

УДК 621.9.011

Н. А. Я р о с л а в ц е в а

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДА ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

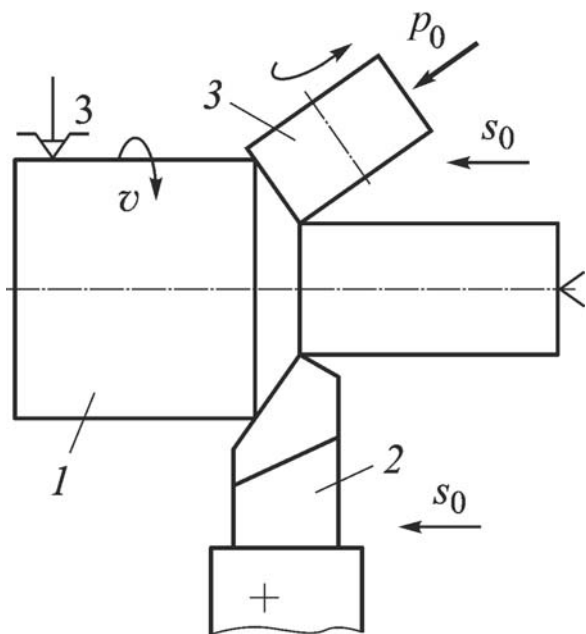
*Представлены аналитические зависимости для расчетного определения геометрических параметров и ориентации в корне стружки прямоугольной делительной сетки после двух последовательных больших пластических деформаций, а также картина деформированного состояния материала, полученная методом делительных микросеток (сторона квадрата ячейки сетки равна 60 мкм). Приведено сопоставление расчетных картин деформаций и соответствующих экспериментальных значений, зафиксированных в зоне стружкообразования.*

**E-mail:** [mt13@bmstu.ru](mailto:mt13@bmstu.ru)

**Ключевые слова:** неоднородные свойства материала, стружкообразование, опережающее пластическое деформирование, вид деформации, расчетная модель деформации.

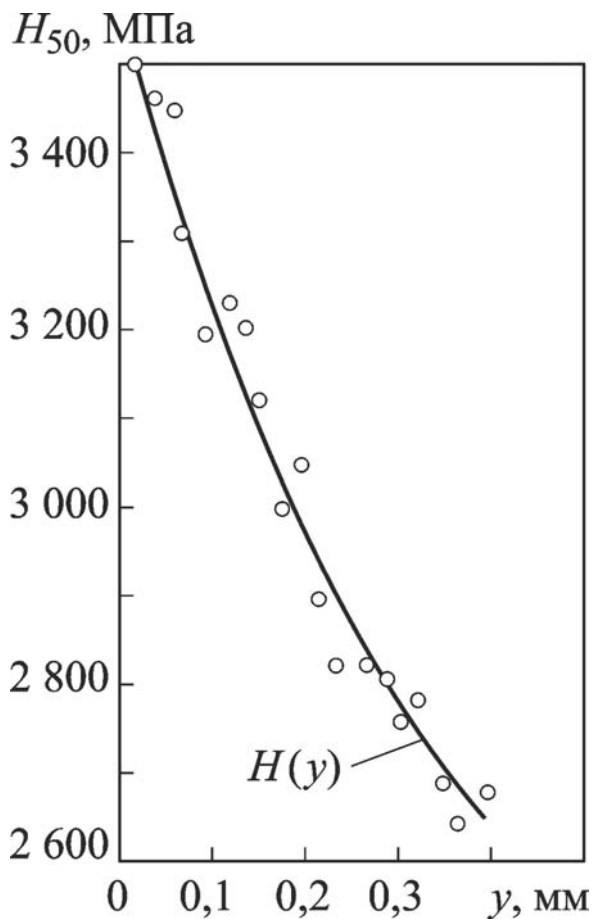
Модернизация промышленного производства непосредственно связана с применением наукоемких машиностроительных технологий, способствующих интенсификации производственного процесса и повышению качества выпускаемой продукции. Инновационное развитие технологий изготовления деталей машин определяется прежде всего использованием прогрессивных методов обработки, в том числе комбинированных. Одним из них является разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана метод резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [1–3 и др.].

