



СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ЗЕНКЕРОВАНИЯ СБОРНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Дерябин И.П., Токарев А.С.

Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ГТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). При обработке деталей высокой точности в машиностроении сталкиваются с длительной отладкой технологического процесса, после его проектирования и диагностики причин брака. Обработка точных и глубоких отверстий создает особые трудности инженерам-технологам при проектировании технологических процессов. Но, несмотря на затраченные усилия после отладки технологической системы, не удается избежать частого появления брака по точности обработки. Диагностика причин брака занимает длительное время. Анализ технологии обработки точных и глубоких отверстий на современных предприятиях показал, что основной причиной продолжительной обработки являются трудности назначения технологических параметров операций и переходов на начальных стадиях обработки, к которым относятся сверление и зенкерование. Назначаемые технологические параметры обработки, такие как режимы резания, геометрия режущего инструмента, на эти операции мало соответствуют требованиям достижения точности расположения оси, а больше соответствуют требованиям достижения точности диаметрального размера, а также требованиям наибольшей производительности и стойкости инструмента. Повысить качество прогнозов точности обработки отверстий возможно на основе разработки математических моделей формообразований отверстий и компьютерных моделей расчета точности, учитывающих особенности зенкеров с многогранными неперетачиваемыми пластинами. **Используемые методы.** В данном исследовании использовались методы математического моделирования, теория резания, а также основные положения теории механизмов и машин. **Новизна.** Разработана математическая модель распада оси отверстия при обработке зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами, учитывающая новые переменные – осевое смещение вершин режущих кромок многогранных неперетачиваемых пластин τ друг от друга и различие главных углов в плане φ , которые ранее не использовались в уже имеющихся аналогичных математических моделях. **Результат.** Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать увод оси отверстия при обработке зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами, варьируя режимами резания, тем самым снижая трудоемкость обработки отверстий. **Практическая значимость.** Разработана методика выбора параметров операции, при обработке зенкерами с многогранными неперетачиваемыми пластинами, обеспечивающих заданную точность. Достигнуто повышение экономической и технологической эффективности при обработке отверстий зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами, при использовании разработанной математической модели на основе уменьшения числа переходов и повышения агрегативности операций.

Ключевые слова: зенкер с многогранными неперетачиваемыми пластинами, математическая модель, увод оси отверстия, повышение точности обработки, снижение трудоемкости, зенкерование, обработка отверстий.

© Дерябин И.П., Токарев А.С., 2021

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-107-115>



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

REDUCING THE LABOR INTENSITY OF HOLE MACHINING BY INCREASING THE ACCURACY OF COUNTERSINKING OPERATIONS WITH PRECAST TOOLS

Deryabin I.P., Tokarev A.S.

Tryokhgornyy Technological Institute – the branch of National Research Nuclear University MEPhI (TTI NRNU MEPhI), Tryokhgornyy, Russia

Abstract. Problem statement (relevance of the research). When machining high-precision parts, mechanical engineers face a long adjustment of the technological process after its design and diagnosis of the causes of defects. Machining of precise and deep holes creates special difficulties for process engineers, when designing technological processes. But, despite the effort expended, after adjusting the technological system, it is not possible to avoid the frequent occurrence of defects in machining accuracy. It takes a long time to diagnose the causes of defects. Analysis of the technology of machining precise and deep holes at modern enterprises has shown that the main reason for long-time machining is the difficulty of assigning technological parameters of operations and transitions at the initial machining stages, which include drilling and countersinking. The assigned machining parameters, such as cutting modes, geometry of the cutting tool, for these operations slightly meet the requirements for the accuracy of the axis location, but rather meet the requirements for the accuracy of the diameter, as well as the requirements of the highest output and durability of the tool. It is possible to improve the quality of forecasts for the hole machining accuracy by designing mathematical models of hole shaping and computer models for calculating accuracy, taking into account the features of countersinks with polyhedral disposable plates. **The methods used.** In this study, the authors used methods of mathematical modeling, cutting theory, as well as the main provisions of the theory of mechanisms and machines. **Novelty.** The authors have developed a mathematical model to calculate the drill run-off, when machining with the countersink with polyhedral disposable plates, factoring into new variables: the axial displacement of the vertices of the cutting edges of polyhedral disposable plates τ from each other and the difference in the main cutting edge angles φ , which were not previously used in existing similar mathematical models. **Result.** The developed mathematical model predicts the drill run-off, when machining with a countersink with polyhedral disposable plates, varying the cutting modes, thereby reducing the labor intensity of hole machining. **Practical significance.** The authors have developed a technique used to select operation parameters, providing the set accuracy, when machining with countersinks with polyhedral disposable plates. This contributes to an increase in economic and technological efficiency, when machining holes with a countersink with polyhedral disposable plates, using the developed mathematical model based on reducing the number of transitions and increasing the ability to aggregate operations.

