

А.С. Манохин, канд. техн. наук, С.А. Клименко, д-р. техн. наук,  
Ю.А. Мельничук, канд. техн. наук, Киев, Украина

## ПАРАМЕТРЫ СЕЧЕНИЯ СРЕЗА ПРИ ТОЧЕНИИ ИНСТРУМЕНТОМ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Выполнено аналитическое определение толщины среза вдоль режущей кромки инструмента с цилиндрической передней поверхностью, оснащенного круглой режущей пластиной. Определены величины углов в плане и наклона режущей кромки таких инструментов.*

*Виконано аналітичне визначення товщини зрізу вдовж різальної кромки інструменту з циліндричною передньою поверхнею, оснащеного круглою різальною пластиною. Визначено величини кутів у плані та нахилу різальної кромки таких інструментів.*

*Analytical methods are used to determine thickness of cut in the every point of cutting edge of round tipped cylindrical-front surface tool. Cutting edge angles and inclination of this tool are evaluated.*

Известно, что, из-за пластических явлений в зоне резания, высота неровностей не соответствует рассчитанной исходя из кинематико-геометрических представлений о процессе обработки и превышает ее на величину  $H_{пл}$ , зависящую от глубины резания, геометрических параметров режущего инструмента и механических свойств обрабатываемого материала [1]. Это явление обусловлено пластическим сдвигом в объеме удаляемого металла в зоне резания и образованием перед сходящей стружкой волны деформации за счет наличия у инструмента главной и вспомогательной режущих кромок. В точке над передней поверхностью инструмента, соответствующей максимальным касательным напряжениям, происходит разделение материала на срезаемую и выдавливаемую части с последующим перемещением последней в сторону вершины формируемой неровности. Таким образом, неравномерность пластической деформации вдоль режущих кромок резца, характерная для несвободного резания, способствует приращению высоты неровностей, образующихся в процессе обработки.

Уменьшить составляющую  $H_{пл}$  можно применяя режущий инструмент с цилиндрической передней поверхностью, ось которой направлена в сторону схода стружки [2, 3]. В этом случае условия для пластической деформации в зоне сдвига более благоприятны, что проявляется в минимизации причин, обуславливающих выдавливание металла в формируемую неровность. Кроме того, у инструментов с цилиндрической передней поверхностью проекция режущей кромки на основную плоскость имеет больший радиус кривизны, чем у обычных резцов, что также способствует снижению высоты микронеровностей. Шероховатость поверхности, обработанной резцами

данного типа, до двух раз ниже, чем обработанной обычными резцами при условии равенства подач.

Таким образом, совершенствование конструкции токарных резцов позволяет существенно повысить производительность обработки, обеспечив при этом более высокое качество обработанной поверхности.

Изменение формы передней поверхности инструмента приводит к изменению его геометрических параметров и формы сечения среза, что затрудняет определение размеров срезаемого слоя – толщины среза и длины активной части режущей кромки. Расчет этих величин и оценка их влияния на параметры контактного взаимодействия в зоне резания расширяет возможности по управлению процессом обработки и оптимизации режимов резания.

В настоящей работе представлены аналитические зависимости, определяющие геометрические параметры инструмента и параметры сечения среза при точении резцом с цилиндрической передней поверхностью, оснащенным негативно установленной круглой режущей пластиной без фаски.

В соответствии с ГОСТ 35762-83, толщина среза – «длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя». В соответствии с этим, для расчета ограниченной сечением срезаемого слоя длины нормали  $a_i$  к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, используется выражение [4], оценка по которому не зависит от формы инструмента, его геометрических параметров и траектории движения:

$$a_i = \frac{\vec{S} \cdot \vec{N}}{|\vec{N}|} = \frac{\vec{S} \left[ \vec{P} \times \vec{v}_e \right]}{\left[ \vec{P} \times \vec{v}_e \right]},$$

где  $\vec{S}$  – вектор подачи;  $\vec{N}$  – вектор нормали к поверхности резания в рассматриваемой точке;  $\vec{v}_e$  – вектор скорости результирующего движения резания;  $\vec{P}$  – вектор касательной к режущей кромке в точке.

