

износа. Остаточная (пластическая) составляющая деформации, обнаруженная нами при резании латуни, в данном случае отсутствует, а имеет место деформация восстановления, упругая и линейно связанная с силой P_y .

Л и т е р а т у р а

1. А ф о н а с о в А.И. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ТПИ.
2. П о л е т и к а М.Ф., В л а с о в П.В. "К вопросу об определении сил на задней грани резца" Сборник докладов III научно-технической конференции ТПИ. 1971.
3. К р а с и л ь н и к о в В.А., П о л е т и к а М.Ф. Применение полупроводниковых тензорезисторов в приборах для измерения сил резания. Известия ТПИ, том 225, 1972.

В.И.Лепилин

О ЕСТЕСТВЕННОМ ЗАВИВАНИИ СТРУЖКИ

Многими исследователями установлено [1,2,3], что при образовании каждого элемента стружки сжатие металла, лежащего за поверхностью скалывания A_0B_0 (рис.1) и частично уже подвергшегося некоторой деформации, начинается в точке B_0 одновременно с началом сдвига ранее сформированного элемента.

Тщательное изучение кадров скоростной микрокиносъемки процесса образования элемента стружки со всей очевидностью показывает, что в начальный момент металл около точки B_0 , приходя в контакт с передней поверхностью резца под действием сил трения, на мгновение затормаживается, а в следующее мгновение уже оказывается блокированным в этом (т.е. в заторможенном) положении пластически деформируемым объемом металла, имеющим клинообразную форму с углом β_1 , и превращается таким образом в застойную зону. По мере перемещения резца и вовлечения в пластическую деформацию все большего и большего объема металла (в связи с его клинообразной формой) растет и объем застойной зоны, достигая значительной величины к моменту окончания формирования элемента.

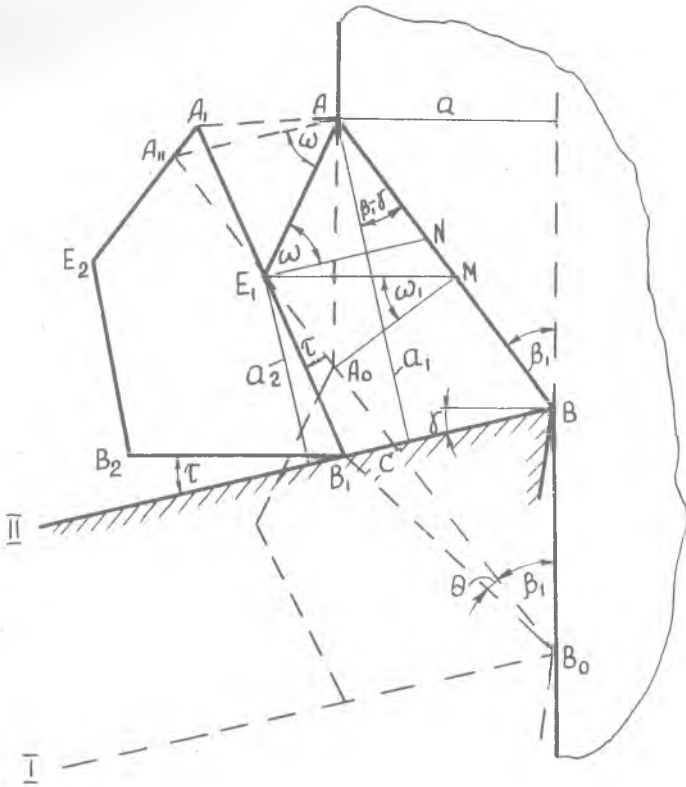


Рис. 1. Схема образования элементов стружки

Деформация объема металла специфической формы при заостре вблизи режущей кромки приводит к тому, что металл, расположенный на ранее образовавшейся поверхности скалывания (A_0B_0) и принадлежащий вновь образуемому элементу, входит в контакт с передней поверхностью резца, т.е. выходит на прирезцовую сторону B_1V элемента ABV_1E_1 . При этом к моменту окончания формирования элемента его сторона E_1V_1 станет короче поверхности скалывания $A_1V_1=A_0B_0$ на величину, необходимую для образования прирезцовой стороны V_1B .

