

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

В. И. КАРНОВ, Г. Д. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедр станков и резания металлов  
и технологии машиностроения)

Исследованию напряженного состояния, возникающего в процессе резания металлов, посвящен целый ряд работ [1, 2]. В этих работах рассматриваются напряжения при образовании сливной стружки. Ниже приводятся результаты исследования напряженного состояния в зоне резания при образовании стружки скалывания. Исследование выполнено методом измерения твердости [3], позволяющим в случае плоской деформации определить все компоненты напряженного состояния [4]. Резанию подвергалась латунь ЛС-59-1, механические свойства которой позволяют отнести ее к разряду малопластичных металлов. Резание латуни выполнено на микроскоростях (скорость перемещения резца  $V = 19 - 98$  мм/мин). Ввиду того, что размер пластической области в рассматриваемом случае очень мал (глубина резания  $t = 0,8 - 1,2$  мм), а градиент предела текучести весьма велик, измерялась микротвердость на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор в 100 г.

Тарировочный график, связывающий твердость  $HV$  с интенсивностью касательных напряжений  $K$ , был получен по результатам испытания исследуемого материала на осевое сжатие. Шесть образцов диаметром 12 мм и высотой 24 мм были сжаты до различной степени деформации. Сжатые образцы разрезались по меридиональному сечению, на полученной поверхности после полировки измерялась твердость в пяти точках. Среднее этих измерений сопоставлялось с интенсивностью касательного напряжения.

$$\kappa = \frac{4P}{\sqrt{3} \pi D^2}, \quad (1)$$

где  $P$  — деформирующее усилие.

$D$  — диаметр сжатого образца.

Напряженное состояние определено для трех случаев: для конечной стадии образования элемента при передних углах в  $30^\circ$  и  $10^\circ$  и при 50% внедрения резца с передним углом  $10^\circ$ . Расшифровка выполнена по методике, изложенной в статье [4]. Компоненты напряжения удовлетворяют уравнению:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4K^2(x, y). \quad (2)$$

При расшифровке уравнение (2) рассматривается совместно с уравнениями равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Система уравнений (2, 3) решается методом линии скольжения. Соотношения на этих линиях [4]:

$$\frac{\sigma}{2K} - \Theta = -A\alpha, \quad \frac{\sigma}{2K} + \Theta = -A\beta, \quad (4)$$

где

$$A_\alpha = \frac{1}{2K} \int_\alpha \frac{\partial K}{\partial \beta} \cdot d\alpha, \quad A_\beta = \frac{1}{2K} \int_\beta \frac{\partial K}{\partial \alpha} d\beta, \quad (5)$$

здесь  $\sigma$  — гидростатическое давление,  
 $\Theta$  — угол между касательной к линии скольжения  $\alpha$  и осью  $x$ ,  
 $\frac{\partial}{\partial \alpha}$  и  $\frac{\partial}{\partial \beta}$  — производные вдоль линии скольжения  $\alpha$  и  $\beta$ . Напряжения  $\sigma_x$ ,  
 $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  связаны с  $\sigma$ ,  $K$ ,  $\Theta$  соотношениями

$$\sigma_x = \sigma - K \sin 2\Theta; \quad \sigma_y = \sigma + K \sin 2\Theta; \quad \tau_{xy} = K \cos 2\Theta. \quad (6)$$

Контур  $AB$  элемента стружки (рис. 1) является свободным. Распределение напряжений вдоль передней грани резца неизвестно. В соответствии с этим при расшифровке в области  $ABC$  решается задача Коши, а в области  $BСД$  — начальная характеристическая задача. Касательное напряжение в точке  $B$  контура  $OB$  принято равным нулю.

