

6. Эйринг Г., Лин С. Г., Лин С. М. Основы химической кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 528 с.
7. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки: Навч. посіб. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2002. – 392 с.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. – М.: Физматгиз, 1963. – 702 с.
9. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые матер.– 2001.– № 3.– С. 36–49.
10. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method / Yu. D. Filatov, O. Yu. Filatov, U. Heisel, M. Storchak, G. Monteil. // SPIE Photonics Europe 2010, Intern. Conf. – Brussels, Belgium, 12–16 Apr. 2010. – Paper 7718-55.
11. New technology of precision polishing of glass optic / V. V. Rogov, Y. D. Filatov, W. Kottler, V. P. Sobol // Opt. Eng. –**40**. – Aug. 2001. – P. 1641–1645.
12. Filatov O. Yu., Poperenko L. V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surf. Sc.– **253**, 31.– Oct. 2006. – P. 163–166.

Поступила 03.06.10

УДК 621.9.015

**А. С. Мановицкий**, канд. техн. наук

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

## **РАСЧЕТ УГЛОВ СДВИГА И ДЕЙСТВИЯ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ СВОБОДНОМ РЕЗАНИИ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ**

*The determination of shearing angle and acting angle when free orthogonal cutting of low-plastic carbon-ferrous alloys is provided by analytic method based on mechanical material resistance.*

Стружкообразование в зависимости от степени пластичности обрабатываемого материала в процессе резания происходит либо вследствие пластического течения металла в зоне резания, либо его разрушения с образованием и развитием трещин и последующим отделением элементной или суставчатой стружки. Известные методы подходов к оценке природы деформаций в зоне резания позволяют количественно решить задачу напряженно-деформированного состояния, но не всегда в достаточно полной мере описывают физическую сущность протекающих процессов.

Разработано несколько моделей зоны деформации при резании с одной и более плоскостями сдвига. По мнению подавляющего большинства исследователей процесс стружкообразования является результатом пластического сдвига металла в зоне деформации. Такой подход вполне справедлив для пластичных сплавов при их резании с низкой скоростью, однако, не в полной мере объясняет такие явления, как завивание сливной стружки и образование элементов стружки с формой их продольного сечения, близкой к треугольной. Также большинство исследователей считают, что в зоне пластической деформации действуют большие сжимающие напряжения, препятствующие разрыву материала, несмотря на то, что относительная деформация превосходит то ее значение, при котором происходит разрушение образца при растяжении. Несмотря на то, что более реалистичной представляется модель с развитой зоной деформации, аналитические исследования с применением моделей с одной плоскостью сдвига имеют вполне законченный вид и при обработке с высокой скоростью резания становятся все же более приемлемыми. Особенно это проявляется при обработке малопластичных и хрупких материалов [1].

Условно по соотношению пределов текучести и прочности обрабатываемые материалы можно разделить на весьма пластичные при  $\sigma_T(\sigma_{0,2})/\sigma_B = 0,45-0,55$ ; пластичные при  $\sigma_T/\sigma_B = 0,55-0,70$ ; малопластичные материалы, имеющие соотношение  $\sigma_T/\sigma_B = 0,70-0,90$ , и хрупкие – практически не обладающие текучестью [3]. В соответствии с этим признаком все закаленные стали и отбеленные, ковкие, высокопрочные чугуны можно отнести к малопластичным материалам.

При обработке инструментом с отрицательными значениями переднего угла, что характерно для обработки закаленных сталей и чугунов инструментом из поликристаллов нитрида бора (ПКНБ) материал припуска в зоне деформации испытывает деформации сжатия с последующим его вытеснением (сдвигом) в стружку. Как видно из рис. 1, текстура стружки образуется под углом, который не соответствует ни переднему углу резца, ни углу положения границы зоны стружкообразования [8]. Многочисленные шлифы, раскрывающие текстуру линий сдвига материала, переходящего в стружку, наилучшим образом исследованные Н.Н. Зоревым (пример показан на рис. 2) [2], получены при скорости резания, на два порядка меньшей по сравнению со скоростью точения труднообрабатываемых железоуглеродистых сплавов резцами, оснащенными ПКНБ. Соответственно, температура в зоне стружкообразования также ниже  $950 - 1100^\circ\text{C}$  [5, 10] (температура при точении закаленных сталей), а значит, напряжения и деформации обрабатываемого материала с этих случаях также значительно отличаются.

