

DOI: 10.53078/20778481_2022_2_14

УДК 621.9.042

С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАННЫХ ОТВЕРСТИЙ ОСЕВЫМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ

S. G. Paltaratski, V. M. Shemenkov

FORMING FACETED HOLES WITH AN AXIAL ROTATING TOOL

Аннотация

Представлены теоретические основы и методика формирования отверстий любой гранности специальным универсальным осевым лезвийным инструментом, работающим по принципу обкатывания, с использованием станков с числовым программным управлением.

Ключевые слова:

гранные отверстия, осевой лезвийный универсальный инструмент, траектория, параметрическое уравнение, треугольник Рёло, станок с ЧПУ.

Для цитирования:

Полторацкий, С. Г. Формирование гранных отверстий осевым вращающимся инструментом / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 14–22.

Abstract

The theoretical foundations and methods are presented for forming holes with any number of facets on CNC machines using a special universal axial blade tool operating on the principle of rolling.

Keywords:

faceted holes, axial blade universal tool, trajectory, parametric equation, Reuleaux triangle, CNC machine.

For citation:

Paltaratski, S. G. Forming faceted holes with an axial rotating tool / S. G. Paltaratski, V. M. Shemenkov // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 14–22.

Введение

Использование гранных отверстий в машиностроении имеет специфическую и достаточно важную область применения. Следует только вспомнить бесшпоночные соединения для передачи больших крутящих моментов, используемые передовыми мировыми производителями станочного оборудования и инструментальной оснастки. Разработан ряд стандартов, которые регламентируют так называемые многоугольные профили.

Формирование таких отверстий, особенно глухих, в условиях классического механообрабатывающего производства, оснащенного универсальными станками и станками с ЧПУ и не имеющего специального оборудования, такого как электроэрозионные, прошивные, протяжные, долбежные и другие станки, является сложной, а в ряде случаев невыполнимой задачей.

В связи с этим разработка легкореализуемой, конкурентоспособной технологии получения гранных отверстий в условиях классического машиностроения

тельного производства является актуальной задачей, особенно в современных условиях импортозамещения.

На современном этапе развития металлообработки одним из основных методов, используемых при формировании гранных отверстий в серийном производстве, является метод качающего прошивания [1].

Неоспоримыми достоинствами этого метода является значительное снижение силовых параметров процесса резания по сравнению с классическим прошиванием. Однако данный метод, так же как и при прошивании, требует сверления предварительного отверстия, что увеличивает номенклатуру используемого режущего инструмента. Кроме этого, точность получаемых при таком методе отверстий не превышает 12-го качества.

В рамках статьи описан один из перспективных вариантов получения гранных отверстий на станках с ЧПУ фрезерно-сверлильно-расточной группы, заключающийся в применении

многолезвийного осевого режущего инструмента.

Формирование квадратных отверстий

Формирование квадратных отверстий заключается в обкалывании фигур постоянной ширины по определенной траектории с одновременным вращением вокруг своей оси и перемещением вдоль оси на глубину резания. Ярким примером такой фигуры является треугольник Рёло [2, 3], при помощи которого возможно получить квадратное отверстие [4].

Одной из важных задач является разработка траектории движения режущего инструмента для формирования гранных отверстий.

Классическая траектория движения инструмента является кривой, состоящей из четырех дуг эллипса [5, 6]. На рис. 1 представлен пример траектории для формирования квадратного отверстия.

