

УДК 621.91.01

DOI 10.18698/0536-1044-2016-4-82-91

# Анализ геометрии косоугольного растачивания безвершинными радиусными резцами в статической и кинематической системах координат

А.В. Филиппов<sup>1,2</sup>, А.В. Вальтер<sup>2</sup>, Н.Н. Шамарин<sup>2</sup>, О.А. Подгорных<sup>2</sup>,  
П.А. Чазов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, Томск, Российская Федерация, Академический просп., д. 2/4

<sup>2</sup> Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета, 652055, Юрга, Российская Федерация, Ленинградская ул., 26

## Geometry Analysis of Oblique Boring by Radius Peakless Cutters in Static and Kinematic Systems of Coordinates

A.V. Filippov<sup>1,2</sup>, A.V. Walter<sup>2</sup>, N.N. Shamarin<sup>2</sup>, O.A. Podgornyykh<sup>2</sup>,  
P.A. Chazov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Russian Federation, Akademicheskij Pr., Bldg. 2/4

<sup>2</sup> Yurga Institute of Technology, Affiliate of the National Research Tomsk Polytechnic University, 652055, Yurga, Russian Federation, Leningradskaya St., Bldg. 26



e-mail: avf@tpu.ru, avwalter@tpu.ru, shamarinnik@gmail.com, podgornyysh.o.a@mail.ru, chapaese@gmail.com



Геометрия лезвия оказывает значительное влияние на механизмы деформации срезаемого слоя материала и механику формообразования, поэтому анализ геометрических параметров режущего инструмента является актуальным. Безвершинное резание характеризуется высокими показателями качества обработки и производительности. Рассмотрены геометрические параметры процесса косоугольного безвершинного растачивания. Составлена схема процесса в статической системе координат. Предложена методика расчета геометрических параметров в статической и кинематической системах координат. Геометрия определена методом векторно-матричных преобразований на основе аппарата линейной алгебры с использованием однородных координат. Установлены пределы изменения статических углов инструмента в зависимости от технологических параметров: глубины резания, подачи, диаметра обрабатываемого отверстия, радиуса режущей пластины, исходной геометрии режущего лезвия. Полученные результаты могут быть полезны при разработке конструкций современного металлорежущего инструмента и технологической подготовке производства.

**Ключевые слова:** растачивание, системы координат, безвершинный резец, геометрия инструмента.



The geometry of the cutting edge has a significant effect on the mechanisms of deformation in the removed layer of the material, and on the mechanics of geometry formation, therefore the analysis of the cutting tool geometric parameters is important. Peakless cutting is characterized by high quality and efficiency. Geometrical parameters of oblique peakless boring are considered in this paper. The scheme of the process is drawn in a static system of coordinates. A method of calculating geometrical parameters in static and kinematic systems of coordinates is proposed. The geometry is determined by vector-matrix transformations based on the linear algebra apparatus using homogeneous coordinates. The

limits of static angles of the cutting tools are set depending on the technological parameters such as the cutting depth, feed, workpiece diameter, cutting insert radius, and initial geometry of the cutting edge. The results obtained may be used for designing modern metal cutting tools and developing manufacturing processes.

**Keywords:** boring, coordinate systems, peakless cutter, cutting edge geometry.

В современном машиностроении на операциях механической обработки используют различные по конструкции и способу работы инструменты. Для определения области применения конкретного вида инструмента необходимо выявить принципиальные особенности его работы. Геометрические параметры следует рассматривать в контексте конкретного метода обработки (например, наружное точение или растачивание), что позволит точнее обозначить область допустимых значений и ограничения геометрии инструмента. Благодаря выбору рациональной геометрии режущего лезвия и способа его установки возможно повышение стойкости инструмента, производительности и качества обработки [1, 2].

На сегодняшний день одним из перспективных и малоизученных методов механической обработки является косоугольное безвершинное резание, также известное как «бреющее» [3–6]. Основная особенность такого процесса заключается в использовании прямолинейной (либо криволинейной) режущей кромки в качестве основного режущего элемента вместо вершины. К существенным достоинствам безвершинного точения относятся повышенная стойкость инструмента и высокое качество обработки. По чистоте обработки поверхности безвершинное резание может быть сопоставимо со шлифованием.

Ранее были определены параметры геометрии [7] и сечения срезаемого слоя [8–10], а также силовые зависимости для процесса косоугольного безвершинного точения [11]. Результаты теоретических исследований показали, что при косоугольном безвершинном точении значения геометрических параметров инструмента изменяются в широких пределах. Имеет место переход от положительных значений переднего угла к отрицательным. При определенных условиях работы возможно изменение кинематического заднего угла до отрицательных значений даже при большом положительном инструментальном угле. Это приводит к увеличению контактной площадки между задней поверхностью инструмента и заготовкой, что негативно сказывается на процессе обработки.

Кроме того, значения геометрических параметров в большой степени зависят от выбранной схемы резания (прямой или обратной), а диапазон их изменения определяется углом наклона лезвия, величиной подачи, глубиной резания и диаметром обрабатываемой заготовки.

