

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.9.042  
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-129-136



## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ОТВЕРСТИЙ В СОСТАВНЫХ ДЕТАЛЯХ

Козлов А.В.<sup>1</sup>, Дерябин И.П.<sup>1</sup>, Верещагин В.С.<sup>1</sup>, Платов С.И.<sup>2</sup>, Кургузов С.А.<sup>2</sup>,  
Терентьев Д.В.<sup>2</sup>, Звягина Е.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Златоуст, Россия

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В конструкциях машин возможно применение составных деталей с отверстием. Наличие в заготовке отверстия треугольной или квадратной формы приводит к образованию соответствующих погрешностей формы при последующей обработке в связи с «копированием» этих погрешностей на стадиях черновой, получистовой и чистовой обработок. Основной задачей является обеспечение точности обработки отверстий в составных деталях, так как в дальнейшем отверстие используется в качестве основной конструкторской базы для различных соединений, вставок и других элементов узлов и механизмов. **Используемые методы.** Анализ причин образования огранки отверстий с помощью системы математических моделей радиально-статического типа. Экспериментальное опробирование результатов расчетов при обработке отверстий с помощью концевых мерных осевых режущих инструментов. **Новизна.** Разработана система математических моделей для процессов формообразования точных отверстий в составных деталях инструментами одностороннего резания, к которым относятся ружейные сверла и зенкеры. Результаты расчетов процессов сверления и зенкерования по данным моделям позволили уточнить углы расположения опорных кулачков ружейного сверла и показали, что последующее применение 3-лезвийного зенкера позволяет существенно уменьшить погрешность формы формируемого отверстия. **Результат.** Предложены мероприятия, направленные на устранение недостатков существующего технологического процесса и применяемого режущего инструмента, такие как применение кондукторной втулки, изменение конструкции и геометрических параметров рабочей части режущего инструмента. Это позволило формировать более точные отверстия. **Практическая значимость.** Разработаны мероприятия, направленные на повышение точности сборочного соединения с использованием составных деталей.

**Ключевые слова:** составная деталь, точность формы отверстия, математическая модель, концевые мерные инструменты

© Козлов А.В., Дерябин И.П., Верещагин В.С., Платов С.И., Кургузов С.А.,  
Терентьев Д.В., Звягина Е.Ю., 2022

### Для цитирования

Повышение точности формы отверстий в составных деталях / Козлов А.В., Дерябин И.П., Верещагин В.С., Платов С.И., Кургузов С.А., Терентьев Д.В., Звягина Е.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 129-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-129-136>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## IMPROVEMENT OF HOLE SHAPE ACCURACY IN COMPOSITE PARTS

Kozlov A.V.<sup>1</sup>, Deryabin I.P.<sup>1</sup>, Vereshchagin V.S.<sup>1</sup>, Platov S.I.<sup>2</sup>, Kurguzov S.A.<sup>2</sup>,  
Terentev D.V.<sup>2</sup>, Zvyagina E.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Branch of South Ural State University (National Research University), Zlatoust, Russia

<sup>2</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Machine designs may contain composite parts with a hole. A triangular or square hole in the blank leads to corresponding shape errors during subsequent processing due to the “copying” of these errors at roughing, semi-finishing and finishing stages. A main objective is to ensure the accuracy of processing holes in composite parts, since the hole is then used as a main assembly base for various connections, inserts and other elements of assemblies and mechanisms. **Methods Applied:** Analysis of the reasons for hole faceting using a system of radial-static mathematical models. Experimental testing of the calculation results in the processing of holes using measurement rotary end-cutting tools. **Originality:** A system of mathematical models has been developed for the processes of forming holes with single-sided cutting tools, which include gun drills and countersinks. The calculations of drilling and countersinking processes according to these models made it possible to clarify the angles of location of the support cams of the gun drill and showed that the subsequent use of a 3-blade countersink significantly reduced the error in the shape of the hole being formed. **Result.** The authors proposed measures aimed at eliminating disadvantages of the existing technological process and the cutting tool used, such as the use of a drill bushing, changing the design and geometric parameters of the working part of the cutting tool. This contributed to forming more accurate holes. **Practical Relevance.** The measures have been developed to improve the accuracy of the assembly unit consisting of composite parts.