Сущность метода резания с ОПД заключается в целенаправленном изменении физико-механических свойств материала срезаемого слоя путем его предварительного пластического деформирования дополнительным механическим источником энергии. В результате исчерпывается часть запаса пластичности материала и, как следствие, снижается работа пластического деформирования, совершаемая режущим инструментом. В качестве источника дополнительного энергетического воздействия на материал заготовки могут служить разные методы поверхностного пластического деформирования (ППД). На рис. 1 представлена схема обработки резанием, где предварительное ППД осуществляется накатным роликом. При этом материал, удаляемый



**Рис. 1.** Схема наружного точения с ОПД:

1 — заготовка; 2 — режущий инструмент; 3 — упрочняющее устройство ОПД;  $p_0$  — давление накатного устройства на срезаемый слой;  $s_0$  — подача;  $v$  — скорость резания



**Рис. 2.** Экспериментальная зависимость распределения микротвердости  $H_{50}$  по глубине поверхностного слоя в результате действия контактной нагрузки  $P_0$  накатного ролика при резании с ОПД стали 12X18H10T ( $P_0 = 6$  кН;  $v = 0,42$  м/с;  $s_0 = 0,43$  мм/об;  $t = 3$  мм)

с поверхности заготовки, приобретает новые физико-механические свойства, крайне неоднородные по толщине срезаемого слоя, которые можно характеризовать распределением микротвердости в направлении действия нагрузки ОПД (рис. 2). Эффективность метода резания с ОПД непосредственно связана с количественными характеристиками деформированного состояния материала в зоне стружкообразования и особенностями распределения деформаций по сечению среза, напрямую определяющими параметры напряженности процесса резания.

Для экспериментального определения больших пластических деформаций при резании металлов применяют метод делительных сеток, позволяющий получать наиболее полную информацию о процессе. Методом делительных сеток установлено, что деформированное состояние материала при резании в большинстве случаев можно рассматривать практически плоским, а вид деформации — соответствующим простому сдвигу [4]. Однако эти данные получены на образцах с однородными физико-механическими свойствами материала по толщине срезаемого слоя.

Условия стружкообразования при резании с ОПД, когда срезаемый слой подвергается последовательно двум большим пластическим деформациям с разным механизмом преобразования свойств материала (ППД и резание) и характеризуется высоким градиентом физико-механических свойств по толщине среза, существенно отличаются от условий обычного резания. Поэтому разработка механики процесса резания с ОПД в целях научно обоснованного управления условиями обработки вызывает необходимость исследования вида и особенностей деформированного состояния материала в зоне стружкообразования при резании с ОПД.

Было сделано предположение, что при удалении материала с ярко выраженной неоднородностью свойств по толщине срезаемого слоя, как это имеет место при резании с ОПД, процесс стружкообразования и в этом случае подчиняется условиям простого сдвига, когда смещение всех точек происходит параллельно одной оси.

Расчетная схема для определения в процессе резания деформированного состояния прямоугольной делительной сетки, нанесенной на боковой поверхности обрабатываемой заготовки, показана на рис. 3.

Согласно существующим современным представлениям науки о резании, процесс образования стружки осуществляется в переходной пластически деформируемой зоне (зоне первичных деформаций), где материал срезаемого слоя претерпевает деформацию сдвига. При применяемых на практике условиях резания эта зона является очень узкой, поэтому при вычислениях значений конечной пластической деформации ее принято представлять в виде условной плоскости сдвига  $OA$  (см. рис. 3), которая наклонена к поверхности резания под углом сдвига  $\beta$  [4]. Угол сдвига определяет направление и величину пластической деформации в зоне стружкообразования. Предположение о деформации простого сдвига в зоне резания означает, что в переходной пластически деформируемой зоне смещение всех элементарных объемов материала происходит параллельно плоскости сдвига  $OA$ .

Рассмотрим деформацию одной ячейки  $ABFE$  (см. рис. 3) прямоугольной сетки со стороной квадрата  $d_0$  при обычном свободном резании (без ОПД), исходя из предположения, что стружка образуется сливной и нарост отсутствует.

Пусть для перемещения точки  $B$ , которое осуществляется со скоростью резания  $v$ , в положение точки  $C$  на плоскости сдвига необходимо время  $t_0$ , т.е.  $BC/t_0 = v$ . За это же время точка  $A$  на наружной поверхности стружки сместится на расстояние  $AD$ , причем  $AD/t_0 = v_c$ , где  $v_c$  — скорость движения стружки по передней поверхности инструмента. В результате таких перемещений вертикальный отрезок прямой  $AB$  займет в стружке положение  $DC$ . Положение отрезка  $DC$  относительно плоскости сдвига  $AC$  характеризует ориентацию координатной

