

Численные методы моделирования Numerical simulation methods

Научная статья
УДК 621.91.02
DOI: 10.14529/engin250406

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА УВОДА ОСИ ОТВЕРСТИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ДВУХЛЕЗВИЙНЫМ СВЕРЛОМ

И.П. Дерябин¹, derigp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1080-4507>

В.Г. Шаламов², shalamovvg@susu.ru

А.С. Токарев³, tokarev_a_s91@mail.ru

А.В. Морозов⁴, ntk_2005@rambler.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Трехгорный, Россия

⁴ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты серии экспериментов по сверлению отверстий двухлезвийным сверлом. Эти эксперименты были проведены с целью подтверждения адекватности разработанной математической модели, предназначенной для расчета увода оси отверстия. Первым этапом создания математической модели было построение схем срезаемых сечений припусков с учетом погрешности главных углов в плане. Данная методика уже не раз применялась при исследовании подобных процессов обработки отверстий, и она постоянно совершенствуется, добавляются новые параметры, которые раньше не были учтены. Построение схем срезаемых сечений припуска осуществляется в программе Компас 3D. Следующим этапом были разработаны математические формулы, учитывающие особенности обработки отверстий концевым мерным инструментом, такие как погрешности главного угла в плане, амплитуда осевых колебаний инструмента и прочие факторы. Математические формулы были выведены на основании построенных площадей срезаемых сечений припусков. В тексте статьи представлены основные параметры, использованные при проведении экспериментов. Также в статье описаны результаты измерений отклонения осей отверстий высокоточным измерительным оборудованием. Исследование позволяет на практике оценить эффективность разработанной математической модели и ее применимость в практических задачах. Эксперименты были проведены на одинаковых заготовках. При глубоком сверлении, т. е. свыше пяти диаметров отверстия, применялись сверла разного диаметра. Анализ представленных результатов и подтверждение адекватности математической модели позволяет сделать выводы о возможности использования этой модели для оптимизации процессов, а вследствие этого и повышения качества производства в технических отраслях.

Ключевые слова: сверло, увод оси, математическая модель, расчет увода оси, разность главных углов в плане

Для цитирования: Экспериментальное исследование адекватности математических моделей расчета увода оси отверстия при сверлении двухлезвийным сверлом / И.П. Дерябин, В.Г. Шаламов, А.С. Токарев, А.В. Морозов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 4. С. 62–73. DOI: 10.14529/engin250406

EXPERIMENTAL STUDY OF THE ADEQUACY OF MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING THE DEFLECTION OF THE HOLE AXIS WHEN DRILLING WITH A TWO-BLADE DRILL

I.P. Deryabin¹, derigp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1080-4507>

V.G. Shalamov², shalamovvg@susu.ru

A.S. Tokarev³, tokarev_a_s91@mail.ru

A.V. Morozov⁴, ntk_2005@rambler.ru

¹ South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³ Trekhgornyy Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Trekhgornyy, Russia

⁴ Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract. This article presents the results of a series of experiments on drilling holes with a double-edged drill. These experiments were conducted to confirm the adequacy of the developed mathematical model for calculating the deviation of the hole axis. The first step in creating the mathematical model was to construct diagrams of the cut sections of the allowances, taking into account the error in the main angles in plan view. This methodology has been used in previous studies of similar hole processing processes, and it is constantly being improved by adding new parameters that were not previously considered. The construction of the cut sections is carried out in the Compass 3D program. The next step was to develop mathematical formulas that take into account the features of hole processing with a measuring end tool, such as errors in the main angle in plan, the amplitude of axial vibrations of the tool, and other factors. Mathematical formulas were derived based on the constructed areas of the cut sections of the allowances. The article presents the main parameters used in the experiments. The article also describes the results of measuring the deviation of the hole axes using high-precision measuring equipment. This study allows for an empirical assessment of the effectiveness of the developed mathematical model and its applicability in practical tasks. The experiments were conducted on identical workpieces. When drilling deeply, i.e., beyond five hole diameters, using drills of different diameters. The analysis of the presented results and the confirmation of the mathematical model's adequacy allow us to draw conclusions about the possibility of using this model to optimize processes and, consequently, improve the quality of production in technical industries.