Выходя с поверхности скалывания на поверхность контакта с резцом, металл подвергается деформации сжатия. Приращение контактной поверхности в результате сжатия составляет величину CB_I [3]. Таким образом, можно предполагать, что размер $B_I B = BC + CB_I$ сформировался из металла, вышедшего с поверхности скалывания, и его уширения от сжатия $-CB_I$. А это значит, что $BC = B_I B - CB_I = A_I B_I - E_I B_I = A_I E_I$. Поскольку с надрезковой стороны элемента отсутствует препятствие для перемещения металла, положение поверхности AE_I определяется деформацией сдвига, и размер $E_I N$ практически не зависит от величины деформации сжатия, то можно принять

$$E_I N = BC = A_I E_I.$$

Приняв $E_I N$ за размер m элемента стружки на высоте a_2 от прирезковой стороны, определим его величину:

$$m = A_I E_I = A_I B_I - E_I B_I.$$

Из рис. 1

$$A_I B_I = AB = \frac{a_1}{\cos(\beta_1 - \gamma)}; \quad E_I B_I = \frac{a_2}{\cos(\beta_1 - \gamma - \tau)},$$

Следовательно,

$$m = \frac{a_1}{\cos(\beta_1 - \gamma)} - \frac{a_2}{\cos(\beta_1 - \gamma - \tau)}. \quad (1)$$

При образовании стружки с большим радиусом закругления угол τ мал и можно принять

$$m \approx \frac{a_1 - a_2}{\cos(\beta_1 - \gamma)}. \quad (2)$$

Сопоставление величины m с величинами, полученными непосредственным измерением на стружках различных сплавов, указывает на вполне удовлетворительную сходимость результатов^{х)}. Так, если экспериментальные величины (a_1 ; a_2 ; β_1 и m) определяются как средние из пяти-семи измерений, то погрешность расчетной величины m не превышает $\pm 8\%$.

х) Следует иметь в виду, что при наличии разрыва между элементами по поверхностям скалывания m не равна шагу элементов стружки.

Как уже отмечалось, в результате деформации сжатия прирезцовая поверхность элемента к концу его формирования получает приращение B_1C . В связи с этим поверхность E_1B_1 только что сформировавшегося элемента, а вместе с ней и ранее сформировавшийся элемент повернутся на угол τ . Это явление приводит к так называемому естественному завиванию стружки. Связь между углом τ и размером B_1B элемента по прирезцовой стороне может быть определена следующим образом:

$$B_1B = m + B_1C.$$

$$\frac{B_1C}{E_1B_1} = \frac{\sin \tau}{\cos(\beta_1 - \gamma)}; \quad E_1B_1 = \frac{a_2}{\cos(\beta_1 - \gamma - \tau)}$$

и, следовательно,

$$B_1B = m + \frac{a_2 \sin \tau}{\cos(\beta_1 - \gamma) \cos(\beta_1 - \gamma - \tau)}. \quad (3)$$

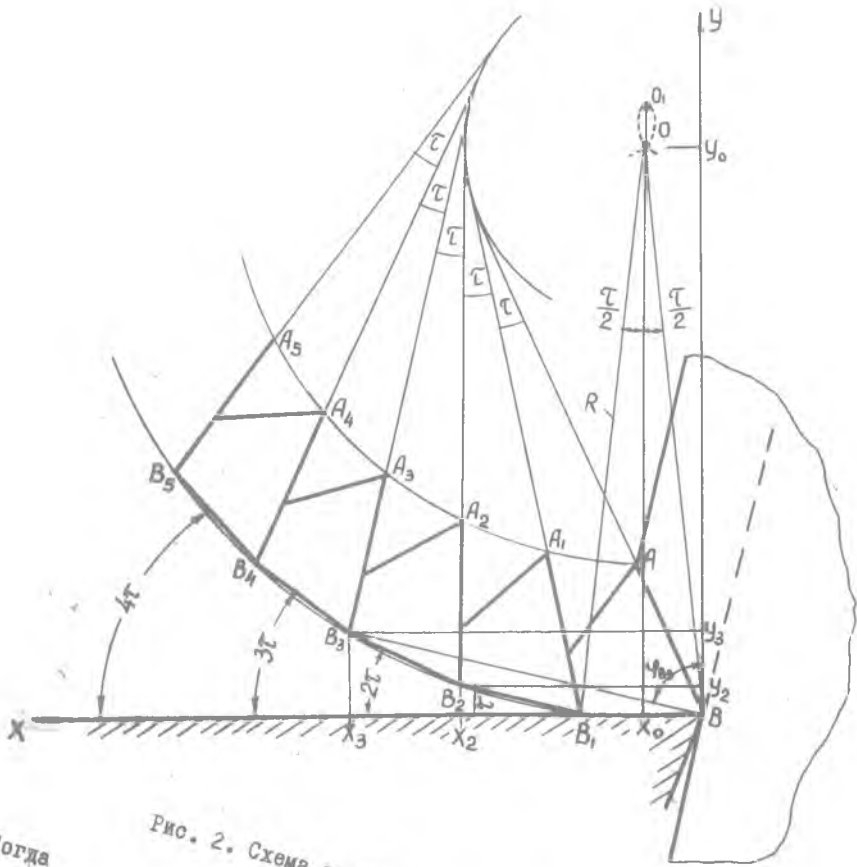
Если пренебречь упругим изменением формы образовавшегося элемента после выхода его из контакта с передней поверхностью, то прирезцовая сторона стружки будет состоять из отрезков равных B_1B и расположенных относительно друг друга под углом τ (рис.2). Пусть начало координат лежит на режущей кромке (в точке В), и ось X направлена касательно к передней поверхности реза. Тогда координаты точек сопряжения прирезцовых сторон элементов в стружке будут определяться следующим образом