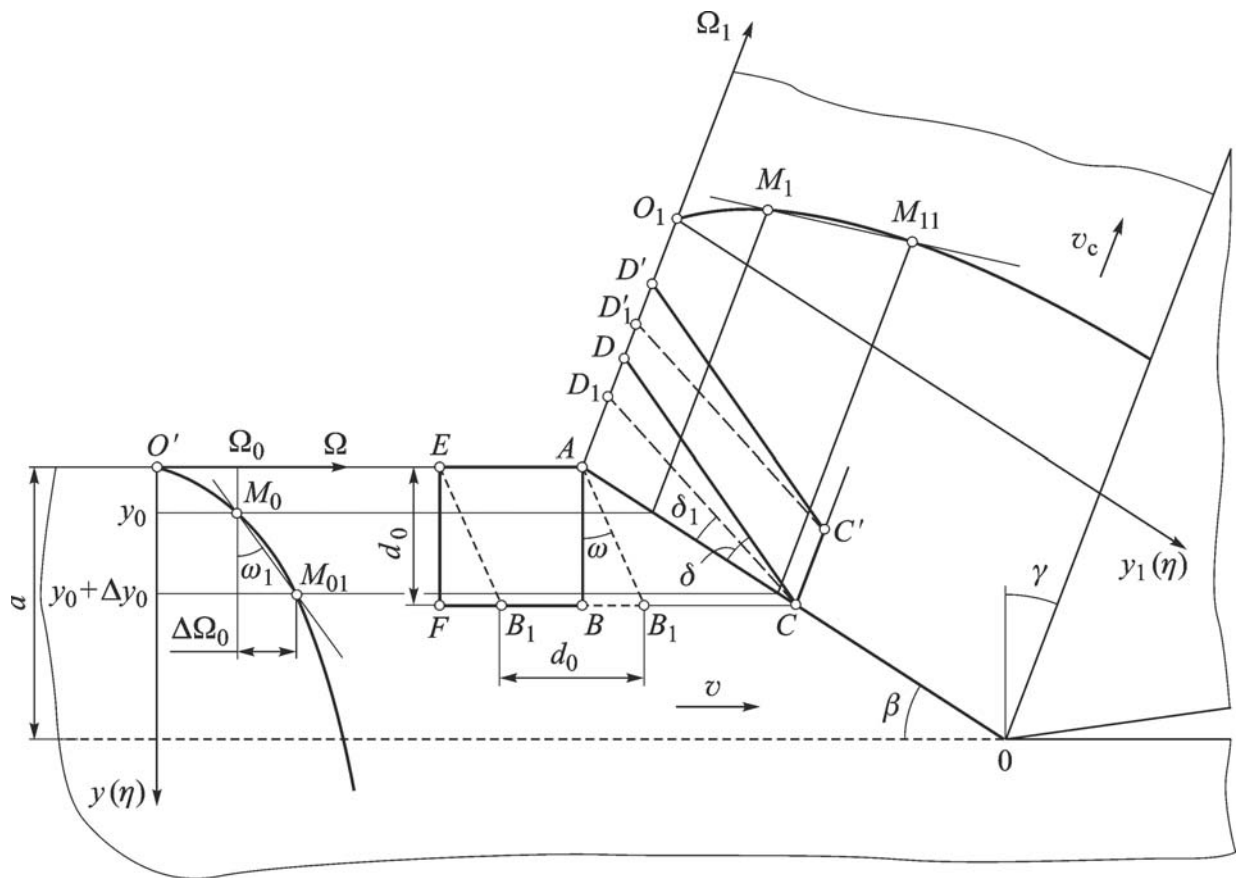


Рис. 3. Расчетная схема для определения деформации прямоугольной делительной сетки

сетки после пластической деформации и может определяться углом  $\delta$ . Требуется найти аналитическую зависимость для угла  $\delta$  и геометрию деформированной сетки.

Из записанных ранее равенств для скоростей  $v$  и  $v_c$  следует, что

$$\frac{BC}{AD} = \frac{v}{v_c}. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае отношение  $v/v_c = K_l$ , где  $K_l$  — коэффициент укорочения стружки, равный

$$K_l = \frac{\cos(\beta - \gamma)}{\sin \beta}, \quad (2)$$

и, следовательно, равенство (1) можно представить в виде

$$AD = BC \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)}.$$

Из треугольника  $ABC$  отрезок  $BC$  выражается через параметр делительной сетки (сторона квадрата сетки)  $d_0$

$$BC = d_0 \operatorname{ctg} \beta.$$

Таким образом,

$$AD = d_0 \frac{\cos \beta}{\sin(\beta - \gamma)}. \quad (3)$$

Аналогично получаем значение  $AC$ :

$$AC = \frac{d_0}{\sin \beta}. \quad (4)$$

Вместе с тем, применяя теорему косинусов, из треугольника  $ACD$  можно записать

$$DC^2 = AD^2 + AC^2 - 2AD < AC \cos(\pi/2 + \beta - \gamma)$$

или

$$DC^2 = AD^2 + AC^2 + 2AD < AC \sin(\beta - \gamma), \quad (5)$$

а также

$$DC^2 = AD^2 - AC^2 + 2AD < DC \cos \delta. \quad (6)$$

Приравнивая правые части уравнений (5) и (6), получаем зависимость

$$\delta = \arccos \frac{AC + AD \sin(\beta - \gamma)}{DC}. \quad (7)$$

Величина  $DC$  определяется из формулы (5) при подстановке в нее выражений (3) и (4) для  $AD$  и  $AC$ , т.е.