Известным способом обработки внутренних поверхностей безвершинным инструментом является ротационное резание резцами с чашечными пластинами. Однако процесс ротационного резания характеризуется склонностью к повышенным вибрациям [12, 13], особенно в условиях недостаточной жесткости технологической системы. В связи с этим целесообразно рассмотреть работу безвершинного инструмента без дополнительного вращения режущей части.

Цель работы — определение и анализ геометрических параметров косоугольного безвершинного растачивания.

**Методика расчета.** Для определения геометрических параметров косоугольного безвершинного растачивания применялось 3D-моделирование процесса в статической системе координат (ССК), выполненное в программах Компас 3D и Siemens NX. Геометрические параметры процесса определяли с учетом требований, изложенных в ГОСТ 25762–83. Единственным исключением стало изменение индексов, обозначающих плоскость резания и секущей плоскости. Поскольку плоскость резания является касательной, ее, согласно традиционным положениям механики, обозначили индексом « $t$ », а ортогональную (секущую) плоскость — индексом « $n$ ».

В случае косоугольного безвершинного растачивания целесообразно применять радиусные режущие лезвия (пластины). Тогда процесс формообразования характеризуется сопряжением двух цилиндрических поверхностей: наружной (заготовки) и внутренней (инструмента). На рис. 1 приведена схема процесса косоугольного безвершинного растачивания в статической системе координат (ССК). В качестве режущего лезвия рассматривается радиусная пластина, прочие элементы инструмента не показаны. Пластина расположена под углом  $\omega$  наклона лезвия относительно оси вращения заготовки. Участок

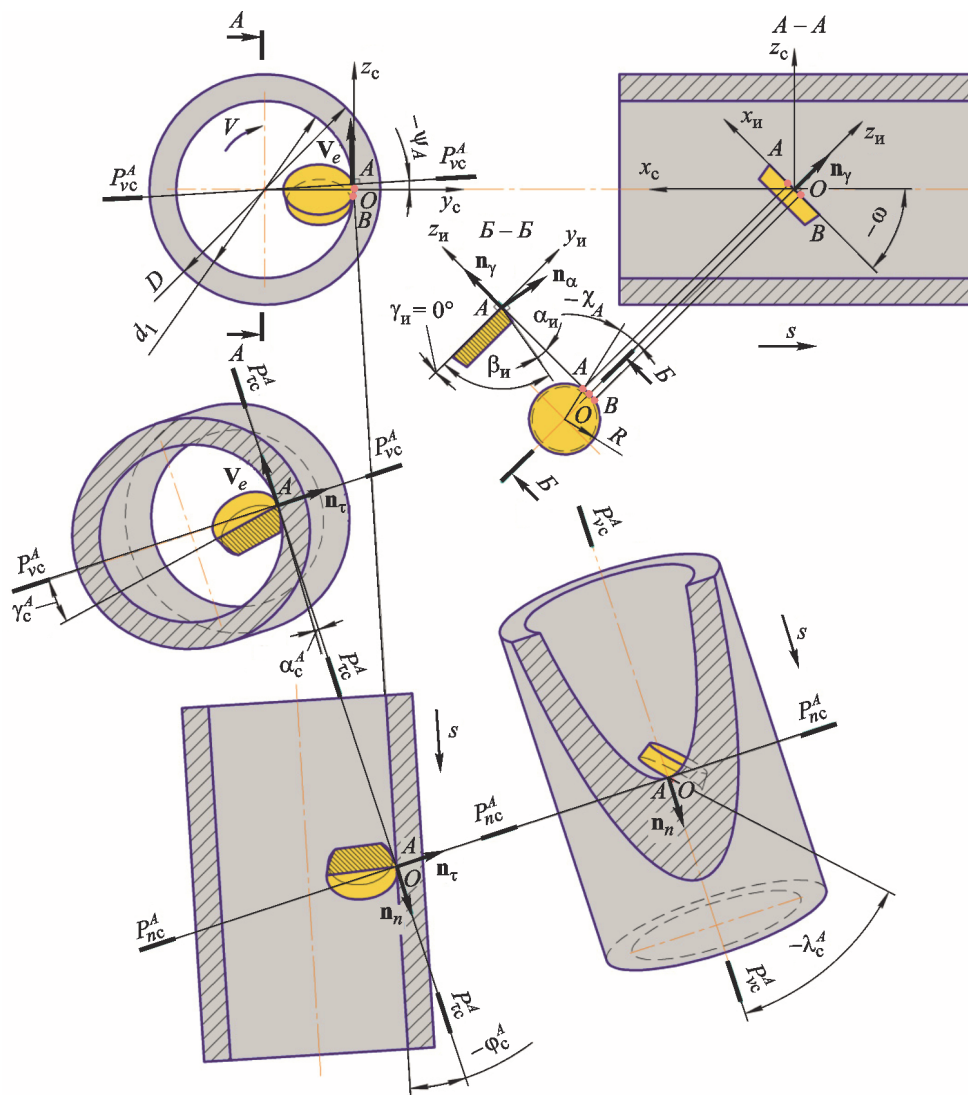


Рис. 1. Геометрические параметры процесса растачивания безвершинными радиусными резами в ССК

максимальной длины контакта режущей кромки с заготовкой ограничен отрезком  $AB$ .