**Keywords:** composite part, hole shape accuracy, mathematical model, end measurement tools

### For citation

Kozlov A.V., Deryabin I.P., Vereshchagin V.S., Platov S.I., Kurguzov S.A., Terentyev D.V., Zvyagina E.Yu. Improvement of Hole Shape Accuracy in Composite Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 129-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-129-136>

### Введение

В настоящее время в действующем производстве изготавливают несколько типоразмеров деталей, характерной особенностью которых является их сборка из нескольких секторов (трех или четырех) и образованное в центре трех- или четырехгранное отверстие (рис. 1). Наличие в заготовке отверстия треугольной или квадратной формы приводит к образованию соответствующих погрешностей формы при последующей обработке в связи с «копированием» этих погрешностей на стадиях черновой, получистовой и чистовой обработок [1]. Изучаемые процессы изготовления составных деталей в машиностроении встречаются нечасто, поэтому в технической литературе недостаточно информации по данной проблеме.

Цель исследования – провести теоретические и экспериментальные исследования процесса формирования отверстий при изготовлении со-

ставных деталей. На основе анализа результатов предложить технологию процесса обработки и обосновать изменения в конструкции режущих инструментов, которые позволят повысить точность формы отверстий.

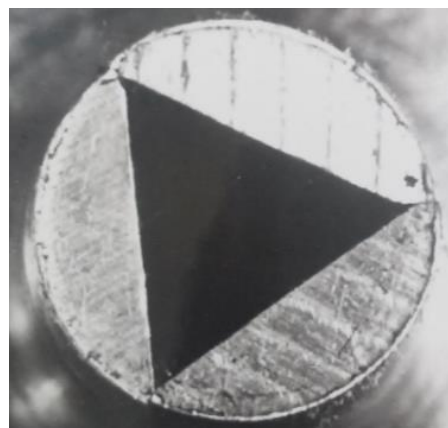


Рис. 1. Фотография трехгранного отверстия в заготовке

Fig. 1. A triangular hole in the workpiece

### Полученные результаты и их обсуждение

Технологический процесс обработки таких отверстий будет рассмотрен на примере конкретной детали, составленной из трех секторов. Существующий технологический процесс обработки отверстий включает в себя следующие технологические переходы [2, 3]:

1. Засверливание отверстия на длину 20-30 мм спиральным сверлом.
2. Сверление «на проход» ружейным сверлом с углами расположения опорных кулачков 90 и 180°.
3. Предварительное зенкерование отверстия ружейным зенкером.
4. Окончательная расточка отверстия резцом (для коротких деталей) или зенкерование трёх- и четырёхлезвийным зенкером (для длинных деталей).

При обработке деталей по существующему техпроцессу уже на первом переходе – сверление на проход – возникают:

- огранка отверстия после сверления в пределах 1-2 мм, что подтверждается круглограммой (рис. 2, а);
- значительные уводы и искривление оси отверстия, что было зафиксировано непрохождением в отверстии калибра на прямолинейность и наличием разностенности на выходе из отверстия;
- разбивка отверстия (увеличение диаметра), о чем свидетельствуют измерения диаметра и контроль предельными калибрами.

Последующая обработка зенкерованием и растачиванием показывает, что происходит некоторое уменьшение погрешности формы (огранки), но все же эта погрешность остается значительной (рис. 2). Погрешности гладкого

отверстия копируются в процессе последующего резбонарезания резцом или метчиком. А это, в свою очередь, сказывается на качестве сборки готовой продукции и ее эксплуатационных показателях [4-8].

