

ОБОСНОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ ПОСЛЕ КОЛЬЦЕВОГО СВЕРЛЕНИЯ

В.Е. Овсянников¹, ovsjannikovve@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7193-7197>

Б.А. Лопатин², lopatinba@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3398-2138>

М.О. Чернышов¹, chernyshovmo@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2476-7786>

Т.Е. Костив¹, kostivte@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6271-900X>

С.В. Никитин¹, nikitinsv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0857-4289>

Е.И. Маслов¹, eg0rmasloff@yandex.ru

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия

Аннотация. Данная статья посвящена комплексному исследованию процесса удаления стержня в глухом отверстии после выполнения операции кольцевого сверления. Особое внимание уделяется анализу взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым материалом в условиях высоких нагрузок и деформаций. Для проведения исследования применяется современное программное обеспечение Abaqus, позволяющее выполнить детальное моделирование всех этапов технологического процесса.

В работе представлена инновационная конструкция режущего инструмента, отличающаяся уникальным принципом работы. Ключевая особенность разработки заключается в способности корпуса инструмента к упругой деформации под действием противодействующих сил со стороны обрабатываемой заготовки. При этом обеспечивается согласованное перемещение направляюще-опорной части вместе с режущим лезвием по направлению к оси вращения.

Принцип работы инструмента основан на его вращении с заданной частотой в направлении подачи, что способствует эффективному удалению керна стержня. Существенным преимуществом предложенного решения является отсутствие подвижных соединений в конструкции, что значительно повышает надежность и долговечность инструмента.

Разработанная технология позволяет существенно оптимизировать процесс извлечения центральной части из глухого отверстия после кольцевого сверления. Это достигается за счет рационального распределения нагрузок и минимизации механического воздействия на обрабатываемый материал. Внедрение предложенного метода способствует сокращению времени обработки, снижению энергозатрат и повышению качества получаемых поверхностей.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной технологии в машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности, где широко используются операции глубокого сверления и последующей обработки отверстий.

Ключевые слова: режущий инструмент, глухое отверстие, упругий элемент, кольцевое сверление

Для цитирования: Обоснование реализации нового метода обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления / В.Е. Овсянников, Б.А. Лопатин, М.О. Чернышов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 2. С. 56–67. DOI: 10.14529/engin260205

JUSTIFICATION OF THE IMPLEMENTATION OF A NEW METHOD FOR PROCESSING DEEP HOLES AFTER CORE DRILLING

V.E. Ovsyannikov¹, ovsjannikovve@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7193-7197>

B.A. Lopatin², lopatinba@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3398-2138>

M.O. Chernyshov¹, chernyshovmo@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2476-7786>

T.E. Kostiv¹, kostivte@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6271-900X>

S.V. Nikitin¹, nikitinsv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0857-4289>

E.I. Maslov¹, egOrmasloff@yandex.ru

¹ Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

² South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russia

Abstract. This article is devoted to a comprehensive study of the process of removing the core from a blind hole after performing a hole drilling operation using a ring drill. Particular attention is paid to analyzing the interaction between the cutting tool and the workpiece material under conditions of high loads and deformations. The research utilizes modern Abaqus software, which allows for detailed modeling of all stages of the technological process.

The paper presents an innovative design of a cutting tool with a unique operating principle. The key feature of the development lies in the ability of the tool body to elastically deform under the influence of opposing forces exerted by the workpiece. This ensures coordinated movement of the guiding-supporting part together with the cutting blade towards the rotation axis.

The tool operates based on its rotation at a specified frequency in the feed direction, which facilitates efficient removal of the core. A significant advantage of this solution is the absence of moving connections in the design, which considerably increases the reliability and service life of the tool.

The developed technology allows for substantial optimization of the process for extracting the central part from a blind hole after ring drilling. This is achieved through rational distribution of loads and minimization of mechanical impact on the workpiece material. Implementation of the proposed method contributes to reduced processing time, lower energy consumption, and improved quality of resulting surfaces.

The practical significance of the research lies in the potential application of the developed technology in mechanical engineering, aviation, and automotive industries, where deep drilling operations and subsequent hole processing are widely used.

Keywords: cutting tool, core drilling, blind hole, elastic element

For citation: Ovsyannikov V.E., Lopatin B.A., Chernyshov M.O., Kostiv T.E., Nikitin S.V., Maslov E.I. Justification of the implementation of a new method for processing deep holes after core drilling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026;26(2):56–67. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260205

Введение

Глубокое сверление является важной технологической операцией, при которой создаётся отверстие, длина которого как минимум в пять раз больше его диаметра. Поскольку данная операция широко используется в машиностроительной отрасли по всему миру, постоянно ведутся исследования и внедряются инновации, направленные на совершенствование технологий глубокого сверления. Это включает разработку новых методов обработки, создание современного оборудования и совершенствование режущего инструмента. Улучшение технологических процессов положительно сказывается на экономической эффективности производства и способствует повышению конкурентоспособности предприятий в сфере машиностроения.

Сложность глубокого сверления состоит в том, что инструмент не обладает достаточной жёсткостью, из-за чего снижается точность обработки отверстий. Это связано с тем, что скорость резания по длине поперечной кромки инструмента распределяется неравномерно: у самой оси она практически равна нулю. В результате металл в этой зоне не режется, а выдавливается. Такой

процесс выдавливания отличается нестабильностью, что приводит к уходу сверла в сторону и нарушению соосности отверстия [1]. Кроме того, при глубоком сверлении часто наблюдается опасное явление скопления и уплотнения стружки в канавках сверла или в самом отверстии. Это случается, когда объём образующейся стружки становится больше, чем могут вывести каналы для её удаления [2, 3]. Также одной из проблем изготовления глубоких отверстий является преждевременный отказ сверл [4–8].

