

**А.С. Мановицкий, к.т.н.***Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля  
НАН Украины***РАСЧЕТ УГЛА СДВИГА В СТАТИКЕ  
ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ СВОБОДНОМ РЕЗАНИИ  
МАЛОПЛАСТИЧНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ**

*Актуальная проблема расчета и прогнозирования характерных показателей процесса деформации материала в зоне лезвийной обработки требует современных подходов для определения классических характеристик процесса резания аналитическими методами с отображением физической сущности стружкообразования. В работе приведен теоретический анализ в статике процесса стружкообразования со сдвигом и расчет угла сдвига малопластичных железоуглеродистых сплавов на примере свободного прямоугольного резания закаленной стали ШХ 15.*

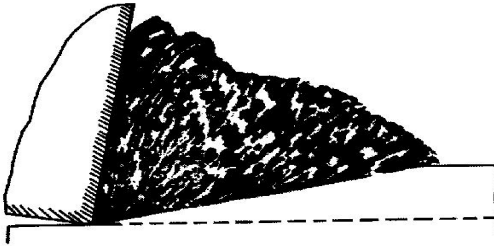
**Постановка проблемы.** Стружкообразование в зависимости от степени пластичности обрабатываемого материала в процессе резания происходит либо вследствие пластического течения металла в зоне резания, либо его разрушения с образованием и развитием трещин и последующим отделением элементной или суставчатой 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.

Одним из основополагающих положений науки о резании материалов является зависимость усадки стружки от степени деформации материала срезаемого слоя. Долгое время усадка стружки является одной из основных характеристик, позволяющих судить о явлениях, происходящих в зоне резания и производить многие расчеты с ее использованием. Вместе с тем также хорошо известно, что измерение длины пути резания, длины и толщины срезанной стружки, ее взвешивание и производство окончательных расчетов с определением истинных величин и значений усадки стружки сопряжены со значительными трудозатратами, имеют немалые погрешности и чрезвычайно неудобны при практическом использовании в примышленном производстве. Особенно затруднено получение значений усадки стружки при образовании элементной и суставчатых стружек, длину которых практически невозможно измерить.

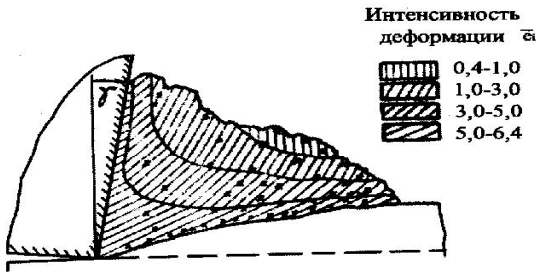
**Изложение основного материала.** Известно [1, 2, 8, 9], что отделение металла происходит в зоне резания, где металл получил деформацию, равную предельной, и при напряжении, равном пределу текучести максимально упрочненного металла. На контакте с передней поверхностью напряжения в металле стружки также достигают своих предельных значений. М.Ф. Полетика [6] считает, что элемент стружки образуется вследствие зарождения и развития трещины в непосредственной близости к режущей кромке инструмента. На рисунке 1 приведен микрошлиф отделяемого элемента стружки с образующейся текстурой, направление которой меняется в зависимости от места расположения материала снимаемого элемента в зоне резания [8]. Как видно из приведенного рисунка, направление текстуры стремится к направлению конечной плоскости сдвига, в которой металл предельно упрочнен и подвергается сдвигу, в результате которого и отделяется стружка от основного материала снимаемого припуска.

При дальнейшем контактном взаимодействии стружки с передней поверхностью резца происходит дополнительный нагрев стружки вследствие ее трения о переднюю поверхность и текстура размягченной стружки уже формируется не столько от сдвиговых напряжений при ее отделении, сколько благодаря контактному трению о переднюю поверхность инструмента и внутреннему трению металла стружки.

