



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)







### Влияние формы тороидальной задней поверхности на углы режущего клина и механические напряжения вдоль режущей кромки сверла

Петр Пивкин <sup>a, \*</sup>, Артем Ершов <sup>b</sup>, Никита Миронов <sup>c</sup>, Алексей Надыкто <sup>d</sup>

Московский государственный технологический университет Станкин, Вадковский пер., 3а, г. Москва, 127055, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7547-4652>,  [PMPivkin@gmail.com](mailto:PMPivkin@gmail.com); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3966-7032>,  [a.ershov@stankin.ru](mailto:a.ershov@stankin.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-4205-6996>,  [dzr1380im@gmail.com](mailto:dzr1380im@gmail.com); <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3652-7421>,  [a.nadykto@stankin.ru](mailto:a.nadykto@stankin.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.025.6/621.9.025.7

#### История статьи:

Поступила: 01 сентября 2023  
 Рецензирование: 18 сентября 2023  
 Принята к печати: 27 сентября 2023  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2023

#### Ключевые слова:

Сверло  
 Тороидальная задняя поверхность  
 Режущий клин  
 МКЭ

#### Финансирование

Работа была выполнена при финансировании Российского научного фонда (проект № 23-29-00999, <https://rscf.ru/project/23-29-00999/>) с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный Инжиниринговый Центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Сверление отверстий с качеством точности от IT8 до IT12 широко применяется в промышленном производстве. Однако в настоящее время не существует исследований и научно-обоснованных рекомендаций по назначению геометрии режущей части сверл с тороидальной задней поверхностью. В связи с этим разработка САПР новых конструкций сверл с тороидальной задней поверхностью и численное моделирование напряженного состояния их режущей части являются актуальными задачами. **Цель работы:** уменьшение диапазона изменения переднего угла и угла заострения режущего клина вдоль режущей кромки от периферии к центру, а также снижение эквивалентных напряжений в режущем клине. **В работе исследованы** изменения величины переднего угла и угла заострения режущего клина в зависимости от радиуса образующей тороидальной задней поверхности; изменения эквивалентных напряжений в режущем клине в зависимости от изменения радиуса образующей тороидальной задней поверхности. **Методами** исследования являются основы теории о режущем инструменте, методы его автоматизированного проектирования и метод конечных элементов, примененный в данной работе к новым конструкциям сверл. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что с уменьшением радиуса образующей задней поверхности уменьшается диапазон изменения переднего угла и угла заострения режущего клина сверла по сравнению со стандартной конструкцией. Разработана система автоматизированного проектирования сверл с тороидальной задней поверхностью. В результате величина диапазона изменения переднего угла вдоль режущей кромки уменьшилась на 86 % у сверла с минимальным радиусом образующей тороидальной поверхности по сравнению с конической заточкой, диапазон угла заострения режущего клина уменьшился на 56 %, максимальные эквивалентные напряжения снизились в 2,13 раза. При этом угол заострения режущего клина имеет значение, близкое к постоянному, на половине зуба сверла. Данные показатели превышают все показатели существующих на сегодняшний день аналогичных конструкций спиральных сверл.

**Для цитирования:** Влияние формы тороидальной задней поверхности на углы режущего клина и механические напряжения вдоль режущей кромки сверла / П.М. Пивкин, А.А. Ершов, Н.Е. Миронов, А.Б. Надыкто // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 151–166. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-151-166.

### Введение

Сверление отверстий применяется в производстве изделий в большинстве областей промышленности. Наиболее широко распространенной конструкцией сверл являются спиральные сверла. Достоинства спиральных сверл: хороший отвод стружки из обрабатываемого

отверстия; простота конструкции и, следовательно, низкая трудоемкость переточки на заточных станках; высокая точность позиционирования в отверстие ввиду наличия калибровочных ленточек [1]. Главные режущие кромки сверла располагаются на конической режущей части с углом  $2\phi$ . Угол  $2\phi$  выполняет роль угла в плане и может изменяться от 70 до 135° [2].

При этом существует ряд недостатков в конструкции спиральных сверл: уменьшение переднего угла вдоль режущей кромки (РК) вплоть до отрицательного при приближении к центру; слишком большие передние углы на периферии.

#### \*Адрес для переписки

Пивкин Петр Михайлович, к.т.н., доцент  
 Московский государственный технологический университет Станкин,  
 Вадковский пер., 3а,  
 127055, г. Москва, Россия  
 Тел.: +7 (903) 231-66-80, e-mail: PMPivkin@gmail.com

Для устранения этих недостатков предложено конструктивное решение сверла с подточкой в центре. Подточка выполнена либо для уменьшения участка с отрицательными значениями переднего угла [3], либо с положительным передним углом вдоль всей подточки [4]. В инструментальном производстве также существуют решения с подточкой вдоль всей режущей кромки [5]. Однако реализация такой конструкции возможна только при небольших передних углах, что может привести к повышению сил резания и ускорению изнашивания сверла [6].

Для уменьшения переднего угла на периферии применяют конструкцию сверла с двумя коническими участками с различными углами образующей  $\varphi$ . На периферии конус имеет меньший угол: например, для угла  $2\varphi = 118^\circ$  второй конический участок имеет угол  $70^\circ$  [7]. В результате у данной конструкции сверла передний угол на периферии может быть уменьшен на  $7-8^\circ$ , что позволит разгрузить наиболее подверженные износу участки. В результате уменьшения угла  $\varphi$  уменьшается толщина и увеличивается ширина стружки, а также улучшается теплоотвод, что позволяет увеличить стойкость инструмента более чем в три раза [1]. Такая конструкция имеет недостаток в виде неравномерного изменения ширины срезаемого слоя и образования концентратора напряжения на переходной зоне. Устранить указанные проблемы позволяет применение спирального сверла не с конической, а с тороидальной задней поверхностью.

По сравнению с аналитическими моделями [8] алгоритмы анализа трехмерного моделирования обеспечивают более полные и точные результаты контроля передних углов вдоль режущей кромки сверла. В настоящее время моделирование специализированных автоматизированных алгоритмов применяется для оценки геометрических параметров различных классов инструментов, поэтому обоснование выбора геометрических параметров рассматриваемого класса сверл в данной работе формируется на базе САПР новых конструкций сверл с тороидальной задней поверхностью. Кроме того, некоторые принципиально важные показатели эксплуатации сверл, такие как напряжения в режущем клине, которые трудно получить экспериментально, могут быть легко предсказаны

с помощью анализа методом конечных элементов (МКЭ) [9–11].

При численном моделировании процессов металлообработки возникают две основные проблемы процесса разработки моделей с применением МКЭ. Первая заключается в том, что модель материала должна адекватно отражать деформационное состояние при нагрузке с различной интенсивностью и направлением напряжений, приложенных к конструкции, в диапазоне рабочих условий и учитывать характер внутреннего напряжения в конструкции [12–14]. Вторая проблема связана с моделированием и численной реализацией изменения конфигурации режущей части в процессе формообразования в зависимости от состояния технологической системы [15, 16]. Численное моделирование процессов механической обработки осложняется множественными участками контакта режущего клина с обрабатываемым материалом [17, 18]. Указанные проблемы невозможно решить, используя стандартные методы конечных элементов [19]. В настоящее время проводится множество работ, направленных на решение указанных проблем, регулярно возникающих при численном моделировании процессов резания [20, 21]. Несмотря на то что в области исследования проведено множество работ, посвященных использованию метода конечных элементов для прогнозирования рабочих характеристик при обработке широкого спектра материалов заготовок [22], не существует моделей с применением МКЭ для исследования характеристик конструкций сверл с тороидальной задней поверхностью.