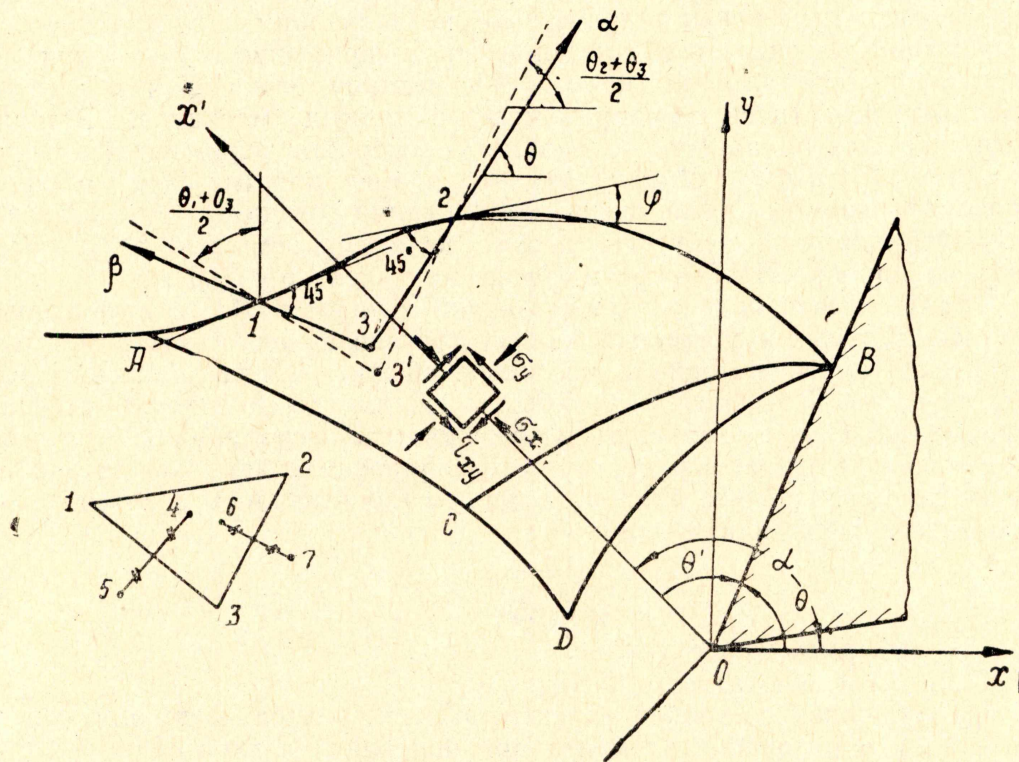


Рис. 1 Схема к определению напряжений в зоне стружкообразования.

Напряженное состояние в области  $OBD$ , примыкающей к передней грани резца, остается неизвестным. Вдоль границы  $AB$  справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma &= -K & A_\alpha &= \Theta + 0,5 \\ \Theta &= \varphi + 45^\circ & A_\beta &= 0,5 - \Theta, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\varphi$  — угол между касательной к контуру и горизонтальной осью  $x$ .

Зная  $\Theta$ ,  $A_\alpha$ ,  $A_\beta$  вдоль границы  $AB$ , определяем эти же величины в следующем слое. Так, например, положение точки 3 определяется следующим образом. Из точек 1 и 2 проводятся лучи под углами  $\Theta_1 + \frac{\pi}{2}$  и  $\Theta_2$  к оси  $x$ . На пересечении этих лучей находим точку 3, в которой

$$\begin{aligned} (A_\alpha)_3 &= (A_\alpha)_2 - \frac{1}{2K_3} \cdot \frac{K_6 - K_7}{e_{6-7}} \cdot e_{2-3} \\ (A_\beta)_3 &= (A_\beta)_1 - \frac{1}{2K_3} \cdot \frac{K_4 - K_5}{e_{4-5}} \cdot e_{1-3} \end{aligned} \quad \Theta_3 = \frac{1}{2}(A_\alpha - A_\beta). \quad (8)$$

Индексы при  $A_\alpha$ ,  $A_\beta$  и  $\Theta$  указывают, к каким точкам относятся эти величины. Через  $l_{2-3}$ ,  $l_{1-3}$  ... обозначены расстояния между соответствующими точками. Отрезки 6—7, 4—5 перпендикулярны к отрезкам 1—3, 2—3 и проходят через их середину. Полученное решение уточнялось. Для этого из точек 1 и 2 проводились лучи под углами  $90^\circ + \frac{\Theta_1 + \Theta_3}{2}$  и  $\frac{\Theta_2 + \Theta_3}{2}$  к оси  $x$ . На пересечении этих лучей находилась

точка 3', для которой вновь определялись величины  $A_\alpha$ ,  $A_\beta$ ,  $\Theta$ . Таким образом строилось решение во всей области  $ABC$ .