Keywords: countersink with polyhedral disposable plates, mathematical model, drill run-off, improvement of machining accuracy, reduction of labor intensity, countersinking, hole machining.

For citation

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-107-115>

Введение

При обработке отверстий часто приходится сталкиваться с различными факторами, влияющими на точность конечных результатов и требований, предъявляемых к детали. Зачастую при назначении основных параметров обработки, таких как режимы резания, геометрия режущей части инструмента, ориентируются на точность диаметральных размеров, а не на точность расположения оси отверстия. Результатом данных ситуаций является назначение дополнительных переходов и операций для достижения требуе-

мой точности, то есть увеличивается трудоемкость обработки отверстий. Для обработки отверстий в последнее время все чаще применяют сборный лезвийный инструмент с многогранными неперетачиваемыми пластинами (МНП), в том числе и зенкеры [1, 2, 4, 7].

Одним из путей решения проблемы снижения трудоемкости обработки деталей является моделирование и расчет точности обработки поверхностей, которые позволяют значительно повысить эффективность проектирования технологического процесса обработки деталей [9, 10].

Анализ технологических процессов (ТП) обработки отверстий высокой точности в различных деталях показывает, что выполнение заданной точности расположения оси достигается с большим трудом, при этом количество выполняемых переходов нередко больше, чем необходимо для обработки других поверхностей аналогичной точности. Особенности обработки отверстий концевыми мерными инструментами (КМИ), к которым относятся сборные зенкеры, в основном связаны с параметрами геометрии режущей части инструмента и режимами резания, поэтому точность обработки в основном зависит от этих параметров, и в меньшей степени – от применяемого оборудования [6]. Невозможность обеспечить заданные параметры точности расположения оси на современных многопозиционных и многоинструментных станках и станках с ЧПУ приводит к необходимости применения дополнительных операций координатного и алмазного растачивания, что снижает эффективность применения дорогостоящего оборудования.

Решение проблемы достижения точности расположения оси отверстия можно добиться разработкой математических моделей [3, 11], которые смогут прогнозировать увод оси отверстия на этапе компьютерной отладки технологического процесса. Вопросами точности обработки отверстий занимались ученые В.Н. Подураев, А.Г. Косилова, В.В. Матвеев, В.И. Гузеев, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, И.П. Дерябин, А.В. Козлов и др. В этих исследованиях установлено, что на образование систематических погрешностей при многопереходной обработке отверстий КМИ существенное влияние оказывают диссимметрия режущей части инструмента, погрешности заготовки и предварительной обработки, осевые вибрации инструмента и заготовки. Однако влияние некоторых из этих факторов для зенкеров с МНП недостаточно изучено на количественном уровне, что не позволяет создать достаточно надежные рекомендации по устранению причин возникновения различных погрешностей обработки отверстий.

