zy} &= -D(1-\mu) \frac{\omega_0}{4cd} \pi^2 \sin \frac{\pi y}{c} \sin \frac{\pi(z+d)}{2d}. \end{aligned} \quad (23)$$

Переходя к крайним значениям пластины ($y = -a, z = b$), соответствующим максимальному значению изгибающего момента, получим, что

$$\begin{aligned} M_y &= \frac{D\omega_0 \pi^2}{2c^2} = \frac{Eh^3 \omega_0 \pi^2}{24(1-\mu^2)c^2}, \\ M_z &= \frac{D\omega_0 \pi^2}{2d^2} = \frac{Eh^3 \omega_0 \pi^2}{24(1-\mu^2)d^2}, \\ M_{zy} &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

Все значения, входящие в уравнение (24), известны, кроме среднего коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью. Этот коэффициент, согласно [9], при несвободном резании определяется следующим уравнением:

$$\mu = \sqrt{\frac{[R'_z \sin \gamma + (R'_y \cos \varphi + R'_x \sin \varphi) \cos \gamma]^2 + R'_y \sin \varphi - R'_x \cos \varphi}{R'_z \cos \gamma - (R'_y \cos \varphi + R'_x \sin \varphi) \sin \gamma}}, \quad (25)$$

где R'_z , R'_y , R'_x — соответственно силы стружкообразования в направлении осей Z , Y , X .

Метод определения R'_z , R'_y , R'_x основан на следующих предположениях. Если все условия резания остаются постоянными, а увеличивается только ширина фаски износа на задней поверхности, то процесс стружкообразования обычно не изменяется, т. е. сила стружкообразования остается постоянной. Однако увеличение площади контакта задней поверхности резца с обрабатываемым материалом приводит к соответствующему росту сил на задней поверхности. Соответственно возрастает и сила резания P . Следовательно, наблюдаемое при этом приращение силы резания должно быть отнесено за счет увеличения силы, действующей на задней поверхности резца. Формулы для определения сил, действующих на задней поверхности резца, имеют вид [9]

$$P'_x = \Delta P_x \frac{\delta_1}{\Delta \delta_1}; \quad P'_y = \Delta P_y \frac{\delta_1}{\Delta \delta_1}; \quad P'_z = \Delta P_z \frac{\delta_1}{\Delta \delta_1}, \quad (26)$$

где ΔP_x , ΔP_y , ΔP_z могут быть подсчитаны как разность показаний динамометра при двух различных значениях ширины фаски на задней поверхности.

$\Delta \delta_1$ — приращение фаски на задней грани резца,

δ_1 — ширина фаски на задней грани резца.

Как следует из (26), для определения сил на задней поверхности принципиально достаточно иметь динамометрическое показание сил резания при двух различных величинах фаски на задней поверхности резца. В наших условиях величины фасок соответственно равны 0,2 и 0,6, изготовленные с точностью $\pm 0,05$ мм.

Рассматриваемый метод определения сил на задней грани уместен, если изменение ширины фаски на задней грани не вызывает изменения усадки стружки. В наших условиях коэффициент усадки стружки при вышеуказанных значениях фаски практически оставался постоянным.

Полученные результаты приведены в табл. 1. Таким образом, силы стружкообразования R'_z , R'_y и R'_x можно получить как разность двух экспериментально регистрируемых сил:

$$R'_z = P_z - P'_z; \quad R'_y = P_y - P'_y; \quad R'_x = P_x - P'_x, \quad (27)$$

После определения значений M_y и M_z можно подсчитать по уравнению (21) значения σ_y и σ_z . Напряжение $\sigma_{\max}$ на передней поверхности резца определяется следующим выражением:

Таблица 1

Материал	Скорость	Сила по оси z			Сила по оси y			Сила по оси x			P_z	P_y	P_x	Сила стружкообразования		
		$\delta_1=0.2$	$\delta_2=0.6$	P'_z	$\delta_1=0.2$	$\delta_2=0.6$	P'_y	$\delta_1=0.2$	$\delta_2=0.6$	P'_x				R'_z	R'_y	R'_x
Железо Армо	3	178,6	223,6	22,5	95,1	143,1	24	84	126	21	165	90	68	142,5	66	47
	8	157,8	182,4	12,8	79,4	105,6	13,1	80,1	104,8	12,4	153	78	57,9	140,2	64,9	45,5
	20	186,3	274,7	44,2	117,5	229,5	56	90,2	164,7	37,2	180	114	78,2	135,8	58	41
	36	201,9	349,4	73,6	100,4	215,4	97,6	98,2	224,5	63	204,6	150,6	99,3	130,3	53	36,3
Сталь У8А	3	150,4	172,4	11	75,4	119,4	22	74,2	104,2	15	135,3	60	38	124,3	38	23
	8	134,7	147,2	6,8	69,5	108,5	19,5	70,1	95,1	12,5	125,4	55	33,5	118,6	35,5	21
	20	169,2	245,4	38,1	92,7	198,7	53	84,5	149,5	32,5	155,1	84,8	50,7	117	31,8	18,2
	36	184,9	299,3	57,2	91,8	253,8	81	92,7	182,7	45	172,2	110	60,8	115	29	15,8