По результатам обзора литературы можно сделать вывод о том, что хотя на сегодняшний день существует несколько разновидностей конструкций сверл со сферической или тороидальной задней поверхностью, но исследований и рекомендаций по назначению геометрии их режущей части и параметров оценки эффективности их работы не существует. Кроме того, не существует систем автоматизированного проектирования сверл с тороидальной задней поверхностью и устоявшихся механизмов численного моделирования напряженного состояния режущей части. В связи с этим **целью данного исследования** является уменьшение диапазона изменения переднего угла и угла заострения режущего клина вдоль режущей кромки от пери-

ферии к центру, а также снижение эквивалентных напряжений в режущем клине за счет применения сверл с тороидальной задней поверхностью с рациональными геометрическими параметрами.

Для достижения поставленной цели необходимо **решить следующие задачи**: 1) разработать систему автоматизированного проектирования (САПР) сверл с тороидальной задней поверхностью; 2) провести исследование изменения величины переднего угла и угла заострения режущего клина в зависимости от радиуса образующей тороидальной задней поверхности; 3) провести исследование изменения эквивалентных напряжений в режущем клине в зависимости от изменения радиуса образующей тороидальной задней поверхности.

## Методика исследований

В основе исследования геометрических и эксплуатационных характеристик сверл сформирована система автоматизированного проектирования для создания конструкций в широком диапазоне конструктивных исполнений. Алгоритм САПР включает в себя методики проектирования как стандартных конструкций сверл, так и усовершенствованных конструкций с тороидальной задней поверхностью, выделенных в отдельную подсистему. Исходные параметры для проектирования сверл представлены в табл. 1.

Автоматизированное проектирование спиральных сверл основывается на исходных дан-

Таблица 1

Table 1

**Исходные параметры для проектирования сверл**  
**Initial parameters for drill design**

Обозначение параметра	Название параметра
$R$	Радиус сверла
$d_s$	Диаметр сердцевины
$\alpha$	Задний угол
$\gamma$	Передний угол
$\beta$	Угол заострения режущего клина
$\gamma_k$	Передний угол профиля стружечной канавки
$\omega$	Угол наклона стружечной канавки
$R_t$	Радиус образующей тороидальной задней поверхности
$\varphi$	Угол в плане
$\kappa$	Смещение образующей тороидальной задней поверхности относительно оси сверла
$\eta$	Угол между точкой касания окружности, задающей тороидальную образующую, и точкой пересечения окружности с периферией
$L$	Длина сверла
$l_r$	Длина рабочей части
$f$	Ширина ленточки
$v$	Величина, задающая точку положения касания тороидальной образующей относительно оси сверла
$r$	Радиус спинки профиля винтовой канавки сверла
$r_p$	Радиус окружности, задающий контрольное сечение, которое определяет значение заднего угла сверла
$R_{\min}$	Минимальный радиус образующей тороидальной задней поверхности сверла
$l_T$	Длина главной режущей кромки в контрольной точке, измеренной от начального положения. Начальное положение кромки задается в точке пересечения главной и поперечной режущих кромок
$l$	Общая длина главной режущей кромки

ных, определяющих совокупность технологических, физико-механических и эксплуатационных показателей и их взаимосвязей с конструктивными элементами как основу методики проектирования. Автоматизированное проектирование конструкций осуществляется за счет последовательной методики на основе влияния наиболее важных элементов и ограничений при разработке конструкторской документации. Создание такой системы играет важную роль в разработке режущих инструментов и отраслевых НИОКР, что может значительно повысить эффективность проектирования сверл и его качества, помочь разработчикам выйти из различных научных областей и использовать эффективные технологии и методы для создания научных и инновационных схем проектирования, а также значительно повысить эффективность проектирования и разработки продукта. Чтобы значительно повысить эффективность технологических инноваций, сначала были проанализированы ключевые параметры: изменения переднего угла и внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине сверла. С этой целью на результаты проектирования должны быть наложены опреде-

ленные ограничения в виде рекомендуемых диапазонов и контрольных значений параметров. Анализ взаимосвязей конструктивных элементов и геометрических параметров спирального сверла с тороидальной задней поверхностью осуществляется исходя из обрабатываемого и инструментального материала, режимов резания и взаимозависимых особенностей конструкции. На сегодняшний день не существует формализованных зависимостей в аналитическом, численном и алгоритмизированном виде между параметрами технологической среды и параметрами сверла, поэтому в данной работе впервые предложена комплексная методика проектирования сверл с тороидальной задней поверхностью. Комплексная методика разработки САПР спиральных сверл базируется на классических подходах к проектированию сверл и разбита на подэлементы моделирования (рис. 1). Первый блок проектирования включает структурную базу исходных данных в соответствии с ГОСТ 17275–71 ( $R, d_s, \alpha, \gamma_k, \omega, R_p, \varphi, \kappa, \eta, L, l_r, f, v$ ).

В зависимости от формы режущей кромки методика проектирования включает в себя две группы конструктивных исполнений режущей

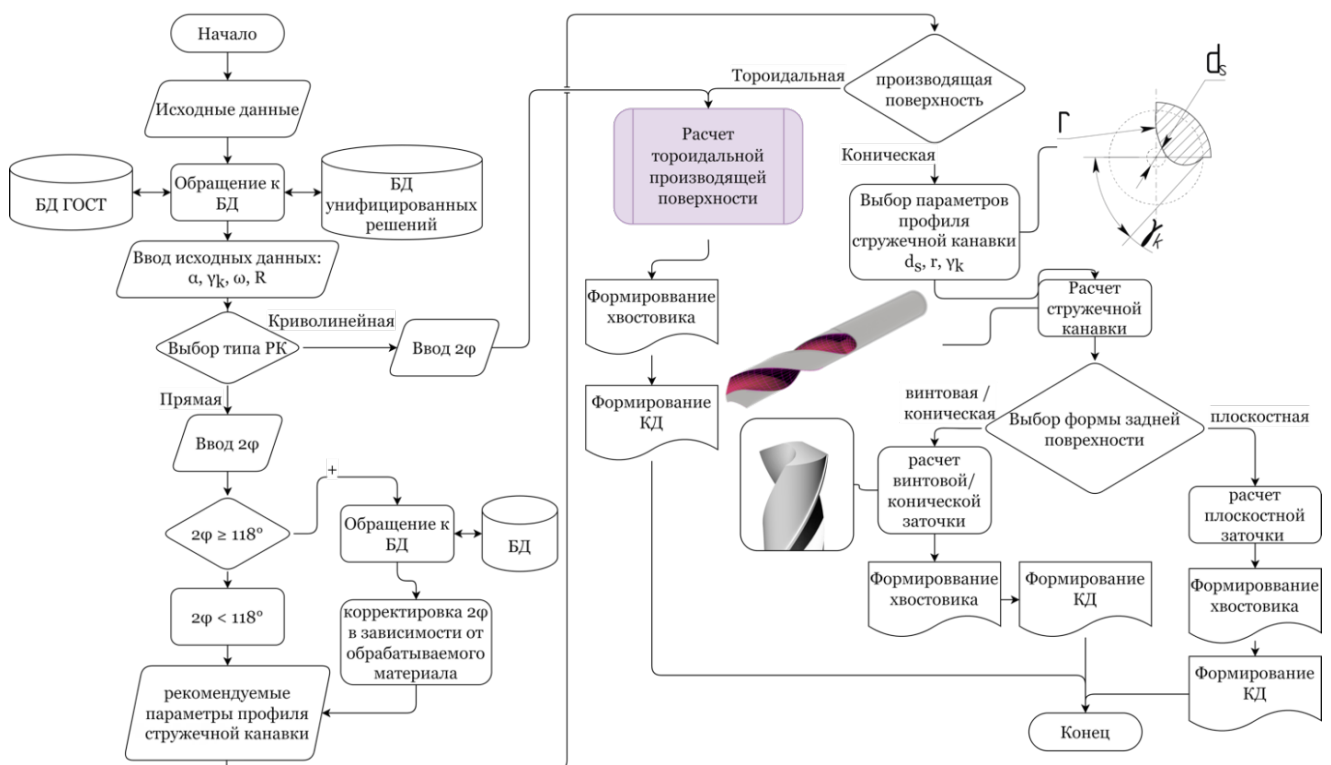


Рис. 1. Комплексная блок-схема САПР спиральных сверл

Fig. 1. Complex CAD block schematic diagram of twist drills

кромки. Для формирования прямолинейной режущей кромки сверла с конической производящей поверхностью система формирует условия поиска рациональной формы канавки [7] (рис. 2).

