

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9.02

doi: 10.30987/2782-5957-2022-10-19-27

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РАСТОЧНЫХ РЕЗЦОВ

Александр Алексеевич Жолобов<sup>1</sup>, Ольга Николаевна Кляус<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup> Белорусско-Российский университет, Могилев, Республика Беларусь

<sup>1</sup> bru\_AA@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7020-2789>

<sup>2</sup> klyaus.olya@yandex.by, <https://orcid.org/0000-0001-9463-0166>

### Аннотация

Цель теоретических исследований: создание предпосылок для разработки новых конструкций расточных резцов. Задача, решению которой посвящена статья: выявление конструктивных разновидностей расточных резцов; совершенствование геометрической формы конической части резца. Методы исследования: моделирование упругих деформаций различных конструкций расточных резцов. Новизна работы: предложена для внедрения в практику металлообработки конструкция с переходным участком от призматической части к конической

в виде конуса, и конической частью в бочкообразном исполнении. Результаты исследований: выявлены оптимальные геометрические формы и параметры расточного резца. Выводы: в работе проанализированы полученные данные теоретических исследований и определены конструктивные изменения в широко используемых в металлообработке стандартных расточных резцах.

**Ключевые слова:** жесткость, резец, конструкция, деформация.

Ссылка для цитирования:

Жлобов А.А. Совершенствование конструкций расточных резцов / А.А.Жолобов, О.Н. Кляус // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 10. – С. 19 – 27. doi: 10.30987/2782-5957-2022-10-19-27.

Original article

Open Access Article

## IMPROVEMENT OF BORING TOOL DESIGN

Aleksandr Alekseevich Zholobov<sup>1</sup>, Olga Nikolaevna Klyaus<sup>1</sup>✉

<sup>1,2</sup> Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus

<sup>1</sup> bru\_AA@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7020-2789>

<sup>2</sup> klyaus.olya@yandex.by, <https://orcid.org/0000-0001-9463-0166>

### Abstract

The theoretical research objective is to create prerequisites for the development of new designs of boring tools. The task to which the paper is devoted: identification of constructive varieties of boring tools; improvement of the geometric shape of the conical part of the tool. Research methods: modeling of elastic deformations of various designs of boring tools. The novelty of the work: a design with a transitional section from the prismatic to the conical part in the form of a

cone and a conical part in a barrel-like design is proposed for introduction into metalworking. Research results: optimal geometric shapes and parameters of the boring tool are identified. Conclusions: the paper analyzes the obtained data of theoretical studies and identifies structural changes in the standard boring tools widely used in metalworking.

**Keywords:** stiffness, boring tool, design, deformation.

Reference for citing:

Zholobov AA, Klyaus ON. Improvement of boring tool design. Transport Engineering. 2022;10: 19–27. doi: 10.30987/2782-5957-2022-10-19-27.

### Введение

В настоящее время зарубежные и отечественные фирмы производят инструмент для обработки отверстий. отече-

ственный инструмент, изготовленный в соответствии с ГОСТ, занимает определенную нишу на рынке металлорежущего

инструмента ЕАЭС в связи с тем, что это, во-первых, качественный инструмент, во-вторых он совместим не только со старым советским, но и с российским, белорусским и большинством моделей импортного оборудования и в-третьих имеет невысокую стоимость [2, 3, 5].

При расверливании, зенкерования и развертывании, как правило, для каждого отверстия в соответствии с требованиями технической документации необходим определенный инструмент, что увеличивает его номенклатуру на производстве. Кроме этого, изменение геометрии режущих лезвий при износе и последующей переточке концевой инструмента значительно влияет на точность формируемого

отверстия и смещение его оси [5-7]. В отличие от концевой инструмента, расточные резцы являются универсальными, т.е. способными обработать определенный диапазон размеров отверстий. Вместе с тем резцы более точно обрабатывают отверстие за счет особенностей кинематики процесса формирования поверхности.

Тем не менее, анализ конструктивных особенностей стандартного инструмента показывает, что имеются определенные возможности увеличения его жесткости и, соответственно, сопротивляемости силам резания, которые в конечном счете должны привести к повышению точности обработки.