Нужно отметить, что при расчете по этому выражению, в точке выхода лезвия из контакта с материалом толщина среза достигает своего максимального значения, а не стремиться к нулю как это имеет дело в действительности. Поэтому в настоящей работе толщину среза будем находить, как длину нормали к поверхности резания, проведенную через рассматриваемую точку режущей кромки и ограниченную поверхностью, образованной при предыдущем проходе инструмента или еще не обработанной поверхностью детали.

Для решения поставленной задачи зададимся системой координат (рис. 1):  $OXYZ$  – неподвижная система, ось  $OZ$  которой направлена вдоль оси детали;  $(OXYZ)_0$  – система, которая вращается вокруг оси  $OZ$  и перемещается вдоль нее;  $(OXYZ)_1$  – система, образованная параллельным переносом системы  $(OXYZ)_0$  вдоль оси  $X_0$  на расстояние  $(R - t)$ . Система  $(OXYZ)_2$  образована

поворотом системы  $(OXYZ)_1$  против часовой стрелки на угол  $\lambda$  вокруг оси  $OX_1$ ; система  $(OXYZ)_3$  образована поворотом системы  $(OXYZ)_2$  вокруг оси  $OZ_2$  на угол  $\gamma$  (плоскость  $(OYZ)_3$  этой системы совпадает с передней поверхностью инструмента).

Задавая движение линии контакта поверхности детали и режущей кромки инструмента (вращательное вокруг продольной оси детали и прямолинейное вдоль нее) определим форму обработанной поверхности и направляющую вектора нормали к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки.

Вектор нормали к поверхности резания в рассматриваемой точке  $M_0(x_0; y_0; z_0)$  режущей кромки:

$$\vec{N} = [\vec{P} \times \vec{v}_e].$$

Определив вектор нормали  $\vec{N}$ , и, соответственно, параметрические уравнения линии, перпендикулярной к поверхности резания, найдем координаты точки  $M_1(x_1; y_1; z_1)$  пересечения этой линии с обработанной на предыдущем витке поверхностью либо с обрабатываемой поверхностью, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} X(\varphi, \theta) - (x_0 + a \cdot t) = 0 \\ Y(\varphi, \theta) - (y_0 + b \cdot t) = 0 \\ Z(\varphi, \theta) - (z_0 + c \cdot t) = 0 \end{cases},$$

где  $R$  – радиус обрабатываемой детали;  $X(\varphi, \theta)$ ;  $Y(\varphi, \theta)$ ;  $Z(\varphi, \theta)$  – выражения, определяющие в параметрическом виде обработанную поверхность;  $\theta, \varphi, t$  – параметры уравнений, определяющих обработанную поверхность и прямую, нормальную к поверхности резания.