$$DC = d_0 \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta} + \frac{\cos^2 \beta}{\cos^2(\beta - \gamma)} + 2 \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \operatorname{ctg} \beta}. \quad (8)$$

Таким образом, заменяя в формуле (7)  $AD$ ,  $AC$  и  $DC$  их значениями из (3), (4) и (8), после преобразований имеем окончательное выражение угла  $\delta$ , который образуют вертикали прямоугольной координатной сетки в срезаемом слое в конечном деформированном состоянии с направлением сдвига:

$$\delta = \arccos \frac{\frac{1}{\sin \beta} + \cos \beta \operatorname{tg}(\beta - \gamma)}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta} + \frac{\cos^2 \beta}{\cos^2(\beta - \gamma)} + 2 \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \operatorname{ctg} \beta}}. \quad (9)$$

Отрезок  $DC$  — отрезок  $AB$  сетки в результате деформации — может быть определен по формуле (8) или при известном значении  $\delta$  вычислен с помощью равенства, которое следует из рис. 3:

$$DC = \frac{d_0}{\sin \beta [\cos \delta - \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \sin \delta]}, \quad (10)$$

Последующее смещение режущего клина вызовет плоскопараллельное перемещение прямой  $DC$  в направлении вектора скорости стружки  $v_c$ , и через некоторый отрезок времени  $t_1 = d_0/v$  прямоугольная ячейка сетки трансформируется в параллелограмм  $CC'D'D$ ,

у которого

$$\frac{CC'}{v_c} = \frac{d_0}{v} \quad \text{или} \quad CC' = DD' = \frac{d_0}{K_l} = d_0 \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)},$$

т.е. горизонтальные участки сетки  $d_0$  будут иметь в стружке длину

$$CC' = DD' = d_0 \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)}. \quad (11)$$

Из рис. 3 можно записать и значения углов деформированной ячейки сетки

$$\begin{aligned} \angle DD'C' &= \angle DCC' = \pi/2 - \beta - \delta + \gamma; \\ \angle D'DC &= \angle CC'D' = \pi/2 + \beta + \delta - \gamma. \end{aligned} \quad (12)$$

Формулы (8)–(12) полностью определяют геометрию одной ячейки прямоугольной координатной сетки со стороной квадрата  $d_0$  в деформированном состоянии и ориентацию ее относительно плоскости сдвига. Очевидно, что для принятых условий стружкообразования это равнозначно определению конфигурации всей координатной сетки срезаемого слоя.

Используя аналогичный прием, при тех же допущениях можно найти геометрические параметры координатной сетки в стружке и после ее предварительного пластического деформирования дополнительным механическим источником энергии до момента резания.

Рассмотрим деформацию ячейки  $AB_1F_1E$ , имеющую форму параллелограмма (см. рис. 3), т.е., учитывая микромасштаб координатной делительной сетки на исследуемых образцах, примем для простоты, что кривизна боковых сторон предварительно деформированной ячейки равна нулю.

Как и в приведенном ранее решении (без учета ППД), при смещении в процессе резания точки  $B_1$  в точку  $C$  участок  $AB_1$  ячейки сетки займет в стружке положение  $CD_1$  под углом  $\delta_1$  ( $\delta_1 < \delta$ ) к плоскости сдвига  $AC$ . Из треугольника  $AD_1C$  можно найти угол  $\delta_1$  (см. формулу (7)):

$$\delta = \arccos \frac{AC + AD_1 \sin(\beta - \gamma)}{CD_1}. \quad (13)$$

Значения отрезков  $AD_1$ ,  $AC$  и  $CD_1$  определяются из расчетной схемы (см. рис. 3). Очевидно, что

$$\frac{B_1C}{AD_1} = \frac{v}{v_c} = K_l = \frac{\cos(\beta - \gamma)}{\sin \beta},$$

откуда  $AD_1 = B_1C \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)}$ ,  $B_1C = BC - BB_1$ , причем  $BC =$

$= AB \operatorname{ctg} \beta$  и, следовательно,

$$AD_1 = AB \left( \operatorname{ctg} \beta - \frac{BB_1}{AB} \right) \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)}; \quad (14)$$

$$AC = AB \frac{1}{\sin \beta}; \quad (15)$$

$$CD_1 = \sqrt{AD_1^2 + AC^2 + 2AD_1AC \sin(\beta - \gamma)}$$

или с учетом (14) и (15)

$$CD_1 = AB \left( \frac{1}{\sin^2 \beta} + \frac{1}{\cos^2(\beta - \gamma)} \left( \cos \beta - \frac{BB_1}{AB} \sin \beta \right)^2 + \right. \\ \left. + 2 \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \left( \operatorname{ctg} \beta - \frac{BB_1}{AB} \right) \right)^{-1}. \quad (16)$$

Подставляя найденные согласно выражениям (14) и (15) значения  $AD_1$  и  $AC$  в формулу (13) для  $\delta_1$ , получаем

$$\delta_1 = \arccos \frac{AB \left[ \frac{1}{\sin^2 \beta} + \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \left( \cos \beta - \frac{BB_1}{AB} \sin \beta \right) \right]}{CD_1}. \quad (17)$$

Здесь величина отрезка  $CD_1$  находится по формуле (16).