Существующие математические модели формирования отверстий зенкерами, приведенные в работах С.Г. Лакирева, Я.М. Хилькевича, И.П. Дерябина, А.В. Козлова, не учитывают особенности геометрии режущей части сборных зенкеров с МНП. Но проведя анализ технологических процессов на машиностроительных предприятиях, было выявлено, что для обработки отверстий порядка 70% инструмента является сборным, а следовательно, игнорировать погрешности параметров геометрии заточки, которые не учитывались для цельного режущего инструмента, нельзя. Таким образом, целью данного исследования стал учет новых геометрических параметров: осевого смещения режущих кромок лезвий относительно друг друга τ и погрешность главного угла в плане φ .

Теоретические исследования

Особенностями зенкеров с МНП является погрешность положения пластин и погрешность геометрических параметров режущей части, а также соотношение их с величиной подачи.

Для разработки новой математической модели, которая бы учитывала геометрию сборного инструмента, были использованы два новых фактора: осевое смещение режущих кромок лезвий относительно друг друга τ и погрешность главного угла в плане φ . Данные параметры показаны на **рис. 1**.

Для разработки математических моделей взяты следующие положения:

1. Траектория движения инструмента описывается текущими координатами радиус-векторов вершин режущих лезвий, которые и определяют профиль обработанного отверстия.
2. Статическое равновесие инструмента определяется действием радиальных составляющих сил резания на каждое лезвие.
3. Радиальные составляющие сил резания пропорциональны площадям срезаемого сечения с соответствующим коэффициентом пропорциональности.

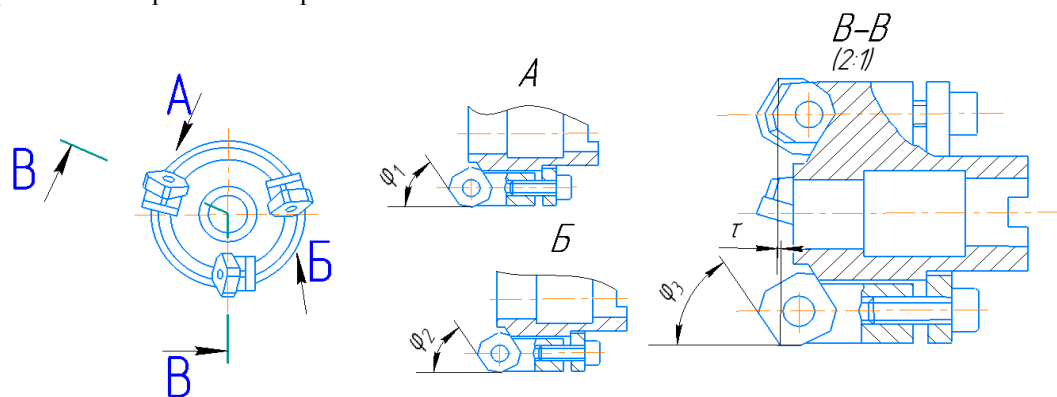


Рис. 1. Новые геометрические параметры
Fig. 1. New geometric parameters

В программе КОМПАС-3D была разработана методика построения срезаемых сечений каждым лезвием инструмента [8], которая позволила доказать необходимость учета осевого смещения вершин режущих кромок пластин относительно друг друга τ и погрешность главного угла в плане φ . Используя построения срезаемых сечений в программе КОМПАС-3D, были разработаны две математические модели для двух случаев, когда $\tau \leq S/z$ (1) и $\tau > S/z$ (2) (где S – подача, z – количество режущих лезвий на зенкере с МНП) [14].

Математическая модель для случая $\tau \leq S/z$:

$$\begin{cases} \Delta_1 = \frac{h}{2} \left(\frac{S_0}{3} - \tau + h_1 \left(\operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_2}{180} \cdot \pi \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_1}{180} \cdot \pi \right) \right) \right), \\ \Delta_2 = \frac{h}{2} \left(\frac{S_0}{3} + h_2 \left(\operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_3}{180} \cdot \pi \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_2}{180} \cdot \pi \right) \right) \right), \\ \Delta_3 = \frac{h}{2} \left(\frac{S_0}{3} + \tau + h_3 \left(\operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_1}{180} \cdot \pi \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_3}{180} \cdot \pi \right) \right) \right), \end{cases} \quad (1)$$

где Δ – площадь сечения срезаемого слоя, мм; S_0 – подача за один оборот инструмента, мм/об; h – припуск на лезвие, мм; τ – осевое смещение вершин режущих кромок пластин относительно друг друга, мм; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – главные углы в плане 1, 2 и 3 лезвий соответственно, град.