Точка  $B$  является особой, так как при движении вдоль границы  $\sigma$ ,  $\Theta$  и  $A_\alpha$  изменяются скачком. Через эту точку проходит веер семейства линий скольжения  $\alpha$ . Интеграл  $A_\beta$  у всех этих линий в точке  $B$  одинаков и равен интегралу  $A_\beta$  в точке  $B$  контура  $AB$ . При отсутствии сил трения в точке  $B$  линия скольжения  $DB$  наклонена под углом  $45^\circ$  к передней грани резца.

Зная  $A_\alpha$  и  $A_\beta$  в любой точке пластически деформированной зоны, можно определить гидростатическое давление

$$\sigma = K(-A_\alpha - A_\beta), \quad (9)$$

а следовательно, и все напряжения по формулам (6).

Опыты на микроскоростях проводились на универсально-фрезерном станке Тульского завода. Резанию подвергались предварительно шлифованные пластинки толщиной 3 мм инструментом с различными передними углами. При мгновенной остановке процесса резания получались корни стружек в различных стадиях образования элемента. Измерение твердости корней стружек в зоне деформации производилось по координатной сетке со стороной квадрата в 0,1—0,2 мм.

По твердости, измеренной в зоне резания, из тарировочного графика  $HV - K$  строились линии равных интенсивностей касательного напряжения. На рис. 2 приведена сетка линий скольжения для одного из трех исследованных случаев (для конечной стадии образования элемента при резании инструментом с передним углом  $\gamma = -10^\circ$ ). Как видно из приведенной фигуры, крайние линии семейства  $\beta$  при движении от границы к вершине резца сближаются (линии  $\beta$ , исходящие из точек 1...5). Это подтверждает геометрию линий сдвигов, принятую в теории резания металлов (5).

Представляет большой теоретический и практический интерес определить напряжения в плоскости сдвига.

На рис. 2 проведена линия  $OO'$  параллельно линии скола. При малых внедрениях резца угол между линией  $OO'$  и линиями скольжения близок к  $45^\circ$ . С ростом внедрения режущего инструмента эти линии все больше и больше по своему направлению приближаются к линиям