Отношение  $BB_1/AB$  в формулах (16) и (17) можно представить как  $\operatorname{tg} \omega$ , где  $\omega$  — угол, характеризующий степень (меру) искажения координатной сетки в срезаемом слое (см. рис. 3); в этом случае формула (17) будет иметь вид

$$\delta_1(\omega) = \arccos \frac{\frac{1}{\sin \beta} + \operatorname{tg}(\beta - \gamma)(\cos \beta - \operatorname{tg} \omega \sin \beta)}{\sqrt{G(\omega)}}, \quad (18)$$

где

$$G(\omega) = \frac{1}{\sin^2 \beta} + \frac{1}{\cos^2(\beta - \gamma)} (\cos \beta - \operatorname{tg} \omega \sin \beta)^2 + 2 \operatorname{tg}(\beta - \gamma) (\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{tg} \omega).$$

Выражения для других геометрических параметров ячейки  $AB_1F_1E$  после ее деформации подобны тем, которые получены в ранее рассмотренном случае. Так, горизонтальные отрезки  $AF$  и  $B_1F_1$  трансформируются в малые (при  $\beta < \pi/4$ ) стороны параллелограмма  $D_1D'_1C'C$ , равные

$$D_1D'_1 = CC' = \frac{d_0}{K_l} = d_0 \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)}. \quad (19)$$

Значения внутренних углов составляют

$$\begin{aligned}\angle D_1 D'_1 C' &= \angle D_1 C C' = \pi/2 - \beta + \gamma - \delta_1(\omega); \\ \angle D'_1 C' C &= \angle C D_1 D'_1 = \pi/2 + \beta - \gamma + \delta_1(\omega).\end{aligned}\tag{20}$$

Применение полученных аналитических зависимостей (16)–(20) возможно при относительно небольших размерах ячеек координатной сетки, когда в пределах одной ячейки можно пренебречь кривизной вертикальных полос исходной сетки после предварительной деформации срезаемого слоя и заменить их отрезками прямых соответствующей ориентации. Если в конкретном случае искажения координатной сетки на боковой поверхности образца или отдельных ее участков не допускают такого спрямления, то при теоретическом построении деформационной картины можно воспользоваться графическим делением реальных ячеек в срезаемом слое на число частей, обеспечивающее получение необходимой точности построения.

В тех случаях, когда деформационная картина сетки в срезаемом слое задается аналитическими зависимостями, формулы (17) или (18) для  $\delta_1$  целесообразнее представить в дифференциальном виде, в результате чего можно значительно сократить объем соответствующих вычислений.

Пусть одна из вертикалей координатной сетки после деформации срезаемого слоя накатным устройством описывается некоторой непрерывной функцией  $\Omega(y)$  (см. рис. 3); ось  $y$  перпендикулярна обрабатываемой поверхности и направлена внутрь тела, ось  $\Omega$  расположена в плоскости обрабатываемой поверхности параллельно вектору скорости  $v$ . В результате деформации в процессе стружкообразования рассматриваемая кривая  $\Omega(y)$  изменяет конфигурацию и в косоугольной координатной системе  $\Omega_1 0_1 y_1$  (ось  $0_1 y_1 \parallel OA$ ) будет определяться новой зависимостью  $\Omega_1 = f_1(y_1)$ . Возьмем на кривой  $\Omega(y)$  произвольную точку  $M_0(y_0; \Omega_0)$ . Изменение абсциссы  $y_0$  на некоторую величину  $\Delta y_0$  вызовет соответствующее приращение ординаты  $\Delta \Omega_0$ . Если через точки  $M_0(y_0; \Omega_0)$  и  $M_{01}(y_0 + \Delta y_0; \Omega_0 + \Delta \Omega_0)$  провести секущую  $M_0 M_{01}$ , то ее угловой коэффициент с положительным направлением оси  $y$  находится как

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \lim_{\Delta y_0 \rightarrow 0} \frac{\Delta \Omega_0}{\Delta y_0}$$