Для описания и выявления основных закономерностей формообразования отверстий инструментами различных типов была разработана система математических моделей радиально-статического типа [3, 4]. В частности, процессы обработки двухлезвийными инструментами, например спиральными сверлами, могут быть описаны уравнениями вида

$$A \cdot p(\psi) = -p(\psi - \pi) + C, \quad (1)$$

$$A = 1 + \frac{S}{2n} \cdot \tan \varphi + \frac{\tau}{h} \cdot \frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1}, \quad (2)$$

$$C = \tan \varphi \cdot \left( \frac{S}{2} \cdot \frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1} + \tau \right), \quad (3)$$

где  $p(\psi)$  – радиус-вектор вершины режущего лезвия, мм;  $S$  – осевая подача, мм/об;  $\varphi$  – главный угол в плане лезвий, град;  $h$  – глубина резания, мм;  $\psi$  – текущий угол поворота инструмента, град;  $\tau$  – осевое биение режущих кромок инструмента или осевой сдвиг вершин режущих кромок, мм;  $n$  – количество колебаний за 1 оборот детали;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты пропорциональности сил резания площадям срезаемого слоя (для ружейного сверла соответствующий коэффициент можно считать близким к  $\infty$ ).

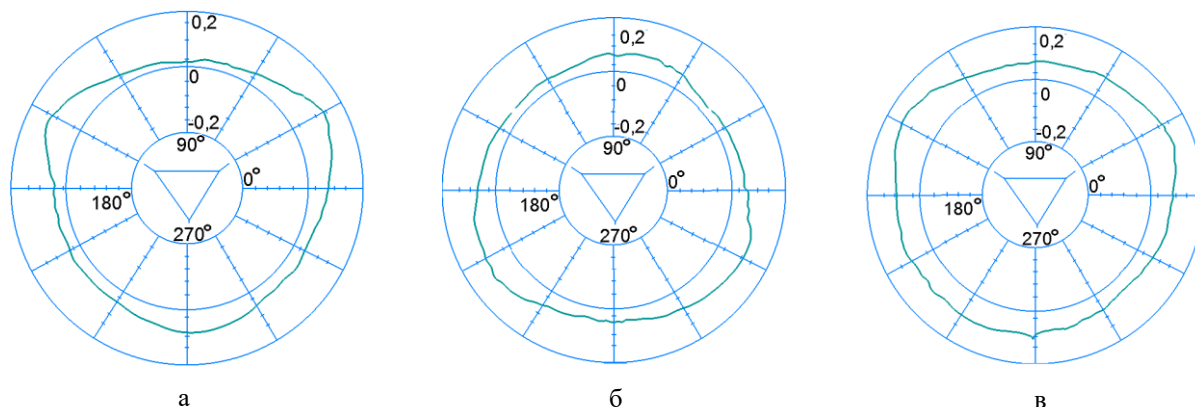


Рис. 2. Образование огранки отверстия (а) и ее технологическое наследование после зенкерования и растачивания (б, в)

Fig. 2. Formation of the hole cut (а) and its technological inheritance after countersinking and boring (б, в)

Приведенная модель описывает процесс формообразования инструментами, формообразующие элементы которого имеют незначительный осевой сдвиг.

Подобная же система математических моделей была разработана для процессов формообразования отверстий инструментами одностороннего резания, к которым относятся ружейные сверла и зенкеры [2, 3]. Данные модели показывают, что большое значение имеет относительное расположение вершины режущего лезвия и опорного кулачка инструмента, а также углы расположения направляющего и опорного кулачков.

Анализ чертежа пушечного сверла показал, что диаметральный кулачек выдвинут по отношению к вершине режущего лезвия вперед на величину  $t = 0,5$  мм (рис. 3). Измерения расстояния  $t$  это подтвердили. Такое расположение кулачка приводит к базированию инструмента в процессе обработки по поверхности резания [11].