### Материалы, модели, эксперименты и методы

Основными критерием жесткости  $j$  технологической системы является смещение вершины режущей кромки  $\Delta y$  в направлении действия силы  $P_y$ . Однако, учитывая, что на систему действуют все составляющие силы резания:  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  в настоящей работе их влияние тоже учитывается результирующей силой  $P$ .

Основой инженерного анализа в среде *Solidworks Simulation* является метод конечных элементов, сущность которого заключается в дискретизации объекта с целью решения уравнений механики сплошной среды, предполагая, что эти уравнения выполняются в пределах каждой из элементарных областей, именуемых конечными элементами.

Для исследований упругих смещений вершины режущей пластины инструмента разрабатывалась твердотельная модель расточного резца и создавалась сетка. Поскольку резец в своей конструкции имеет

державку, материал которой улучшенная сталь 45, и пластину из твердого сплава (в настоящем исследовании принят сплав Т15К6), то в САПР *Solidworks* необходимо создать сборку (рис. 1), состоящую из твердотельной модели державки и пластины, а также назначить для каждой из них свой материал.

Размеры расточного резца и пластины указаны в [1]. Конструкция резца по [1] выбрана в связи с тем, что расточной резец для обработки глухих отверстий имеет главный угол в плане  $\varphi = 90-95^\circ$ , в отличие от расточного резца для сквозных отверстий с главным углом в плане  $\varphi = 60^\circ$ , что, в свою очередь позволяет, кроме формирования диаметра отверстия, осуществлять проточку, а затем и шлифовку дна отверстия. Этот же резец с успехом может применяться и для обработки сквозных отверстий.

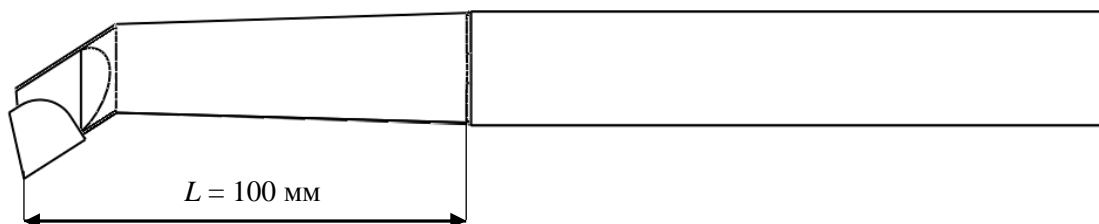


Рис. 1. Сборная твердотельная модель стандартного расточного резца с твердосплавной пластиной по [1]

Fig. 1. Prefabricated solid-state model of a standard boring cutter with a carbide plate according to [1]

Инструмент устанавливается в резцедержателе токарного станка путем закрепления призматической составляющей державки. На вершину режущего лезвия резца при обработке отверстия действуют

силы резания (рис. 2). Методика настоящих исследований предполагает, что после установления сил резания осуществляется создание сетки методом конечных элементов (рис. 3).

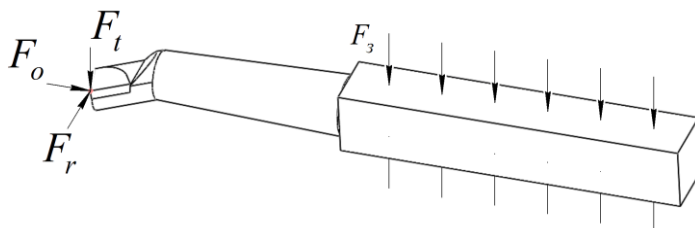


Рис. 2. Расположение сил и креплений в инженерном анализе  
Fig. 2. Arrangement of forces and fasteners in engineering analysis

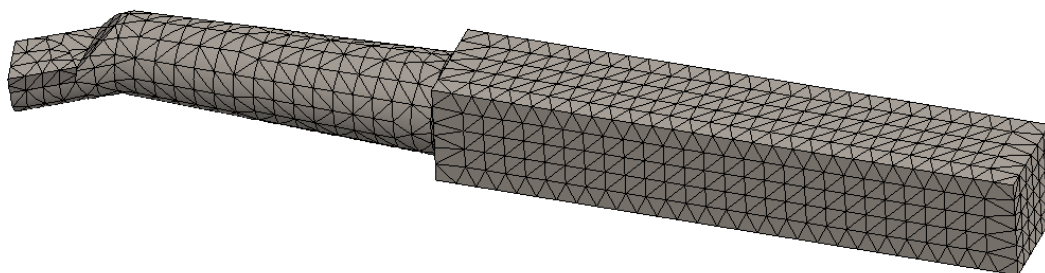


Рис. 3. Сетка, построенная по методу конечных элементов  
Fig. 3. A grid constructed by the finite element method