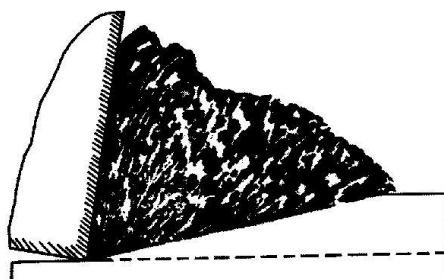


Рис.1. Изображение микрошлифа отделяемого элемента стружки с образующейся текстурой. Сталь 45,  $V = 60$  м/мин;  $S = 0,59$  мм/об;  $t = 1,5$  мм

В случае сливного стружкообразования очень сложно отделить зону первичной деформации от части материала припуска, уже перешедшего в стружку. Значительно легче это сделать, когда образуется элементная или суставчатая стружка.

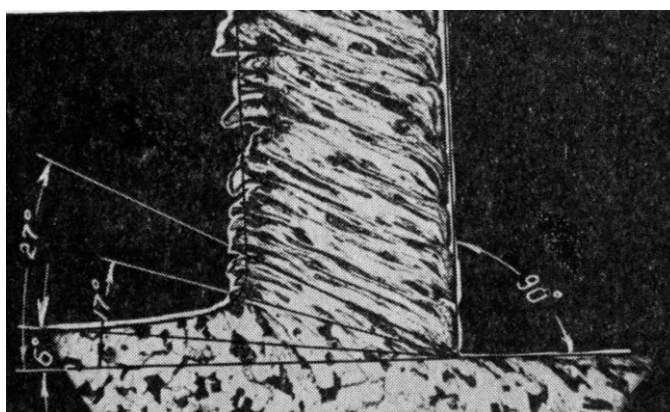


Рис. 2. Изображение границ зоны деформации при стружкообразовании и угла направления текстуры при свободном прямоугольном резании стали 20Х со скоростью  $V = 0,7$  м/мин, толщина среза  $a = 0,065$  мм [2]

Последовательность зарождения и образования элемента стружки [1], зафиксированная с помощью скоростной киносъемки с частотой 1500 кадров в секунду, показана на рис. 3.

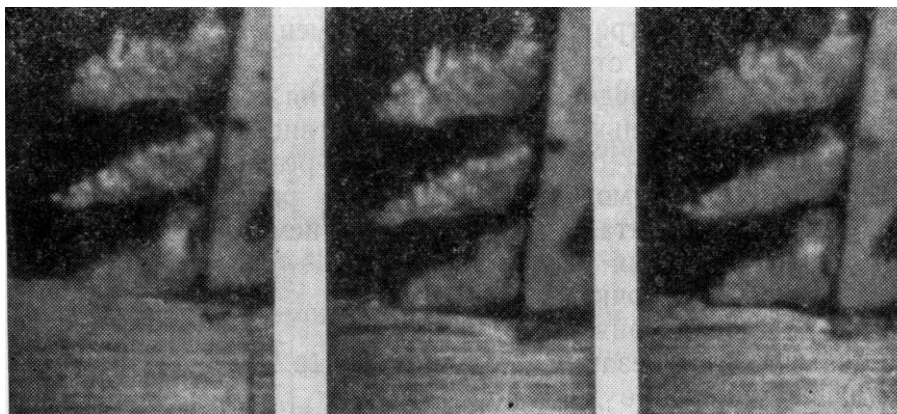


Рис. 3. Схема образования элементной стружки и текстуры при частоте скоростной съемки 1500 кадров в секунду холодноотянутой стали типа 20Г. Толщина среза – 0,25 мм