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= B_1B; & X_2 &= X_1 + B_1B \cos \tau \\ Y_1 &= 0; & Y_2 &= Y_1 + B_1B \sin \tau \\ X_3 &= B_1B + B_1B \cos \tau + B_1B \cos 2\tau \\ Y_3 &= 0 + B_1B \sin \tau + B_1B \sin 2\tau \end{aligned} \right\} \text{ и так далее.}$$

Следовательно, в общем случае

$$\left. \begin{aligned} X_n &= B_1B [1 + \cos \tau + \cos 2\tau + \dots + \cos (n-1)\tau] \\ Y_n &= B_1B [\sin \tau + \sin 2\tau + \dots + \sin (n-1)\tau]. \end{aligned} \right\} (3a)$$

Пользоваться уравнениями (а) неудобно, поэтому преобразуем их. Обозначим



Тогда

Рис. 2. Схема завивания стружки

$$\left. \begin{aligned} X_n &= B_1 B [1 + U(\tau)] \\ Y_n &= B_1 B \cdot V(\tau) \end{aligned} \right\}$$

Сделав некоторые преобразования в последних выражениях, можно получить также

$$\left. \begin{aligned} X_n &= B_1 B \left[\frac{1}{2} + \frac{\sin\left(n - \frac{1}{2}\right)\tau}{2 \sin \frac{\tau}{2}} \right], \\ Y_n &= B_1 B \left[\frac{\cos \frac{\tau}{2}}{2 \sin \frac{\tau}{2}} - \frac{\cos\left(n - \frac{1}{2}\right)\tau}{2 \sin \frac{\tau}{2}} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3ж)$$

Легко заметить, что выражения (3ж) представляют собой уравнения типа

$$\begin{aligned} X &= X_0 + R \cos t; \\ Y &= Y_0 + R \sin t \end{aligned}$$

или уравнения окружности в параметрической форме, центр которой не лежит в начале координат. Из (3ж) следует, что радиус окружности имеет величину

$$R = \frac{B_1 B}{2 \sin \frac{\tau}{2}}. \quad (4)$$

координаты центра

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{B_1 B}{2}, \\ Y_0 &= \frac{B_1 B}{2 \sin \frac{\tau}{2}} \cos \frac{\tau}{2}, \end{aligned}$$

а параметр $t = 90 - \left(n - \frac{1}{2}\right)\tau$ изменяется с шагом, равным τ .

Если $B_1 B$ выразить через R по (4), то

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= R \sin \frac{\tau}{2}, \\ Y_0 &= R \cos \frac{\tau}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

а выражение (3ж) будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} X_n &= R \left[\sin \frac{\tau}{2} + \sin\left(n - \frac{1}{2}\right)\tau \right], \\ Y_n &= R \left[\cos \frac{\tau}{2} - \cos\left(n - \frac{1}{2}\right)\tau \right]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Таким образом, элементарная стружка, завиваясь естественно по прирезочной стороне, представляет собой многоугольник со стороной $B_1 B$. Вершины этого многоугольника лежат на описанной окружности с радиусом (4). В момент окончания одного и начала формирования другого элемента координаты центра описанной около стружки окружности определяются выражениями (5), а координаты вершин - (6).