Аналогичным образом на основе созданной твердотельной модели расточного резца, (рис. 1), строится сборная твердотельная модель для исследования, представленная на рис.4. Причем размеры гео-

метрических параметров переходного участка необходимо принимать таким образом, чтобы они не превышали наименьший диаметр растачиваемого отверстия, рекомендуемого [1].

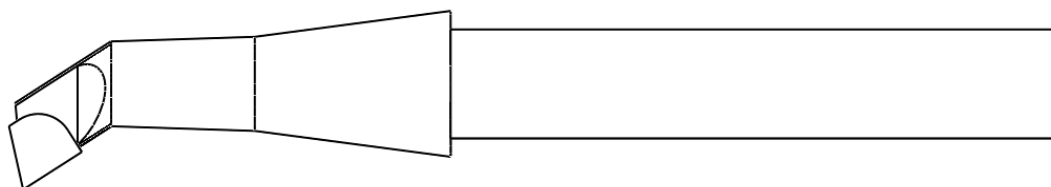


Рис. 4. Сборная твердотельная модель расточного резца с твердосплавной пластиной и переходным участком в виде дополнительного внешнего конуса  
Fig. 4. Prefabricated solid-state model of a boring cutter with a carbide plate and a transition section in the form of an additional external cone

Представленная модель расточного резца обусловлена тем, что в качестве способа изготовления державки подразумевается штамповка, характеризующаяся относительной простотой изготовления при реализации.

Задача настоящих исследований заключается в подборе оптимальной геометрической формы и параметров резца с целью обеспечения минимально возможного упругого смещения вершины рабочей части пластины под воздействием сил резания.

## Результаты

**Подбор оптимальной геометрии переходного участка в виде дополнительного внешнего конуса.** В основе под-

бора оптимальной геометрии переходного участка, имеющего промежуточное положение между конической и призматиче-

ской частями державки, лежит величина упругого смещения вершины режущей пластины, зависящая от изменений в его размерных параметрах. Между державкой и рабочей частью расточного резца в соответствии с [1] существует некоторый радиус скругления, выбираемый конструктивно. Соответственно, переходной участок в виде дополнительного внешнего ко-

нуса должен иметь определенную длину. Для дополнительного конуса (рис. 5а) его окончание находится на линии перехода конического участка рабочей части в призматический участок расточного резца. На рис. 5 б) на этой линии находится середина участка перехода от конической к призматической частям.