Очевидно, что задача определения ориентации секущей  $M_0 M_{01}$  за плоскостью сдвига  $OA$  ничем не отличается от уже рассмотренного случая, а формула для вычисления угла  $\delta$  при новых обозначениях может быть получена простой заменой в выражении (17) отношения  $BB_1/AB$  на  $\Delta \Omega_0/\Delta y_0$ . При стремлении приращения  $\Delta y_0$  к 0 в пределе вместо секущей  $M_0 M_{01}$  получим касательную к кривой  $\Omega(y)$  в точке



$M_0$ , угловой коэффициент которой является производной

$$\frac{d\Omega_0}{dy_0} = \lim_{\Delta y_0 \rightarrow 0} \frac{\Delta \Omega_0}{\Delta y_0} \text{ при } \Delta y_0 \rightarrow 0.$$

Положение этой касательной в стружке определится при подстановке в формулу (17) вместо отношения  $BB_1/AB$  производной  $d\Omega_0/dy_0$ . Нетрудно показать, что касательная к кривой  $\Omega(y)$  остается касательной и к деформированной кривой  $\Omega_1(y_1)$  в стружке. Действительно, если на рис. 3 точки  $M_1$  и  $M_{11}$  кривой  $\Omega_1(y_1)$  соответствуют точкам  $M_0$  и  $M_{01}$  в срезаемом слое, то при  $\Delta y_0 \rightarrow 0$  как секущая  $M_0M_{01} \rightarrow 0$ , так и  $M_1M_{11} \rightarrow 0$ . Предельные положения этих секущих и будут касательными к кривым  $\Omega(y)$  и  $\Omega_1(y_1)$  в соответствующих точках  $M_0$  и  $M_1$ .

Таким образом, если функция  $\Omega = f(y)$  на исследуемом участке  $0 \leq y \leq a$  ( $a$  — толщина срезаемого слоя) является дифференцируемой, то каждой точке кривой  $\Omega(y)$  соответствует определенное значение угла

$$\delta(y) = \arccos \frac{\frac{1}{\sin \beta} + \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \left( \cos \beta - \sin \beta \frac{d\Omega}{dy} \right)}{\sqrt{G(y)}}. \quad (21)$$

Здесь через  $G(y)$  обозначено

$$G(y) = \frac{1}{\sin^2 \beta} + \frac{1}{\cos^2(\beta - \gamma)} \left( \cos \beta - \sin \beta \frac{d\Omega}{dy} \right)^2 + 2 \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \left( \operatorname{ctg} \beta - \frac{d\Omega}{dy} \right).$$

Выражение (21) представляет собой семейство направлений, которые составляют касательные к кривой  $\Omega(y)$  по отношению к плоскости сдвига после деформации в процессе стружкообразования.

Следует отметить, что каждая точка  $M(y, \Omega)$  кривой  $\Omega(y)$  после деформации определяется в координатной системе  $\Omega_1 0_1 y_1$  новым значением абсциссы  $y_1$ , которое зависит от угла сдвига  $\beta$  и составляет

$$y_1 = \frac{y}{\sin \beta}. \quad (22)$$

Необходимость пересчета положения соответствующих точек в срезаемом слое и стружке можно исключить, если зависимости  $\Omega(y)$  и  $\Omega_1(y_1)$  представить как функции новой переменной  $\eta$ , записанной в безразмерном виде. Пусть  $\eta = y/a$  ( $0 \leq \eta \leq 1$ );  $\eta_1 = \frac{y_1}{OA} = \frac{y_1 \sin \beta}{a}$  или с учетом (22)  $\eta_1 = \frac{y}{a} = \eta$ .

В соответствии с этим для вычисления угла  $\delta$  можно воспользоваться формулой

$$\delta(\eta) = \arccos \frac{\frac{1}{\sin \beta} + \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \left( \cos \beta - \sin \beta \frac{d\Omega}{d\eta} \right)}{\sqrt{G(\eta)}}; \quad (23)$$