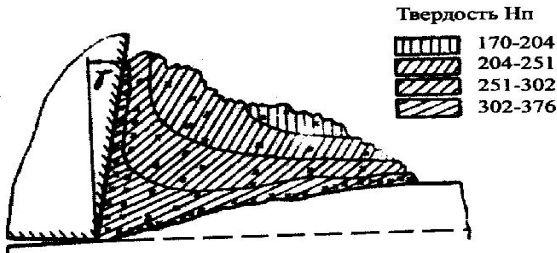
В теории резания разработано несколько моделей зоны деформации при резании с одной и более плоскостями сдвига. По мнению подавляющего большинства исследователей процесс стружкообразования является результатом пластического сдвига металла в зоне деформации. Такой подход вполне справедлив для пластичных 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.



Микрошлиф элемента стружки.  
Ст. 45,  $V=60\text{м/мин}$ ,  $S=0,59\text{ мм/об}$ ,  $t=1,5\text{ мм}$



Распределение интенсивности деформации по элементу стружки



Распределение твердости по элементу стружки

Рис. 1. Микрошлиф отделяемого элемента стружки с образующейся текстурой

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, 11].

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 рисунка 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 [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 950–1200 °С [5, 10, 111] (температура при точении закаленных сталей), а значит, напряжения и деформации обрабатываемого материала с этих случаях также значительно отличаются.

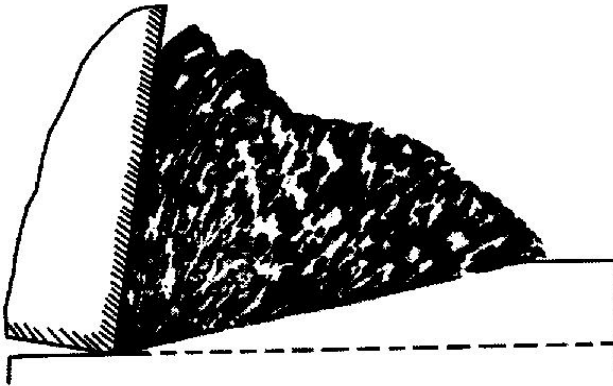


Рис. 1, а. Изображение микрошлифа отделяемого элемента стружки с образующейся текстурой. Сталь 45,  $V = 60$  м/мин.;  
 $S = 0,59$  мм/об.;  $t = 1,5$  мм

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. Корень стружки со слоистой текстурой, образовавшийся вследствие сдвиговых процессов, приведен на рисунке 2.

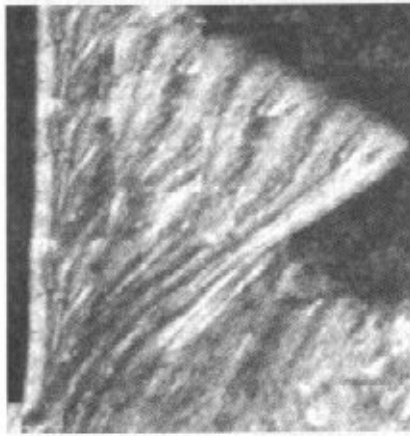


Рис. 2. Корень стружки с текстурой сдвига материала припуска [11]

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



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

Кадры скоростной киносъемки, приведенные на рисунке 3, получены при прямоугольном свободном резании холоднотянутой 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 уравниваются 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 рисунке 4. В этом случае зона стружкообразования будет ограничиваться снизу линией  $AE$ , а со стороны передней поверхности резца – линией  $AB$ .

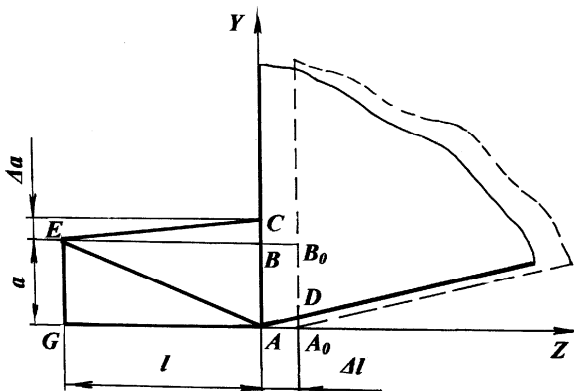


Рис. 4. Схема зоны деформации снимаемого припуска

Для упрощения выкладок и наглядности предположим, что передний угол резца 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 резца на расстояние  $\Delta l$ , как показано на рисунке 4. При этом площадь сечения треугольника  $BEC$  будет равна площади сечения прямоугольника  $A_0ABB_0$ .