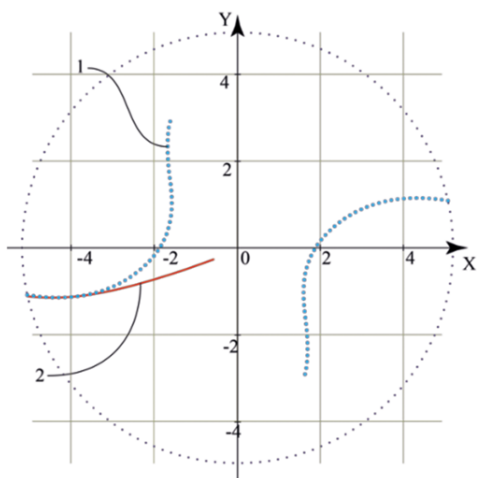


Рис. 2. Определение профиля винтовой канавки (1) и элемента профиля на передней поверхности (2)

Fig. 2. Defining the profile of the spiral flute (1) and the profile element of flute on the rake surface (2)

Определение винтовой проекции режущей кромки описывается следующими уравнениями:

$$Pr_y = -RK\Xi_{ty} \cos \left( \frac{B + \tan \left( \sqrt{RK\Xi_{tx}^2 + RK\Xi_{ty}^2} \right)}{\tan(\omega) \cdot \pi D d} \right) +$$

$$+ RK\Xi_{tx} \sin \left( \frac{B + \tan(\varphi) \sqrt{RK\Xi_{tx}^2 + RK\Xi_{ty}^2}}{\tan(\omega) \cdot \pi \sqrt{RK\Xi_{tx}^2 + RK\Xi_{ty}^2}} \right); \quad (1)$$

$$Pr_x =$$

$$= -RK\Xi_{tx} \cdot \cos \left( \frac{B + \tan(\varphi) \cdot \sqrt{RK\Xi_{tx}^2 + RK\Xi_{ty}^2}}{\tan(\omega) \cdot \pi \sqrt{RK\Xi_{tx}^2 + RK\Xi_{ty}^2}} \right) -$$

$$- RK\Xi_{ty} \cdot \sin \left( \frac{B + \tan(\varphi) \cdot \sqrt{RK\Xi_{tx}^2 + RK\Xi_{ty}^2}}{\tan(\omega) \cdot \pi \sqrt{RK\Xi_{tx}^2 + RK\Xi_{ty}^2}} \right). \quad (2)$$

Следующий этап методики проектирования заключается в твердотельном моделировании винтовой канавки и соответствующей ей производящей поверхности. В зависимости от

диаметра сверла назначается форма задней поверхности и формируется булева операция, задающая заднюю поверхность, выдерживая при этом форму режущей кромки и заданные геометрические параметры в контрольных сечениях ( $\alpha, \gamma_k, \omega, \varphi, \kappa, \nu$ ). На этом этапе проектирования формируют конструкторскую документацию для традиционных видов конструкций спиральных сверл.

В настоящей работе впервые предложена новая методика автоматизированного проектирования сверл с тороидальной задней поверхностью. Блок-схема данной методики представлена на комплексной блок-схеме и более детально приведена на рис. 3 в качестве отдельного алгоритма. Первым этапом проектирования является формирование актуальной совокупности исходных данных ( $R, d_s, \alpha, \gamma_k, \omega, R_r, \varphi, \kappa, \eta, L, l_r, f, \nu$ ). Диапазон назначения радиуса образующей тороидальной задней поверхности согласуется с диапазоном назначения задних углов и сопоставляется с наработанной базой данных проектирования, имеющей ряд типовых соотношений геометрических параметров сверла. В результате этого алгоритм определяет положение сечения, в котором задается значение заднего угла  $\alpha$ , либо этот параметр задается вручную. Далее формируется профиль стружечной канавки исходя из заданных величин диаметра сердцевины  $d_s$ , радиуса спинки  $r$  и радиального переднего угла  $\gamma_k$ . На основе данных профиля винтовой канавки спирального сверла формируется булева операция, задающая 3D-модель заготовки с винтовой канавкой.

Важным этапом разработки модели сверла является формирование производящей поверхности. Геометрические параметры, задающие булеву операцию, представлены на втором операторе алгоритма. Касательная к образующей производящей поверхности накладывает жесткое ограничение, обеспечивающее постоянный контакт образующей всей совокупности конструкций сверл под определенным углом в плане  $\varphi$ . Межосевое расстояние между осью тороидальной задней поверхности и осью сверла задается параметром  $\nu$ . Угол между точкой касания окружности, задающей тороидальную образующую, и точкой пересечения окружности с периферией  $\eta$  регулирует возможность назначения радиусу образующей задней поверхности