При глубоком сверлении различают сплошное и кольцевое сверление. Достоинством кольцевого сверления является более высокая производительность и меньший износ режущих кромок ввиду того, что отсутствует центральная часть сверла, где скорость резания стремится к нулю, как при сплошном сверлении. Также отсутствие центральной части позволяет снизить усилия резания и уменьшить объём материала, переводимого в стружку. Поэтому энергоэффективность такого процесса выше. Помимо всего этого при кольцевом сверлении, как правило, применяется многолезвийный инструмент, у которого опорные боковые поверхности более равномерно распределены по диаметру сверла, что также повышает производительность и качество обработки, по сравнению со сплошным сверлением [9, 10].

Несмотря на перечисленные достоинства у кольцевого сверления есть один существенный недостаток: центральная часть отверстия не обрабатывается, в результате чего образуется стержень (или kern), который сложно, а в отдельных случаях невозможно удалить. Кроме того, при глубоком сверлении стержень может деформироваться из-за перераспределения остаточных напряжений, а также провисать под собственным весом и оказывать давление на стенки кольцевого сверла, что приводит к поперечным колебаниям заготовки и режущего инструмента, а это, в свою очередь, негативно влияет на качество получаемого отверстия. Поэтому кольцевое сверление на сегодня применяют либо для получения сквозных отверстий, либо для неглубоких отверстий большого диаметра.

На сегодняшний день применяются следующие способы извлечения керн после выполнения кольцевого сверления [1, 9–11]:

- высверливание керн (рис. 1, а). Основным недостатком этого метода является сравнительно низкая производительность при формировании отверстия;
- разрушение керн путём поочерёдных ударов по его краям с целью выламывания (рис. 1, б). К минусам этого способа относится трудоёмкость процесса, обусловленная толщиной и свойствами материала керн. Кроме того, после повторного захода сверла в отверстие дальнейшее выламывание становится невозможным;
- формирование отверстия в зоне соединения керн с основанием для последующего отделения с помощью газового или плазменного резака, либо подрезание через перпендикулярный канал у основания керн (рис. 1, с). Недостатком данного подхода считается низкая эффективность и высокая стоимость, связанные с необходимостью сверления дополнительного бокового отверстия, трудоёмким удалением керн и последующей герметизацией подготовленного проёма;
- применение специализированных инструментов (рис. 2).

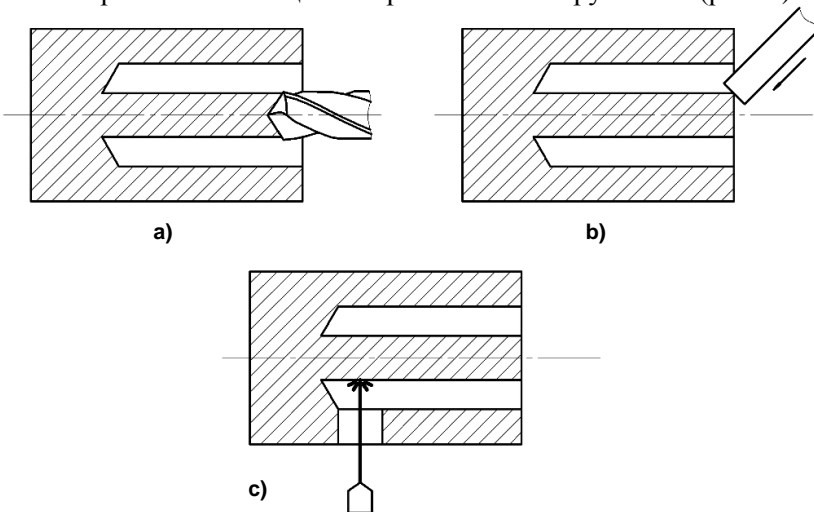


Рис. 1. Способы извлечения стержня после выполнения кольцевого сверления:

а) принцип действия метода высверливания; б) принцип действия метода выламывания; с) принцип действия метода подрезания стержня через отверстия в его основании

Fig. 1. Methods of core removal after ring drilling:

a) operating principle of the drilling-out method; b) operating principle of the breaking-out method; c) operating principle of the core cutting method through holes in its base