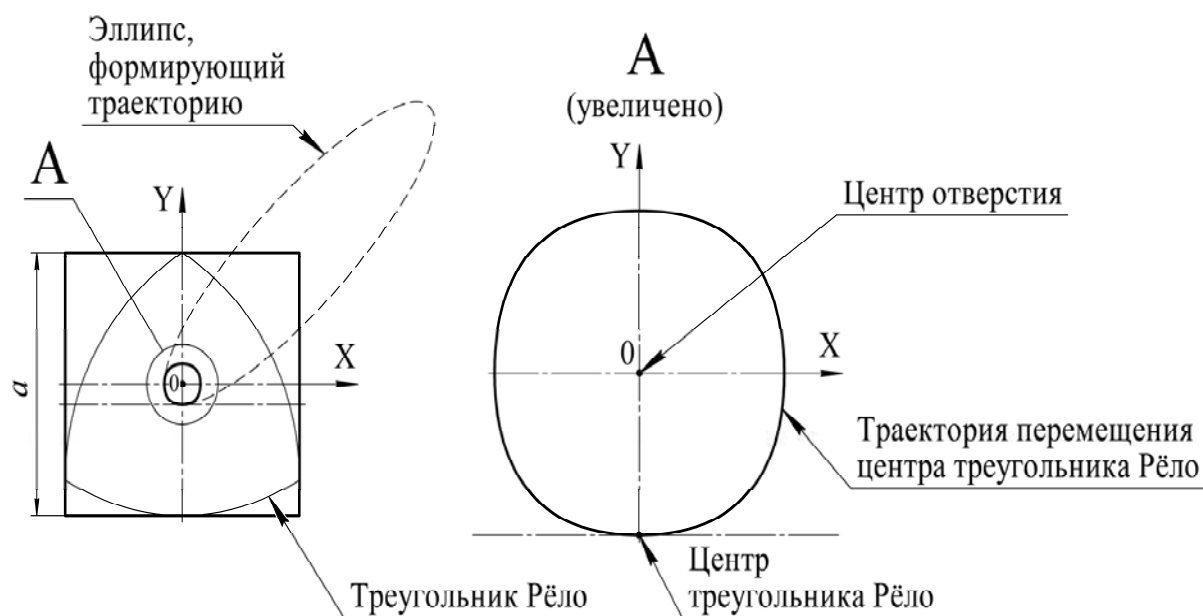


Рис. 1. Траектория движения инструмента для формирования квадратного отверстия, построенная по четырем эллипсам

Как видно из рисунка, центр квадратного отверстия совпадает с центром траектории движения инструмента, а центр треугольника Рёло – с нижней точкой траектории движения инструмента.

Эллипс в нижнем левом квадранте имеет параметрические уравнения:

$$x = 1 + \cos \beta + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \beta; \quad (1)$$

$$y = 1 + \sin \beta + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \beta, \quad (2)$$

где $\beta \in \left[\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{3} \right]$. Эллипс имеет центр

$(+1; +1)$, большую полуось $k = 1 + \frac{1}{\sqrt{3}}$,

малую полуось $j = 1 - \frac{1}{\sqrt{3}}$ и повернут на 45° .

Таким образом, можно получить траекторию движения инструмента при обработке только квадратного отверстия [7]. В случае, когда нужно получить отверстие другой гранности, отличной от квадратной, такой способ не применим либо требует определенной доработки, которая будет описана ниже.

В [8] приведено уравнение траектории движения инструмента, в основе которого лежит треугольник Рёло, для формирования квадратного отверстия (рис. 2). Данная траектория не отличается от траектории, построенной по эллипсам.

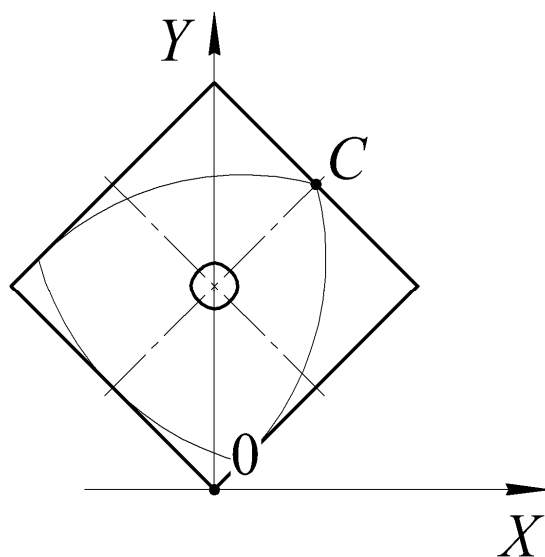


Рис. 2. Траектория движения инструмента для формирования квадратного отверстия, построенная по уравнению

При длине стороны квадрата, равной a , уравнение 1/4 траектории запишется как

$$x = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{3 + \sqrt{3}}{6} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{6} - \beta \right) \right) \cdot a; \quad (3)$$

$$y = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3 - \sqrt{3}}{6} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{6} - \beta \right) \right) \cdot a \quad (4)$$

при $\frac{\pi}{12} \leq \beta \leq \frac{\pi}{4}$.