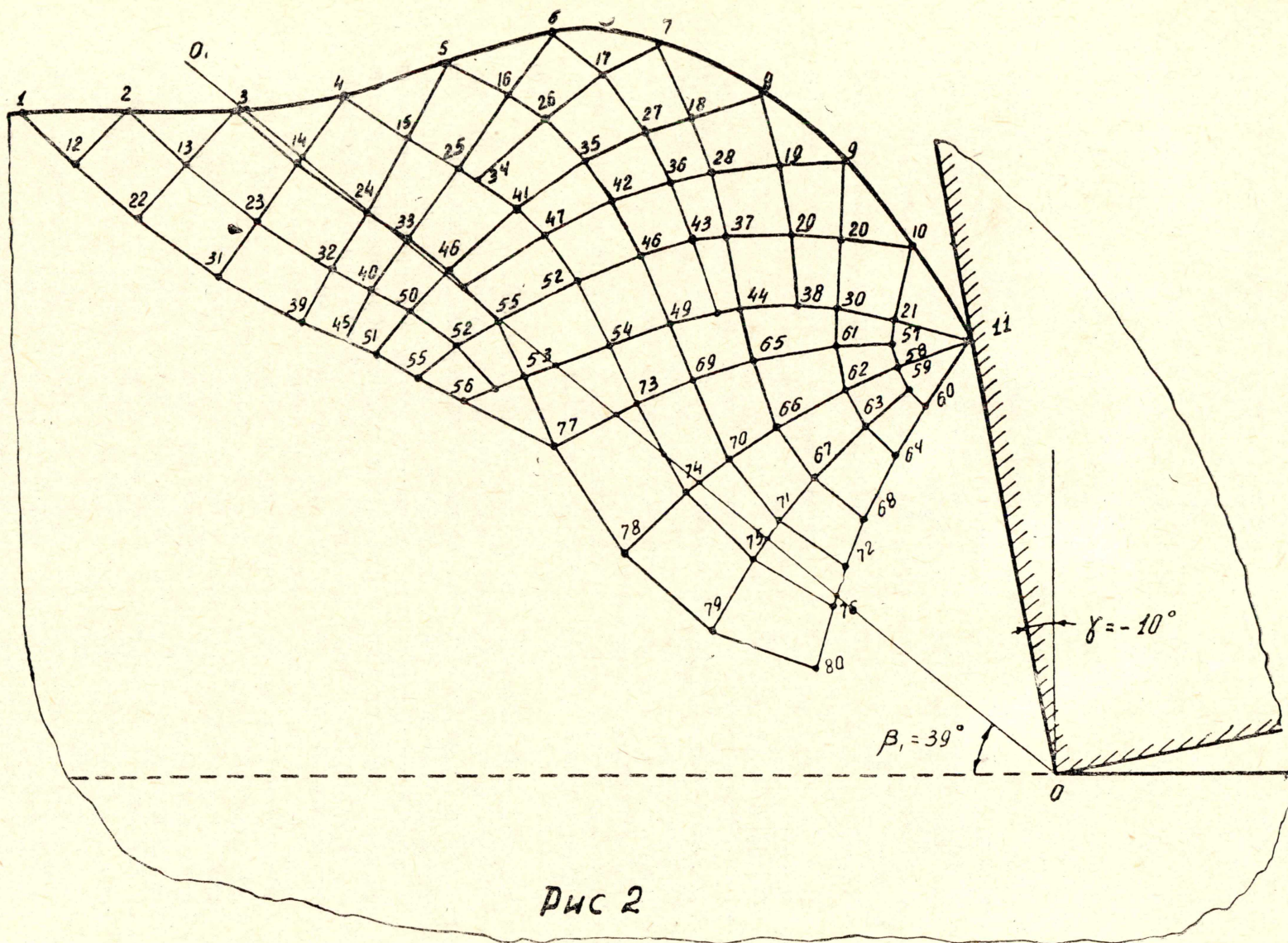


Рис 2

Рис. 2. Сетка линий скольжения в зоне образования элементной стружки.

скольжения  $\beta$ . Однако даже в момент, предшествующий разрушению, их совпадение является далеко не полным.

На рис. 3 представлены эпюры напряжений вдоль линии  $OO'$ . Эти напряжения определены по формулам (6), в которых вместо угла  $\Theta$  подставляем угол  $\Theta - \alpha$  (рис. 1).