Математическая модель для случая при $\tau > S/z$

$$\begin{cases} \Delta_1 = \left(\frac{\rho_1(\Psi) - \frac{D_0 + e_{\text{ин}} \sin(\Psi)}{2}}{2} \right) \cdot \left[\frac{S}{3} + \operatorname{tg}(90 - \varphi_1) \times \right. \\ \left. \times \left(\rho_1(\Psi) - \frac{D_0 + e_{\text{ин}} \sin(\Psi)}{2} \right) \right], \\ \Delta_2 = \left(\frac{\rho_2(\Psi + 120) - \frac{D_0 + e_{\text{ин}} \sin(\Psi)}{2}}{2} \right) \cdot \left[\frac{S}{3} + \right. \\ \left. + \operatorname{tg}(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \left(\rho_2(\Psi + 120) - \frac{D_0 + e_{\text{ин}} \sin(\Psi)}{2} \right) \right], \\ \Delta_3 = \left(\frac{\rho_3(\Psi + 240) - \frac{D_0 + e_{\text{ин}} \sin(\Psi)}{2}}{2} \right) \cdot \left[\left(S - \left(\frac{2S}{3} + \tau \right) \right) + \right. \\ \left. + \operatorname{tg}(\varphi_3 - \varphi_2) \cdot \left(\rho_3(\Psi + 240) - \frac{D_0 + e_{\text{ин}} \sin(\Psi)}{2} \right) \right], \end{cases} \quad (2)$$

где Ψ – текущий угол поворота инструмента, град; $\rho_1(\Psi), \rho_2(\Psi), \rho_3(\Psi)$ – координаты радиус-векторов

вершин лезвий; D_0 – диаметр отверстия в заготовке, мм; S – подача инструмента, мм/об; $e_{\text{ин}}$ – погрешность предшествующего перехода, мм.

Применение результатов исследования на серийных деталях машиностроительного производства

Рассмотрим пример применения математической модели расчета увода оси отверстия при зенкерование инструментами с многогранными неперегачиваемыми пластинами [9].

На рис. 2 показана структурная схема методики проектирования операций обработки отверстий, на основе которой разработана программа для ЭВМ. Данная методика позволяет совершать подбор необходимых параметров режимов резания, а также процесс отладки в случае несоответствия результатов, предъявляемых требованиями к оси отверстия.

Первый этап включает в себя ввод исходных данных (геометрия режущей части, режимы резания и т.д.), необходимых для прогнозирования увода оси отверстия. Затем происходит выбор расчетной математической модели исходя из условий, когда $\tau \leq S/z$ и $\tau > S/z$. Далее рассчитываются силы резания P , действующие на режущие лезвия зенкера с МНП, и результирующая сила ΔP , которая влияет на увод оси отверстия e . После этого происходит сравнение полученных данных с заданными e_3 , и если результат больше допустимого значения, то происходит режим отладки, то есть корректировка ввода исходных данных. Если значение находится в пределах допуска, то происходит вывод результата.

После расчетов погрешностей обработки по математическим моделям производится сравнение расчетных значений – увода оси с заданными (допустимыми) параметрами точности. При превышении каким-либо расчетным значением допустимого выполняется процесс отладки параметров перехода. Процесс отладки подразумевает под собой корректировку ввода исходных данных с целью получения параметров операции, обеспечивающих заданную точность обработки отверстия.