Выразим длину стороны квадрата через диаметр вписанной окружности:

$$a = d \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right), \quad (5)$$

где d – диаметр вписанной окружности гранного отверстия; N – количество граней у формируемого отверстия.

Как видно из рис. 2, начало координат лежит на углу обрабатываемого отверстия, при этом отверстие наклонено на 45° . Это не совсем удобно с точки зрения программирования обработки на станке с ЧПУ. Преобразуем уравнение (4) таким образом, чтобы ось X проходила через центр обрабатываемого отверстия. Уравнение будет иметь вид:

$$y = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3-\sqrt{3}}{6} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot a - \sin 45^\circ. \quad (6)$$

Воспользуемся уравнениям преобразования, чтобы избавиться от угла наклона 45° :

$$x' = x \cdot \cos 45^\circ - y \cdot \sin 45^\circ; \quad (7)$$

$$y' = x \cdot \sin 45^\circ + y \cdot \cos 45^\circ. \quad (8)$$

Таким образом, ось координат проходит через центр обрабатываемого отверстия, при этом оно не имеет наклона (рис. 3). Преобразованное уравнение описывает траекторию в нижнем левом квадранте.

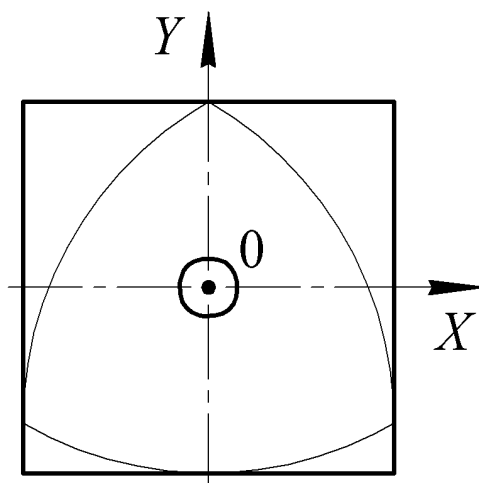


Рис. 3. Траектория движения инструмента для формирования квадратного отверстия с началом координат в центре этого отверстия

Так как сверло является осевым инструментом, преобразование траектории делает удобным составление программного продукта для обработки на станке с ЧПУ.

Формирование отверстий любой гранности

Возьмем за основу сверление квадратных отверстий и рассмотрим сверление пяти-, шести- и семигран-

ных отверстий.

Как было описано выше, центр обрабатываемого отверстия совпадает с центром траектории движения инструмента, а центр фигуры постоянной ширины – с нижней точкой траектории движения инструмента. Таким образом, вписав фигуру постоянной ширины в гранное отверстие, можно получить центр траектории и его нижнюю точку. Расстояние от центральной и нижней точки траектории при обработке отвер-

стей разной гранности меняется, причем с увеличением числа граней оно уменьшается.

Исследования показали, что траектория обработки различных гранных отверстий (начиная с четырех) может иметь одинаковую форму, различия будут только в масштабе.

Найдем расстояние от центральной до нижней точки траектории обработки шестигранных отверстий и разделим эту длину на расстояние от центральной до нижней точки траектории обработки квадратных отверстий. Важно при этом, чтобы диаметры вписанной окружности квадратного и шестигранного отверстия были одинаковыми. Таким образом, это отношение будет описывать отношение масштаба траек-

тории при обработке шестигранных отверстий к траектории при обработке квадратных отверстий. Такой коэффициент масштаба будет равен $k_{ГР} = 0,4074$.