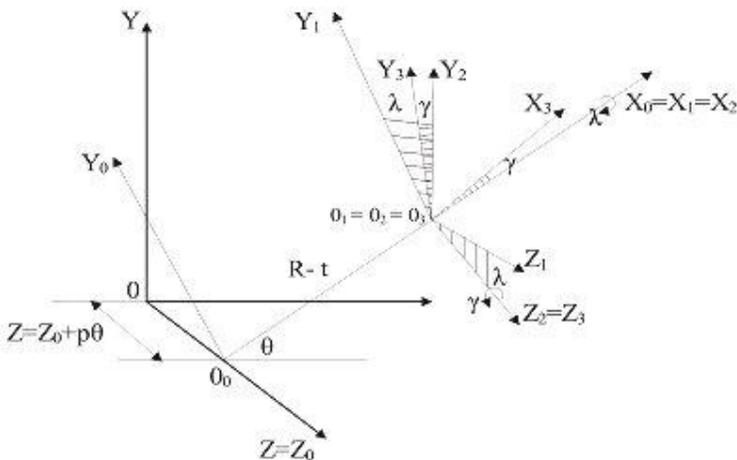


Рисунок 1 – Рассматриваемые системы координат

Приведенная система учитывает, что при  $\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq R^2$  нормаль пересекает обработанную поверхность, образованную при предыдущем проходе инструмента; при  $\sqrt{(x_0 + a \cdot t)^2 + (y_0 + b \cdot t)^2} = R^2$  точка  $M_1$  лежит на еще не обработанной поверхности.

Зная координаты точек  $M_0$  и  $M_1$ , легко рассчитать толщину среза  $a$  как расстояние между ними.

Форму режущей кромки при  $\varphi \in \varphi_0 \dots \varphi_1$  определим в системе  $(OXYZ)_3$  зависимостями:

$$\begin{cases} X_3 = 0 \\ Y_3 = r \cdot \cos \varphi - 1 \\ Z_3 = r \cdot \sin \varphi \end{cases} \text{ или в матричной форме: } \mathbf{M}(\varphi) = \begin{pmatrix} 0 \\ r \cdot (\cos \varphi - 1) \\ r \cdot \sin \varphi \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Матрицы преобразований координат для перехода от системы, связанной с режущей кромкой, к неподвижной системе координат, связанной с заготовкой, запишем в виде:

$$\mathbf{M}r = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & R-t \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{M}\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{M}\lambda = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{M}\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p \cdot \theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Перемножая матрицы преобразований систем координат, запишем переход от системы координат  $(OXYZ)_3$ , связанной с инструментом, к неподвижной системе  $OXYZ$  в виде  $\mathbf{M}(\theta) = \mathbf{M}\theta \cdot \mathbf{M}r \cdot \mathbf{M}\lambda \cdot \mathbf{M}\gamma$ .

Откуда получаем параметрические уравнения траекторий движения точек режущей кромки инструмента в неподвижной системе  $XYZ$ , и, при известных  $\theta$  и  $\varphi$ , координаты точки в этой системе координат точки  $M_0(x_0; y_0; z_0)$ , в которой определяется толщина. Аналогично в неподвижной системе координат найдем и направляющий вектор нормали к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки:

$$\begin{pmatrix} X(\varphi, \theta) \\ Y(\varphi, \theta) \\ Z(\varphi, \theta) \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{M}(\theta) \cdot \mathbf{M}(\varphi) \text{ и } \begin{pmatrix} a(\varphi, \theta) \\ b(\varphi, \theta) \\ c(\varphi, \theta) \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{M}(\theta) \cdot \mathbf{N}(\varphi)$$

Результаты расчета по приведенным зависимостям толщины среза вдоль режущей кромки инструмента позволяют проанализировать влияние на нее подачи, переднего угла и формы передней поверхности инструмента (рис. 2).

Как видно, для инструмента с цилиндрической передней поверхностью сечение среза имеет более вытянутую форму за счет большей длины контакта, а максимальная толщина среза у таких резцов в диапазоне подач 0,1–0,5 мм/об меньше, чем у стандартных инструментов. Указанное обуславливает увеличение доли участка контакта резца с обрабатываемым материалом на участке округления режущей кромки инструмента с цилиндрической передней поверхностью в сравнении с резцом с плоской передней поверхностью, что сопровождается сменой резания упруго-пластическим смятием материала и, способствует, возникновению выглаживающего эффекта на этих участках.