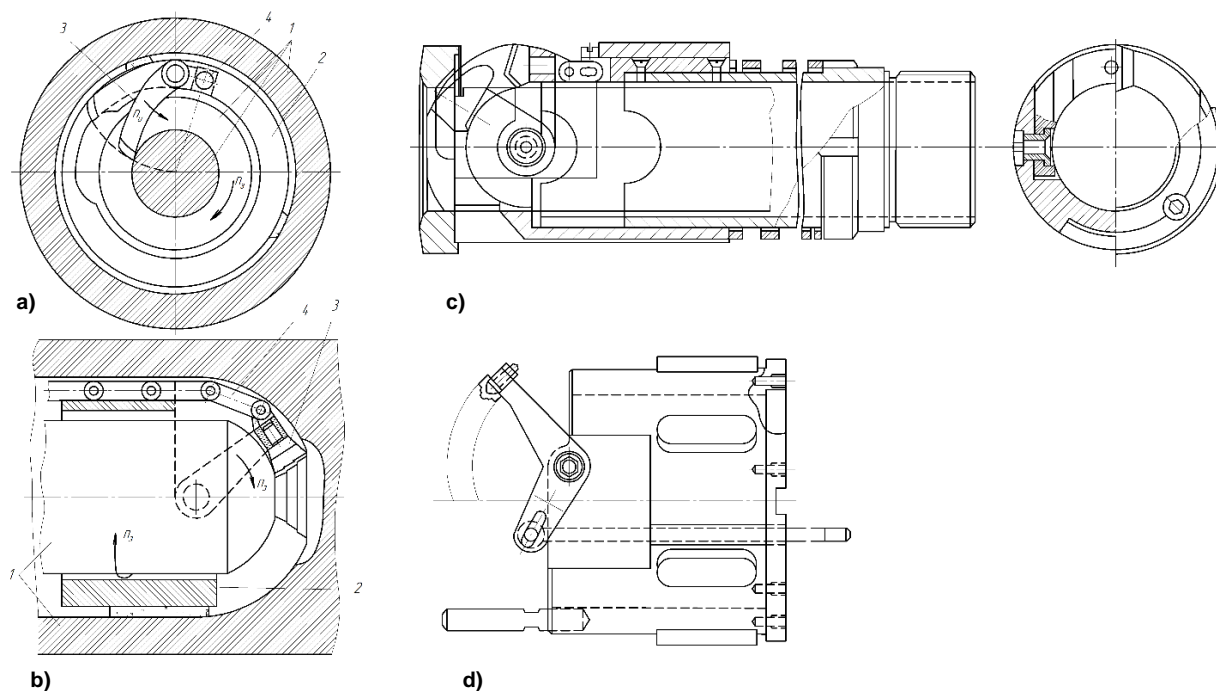


Рис. 2. Специализированные инструменты для отделения стержня, образующегося при высверливании, классифицируются следующим образом: а) устройства с резцом, совершающим движение в направлении, перпендикулярном оси заготовки; б) устройства, в которых резец перемещается в плоскости, параллельной оси заготовки; в) головка для разделения сердечника, оснащённая шарнирным механизмом и дуговым держателем режущего инструмента; д) головка для отрезки сердечника с дуговым резцедержателем.
Обозначения на схеме: 1 – заготовка; 2 – корпус головки; 3 – резец; 4 – привод резца

Fig. 2. Specialized tools for core separation formed during drilling are classified as follows:
a) devices with a cutter moving in a direction perpendicular to the workpiece axis; b) devices where the cutter moves in a plane parallel to the workpiece axis; c) core separation head equipped with a hinge mechanism and an arc-shaped cutting tool holder
Designations in the diagram: 1 – workpiece; 2 – head body; 3 – cutter; 4 – cutter drive

Использование специальных инструментов для подрезания стержня после кольцевого сверления считается самым технологичным способом по сравнению с ранее рассмотренными методами. Однако на сегодняшний день этот подход применяется нечасто, так как конструкции инструментов отличаются сложностью, а их производительность и надёжность остаются низкими.

В работе Н.Д. Троицкого описано устройство режущей головки, предназначенной для отделения керна (стержня), изображённой на рис. 2, а. Конструкция включает корпус инструмента, в передний торец которого встроен рычаг с закреплённой на нём режущей пластиной. Рычаг жёстко зафиксирован на приводном валу с косозубым шестерённым колесом. Это колесо взаимодействует с рейкой, имеющей наклонные зубцы и движущейся вдоль оси стебля и инструмента. При продвижении рейки вперёд косозубое колесо поворачивается в опорных подшипниках и плавно вращает рычаг с напаянной режущей пластиной от периферии к центру отверстия. Двигаясь по дуге, проходящей через ось отверстия, рычаг отсекает стержень у самого его основания. Перемещение рычага осуществляется вручную [9].

Также приведено описание конструкции режущей головки для отделения керна (стержня), показанной на рис. 2, б. Она состоит из корпуса, на передней части которого установлен дугообразный рычаг с режущей пластиной, приводимый в движение штангой с промежуточными звеньями [9].

В справочнике С.В. Кирсанова, В.А. Гречишникова, С.Н. Григорьева, А.Г. Схиртладзе описано устройство отрезной головки, предназначенной для отделения керна (стержня), иллюстрация которой представлена на рис. 2, с. Конструкция включает в себя втулку с корпусом, в котором на шарнирных соединениях установлен дугообразный держатель резца. Подрезание керна (стержня) осуществляется за счёт поворота этих шарниров [1].

Также рассмотрено устройство отрезной головки для отделения керна (стержня), изображённой на рис. 2, d. Она состоит из корпуса, на котором зафиксирована дугообразная державка с режущим инструментом. Державка соединена с суппортом станка посредством тяги; при движении суппорта в направлении задней бабки происходит поворот дуги-державки. В результате этого поворота резец, закреплённый на дуге, врежется в kern (стержень) и осуществляет его подрезку [1].

Недостатком всех указанных выше конструкций режущего инструмента является их конструктивная сложность. В каждой из них присутствуют подвижные узлы, включающие множество мелких и подверженных износу деталей. Это приводит к усложнению изготовления, снижению надёжности и эксплуатационных характеристик, а также к низкой производительности при вырезании керна из отверстия из-за недостаточной надёжности данных конструкций.

Таким образом, **целью** этой работы является обоснование возможности реализации нового метода обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления.

Постановка задач исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать новый метод обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления, предусматривающий подрезку оставшегося стержня с помощью режущего инструмента, обладающего упругим корпусом;

– разработать конструкцию инструмента, обеспечивающую практическое применение предложенного метода обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления. Конструкция должна обеспечивать упругую деформацию корпуса инструмента под воздействием силы реакции опоры со стороны детали, а также перемещение направляющей опоры с режущей кромкой к оси вращения;

– обосновать работоспособность нового метода обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления.