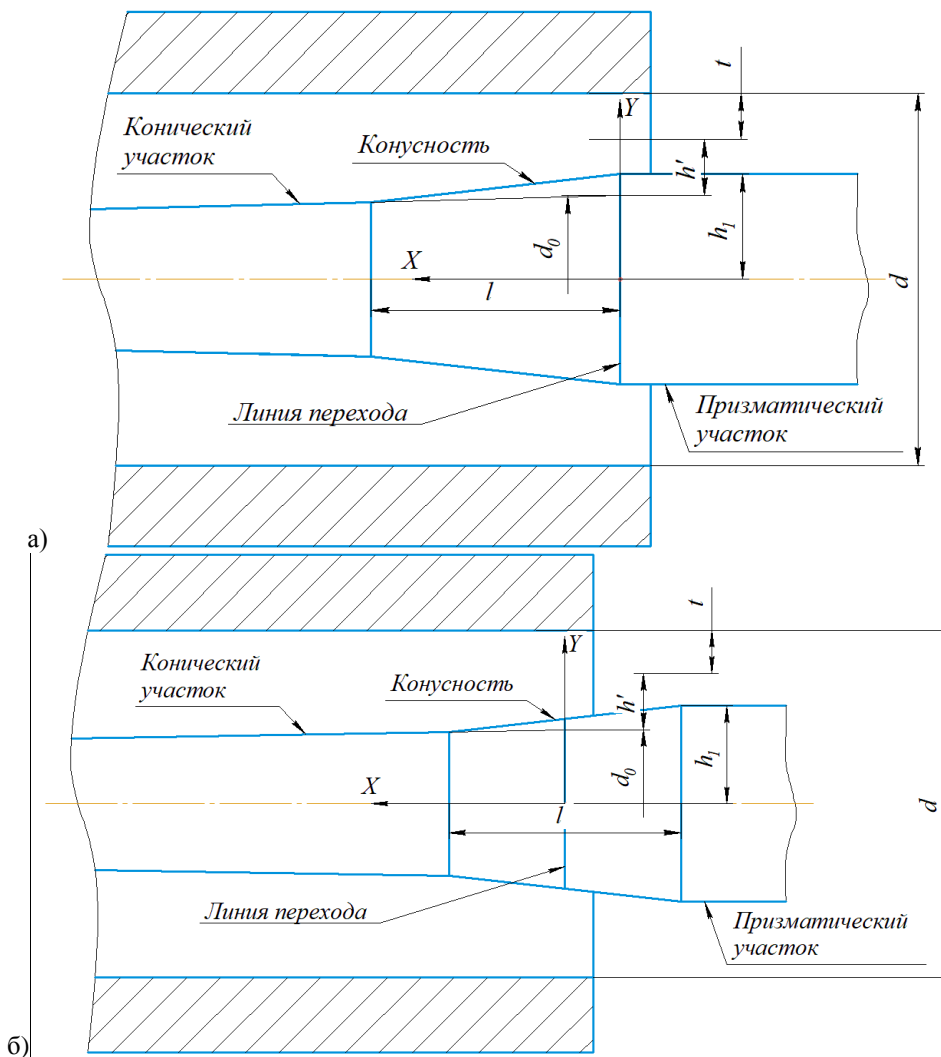


Рис. 5. Параметры переходного участка расточного резца с твердосплавной пластиной и дополнительным внешним конусом: а) окончание дополнительного внешнего конуса находится на линии перехода конического участка рабочей части в призматический участок расточного резца; б) на линии перехода конического участка рабочей части в призматический участок расточного резца находится середина дополнительного внешнего конуса

Fig. 5. Parameters of the transition section of the boring cutter with a carbide plate and an additional external cone: a) the end of the additional outer cone is located on the line of transition of the conical section of the working part into the prismatic holder of the boring cutter; b) on the line of transition of the conical section of the working part into the prismatic holder of the boring cutter is the middle of the additional outer cone

$$h_1 - \frac{d_0}{2} < h' < \frac{d}{2} - t - h_1, \quad (1)$$

где  $h'$  – высота дополнительного внешнего конуса (рис. 5);  $h_1 = 12,5$  мм – половина высоты призматической части державки;

$d_0 = 24$  мм [1] – больший диаметр конической части державки;  $d = 40$  мм – диаметр обработанного отверстия.

Для определения наибольшего значения величины упругого смещения вер-

шины режущей кромки назначаются максимальные режимы резания [1, 2, 3]: глубина резания  $t = 3$  мм; подача  $s = 0,16$  мм/об; скорость резания  $V = 180$  м/мин и рассчитываются силовые параметры процесса обработки  $P_x = 459$  Н;  $P_y = 463$  Н;  $P_z = 867$  Н.

$$12,5 - \frac{24}{2} \leq h' \leq \frac{40}{2} - 3 - 12,5;$$

$$12,5 - 12 \leq h' \leq 20 - 3 - 12,5; \quad (2)$$

$$0,5 \leq h' \leq 4,5.$$

Выражение (2) конкретизирует условие (1) для величины  $h'$  при заданных параметрах формируемого отверстия: диаметре обработанного отверстия  $d = 40$  мм и длине обработанного отверстия  $l = 95$  мм.