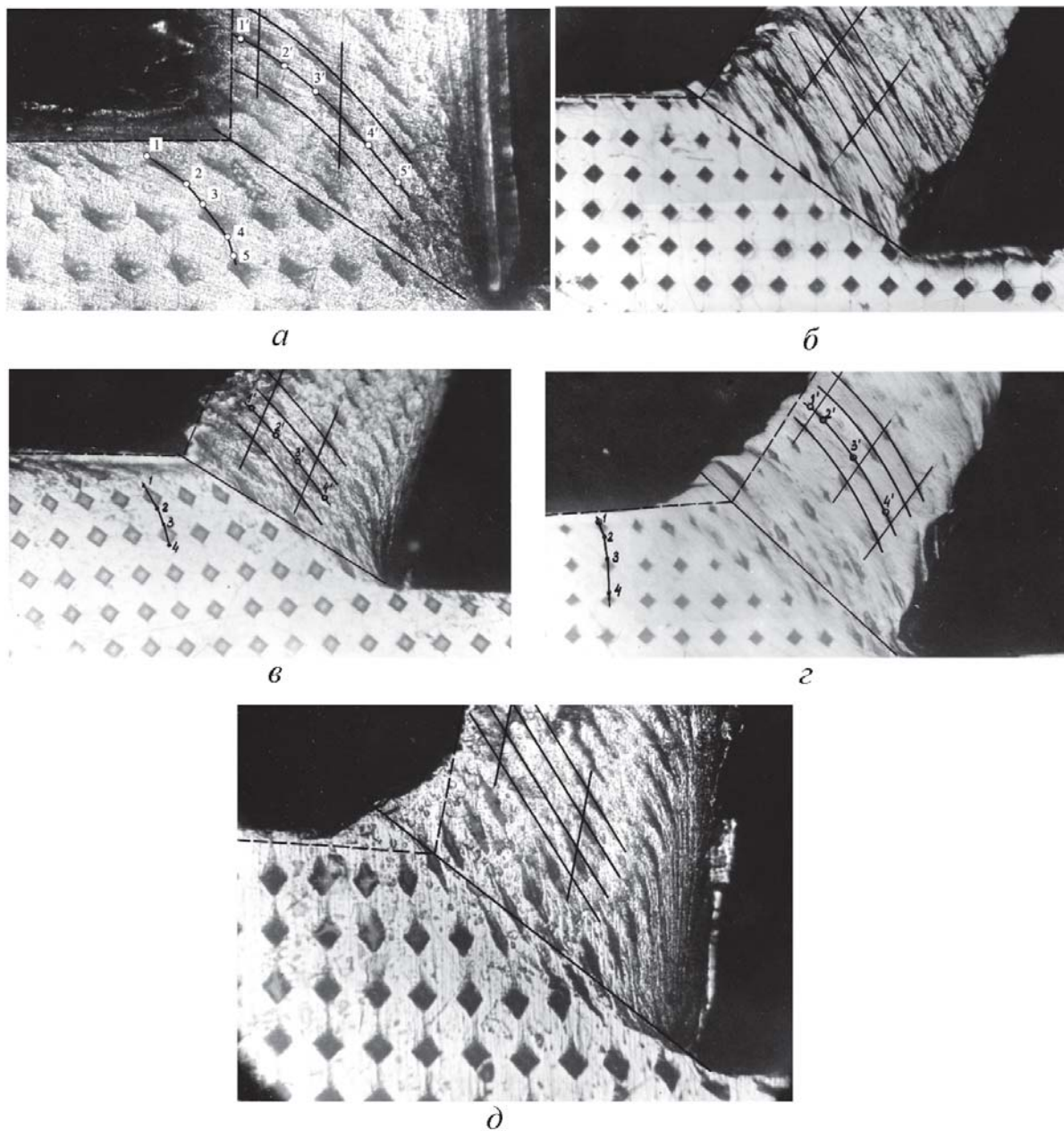
здесь

$$G(\eta) = \frac{1}{\sin^2 \beta} + \frac{1}{\cos^2(\beta - \gamma)} \left( \cos \beta - \sin \beta \frac{d\Omega}{d\eta} \right)^2 + 2 \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \left( \operatorname{ctg} \beta - \frac{d\Omega}{d\eta} \right).$$

Используем найденные математические зависимости для анализа деформированного состояния корней стружек при различных условиях обработки резанием (с ОПД и обычном резании).

На микрофотографиях (рис. 4) совмещены вычисленные по формулам (16), (18), (19) геометрические параметры отдельных ячеек сетки с соответствующими элементами делительной микросетки, экспериментально полученной в корне стружки. Угол сдвига  $\beta$  и искажение вертикалей сетки после обкатки  $\operatorname{tg} \omega$ , которые входят в расчетные формулы, определялись непосредственными измерениями на микрофотографиях. В таблице приведены использованные при вычислениях значения углов  $\beta$  и  $\gamma$ , а также для ряда выбранных значений  $\operatorname{tg} \omega_{i,i+1}$  представлены результаты сопоставления расчетных величин  $\delta$  со средними экспериментальными значениями. Угловые коэффициенты искажения вертикалей координатной сетки  $\operatorname{tg} \omega_{i,i+1}$  и соответствующие значения угла  $\delta_i$  определялись для отрезков прямых 1–2, 2–3, ...  $i-i+1$ , ... (см. рис. 4), проведенных через вершины 1, 2, 3, ...  $i$ , ... отпечатков, образующих делительную сетку. Математические зависимости (16), (18), (19) не учитывают контактные деформации в слоях стружки, прилегающих к передней поверхности инструмента. Поэтому вычисления выполнялись лишь для той части стружки по ширине, на которой не наблюдается непосредственного влияния контактных процессов, проявляющегося в виде дополнительных искажений делительной сетки.