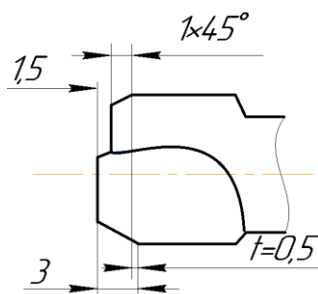


Рис. 3. Схема обработки пушечным сверлом с опережающим осевым расположением кулачка

Fig. 3. Processing with a cannon drill with an advanced axial cam arrangement

Модель, описывающая процесс обработки 2-элементным инструментом при его базировании по поверхности резания, имеет вид

$$p(\varphi) = D - p(\psi - \pi) + \left( \frac{S}{2} - \tau \right), \quad (4)$$

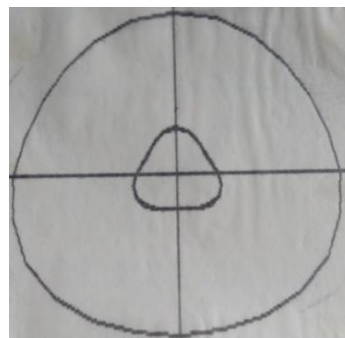
где  $p(\varphi)$  – радиус-вектор вершины режущего лезвия в точке касания, мм;  $D$  – диаметр инструмента, мм.

Анализ моделей (1) и (4) показал, что:

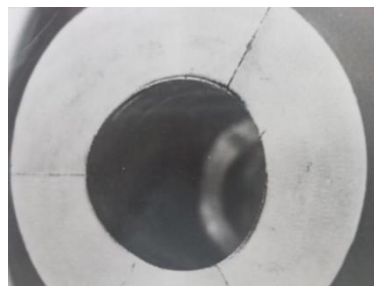
1. Базирование диаметрального кулачка по поверхности резания приводит к образованию «разбивки» отверстия, величина которой может достигать

$$\Delta D(\varphi) = \left( \tau + \frac{S}{2} \right) \cdot \tan \varphi = (0,5 + 0,1) \cdot 1 = 0,6 \text{ мм.}$$

2. Наличие трехгранного отверстия в заготовке приводит к образованию огранки в результате копирования 2-элементным инструментом предварительно полученного отверстия. На рис. 4 приведена траектория движения вершины режущего лезвия ружейного сверла при обработке трехгранного отверстия, подтверждающая копирование погрешности отверстия в заготовке.



а



б

Рис. 4. Копирование погрешности отверстия в заготовке при его обработке ружейным сверлом: а – результат компьютерного моделирования; б – фото обработанной заготовки

Fig. 4. Copying the error of the hole in the workpiece during its processing with a gun drill: а is computer modeling, б is a processed workpiece

Предложены следующие мероприятия, направленные на устранение недостатков существующего технологического процесса [5-8]:

1. Осуществить направление инструмента одностороннего резания существующей конструкции по кондукторной втулке (рис. 5, а) [9].

2. Изменить осевое расположение кулачка по отношению к вершине режущего лезвия, обеспечив базирование выглаживающего кулачка на обработанную поверхность (рис. 5, б).

3. Изменить угловое расположение кулачков, сделав их равными  $\psi_1 \approx 105^\circ$ ,  $\psi_2 \approx 215^\circ$  (рис. 5, в и б).

4. Использовать на завершающем переходе зенкер с числом лезвий, равным числу составляющих деталь элементов (для 3-элементной детали применить 3-лезвийный зенкер), что было показано в работах [2, 10].