Так как при образовании нового элемента (рис.2) точка В сформированного элемента перемещается в точку B_1 не по окружности, а по прямой линии (по передней поверхности резца), то центр O естественного завивания стружки не может постоянно оставаться в одной точке, определяемой координатами (5). Он должен совершать колебательное движение по какому-то закону с циклом, по времени равным циклу образования элемента.

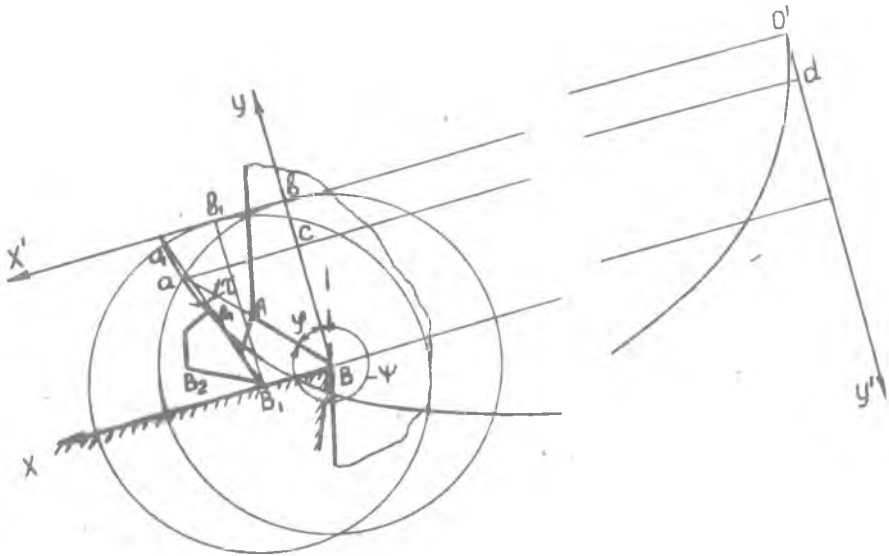


Рис. 3. Схема преобразования системы координат

Исследование с помощью скоростной киносъемки показывает, что приращение угла τ (рис.1) пропорционально перемещению точки В по передней поверхности резца. Следовательно, линию АВ (рис. 3) можно представить как часть радиуса ($r = Ba$) окружности, касающейся по прямой $O'X'$, параллельной передней поверхности, отстоящей от последней на расстоянии r , а центр (В) окружности перемещается по передней поверхности из точки В в точку B_1 .

Совершенно очевидно, что в этом случае каждая точка линии АВ и ее продолжение будут описывать циклоидальную кривую. Уравнение этой кривой в параметрической форме, как известно, имеет вид

$$X' = r\psi - c \sin \psi;$$

$$Y' = r - c \cos \psi,$$

где ψ - параметр - угол между линией, параллельной оси OY' и радиусом r производящей окружности, отсчитываемый от указанной линии в направлении вращения радиуса.

Поскольку в процессе всего цикла образования элемента центр производящей окружности перемещается только от точки В до точки B_1 , то и любая точка радиуса (или его продолжения) указанной окружности описывает также только ограниченный участок циклоидальной кривой, повторяющийся с каждым новым циклом образования элемента.

Следовательно, в нашем случае параметр ψ изменяется в узком интервале. Разность между крайними значениями параметра не превышает величины τ .

В связи со сказанным целесообразно перейти к новой системе координат с началом в точке В, изменить направление отсчета параметра и расчленить последний на постоянную и переменную составляющие. При этом постоянная составляющая обеспечит неизменность начала координат при анализе траектории любой точки образовавшейся стружки.