Как уже упоминалось, безвершинный инструмент может работать по двум схемам: прямой и обратной. В прямой (см. рис. 1) угол наклона лезвия отрицательный. Обратная схема относительно прямой может быть реализована либо путем поворота лезвия на угол  $\omega = 90^\circ$  против часовой стрелки, либо изменением направления подачи.

Рассмотрим прямую схему резания. Согласно подходу, изложенному в работах [14, 15], для определения геометрии на основе векторно-матричных преобразований требуется найти относительную ориентацию инструментальной и ССК. Для этого используют единичные векторы и матрицы поворота, записанные в однородных координатах  $xyzh$ .

Ориентация осей инструментальной системы координат (ИСК) определяется единичными векторами  $x_{и}$ ,  $y_{и}$ ,  $z_{и}$  с началом в точке  $O$ , принадлежащей режущей кромке (см. рис. 1). Эти векторы имеют следующий вид:

$$x_{и} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad y_{и} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad z_{и} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Ориентация лезвия в ССК задается его поворотом на угол  $\omega$ :

$$R_{\omega} = \begin{pmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Расчет геометрических параметров в каждой точке режущей кромки требует точного определения ориентации рассматриваемой точки и поверхностей инструмента в пространстве выбранной системы координат. Для этого необходимо задать направляющий вектор режущей кромки  $\mathbf{a}$  (касательный к режущей кромке в рассматриваемой точке, совпадающий с вектором  $\mathbf{x}_и$  в ИСК), векторы, ортогональные передней  $\mathbf{n}_\gamma$  и задней  $\mathbf{n}_\alpha$  поверхностям лезвия инструмента.

Изменение положения направляющего вектора режущей кромки  $\mathbf{a}$  для радиусного лезвия задается путем его поворота вокруг оси круглой пластины на угол  $\chi$ :

$$\mathbf{R}_R = \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

С учетом выражений (1)–(3) положение вектора  $\mathbf{a}$  в ССК определяется формулой

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_R \mathbf{x}_и. \quad (4)$$

Положение передней и задней поверхностей задается поворотом векторов  $\mathbf{n}_\gamma$  и  $\mathbf{n}_\alpha$  на величину соответственно переднего  $\gamma_и$  и заднего  $\alpha_и$  углов:

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_и & -\sin \alpha_и & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_и & \cos \alpha_и & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_\gamma = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_и & -\sin \gamma_и & 0 \\ 0 & -\sin \gamma_и & \cos \gamma_и & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Тогда с учетом выражений (1), (2) и (6) нормальный вектор передней поверхности

$$\mathbf{n}_\gamma = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\gamma \mathbf{z}_и.$$

Нормальный вектор задней поверхности с учетом выражений (1)–(3), (5) имеет вид

$$\mathbf{n}_\alpha = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_R \mathbf{y}_и.$$

Как показано в работах [7, 16], при косоугольном безвершинном резании вектор скорости движения резания ( $\mathbf{v}_e$ ) в разных точках режущей кромки будет иметь переменное направление и выражается углом наклона основной плоскости ( $\psi_c$ ).

В точке  $O$  угол  $\psi_c = 0^\circ$  и направление вектора  $\mathbf{v}_e$  будет совпадать с вектором  $\mathbf{z}_и \equiv \mathbf{z}_c$ . Тогда для определения вектора скорости движения резания в каждой точке режущей кромки с учетом выбранной системы координат можно использовать матрицу преобразования

$$\mathbf{R}_v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\psi_c) & -\sin(-\psi_c) & 0 \\ 0 & -\sin(-\psi_c) & \cos(-\psi_c) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В результате получим уравнение для определения вектора  $\mathbf{v}_e$  в каждой точке режущей кромки в ССК:

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{R}_v \mathbf{z}_и. \quad (7)$$

Далее определим положение плоскостей, в которых измеряются геометрические параметры инструмента. Ориентация плоскости, как и поверхности, может быть задана ее нормальным вектором в некоторой точке, принадлежащей этой плоскости. В данном случае рассматриваются точки, принадлежащие режущей кромке, для которых существуют собственные векторы  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{v}_e$ , определяемые по формулам (4) и (7).

Согласно ГОСТ 25762–83, в ССК выделяют четыре плоскости для определения геометрических параметров. Для нахождения нормальных векторов искомым плоскостей используем векторное произведение, вычислив которое получим вектор, перпендикулярный двум заданным векторам [17]. Таким образом, получим выражения для определения нормальных векторов искомым плоскостей.