Умножим рассматриваемое параметрическое уравнение траектории на этот коэффициент и проверим адекватность полученной траектории. Для этого построим шестиугольник, впишем в него фигуру постоянной ширины и обкатаем по полученной траектории (рис. 4).

Как видно из рис. 4, данная траектория подходит для обработки таких отверстий.

Таким же способом были получены масштабы траектории для обработки пяти- и семигранных отверстий (рис. 5).

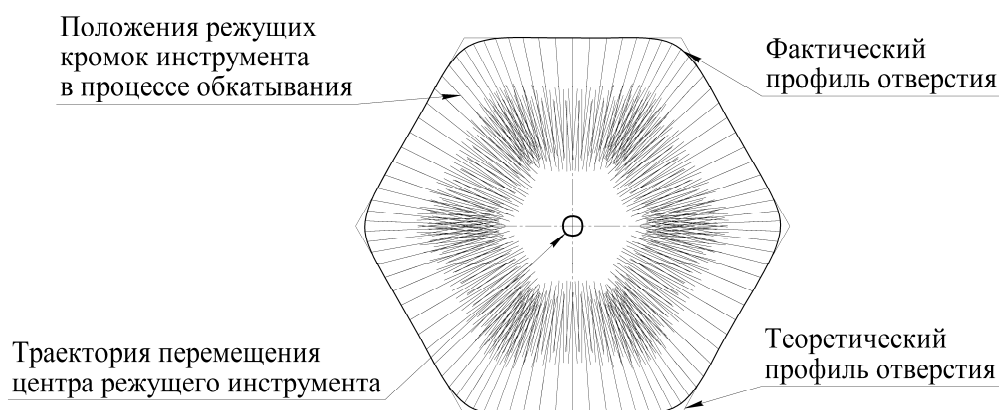


Рис. 4. Формирование шестигранного отверстия методом обката

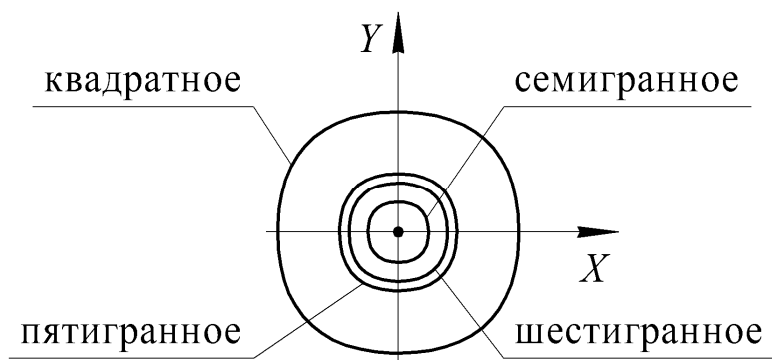


Рис. 5. Траектория движения центра инструмента при формировании гранных отверстий

Еще одним отличием обработки отверстий любой гранности, помимо масштаба траектории, будет количество полных проходов по траектории для формирования полного профиля вершиной инструмента. Для того чтобы получить квадратное отверстие, инструменту необходимо пройти по траектории 3 раза. Количество проходов

всегда на единицу меньше количества граней у обрабатываемого отверстия.

Таким образом, универсальное уравнение траектории движения инструмента, в основе которого лежат фигуры постоянной ширины, для формирования отверстий любой «гранности» будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \left(\left(\left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{3 + \sqrt{3}}{6} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left(d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) \right) \cdot \cos 45^\circ - \right. \\ \left. - \left(\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3 - \sqrt{3}}{6} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left(d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) - \sin 45^\circ \right) \cdot \sin 45^\circ \right) \cdot k_{зр}; \\ y = \left(\left(\left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{3 + \sqrt{3}}{6} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left(d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) \right) \cdot \sin 45^\circ + \right. \\ \left. + \left(\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{3 - \sqrt{3}}{6} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) \right) \cdot \left(d_{ВП} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180^\circ}{N}\right) \right) - \sin 45^\circ \right) \cdot \cos 45^\circ \right) \cdot k_{зр}, \end{array} \right. \quad (9)$$

где $k_{зр}$ – коэффициент масштаба, зависящий от количества граней обрабатываемого отверстия. Для квадратных отверстий $k_{зр} = 1$, для пятигранных отверстий $k_{зр} = 0,4862$, для шестигранных $k_{зр} = 0,4074$, для семигранных $k_{зр} = 0,2507$.