Согласно рис. 5 одним из параметров переходного участка является конусность,

которая согласно действующему ГОСТ [4], регламентируется определенным рядом. Однако при выборе величин, необходимых в исследовании, из предложенного ряда конусности следует учитывать вышеприведенное условие и длину конической части державки расточного резца, которая по ГОСТ [1] составляет 78 мм. Таким образом при выборе максимально возможной величины  $h' = 4,5$  мм соответствующая ей конусность равна 1:10 (поскольку ряд 1 предпочтительнее ряда 2, значение выбирается из ряда 1 в соответствии с [4]). Величина упругого смещения вершины режущей пластины расточного резца с переходным участком в виде дополнительного внешнего конуса в зависимости от изменения его геометрических параметров представлена в табл. 1.

Таблица 1

Величина упругого смещения вершины режущей пластины расточного резца в зависимости от изменения геометрических параметров переходного участка

Table 1

The value of the elastic displacement of the tip of the cutting plate of the boring cutter depending on the change in the geometric parameters of the transition section

$h'$ , мм	0,5			2,5			4,5		
конусность	1:3	1:5	1:10	1:3	1:5	1:10	1:3	1:5	1:10
вариант а)									
$\Delta_y$	0,1655	0,1649	0,1638	0,1558	0,1512	0,1412	0,1456	0,1351	0,1124
вариант б)									
$\Delta_y$	0,1678	0,1688	0,1747	0,1666	0,1687	0,1770	0,1650	0,1668	0,1751

Из табл. 1 видно, что при расчетах по варианту а) наблюдается снижение значений упругих смещений при всех манипуляциях по изменению конусности с 1:3 до 1:10 и увеличению высоты дополнительного внешнего конуса с 0,5 до 4, 5 мм, а по варианту б) наоборот, наблюдается увеличение этих смещений с изменением тех же параметров в указанных пределах.

Такое явление можно объяснить тем, что при варианте а) длина переходного участка увеличивается только в сторону конического участка рабочей части резца, тем самым повышая его жесткость, а в варианте б) его длина равномерно растет в обе стороны от линии перехода, т. е. как в сторону призматической части, уменьшая ее длину, так и в сторону конической части, но на значительно меньшую длину по сравнению с вариантом а), что и приводит к уменьшению сопротивления силам реза-

ния. Соответственно (табл. 1) для вариантов а) и б) меньшие значения упругого смещения достигаются при:  $h' = 4,5$  мм.

Тогда для варианта а) при  $h' = 4,5$  мм увеличение жесткости инструмента с конусностью переходного участка 1:10 в сравнении с инструментом с подобным параметром и его величиной, равной 1:3 равно:

$$\Delta_1 = \frac{|0,1456 - 0,1124|}{0,1124} 100\% = 29,53\%$$

Аналогично для варианта б) при  $h' = 0,5$  мм увеличение жесткости инструмента с конусностью переходного участка 1:3 в сравнении с инструментом с подобным параметром и его величиной, равной 1:10 равно:

-для варианта б):

$$\Delta_2 = \frac{|0,1650 - 0,1751|}{0,1751} 100\% = 5,76\%$$

Увеличение жесткости расточного резца по варианту а) относительно варианта б) составит:

$$\Delta_3 = \frac{|0,1650 - 0,1124|}{0,1124} \cdot 100\% = 46,79\%.$$

Таким образом оптимальными параметрами переходного участка исследуемой конструкции являются: конусность 1:10 и  $h' = 4,5$  мм и вариант расположения переходного участка а) (рис. 5), так как большее увеличение  $h'$  недопустимо для диаметра растачиваемого отверстия  $d = 40$  мм.

Однако, коническая часть, соединенная посредством переходного участка с призматической, может иметь и бочкообразную геометрическую форму. В связи с этим, возникает необходимость подбора оптимальной геометрии переходного

участка с рабочей частью бочкообразного исполнения.

**Подбор оптимальной геометрии переходного участка с рабочей частью бочкообразного исполнения расточного резца с переходным участком в виде дополнительного внешнего конуса.** Как известно из пункта 1 оптимальными параметрами рассматриваемого переходного участка являются конусность 1:10 и  $h' = 4,5$  мм и вариант его расположения а) (окончание дополнительного внешнего конуса находится на линии перехода конической части державки в призматическую). Тем не менее при этих параметрах и принятой величине  $h_2 = 17$  мм (рис.6) происходит пересечение между бочкообразной рабочей частью и узкой частью переходного участка в виде дополнительного внешнего конуса (рис. 7).