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (28)$$

В табл. 2 приведены значения используемых величин. Как показывают уравнения (9) и (11), для определения нормальных и касательных сил на передней грани резца необходимо определить значения нормальных и касательных напряжений по уравнениям (1) и (2). Однако эти силы невозможно определить, так как неизвестна длина контакта стружки B с передней поверхностью резца и показатель, характеризующий форму эпюры нормальных напряжений на той же поверхности. Ввиду того, что распределение давлений нами рассматривается по закону треугольника, с небольшим допущением можно подсчитать значения B следующим уравнением [10]:

$$B = \frac{2a \cos \theta}{\sin(\theta + \beta_1 - \gamma) \sin \beta_1 \cos(\beta_1 - \gamma)}, \quad (29)$$

где a — толщина среза,

θ — угол трения: $\operatorname{tg} \theta = \mu$,

β_1 — угол сдвига,

γ — передний угол.

Таблица 2

Сталь У8А				Железо Армо				Материал
36	20	8	3	36	20	8	3	Скорость
132,3	126,5	122,9	120	164,9	161,2	153,3	145,9	$R_z'^2 + R_y'^2 + R_x'^2$
1,62	1,48	1,37	1,3	2,15	1,92	1,79	1,66	$2 d, \text{ мм}$
2,47	2,23	2,04	2,0	3,26	2,92	2,68	2,53	$2 c, \text{ мм}$
0,47	0,5	0,54	0,6	0,71	0,76	0,81	0,88	μ
2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	$h, \text{ мм}$
$2,10^4$	$2,10^4$	$2,10^4$	$2,10^4$	$7,810^4$	$1,810^4$	$1,810^4$	$1,810^4$	$E, \text{ кг/мм}^2$
4,0	3,3	3,3	2,6	7,0	5,6	4,8	4,2	$F=2c-2 d, \text{ мм}^2$
33,1	38,3	38,3	46,4	23,5	28,8	31,9	34,7	$\sigma_0, \text{ кг/мм}^2$
$4,10^{-4}$	$4,10^{-4}$	$4,10^{-4}$	$2,910^{-4}$	$13,10^{-4}$	$9,210^{-4}$	$7,610^{-4}$	$8,210^{-4}$	$\omega_0, \text{ мм}$
44,4	43,3	43,3	39,2	60	53	51,6	47,3	σ_y
101,7	98,5	98,5	92,8	137,4	121,4	116	109,6	σ_z
111	107	102	100,4	149	132	127	121	$\sigma_{\max}$

Показатель n подсчитывается, полагая, что напряжения на плоскости сдвига распределяются равномерно и по рекомендации [5] определяются как

$$n = 2 \left\{ \frac{B}{a \zeta [\mu + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma)]} - 1 \right\}, \quad (30)$$

где ζ — усадка стружки.

В табл. 3 приведены все значения для подсчета n и B . Из табл. 3 видно, что с увеличением скорости резания увеличиваются нормальные и касательные удельные нагрузки на передней и задней поверхностях. Таким образом, напряжение на передней поверхности резца в основном зависит от скорости резания.

Таблица 3

Материал	$V, \text{ м/мин}$	Толщина среза $a, \text{ мм}$	Ширина среза $b, \text{ мм}$	φ_1°	θ°	$B, \text{ мм}$	ζ	n	$N, \text{ кг}$	$F, \text{ кг}$	$q_N, \text{ кг/мм}^2$	$q_F, \text{ кг/мм}^2$	$q_{N\text{ср}}, \text{ кг/мм}^2$
Железо Армко	3	0,433	1,155	7°	44°12'	6,1	6,01	3,02	105	101,7	14,9	15	21
	8	0,433	1,155	8°12'	39°42'	4,8	5,81	2,8	118	97,6	21,3	18	28
	25	0,433	1,155	9°54'	47°30'	4,2	5,55	2,24	109	118,6	22,3	24	33
	36	0,433	1,155	11°48'	53°18'	3,6	4,62	1,62	98	131,5	23,5	32	39
Сталь У8А	3	0,433	1,155	15°12'	37°18'	3,5	2,65	3,04	95	72,7	23,6	18	30
	8	0,403	1,155	19°42'	36°42'	2,9	2,36	2,84	99	73,4	29,4	22	37
	20	0,433	1,155	24°54'	40°42'	2,4	2,09	2,76	96	82,1	34,7	30	46
	36	0,433	1,155	27°24'	44°30'	2,2	1,82	2,32	94	92,5	37,	36	52

Показатель n при этом показывает, что эпюра семейства кривых нормальных и касательных напряжений приближается к кубической параболе.