Универсальный инструмент для формирования гранных отверстий

Имея универсальное уравнение траектории движения инструмента, возмож-

но рассмотреть вопрос об изготовлении универсального инструмента для формирования отверстий любой гранности с одинаковым диаметром вписанной окружности $d_{ВП}$ (рис. 6).

Проведя теоретические исследования над четырех-, пяти-, шести- и восьмигранными отверстиями, выявили возможность изготовления универсального инструмента (рис. 7). Количество режущих кромок инструмента не зависит от количества граней у обрабатываемого отверстия.

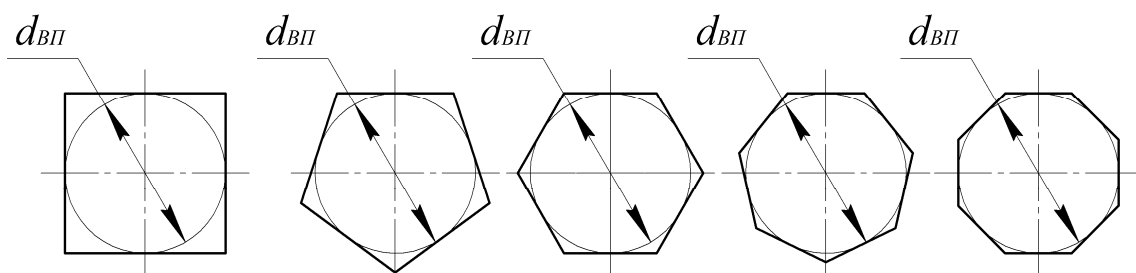


Рис. 6. Виды гранных отверстий с количеством граней, равным четырем, пяти, шести, семи и восьми, и одинаковым диаметром вписанной окружности $d_{ВП}$