Как видно из рис. 3, уравнения циклоидальной кривой относительно новых координат могут быть представлены в виде

$$X = X' - \tau r \frac{\psi_1}{180^\circ};$$

$$Y = Y_0 - Y' = r - Y'.$$

Если обозначить

φ - угол между осью OY и радиусом производящей окружности в момент начала формирования нового элемента, постоянная часть параметра;

$\Delta\varphi$ - изменение угла φ в процессе формирования элемента, переменная часть параметра,

то

$$\psi = 360^\circ - \varphi + \Delta\varphi,$$

$$\alpha \quad \psi_1 = 360^\circ - \varphi.$$

Подставив все необходимое в выше приведенные уравнения, получим

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{r_1 B \Delta \varphi}{180^\circ} + C \sin(\varphi - \Delta \varphi); \\ y &= C \cos(\varphi - \Delta \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Величину радиуса производящей окружности можно определить из соотношения

$$\frac{B_1 B}{r_1} = \frac{\tau}{180^\circ},$$

откуда

$$r_1 = \frac{B_1 B \cdot 180^\circ}{\tau},$$

или с учетом (4)

$$r_1 = \frac{2 \cdot 180^\circ R \sin \frac{\tau}{2}}{\tau} \quad (8)$$

Подставив последнее в (7), получим уравнения траектории движения любой из точек стружки в виде

$$\left. \begin{aligned} x &= 2R \frac{\Delta \varphi}{\tau} \sin \frac{\tau}{2} + C \sin(\varphi - \Delta \varphi); \\ y &= C \cos(\varphi - \Delta \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

- где τ - угол между двумя поверхностями скалывания одного элемента стружки;
- R - радиус естественного закругления стружки;
- φ - угол между осью OY и линией, соединяющей точку B (вершину резца) с рассматриваемой точкой стружки в момент окончания формирования одного элемента и начала другого;
- $\Delta \varphi$ - величина, на которую изменяется угол φ от начала до конца формирования элемента;
- C - расстояние от точки B (вершины резца) до рассматриваемой точки стружки в момент окончания формирования одного элемента и начала другого.

Известно, что, если $C = r_1$, то исследуемая точка опишет участок циклоиды, при $C < r_1$ - часть укороченной циклоиды (трохоиды), а при $C > r_1$ - часть удлиненной циклоиды. Так, например, за время образования нового элемента точка B_1 переместится в точку B_2 (рис. 2 и 3), а точка A - в точку A_1 описав соответствующие участки укороченной циклоиды.

С целью анализа траекторий движения характерных точек стружки (точек B, B_1, B_2 , и т.д.), а также центра естественного завивания стружки, определим для них φ , пределы изменения $\Delta\varphi$ и величину C .

Угол φ для любой точки B_n прирезцової стороны стружки можно определить, обозначив его φ_{Bn} (см.рис. 2) как

$$\operatorname{tg} \varphi_{Bn} = \frac{X_{Bn}}{Y_{Bn}}.$$

Если в последнее выражение подставить X и Y по (6), то получим

$$\operatorname{tg} \varphi_{Bn} = \operatorname{ctg} \left(\frac{n-1}{2} \right) \tau$$

или

$$\varphi_{Bn} = 90^\circ - \left(\frac{n-1}{2} \right) \tau. \quad (10)$$

Из того же рис. 3

$$C_{Bn} = \frac{Y_{Bn}}{\cos \varphi_{Bn}} = \frac{X_{Bn}}{\sin \varphi_{Bn}},$$

а с учетом (6) и (10)

$$C_{Bn} = R \frac{[\cos \frac{\tau}{2} - \cos (n - \frac{1}{2}) \tau]}{\sin \left(\frac{n-1}{2} \right) \tau}$$

или

$$C_{Bn} = \frac{[R \sin \frac{\tau}{2} + \sin (n - \frac{1}{2}) \tau]}{\cos \left(\frac{n-1}{2} \right) \tau}$$

Величина $\Delta\varphi$ может изменяться от $\Delta\varphi = 0$ до $\Delta\varphi (\varphi_{Bn} - \varphi_{B(n+1)}) = \frac{\tau}{2}$.

Траектория движения центра естественного завивания стружки будет определяться уравнениями (9) при $c = R$ и $\varphi = \frac{\tau}{2}$ (см. рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} X &= R \left[\frac{2\Delta\varphi}{\tau} \sin \frac{\tau}{2} + \sin \left(\frac{\tau}{2} - \Delta\varphi \right) \right] \\ Y &= R \cos \left(\frac{\tau}{2} - \Delta\varphi \right), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\Delta\varphi$ изменяется от $\Delta\varphi = 0$ до $\Delta\varphi = \tau$.