Кадры скоростной киносъемки, приведенные на рис.3, получены при прямоугольном свободном резании холодноотянутой стали типа 20Г со скоростью резания 40 м/мин и толщиной среза 0,25 мм. Еще на этапе зарождения элемента стружки в отделяемом материале начинают просматриваться линии текстуры сдвига материала, которые более отчетливо наблюдаются в уже отделившихся элементах стружки. При этом направление линий сдвига сохраняется. До тех пор, пока нормальные напряжения в элементарном объеме деформируемого материала уравновешиваются касательными напряжениями на передней поверхности резца, сдвиг не происходит, материал припуска пластически деформируется и вытесняется из зоны деформации на переднюю поверхность резца. Как только напряжения сжатия достигают предела прочности материала, происходит разрушение его элементарного объема и смещение по плоскости сдвига и затем по передней поверхности резца. Как справедливо утверждает С. С. Силин [9], сила стружкообразования при резании вызывает значительное сжатие и упруго-пластическое деформирование металла снимаемого припуска с последующим пластическим сдвигом (разрушением). Однако утверждение о том, что равнодействующая сила стружкообразования всегда должна составлять угол  $45^{\circ}$  с условной плоскостью сдвига, как это имеет место при разрушении цилиндрического образца при его сжатии, представляется недостаточно обоснованным. При разрушении образца угол  $45^{\circ}$  образуется как половина угла между основанием, на котором расположен нагружаемый образец, и направлением действия приложенной силы. При этом линия сдвига проходит через центр тяжести продольного сечения разрушаемого образца.

При прямоугольном свободном резании малопластичных материалов эта зона будет представлять собой неправильную фигуру, близкую к треугольнику. Сдвиг в объеме снимаемого припуска наиболее вероятно будет происходить по плоскости, с углом наклона, близким к углу текстуры и находящимся между передней поверхностью резца и нижней границей зоны стружкообразования и наиболее вероятно проходить через центр тяжести геометрической фигуры, представляющей собой проекцию зоны деформации на плоскость  $YZ$ .

Представим зону резания, как показано на рис 4. В этом случае зона стружкообразования будет ограничиваться снизу линией  $AE$ , а со стороны передней поверхности резца – линией  $AB$ .

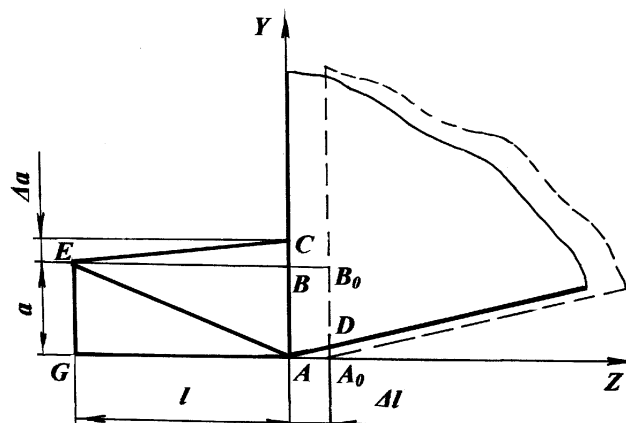


Рис. 4. Схема зоны деформации снимаемого припуска

Для упрощения выкладок и наглядности предположим, что передний угол реза равен нулю. Тогда элементарный (мгновенный) объем припуска, снимаемого резцом при свободном прямоугольном резании за бесконечно малый отрезок времени  $\Delta T$ , упрощенно можно представить в виде треугольника  $A_0EB_0$ , который мгновенно трансформируется в треугольник  $AEC$  при перемещении реза на расстояние  $\Delta l$ , как показано на рис. 4. При этом площадь сечения треугольника  $ABE$  будет равна площади сечения прямоугольника  $A_0ABD$ .

Непосредственно перед разрушением элементарного объема припуска и образования элемента стружки площадь поперечного сечения такого объема ближе всего можно представить треугольником  $AEC$ . Рассчитав и приравняв площади указанных фигур, получаем уравнение, решив которое относительно  $l$ , получим высоту  $BE$  треугольника  $AEC$ .

$$\frac{1}{2}l\Delta a = \Delta la, \quad (1)$$

$$l = \frac{2a\Delta l}{\Delta a}. \quad (2)$$

Для лучшего представления сечения элементарного объема снимаемого припуска после пластической деформации непосредственно перед сдвигом и определения положения плоскости сдвига произведем дополнительные построения, как показано на рис. 5.