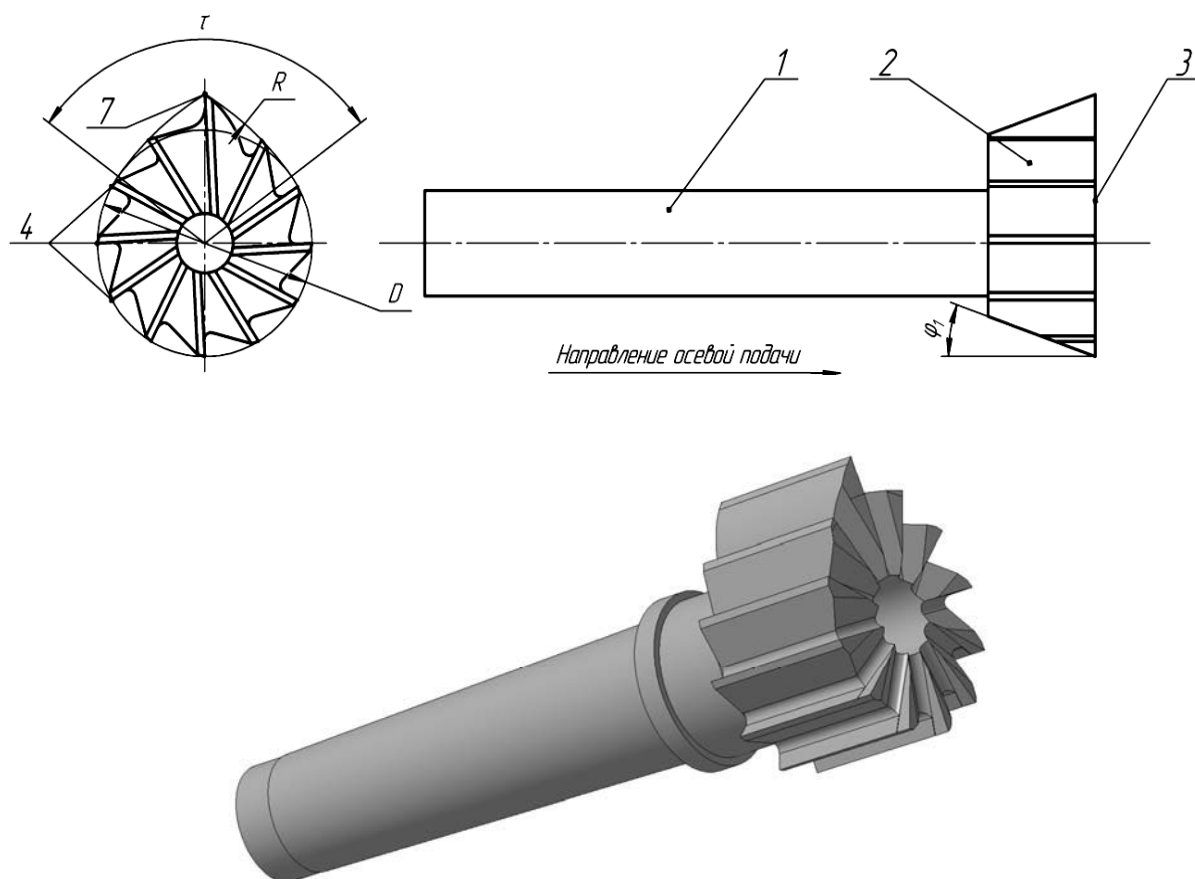


Рис. 7. Универсальный инструмент для формирования гранных отверстий

Осевой инструмент состоит из присоединительной части 1 и рабочей части 2. В данном случае присоединительная часть 1 выполнена в виде цилиндра.

Рабочая часть 2 инструмента содержит режущие зубья с вершинами зуба 4, формирующие режущую кромку, предназначенную для снятия обрабатываемого материала. Торцовая поверхность 3 рабочей части 2 имеет специфическую форму, у которой радиус дуг R , формирующий основной режущий зуб 7, равен диаметру вписанной окружности гранного отверстия $d_{ВП}$, диаметр инструмента $D = 0,76d_{ВП}$. Значение вспомогательного угла в плане φ_1 находится в пределах от 0° до 30° , а значение контактного угла τ – в пределах от 105° до 110° .

Принцип формирования гранных отверстий с использованием станков с ЧПУ

При разработке управляющей программы необходимо учесть то, что задать перемещение инструмента по траектории, представленной в виде системы уравнений достаточно сложно, а для станков с ЧПУ первых поколений невозможно. Таким образом, для получения гранных отверстий на станках с ЧПУ любого поколения предлагается заменить траекторию перемещения оси инструмента дугами окружности, которые можно повторить путем круговой интерполяции.

Как пример далее приведена программа получения квадратных отверстий с размером сторон $a = 16$ мм

на станке с ЧПУ с приводным инструментом.

D1 T1
 G17 G95 F24,03 S33,52 M3
 G0 X0 Y0 Z5
 G1 X0 Y0 Z-0,1
 G3 X0,2662 Y0,0171 R1,9754
 G3 X0,5261 Y0,0762 R1,4367
 G3 X0,7670 Y0,1898 R1,0763
 G3 X0,9683 Y0,3637 R0,9172
 G3 X1,1121 Y0,5876 R0,9707
 G3 X1,1970 Y0,8401 R1,2328
 G3 X1,2335 Y1,1043 R1,6856
 G3 X1,2335 Y1,3711 R2,1947
 G3 X1,1970 Y1,6352 R1,6856
 G3 X1,1121 Y1,8878 R1,2328
 G3 X0,9683 Y2,1117 R0,9706
 G3 X0,7670 Y2,2856 R0,9172
 G3 X0,5261 Y2,3991 R1,0763
 G3 X0,2662 Y2,4582 R1,4367
 G3 X0 Y2,4754 R1,9754
 G3 X-0,2662 Y2,4582 R1,9754
 G3 X-0,5261 Y2,3991 R1,4367
 G3 X0,7670 Y2,2856 R1,0763
 G3 X0,9683 Y2,1117 R0,9172
 G3 X1,1121 Y1,8878 R0,9706
 G3 X1,1970 Y1,6352 R1,2328
 G3 X1,2335 Y1,3711 R1,6856
 G3 X1,2335 Y1,1043 R2,1947
 G3 X1,1970 Y0,8401 R1,6856
 G3 X1,1121 Y0,5876 R1,2328
 G3 X0,9683 Y0,3637 R0,9707
 G3 X0,7670 Y0,1898 R0,9172