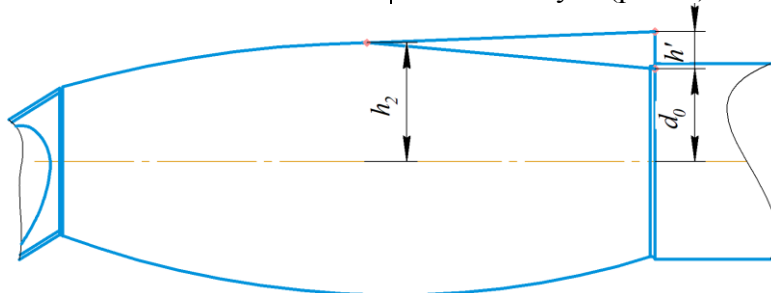


Рис. 6. Параметры переходного участка расточного резца с твердосплавной пластиной и дополнительным внешним конусом  
Fig. 6. Parameters of the transition section of the boring cutter with a carbide plate and an additional external cone

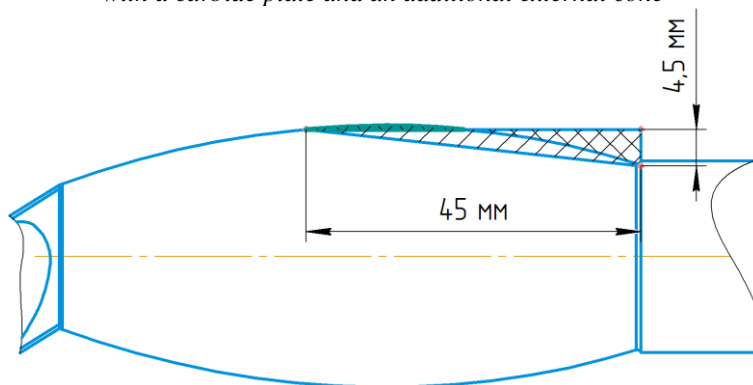


Рис. 7. Графическое изображение сочетаний дополнительного внешнего конуса и бочкообразной рабочей части расточного резца  
Fig. 7. Graphic representation of combinations of an additional external cone and a barrel-shaped working part of the boring cutter

Для того, чтобы избежать подобной ситуации, необходимо уменьшить величину бочкообразности. Тогда, для величины  $h_2$  должно выполняться следующее условие (рис. 6)

$$\frac{d_0}{2} \leq h_2 \leq \frac{d_0}{2} + \frac{h'}{2}; \quad (3)$$

где  $h'$  – высота дополнительного внешнего конуса, мм;  $d_o$  – большой диаметр конической части,  $d_o = 24$  мм [1].

Для определения величин упругого смещения вершины режущей кромки твердосплавной пластины по (3) используются режимы резания и силовые параметры процесса обработки из пункта 1.

$$12 \leq h_2 \leq 12 + \frac{4,5}{2};$$

$$12 \leq h_2 \leq 12 + 2,25; \quad (4)$$

$$12 \leq h_2 \leq 14,25;$$

Величина упругого смещения вершины режущей пластины расточного резца исследуемой конструкции в зависимости от изменения геометрии переходного участка представлена в табл. 2.

Таблица 2

Величина упругого смещения вершины режущей пластины расточного резца в зависимости от изменения геометрии переходного участка

Table 2

The value of the elastic displacement of the tip of the cutting plate of the boring cutter, depending on the change in the geometry of the transition section

$h_2$	12			13,125			14,25		
конусность	1:3	1:5	1:10	1:3	1:5	1:10	1:3	1:5	1:10
$h' = 4,5$ мм									
$\Delta_y$	0,1151	0,1074	0,09480	0,09635	0,09030	0,08307	0,08324	0,07872	0,07465

Из данных табл. 2 видно, что упругое смещение вершины режущей кромки расточного резца имеет наименьшие значения при  $h_2 = 14,25$  мм. Тогда увеличение

жесткости инструмента с конусностью переходного участка 1:10 в сравнении с инструментом с подобным параметром и его величиной, равной 1:3 равно:

$$\Delta_4 = \frac{0,08324 - 0,07465}{0,07465} \cdot 100\% = 11,50\%$$

Сборная твердотельная модель резца повышенной жесткости представлена на рис. 8.