Keywords: drill, axis deviation, mathematical model, calculation of axis deviation, difference in the main angles in the plan

For citation: Deryabin I.P., Shalamov V.G., Tokarev A.S., Morozov A.V. Experimental study of the adequacy of mathematical models for calculating the deflection of the hole axis when drilling with a two-blade drill. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025;25(4):62–73. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250406

Введение

При обработке отверстий в детали серийного производства очень часто достигается удовлетворительная точность диаметрального размера, так как сборка осуществляется селективно, но допуск на прямолинейность оси (данный параметр может иметь особое значение при сборке изделия) далеко не всегда лежит в пределах допуска. В связи с этим возникает необходимость исследования процессов образования отверстий концевыми мерными инструментами.

Математическая модель

Используя разработанную методику [1, 6–8, 12–16] расчета сечений срезаемых при сверлении слоев, где увод оси сверла является следствием возникновения различия сил на режущих лезвиях (рис. 1), был рассмотрен случай получения отверстия в сплошном материале с после-

дующим построением схем образования срезаемых сечений припуска. Основные параметры построения: подача $S = 0,1$ мм/об; диаметр сверла 2,5 мм, материал – сталь 20; главные углы в плане $\varphi_1 = 61^\circ$ и $\varphi_2 = 57^\circ$.

Δ_1 – площадь сечения припуска, срезаемая первым лезвием, Δ_2 – площадь сечения припуска, срезаемая вторым лезвием, S – подача.

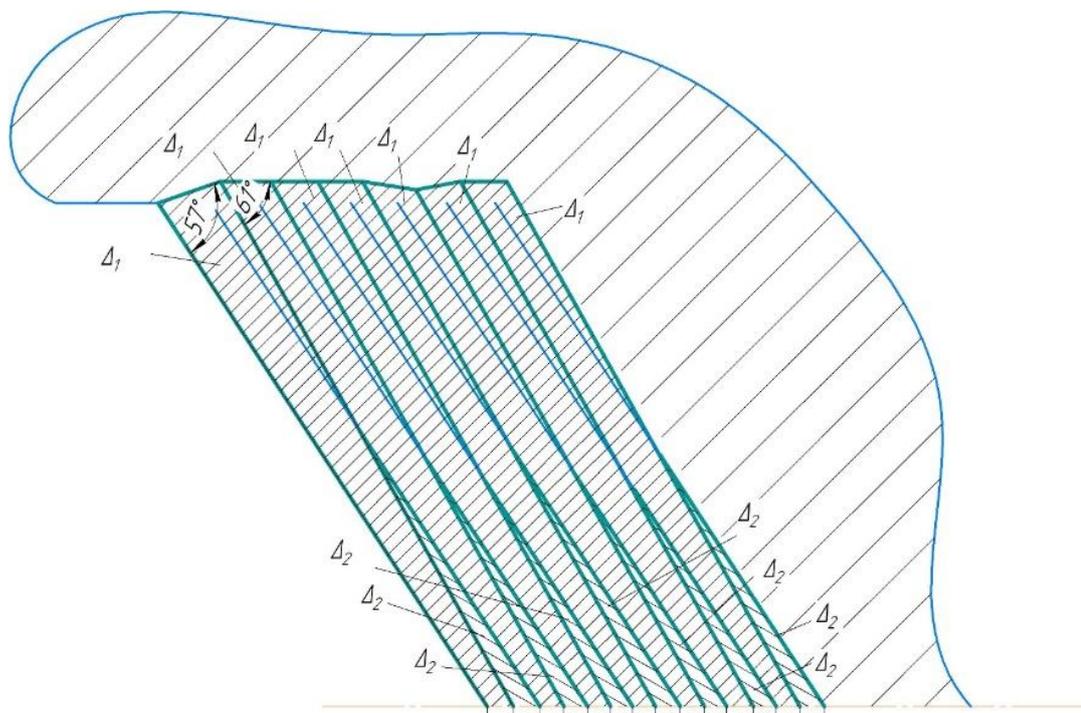


Рис. 1. Схема образования при сверлении сечений срезаемых каждым лезвием слоев для варианта главных углов в плане 57–61°

Fig. 1. Scheme of formation of sections cut by each blade during drilling for the main angles in plan view 57–61°

За основу была взята формула расчета увода оси отверстия, полученная в работе [3]:

$$e = \Delta y \cdot \frac{L_{\text{отв}}}{S} = \frac{P_y}{J} \cdot \frac{L_{\text{отв}}}{S}, \quad (1)$$

где J – жесткость сверла, Н/м; $L_{\text{отв}}$ – длина обрабатываемого отверстия, мм; S – номинальная подача, установленная на станке, мм/об; Δy – величина увода оси за один оборот инструмента, мм; P_y – величина вектора радиальной составляющей силы резания, Н.