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 рисунке 5.

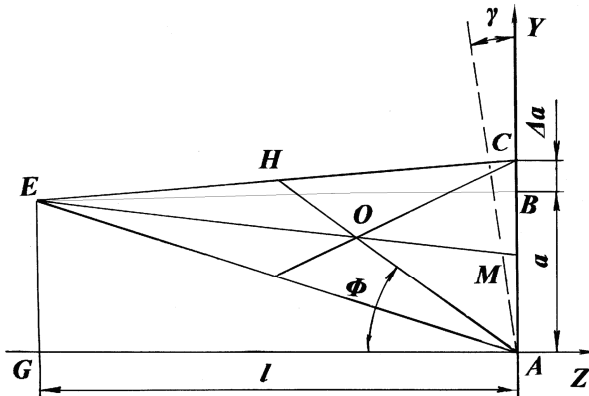


Рис. 5. Схема для определения угла наклона главной плоскости сдвига пластически деформированного припуска в зоне резания

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

$$\angle CAH = \frac{\pi}{2} - \Phi. \quad (3)$$

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. Находим угол  $BCE$  из одноименного треугольника:



$$\angle BCE = \operatorname{arctg} \frac{l}{\Delta a}. \quad (4)$$

Тогда сторона  $EC$  этого треугольника будет:

$$EC = \frac{\Delta a}{\cos \operatorname{arctg} \frac{l}{\Delta a}}. \quad (5)$$

Сторона  $AC = a + \Delta a$ , а сторона  $HC$  треугольника  $ACH$  будет:

$$HC = \frac{1}{2} EC = \frac{\Delta a}{2 \cos \operatorname{arctg} \frac{l}{\Delta a}}. \quad (6)$$

По теореме косинусов:

$$\begin{aligned} AH^2 &= HC^2 + AC^2 - 2HC \cdot AC \cos \angle BCE = \\ &= \left( \frac{\Delta a}{2 \cos \operatorname{arctg} \frac{l}{\Delta a}} \right)^2 + (a + \Delta a)^2 - \frac{2\Delta a}{2 \cos \operatorname{arctg} \frac{l}{\Delta a}} \cdot (a + \Delta a) \cdot \cos \operatorname{arctg} \frac{l}{\Delta a} \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки значения проведения сокращения и извлечения квадратного корня получаем следующее уравнение для определения действительного значения длины условной плоскости сдвига:

$$AH = \sqrt{\left( \frac{\Delta a}{2 \cos \operatorname{arctg} \frac{l}{\Delta a}} \right)^2 + (a + \Delta a)^2 - \Delta a(a + \Delta a)}. \quad (8)$$

Из теоремы синусов соотношение сторон и углов треугольника  $ACH$  будет следующим:

$$\frac{HC}{\sin \angle CAH} = \frac{AH}{\sin \angle ACH}. \quad (9)$$

Следовательно,

$$\sin \angle CAH = \frac{HC \sin \angle ACH}{AH}. \quad (10)$$

Поскольку  $\angle CAH = \frac{\pi}{2} - \Phi$ , то с учетом формул приведения при наличии у резца переднего угла, отличного от нуля, находим искомый угол сдвига:

$$\Phi = \arccos \frac{\Delta a \cdot \operatorname{sinarctg} \frac{l}{\Delta a}}{\sqrt{\left( \frac{\Delta a}{2 \operatorname{cosarctg} \frac{l}{\Delta a}} \right)^2 + (a + \Delta a)^2 - \Delta a(a + \Delta a)}} \pm \gamma, \quad (11)$$

Причем знак «-» применяется для отрицательного значения угла, а знак «+» – для положительного.