Рис. 2. Структура методики проектирования операций
Fig. 2. Structure of the operations design technique

Рассмотрим применение результатов исследований на примере деталей «Держатель», «Корпус» и «Втулка». У деталей имеются отверстия с высокими требованиями к позиционному допуску. Обработка таких отверстий требует подбора параметров операций, обеспечивающих предъявляемые к ним требования точности [5].

Рассмотрим деталь «Держатель» (рис. 3). Наибольшую трудность обработки вызывает отверстие $\varnothing 14H10^{+(0,07)}$. К нему предъявляются требования: H10 и позиционный допуск 0,03 мм.

Рассмотрим действующий процесс обработки детали, представленный в табл. 1.

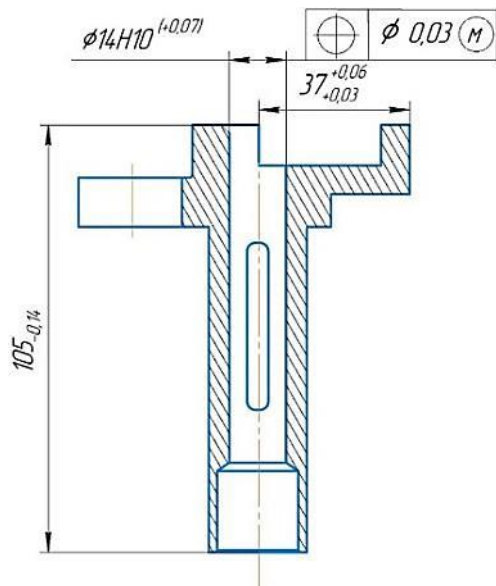


Рис. 3. Держатель
Fig. 3. Holder

Таблица 1. Действующий технологический процесс обработки отверстия в детали «Держатель»
Table 1. The current technological process of machining a hole in the "Holder" part

Номер операции	Операция	Режимы резания			Время, затрачиваемое на операцию T_0 , мин
		S , мм/об	V , м/мин	t , мм	
030	Зацентрировать отверстие	–	–	–	0,1
	Сверлить отверстие	–	–	–	1,6
	Зенкеровать отверстие предварительно	0,95	62	1	1,25
	Зенкеровать отверстие окончательно	0,75	88	0,5	0,50
040	Растачивать отверстие предварительно (алмазное растачивание)	0,05	60	0,2	2,62
	Растачивать отверстие окончательно (алмазное растачивание)	0,02	79	0,1	5,25
$T=$					11,32

По справочным данным [5] спроектируем окончательное зенкерование отверстия. На рис. 4 и 5 показаны фрагменты работы программы для ЭВМ.

Номинальная подача за один оборот $S_0 =$ <input type="text" value="0,75"/>	Осевое отставание пластин $t =$ <input type="text" value="0,1"/>	Длина обработки Лотв = <input type="text" value="120"/>
Амплитуда осевых колебаний $a =$ <input type="text" value="0,2"/>	Диаметр зенкера $D =$ <input type="text" value="14"/>	Колебания припуска $h_0 =$ <input type="text" value="0,1"/>
Коэффициент для материала $C_p =$ <input type="text" value="206,5"/>	Диаметр просверленного отверстия $D_0 =$ <input type="text" value="11,25"/>	Длина зенкера $L =$ <input type="text" value="195"/>
Коэффициенты влияния углов режущей части у инструмента $K_\phi =$ <input type="text" value="0,89"/> $K_y =$ <input type="text" value="1"/> $K_l =$ <input type="text" value="1,1"/>	Главные углы пластин в плане $\Phi_1 =$ <input type="text" value="42"/> $\Phi_2 =$ <input type="text" value="45"/> $\Phi_3 =$ <input type="text" value="47"/>	Прогнозируемый увод оси отверстия еотв = 0,05
<input type="button" value="Расчет"/>		

Рис. 4. Результаты прогнозирования увода оси отверстия в детали «Держатель» по данным Технологического справочника

Fig. 4. The results of predicting the drill run-off in the "Holder" part according to the Technological Reference Book