Материалы и методы исследования

Компьютерное моделирование – это инструмент, который позволяет прогнозировать и совершенствовать поведение режущего инструмента и заготовки в условиях, приближённых к реальному производству. Среди множества программных решений, применяемых для моделирования подобных процессов, особое место занимает Abaqus – благодаря своей универсальности, высокой производительности и обширному спектру функциональных возможностей [12–19].

В программном комплексе Abaqus для имитации процессов резания и разрушения материалов применяется модель Джонсона – Кука, представленная в виде следующего уравнения:

$$\sigma = (A + B \times (\bar{\epsilon})^n) \times (1 + C \times \ln \dot{\epsilon}^*) \times (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

где A – величина предела текучести обрабатываемого материала при статическом нагружении, МПа; B – характеристика чувствительности к деформации (изотропное упрочнение), МПа; $\bar{\epsilon}$ – значение эквивалентной пластической деформации, МПа; n – коэффициент, характеризует упрочнение материала при резании; C – коэффициент, который характеризует скорость; $\dot{\epsilon}^*$ – величина скорости пластических деформаций, мм/с; m – характеристика процесса термического охрупчивания.

В данной модели, описываемой формулой (1), первый множитель отражает эффект упрочнения (наклепа), второй – динамическое упрочнение, а третий – термическое разупрочнение.

Моделирование процесса формирования подрезки стержня осуществлялось с применением модели Джонсона – Кука, которая учитывает накопление повреждений. Связанная модель задаётся формулой

$$\epsilon_f = \left(D_1 + D_2 \times \exp \left(D_3 \times \frac{p}{q} \right) \right) \times \left(1 + D_4 \times \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \times \left(1 + D_5 \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right), \quad (2)$$

где D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – параметры разрушения материала; p – величина статического давления, МПа; q – напряжение Мизеса, МПа.

Параметры разрушения материала D определяются по формуле

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\epsilon_f}, \quad (3)$$

где $\Delta \bar{\epsilon}$ – инкремент пластической деформации во время цикла интегрирования.

Результаты и обсуждения

Суть предложенного метода подрезки стержня после кольцевого сверления состоит в использовании упругой деформации для точного направления режущей пластины к центру обрабатываемого отверстия, что и обеспечивает качественное удаление стержня.

На рис. 3 изображена разработанная конструкция режущего инструмента, предназначенного для извлечения стержня из глухого отверстия после обработки кольцевым сверлом [20]. Инструмент включает в себя корпус с осью вращения 1. В его состав входят хвостовик 2 и рабочая часть. Последняя, в свою очередь, состоит из упругого элемента 3, направляюще-опорного участка 4 с упорным выступом 5 и режущей зоны 6 с лезвием 7. Упорный выступ 5 и режущий элемент 7 могут быть выполнены как неразъёмная часть корпуса и рабочей зоны (включающей направляюще-опорный участок 4 и режущую зону 6), так и в виде сменных деталей. В последнем случае они изготавливаются из более износостойкого материала, отличного от основного корпуса, например, из быстрорежущей стали или твёрдого сплава. Упругий элемент 3 представляет собой тонкостенную изогнутую пластину. Её кривизна соответствует дуге, длина которой равна или составляет менее одной трети диаметра хвостовика 2 корпуса инструмента. Такая конфигурация придаёт рабочей части необходимую гибкость. Это проявляется в упругости элемента 3 при воздействии реактивной силы со стороны обрабатываемой детали на упорный выступ 5. Конструкция обеспечивает перемещение направляюще-опорного участка 4 (вместе с выступом 5) и режущей зоны 6 (с лезвием 7) к оси вращения 1 за счёт движения инструмента с окружной скоростью V в направлении подачи S . Одновременно данное решение гарантирует высокую жёсткость на кручение рабочей части, в частности упругого элемента 3. Это необходимо для стабильного процесса резания, выполняемого лезвием 7.