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 уравнения (8) и (11) получаем выражение для определения длины и угла наклона условной плоскости сдвига в зависимости от свойств обрабатываемого материала при нулевом значении переднего угла реза:

$$\Delta l \approx \delta \cdot l; \quad \Delta a \approx \psi \cdot a. \quad (12)$$

При единичном значении толщины среза  $a$  относительное значение утолщение принимает значение  $\psi$ , а относительное укорочение –  $\delta$ , тогда при заданном значении толщины среза величина  $l$  может быть рассчитана после подстановки в уравнение (2), которое примет следующий вид:

$$l = \frac{2a\delta}{\psi}. \quad (13)$$

Таким образом, мы получили возможность выразить условную длину  $l$  треугольной зоны деформации малопластичного материала при резании через заданную фактическую толщину среза и значения относительных деформаций укорочения и утолщения в условиях резания соответственно.

После подстановки в уравнение (8)  $\Delta a$  из равенства (12) и  $l$  из (13) и проведения несложных преобразований получаем зависимость длины линии сдвига от толщины среза и показателей относительных деформаций обрабатываемого материала при температуре резания:

$$AH = \sqrt{\left( \frac{a\psi}{2 \operatorname{cosarctg} 2\delta} \right)^2 + a^2(1 + \psi)}. \quad (14)$$

Угол сдвига, выраженный через толщину среза  $a$  и относительные деформации срезаемого материала в термобарических условиях резания, находим после подстановки  $\Delta a$  и  $l$  в уравнение (11), которое в окончательном виде выглядит так:

$$\Phi = \arccos \frac{\psi a \cdot \sin \arctg 2\delta}{\sqrt{\left(\frac{a\psi}{2\cos \arctg 2\delta}\right)^2 + a^2 + a^2(1+\psi)}} \pm \gamma \quad (15)$$

При высоких скоростях резания, что неизбежно приводит к необходимости рассмотрения схемы с единственной плоскостью сдвига как единственно достоверной модели, формулы, полученные в результате многочисленных исследований, проведенных как отечественными, так и зарубежными учеными, фактически сводятся к уравнению М.Мерчанта, определяющего угол действия как основной фактор влияния на угол сдвига деформированного материала в зоне резания [1, 2, 8, 12]:

$$2\Phi + \varpi = \pi / 2 \quad (16)$$

Из этого уравнения с учетом полученной зависимости для угла сдвига находим угол действия  $\omega$ ,

$$\varpi = \pi / 2 - 2\Phi \quad (17)$$

который, в свою очередь, связан с углом трения на передней поверхности и отрицательным передним углом реза следующей зависимостью [12]:

$$\beta = \varpi - \gamma \quad (18)$$

и после подстановки этого выражения в уравнение (17) находим выражение угла трения на передней поверхности через угол сдвига и негативный передний угол реза:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - 2\Phi + \gamma \quad (19)$$

Рассчитав значение угла сдвига по формуле (15), мы также можем получить расчетное значение коэффициента продольной усадки стружки  $K_L$  из следующего уравнения [12]:

$$K_L = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi} \quad (20)$$

Предложенная А.М. Розенбергом и О.А. Розенбергом эмпирическая формула [12] для расчета коэффициента трения по

передней и задней поверхностям реза для сталей, закаленных до твердости HRC > 55:

$$\mu_1 = \frac{22500}{(90 - \gamma)^{2,46}} K_L^{0,0015(90 - \gamma)^{1,27}} \quad (21)$$

не очень удобна для расчетов, однако может послужить для сравнения значений коэффициента трения, полученных из расчета с ее использованием при использовании уравнения (20) со значением угла трения, вычисленного по уравнению (19).

Сравнение средних арифметических значений угла трения, найденного из уравнения (19) трения и рассчитанного по формуле (21) с учетом данных по относительному удлинению и сужению стали ШХ15 при высоких температурах, соответствующих температуре резания, приведенных из справочных данных [14], показали хорошую сходимость в диапазоне значений передних углов от 5 до 10 градусов.