Номинальная подача за один оборот $S_0 =$ <input type="text" value="0,35"/>	Осевое отставание пластин $t =$ <input type="text" value="0,1"/>	Длина обработки Лотв = <input type="text" value="120"/>
Амплитуда осевых колебаний $a =$ <input type="text" value="0,2"/>	Диаметр зенкера $D =$ <input type="text" value="14"/>	Колебания припуска $h_0 =$ <input type="text" value="0,1"/>
Коэффициент для материала $C_p =$ <input type="text" value="206,5"/>	Диаметр просверленного отверстия $D_0 =$ <input type="text" value="11,25"/>	Длина зенкера $L =$ <input type="text" value="195"/>
Коэффициенты влияния углов режущей части у инструмента $K_\phi =$ <input type="text" value="0,89"/> $K_y =$ <input type="text" value="1"/> $K_l =$ <input type="text" value="1,1"/>	Главные углы пластин в плане $\Phi_1 =$ <input type="text" value="42"/> $\Phi_2 =$ <input type="text" value="45"/> $\Phi_3 =$ <input type="text" value="47"/>	Прогнозируемый увод оси отверстия еотв = 0,02
<input type="button" value="Расчет"/>		

Рис. 5. Результаты прогнозирования увода оси отверстия в детали «Держатель»

Fig. 5. The results of predicting the drill run-off in the "Holder" part

Спроектированный увод оси по параметрам технологических справочников превышает допустимое значение 0,03 мм.

Сборный зенкер с многогранными неперетачиваемыми пластинами может обеспечить необходимые заданные требования точности для данного размера [12, 13]. Используя разработанную математическую модель, спрогнозируем увод оси

отверстия при обработке его зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами.

На основании полученных данных (см. рис. 4) мы можем варьировать исходными данными, подбирать подачу и главный угол в плане у пластин [14]. Изменение главного угла в плане возможно при замене пластин, то есть потребуются дальнейшая переналадка станка. Данный параметр необ-

ходимо изменять только после перебора всех возможных вариантов подачи для зенкера с многогранными неперетачиваемыми пластинами. Поэтому сначала уменьшаем подачу.

Прогнозирование увода оси отверстия в детали типа «Держатель» представлено на рис. 5.

Полученное значение увода оси составляет 0,02 мм, что является допустимым значением, так как допуск увода оси отверстия должен составлять не более 0,03 мм по техническим требованиям на чертеже детали.

После применения разработанной методики технологический процесс обработки отверстия показан в табл. 2.

Таблица 2. Модернизированный технологический процесс обработки отверстия в детали «Держатель»

Table 2. Modernized technological process for machining a hole in the "Holder" part

Номер операции	Операция	Режимы резания			Время, затрачиваемое на операцию T_0 , мин
		S , мм/об	V , м/мин	t , мм	
030	Зацентрировать отверстие	–	–	–	0,1
	Сверлить отверстие	–	–	–	1,6
	Зенкеровать отверстие предварительно	0,7	57	1	0,9
	Зенкеровать отверстие окончательно	0,3	72	0,5	0,6
$T=$					3,2

Таким образом, при использовании разработанной математической модели, прогнозирующей увод оси отверстия, сократилось время обработки отверстия детали «Держатель» на 8,12 мин.

Заключение

1. Разработанная математическая модель формообразования используется для расчетно-обоснованного назначения режимов резания с целью обеспечения заданного качества обрабатываемых отверстий.

2. Разработанная математическая модель позволяет заблаговременно определять необходимые геометрические параметры режущего инструмента и режимы резания для обработки отверстий.

3. Использование данной методики на стадии проектирования технологических процессов обработки деталей позволит значительно сократить трудоемкость обработки отверстий.