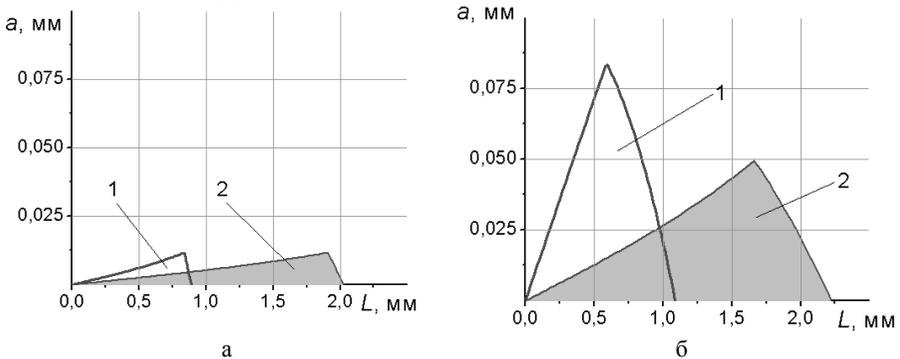


Рисунок 2 – Изменение толщины среза вдоль режущей кромки резца  
 $(t = 0,1 \text{ мм}; \varnothing = 50 \text{ мм}; \gamma = -10^\circ; \text{ режущая пластина диаметром } d = 7 \text{ мм})$   
 $a - S = 0,1 \text{ мм/об}; b - S = 0,5 \text{ мм/об}; 1 - \text{ резец с плоской передней поверхностью};$   
 $2 - \text{ резец с цилиндрической передней поверхностью}$

Максимальная толщина среза для инструмента с цилиндрической передней поверхностью с ростом подачи возрастает меньше, чем это имеет место для инструмента с плоской передней поверхностью. Это же относится и к увеличению ширины сечения среза, но в меньшей степени.

Максимальная толщина среза, кроме подачи, определяется также размером применяемой режущей пластины и передним углом инструмента (рис. 3, а). В связи с меньшими величинами максимальной толщины среза, инструмент с цилиндрической передней поверхностью, в сравнении с резцом с плоской передней поверхностью, может производить обработку с более высокими подачами при обеспечении прочности инструмента.

Длина активной части режущей кромки в диапазоне рассматриваемых условий обработки находится в пределах 1,5–3,0 мм (рис. 3, б). Как показывают расчетные данные, подача и диаметр обрабатываемой детали

вливают на длину активной части режущей кромки незначительно, и, следовательно, в отличие, например, от однокромочного косоугольного инструмента при обработке крупногабаритных изделий, в данном случае нет необходимости применять режущие пластины больших размеров. Толщина среза практически не зависит от диаметра заготовки и определяется подачей, передним углом, а так же размером режущей пластины.

Для инструмента с цилиндрической передней поверхностью характерным является изменение вдоль режущей кромки в статической системе координат угла наклона режущей кромки и углов в плане, что обуславливает неравномерность пластической деформации удаляемого материала вдоль режущей кромки и оказывает влияние на качество обработанной поверхности.

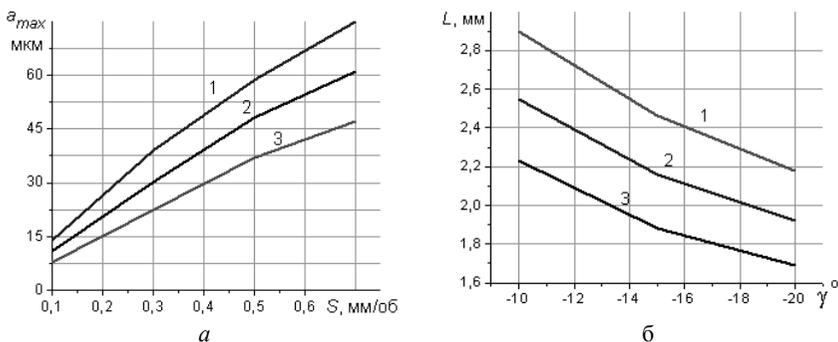


Рисунок 3 – Зависимости максимальной толщины среза от подачи (*a*) ( $l - d = 7$  мм;  $\gamma = -10^\circ$ ;  $2 - d = 12,7$  мм;  $\gamma = -10^\circ$ ;  $3 - d = 7$  мм;  $\gamma = -20^\circ$ ) и длины режущей кромки от статического переднего угла для резцов с режущими пластинами разного диаметра (*б*) ( $l - 12,7$  мм;  $2 - 9,52$  мм;  $3 - 7$  мм). ( $S = 0,5$  мм/об;  $t = 0,1$  мм;  $\varnothing = 100$  мм)