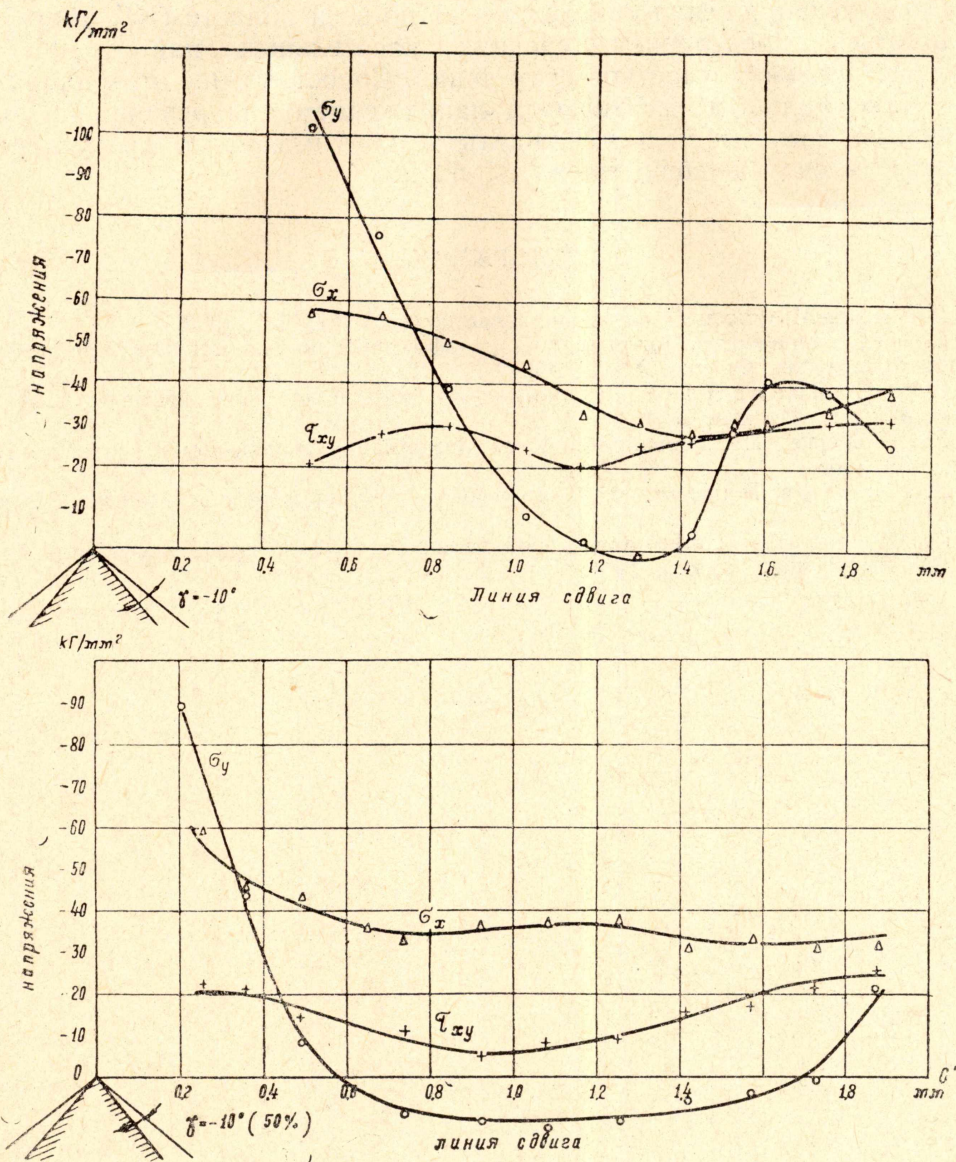


Рис. 3 Эпюры касательных и нормальных напряжений вдоль линии сдвига.

Анализ эпюр показывает, что с ростом внедрения резца распределение касательного напряжения становится все более равномерным, однако и в момент, предшествующий сколу элемента, неравномерность этих эпюр остается значительной. Напряжения  $\sigma_x$  являются сжимающими. Нормальные напряжения  $\sigma_y$  во всех исследованных случаях имеют идентичный характер: вначале при движении от границы к вершине резца эти напряжения являются сжимающими, затем они изменяют знак. Однако в дальнейшем они вновь являются сжимающими и резко возрастают в направлении к вершине резца.

Выполненный расчет был проверен путем сопоставления касательных напряжений, найденных по результатам динамометрирования в процессе резания, с расчетными. По результатам динамометрирования максимальное значение касательного напряжения в плоскости сдвига при резании латуни равно 26—27 кг/мм<sup>2</sup> [6]. Эти напряжения представляют собой не что иное, как среднее напряжение  $\tau_{xy}$  вдоль линии  $OO'$  в момент, предшествующий сколу элемента.

Так как напряжения определены не по всей области  $OO'$ , пришлось ограничиться определением средних касательных напряжений  $\tau_{xy}$  вдоль рассчитанных участков этих линий. Сопоставление этих напряжений с максимальным касательным напряжением при резании кажется возможным, так как нельзя ожидать резкого изменения  $\tau_{xy}$  у вершины резца (в силу неравенства  $\tau_{xy} \leq K$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Хилл. Математическая теория пластичности. ГИТТЛ, 1956.
  2. В. И. Садчиков. Напряженное и деформированное состояние при резании металлов. Изв. вузов. Физика, № 6, 1960.
  3. Г. А. Смирнов-Аляев. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Машгиз, Москва, 1961.
  4. Г. Д. Дель. Исследование плоской деформации измерением твердости. Изв. ТПИ, т. 138, 1965.
  5. Н. Н. Зорев. Вопросы механики процесса резания металлов. Машгиз, Москва, 1956.
  6. Резание металлов и инструмент, под редакцией д. т. н. проф. Розенберга А. М. Изд. Машиностроение, Москва, 1964.
-