*Рабочая плоскость  $P_s$*  — плоскость, в которой расположены направления скорости главного движения резания ( $\mathbf{v}_e$ ) и подачи ( $\mathbf{s}$ ). Ее нормальный вектор

$$\mathbf{n}_s = \frac{\mathbf{s} \mathbf{v}_e}{|\mathbf{s} \mathbf{v}_e|}.$$

С учетом выбранной системы координат вектор подачи

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

*Основная плоскость  $P_v$*  — плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скоро-

сти главного движения резания в этой точке. Следовательно, ее нормальный вектор будет совпадать с вектором  $\mathbf{v}_e$  для рассматриваемой точки:

$$\mathbf{n}_v = \mathbf{v}_e = \mathbf{R}_v \mathbf{z}_{ин}.$$

Положение статической основной плоскости изменяется в пределах участка контакта режущей кромки инструмента с заготовкой (см. рис. 1, отрезок  $AB$ ). Положение  $P_{vc}$  определяется углом ее наклона  $\psi_c$ . Математическое описание геометрии требует нахождения координат точек вдоль отрезка  $AB$ . Это можно сделать путем разделения режущей кромки на равные отрезки с ограничением по координатам точек  $A$  и  $B$ . Координаты этих точек в ССК определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} x(A, B) = \frac{z(B)^2}{\operatorname{tg} \omega}; \\ y(A, B) = \frac{1}{\sin^2 \omega - 1} [L \sin^2 \omega - (L^2 \sin^2 \omega - \\ - R_{отв}^2 \sin^2 \omega + R_{отв}^2 + R^2 \sin^4 \omega - R^2 \sin^2 \omega)^{1/2}]; \\ z(A, B) = \pm \sqrt{R_{отв}^2 - y(A, B)^2}, \end{cases}$$

где  $L$  — смещение оси инструмента относительно оси заготовки;  $R_{отв}$  — радиус отверстия заготовки;  $R$  — радиус пластины.

Знак «-» для координаты  $z$  соответствует точке  $B$ , а знак «+» — точке  $A$ .

Связность поворота основной плоскости с рассматриваемой точкой режущей кромки выражается через параметрический угол  $\chi$  и угол  $\psi$  наклона основной плоскости, которая определяется следующими выражениями:

$$\operatorname{tg} \psi_i = \frac{\sqrt{R^2 \sin^2 \omega - [y_i(AB) - L]^2 \sin^2 \omega}}{y_i(AB)};$$

$$\sin \chi_i = \frac{-y_i(AB) \operatorname{tg} \psi_i}{R \sin \omega},$$

где  $y_i(AB)$  — координата точки на режущей кромке инструмента,

$$y_i(AB) = -\frac{L \cos \omega - L}{2\psi_i^2 - \cos 2\omega + 1} - \frac{\sqrt{2} \sin \omega \sqrt{R^2 - R^2 \cos 2\omega - 2L^2 \psi_i^2 + 2R^2 \psi_i^2}}{2\psi_i^2 - \cos 2\omega + 1}.$$

Плоскость резания  $P_\tau$  — плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная основной плоскости. Ее нормальный вектор

$$\mathbf{n}_\tau = \frac{\mathbf{a} \mathbf{v}_e}{|\mathbf{a} \mathbf{v}_e|}.$$

Секущая плоскость  $P_n$  — плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости  $P_v$  и плоскости резания  $P_\tau$ . Ее нормальный вектор

$$\mathbf{n}_n = \frac{\mathbf{v}_e \mathbf{n}_\tau}{|\mathbf{v}_e \mathbf{n}_\tau|}.$$

Зная ориентацию лезвия, координатной плоскости и плоскостей в ССК, можно определить геометрические параметры инструмента. Используя скалярное произведение двух единичных векторов, можно определить косинус угла между ними [18]. Получим уравнения, позволяющие определить углы в ССК:

- угол наклона режущей кромки  $\lambda_c$  — угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью, которая будет совпадать с нормальным вектором секущей плоскости:

$$\cos \lambda_c = \mathbf{n}_n \mathbf{a}; \quad (8)$$

- угол в плане  $\varphi_c$  — угол в основной плоскости между плоскостью резания и рабочей плоскостью:

$$\cos \varphi_c = \mathbf{n}_n \left( \frac{\mathbf{n}_s \mathbf{v}_e}{|\mathbf{n}_s \mathbf{v}_e|} \right); \quad (9)$$

- задний угол  $\alpha_c$  — угол в секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и плоскостью резания, которая будет совпадать с нормальным вектором основной плоскости:

$$\cos \alpha_c = \mathbf{n}_v \left( \frac{\mathbf{n}_n \mathbf{n}_\alpha}{|\mathbf{n}_n \mathbf{n}_\alpha|} \right); \quad (10)$$

- передний угол  $\gamma_c$  — угол в секущей плоскости между передней поверхностью и основной плоскостью:

$$\cos \gamma_c = \mathbf{n}_\tau \left( \frac{\mathbf{n}_n \mathbf{n}_\gamma}{|\mathbf{n}_n \mathbf{n}_\gamma|} \right). \quad (11)$$