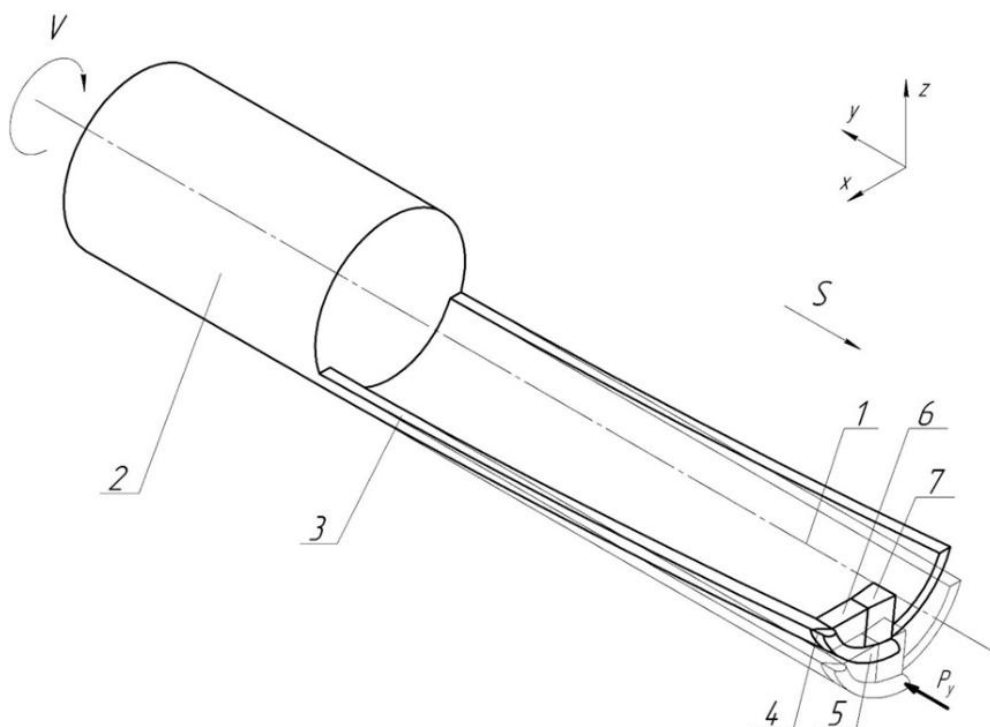


Рис. 3. Режущий инструмент, предназначенный для выемки стержня из несквозного отверстия, полученного кольцевым сверлением

Fig. 3. Cutting tool designed for core removal from blind holes produced by ring drilling

Инструмент вставляют в кольцевое отверстие до упора в его дно. При этом дно должно иметь коническую форму, что представлено на рис. 4.

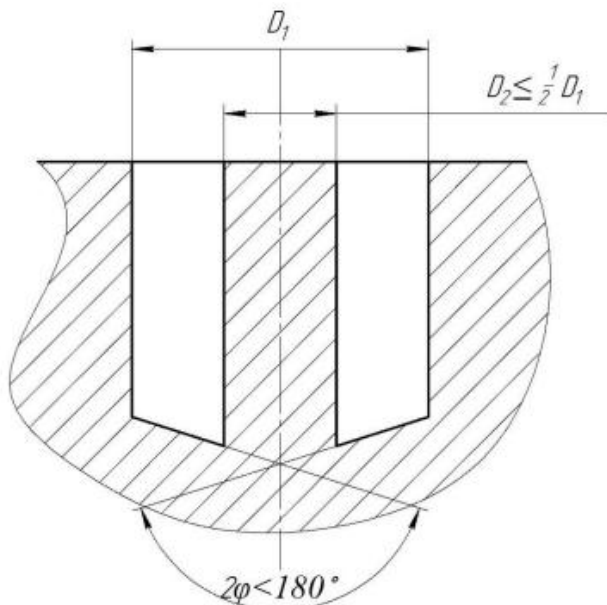


Рис. 4. Отверстие с дном конической формы
Fig. 4. Hole with conical base

керна (стержня) (рис. 5). Как только сила реакции опоры P_y заготовки на инструмент станет больше силы реакции опоры керна P_p , режущий элемент начнёт подрезать kern (стержень) (рис. 6).

Преимущества нового метода: работа инструмента выполняется без использования подвижных соединений и только за счет упругой деформации самого инструмента, за счет этого повышается надежность и работоспособность инструмента.

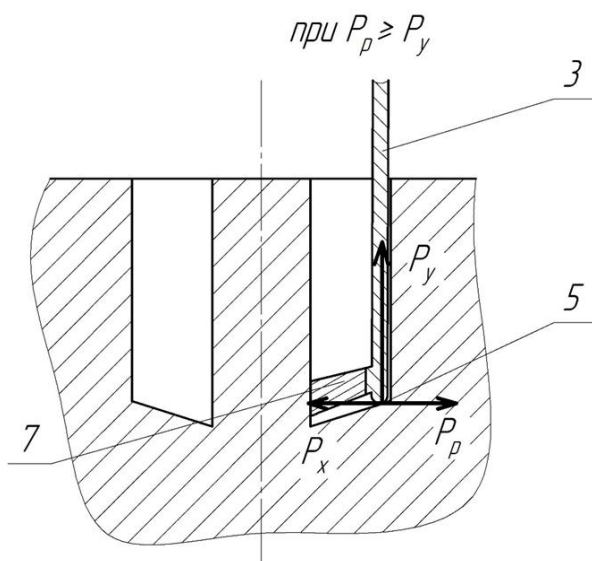


Рис. 5. Инструмент, помещенный в кольцевое отверстие
Fig. 5. Tool inserted into the annular hole

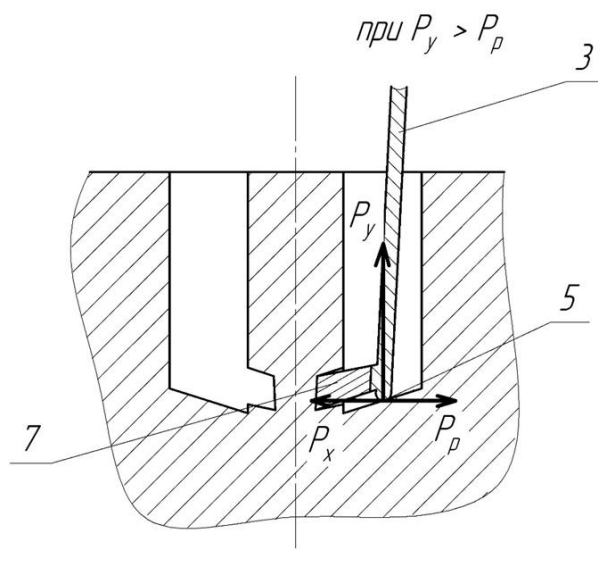


Рис. 6. Подрезание стержня
Fig. 6. Core undercutting

Для оценки работоспособности новой конструкции режущего инструмента в среде Abaqus были созданы трёхмерные модели инструмента и заготовки после кольцевого сверления, что представлено на рис. 7 и 8.