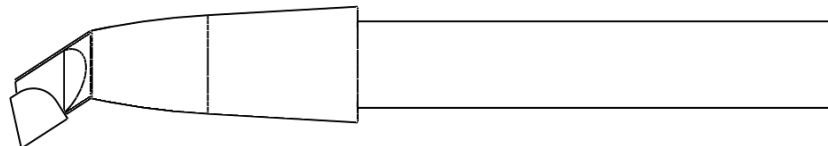


Рис. 8. Сборная твердотельная модель расточного резца повышенной жесткости  
Fig. 8. Prefabricated solid-state model of a boring cutter of increased rigidity

Из приведенного выше анализа видно, что оптимальными параметрами конструкции на рис. 8 являются: конусность 1:10 и  $h' = 4,5$  мм и бочкообразный вариант переходного участка при  $h_2 = 14,25$  мм.

В целях выявления более жесткой конструкции расточного резца (табл. 3)

следует сравнить упругое смещение режущей пластины расточного резца с: конической (рис. 4) или бочкообразной (рис. 8) рабочей частью с переходным участком в виде дополнительного внешнего конуса и стандартного расточного резца (рис. 1).

Таблица 3

Варианты выполнения расточного резца

Table 3

Variants of the boring cutter

Вариант выполнения переходного участка расточного резца	Стандартная конструкция расточного резца	Конструкция с конической рабочей частью и переходным участком в виде дополнительного внешнего конуса	Конструкция с бочкообразной рабочей частью и переходным участком в виде дополнительного внешнего конуса
$\Delta_y$ , мм	0,1661	0,1124	0,07465

Как видно из табл. 3 конструкция с бочкообразной рабочей частью и переходным участком в виде дополнительного внешнего конуса имеет наименьшую величину упругого смещения, равную 0,07465 мм, а, следовательно, и более высокую жесткость.

Тогда уменьшение упругого смещения вершины режущей пластины расточного резца конструкции с бочкообразной рабочей частью и переходным участком по

### Обсуждение/Заключение

Разработана конструкция расточного резца с бочкообразной рабочей частью и осуществлен подбор оптимальных параметров переходного участка данной конструкции для определенных условий обработки.

При анализе полученных данных в таблицах видно, что значения упругого

сравнению с упругим смещением стандартного расточного резца:

$$\Delta_5 = \frac{|0,1661 - 0,07465|}{0,07465} 100\% = 122,50\%$$

Таким образом, упругое смещение вершины режущей пластины конструкции с бочкообразной рабочей частью и переходным участком на 122,50% меньше, чем стандартной конструкции.