Как следует из выражений (8)–(11), для нахождения углов используется положительная функция  $\cos$ , поэтому необходимо определить знак для вычисленных по этим уравнениям значений. Это можно сделать, введя проверку на коллинеарность векторов [18], которая является способом определения взгляда на координатную плоскость, в которой измеряется искомым углом. С учетом данного правила получим уравнения для углов:

$$\lambda = \mathbf{n}_\tau \frac{\mathbf{a}\mathbf{n}_n}{|\mathbf{a}\mathbf{n}_n|}; \quad (12)$$

$$\varphi = \mathbf{n}_v \left( \frac{(\mathbf{n}_s \mathbf{v}_e) \mathbf{n}_n}{|(\mathbf{n}_s \mathbf{v}_e) \mathbf{n}_n|} \right); \quad (13)$$

$$\alpha = \mathbf{n}_n \left( \frac{\mathbf{n}_v (\mathbf{n}_\alpha \mathbf{n}_n)}{|\mathbf{n}_v (\mathbf{n}_\alpha \mathbf{n}_n)|} \right); \quad (14)$$

$$\gamma = \mathbf{n}_n \left( \frac{(\mathbf{n}_\alpha \mathbf{n}_n) \mathbf{n}_\tau}{|(\mathbf{n}_\alpha \mathbf{n}_n) \mathbf{n}_\tau|} \right). \quad (15)$$

При расчете формул (12)–(15) могут быть получены значения «+1» либо «-1», и это основное условие проверки на коллинеарность. Если в ходе проверки получено значение «-1», то направление взгляда на плоскость, в которой определяется угол, выбрано неверно и знак угла следует изменить на противоположный.

Отличие кинематической системы координат (КСК) от ССК заключается в определении вектора скорости результирующего движения резания, направление и величина которого будут зависеть от скорости резания и скорости движения подачи.

Для предложенного подхода векторно-матричного расчета геометрических параметров скорости подачи и резания должны иметь одинаковую размерность. Скорость подачи

$$s_M = sn,$$

где  $s$  — подача, мм/об;  $n$  — число оборотов шпинделя, об/мин.

В векторной форме скорость подачи имеет вид

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} -s_M \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

С учетом формул (7) и (16) результирующий вектор скорости резания в КСК определяется выражением

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_e + \mathbf{s}. \quad (17)$$

Для расчета геометрии в КСК требуется изменить в соответствующих формулах для ССК статический вектор скорости резания (7) на кинематический (17). В результате этой подстановки исключается необходимость дополнительных замен или изменения формул, определяющих положение плоскостей и значения углов для КСК.

**Результаты расчетов.** На рис. 2 приведены графики изменения углов инструмента в ССК, рассчитанные по полученным формулам. Точки  $A$ ,  $O$  и  $B$  соответствуют точкам на режущей кромке в пределах участка контакта инструмента с заготовкой (см. рис. 1).

Статический задний угол  $\alpha_c$  характеризуется значительным линейным изменением величины в пределах участка контакта инструмента с заготовкой. При больших углах наклона лезвия ( $\omega = 60, 75^\circ$ ) задний угол на отрезке  $OA$  уменьшается до  $0^\circ$  и переходит в область отрицательных значений даже при положительном инструментальном заднем угле. Последнее недопустимо с точки зрения работоспособности инструмента. Избежать отрицательных значений заднего угла можно путем уменьшения угла наклона лезвия, глубины резания или радиуса пластины, а также за счет увеличения инструментального заднего угла.

Статический передний угол  $\gamma_c$  изменяется в больших пределах, чем задний угол, но также имеет область отрицательных значений только на отрезке  $OB$ . Пределы изменения величины переднего угла возрастают при больших углах наклона лезвия ( $\omega = 60, 75^\circ$ ). При угле  $\omega = 75^\circ$  изменение переднего угла переходит от линейного характера к параболическому в пределах участков  $OA$  и  $OB$ .

Статический угол в плане  $\varphi_c$  изменяется линейно. Значения угла в плане при величине угла наклона лезвия  $45$  и  $60^\circ$  являются практически идентичными, но при  $\omega = 60^\circ$  пределы изменения  $\varphi_c$  увеличиваются. Схожие значения объясняются геометрическими условиями сопряжения внутренней и наружной цилиндрических поверхностей при заданных диаметральных размерах.

Статический угол наклона режущей кромки  $\lambda_c$  изменяется менее выражено, чем остальные углы, особенно при малых углах наклона лезвия. Как показали дополнительные расчеты, увеличение радиуса пластины приводит к переходу от почти линейного изменения угла  $\lambda_c$  к параболическому. Знак угла  $\lambda_c$  соответствует знаку угла наклона лезвия.

Расчеты углов, выполненные для КСК, показали их незначительное отличие от углов, полученных для ССК. Это связано с низкой скоростью подачи по отношению к скорости резания, вследствие чего отклонение основной плоскости происходит на небольшой угол. Характер изме-

