

Н.В. Новиков, академик НАН Украины, д-р техн. наук,
С.А. Клименко, д-р техн. наук,
А.С. Мановицкий, канд. техн. наук, Киев, Украина

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА СДВИГА ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ СВОБОДНОМ РЕЗАНИИ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

У статті представлено визначення кута зрушення при вільному ортогональному різанні малопластичних углеродистих сплавів, що забезпечується аналітичним методом, заснованим на механічному опорі матеріалів.

В статье представлено определение угла сдвига при свободном ортогональном резании малопластичных углеродистых сплавов, которое обеспечивается аналитическим методом, основанным на механическом сопротивлении материалов.

*N.V. NOVIKOV, S.A. KLIMENKO, A.S. MANOVICKII
SETTLEMENT DEFINITION OF THE CORNER OF SHIFT AT ORTHOGONAL FREE
CUTTING МАЛОПЛАСТИЧНЫХ OF CARBONACEOUS ALLOYS*

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

В зависимости от степени пластичности обрабатываемого материала стружкообразование 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.

Долгое время усадка стружки является одной из основных характеристик, позволяющих судить о явлениях, происходящих в зоне резания и производить многие расчеты с ее использованием. Одним из основополагающих положений науки о резании материалов является зависимость усадки стружки от степени деформации материала срезаемого слоя. 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.

Используя общепринятую схему стружкообразования с единственной плоскостью сдвига, и зная площади контакта передних поверхностей режущих элементов со срезаемым припуском, можно предпринять попытку описать контактные явления в зоне резания и произвести расчет силы стружкообразования.

Известно, 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 и М.Г. Гольдшмидт [6] считают, что элемент стружки образуется вследствие зарождения и развития трещины в непосредственной близости к режущей кромке инструмента.

На рис. 1 приведен микрошлиф отделяемого элемента стружки с образующейся текстурой, направление которой меняется в зависимости от места расположения материала снимаемого элемента в зоне резания [8].

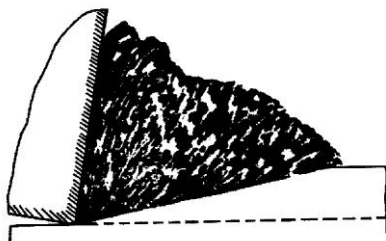


Рисунок 1 – Изображение микрошлифа отделяемого элемента стружки с образующейся текстурой. Сталь 45, $V=60$ м/мин; $S=0,59$ мм/об; $t=1,5$ мм.

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 контактом 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.

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 завершённый 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 $\sigma_{\tau}(\sigma_{0,2})/\sigma_B = 0,45-0,55$; пластичные при $\sigma_{\tau}/\sigma_B = 0,55-0,70$; малопластичные материалы, имеющие соотношение $\sigma_{\tau}/\sigma_B = 0,70-0,90$, 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, 111] (температура при точении закаленных сталей), а значит, напряжения и деформации обрабатываемого материала с этих случаях также значительно отличаются.

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.

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

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.

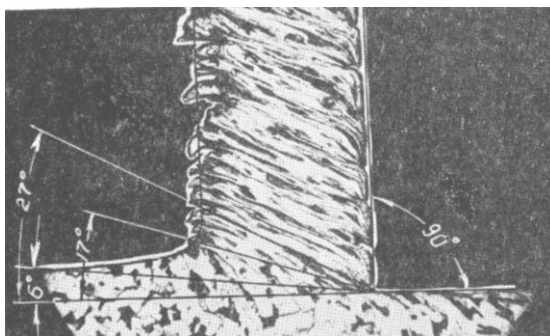


Рисунок 2 – Изображение границ зоны деформации при стружкообразовании и угла направления текстуры при свободном прямоугольном резании стали 20Х со скоростью $V = 0,7$ м/мин, толщина среза $a = 0,065$ мм [2].

Кадры скоростной киносъемки, приведенные на рис.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.

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° с условной плоскостью сдвига, как это имеет место при разрушении цилиндрического образца при его сжатии, представляется недостаточно обоснованным.

При разрушении образца угол 45° 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 .



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

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 .

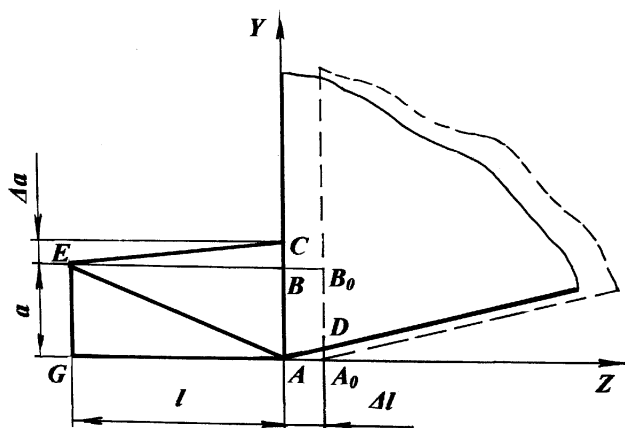


Рисунок 4 – Схема зоны деформации снимаемого припуска

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 ΔT , упрощенно можно представить в виде треугольника A_0EB_0 , который мгновенно трансформируется в треугольник AEC при перемещении резца на расстояние Δl , как показано на рис. 4. При этом площадь сечения треугольника BEC будет равна площади сечения прямоуголь-

ника 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 .

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.