Анализ результатов симуляции, проведённой в среде Abaqus, подтверждает, что новый инструмент успешно реализует заложенную функцию – стержень был полностью отрезан. Иллюстрация процесса моделирования представлена на рис. 9.

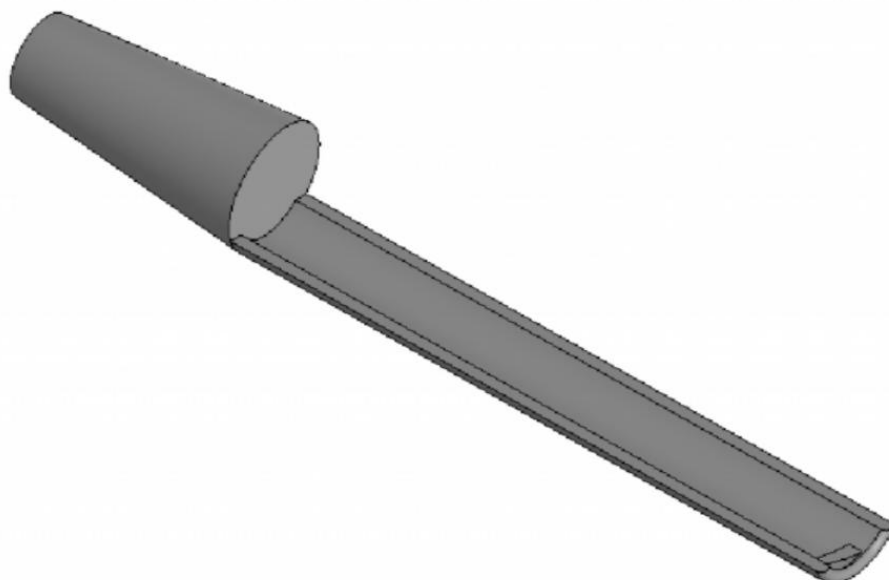


Рис. 7. Трёхмерная модель нового инструмента
Fig. 7. Three-dimensional model of the new cutting tool

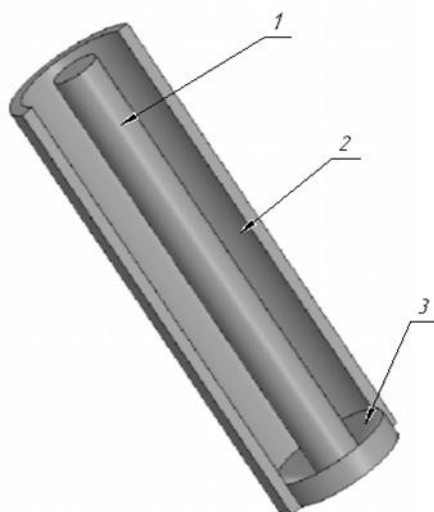


Рис. 8. Трёхмерная модель заготовки после кольцевого сверления:
1 – стержень; 2 – наружная стенка; 3 – дно отверстия с уклоном
Fig. 8. Three-dimensional model of the workpiece after annular drilling:
1 – core; 2 – outer wall; 3 – hole bottom with slope

Для расчёта готового инструмента в качестве заготовки выбрана деталь после обработки кольцевым сверлом с наружным диаметром 80 мм и внутренним диаметром 40 мм. В качестве материала детали использована сталь 20, а режущая часть выполнена из твёрдого сплава Т5К10. Режимы обработки: скорость резания – 60 м/мин, подача – 0,1 мм/об.

Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов.

1. Разработан новый метод обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления, который заключается в осуществлении подрезки стержня режущим инструментом с упругим корпусом.

2. Разработана и запатентована конструкция режущего инструмента [20], реализующая новый метод обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления, обеспечивающая упругую деформацию корпуса такого инструмента под влиянием силы реакции опоры от детали на опорную поверхность и смещение направляющей опоры с режущим лезвием к оси вращения.