Кинематический угол наклона кромки  $\lambda_k$  (угол в кинематической плоскости резания между режущей кромкой и кинематической основной плоскостью) и угол в плане [5] определяются выражениями векторной алгебры:

$$\lambda_k = \frac{\pi}{2} - \frac{\vec{P} \cdot \vec{v}_e}{|\vec{P}| \cdot |\vec{v}_e|}, \quad \cos(\varphi_k) = \arccos \frac{\vec{N}_{Pn} \cdot \vec{N}_S}{|\vec{N}_{Pn}| \cdot |\vec{N}_S|},$$

где  $\vec{N}_{Pn}$  и  $\vec{N}_S$  – вектора нормалей к кинематической плоскости резания и рабочей плоскости.

Влияние диаметра режущей пластины на значения кинематического угла наклона вдоль режущей кромки показано на графиках (рис. 4). Изменение величины статического переднего угла инструмента с цилиндрической передней поверхностью (табл. 1) оказывает влияние на длину режущей

кромки и на значение угла ее наклона в точке выхода инструмента из контакта с обрабатываемой заготовкой, где эта величина имеет максимальное значение.

Таблица 1 – Влияние переднего угла инструмента на длину режущей кромки резца и кинематический угол наклона режущей кромки

Передний угол $\gamma$ , град.	-5	-10	-15	-20	-25
Длина режущей кромки $L$ , мм	2,88	2,23	1,88	1,68	1,54
Кинематический угол наклона режущей кромки $\lambda_k$ , град.	-37,7	-27,8	-22,6	-19,2	-16,64

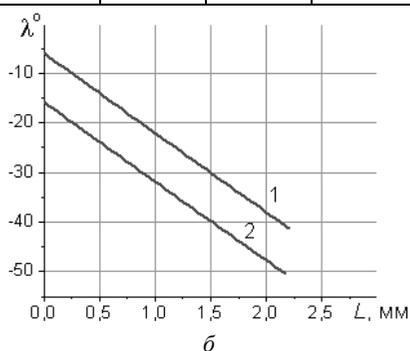
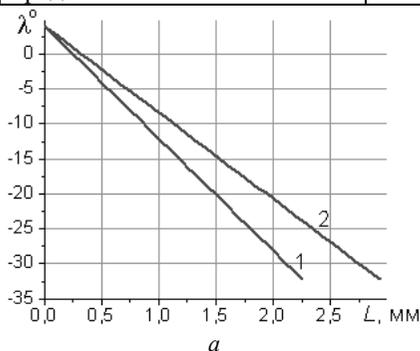


Рисунок 4 – Величина кинематического угла наклона по длине режущей кромки резца с цилиндрической передней поверхностью: а – без дополнительного поворота режущей пластины ( $1 - d = 7$  мм;  $2 - d = 12,7$  мм); б – при дополнительном повороте режущей пластины ( $1 - \lambda_0 = -10^\circ$ ;  $2 - \lambda_0 = -20^\circ$ ) ( $S = 0,5$  мм/об;  $t = 0,1$  мм;  $\varnothing = 100$  мм;  $\gamma = -10^\circ$ )

Угол наклона режущей кромки можно изменить за счет обеспечения дополнительного поворота режущей пластины на угол  $\lambda_0$  (рис. 1). Это способствует более интенсивному росту и реализации больших значений кинематического угла наклона режущей кромки  $\lambda_k$  (рис. 4, б).