G3 X0,5261 Y0,0762 R1,0763
 G3 X0,2662 Y0,0171 R1,4367
 G3 X0 Y0 R1,9754
 ...
 G0 X0 Y0 Z5
 M05
 M30

Выводы

Существующие методы получения гранных отверстий имеют ряд недостатков, среди которых дороговизна используемого оборудования и электроэнергии, невозможность обработки глухих отверстий, необходимость нескольких технологических переходов, необходимость индивидуального инструмента под каждый тип отверстий и др. [9].

Предложенный в статье вариант получения гранных отверстий осевым инструментом имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в некоторой универсальности получения отверстий любой гранности одним и тем же инструментом. Однако предлагаемый способ также имеет свою особенность, выражающуюся в том, что углы между гранями сопрягаются по дуге определенного радиуса, который напрямую зависит от диаметра вписанной в фигуру окружности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубков, Н. Н.** Получение гранных отверстий методом качающейся прошивки / Н. Н. Зубков, А. В. Ломакин // *Технология машиностроения*. – 2008. – № 7. – С. 13–15.
2. **Радемахер, Г.** Кривые постоянной ширины / Г. Радемахер, О. Тёплиц // *Числа и фигуры. Опыты математического мышления: пер. с нем.* / Г. Радемахер, О. Тёплиц; под ред. И. М. Яглома. – Москва: Физматлит, 1962. – С. 195–211.
3. **Яглом, И. М.** Фигуры постоянной ширины / И. М. Яглом, В. Г. Болтянский // *Выпуклые фигуры* / И. М. Яглом, В. Г. Болтянский. – Москва; Ленинград: ГТТИ, 1951. – С. 90–105.
4. Особенности формирования гранных отверстий сверлением / А. П. Сериков [и др.] // 55 студенч. науч.-техн. конф., Могилев, 3–4 мая 2019 г.: тез. докл. – Могилев, 2019. – С. 61.
5. **Raviraj D. Gohil.** Design of cam geometry for minimization of fillet radius effect in square hole drilling operation / Raviraj D. Gohil, Manhar S. Kagthara, Piyush J. Mandaliya // *International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*. – 2014. – Vol. 1, iss. 5. – P. 4470.
6. **Smith, S.** Drilling Square Holes / S. Smith // *The Mathematics Teacher*. – Reston: National Council of Teachers of Mathematics, 1993. – Vol. 86, № 7. – P. 579–583.
7. **Полторацкий, С. Г.** Особенности кинематики процесса сверления квадратных отверстий / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материа-*

лы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 59.

8. **Куренков, Е. Д.** Динамика точек треугольника Рёло [Электронный ресурс] / Е. Д. Куренков, О. В. Починка // Огарев – online. – 2016. – № 20. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/dinamika-tochek-treugolnika-ryolo>. – Дата доступа: 01.04.2022.

9. **Полторацкий, С. Г.** Основные способы получения гранных отверстий в современном машиностроении / С. Г. Полторацкий, В. М. Шеменков // Менеджмент качества производственных, социально-экономических и технических систем: развитие и совершенствование: сб. тр. – Брянск: БГТУ, 2022. – С. 65–71.

Статья сдана в редакцию 16 апреля 2022 года

Сергей Григорьевич Полторацкий, аспирант, Белорусско-Российский университет.
E-mail: poltos17@gmail.com.

Владимир Михайлович Шеменков, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

Siarhei Grigoryevich Paltaratski, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: poltos17@gmail.com.

Vladimir Mikhailovich Shemenkov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.