Сравнивая картины деформаций на рис. 4, а также данные таблицы, можно сделать вывод, что расчетная модель деформаций в корнях стружек и деформации, полученные экспериментальным путем, как при обычном резании (рис. 4, а, в), так и резании с ОПД (рис. 4, б, г, д) вполне удовлетворительно совпадают. Это означает, что при обработке с ОПД деформированное состояние срезаемого слоя материала подобно обычному резанию является результатом преимущественной деформации простого сдвига в направлении условной плоскости сдвига. Следовательно, несмотря на высокую неоднородность физико-механических свойств материала срезаемого слоя после поверхностного упрочнения, исследование стружкообразования при обработке с



**Рис. 4. Деформированное состояние прямоугольной делительной микросетки в корнях стружки ( $\times 487$ ):**

*а* – 12X18H9T (обычное резание); *б* – 12X18H9T (резание с ОПД); *в* – 40ХСШ (обычное резание); *г* – 40ХСШ (резание с ОПД); *д* – ХН77ТЮР (резание с ОПД)

ОПД может осуществляться на базе существующих представлений механики обычного процесса резания.

Вместе с этим, рассматривая представленные в таблице численные значения углов  $\delta$ , можно отметить и некоторые особенности распределения деформаций в корнях стружек при резании по наклепанному слою (см. рис. 4, *б*, *г*, *д*). Так, участки координатной сетки, расположенные вблизи наружной границы стружки, имеют завышенные значения угла  $\delta$  по сравнению с теоретически вычисленными значениями. Увеличение угла  $\delta$  означает снижение степени деформации материала. Есть основание полагать, что отмеченное несовпадение расчетных и опытных значений  $\delta$  является закономерным. Принятые при вычислениях положения условных плоскостей сдвига на рис. 4, проходящих

Микрофотография	Участок ( $i, i + 1$ )	Угол сдвига $\beta$ , градусы	Передний угол $\gamma$ , градусы	Искажение координатной сетки $\text{tg } \omega_{i,i+1}$	Расчетное значение $\delta_p, ^\circ$	Экспериментальное значение $\delta_3, ^\circ$	$\delta_3 - \delta_p, ^\circ$ (приближенно)
Рис. 4, а		32	4	—	19°56'	22	+2°
Рис. 4, б	1-2	34	4	1,4	1°24'	6°30'	+5°
	2-3			0,89	9°30'	10	+0°30'
	3-4			0,72	11°50'	12	0
	4-5			0,48	14°54'	13	-2°
Рис. 4, в		36	18	—	22°24'	21	-1°30'
Рис. 4, г	1-2	38	18	0,4	16°40'	19	+2°20'
	2-3			0,17	20°10'	22	+1°50'
	3-4			0,0	22°42'	23	0
Рис. 4, д	1-2	34	18	0,51	15°35'	18	+2°30'
	2-3			0,30	18°30'	20	+1°30'
	3-4			0,175	21°06'	22	+1

через режущую кромку и линию пересечения наружных поверхностей срезаемого слоя и стружки, усредняют действительные направления сдвигов в переходной пластически деформируемой зоне, т.е. в этом случае, как и при обычном резании, предполагается одинаковая деформация по ширине стружки. Однако, при обработке с ОПД верхние, наиболее упрочненные обкаткой слои срезаемого материала в меньшей степени склонны к пластической деформации, чем ниже расположенные слои, что и отражают представленные в таблице результаты измерений.

Таким образом, при резании материала после его поверхностного упрочнения в процессе стружкообразования происходит выравнивание деформированного состояния, когда наиболее наклепанные слои материала испытывают меньшие степени деформации. Регулирование работы предварительной пластической деформации срезаемого слоя при резании с ОПД служит главным средством управления условиями обработки, позволяя существенно уменьшить напряженность процесса резания. В зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала сила резания снижается на 15–40 %, температура резания — на 4–12 %. Снижение этих параметров позволяет обеспечить повышение периода стойкости режущего инструмента в 2–6 раз, а производительности труда до 1,6 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 358089 (СССР). Способ обработки резанием / В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева, В.Н. Подураев. – Оpubл. в БИ, 1972. – № 34.
2. А.с. № 407648 (СССР). Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / В.М. Ярославцев. – Оpubл. в БИ, 1972. – № 47.
3. Я р о с л а в ц е в В. М. Резание с опережающим пластическим деформированием: Учеб. пособие по курсу “Перспективные технологии реновации”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 46 с.
4. Б о б р о в В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

Статья поступила в редакцию 22.02.2012

Нина Александровна Ярославцева окончила в 1960 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 научных работ в области теории резания, технологии обработки металлов.

N.A. Yaroslavtseva graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1960. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Treatment of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of theory of cutting, technology of treatment of materials.