Величина кинематического угла в плане инструмента с цилиндрической передней поверхностью меньше, чем у обычного резца с режущей пластиной такого же радиуса (рис. 5). Это является одним из факторов, позволяющих обеспечивать высокое качество обработки при использовании инструментов с цилиндрической передней поверхностью. Уменьшение у инструмента переднего угла или наличие дополнительного угла  $\lambda_0$  способствует росту значений угла в плане вдоль кромки резца.

Наличие перегиба на зависимостях, представленных на рис. 5, связано с тем, что в процессе резания участвуют главная и вспомогательная режущие кромки инструмента.

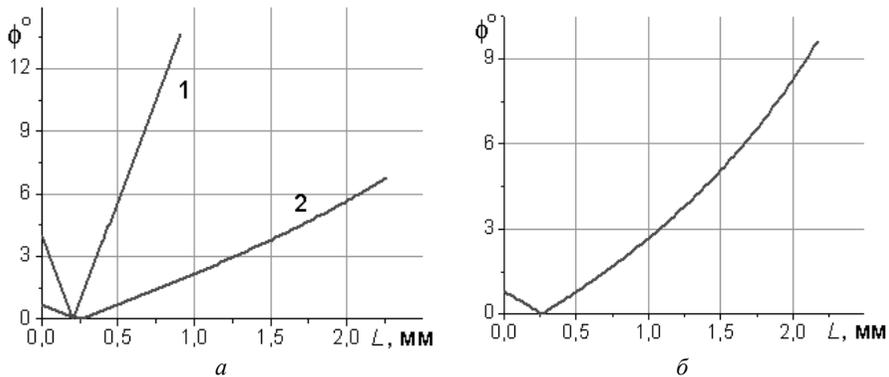


Рисунок 5 – Изменение величины угла в плане по длине режущей кромки: *а* – без дополнительного поворота режущей пластины (1 – обычный резец; 2 – резец с цилиндрической передней поверхностью); *б* – для резца с цилиндрической передней поверхностью при дополнительном повороте режущей пластины на угол  $\lambda_0 = -20^\circ$  ( $t = 0,1$  мм;  $\varnothing = 50$  мм;  $\gamma = -10^\circ$ )

Кинематические значения заднего угла вдоль режущей кромки изменяются незначительно, увеличиваясь на величину до двух градусов в направлении точек, ограничивающих контакт инструмента с обрабатываемой заготовкой.

*Выводы.* Представлены аналитические зависимости для определения параметров сечения среза при точении резцом с цилиндрической передней поверхностью, оснащенный негативно установленной круглой режущей пластиной без фаски.

Рассмотрено изменение величин углов наклона режущей кромки и в плане резца вдоль режущей кромки инструмента, учитывая наличие главной и вспомогательной режущих кромок.

Показано, что величина кинематического угла в плане инструмента с цилиндрической передней поверхностью меньше, чем у обычного резца с режущей пластиной такого же радиуса. Кроме того, величину угла наклона режущей кромки резца можно увеличить за счет обеспечения дополнительного поворота режущей пластины на угол  $\lambda_0$ .

**Список использованных источников:** 1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2006. – 316 с. 2. Киппер Э.Е., Клименко С.А. Чистовое точение износостойких наплавленных покрытий // Технологические методы повышения эксплуатационных свойств деталей машин: Тез. докл. Укр. науч.-практ. конф., май 1992, Севастополь. – Харьков: з-д ФЭД, 1992. – С. 26. 3. Точение износостойких защитных покрытий / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский, П.П. Мельничук. – К.: Техніка, 1997. – 144 с. 4. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов. – К.: Вища шк., 1990. – 484 с. 5. Равська Н.С., Ковальова Л.Л., Родін Р.П. Про визначення товщини зрізу вздовж різальної кромки інструменту // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування. – 2009. – № 56. – С. 113–119.

Поступила в редколлегию 15.02.2010