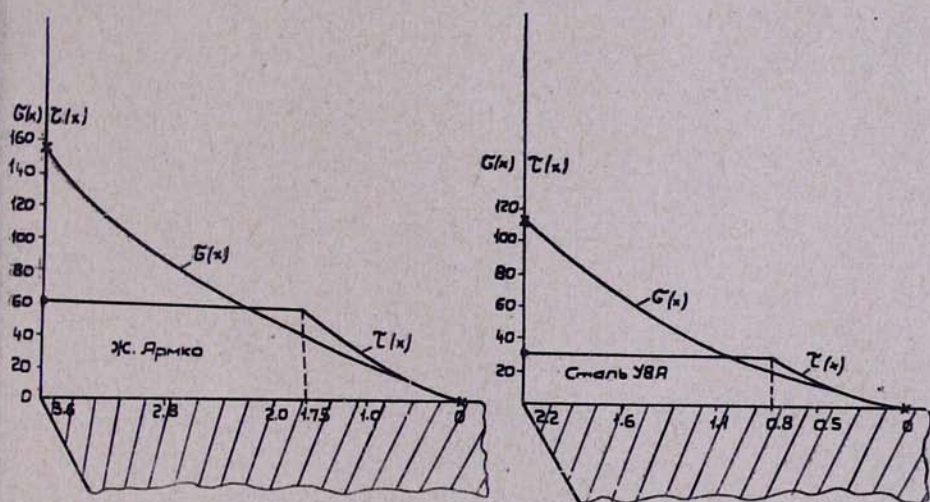


Рис. 7. Эпюры нормальных и касательных напряжений при строгании стали У8А и железа Армко резцом Т5К10. Режимы резания $V = 36 \text{ м/мин}$, $S = 0,5 \text{ мм/дв. ход}$, $t = 1 \text{ мм}$.

Таким образом, для построения эпюры нормальных и касательных напряжений на передней части резца необходимо рассчитать σ по (1) и τ по (2), применяя для этого все данные, приведенные в табл. 2 и 3.

Эпюра изменения контактных нормальных и касательных напряжений построена для $V=36$ м/мин при обработке стали У8А и железа Армко (рис. 7).

ВЫВОДЫ

1. Исследование показало, что контактное давление на передней поверхности по мере удаления от режущей кромки резца плавно уменьшается, сначала быстро, а затем медленно и становится равным нулю в точке отхода стружки от резца.

2. Свойства обрабатываемого материала не оказывают существенного влияния на форму кривых контактных напряжений (показатель n).

3. Толщина среза и передний угол на форму кривых контактных напряжений влияют слабо.

4. При расчете контактных напряжений на передней поверхности резца можно применять рекомендации [5], [7], [8].

§ 2. Напряжения на задней поверхности резца

Согласно известной гипотезе, контакт между задней поверхностью резца и поверхностью резания возникает в результате волны упругого восстановления, которая следует за волной пластической деформации, опережающей резец [4]. Этот контакт имеет упруго-пластический характер и весьма ограниченную площадь соприкосновения. Некоторые исследователи, в том числе А. М. Розенберг, Ю. П. Зимин, М. Э. Иткин и другие обстоятельно изучали силы на задней грани в зависимости от условий резания. Однако основательное исследование состояния силы на задней поверхности резца проводил Н. Н. Зорев [9]. Ему же принадлежит разработка нескольких методов экспериментального определения сил на задней поверхности. Он впервые теоретически обосновал характер образования этих сил.

В последнее время установлен, что силы на задней поверхности резца не зависят от толщины среза. Для условий постоянной усадки стружки и температуры контакта это положение является основой разделения сил на задней поверхности резца методом экстраполяции силы резания на нулевую толщину среза.

Как известно, в общем случае площадка контакта резца на задней поверхности состоит из трех участков [4]:

- а) переходная поверхность скругления DE (рис. 8),
- б) плоская поверхность или фаска EM ,
- в) участок собственно задней поверхности MN .

Для определения сил, действующих на этих участках резца, нами проведены опыты на материалах сталь СТЗ и железо Армко, с изменением геометрических параметров R_1 и ρ резца соответственно в диапазонах 0,03—1,2 мм и 0,03—0,5 мм (режимы резания и остальные геометрические параметры резца оставались постоянными).

Увеличение R_1 и ρ вызывает увеличение поверхности упругопластического контакта и этим самым способствует возрастанию сил на задней грани.

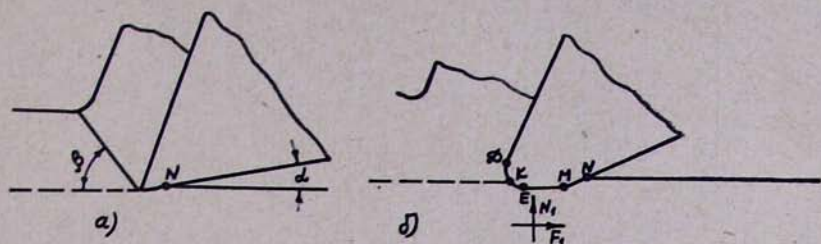


Рис. 8. Общий реальный случай контакта задней поверхности резца с поверхностью резания: а—идеальный острый резец, б—реальный случай.