Список литературы

1. Аверьянов О.И., Клепиков В.В. Режущий инструмент. М.: МГИУ, 2007. 144 с.
2. Адашкин А.М., Колесов Н.В. Современный режущий инструмент: учебное пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: ИЦ Академия, 2012. 224 с.
3. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. 136 с.
4. Горохов В.А., Беляков Н.В., Махаринский Ю.Е. Основы технологии машиностроения. Лабораторный практикум. М.: Инфра-М, 2013. 440 с.
5. Гузев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 386 с.
6. Дерябин И.П. Методология параметрического проектирования многопереходной обработки круглых отверстий концевыми мерными инструментами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения». Челябинск, 2009.
7. Емельянов С.Г., Зубкова О.С., Мержоева М.С. Эффективность использования сборных зенкеров со сменными многогранными пластинами / С.Г. Емельянов // Вестник машиностроения. 2003. №12. С. 60–61.
8. Козлов А.В., Дерябин И.П. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами / М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Южно-Уральский гос. ун-т, филиал в г. Златоусте. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 251 с.
9. Миронова И.Н. Сокращение трудоемкости технологической подготовки производства на этапах проектирования и отладки операций обработки отверстий инструментами одностороннего резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / И.Н. Миронова. Челябинск, 2006.
10. Пятых А.С. Совершенствование процесса получения точных отверстий в деталях из алюминиевых сплавов на высокопроизводительном оборудовании: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / А.С. Пятых. Иркутск, 2019. 20 с.
11. Рейзлин В.И. Математическое моделирование: учебное пособие. М.: Юрайт, 2016. 128 с.
12. Токарев А.С., Дерябин И.П., Лопатин Б.А. Экспериментальное определение увода оси отверстий при обработке зенкером с МНП // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2020. С. 55–62.

13. Токарев А.С., Дерябин И.П. Измерение погрешности расположения пластин зенкера с МНП // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты статьи: тезисы докладов Международной научно-исследовательской конференции. 2017. С. 72–74.
14. Разработка математической модели прогнозирования увода оси отверстия при обработке зенкером с МНП / И.П. Дерябин, А.С. Токарев, Ю.Д. Донцова, О.А. Токарева // Естественные и технические науки. 2018. № 6 (120). С. 212–215.
8. Kozlov A.V., Deryabin P.I. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya otverstii mernymi instrumentami* [Study on the processes of formation of holes with measuring tools]. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, South Ural State University, Branch in Zlatoust. Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 2006, 251 p. (In Russ.)
9. Mironova I.N. *Sokrashchenie trudoemkosti tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na etapakh proektirovaniya i otladki operatsii obrabotki otverstii instrumentami odностороннего rezaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Reduction of labor intensity of technological preparation of production at the stages of design and adjustment of hole processing operations with single-sided cutting tools: Extended abstract of the PhD thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Chelyabinsk, 2006.
10. Pyatykh A.S. *Sovershenstvovanie protsessa polucheniya tochnykh otverstii v detalyakh iz alyuminiyevykh splavov na vysokoproizvoditelnom oborudovanii: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Improving the process of making precise holes in aluminum alloy parts on high-performance equipment: Extended abstract of the PhD thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Irkutsk, 2019, 20 p.
11. Reizlin V.I. *Matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling: Textbook]. Moscow: Yurayt, 2016, 128 p. (In Russ.)
12. Tokarev A.S., Deryabin I.P., Lopatin B.A. Experimental determination of the drill run-off, when processing with a countersink with polyhedral disposable plates. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of SUSU. Series "Mechanical Engineering"], 2020, pp. 55–62. (In Russ.)