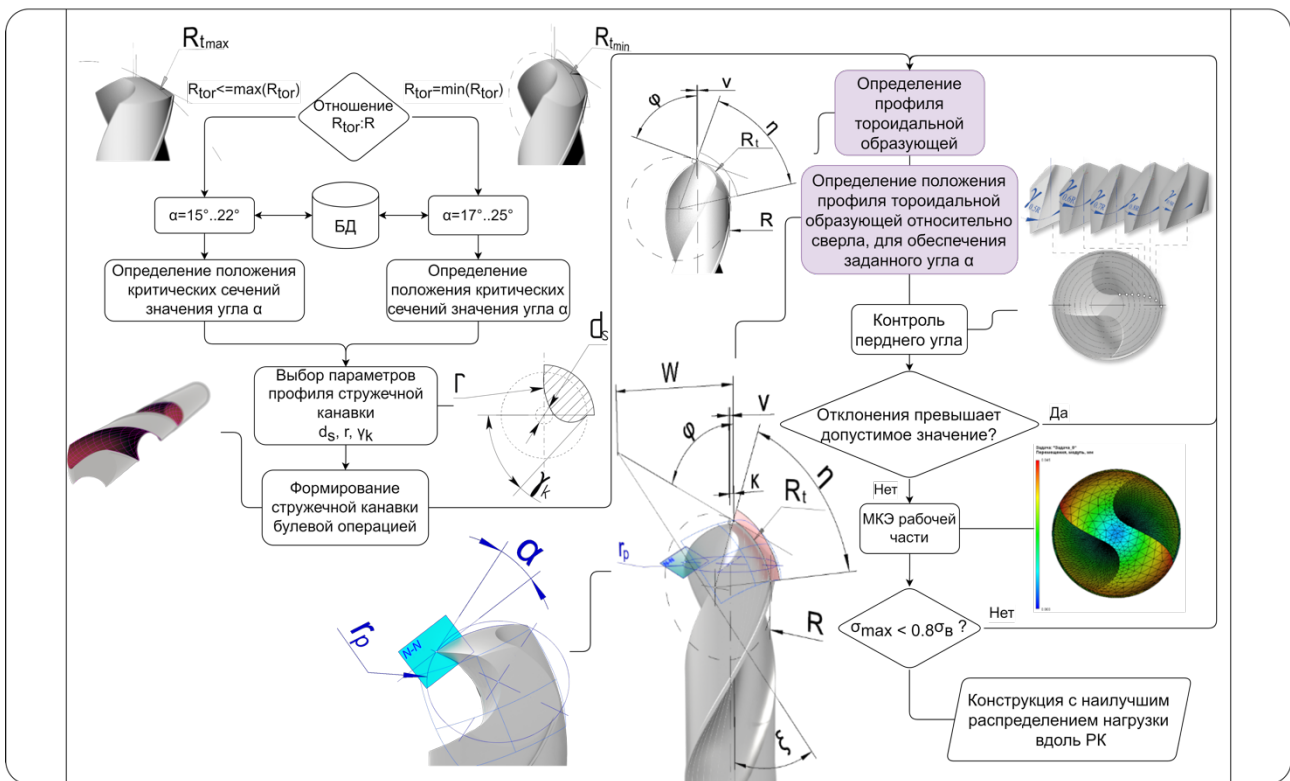


Рис. 3. Блок-схема САПР спиральных сверл с тороидальной задней поверхностью

Fig. 3. CAD block schematic diagram of twist drills with toroidal flank surface

параметрического и конструктивно связанного с ним угла в плане  $\varphi$  при известном радиусе тороидальной поверхности  $R_t$ .

Финальной задачей разработки параметрической модели спирального сверла с тороидальной задней поверхностью является формирование задней поверхности. Задняя поверхность представляет собой тороидальную поверхность, полученную путем вращения профиля булевой операции вычитания вокруг оси, расположенной под углом  $\varepsilon$  к оси сверла, и положением точки скрещивания этих осей на расстоянии  $W$  от оси сверла. Причем угол между касательной к задней поверхности и касательная в заданной точке на режущей кромке сверла с радиусом  $r_p$  является задним углом  $\alpha$ .

Комплексная методика САПР позволяет проектировать наиболее широко распространенные и специализированные конструкции спиральных сверл (рис. 4). На основе работы САПР и полученных конструкций с тороидальной задней поверхностью выполнено изучение распределения величины переднего угла вдоль режущей кромки, деформаций и напряженного состояния методом конечных элементов вдоль режущей кромки для конструкций с различными видами

заточки задней поверхности – конической и тороидальной, с различными радиусами образующей тороидальной поверхности  $R_t$  ( $R_{t\min}$ ,  $1,25R$ ,  $2,5R$ ). Изменение радиусов тороидальной задней поверхности осуществляется от  $2,5R$  (конструкция сверла по геометрии сопоставима со сверлом с конической заточкой) до минимально возможного радиуса образующей тороидальной задней поверхности  $R_{t\min}$ . Минимальный радиус образующей задней поверхности  $R_{t\min}$  определяется уравнением

$$R_{t\min} = \frac{R \cdot \tan(\varphi/2)}{\sin(\varphi)}. \quad (3)$$

Исследование геометрических параметров вдоль режущей кромки осуществлялось путем определения угла между касательной к передней (задней) поверхности в контрольной точке и перпендикуляра (касательной) к задней поверхности в контрольной точке (рис. 5).

Анализ зон контакта сверла с заготовкой был центральным аспектом для определения высоты передней поверхности, на которую непосредственно воздействуют возникающие механические нагрузки в САЕ-системе SolidWorks Simulation (рис. 6). К этой области применялись

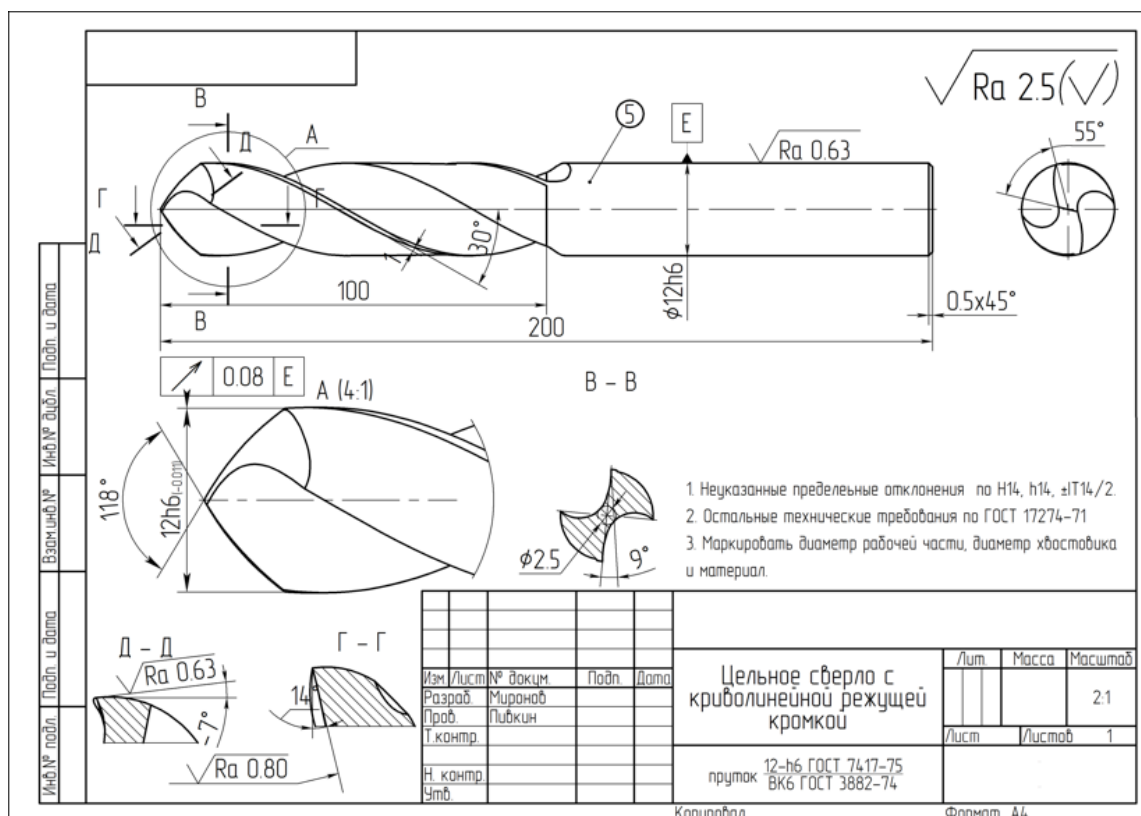


Рис. 4. Чертеж спирального сверла с тороидальной заточкой задней поверхности

Fig. 4. Technical drawing of a twist drill with toroidal flank surface

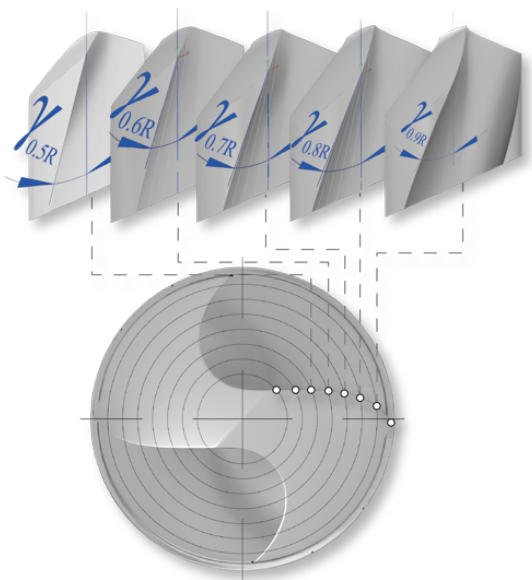


Рис. 5. Определение переднего угла на сверле с тороидальной заточкой задней поверхности

Fig. 5. Defining the rake angle on a drill with the toroidal flank surface

механические силы в моделировании МКЭ. Поэтому нагрузка в данном анализе прикладывается под углом, который задается касательной к траектории движения режущего клина в зоне

подачи на оборот  $S$  (0,2 мм/об). Зона приложения сил резания переформируется в зависимости от ширины срезаемого слоя при различных радиусах кривизны режущей кромки при постоянной подаче. Закрепление инструмента осуществляется по цилиндрической поверхности.