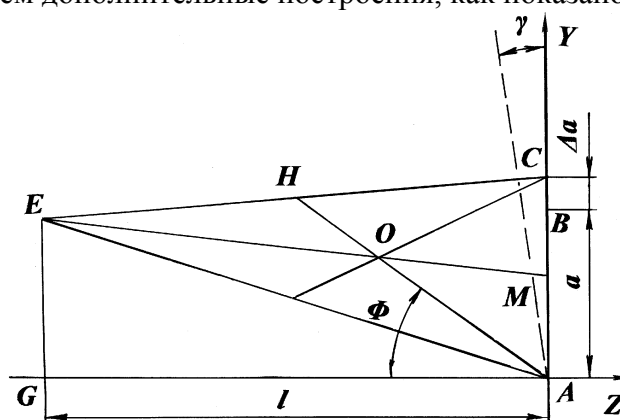


Рис. 5. Схема для определения угла наклона главной плоскости сдвига пластически деформированного припуска в зоне резания

Выражая через тангенс угла  $EAG$  отношение толщины среза к высоте треугольника  $AEC$ , определяем значение этого угла:

$$\angle EAG = \operatorname{arctg} \frac{a}{l} . \quad (3)$$

С учетом допущения, что линия разрушения (сдвига) элементарного объема проходит через его центр тяжести, находим точку  $O$ , которая является центром тяжести продольного сечения зоны стружкообразования. Проведенная через центр тяжести  $O$  и вершину резца  $A$  медиана  $AH$  стороны треугольника  $EC$  разделит угол  $EAC$  в соотношении 1:3.

Поскольку угол сдвига  $\Phi$  равен сумме угла  $EAG$  и  $1/3$  угла  $CAE$ , находим значение последнего:

$$\angle CAE = \left( \frac{p}{2} - \operatorname{arctg} \frac{a}{l} \right) = \operatorname{arcctg} \frac{a}{l} . \quad (4)$$

Суммируя значения  $EAG$  угла и  $1/3$  угла  $CAE$ , получаем уравнение для определения угла наклона условной плоскости сдвига:

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{a}{l} + \frac{1}{3} \operatorname{arcctg} \frac{a}{l} . \quad (5)$$

После подстановки значения  $l$  из уравнения (1) и сокращения на  $a$  числителя и знаменателя обоих слагаемых получаем следующее уравнение для определения угла наклона условной плоскости сдвига:

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta a}{2\Delta l} + \frac{1}{3} \operatorname{arcctg} \frac{\Delta a}{2\Delta l} . \quad (6)$$

Поскольку в рассматриваемом случае  $\Delta l$  и  $\Delta a$  представляют собой относительные изменения линейных размеров при сжатии и пластическом деформировании материала припуска непосредственно перед сдвигом, то можно представить их как относительное укорочение  $\delta$  и относительное утолщение  $\psi$  при сжатии в термических условиях, близких к температуре резания [7]. После подстановки этих характеристик обрабатываемого материала в уравнение (6) получаем выражение для определения угла наклона условной плоскости сдвига в зависимости от свойств обрабатываемого материала при нулевом значении переднего угла резца:

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{\psi}{2\delta} + \frac{1}{3} \operatorname{arcctg} \frac{\psi}{2\delta} . \quad (7)$$

При наличии у резца переднего угла, отличного от нуля, уравнение (7) преобразуется в уравнение вида

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{\psi}{2\delta} + \frac{1}{3} \operatorname{arcctg} \frac{\psi}{2\delta} \pm \gamma , \quad (8)$$

причем знак « $\leftarrow$ » применяется для отрицательного значения угла, а знак « $\rightarrow$ » – для положительного.