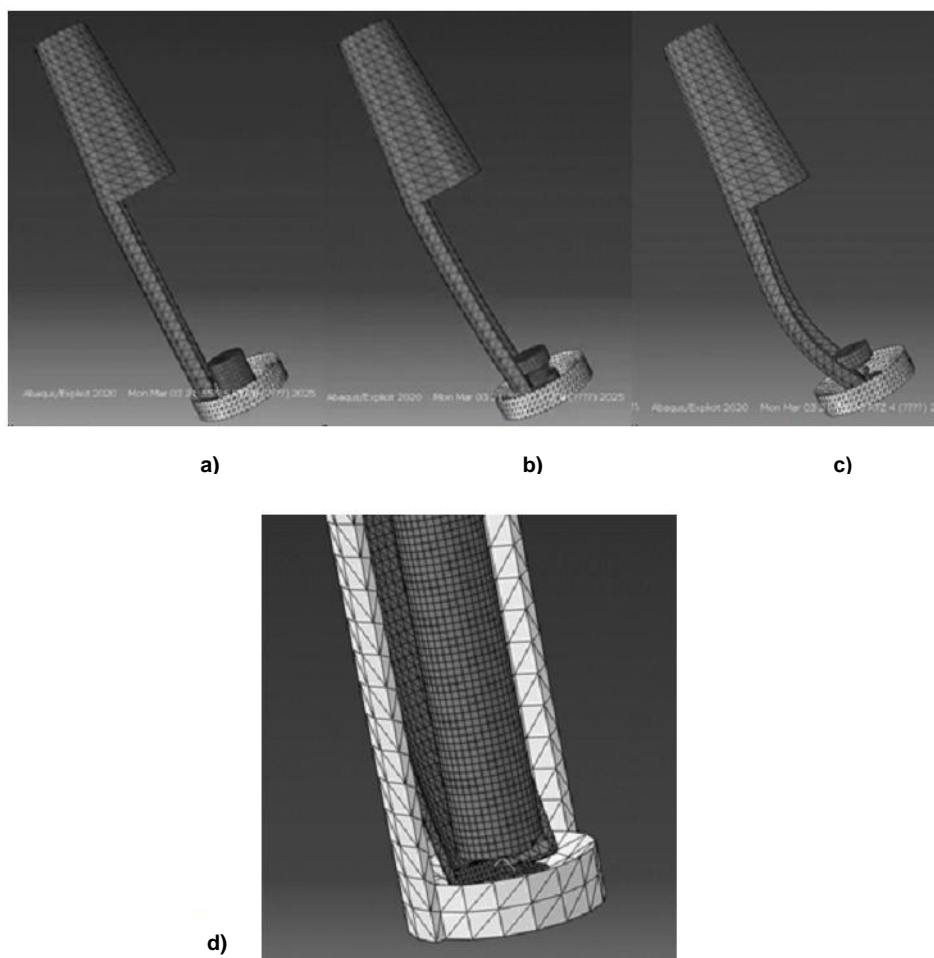


Рис. 9. Симуляция работы нового инструмента: а) исходное положение; б) момент врезания инструмента в стержень; с) момент начала отделения стержня; д) полное отделение стержня

Fig. 9. Simulation of the new tool operation: a) initial position; b) moment of tool engagement with the core; c) moment of core separation initiation; d) complete core separation

3. Путем симуляции работы новой конструкции режущего инструмента в программной среде Abaqus обоснована работоспособность нового метода обработки глубоких отверстий после кольцевого сверления.

Список литературы

1. Обработка глубоких отверстий в машиностроении: справочник / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе. М.: Машиностроение, 2010. 344 с.
2. Audy J. A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on forces and power in drilling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 204. P. 130–138. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.079.
3. Ke F., Ni J., Stephenson D.A. Continuous chip formation in drilling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. P. 1652–1658. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.011.
4. Гузев В.И., Шаламов В.Г., Морозов А.В. Обеспечение стойкости мелкоразмерных сверл при глубоком сверлении // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2024. Т. 24, № 3. С. 53–63. DOI: 10.14529/engin240305.
5. Древаль А.Е., Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2011. № 10. С. 1.

6. Самсонов В.А., Рагрин Н.А., Стародубов И.И. Особенности износа ленточек и уголков быстрорежущих спиральных сверл // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2013. № 29. С. 129–133.
7. Рагрин Н.А. Влияние условий обработки на физическую модель износостойкости инструмента при сверлении // Технология машиностроения. 2013. № 12. С. 15–24.
8. Древаль А.Е., Ткаченко И.В., Рагрин Н.А. Модели отказов спиральных сверл // Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности: материалы семинара. М.: Центральный Российский Дом Знаний, 1992. С. 55-62.
9. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 1971. 276 с.
10. Звонцов И.Ф., Серебrenицкий П.П., Схиртладзе А.Г. Технологии сверления глубоких отверстий: учебное пособие. СПб.: Лань, 2022. 496 с.
11. Авдеева А.А., Клевцов П.С. Удаление сердечника после кольцевого сверления глухого отверстия // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: БелГТУ, 2018. С. 1962–1968.
12. Developed numerical Analysis of Residual Stress caused by Welding and Cutting in Steel Structures / Li Z. et al. // Ce/Papers. 2023. Vol. 6. No. 3-4. P. 1507–1512. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_1_251
13. Investigation of Dynamic Behavior and Process Stability at Turning of Thin-Walled Tubular Workpieces Made of 42CrMo4 Steel Alloy / Mehdi K. et al. // Machines. 2024. Vol. 12, no. 2. P. 120. DOI: 10.3390/machines12020120
14. Pal S., Velay X., Saleem W. Finite element investigation of cutting speed effects on the machining of Ti6Al4V alloy // Discover Mechanical Engineering. 2024. Vol. 3. No. 1. P. 1. DOI: 10.1007/s44245-024-00031-0
15. Wakjira M. W., Janaki Ramulu P. Analysis of turning chip morphology with various tool geometries using finite element modeling and simulation to optimize product sustainability // Advances in Mechanical Engineering. 2022. Vol. 14. No. 11. P. 16878132221136421. DOI: 10.1177/16878132221136421.
16. Yang D. et al. Finite Element Modelling and Experimental Validation of the Graphite Cutting Process // Processes. 2023. Vol. 11. No. 9. P. 2546. DOI: 10.3390/pr11092546.
17. Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspiwall D. A Coupled Eulerian Lagrangian Finite Element Model of Drilling Titanium and Aluminium Alloys // SAE Int. J. Aerosp. 2016. V. 9(1). P. 198–207. DOI: 10.4271/2016-01-2126.
18. Isbilir O., Ghassemieh E. Finite element analysis of drilling of titanium alloy // Procedia engineering. 2011. Vol. 10. P. 1877–1882. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.312.
19. Ma Y., Liang Z., Wan K. Development of a New Micro Drilling Tool with H-Shaped Chisel Edge // Metals. 2023. Vol. 13(608). P. 1–14. DOI: 10.3390/met13030608
20. Патент на полезную модель № 241930 U1 Российская Федерация, МПК В23В 51/04. Режущий инструмент: заявл. 26.12.2025; опубл. 04.03.2026 / В.Е. Овсянников, М.О. Чернышов, С.В. Никитин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

References

1. Kirsanov S.V., Grechishnikov V.A., Grigoriev S.N., Skhirtladze A.G. *Obrabotka glubokikh otverstiy v mashinostroyenii* [Deep hole machining in mechanical engineering]. Moscow, 2010. 344 p.
2. Audy J. A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on forces and power in drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 204, pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.079.
3. Ke F., Ni J., Stephenson D. A. Continuous chip formation in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1652–1658. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.011.
4. Guzeev V.I., Shalamov V.G., Morozov A.V. Ensuring the durability of small-sized drills during deep drilling. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 53-63. DOI: 10.14529/engin240305. (In Russ.)