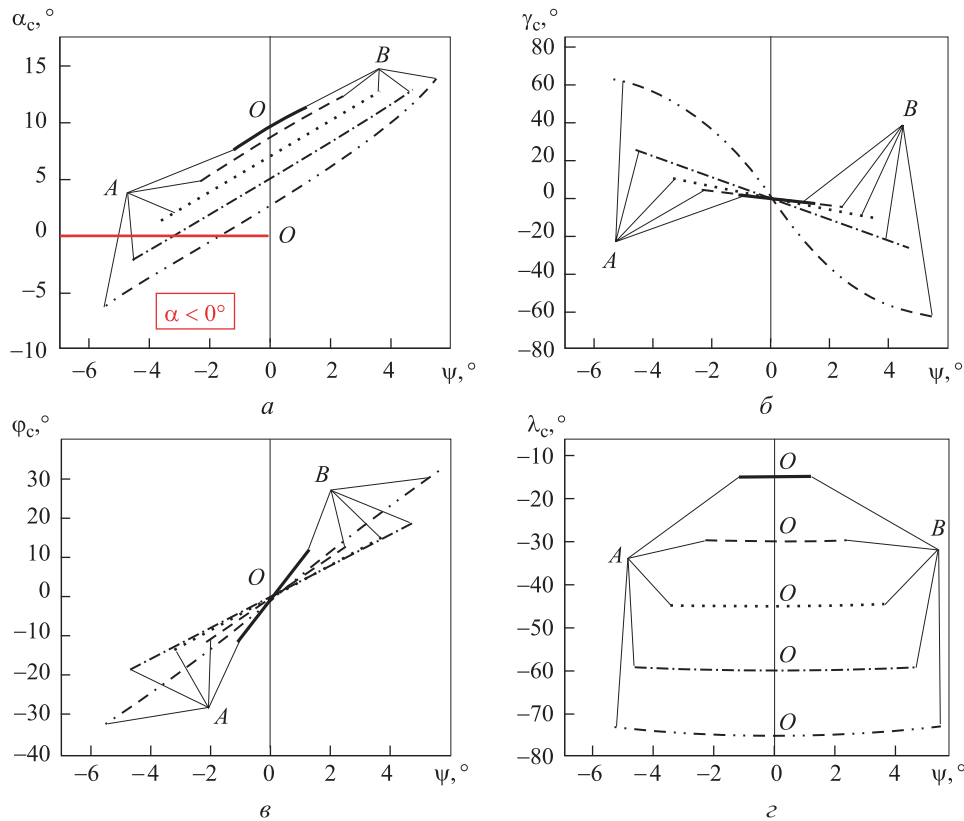


Рис. 2. Зависимости углов  $\alpha_c$  (а),  $\gamma_c$  (б),  $\phi_c$  (в),  $\lambda_c$  (г) вдоль режущей кромки безвершинного расточного реза в ССК от угла наклона основной плоскости  $\psi$ :

—  $\omega = 15^\circ$ ; - - -  $\omega = 30^\circ$ ; .....  $\omega = 45^\circ$ ; - · - · -  $\omega = 45^\circ$ ; - · - · -  $\omega = 75^\circ$

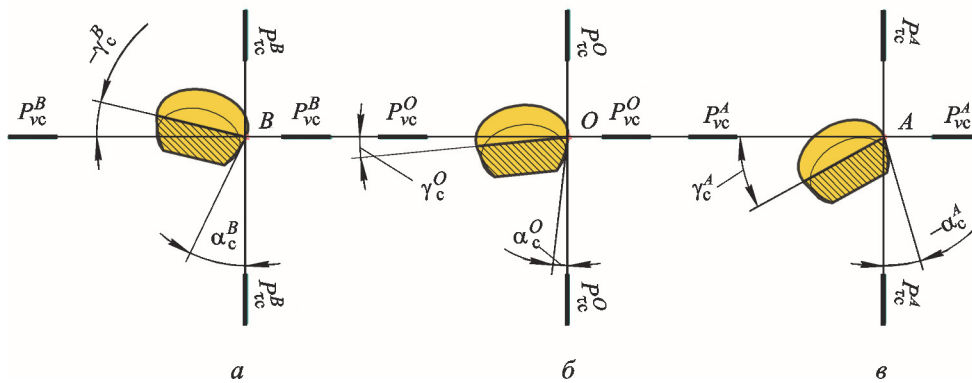


Рис. 3. Изменение переднего и заднего статических углов инструмента в точках В (а), О (б) и А (в) режущей кромки

нения кинематических углов аналогичен их изменениям в статике.

На рис. 3 показано изменение переднего и заднего статических углов инструмента в точках В, О и А режущей кромки. В точке В статический передний угол находится в области отрицательных значений, при том что инструментальный угол  $\gamma_n = 0^\circ$ . Значение заднего угла увеличивается и находится в области положительных значений.

В точке О значение статического переднего угла равно инструментальному углу. Значение заднего угла отличается в силу того, что секущая плоскость проходит через расположенную под углом радиусную заднюю поверхность, в результате чего касательная к задней поверхности инструмента отклоняется на некоторую величину.

В точке А задняя поверхность инструмента пересекает плоскость резания, следовательно,

увеличивается контактная площадка между инструментом и заготовкой, а также степень деформационного воздействия на поверхностный слой заготовки. Значение переднего угла увеличивается и находится в области положительных значений.

## Выводы

1. Предложенная методика расчета геометрических параметров является универсальной и позволяет автоматизировать процедуры определения геометрических параметров лезвийного режущего инструмента в соответствии с требованиями ГОСТ 25762–83.