Минимальный размер элемента сетки должен быть как минимум в три раза меньше толщины стружки для моделирования образования стружки, и в этом случае соответствует очень мелкой локальной сетке.

Поскольку в работе варьируется форма осевого сечения сверла, то и форма срезаемого припуска изменяется. Поэтому для задания зоны нагружения целесообразно провести анализ срезаемого слоя с одной постоянной подачей ( $S = 0,2$  мм/об) при разных формах профилей производящих поверхностей (табл. 2).

На полученных схемах наблюдается значительное уменьшение срезаемого слоя на периферии при уменьшении радиуса кривизны образующей задней поверхности, что свидетельствует об уменьшении действующих на режущую кромку сил и формировании более благоприятных условий процесса резания.

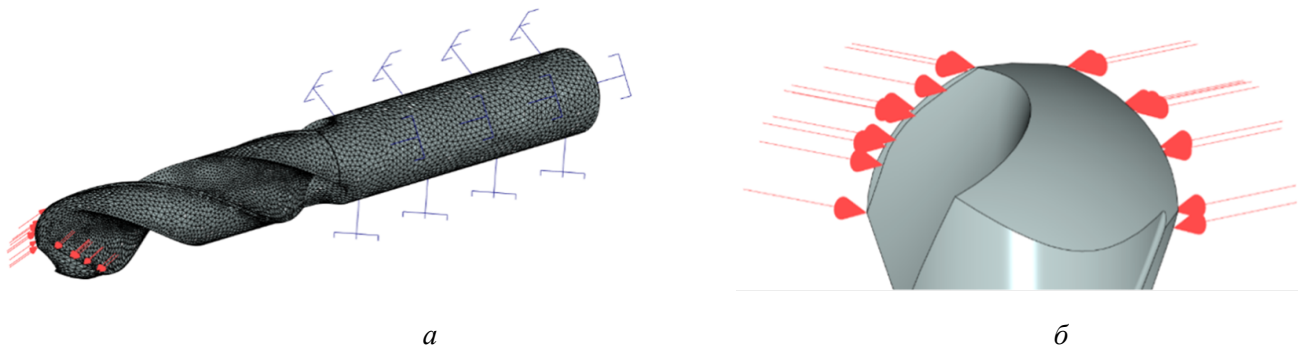


Рис. 6. Модель сверла с тороидальной заточкой в САЕ-системе SolidWorks Simulation:

*a* – вид в изометрии модели с сеткой; *б* – вид сбоку приложенных нагрузок

Fig. 6. Model of a drill with the toroidal flank surface in the *SolidWorks Simulation* CAE system:

*a* – isometric view of the model with a mesh; *b* – side view of applied loads

Таблица 2

Table 2

**Сравнение формы срезаемого слоя спиральными сверлами с различными параметрами задней поверхности (ЗП)**

**Comparison of the shape of the cut layer using twist drills with different parameters of the flank surface**

Параметр	Коническая заточка ЗП	Тороидальная заточка ЗП (2,5R)	Тороидальная заточка ЗП (1,25R)	Тороидальная заточка ЗП ( $R_{t\min}$ )
Срезаемый слой на периферии	$t = 0,19$ мм	$t = 0,17$ мм	$t = 0,13$ мм	$t = 0,04$ мм
Схема припуска				

В настоящей работе для проведения МКЭ сетка модели представляла собой трехмерные многогранники – тетраэдры. С одной стороны, они способны обеспечить высокую степень адаптации к сложной геометрии режущей части сверла с тороидальной задней поверхностью, с другой – предполагают высокую вычислительную сложность расчета. Для получения достоверных результатов также необходимо, чтобы размер элементов сетки был не менее чем в три раза меньше толщины снимаемой стружки. Вследствие данных ограничений размер сетки был выбран 0,02 мм для получения достоверных результатов напряжений на режущую часть различных конструкций сверл (рис. 7).

В качестве материала режущего инструмента был выбран твердый сплав ВК6 ввиду его эффективного применения в случае материалов, при обработке которых преобладает абразивное

изнашивание, например чугунов. Физико-механические свойства материала ВК6 для создания модели материала представлены в табл. 3.

По завершении решения задачи имеются эпюры эквивалентных напряжений и перемещений сверл с конической и тороидальной заточкой задней поверхности.

### Результаты и их обсуждение

По предложенной выше методике получены контрольные результаты измерения передних (рис. 8, *a*) и задних углов (рис. 8, *б*) для четырех конструкций спиральных сверл – одной конструкции с конической заточкой задней поверхности и трех конструкций с тороидальной заточкой задней поверхности с варьированием радиуса образующей тороидальной поверхности  $R_t$  ( $R_{t\min}$ , 1,25R, 2,5R). Исходные значения углов



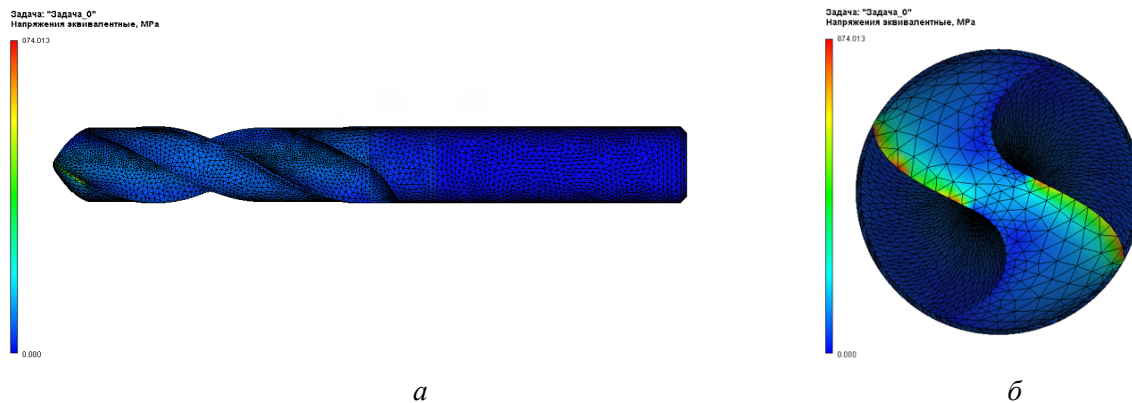


Рис. 7. Эпюра эквивалентных напряжений сверла с криволинейной задней поверхностью:

$a$  – вид сбоку;  $b$  – вид с торца

Fig. 7. Epure of equivalent stresses of a drill with a toroidal flank surface:

$a$  – side view;  $b$  – end view

Таблица 3

Table 3

### Физико-механические свойства материала ВК6

#### Physical and mechanical properties of hard alloy

Физико-механические свойства ВК6	Значение
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	1500
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	4300
Плотность, г/см <sup>3</sup> , не менее	14,6
Твердость HRA, не менее	88,5

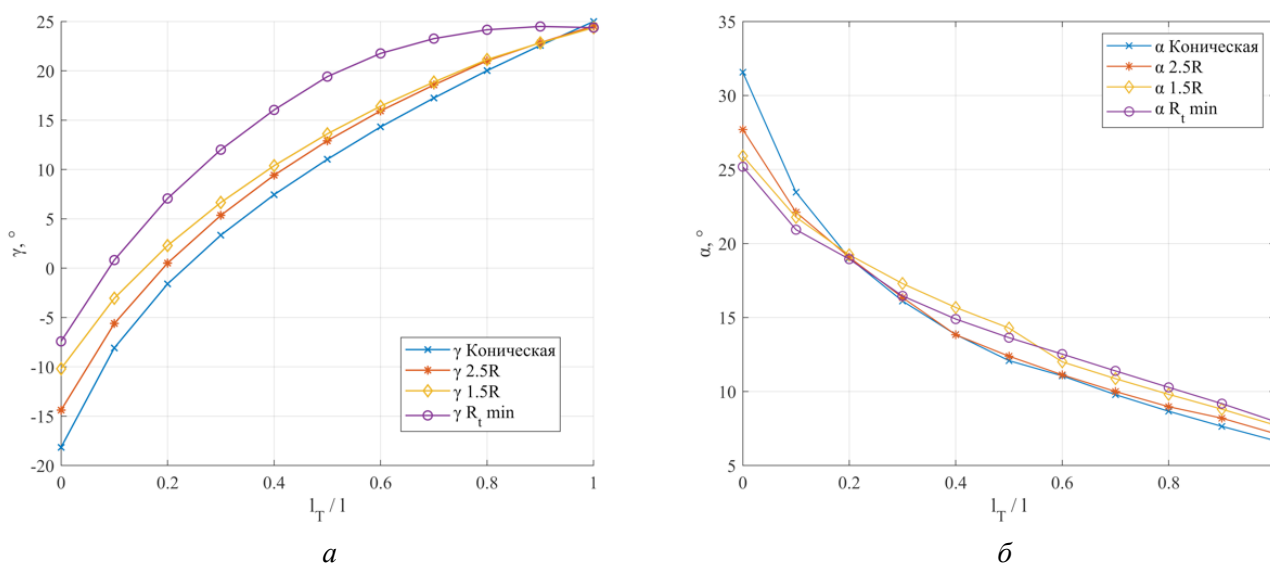


Рис. 8. Графики зависимости переднего ( $a$ ) и заднего ( $b$ ) углов различных конструкций сверл от отношения длины главной РК в контрольной точке, измеренной от начального положения, к общей длине главной РК

Fig. 8. Graphs of the dependence of the rake ( $a$ ) and clearance ( $b$ ) angles of various drill designs on the ratio of the length of the main cutting edge at the measurement point from the initial position, to the total length of the main cutting edge

при тороидальной заточке задней поверхности: переднего угла  $\gamma = 30^\circ$ ;  $\gamma_N = 25^\circ$ , при переходе в подточку  $\gamma_p = 2^\circ$ ; заднего угла  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\alpha_N = 8^\circ$ , при переходе в подточку  $\alpha_p = 22^\circ$ .

По результатам анализа графиков установлено, что сверла с тороидальной заточкой задних поверхностей имеют более равномерное уменьшение переднего угла от периферии к центру. Характер изменения переднего и заднего угла у сверл с тороидальной заточкой задней поверхности идентичен характеру изменения геометрических параметров сверл с конической заточкой. Передний угол  $\gamma$  принимает наибольшее значения, а задний угол  $\alpha$  – наименьшее на периферии сверла. Величина диапазона изменения переднего угла уменьшилась с  $[-18^\circ; 25^\circ]$  до  $[2^\circ; 25^\circ]$ , что говорит об уменьшении диапазона на 86 %. При уменьшении радиуса образующей задней тороидальной поверхности выявлено снижение интенсивности уменьшения переднего угла и увеличения заднего угла. Эта тенденция делает изменение величины угла заострения режущего клина от периферии к центру более равномерным. Величина диапазона изменения угла заострения режущего клина уменьшилась с  $[58^\circ; 77^\circ]$  до  $[56^\circ; 68^\circ]$ , что говорит об уменьшении диапазона на 56 %. Конструкция сверл с заточкой задней поверхности с минимальным радиусом образующей имеет наилучшее распределение переднего угла: практически полностью вдоль всей режущей кромки передний угол имеет положительное значение. Это позволит применять такие конструкции сверл без дополнительной заточки в центре с эксплуатационными показателями, соизмеримыми с показателями сверл с заточкой в центре.

График зависимости угла заострения режущего клина  $\beta$  от отношения длины главной РК в контрольной точке, измеренной от начального положения, к общей длине главной РК представлен на рис. 9. По графику можно установить, что применение сверл с заточкой задней поверхности с минимальным радиусом образующей обеспечивает равномерный угол заострения режущего клина вплоть до 0,45 от длины РК сверла как раз в той зоне, которая подвергается наиболее интенсивному нагружению.

Для эпюры эквивалентных напряжений и перемещений сверл с конической и тороидальной заточкой задней поверхности проведен ана-

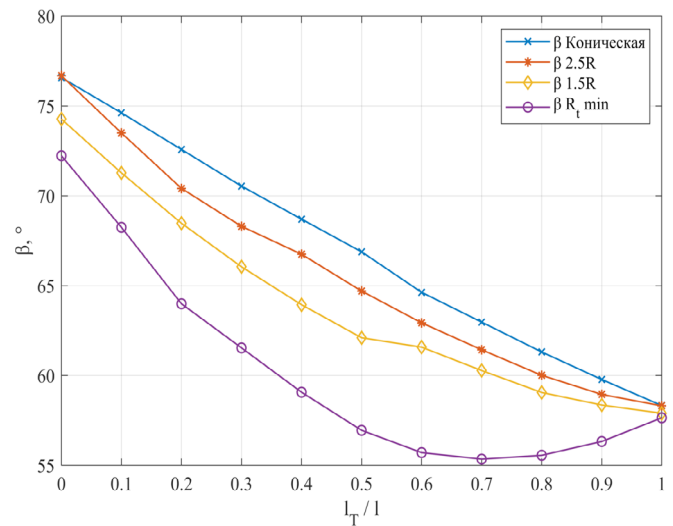


Рис. 9. График зависимости угла заострения режущего клина  $\beta$  от отношения длины главной РК в контрольной точке, измеренной от начального положения, к общей длине главной РК

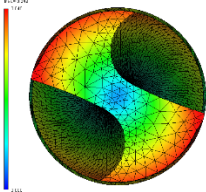
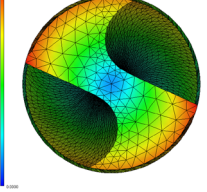
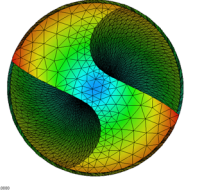
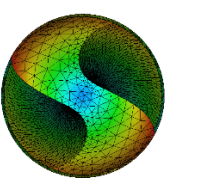
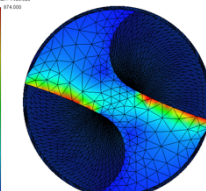
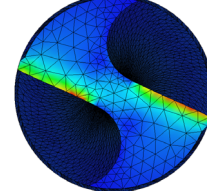
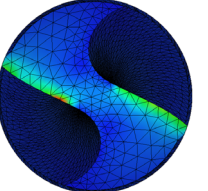
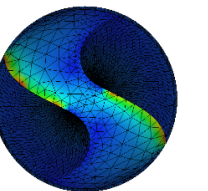
Fig. 9. Graph of the dependence of the angle of the cutting wedge  $\beta$  on the ratio of the length of the main cutting edge at the measurement point from the initial position, to the total length of the main cutting edge