Для расчета равнодействующей силы стружкообразования при разрушении элементарного объема материала снимаемого припуска необходимо определить площадь контакта передней поверхности резца со снимаемым при резании припуском и площадь сдвига. Длина проекции плоскости сдвига  $AH$  (медиана треугольника  $AEC$ ) определяется по формуле

$$AH = \frac{a + \Delta a}{\cos \left( \frac{p}{2} - \gamma - \Pi \right)} = \frac{a(1 + \psi)}{\sin (\gamma + \Pi)} . \quad (9)$$

Из уравнения (9) можно перейти к уравнению для определения площади плоскости сдвига элементарного объема припуска, умножив длину медианы  $AH$  на длину режущей кромки  $b$ . После расчета площади сечения среза припуска (контакта передней поверхности резца со снимаемым припуском) [6] и проецирования ее на площадь сдвига получим следующее уравнение:

$$A_{\Phi} = \frac{a(1 + \sin \gamma)b}{\sin(\gamma + \Phi)}. \quad (10)$$

В простейшем случае прямоугольного свободного резания площадь сечения среза и является площадью контакта припуска по передней поверхности, т. е. произведением толщины среза на длину режущей кромки резца. Отдельно следует рассчитать действительную площадь контакта типовых режущих элементов со срезаемым припуском [4]. После расчета площади сечения среза припуска (контакта передней поверхности резца со снимаемым припуском)  $A_{\gamma}$  можно спроецировать ее на площадь сдвига  $A_{\Phi}$ , разделив на знаменатель уравнения (10).

Как доказано фундаментальными исследованиями механики процесса резания металлов [2], с обобщением отечественных и зарубежных исследований, при поавшении скорости резания ширина пластической зоны значительно уменьшается и практически превращается в плоскость. Тогда становится справедливым уравнение, описывающее зависимость между углами сдвига, трения и передним углом резца:

$$2\Phi + \beta - \gamma = \frac{\rho}{2}, \quad (11)$$

где:  $\beta$  – угол трения;  $\gamma$  – передний угол резца.

Исходя из равновесия сил, действующих на стружку и резец, получаем формулу для определения угла действия силы стружкообразования (угла между вектором равнодействующей силы стружкообразования и плоскостью сдвига):

$$\Theta = \Phi + \beta - \gamma. \quad (12)$$

Зная угол сдвига  $\Phi$  и рассчитав угол трения  $\beta$  по уравнению (9), получим угол действия  $\Theta$ . После этого можно рассчитать радиальную (нормальную)  $P_y$  и тангенциальную  $P_z$  составляющие силы стружкообразования, а также силу нормального давления  $N_{\gamma}$  и силу трения  $F_{\gamma}$  на передней поверхности резца.

### Литература

1. Армареги И. Дж. А., Браун Р. Х. Обработка металлов резанием / Пер. с англ. В. А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 326 с.
2. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 364 с.
3. Королев П. Г. Сопротивление материалов: Справочник по расчетно-проект. раб. – К.: Выща шк., 1974. – 288 с.
4. Новиков Н. В., Мановицкий А. С., Клименко С. А. Расчет силы стружкообразования при сложнопрофильном точении резцами, оснащенными круглыми пластинами // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: Сб. науч. тр. – Краматорск; К., 2008. – Вып. № 23 – С. 3–11.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: В 10 т. / Новиков Ф. В. и др. – Одесса: Изд-во ОНПУ, 2003. – Т. 3: Резание материалов лезвийными инструментами. – 546 с.
6. Полетика М. Ф., Гольдшмидт М. Г., Стефанов Ю. П. Математическое моделирование процесса резания // Вопр. механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. – К.: Изд-во ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2002. – С. 33–43.
7. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
8. Розенберг Ю. А. Резание материалов: Учеб. для техн. вузов. – Курган: Полиграф комбинат, Зауралье, 2007. – 294 с.
9. Силян С. С. Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
10. Y. Kevin Chou, Chris J. Evans, Moshe M. Barash. Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel. Manufacturing Engineering Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA. School of Industrial Engineering, Purdue Univers, West Lafayette, IN, USA // Journal of Mater. Proc. Technology. – № 124. – 2002. – P. 274–283.

Поступила 09.06.10