смещения вершины режущей кромки для расточного резца с бочкообразной рабочей частью и переходным участком между ней и призматической державкой имеют меньшую величину, чем для расточного резца стандартной конструкции, следовательно, теоретически жесткость его при обработке отверстий будет выше.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 18883-73. Резцы токарные расточные с пластинами из твердого сплава для обработки глухих отверстий. Конструкция и размеры= Carbide-tipped boring turning tools for blind holes. Design and dimensions: межгос. стандарт: изд. офиц. : утв. и введ. в действие Постановлением Гос. комитета ст. Сов. Мин. СССР от 8 июня 1973 г. № 1429-ст : введ. впервые : дата введ. 1974-07-01. Часть 1: Сб. ГОСТов М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 8 с.
2. Рыжикова Т.Н., Боровский В.Г. Анализ развития инструментальной промышленности России в рамках концепции устойчивого развития. Экономический анализ: теория и практика. 2018. № 17(2). С. 24-264.
3. Шалгинов И. Металлорежущий инструмент: в поисках нового / И. Шалгинов // Промышленные страницы Сибири. 2020. № 9(152). с. 22-25.
4. ГОСТ Р 53440-2009. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Нормальные конусности и углы конусов = Basic norms of interchangeability. Geometrical product specifications. Standard rates of taper and cone angles: нац. стандарт РФ: изд. офиц.: утв. и введ. в действие Приказом Федер. агенств. по техн. регулир. и метролог. от 4 декабря 2009 г. N 557-ст: введ. впервые: дата введ. 2012-01-01. Сб. ГОСТов М.: Стандартинформ, 2010. [8] с.
5. Обзор рынка металлорежущего инструмента. 2014. URL: <https://mekkain.ru/stati/obzor-ryinka-metallorezhushhego-instrumenta.html> (дата обращения: 05.02.2022).
6. Кляус О.Н. К вопросу моделирования упругих деформаций расточных резцов при формировании отверстий. Менеджмент качества производственных, социально-экономических и технических систем: развитие и совершенствование: сб. науч. тр. Брянский государственный технический университет. Брянск, 2022. С. 226-231. ISBN 978-5-907271-15-9.
7. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с. ISBN 978-5-97060-140-2.
8. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 448 с. ISBN 978-5-9775-0763-9.
9. Кляус О. Н. Жолобов А. А. К вопросу влияния конструкции рабочей части расточного резца при формировании отверстий. Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: сб. междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22 - 23 апреля 2021 г. М-во образования Респ. Беларусь [и др.]. 2021. С. 51. ISBN 978-985-492-257-7.
10. Патент на полезную модель №12885 Республика Беларусь, МПК В23В27/02 (2006.01). Инструмент для обработки глухих, относительно длинных отверстий растачиванием/ Жолобов А.А., Кляус О.Н.; заявитель и патентообладатель МОУВО «Белорусско-Российский университет». – № u20210261; заявл. 24.09.2021; опубл. 30.06.2022.



## REFERENCES

1. GOST 18883-73. Carbide-tipped boring turning tools for blind holes. Design and dimensions. Moscow: IPK Publishing House of Standards; 2003.
2. Ryzhikova TN, Borovskii VG. The analysis of the development of the Russian tool industry in the framework of the sustainable development concept. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2018;17(2):249-264.
3. Shalginov I. Metal-cutting tool: in search of a new one. *Promishlennii Stranitsi Sibiri*. 2020;9(152):22-25.
4. GOST R 53440-2009. Moscow: Standartinform; 2010.
5. Overview of the metal-cutting tools market [Internet]. 2014 [cited 2022 Feb 05]. Available from: <https://mekkain.ru/stati/obzor-ryinka-metallorazhushhego-instrumenta.html>.
6. Klyaus ON. On the problem of modeling elastic deformations of boring cutters during hole formation. Collection of scientific papers: Quality management of production, socio-economic and technical systems: development and improvement: Bryansk: Bryansk State Technical University; 2022. p. 226-231.
7. Alyamovky AA. SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations. Moscow: DMK Press; 2015.
8. Alyamovky AA. SolidWorks Simulation. How to solve practical problems. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2012.
9. Klyaus ON, Zholobov AA. On the problem of the influence of the design of the boring cutter operational part during the formation of holes. Collection of international scientific and technical conference, April 22 – 23, 2021: Materials, equipment and resource-saving technologies; Mogilev: Ministry of Education of Belarus Republic; 2021.
10. Zholobov AA, Klyaus ON. Utility model Patent No. 12885 Republic of Belarus, IPC B23B27/02 (2006.01). Tool for machining deep, relatively long holes by boring. 2022 Jun 30.

### Информация об авторах:

**Жолобов Александр Алексеевич** – кандидат технических наук, профессор, тел. +375 (33) 302-71-50, профессор кафедры «Технология машиностроения», AuthorID: 797209.

**Zholobov Aleksandr Alekseevich** - Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering, phone: +375 (33) 302-71-50, AuthorID: 797209.

**Кляус Ольга Николаевна** - магистр технических наук, тел. +375 (29) 845-19-00, ассистент-стажер, AuthorID: 1101905.

**Klyaus Olga Nikolaevna** – Master of Technical Sciences, Trainee assistant, phone: +375 (29) 845-19-00, AuthorID: 1101905.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 12.07.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022; принята к публикации 26.09.2022. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 12.07.2022; approved after review on 22.07.2022; accepted for publication on 26.09.2022. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.