Анализ показывает, что эта траектория представляет собой петлю (рис. 2) удлиненной циклоиды. В момент начала формирования элемента центр O естественного завивания стружки занимает нижнее положение. В начальный период образования элемента центр движется по левой вет-

ви петли и достигает максимума в точке O_1 при прохождении точкой В расстояния $\frac{B_1B}{2}$, а к концу цикла возвращается в исходное положение в точке O_2 описывая правую ветвь петли.

Наибольшее колебание центра естественного завивания стружки в направлении, параллельном оси OY (перпендикулярно к передней поверхности резца)

$$A_y = y_{O_1} - y_{O_2} = R \left(1 - \cos \frac{\tau}{2}\right), \quad (13)$$

а наибольшее колебание в направлении оси OX (параллельно передней поверхности резца)

$$A_x = 2R \sin \frac{\tau}{4} \left(1 - \cos \frac{\tau}{4}\right). \quad (14)$$

Как видно из выражений (13) и (14), амплитуда колебаний центра естественного завивания стружки прямопропорциональна радиусу завивания и интенсивно убывает с уменьшением τ , однако при этом интенсивно возрастает отношение $\frac{A_y}{A_x}$.

Расчеты показывают, что при практически получающихся стружках имеют место $A_y = 3 - 100$ мкм; $A_x = 0,1 - 5$ мкм, а $\frac{A_y}{A_x} = 30 - 350$. Послед-

нее указывает на большую динамичность колебаний.

Мы рассмотрели траекторию движения точек естественно завивающейся стружки при плоской передней поверхности резца, которая в настоящее время получила наибольшее применение.

По аналогии с изложенным можно исследовать и траекторию движения точек естественно завивающейся стружки при любой форме передней поверхности. Так, например, при выпуклой радиусной передней поверхности каждая из точек стружки будет описывать соответствующий участок гипоциклоидной кривой, а при вогнутой радиусной передней поверхности резца (что встречается более часто) - соответствующие участки - эпициклоидной кривой.

Анализ показывает, что вогнутая радиусная поверхность более предпочтительна, так как при этом уменьшается амплитуда колебаний центра естественного завивания стружки. Последнее подтверждается практикой обработки резанием. Известно, что при заточке передней поверхности резца по радиусу процесс резания протекает более спо-

койно. Наблюдается также, что с образованием на передней поверхности резца лунки износа до определенного момента процесс резания становится более спокойным, вибрации уменьшаются. Расчеты показывают, что если переднюю поверхность резца заточить с радиусом $r_p = R$, где R определяется зависимостью (4), при координатах^{х)} центра дуги заточки $Y_0 = R \cos \beta_1$ и $X_0 = R \sin \beta_1$, то каждая точка естественно завивающейся стружки будет перемещаться по дуге окружности соответствующего радиуса, а центр естественного завивания стружки будет неподвижен. Однако осуществить такую заточку резца практически редко удается, так как при этом должно быть $\chi = \beta_1$.

Л и т е р а т у р а

1. Русские ученые - основоположники науки о резании металлов. Машгиз, М., 1952.
2. Резание металлов и инструмент. Под редакцией А.М.Розенберга. М., "Машиностроение", 1964.
3. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. Под редакцией Н.И.Резникова. М., "Машиностроение", 1972.

А.С.Черемисин, Б.В.Берляев

О ПРЕДСТАВЛЕНИИ СИЛЫ P_z В ВИДЕ СУММЫ ДВУХ СЛАГАЕМЫХ

С помощью установки, состоящей из двухкомпонентного высокочастотного динамометра, скоростной кинокамеры, шлейфового осциллографа, схема которого была описана ранее [1], получены осциллограммы сил резания при элементарном стружкообразовании. В качестве примера на рис. 1 представлена одна из таких осциллограмм, где видно изменение составляющих сил резания P_x и P_y с изображением изменения величины контакта стружки с резцом за время образования элемента. Величины контакта замерены по кинокадрам для соответствующих времен. После образования первого элемента процесс резания стабилизируется, и картина изменения сил для конкретного режима резания сохраняется.

Сделаем анализ осциллограммы для P_z при установившемся процессе. За время образования одного элемента сила P_z сначала растет, а в момент скола - резко падает. Аппроксимируя кривые сил резания, можно получить уравнения, выражающие изменение сил по времени как для

х) Направление координат: X - горизонтально; Y - вертикально; начало координат на режущей кромке.