Учитывая, что из всех основных геометрических параметров резца большое влияние на силы N_1 и F_1 оказывают параметры R_1 и ρ , в ходе опытов уделено большое внимание этим величинам. Касательные и нормальные силы, действующие на задней грани резца, определяются экстраполированием экспериментальных значений величин вертикальной и горизонтальной проекции силы резания на нулевую толщину среза [9]. Результаты исследований двух материалов приведены в логарифмической сетке координат (рис. 9), в табл. 4.

Как видно на графике (рис. 9), при больших значениях R_1 и ρ силы, действующие на задней поверхности резца, соответственно велики. Табл. 4 составляется, исходя из графика (рис. 9).

Таблица 4

R_{1n} ρ , мм	Материалы	$P_{z \text{ з.гр.}}$, кг	$P_{y \text{ з.гр.}}$, кг	$P_{x \text{ з.гр.}}$, кг	N_1 , кг	F_1 , кг
$R_1 = 1,0$	Железо Армко	63,1	25,2	3,2	25,4	4,6
	Сталь СТЗ	44,7	20,4	2,8	20,6	3,7
$R_1 = 0,3$	Железо Армко	42,6	19,4	4,5	19,9	3,6
	Сталь СТЗ	39,8	14,8	3,02	14,9	2,7
$\rho = 0,4$	Железо Армко	50,1	28,2	11,2	30,3	5,5
	Сталь СТЗ	39,8	21,3	7,94	23,0	4,2
$\rho = 0,1$	Железо Армко	31,6	16,6	17,8	24,0	4,4
	Сталь СТЗ	28,2	14,1	8,9	16,8	3,0

Имея эти значения (табл. 4), можно по уравнениям, предложенным [9], определить N_1 и F_1 , действующие на задней поверхности резца:

$$N_1 = \sqrt{P_{y \text{ з.гр.}}^2 + P_{x \text{ з.гр.}}^2}; \quad F_1 = N_1 \operatorname{tg} \gamma \quad \text{в кг.} \quad (31)$$

В данном параграфе уделяется особое внимание определению удельных давлений на задней поверхности резца, считая, что этим можно полностью оценить напряженное состояние резца.

При определении контактных максимальных напряжений на задней поверхности резца напряжения рассматривались независимыми от со-

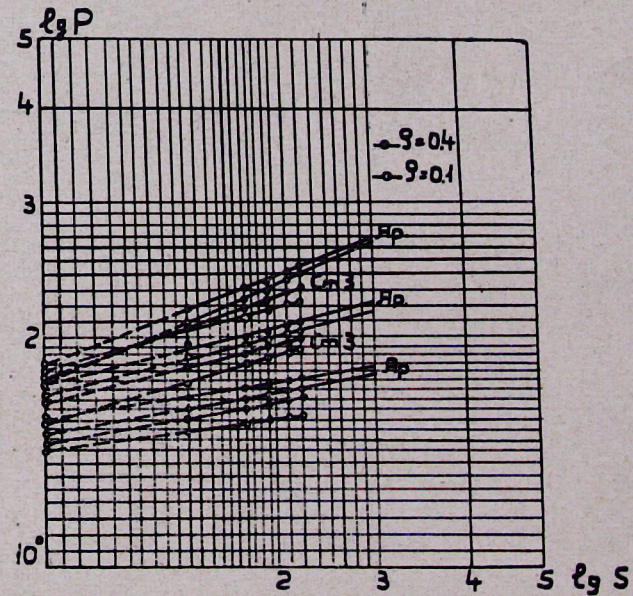
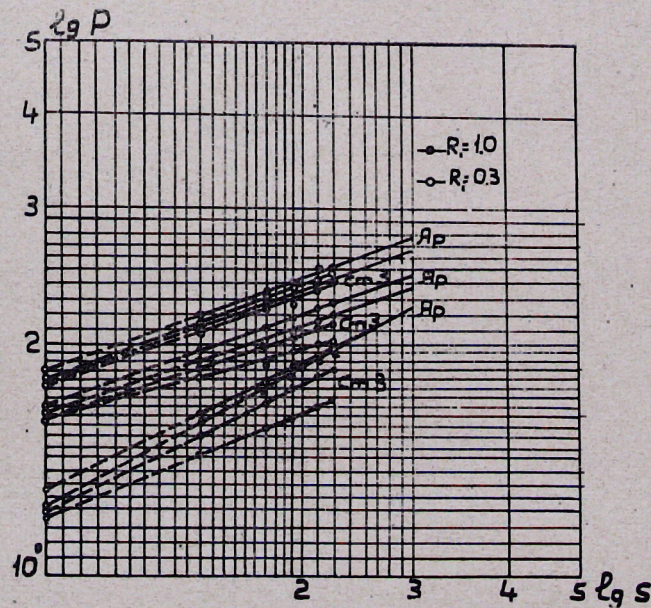


Рис. 9. Определение силы $P_{з.гр}$ резца экстраполированием сил резания на нулевую толщину среза при изменении R_1 и ρ .