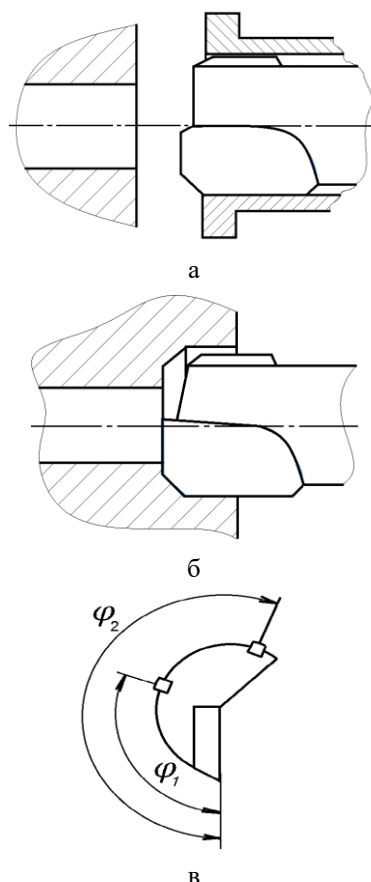


Рис. 5. Методы устранения недостатков технологического процесса: а – по кондукторской втулке; б – на обработанную поверхность; в – расположения кулачков под углами, равными  $\psi_1 \approx 105^\circ$ ,  $\psi_2 \approx 215^\circ$

Fig. 5. Methods of eliminating the disadvantages of the technological process: a is along the drill bushing; б is on the treated surface; в is cams arranged at angles  $\psi_1 \approx 105^\circ$ ,  $\psi_2 \approx 215^\circ$



Рис. 6. Угловое расположение кулачков при  $\psi_1 \approx 105^\circ$ ,  $\psi_2 \approx 215^\circ$

Fig. 6. Cams arranged at angles  $\psi_1 \approx 105^\circ$ ,  $\psi_2 \approx 215^\circ$

В частности, базирование опорного и направляющего кулачков на обработанную поверхность обеспечивает стабильность получения диаметра отверстия. Путем анализа результатов расчетов компьютерных моделей процессов сверления и зенкерования определили углы расположения кулачков ружейного сверла и что последующее применение 3-лезвийного зенкера [2] позволяет существенно уменьшить погрешность формы формируемого отверстия (рис. 7, б). На рис. 7 представлено уменьшение некруглости при сверлении отверстия по разработанной технологии.

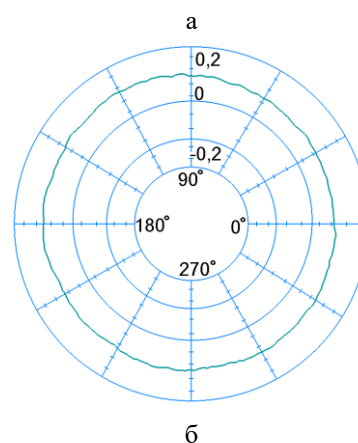
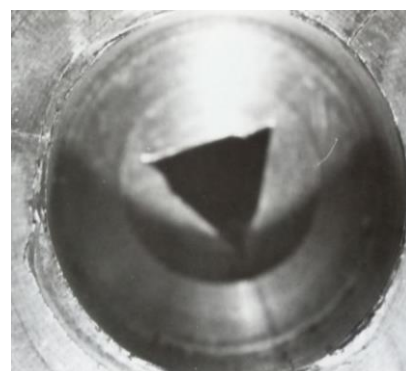


Рис. 7. Уменьшение образования некруглости отверстия: а – фотография полученного отверстия; б – круглограмма отверстия, обработанного инструментом с угловым расположением кулачков  $\psi_1 \approx 105^\circ$ ,  $\psi_2 \approx 215^\circ$

Fig. 7. Reduction of out-of-roundness of the hole: a is a resulting hole; б is a roundness chart of the hole processed by a tool with cams arranged at angles  $\psi_1 \approx 105^\circ$ ,  $\psi_2 \approx 215^\circ$

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что:

1. Для описания закономерностей формообразования отверстий 2-лезвийными инструментами – спиральными сверлами предложена система уравнений радиально-статического типа.



2. Результаты расчетов по разработанной математической модели показали, что необходимо изменить расположение опорных кулачков на корпусе сверла одностороннего резания со значений углов 90 и 180° на 105 и 215° соответственно и применить кондуктор при сверлении.