лиз методом МКЭ по вышеописанной методике. Результаты упругих перемещений и эквивалентных напряжений в режущем клине сверл с различной формой заточки вынесены в табл. 4.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальное напряжение у сверла с минимальным радиусом образующей задней поверхности – минимальное из всех рассматриваемых конструкций сверл, что свидетельствует о более рациональном распределении припуска и геометрических параметров вдоль режущей кромки. Режущий клин вдоль режущей кромки имеет площадь поперечного сечения, наиболее близкую к постоянной, что позволяет судить о наилучших прочностных характеристиках сверла с тороидальной заточкой с минимальным радиусом образующей  $R_{t \min}$ , формирующей заднюю поверхность. Были рассмотрены напряжения в равноудаленных друг от друга точках режущей кромки, а также измерены угловые значения положения этих точек от оси сверла согласно методике проектирования сверл с тороидальной задней поверхностью. Полученные результаты приведены в табл. 5, и на их основе построен график зависимости напряжения от углового положения контрольной точки на режущей кромке в инструментальной системе

**Результаты эпюры максимальных эквивалентных напряжений и перемещений в режущем клине сверл с различными параметрами задней поверхности (ЗП)**

**Results of an epure of the maximum equivalent stresses and displacements in the cutting wedge for drills with different parameters of the flank surface**

Вид МКЭ-анализа	Коническая заточка ЗП	Тороидальная заточка ЗП (2,5R)	Тороидальная заточка ЗП (1,25R)	Тороидальная заточка ЗП ( $R_{l\min}$ )
Перемещения, мм	 max = 0,049 мм	 max = 0,052 мм	 max = 0,050 мм	 max = 0,045 мм
Эквивалентные напряжения, МПа	 max = 1465,926 МПа	 max = 1412,569 МПа	 max = 991,473 МПа	 max = 874,013 МПа

**Результаты эпюры эквивалентных напряжений и перемещений вдоль режущих кромок сверл с различными параметрами задней поверхности (ЗП)**

**Results of an epure of equivalent stresses and displacements along the cutting edges of drills with different parameters of the flank surface**

Коническая заточка ЗП			Тороидальная заточка ЗП (2,5R)			Тороидальная заточка ЗП (1,25R)			Тороидальная заточка ЗП ( $R_{l\min}$ )		
$\sigma$ , МПа	$\Psi$ , град	$\lambda$ , град	$\sigma$ , МПа	$\Psi$ , град	$\lambda$ , град	$\sigma$ , МПа	$\Psi$ , град	$\lambda$ , град	$\sigma$ , МПа	$\Psi$ , град	$\lambda$ , град
1064,85	29,0289	5,8	740,4581	32,0511	0,891	557,1906	36,3369	17,82	499,1	46,81	60
1039,035	27,825	3,8	741,7603	29,9989	0,956	558,1982	33,0369	10,63	462,4	40,6211	40,52
802,4772	25,7869	1,33	694,3632	27,3139	1,052	424,1168	29,4411	5,36	217,7	34,7439	24,7
681,772	22,1639	1,2	622,1755	23,2369	1,124	433,9531	24,7761	2,13	207,4	28,6361	5,26
595,8291	15,1731	2,33	585,3223	15,8989	1,112	722,0529	17,0239	2,09	390,2	20,065	0,75
460,658	0	4	458,2239	0	1,326	654,7368	0	1,016	226,3	0	1,5

координат (рис. 10), а также совмещенный график зависимости угла наклона режущей кромки и эквивалентных напряжений в конструкции сверла от углового положения на режущей кромке (рис. 11).

Было выявлено, что при уменьшении радиуса образующей, формирующей заднюю поверхность, увеличивается длина режущей кромки, что приводит к интегральному снижению напряжений в режущем клине вдоль всего режущего

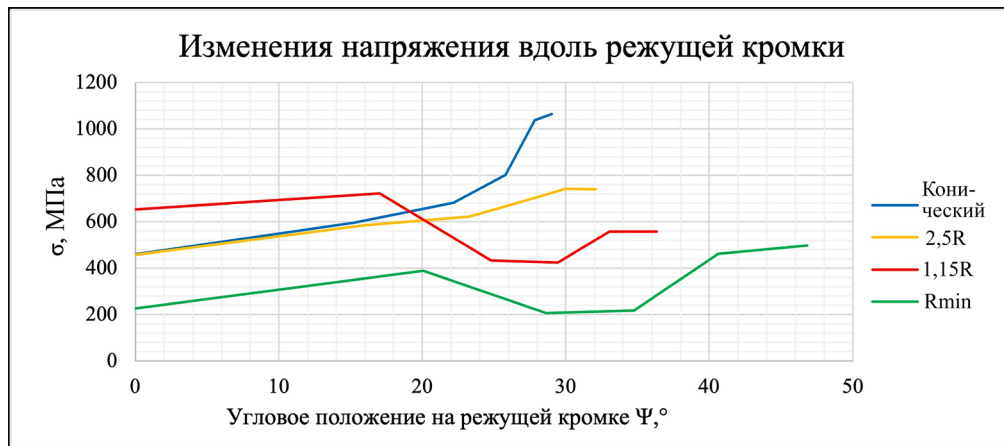


Рис. 10. График изменения внутренних напряжений конструкции сверла относительно углового положения контрольной точки на режущей кромке

Fig. 10. Graph of variance in internal stresses of the drill structure relative to the angular position of the measurement point on the cutting edge

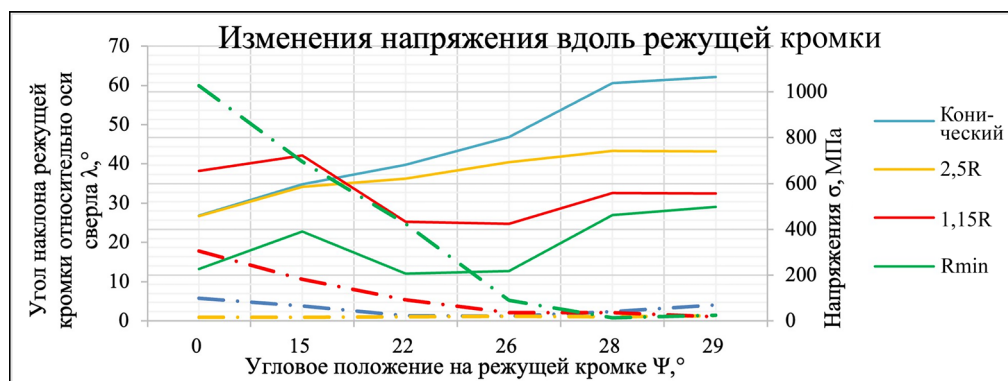


Рис. 11. Совмещенный график зависимости угла наклона режущей кромки и эквивалентных напряжений в конструкции сверла от углового положения на режущей кромке

Fig. 11. Combined graph of the dependence of the cutting edge angle and equivalent stresses in the drill design on the angular position on the cutting edge

клина и доказывает более рациональное назначение геометрических параметров вдоль режущей кромки. Установлено, что конструкция сверла с режущей клиновидной частью и режущей кромкой с большим значением  $\lambda$  может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на ресурс работы сверла. При небольшой продолжительности такого участка элемент режущего клина выступает в роли концентратора напряжений, принимая значимую часть нагрузки на изгиб, а в случае более продолжительного участка с плавным изменением угла усилия равномерно распределяются по режущему клину. Поэтому такая конструкция позволяет значительно повысить сопротивление хрупкому разрушению. Этот эффект может быть усилен равномерной

площадью поперечного сечения режущего клина вдоль режущей кромки.