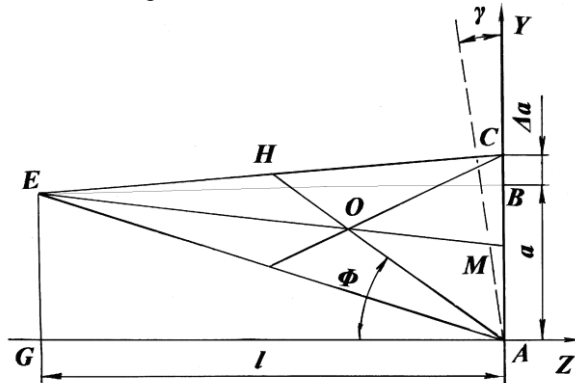


Рисунок 5 – Схема для определения угла наклона главной плоскости сдвига пластически деформированного припуска в зоне резания

$$\frac{1}{2}l\Delta a = \Delta la, \tag{1}$$

$$l = \frac{2a\Delta l}{\Delta a}. \tag{2}$$

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

$$\angle CAH = \frac{\pi}{2} - \Phi. \tag{3}$$

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:

$$\angle BCE = \arctg \frac{l}{\Delta a}. \tag{4}$$

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:

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

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 реза переднего угла, отличного от нуля, находим искомый угол сдвига:

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

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

В рассматриваемом случае Δl и Δa представляют собой относительные изменения линейных размеров при сжатии и пластическом деформировании материала припуска непосредственно перед сдвигом, то можно представить их как относительное укорочение δ и относительное утолщение ψ 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 резца:

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

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

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:

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

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_{γ} можно спроецировать ее на площадь сдвига A_{Φ} , разделив на знаменатель уравнения (10).

Как доказано фундаментальными исследованиями механики процесса резания металлов [2], с обобщением отечественных и зарубежных исследований, при повышении скорости резания ширина пластической зоны значительно уменьшается и практически превращается в плоскость. Тогда стано-

вится справедливым уравнение, описывающее зависимость между углами сдвига, трения и передним углом резца:

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

где: η – угол трения; γ – передний угол резца.

$$\eta = \frac{\pi}{2} - 2\Phi + \gamma, \quad (12)$$

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):

$$\Theta = \Phi + \eta - \gamma. \quad (13)$$

Зная угол сдвига Φ и рассчитав угол трения β из уравнению (12), получим угол действия Θ . После этого можно рассчитать радиальную (нормальную) P_y и тангенциальную P_z составляющие силы стружкообразования, а также силу нормального давления N_y и силу трения F_y на передней поверхности резца.

Упрощенная пластическая зона резания, представленная треугольником ACE на рис.1 и рис.2, в действительности не ограничивается четкой плоскостью. Металл в зоне сдвига переходит в пластическое состояние под действием касательных и нормальных нагрузок и условие пластичности может быть выражено с использованием критерия Мизеса следующим образом:

$$\sigma_B^2 = [\sigma(t)]^2 + 3[\tau(t)]^2. \quad (14)$$

где: σ_B – предел текучести сплава при растяжении; $\tau(t)$ – касательные напряжения; $\sigma(t)$ – нормальные напряжения;

В условиях начала сдвига касательные напряжения достигают своего максимума, а нормальные – стремятся к нулю и из уравнения (14) следует, что максимальные касательные напряжения в плоскости сдвига могут быть рассчитаны по следующему уравнению:

$$\tau = \frac{1}{3} \sigma_B. \quad (15)$$

Список использованных источников: 1. *Армарего 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 Укр. раины, 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. Силин 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. 11. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография в 6 томах / Под общей ред. Н.В. Новикова.– Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. Том 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко.– Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.

Поступила в редколлегию 08.04.2011.

Bibliography (transliterated): 1. Armarego I. Dzh. A., Braun R. H. Obrabotka metallov rezaniem / Per. s angl. V. A. Pastunova. – М.: Mashinostroenie, 1977. –326 s. 2. Zorev N. N. Voprosy mehaniki processa rezanija metallov.– М.: Mashgiz, 1956. – 364 s. 3. Korolev P. G. Soprotivlenie materialov: Spravochnik po raschetno-proekt. rab. – К.: Vywa shk., 1974. – 288 s. 4. Novikov N. V., Manovickij A. S., Klimenko S. A. Raschet sily struzhkoobrazovanija pri slozh-noprofil'nom tochenii rezcami, osnawennymi kruglymi plastinami // Nadezhnost' instrumen-ta i optimizacija tehnologicheskikh sistem: Sb. nauch. tr. – Kramatorsk; K., 2008. – Vyp. № 23 – S. 3–11. 5. Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashino-stroenija: V 10 t. / Novikov F. V. i dr. – Odessa: Izd-vo ONPU, 2003. – Т. 3: Rezanie materialov lezviynymi instrumentami. – 546 s. 6. Poletika M. F., Gol'dshmidt M. G., Stefanov Ju. P. Matematicheskoe modelirovanie processa rezanija // Vopr. mehaniki i fiziki processov reza-nija i holodnogo plasticheskogo deformirovanija. – К.: Izd-vo ISM im. V. N. Bakulja NAN Uk-rainy, 2002. – S. ZZ-43. 7. Poluhin P. I., Gun G. Ja., Galkin A.M. Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallov i splavov. – М.: Metallurgija, 1976. – 488 s. 8. Rozenberg Ju. A. Rezanie materialov: Ucheb. dlja tehn. vuzov.– Курган: Poligraf kombinat, Zaural'e, 2007.– 294 s. 9. Silin S. S. Metod podobija pri rezanii materialov. – М.: Mashinostroenie, 1979.–152 s. 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. – R. 274–283. 11. Sverh-tverдые materialy. Poluchenie i primenenie: monografija v 6 tomah / Pod obwey red. N.V. No-vikova.– Киев: ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2006. Том 5: Obrabotka materia-lov lezviynym instrumentom / Pod red. S.A. Klimenko.– Киев: ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2006. – 316 s.