После аналогичных преобразований, использованных в работах [1, 3], была получена формула расчета увода оси отверстия при обработке сверлом:

$$e = \frac{(((t-1/30 \cdot t) \cdot (\sin \varphi_2 \cdot S_o)) + (1/2 \cdot ((5/2 \cdot S_o) \cdot (1/30 \cdot t)) + (\sin(180 - \varphi_1) \cdot (3/2 \cdot S_o))) + (1/2 \cdot ((2/3 \cdot t) \cdot (\sin \varphi_1 \cdot S_o))))}{\frac{3 \cdot D \cdot E}{L^3}} \cdot \frac{L_{\text{отв}}}{S_o}, \quad (2)$$

$$S_o = S + a \cdot \cos(n \cdot (\psi - \pi)) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

где a – амплитуда осевых колебаний шпинделя станка, мм; n – количество осевых колебаний за один оборот детали или инструмента; ψ – текущий угол поворота инструмента, град, E – модуль упругости первого рода, МПа; D – диаметр сверла, мм; L – рабочий вылет сверла, мм; t – глубина резания, мм; φ_1, φ_2 – главные углы в плане 1-го и 2-го лезвий, град.

Экспериментальное исследование

Для проверки адекватности разработанной математической модели расчета увода оси отверстия при обработке двухлезвийным сверлом были произведены измерения увода оси отверстия

после операции – сверление отверстия в сплошном материале [2–5, 9–11]. Предварительно были произведены расчеты увода оси отверстия по разработанной математической модели, а затем, используя эти же данные (режимы резания, главные углы в плане у режущего инструмента и т. п.), были произведены эксперименты. Результаты измерений представлены в табл. 1–5 и в виде гистограмм (рис. 4, 6, 8, 10, 12).

Для данного эксперимента были определены основные параметры.

Выбраны диаметры режущего инструмента – сверла с цилиндрическим хвостовиком: 2,5; 4,5; 7, 10, 13 мм (рис. 2). 2,5–13 мм – это диапазон диаметров отверстий, которые возможно получить без предварительного сверления.

Материал заготовок – сталь 20, количество – 30 шт., диаметр – 20 мм.

Длина заготовок была выбрана таким образом, чтобы получаемое сквозное отверстие было длиной не менее $5D$, т. е. глубоким.

Для проведения экспериментальной части был использован комплект сверл из быстрорежущей стали марки HSS, главный угол в плане 59° (см. рис. 2).

Оборудование – станок универсальный 1К62.

Для обработки заготовок были выбраны следующие режимы резания:

- S – 0,1 мм/об; V (скорость резания) – 45 м/мин – для диаметров 2,5; 4,5; 7 мм;
- S – 0,12 мм/об; V – 48 м/мин – для диаметров 10; 13 мм.



Рис. 2. Набор сверл для проведения экспериментальных исследований

Fig. 2. A set of drills for conducting experimental research

Используя выбранный режущий инструмент в заготовках, были получены отверстия в заготовках, которые показаны на рис. 3, 5, 7, 9, 11. Затем на координатно-измерительной машине произведены измерения увода оси отверстия. Расчетные значения увода оси отверстия также представлены на рис. 4, 6, 8, 10, 12 в виде гистограмм. Увод оси является расчетной (детерминированной) величиной и на гистограммах не изменяется.