References

1. Averyanov O.I., Klepikov V.V. *Rezhushchii instrument* [Cutting tools]. Moscow: MSIU, 2007, 144 p. (In Russ.)
2. Adaskin A.M., Kolesov N.V. *Sovremenniy rezhushchii instrument: uchebnoe posobie dlya stud. uchrezhdenii sred. prof. obrazovaniya* [Modern cutting tools: A textbook for students of secondary vocational institutions]. Moscow: Academy Publishing Center, 2012, 224 p. (In Russ.)
3. Alpatov Yu.N. *Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennykh protsessov: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of production processes: A textbook]. St. Petersburg: Lan, 2018, 136 p. (In Russ.)
4. Gorokhov V.A., Belyakov N.V., Makharinsky Yu.E. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya. Laboratornyi praktikum* [Fundamentals of mechanical engineering technology. Laboratory practicum]. Moscow: Infra-M, 2013, 440 p. (In Russ.)
5. Guzeev V.I., Batuev V.A., Surkov I.V. *Rezhimy rezaniya dlya tokarnykh i sverlilno-frezerno-rastochnykh stankov s ChPU: spravochnik* [Cutting schedules for turning and drilling-milling-boring CNC machines: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 386 p. (In Russ.)
6. Deryabin I.P. *Metodologiya parametricheskogo proektirovaniya mnogoperekhodnoi obrabotki kruglykh otverstii kontsevyimi mernymi instrumentami: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Methodology of parametric design of multi-pass processing of round holes with end measuring tools: Extended abstract of the doctoral thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Chelyabinsk, 2009.
7. Emelyanov S.G., Zubkova O.S., Merzhoeva M.S. Efficiency of using prefabricated countersinks with replaceable polyhedral plates. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2003, no. 12, pp. 60–61. (In Russ.)
8. Kozlov A.V., Deryabin P.I. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya otverstii mernymi instrumentami* [Study on the processes of formation of holes with measuring tools]. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, South Ural State University, Branch in Zlatoust. Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 2006, 251 p. (In Russ.)
9. Mironova I.N. *Sokrashchenie trudoemkosti tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na etapakh proektirovaniya i otladki operatsii obrabotki otverstii instrumentami odностороннего rezaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Reduction of labor intensity of technological preparation of production at the stages of design and adjustment of hole processing operations with single-sided cutting tools: Extended abstract of the PhD thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Chelyabinsk, 2006.
10. Pyatykh A.S. *Sovershenstvovanie protsessa polucheniya tochnykh otverstii v detalyakh iz alyuminiyevykh splavov na vysokoproizvoditelnom oborudovanii: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Improving the process of making precise holes in aluminum alloy parts on high-performance equipment: Extended abstract of the PhD thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Irkutsk, 2019, 20 p.
11. Reizlin V.I. *Matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling: Textbook]. Moscow: Yurayt, 2016, 128 p. (In Russ.)
12. Tokarev A.S., Deryabin I.P., Lopatin B.A. Experimental determination of the drill run-off, when processing with a countersink with polyhedral disposable plates. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of SUSU. Series "Mechanical Engineering"], 2020, pp. 55–62. (In Russ.)
13. Tokarev A.S., Deryabin I.P. Measuring the error of the arrangement of plates of a countersink with polyhedral disposable plates. *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezultaty stati: tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-issledovatel'skoi konferentsii* [Fundamental and applied research: problems and results of the paper: abstracts of the reports presented at the International Research Conference]. 2017, pp. 72–74. (In Russ.)
14. Deryabin I.P., Tokarev A.S., Dontsova Yu.D., Tokareva O.A. Development of a mathematical model for predicting the drill run-off, when processing with a countersink with polyhedral disposable plates. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Engineering Sciences], 2018, no. 6 (120), pp. 212–215. (In Russ.)

Поступила 18.10.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 18/10/2021; revised 15/11/2021; published 24/12/2021

Дерябин Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор,
Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия
Email: derigp@gmail.com

Токарев Артем Сергеевич – старший преподаватель,
Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия
Email: tokarev_a_s91@mail.ru

Igor P. Deryabin – DrSc (Eng.), Professor,
Tryokhgorny Technological Institute – the branch of National Research Nuclear University MEPHI
(TTI NRNU MEPHI), Tryokhgorny, Russia.
Email: derigp@gmail.com

Artem S. Tokarev – Senior Lecturer,
Tryokhgorny Technological Institute – the branch of National Research Nuclear University MEPHI
(TTI NRNU MEPHI), Tryokhgorny, Russia.
Email: tokarev_a_s91@mail.ru