2. Результаты определения и анализа геометрических параметров свидетельствуют о значительном изменении статических переднего и заднего углов инструмента, а также угла в плане. Угол наклона режущей кромки изменяется незначительно. Характер и пределы изме-

нения статических углов безвершинного инструмента существенно отличаются от тех, что имеют место при точении и растачивании инструментом с вершиной.

3. Пределы изменения статических углов возрастают с увеличением угла наклона лезвия и зависят от таких технологических параметров, как глубина резания, подача, диаметр обрабатываемого отверстия, радиус режущей пластины, а также от исходной геометрии режущего лезвия.

4. Важной особенностью геометрии косоугольного безвершинного точения является образование отрицательных значений статического и кинематического заднего угла при определенном сочетании технологических параметров процесса резания. Избежать отрицательных значений заднего угла можно путем уменьшения угла наклона лезвия, глубины резания или радиуса пластины, а также за счет увеличения инструментального заднего угла.

## Литература

- [1] Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometry. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63 (2), pp. 631–653.
- [2] Грановский Г.И. *Кинематика резания*. Москва, Машгиз, 1948. 200 с.
- [3] Клименко С.А., Манохин А.С. Твердое «бреющее» точение. *Сверхтвердые материалы*, 2009, № 1, с. 58–74.
- [4] Raphael G., Stone B.J. Boring with a Process Similar to Skiving. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1990, vol. 39 (1), pp. 425–428.
- [5] Stone B.J., Bonikowski E.J., Chapple D.J., De Barr A.E. The Skiving of Ball-Bearing Tracks. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1980, vol. 29 (1), pp. 275–280.
- [6] Nee A.Y.C., Venkatesh V.C. Form Accuracy of Tangentially Skived Workpieces. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1985, vol. 34 (1), pp. 121–124.
- [7] Петрушин С.И., Филиппов А.В. Анализ геометрии косоугольного обтачивания безвершинными резцами. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2013, № 2, с. 8–14.
- [8] Filippov A.V. Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34 (11), pp. 718–721.
- [9] Filippov A.V. Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning by a Single-Edge Tool with a Curved Front Surface. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35 (5), pp. 381–384.
- [10] Filippov A.V. Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning by a Single-Edge Tool with a Curved Rear Surface. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35 (5), pp. 385–388.
- [11] Filippov A.V., Filippova E.O. Determination of cutting forces in oblique cutting. *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications*, Switzerland, 2015, vol. 756, pp. 659–664.
- [12] Бобров В.Ф., Иерусалимов Д.Е. *Резание металлов самовращающимися резцами*. Москва, Машиностроение, 1972. 110 с.
- [13] Бобров В.Ф. *Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов*. Москва, Машгиз, 1962. 152 с.
- [14] Вальтер А.В., Клековкина Е.Е. Преобразования систем координат металлорежущих инструментов со сменными многогранными пластинами. *Научное обозрение*, 2013, № 5, с. 57–61.



- [15] Вальтер А.В. Программное обеспечение автоматизированного анализа кинематики процесса резания. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2008, № 1, с. 18–19.
- [16] Филиппов А.В. Моделирование геометрических параметров косоугольного точения безвершинным резцом с радиусной передней поверхностью. *Сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф.* Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013, с. 361–364.
- [17] Фокс А., Пратт М. *Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве*. Москва, Мир, 1982, 304 с.
- [18] Ефимов К.В. *Краткий курс аналитической геометрии*. Москва, Наука, 1969. 273 с.

## References

- [1] Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometry. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, is. 2, pp. 631–653.
- [2] Granovskii G.I. *Kinematika rezaniia* [Kinematics of cutting]. Moscow, Mashgiz publ., 1948. 200 p.
- [3] Klimenko S.A., Manokhin A.S. Tverdoe «breiushchee» tochenie [Solid «shaving» turning]. *Sverkhтвердые материалы* [Journal of Superhard Materials]. 2009, no. 1, pp. 58–74.
- [4] Raphael G., Stone B.J. Boring with a Process Similar to Skiving. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1990, vol. 39, is. 1, pp. 425–428.
- [5] Stone B.J., Bonikowski E.J., Chapple D.J., De Barr A.E. The Skiving of Ball-Bearing Tracks. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1980, vol. 29, is. 1, pp. 275–280.
- [6] Nee A.Y.C., Venkatesh V.C. Form Accuracy of Tangentially Skived Workpieces. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 1985, vol. 34, is. 1, pp. 121–124
- [7] Petrushin S.I., Filippov A.V. Analiz geometrii kosougol'nogo obtachivaniia bezvershinnyimi reztsami [The analysis of the geometry of oblique turning peak less cutters]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal processing (technology, equipment, tools)]. 2013, no. 2, pp. 8–14.
- [8] Filippov A.V. Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 11, pp. 718–721.
- [9] Filippov A.V. Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning by a Single-Edge Tool with a Curved Front Surface. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 5, pp. 381–384.
- [10] Filippov A.V. Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning by a Single-Edge Tool with a Curved Rear Surface. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 5, pp. 385–388.
- [11] Filippov A.V., Filippova E.O. Determination of cutting forces in oblique cutting. *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications*, Switzerland, 2015, vol. 756, pp. 659–664.
- [12] Bobrov V.F., Ierusalimov D.E. *Rezanie metallov samovrashchajushchimisia reztsami* [Metal cutting most rotary cutters]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1972. 110 p.
- [13] Bobrov V.F. *Vliianie ugla naklona glavnoi rezhushchei kromki instrumenta na protsess rezaniia metallov* [Effect of angle of the major cutting edge of the tool to the cutting process metal]. Moscow, Mashgiz publ., 1962. 152 p.
- [14] Val'ter A.V., Klekovkina E.E. Preobrazovaniia sistem koordinat metallozhushchikh instrumentov so smennymi mnogogrannymi plastinami [Transformation of coordinate systems of metal-cutting tools with replaceable polyhedral blades]. *Nauchnoe obozrenie* [Science education]. 2013, no. 5, pp. 57–61.
- [15] Val'ter A.V. Programmnoe obespechenie avtomatizirovannogo analiza kinematiki protsessa rezaniia [The software of the automated analysis of the kinematics of the cutting process]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal processing (technology, equipment, tools)]. 2008, no. 1, pp. 18–19.
- [16] Filippov A.V. Modelirovanie geometricheskikh parametrov kosougol'nogo tocheniia bezvershinnyim reztsom s radiusnoi perednei poverkhnost'iu [Modeling of geometrical parameters peakless oblique turning radius cutter with the front surface]. *Sbornik nauchnykh trudov 7 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Collection of scientific works of the 7 International Scientific and Technical Conference]. Tomsk, TPU publ., 2013, pp. 361–364.