Рис. 3. Заготовки с просверленным отверстием диаметром 2,5 мм
Fig. 3. Blanks with a 2.5 mm hole drilled through them

Результаты измерений увода оси отверстий при обработке сверлом 2,5 мм и глубине сверления 15 мм
Table 1
Results of measurements of the axis deviation of the holes when processing with a 2.5 mm drill and a drilling depth of 15 mm

Диаметр сверла 2,5 мм, глубина сверления 15 мм, главные углы в плане 1-я режущая кромка 57°, 2-я режущая кромка 61°					
№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм
1	0,30	11	0,30	21	0,28
2	0,31	12	0,29	22	0,29
3	0,30	13	0,29	23	0,30
4	0,27	14	0,29	24	0,30
5	0,28	15	0,29	25	0,30
6	0,28	16	0,30	26	0,29
7	0,29	17	0,31	27	0,30
8	0,30	18	0,30	28	0,30
9	0,30	19	0,30	29	0,29
10	0,31	20	0,30	30	0,30

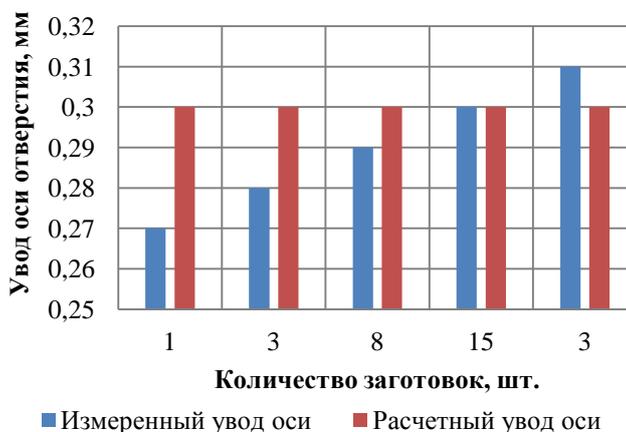


Рис. 4. Гистограмма результатов измерений увода оси отверстия в заготовках при обработке сверлом диаметром 2,5 мм

Fig. 4. Histogram of the results of measuring the deviation of the hole axis in the workpieces during drilling with a 2.5 mm drill bit



Рис. 5. Заготовки с просверленным отверстием диаметром 4,5 мм
Fig. 5. Blanks with a drilled hole of 4.5 mm in diameter

Таблица 2

Результаты измерений увода оси отверстий при обработке сверлом 4,5 мм
и глубине сверления 25 мм

Table 2

Results of measurements of the axis deviation of the holes when processing with a 4.5 mm drill
and a drilling depth of 25 mm

Диаметр сверла 4,5 мм, глубина сверления 25 мм, главные углы в плане 1-я режущая кромка 58°, 2-я режущая кромка 60°					
№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм
1	0,28	11	0,27	21	0,28
2	0,28	12	0,26	22	0,27
3	0,28	13	0,27	23	0,26
4	0,29	14	0,28	24	0,28
5	0,26	15	0,28	25	0,28
6	0,28	16	0,26	26	0,28
7	0,27	17	0,28	27	0,28
8	0,29	18	0,29	28	0,29
9	0,28	19	0,28	29	0,27
10	0,28	20	0,27	30	0,28

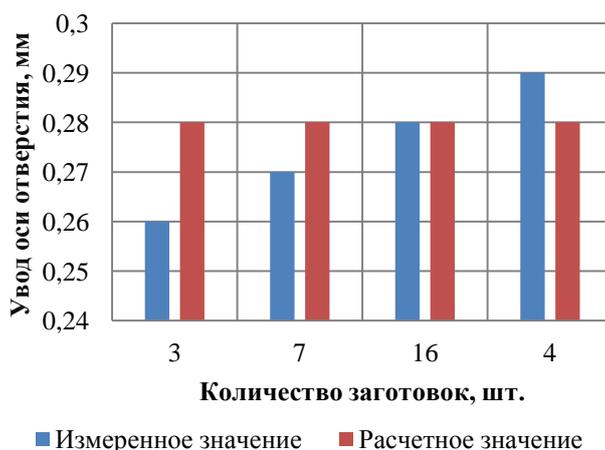


Рис. 6. Гистограмма результатов измерений увода оси отверстия в заготовках
при обработке сверлом диаметром 4,5 мм

Fig. 6. Histogram of the results of measuring the deviation of the hole axis in the workpieces
during drilling with a 4.5 mm drill bit



Рис. 7. Заготовки с просверленным отверстием диаметром 7 мм
Fig. 7. Blanks with a 7 mm diameter hole

Таблица 3
Результаты измерений увода оси отверстий при обработке сверлом 7 мм и глубине сверления 35 мм
Table 3
Results of measurements of the hole axis deviation during drilling with a 7 mm drill and a drilling depth of 35 mm