ставляющих силы стружкообразования. Обычно для анализа давлений на задней поверхности резца принимается плоская задача теории упругости, где необходимые силы, действующие на переднюю поверхность резца, приведены к линии раздела AB , что показано на рис. 10.

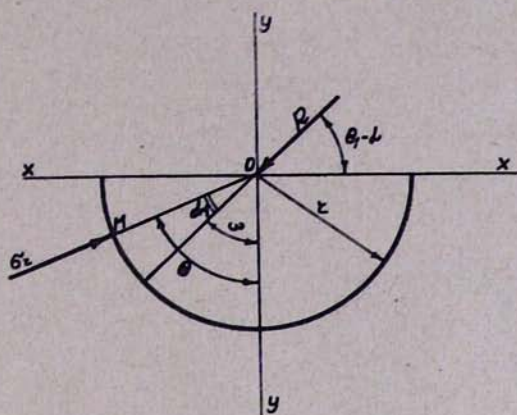


Рис. 10. Схема определения коэффициента K .

Напряжение в любой точке M полуплоскости, согласно [11], описывается следующей функцией:

$$\sigma_r = - \frac{K_1 \cos \alpha_1}{r}. \quad (32)$$

Для определения коэффициента K_1 в выражении (32) выделим вокруг силы R элемент радиуса r (рис. 10) и составим уравнение равновесия. Решение уравнения, как предлагает [11], приводит к окончательному заключению, что:

$$K_1 = \frac{2 R_{\text{стр.}}}{\pi b}. \quad (33)$$

Подставив значение K_1 в уравнение (32), получим:

$$\sigma_r = - \frac{2 R_{\text{стр.}}}{\pi b r} \cos \alpha_1 \quad (34)$$

Учитывая, что $\alpha_1 = \theta - \omega$, $\omega = 90^\circ - (\theta_1 - \gamma)$ и преобразуя (34), получим, что

$$\sigma_r = \frac{2 R_{\text{стр.}} \cos (\theta_1 - \gamma)}{\pi b r} \left[\sin \theta + \operatorname{tg} (\theta_1 - \gamma) \cos \theta \right], \quad (35)$$

Для перехода к декартовой системе координат необходимо воспользоваться формулами перехода:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_r \sin^2 \theta; & r &= \sqrt{x^2 + y^2}; \\ \sigma_y &= \sigma_r \cos^2 \theta; & \cos \theta &= \frac{y}{r} \end{aligned}$$

$$\tau_{xy} = \sigma_r \cos \theta \sin \theta; \quad \sin \theta = -\frac{x}{r}.$$

После перехода получаем, что

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{-2R \cos(\theta_1 - \gamma)}{\pi b} \left[-\frac{x^3}{(x^2 + y^2)^2} + \operatorname{tg}(\theta_1 - \gamma) \frac{yx^2}{(x^2 + y^2)^2} \right]; \\ \sigma_y &= \frac{-2R \cos(\theta_1 - \gamma)}{\pi b} \left[-\frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2} + \operatorname{tg}(\theta_1 - \gamma) \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2} \right]; \\ \tau_{xy} &= \frac{-2R \cos(\theta_1 - \gamma)}{\pi b} \left[-\frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^2} + \operatorname{tg}(\theta_1 - \gamma) \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2} \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

Полагая, что вдоль плоскости АВ действуют напряжения, равные сопротивлению пластическому сдвигу материала $\tau_{сдв.}$, и пренебрегая фактором сложности напряженного состояния, согласно [12], получим, что сила стружкообразования

$$R = \frac{\tau_{сдв.} a \cdot b}{\sin \beta_1 \cos(\beta_1 + \omega_1)}. \quad (37)$$

Подставляя в уравнения (36) значение (37), а также значения $\omega_1 = \theta_1 - \gamma$, получим

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{2\tau_{сдв.} a \cdot \cos \omega_1}{\pi \sin \beta_1 \cos(\beta_1 + \omega_1)} \left[\frac{-x^3}{(x^2 + y^2)^2} + \operatorname{tg} \omega_1 \frac{yx^2}{(x^2 + y^2)^2} \right]; \\ \sigma_y &= -\frac{2\tau_{сдв.} a \cdot \cos \omega_1}{\pi \sin \beta_1 \cos(\beta_1 + \omega_1)} \left[\frac{-xy^2}{(x^2 + y^2)^2} + \operatorname{tg} \omega_1 \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2} \right]; \\ \tau_{xy} &= -\frac{2\tau_{сдв.} a \cdot \cos \omega_1}{\pi \sin \beta_1 \cos(\beta_1 + \omega_1)} \left[\frac{-x^2 y}{(x^2 + y^2)^2} + \operatorname{tg} \omega_1 \frac{y^2 x}{(x^2 + y^2)^2} \right]. \end{aligned} \quad (38)$$