- [17] Foks A., Pratt M. *Vychislitel'naiia geometriia. Primenenie v proektirovanii i na proizvodstve* [Computational geometry. The use in the design and manufacturing]. Moscow, Mir publ., 1982. 304 p.
- [18] Efimov K.V. *Kratkii kurs analiticheskoi geometrii* [Short-course of analytical geometry]. Moscow, Nauka publ., 1969. 273 p.

Статья поступила в редакцию 25.01.2016

## Информация об авторах

**ФИЛИППОВ Андрей Владимирович** (Юрга) — младший научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности. Институт физики прочности и материаловедения СО РАН; ассистент кафедры технологии машиностроения. Юргинский технологический институт национального исследовательского Томского политехнического университета (652055, Юрга, Российская Федерация, Ленинградская ул., д. 26, e-mail: avf@tpu.ru).

**ВАЛЬТЕР Александр Викторович** (Юрга) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (652055, Юрга, Российская Федерация, Ленинградская ул., 26, e-mail: avwalter@tpu.ru).

**ШАМАРИН Николай Николаевич** (Юрга) — учебный мастер кафедры «Технология машиностроения». Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (652055, Юрга, Российская Федерация, Ленинградская ул., 26, e-mail: shamarinnik@gmail.com).

**ПОДГОРНЫХ Олег Анатольевич** (Юрга) — зав. лабораторией кафедры «Технология машиностроения». Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (652055, Юрга, Российская Федерация, Ленинградская ул., 26, e-mail: podgornysh.o.a@mail.ru).

**ЧАЗОВ Павел Андреевич** (Юрга) — ассистент кафедры «Технология машиностроения». Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (652055, Юрга, Российская Федерация, Ленинградская ул., 26, e-mail: chapaese@gmail.com).

## Information about the authors

**FILIPPOV Andrey Vladimirovich** (Yurga) — Junior Research Associate, Laboratory of Physics of Surface Hardening. The Institute of Physics of Strength and Material Science, The Russian Academy of Sciences; assistant Department of Mechanical Engineering Technology. Yurga Institute of Technology, Affiliate of the National Research Tomsk Polytechnic University (652055, Yurga, Russian Federation, Leningradskaya St., Bldg. 26, e-mail: avf@tpu.ru).

**WALTER Aleksandr Viktorovich** (Yurga) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Technology. Yurga Institute of Technology. Affiliate of the National Research Tomsk Polytechnic University (652055, Yurga, Russian Federation, Leningradskaya St., Bldg. 26, e-mail: avwalter@tpu.ru).

**SHAMARIN Nikolai Nikolaevich** (Yurga) — Teaching Specialist, Department of Engineering Technology, Yurga Institute of Technology, Affiliate of the National Research Tomsk Polytechnic University (652055, Yurga, Russian Federation, Leningradskaya St., Bldg. 26, e-mail: shamarinnik@gmail.com).

**PODGORNYKH Oleg Anatolievich** (Yurga) — Head of Laboratory, Department of Engineering Technology. Yurga Institute of Technology, Affiliate of the National Research Tomsk Polytechnic University (652055, Yurga, Russian Federation, Leningradskaya St., Bldg. 26, e-mail: podgornysh.o.a@mail.ru).

**CHAZOV Pavel Andreevich** (Yurga) — Teaching Assistant, Department of Engineering Technology. Yurga Institute of Technology, Affiliate of the National Research Tomsk Polytechnic University (652055, Yurga, Russian Federation, Leningradskaya St., Bldg. 26, e-mail: chapaese@gmail.com).