Диаметр сверла 7 мм, глубина сверления 35 мм, главные углы в плане: 1-я режущая кромка 59°, 2-я режущая кромка 61°					
№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм
1	0,25	11	0,23	21	0,26
2	0,22	12	0,25	22	0,26
3	0,25	13	0,24	23	0,26
4	0,23	14	0,24	24	0,25
5	0,26	15	0,25	25	0,24
6	0,26	16	0,25	26	0,25
7	0,25	17	0,24	27	0,25
8	0,26	18	0,24	28	0,24
9	0,25	19	0,25	29	0,25
10	0,24	20	0,24	30	0,25

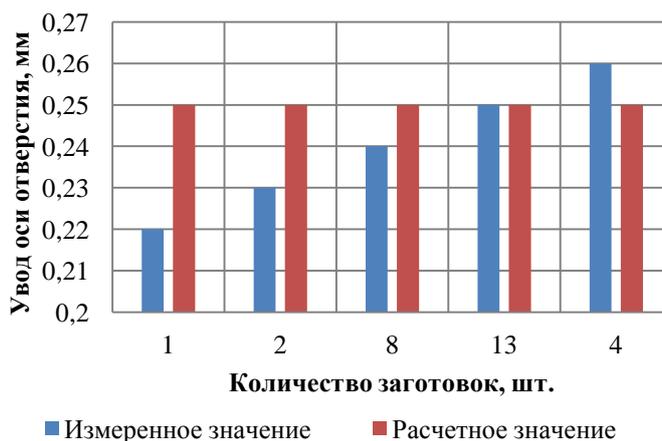


Рис. 8. Гистограмма результатов измерений увода оси отверстия в заготовках при обработке сверлом диаметром 7 мм
Fig. 8. Histogram of the results of measuring the deviation of the hole axis in the workpieces during drilling with a 7 mm drill



Рис. 9. Заготовки с просверленным отверстием диаметром 10 мм
Fig. 9. Blanks with a 10 mm diameter hole

Результаты измерений увода оси отверстий при обработке сверлом 10 мм и глубине сверления 50 мм
Table 4
Results of measurements of the axis deviation of the holes when processing with a 10 mm drill and a drilling depth of 50 mm

Диаметр сверла 10 мм, глубина сверления 50 мм, главные углы в плане: 1-я режущая кромка 57°, 2-я режущая кромка 59°					
№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм
1	0,26	11	0,26	21	0,25
2	0,26	12	0,24	22	0,28
3	0,27	13	0,26	23	0,26
4	0,25	14	0,27	24	0,26
5	0,25	15	0,25	25	0,26
6	0,26	16	0,25	26	0,26
7	0,27	17	0,25	27	0,26
8	0,24	18	0,25	28	0,27
9	0,26	19	0,25	29	0,26
10	0,26	20	0,25	30	0,26

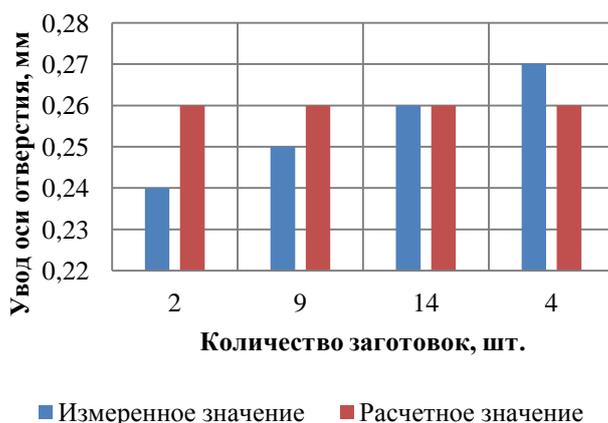


Рис. 10. Гистограмма результатов измерений увода оси отверстия в заготовках при обработке сверлом диаметром 10 мм
Fig. 10. Histogram of the results of measuring the deviation of the hole axis in the workpieces during drilling with a 10 mm drill



Рис. 11. Заготовки с просверленным отверстием диаметром 13 мм
Fig. 11. Blanks with a 13 mm diameter hole

Таблица 5
Результаты измерений увода оси отверстий при обработке сверлом 13 мм и глубине сверления 75 мм
Table 5
Results of measurements of the deviation of the axis of the holes when processing with a 13 mm drill
and a drilling depth of 75 mm