Имея напряжения σ_x , σ_y и τ_{xy} , согласно условию Мизеса, найдем главное напряжение плоско-напряженного состояния под режущей кромкой резца [13]

$$\sigma'_{\max} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + \tau_{xy}^2}. \quad (39)$$

Подсчеты выполнены для сечения, отстающего от плоскости резания на расстояние $y=1$, с учетом следующих условий строгания:

- а) обрабатываемый материал — сталь У8А, железо Армко;
- б) скорость резания — $V=8$ м/мин и $V=36$ м/мин;
- в) остальные параметры — *const.*

Обозначая через A значение $-\frac{2\tau_{сдв.} a \cos \omega_1}{\pi \sin \beta_1 \cos(\beta_1 + \omega_1)}$, на основании принятых условий получаем для $y=1$ следующие уравнения:

$$\sigma_x = A \left[\frac{-x^3}{(1+x^2)^2} + \operatorname{tg} \omega_1 \frac{x^2}{(1+x^2)^2} \right];$$

$$\sigma_y = A \left[\frac{-x}{(1+x^2)^2} + \operatorname{tg} \omega_1 \frac{1}{(1+x^2)^2} \right]; \quad (40)$$

$$\tau_{xy} = A \left[\frac{x^2}{(1+x^2)^2} + \operatorname{tg} \omega_1 \frac{1}{(1+x^2)^2} \right].$$

Как показывают подсчеты и эпюры напряжений (рис. 11), с повышением твердости обрабатываемого материала средний коэффициент трения на задней поверхности снижается, хотя силы N_1 и F_1 при этом увеличиваются. Следовательно, в зависимости от N_1 и F_1 начинают возрастать нормальные и касательные напряжения.

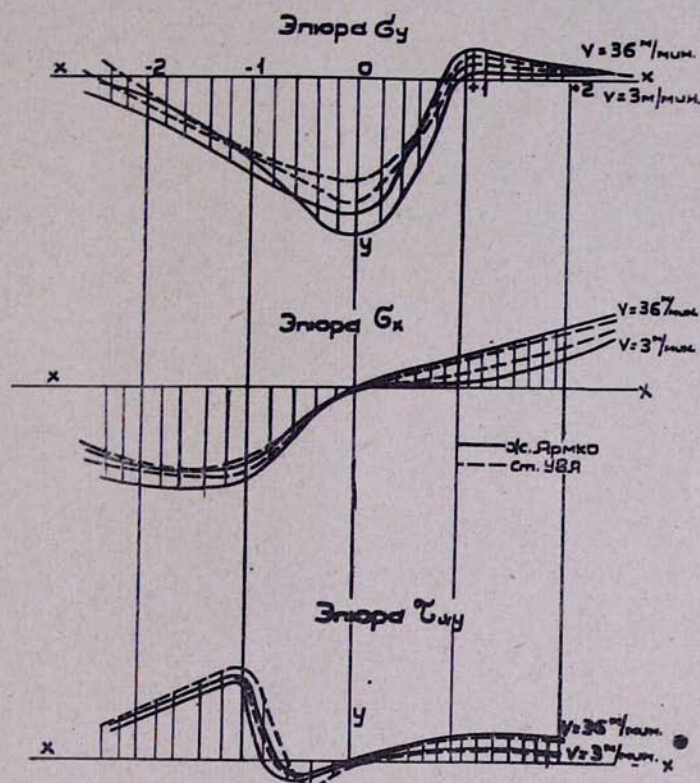


Рис. 11. Эпюры напряжений на задней грани резца.

Таким образом, чем тверже металл, тем меньше нормальные и касательные напряжения на задней поверхности резца (табл. 5). При этом необходимо отметить, что максимальные значения напряжений получаются в сечениях 0—0 и 1—1.

Тенденция к росту сил на задней поверхности с повышением пластичности материала особенно четко выражена для нормальной силы N_1 . Это положение можно свободно распространить также на нормальные и касательные напряжения по задней поверхности резца в сечениях 0—0 и 1—1.

Кроме обрабатываемого материала, на контактные напряжения по задней поверхности резца действуют и режимы резания.

Проведенные опыты показывают, что с увеличением скорости резания увеличивается напряжение на задней поверхности резца. При малых скоростях резания значения контактных напряжений уменьшаются. Это связано с тем, что, начиная с некоторой величины, уменьшение скорости резания приводит к значительному развитию застойной зоны на передней поверхности резца. Развитая застойная зона выступает за режущую кромку и в той или иной степени разгружает заднюю поверхность резца от воздействия сил упругой реакции обрабатываемого материала, что приводит к уменьшению сил и соответственно нормальных и касательных напряжений на задней поверхности резца [9].

Из вышеприведенных рассуждений вытекает несколько важных выводов.