3. В процессе дальнейшей обработки отверстия необходимо применять зенкер с количеством режущих кромок, равным количеству элементов, составляющих деталь.

Проведенные практические испытания технологии с указанными выше изменениями подтвердили высказанные предположения. Так, сверление отверстий в заготовке по предложенной технологии позволяет существенно уменьшить образование некруглости отверстия. Отклонения формы отверстия были уменьшены с 0,15-0,18 до 0,04-0,05 мм.

Результаты исследований могут быть полезны для развития решений аналогичных задач, предложенных в работах [10, 11], а также в работе [12], направленных на совершенствование процессов обработки.

#### Список источников

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. Т. 2. 496 с.
2. Козлов А.В., Дерябин И.П. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 251 с.
3. Ахтаров Д.Р. Исследование точности обработки отверстий в составных деталях // Молодежный научный форум. XII Вузовская научно-исследовательская конференция. Трехгорный, 2020. С. 18-24.
4. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Козлов А.В. Математическое моделирование точности обработки глубоких отверстий концевыми мерными инструментами // Прогрессивная технология обработки глубоких отверстий: сб. тез. докл. 7-й Всесоюзной конф. М.: Информатика, 1991. С. 21-24.
5. Развитие теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев, О.С. Железков, В.В. Рубаник, Ж.П. Вассал // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. Т.1. №1. С. 112-115.
6. Дерябин И.П., Токарев А.С. Снижение трудоемкости обработки отверстий на основе повышения точности операций зенкерования сборными инструментами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 107-115.

7. А.с. 1373484 СССР МКИ В 23 В 35/00. Способ многопроходной обработки отверстий / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов; № 4092586/31-08; заявл. 15.05.86; опубл. 15.02.88, Бюл. № 6.
8. А.с. 1827331 СССР МКИ В 23 В 35/00. Способ обработки некруглых валов и отверстий и устройство для его осуществления / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, С.Г. Чиненов; № 4922123/08; заявл. 25.03.91; опубл. 15.07.93, Бюл. № 26.
9. А.с. 1579636 СССР МКИ В 23 В 5/44. Способ обработки некруглых валов / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, С.Г. Чиненов; № 4922123/08; заявл. 25.03.91; опубл. 23.07.90, Бюл. № 26.
10. А.с. 2243863 РФ МКИ В 23 В 35. Способ обработки некруглых отверстий в виде эквидистанты «треугольника рело» / Ворона В.В., Лакирев С.Г., Максимов С.П., Чиненов С.Г., Чиненова Т.П.; заявл. 15.05.15; опубл. 23.06.15.
11. Разработка регулируемой расточной оправки для обработки отверстий / А.В. Козлов, С.И. Платов, Е.Ю. Звягина [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2021. №10. С. 16-19.
12. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129-139. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139.

#### References

1. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya: v 2 t.* [Machinery's handbook: in 2 volumes]. Moscow: Mechanical Engineering, 1985, vol. 2, 496 p. (In Russ.)
2. Kozlov A.V., Deryabin I.P. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya otverstiy mernymi instrumentami: monografiya* [Research on processes of forming holes with measurement tools: monograph]. Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University, 2006, 251 p. (In Russ.)
3. Akhtarov D.R. Research on accuracy of hole machining in composite parts. *Molodezhny nauchny forum. XII Vuzovskaya nauchno-issledovatel'skaya konferentsiya* [Youth Scientific Forum. The 12<sup>th</sup> University Research Conference]. Trekhgorny, 2020, pp. 18-24. (In Russ.)
4. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V. Mathematical modeling of accuracy when machining deep holes with end measurement tools. *Progressivnaya tekhnologiya obrabotki glubokikh otverstiy: sb. tez. dokl. 7-y Vsesoyuznoy konf.* [Advanced technology of machining deep holes: collection of abstracts of the 7th All-Union Conference]. Moscow: Informatics, 1991, pp. 21-24. (In Russ.)
5. Platov S.I., Ogarkov N.N., Terentev D.V., Zhelezkov O.S., Rubanik V.V., Vassal J.P. Development of theory and technology of designing machines, units and tools in forming and cutting processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, vol.1, no. 1, pp. 112-115. (In Russ.)