Диаметр сверла 13 мм, глубина сверления 75 мм, главные углы в плане: 1-я режущая кромка 58°, 2-я режущая кромка 59°					
№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм	№ заготовки	Увод оси отверстия, мм
1	0,29	11	0,29	21	0,29
2	0,29	12	0,29	22	0,30
3	0,31	13	0,29	23	0,29
4	0,27	14	0,29	24	0,28
5	0,28	15	0,27	25	0,30
6	0,28	16	0,28	26	0,30
7	0,28	17	0,29	27	0,28
8	0,28	18	0,30	28	0,29
9	0,28	19	0,29	29	0,30
10	0,29	20	0,29	30	0,28

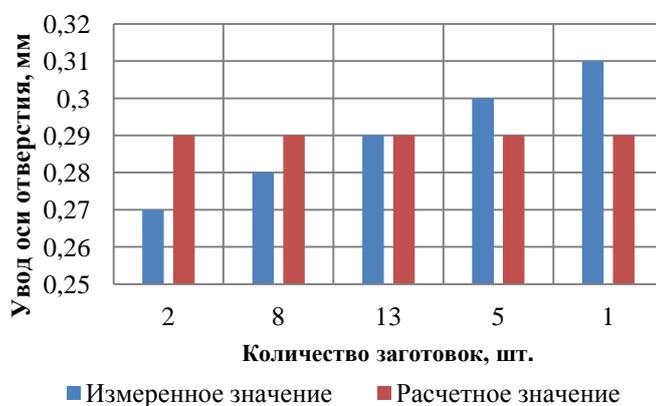


Рис. 12. Гистограмма результатов измерений увода оси отверстия в заготовках при обработке сверлом диаметром 13 мм
Fig. 12. Histogram of the results of measuring the deviation of the hole axis in the workpieces during drilling with a 13 mm drill

Заключение

По полученным данным можно сделать вывод, что максимальная разница между расчетным значением увода оси (показаны на гистограммах рис. 4, 6, 8, 10, 12) и полученным экспериментально по этим же параметрам не превышает 10 %. Следовательно, разработанная математическая модель расчета увода оси отверстия при сверлении двухлезвийным сверлом адекватна [17–20]. В данной статье рассматривалась проверка адекватности в первом приближении, данная методика применяется в научных работах В.И. Гузеева, А.М. Розенберга, В.П. Когаева, В.П. Шаламова и др., т. е. определялась оценка сверху – не превышает 10 %, которая укладывается в допустимые значения, рекомендуемые в теории резания технологии машиностроения. Для уточнения адекватности будет проведена статистическая обработка.

Список литературы

1. Аверченков В.И., Васильев А.С., Хейфец М.Л. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 10. С. 27–32.
2. Артамонов Е.В., Киреев В.В., Зырянов В.Л. Повышение эффективности зубофрезерования путем создания сборных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами // Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2020. № 24(1). С. 35–51.
3. Баранов А.В., Карачев А.В. Определение технологической наследственности при обработке отверстий в деталях газотурбинных двигателей // Вестник машиностроения. 2021. № 11. С. 37–42.
4. Гордеева Э.С., Богущий В.Б., Шрон Л.Б., Новоселов Ю.К. К вопросу об учете технологической наследственности при формировании свойств деталей // Механика XXI века. 2018. № 17. С. 248–254.
5. Дальский А.М., Базаров Б.М., Васильев А.С. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2000. 344 с.
6. Дерябин И.П., Гузеев В.И., Кожарина О.А. Моделирование точности многопереходной обработки отверстий // Технология машиностроения. 2007. № 11. С. 21–24.
7. Дерябин И.П., Гузеев В.И., Кожарина О.А. Исследования наследования погрешностей расположения осей отверстий при многопереходной обработке // Технология машиностроения. 2008. № 6. С. 23–25.
8. Дерябин И.П., Козлов А.В. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.
9. Емельянов С.Г., Зубкова О.С., Мержоева М.С. Эффективность использования сборных зенкеров со сменными многогранными пластинами // Вестник машиностроения. 2003. № 12. С. 60–61.
10. Кряжев Ю.А., Горин Е.Ю. Использование сборного режущего инструмента с демпфирующими элементами для снижения механических колебаний // Вестник машиностроения. 2021. № 8. С. 76–81. DOI: 10.36652/0042-4633-2021-8-76-81.
11. Зайцев А.В., Колупаев Н.А. Методика расчета отклонений оси инструмента при обработке отверстий малого диаметра // Главный механик. 2020. № 11. С. 24–30.
12. Овчаренко А.Г., Ромашев А.Н., Смирнов В.В., Фирсов А.М. Модель анализа точности формы отверстия, обрабатываемого при переменной ширине реза // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2021): материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 27–29 сентября 2021 года / Бийский технологический институт – филиал ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». Бийск: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2021. С. 32–33.
13. Расторгуев Г.А. Особенности технологического наследования в машиностроительном производстве // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 9 (198). С. 8–17.
14. Широков А.В., Шевырев Н.Д. Перспективы использования расточного станка для повышения точности отверстия в крупногабаритных деталях АО «ТЯЖМАШ» // Молодежная наука:

вызовы и перспективы: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых / отв. ред. О.В. Карсунцева. Самара, 2021. С. 321–324.

15. Biermann D., Bleicher F., Heisel U., Klocke F., Möhring H.-C., Shih A. Deep hole drilling // CIRP Annals. 2019. Vol. 68, no. 2. P. 657–680.

16. Bernreiter J., Dorn C., Ibrishimov I., Zisser-Pfeifer R., Herzig N. Optimierung des Tieflochbohrprozesses von hochlegierten Stählen // HPM – High Performance Manufacturing. Wien: Institut für Fertigungstechnik. 2020. S. 142–168.

17. Biermann D., Heilmann M., Kirschner M. Analysis of the Influence of Tool Geometry on Surface Integrity in Single-lip Deep Hole Drilling with Small Diameters // Procedia Engineering. 2021. Vol. 19. P. 16–21.

18. Biermann D., Weinert K., Kessler N. New Method for Reducing the Hole Straightness Deviation in BTA Deep Hole Drilling // 3rd International Conference on Engineering Technology. Pilsen, 2019.

19. Katsuki A., Onikura H., Sakuma K., Chen T., Murakami Y. The Influence of Workpiece Geometry on Axial Hole Deviation in Deep Hole Drilling // JSME International Journal. Ser. 3, Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry. 1992. Vol. 35, no. 1. P. 160–167.

20. Stürenburg H.O. Zum Mittenverlauf beim Bohren. Teil 2: Ursachen, Messungen und Verringerung der Mittenabweichung von Bohrungen in der Metallbearbeitung // TZ für Metallbearbeitung. 2023. Bd. 77, no. 12. S. 36–40.

References

1. Averchenkov V.I., Vasiliev A.S., Kheifets M.L. Technological heredity in the formation of the quality of manufactured parts. *Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2018, no. 10, pp. 27–32. (In Russ.)

2. Artamonov E.V., Kireev V.V., Zyryanov V.V. Improving the efficiency of tooth milling by creating prefabricated milling cutters with replaceable carbide cutting plates. *Proceedings of the Southwest State University*, 2020, no. 24(1), pp. 35–51. (In Russ.)

3. Baranov A.V., Karachev A.V. Determination of technological heredity when processing holes in gas turbine engine parts. *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2021, no. 11, pp. 37–42. (In Russ.)

4. Gordeeva E.S., Bogutsky V.B., Shron L.B., Novoselov Yu.K. On the issue of taking into account technological heredity in the formation of the properties of parts. *Mechanics of the 21st century*, 2018, no. 17, pp. 248–254. (In Russ.)

5. Dalsky A.M., Bazarov B.M., Vasiliev A.S. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroitel'nom proizvodstve* [Technological heredity in machine-building production]. Moscow, 2000. 344 p.

6. Deryabin I.P., Guzeev V.I., Kozharina O.A. Modeling the precision of multi-pass hole processing. *Technology of mechanical engineering*, 2007, no. 11, pp. 21–24. (In Russ.)

7. Deryabin, I.P., Guzeev V.I., Kozharina O.A. Studies of inheritance of errors in the location of hole axes during multi-pass processing. *Technology of mechanical engineering*, 2008, no. 6, pp. 23–25. (In Russ.)