**Вывод.** Полученные путем численного решения уравнений с помощью программы MathCad, значения угла сдвига в зависимости от температуры изменяются от 55 до 40 град. в диапазоне изменения отрицательных значений переднего угла от 5 до 20 град. соответственно. При этом установлено, что толщина среза никак не влияет на величину угла сдвига, а воздействие переднего угла – максимально. Можно предположить, что при малых толщинах среза и с возрастанием износа на величину угла сдвига наиболее существенное влияние будет оказывать фактический передний угол, увеличивающийся с возрастанием радиуса округления режущей кромки реза от периферии передней грани до вершины реза.

### Список використаної літератури:

1. *Армарего И.Дж.А.* Обработка металлов резанием / *И.Дж.А. Армарего, Р.Х. Браун* ; пер. с англ. *В.А. Пастунова*. – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с.
2. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов / *Н.Н. Зорев*. – М. : Машгиз, 1956. – 364 с.
3. *Королев П.Г.* Сопроотивление материалов : справочник по расчетно-проект. раб. – К. : Выща шк., 1974. – 288 с.
4. *Новиков Н.В.* Расчет силы стружкообразования при сложнопрофильном точении резцами, оснащенными круглыми пластинами / *Н.В. Новиков, А.С. Мановицкий, С.А. Клименко* // 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.* Математическое моделирование процесса резания / *М.Ф. Полетика, М.Г. Гольдшмидт, Ю.П. Стефанов* // Вопросы 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.* Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов / *П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин.* – М. : Металлургия, 1976. – 488 с.
8. *Розенберг Ю.А.* Резание материалов : учеб. для техн. вузов / *Ю.А. Розенберг.* – Курган : Полиграф комбинат, Зауралье, 2007. – 294 с
9. *Силин С.С.* Метод подобия при резании материалов / *С.С. Силин.* – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
10. 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 / *Y. Kevin Chou, Chris J. Evans, Moshe M. Barash* // Journal of Mater. Proc. Technology. – № 124. – 2002. – P. 274–283.
11. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : монография : в 6 т. / под общей ред. *Н.В. Новикова.* – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – Т. 5 : Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. *С.А. Клименко.* – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.
12. Основи теорії різання матеріалів : підручник / *М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок та ін.* ; за заг. ред. *М.П. Мазура.* – Львів : Новий Світ–2000, 2010. – 422 с.
13. *Розенберг А.М.* Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / *А.М. Розенберг, О.А. Розенберг.* – К. : Наукова думка, 1990. – 320 с.

МАНОВИЦКИЙ Александр Степанович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обробка матеріалів різанням;
  - режущі інструменти.
- Тел.: (044)432–95–70.

Стаття поступила в редакцію 30.07.2013

**Мановицький О.С.** Розрахунок кута зсуву в статистиці при ортогональному вільному різанні мало пластичних вуглецевих сплавів  
**Мановицький А.С.** Расчет угла сдвига в статике при ортогональном свободном резании малопластичных углеродистых сплавов  
**Мановицький А.С.** Расчет угла сдвига в статике при ортогональном свободном резании малопластичных углеродистых сплавов

УДК 621.9.015

**Розрахунок кута зсуву в статистиці при ортогональному вільному різанні мало пластичних вуглецевих сплавів / О.С. Мановицький**

Актуальна проблема обрахування та прогнозування характерних показників процесу деформації матеріалу в зоні лезової обробки вимагає сучасних підходів до визначення класичних характеристик процесу різання аналітичними методами з відображенням фізичної сутності стружкоутворення. В роботі наведено теоретичний аналіз в статистиці зсувного процесу стружкоутворення та розрахунок кута зсуву малопластичних залізо-вуглецевих сплавів на прикладі вільного прямокутного різання загартованої сталі ШХ 15.

УДК 621.9.015

**Розрахунок кута зсуву в статистиці при ортогональному вільному різанні мало пластичних вуглецевих сплавів / О.С. Мановицький**

The actual problem of calculation and forecasting of critical parameters of material deformation process in zone of single point cutting requires modern approaches to determination of classic indicators of cutting process by analytic methods with reflection of physic nature of shall-formation. In the item the theoretic analysis of shift process and calculation of shearing angle in static when free orthogonal cutting of low-plastic carbon-ferrous alloys is provided on example of ШХ 15 hardened steel.