5. Dreval A.E., Ragrın N.A., Samsonov V.A. Formation of failures of twist drills in automated production. Electronic scientific and technical publication. *Mechanical engineering and computer technologies*, 2011, no. 10, p. 1. (In Russ.)
6. Samsonov V.A. Ragrın N.A., Starodubov I.I. Features of wear of ribbons and corners of high-speed twist drills. *Bulletin of KSTU im. I. Razzakova*, 2013, no. 29, pp. 129–133. (In Russ.)
7. Ragrın N.A. Effect of processing conditions on the physical model of tool wear resistance during drilling. *Technology of mechanical engineering*, 2013, no. 12, pp. 15–24. (In Russ.)
8. Dreval A.E., Tkachenko I.V., Ragrın N.A. Failure models of twist drills. *Problems of tool operation in the metalworking industry*, 1992, pp. 55–62. (In Russ.)
9. Troitsky, N.D. *Glubokoye sverleniye* [Deep drilling]. Leningrad, 1971. 276 p.
10. Zvontsov I.F., Serebrenitsky P.P., Skhirtladze A.G. *Tekhnologii sverleniya glubokikh otverstiy* [Deep Hole Drilling Technologies]. St. Petersburg, 2022. 496 p.
11. Avdeeva A.A., Klevtsov P.S. Removal of the core after annular drilling of a blind hole. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova: Posvyashchena 165-letiyu V.G. Shukhova* [International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov: Dedicated to the 165th anniversary of V.G. Shukhov]. Belgorod, May 1–20, 2018. Belgorod, 2018, pp. 1962–1968. (In Russ.)
12. Li Z. et al. Developed numerical Analysis of Residual Stress caused by Welding and Cutting in Steel Structures. *Ce/Papers*, 2023, vol. 6, no. 3-4, pp. 1507–1512. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_1_251
13. Mehdi K. et al. Investigation of Dynamic Behavior and Process Stability at Turning of Thin-Walled Tubular Workpieces Made of 42CrMo4 Steel Alloy. *Machines*, 2024, vol. 12, no. 2, p. 120. DOI: 10.3390/machines12020120
14. Pal S., Velay X., Saleem W. Finite element investigation of cutting speed effects on the machining of Ti6Al4V alloy. *Discover Mechanical Engineering*, 2024, vol. 3, no. 1, p. 1. DOI: 10.1007/s44245-024-00031-0
15. Wakjira M. W., Janaki Ramulu P. Analysis of turning chip morphology with various tool geometries using finite element modeling and simulation to optimize product sustainability. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, vol. 14, no. 11, p. 16878132221136421. DOI: 10.1177/16878132221136421.
16. Yang D. et al. Finite Element Modelling and Experimental Validation of the Graphite Cutting Process. *Processes*, 2023, vol. 11, no. 9, p. 2546. DOI: 10.3390/pr11092546.
17. Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspiwall D. A Coupled Eulerian Lagrangian Finite Element Model of Drilling Titanium and Aluminium Alloys. *SAE Int. J. Aerosp*, 2016, vol. 9(1), pp. 198–207. DOI: 10.4271/2016-01-2126.
18. Isbilir O., Ghassemieh E. Finite element analysis of drilling of titanium alloy. *Procedia engineering*, 2011, vol. 10, pp. 1877–1882. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.312.
19. Ma Y., Liang Z., Wan K. Development of a New Micro Drilling Tool with H-Shaped Chisel Edge. *Metals*, 2023, vol. 13(608), pp. 1–14. DOI: 10.3390/met13030608.
20. Ovsyannikov V. E. et al. *Rezhushchiy instrument* [Cutting tool]. Patent RF, no. 241930, 2026.

Информация об авторах

Овсянников Виктор Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; ovsjannikovve@tyuiu.ru

Лопатин Борис Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия; lopatinba@susu.ru

Чернышов Михаил Олегович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; chernyshovmo@tyuiu.ru

Костив Татьяна Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная механика», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; kostivte@tyuiu.ru

Никитин Сергей Викторович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; nikitinsv@tyuiu.ru

Маслов Егор Игоревич, обучающийся кафедры «Технология машиностроения», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; eg0rmasloff@yandex.ru

Information about the authors

Viktor E. Ovsyannikov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia; ovsjannikovve@tyuiu.ru

Boris A. Lopatin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools, and Tools, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russia; lopatinba@susu.ru

Mikhail O. Chernyshov, PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia; chernyshovmo@tyuiu.ru

Tatyana E. Kostiv, PhD, Associate Professor, Department of Applied Mechanics, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia; kostivte@tyuiu.ru

Sergey V. Nikitin, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia; nikitinsv@tyuiu.ru

Egor I. Maslov, Student, Department of Mechanical Engineering Technology, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia; eg0rmasloff@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; принята к публикации 27.04.2026.

The article was submitted 10.04.2026; accepted for publication 27.04.2026