6. Deryabin I.P., Tokarev A.S. Reducing the labor intensity of hole machining by increasing the accuracy of countersinking operations with precast tools. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol.19, no. 4, pp. 107-115. (In Russ.)
7. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V. *Sposob mnogoprokhodnoy obrabotki otverstiy* [Method of hole multiple-pass machining]. Author's certificate USSR, no. 1373484, 1988.
8. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V., Chinenov S.G. *Sposob obrabotki nekruglykh valov i otverstiy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of machining out-of-round shafts and holes and the relevant tool]. Author's certificate USSR, no. 1827331, 1993.
9. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Kozlov A.V., Chinenov S.G. *Sposob obrabotki nekruglykh valov* [Method of machining out-of-round shafts]. Author's certificate USSR, no. 1579636, 1990.
10. Vorona V.V., Lakirev S.G., Maksimov S.P., Chinenov S.G., Chinenova T.P. *Sposob obrabotki nekruglykh otverstiy v vide ekvidistanty «treugolnika Relo»* [Method of machining out-of-round holes in the form of a cutter center path of a Reuleaux triangle]. Author's certificate USSR, no. 2243863, 2005.
11. Kozlov A.V., Platov S.I., Zvyagina E.Yu. et al. Development of an adjustable boring bar for hole machining. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering], 2021, no. 10, pp. 16-19. (In Russ.)
12. Zaides S.A. New methods of surface plastic deformation, when manufacturing machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129-139. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139.

Поступила 18.10.2022; принята к публикации 31.10.2022; опубликована 22.12.2022  
Submitted 18/10/2022; revised 31/10/2022; published 22/12/2022

**Козлов Александр Васильевич** – доктор технических наук, профессор,  
филиал Южно-Уральского государственного университета, Златоуст, Россия.  
Email: a\_kozlov55@mail.ru.

**Дерябин Игорь Петрович** – доктор технических наук, профессор,  
филиал Южно-Уральского государственного университета, Златоуст, Россия.  
Email: deriabinip@susu.ru.

**Верещагин Владимир Сергеевич** – студент,  
филиал Южно-Уральского государственного университета, Златоуст, Россия.  
Email: vov.car134@mail.ru. ORCID 0000-0001-5796-9363

**Платов Сергей Иосифович** – доктор технических наук, профессор,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: mitodim@magtu.ru.

**Кургузов Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: ksaask@mail.ru.

**Терентьев Дмитрий Вячеславович** – доктор технических наук, профессор,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: d.terentev@magtu.ru.

**Звягина Елена Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: zviagina\_mmf@mail.ru.

**Alexander V. Kozlov** – DrSc (Eng.), Professor,  
Branch of South Ural State University, Zlatoust, Russia.  
E-mail: a\_kozlov55@mail.ru

**Igor P. Deryabin** – DrSc (Eng.), Professor,  
Branch of South Ural State University, Zlatoust, Russia.  
Email: deriabinip@susu.ru

**Vladimir S. Vereshchagin** – student,  
Branch of South Ural State University, Zlatoust, Russia.  
Email: vov.car134@mail.ru. ORCID 0000-0001-5796-9363

**Sergey I. Platov** – DrSc (Eng.), Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: psipsi@mail.ru.

**Sergey A. Kurguzov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: ksaask@mail.ru

**Dmitry V. Terentev** – DrSc (Eng.), Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: ktnterentyev@mail.ru

**Elena Yu. Zvyagina** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: zviagina\_mmf@mail.ru