1. Эпюры контактных напряжений на задней поверхности резца позволяют заключить, что сплошной пластический участок контакта на задней поверхности либо весьма мал, либо отсутствует.
2. Определение нормальной и касательной сил на задней поверхности показало, что они не зависят от толщины среза.
3. Нормальные и касательные силы на задней поверхности резца зависят от механических свойств обрабатываемого материала и усадки стружки, с увеличением которых соответственно увеличиваются.

§ 3. Влияние контактных напряжений на образование вибраций при резании

Определение контактных напряжений при резании дает возможность решить ряд задач, тесно связанных с практикой: в частности, чистота обработанной поверхности, прочность и износ режущего инструмента, динамическое неустановившееся перемещение основных узлов станка и т. д.

Неустойчивость системы при резании объясняется циклическим изменением угла сдвига β_1 при некоторых значениях условий резания. В работе [14], при образовании стружки скалывания, показывается, что угол сдвига подвергается изменению от β_2 до β_1 , причем это изменение действует на напряжения σ и τ , и они становятся зависящими от времени, т. е. от значения угла сдвига.

В первый момент, когда угол сдвига имеет свое максимальное значение, напряжение σ увеличивается, а τ уменьшается. Затем меняется зона сдвига по отношению к силе резания на передней поверхности резца. Как известно, при плоском напряженном состоянии в зоне сдвига действует условие пластичности Мизеса в следующем виде:

$$\sigma^2 + 3\tau^2 = K_0^2, \quad (41)$$

где K_0 — предел текучести материала при одноосном растяжении и сжатии.

Необходимо отметить, что металл все еще может оставаться в пластическом состоянии и даже тогда, когда увеличивается σ и уменьшается τ , что вытекает из уравнения (41). Когда, наконец, $\tau = 0$, условие Мизеса принимает вид

$$\sigma = K_0. \quad (42)$$

В этом случае металл переходит в пластическое состояние только под действием нормального напряжения σ , но это состояние очень не-продолжительно, хотя нормальное напряжение образует большую пластическую область перед резцом. В данном случае отсутствует течение стружки, и резания не происходит. Это состояние заканчивается тем, что начинает образовываться новая зона сдвига с наименьшим углом сдвига β_1 . Здесь условие текучести принимает следующий вид:

$$K_0 = \sqrt{3} \tau, \quad \text{где } \sigma = 0. \quad (43)$$

Когда $\sigma = 0$, начинает образовываться новый элемент стружки — «зубец», и угол сдвига снова начинает увеличиваться, приводя плоскость сдвига, в конечном счете, в такое положение, когда сдвигающий компонент отсутствует, т. е. когда $\tau = 0$ [15]. В этот момент сила резания на резце будет иметь пик, потому что при пластической деформации металла за счет только нормальной силы требуется силы больше, чем когда деформация вызывается сдвигом. Это явление называется циклическим образованием стружки, которое характерно проявляется при изменении скорости резания. Поэтому интересно рассмотреть, как влияет изменение скорости резания на частоту и амплитуду.

Как указывается в [15], когда при резании режущая кромка движется через металл, конец зоны сдвига, примыкающий к кромке, движется в металле с той же скоростью, как и другой конец зоны сдвига, близкий к обрабатываемой поверхности.

При циклическом образовании стружки увеличение угла сдвига тормозит продвижение конца зоны сдвига вблизи обрабатываемой поверхности, вследствие чего она движется в металле со скоростью, меньшей, чем скорость резания. Здесь принимаем, что скорость движения, близкая к поверхности конца зоны сдвига, имеет постоянную величину V_0 , меньшую, чем скорость резания.

Для аналитического выражения частоты и амплитуды пользуемся схемой резания, предложенной [15]. Если обозначим время T , которое потребуется для полного перехода от β_1 до β_2 , то тогда

$$l = T(V - V_0),$$

$$\text{а так как} \quad \omega = \frac{1}{T},$$

$$\text{то} \quad \omega = \frac{V - V_0}{a} \cdot \frac{1}{\text{ctg } \beta_1 - \text{ctg } \beta_2}, \quad (44)$$

где V — скорость резания, V_0 — средняя скорость движения кон-

ца зоны сдвига, близкого к поверхности за период увеличения угла сдвига от β_1 до β_2 .