8. Deryabin I.P., Kozlov A.V. *Issledovaniye protsessov formoobrazovaniya otverstiy mernymi instrumentami* [Investigation of hole shaping processes with measuring instruments]. Chelyabinsk, 2006.

9. Yemelyanov S.G., Zubkova O.S., Merzhoeva M.S. Efficiency of using prefabricated countersinks with replaceable polyhedral plates. *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2003, no. 12. pp. 60-61. (In Russ.)

10. Kryazhev Yu.A., Gorin E.Yu. The use of a prefabricated cutting tool with damping elements to reduce mechanical vibrations. *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2021, no. 8, pp. 76–81. (In Russ.) DOI 10.36652/0042-4633-20218-76-81.

11. Zaitsev A.V., Kolupaev N.A. Methodology for calculating tool axis deviations when processing small diameter holes. *Chief Mechanic*, 2020, no. 11, pp. 24–30. (In Russ.)

12. Ovcharenko A.G., Romashev A.N., Smirnov V.V., Firsov A.M. A model for analyzing the accuracy of the shape of a hole processed with a variable cutting width. *Measurements, automation and modeling in industry and scientific research (IAMP-2021): Proceedings of the XVI All-Russian Scien-*

tific and Technical Conference of Students, postgraduate students and young scientists with international participation, Biysk, September 27–29, 2021. Biysk, 2021, pp. 32–33. (In Russ.)

13. Rastorguev G.A. Features of technological inheritance in machine-building production. *Guide. Engineering magazine*, 2013, no. 9 (198), pp. 8–17. (In Russ.)

14. Shirokov A.V., Shevyrev N.D. Prospects of using a boring machine to improve the accuracy of holes in large-sized parts of JSC TYAZHMASH. *Youth science: challenges and prospects. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young scientists*. Editor-in-chief O.V. Karsuntseva. Samara, 2021, pp. 321–324. (In Russ.)

15. Biermann D., Bleicher F., Heisel U., Klocke F., Möhring H.-C., Shih A. Deep hole drilling. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, no. 2, pp. 657–680.

16. Bernreiter J., Dorn C., Ibrishimov I., Zisser-Pfeifer R., Herzig N. Optimierung des Tieflochbohrprozesses von hochlegierten Stählen. *HPM – High Performance Manufacturing*. Wien: Institut für Fertigungstechnik, 2020, pp. 142–168.

17. Biermann D., Heilmann M., Kirschner M. Analysis of the Influence of Tool Geometry on Surface Integrity in Single-lip Deep Hole Drilling with Small Diameters // *Procedia Engineering*, 2021, vol. 19, pp. 16–21.

18. Biermann D., Weinert K., Kessler N. New Method for Reducing the Hole Straightness Deviation in BTA Deep Hole Drilling // *3rd International Conference on Engineering Technology*. Pilsen, 2019.

19. Katsuki A., Onikura H., Sakuma K., Chen T., Murakami Y. The Influence of Workpiece Geometry on Axial Hole Deviation in Deep Hole Drilling // *JSME International Journal. Ser. 3. Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry*, 1992, vol. 35, no. 1, pp. 160–167.

20. Stürenburg H.O. Zum Mittenverlauf beim Bohren. Teil 2: Ursachen, Messungen und Verringerung der Mittenabweichung von Bohrungen in der Metallbearbeitung. *TZ für Metallbearbeitung*, 2023, Bd. 77, no. 12. S. 36–40.

Информация об авторах

Дерябин Игорь Петрович, д.т.н., профессор, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия; derigp@gmail.com

Шаламов Виктор Георгиевич, д.т.н., профессор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shalamovvg@susu.ru

Токарев Артем Сергеевич, к.т.н., доцент, Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Трехгорный, Россия; tokarev_a_s91@mail.ru

Морозов Алексей Валентинович, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия; ntk_2005@rambler.ru

Information about the authors

Igor P. Deryabin, Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russia; derigp@gmail.com

Viktor G. Shalamov, Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shalamovvg@susu.ru

Artem S. Tokarev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Trekhgorny Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Trekhgorny, Russia; tokarev_a_s91@mail.ru

Alexey V. Morozov, doctor of science, professor of machine building technology department, Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs, Vladimir, Russia; ntk_2005@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 08.09.2025; принята к публикации 26.10.2025.

The article was submitted 08.09.2025; accepted for publication 26.10.2025.