Таблица 5

Сталь У8А		Железо Армико		Материал	
36	8	36	8	Скорость резания	
51	59,5	31,1	36,7	$\tau_{\text{сдв.}}$	кг/мм^2
0,433	0,433	0,433	0,433	a	мм
34°30'	26°54'	43°18'	29°42'	ω_1	
31°6'	22°	13°42'	9°42'	β_1	
-54,1	-59,7	-48,6	-69,7	A	кг/мм^2
0	0	0	0	σ_x	$X = 0$
-37,4	-30,3	-45,8	-39,8	σ_y	
0	0	0	0	τ_{xy}	
4,2	7,4	0,68	8,2	σ_x	$X = 1$
4,2	7,4	0,68	8,2	σ_y	
4,2	7,4	0,68	8,2	τ_{xy}	
-23	-22,5	-23,6	-27,2	σ_x	$X = -1$
-23	-22,5	-23,6	-27,2	σ_y	
23	22,5	23,6	27,2	τ_{xy}	
11,1	14,3	8,2	16	σ_x	$X = 2$
2,8	3,6	2,05	4	σ_y	
5,6	7,2	4,1	8	τ_{xy}	
-23,4	-24	-22,9	-28,7	σ_x	$X = -2$
-5,9	-6	-5,7	-7,2	σ_y	
11,7	12	11,4	14,4	τ_{xy}	

Известно [9], что относительный сдвиг при достаточно больших пластических деформациях определяется следующим уравнением:

$$\xi = \operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2. \quad (45)$$

Кроме того, есть и другая связь между напряжением сдвига и деформацией относительного сдвига, которая выражается с достаточной точностью показательной функцией

$$\tau = A \epsilon^m, \quad (46)$$

где A — константа, характеризующая предел текучести материала на сдвиг при относительном сдвиге, равном единице (т. е. $\tau = \epsilon^m$)
 m — константа, характеризующая способность материала к упрочнению при пластической деформации.

Подставляя значения уравнений (5) и (46) в (44), получим:

$$\omega = \frac{V - V_0}{a} \cdot \frac{1}{\tau^{1/m}} = \frac{V - V_0}{a} \cdot \frac{B^{n/m}}{[\mu_{\max}(B - B_1)^n]^{1/m}}. \quad (47)$$

Что касается амплитуды, то можно без небольших погрешностей предложить следующее выражение:

$$A_0 = a \cos \gamma (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) = a \cos \gamma \left[\frac{\mu z_{\max} (B - B_1)^n}{B^n} \right]^{1/m}. \quad (48)$$

Таким образом, получается, что частота и амплитуда колебаний при резании в основном зависят от контактных напряжений в зоне резания.

Визуальным наблюдением за процессом резания установили, что неустойчивость процесса отражается на внешнем виде стружки и обработанной поверхности. Эта неустойчивость выражается на стружке в пилообразном сечении, передняя часть которого имеет закругленную форму, что вызвано сжатием, происходящим при изменении угла сдвига от β_2 до β_1 .

Опыты при строгании стали У8А и железа Армко показали хорошее совпадение результатов эксперимента с расчетными данными (табл. 6).

Таблица 6

Материал	Скорость резания	$\sigma_{\max}$	m	Расчетные данные		Результаты экспериментов	
				ω , 1/сек	A_0 , мм	ω , 1/сек	A_0 , мм
Железо Армко	8	127	0,36	569	0,14	553	0,12
	36	149	0,62	2089	0,47	2114	0,494
Сталь У8А	8	102	0,42	801	0,071	781	0,08
	36	111	0,55	2210	0,437	2300	0,421

Эти исследования показали, что контактные напряжения на передней поверхности резца имеют большое влияние на появление колебаний при резании металлов. Чем больше контактные напряжения на резце, тем больше вибрирует система СПИД и тем больше он подвергается перемещению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Т. Васильев, Силы на режущих поверхностях инструмента, «Станки и инструмент», № 4, 1954.
2. Г. С. Андреев, Исследование напряжений в рабочей части резца поляризационно-оптической установки с применением киносъемки, «Вестник машиностроения», № 5, 1958.
3. Н. Takeyama, E. A. Usui, Photoelastic Analysis of Machining Stresses. „Transactions of the ASME“, Journal of the Engineering for Industry, 1960, p. 82, № 4.
4. М. Ф. Полетика, Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента, Гостехиздат, «Машиностроение», 1969.
5. Н. Н. Зорев, О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента, «Вестник машиностроения», № 12, 1963.
6. W. Kattwinkel, Untersuchungen an Schneiden Spanender Werkzeuge mit Hilfe der Spannungsoptik, „Industrie—Anzeiger“, № 36, 1957.
7. С. Д. Пономарев и др., Расчеты на прочность в машиностроении, Машгиз, т. 2, 1953.

8. Б. Г. Галеркин, Упругие тонкие плиты, Маштехиздат, 1933.
9. Н. Н. Зорев, Вопросы механики процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
10. М. И. Клушин, Расчет режущей части инструмента на прочность, «Станки и инструмент», № 2, 1958.
11. С. Н. Никифоров, Теория упругости и пластичности, Машиздат, 1933.
12. Н. Н. Зорев, Расчет проекций силы резания, Машгиз, 1956.
13. Ю. Н. Работнов, Сопротивление материалов, Физматиздат, 1958.
14. Г. Б. Багдасарян, Изучение виброустойчивости строгального станка типа 7М36, «Изв. АН Арм. ССР», серия тех. наук, № 2, 1970.
15. Альбрехт, Автоколебания при резании металлов. Конструирование и технология машиностроения, США, т. 84, серия В, № 4, 1962.