Установленные закономерности являются основой для формирования методики проектирования сверл с тороидальной задней поверхностью и послужили предпосылкой к созданию комплексной САПР сверл. Настоящая работа имеет важное значение для понимания геометрических особенностей конструкции сверл с нестандартной формой задней поверхности. После подтверждения актуальности применения конструкций сверл с новой формой заточки логичным направлением развития настоящей работы является раскрытие аналитических взаимосвязей между формой режущих кромок, винтовой канавки и формой задней поверхности.

## Выводы

1. В данном исследовании решена прикладная задача: впервые предложена комплексная методика автоматизированного проектирования сверл, включая проектирование новых конструкций сверл с тороидальной задней поверхностью. Алгоритм системы автоматизированного проектирования сверл с тороидальной задней поверхностью подробно рассмотрен при разработке каждой функциональной поверхности в системе твердотельного моделирования.

2. Проведено исследование влияния изменения радиуса образующей задней поверхности на величину передних углов с целью определения области применения и выявления наилучших геометрических параметров инструмента на различных конструкциях сверл с тороидальной задней поверхностью. Установлено, что с уменьшением радиуса образующей задней поверхности уменьшается диапазон изменения переднего угла и угла заострения режущего клина по сравнению с конструкцией сверл с конической заточкой задней поверхности. Было установлено, что инструмент с минимальным допустимым радиусом образующей задней поверхности имеет наилучший характер распределения передних углов и углов заострения режущего клина вдоль режущей кромки. Величина диапазона изменения переднего угла уменьшилась с  $[-18^\circ; 25^\circ]$  до  $[2^\circ; 25^\circ]$ , что говорит об уменьшении диапазона на 86 %. Величина диапазона изменения угла заострения режущего клина уменьшилась с  $[58^\circ; 77^\circ]$  до  $[56^\circ; 68^\circ]$ , что говорит об уменьшении диапазона на 56 %. Сверла с такой заточкой задней поверхности могут быть использованы без дополнительной подточки к центру, так как передний угол находится в положительном диапазоне значений вплоть до участка перехода главной РК в поперечную РК. Установлено, что угол заострения режущего клина имеет значение, близкое к постоянному, вплоть до  $0,45l_T/l$ , при этом диапазон угла заострения уменьшился с  $[58^\circ; 68^\circ]$  до  $[56^\circ; 58^\circ]$ , что говорит об улучшении геометрических параметров до пяти раз. Эти показатели превышают все существующие на сегодняшний день показатели аналогичных конструкций спиральных сверл.

3. В результате конечно-элементного моделирования установлено снижение эквивалентных напряжений в режущем клине интегрально

с 4644,62 до 2003,1 МПа за счет применения сверл с тороидальной задней поверхностью с минимальным радиусом образующей (снижение напряжений в 2,31 раза). При этом максимальные эквивалентные напряжения снизились с 1064,85 до 499,1 МПа (снижение напряжений в 2,13 раза).

## Список литературы

1. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов, В.И. Кокарев, А.Г. Схиртладзе; под ред. С.В. Кирсанова. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 526 с. – ISBN 978-5-217-03373-7.
2. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машгиз, 1963. – 952 с.
3. An applied explicit mathematical model of conical drill point geometry without flank rubbing / T. Zeng, Z.C. Chen, Z. Liu, Z. Yi, S. Wang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106 (9–10). – P. 3707–3720. – DOI: 10.1007/s00170-019-04759-y.
4. Патент № 2528593 Российская Федерация. Спиральное сверло с криволинейными режущими кромками: заявл. 17.12.2012; опублик. 20.09.2014 / Ю.Е. Петухов, А.А. Водовозов.
5. Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality / M. Yavuz, H. Gökçe, İ. Çiftçi, H. Gökçe, Ç. Yavaş, U. Şeker // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106 (9–10). – P. 4623–4633. – DOI: 10.1007/s00170-019-04843-3.
6. Abele E., Fajara M. Simulation-based twist drill design and geometry optimization // CIRP Annals. – 2010. – Vol. 59 (1). – P. 145–150. – DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.063.
7. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 45 (11). – P. 1271–1281. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.004.
8. Ren K., Ni J. Analyses of drill flute and cutting angles // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1999. – Vol. 15 (8). – P. 546–553. – DOI: 10.1007/s001700050100.
9. A new method for the precise determination of rational geometric parameters of the helical groove and cutting part of high-performance tri-flute / P.M. Pivkin, V.A. Grechishnikov, A.A. Ershov, A.B. Nadykto // Proceedings of SPIE. – 2020. – Vol. 11540. – P. 1154014. – DOI: 10.1117/12.2574392.
10. Grigor'ev S.N. Volosova M.A. Complex surface hardening of oxide-carbide ceramic cutting tools //

Russian Engineering Research. – 2005. – Vol. 25 (9). – P. 7–12.

11. Geometry modifications of single-lip drills to improve cutting fluid flow / A. Baumann, E. Oezkaya, D. Biermann, P. Eberhard // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 121 (3–4). – P. 1689–1695. – DOI: 10.1007/s00170-022-09400-z.

12. Grigor'ev S.N., Myachenkov V.I., Kuzin V.V. Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31 (11). – P. 1060–1066. – DOI: 10.3103/S1068798X11110086.

13. Study on nano-cutting of brittle material by molecular dynamics using dynamic modeling / J. Wang, X. Zhang, F. Fang, F. Xu, R. Chen, Z. Xue // *Computational Materials Science*. – 2020. – Vol. 183. – P. 109851. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109851.

14. A review of simulation and experiment research on cutting mechanism and cutting force in nanocutting process / D. Chen, S. Wu, Y. He, Y. Luo, X. Wang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 121 (3–4). – P. 1533–1574. – DOI: 10.1007/s00170-022-09051-0.

15. Finite element modelling and experimental validation of the graphite cutting process / D. Yang, F. Wei, W. Wang, Y. Zhang, L. Zeng // *Processes*. – 2023. – Vol. 11 (9). – P. 2546. – DOI: 10.3390/pr11092546.

16. Wang J., Fang F., Li L. Cutting of graphite at atomic and close-to-atomic scale using flexible enhanced molecular dynamics // *Nanomanufacturing and Metrology*. – 2022. – Vol. 5 (3). – P. 240–249. – DOI: 10.1007/s41871-022-00128-8.

17. Wang J., Fang F. Nanometric cutting mechanism of silicon carbide // *CIRP Annals*. – 2021. – Vol. 70 (1). – P. 29–32. – DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.068.

18. Effect of boron-doped diamond interlayer on cutting performance of diamond coated micro drills for graphite machining / X. Lei, L. Wang, B. Shen, F. Sun, Z. Zhang // *Materials*. – 2013. – Vol. 6 (8). – P. 3128–3138. – DOI: 10.3390/ma6083128.

19. Agapiou J.S., DeVries M.F. On the determination of thermal phenomena during drilling. Part I. Analytical models of twist drill temperature distributions / J.S. Agapiou, M.F. DeVries // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1990. – Vol. 30 (2). – P. 203–215. – DOI: 10.1016/0890-6955(90)90130-B.

20. Thermal aspects in deep hole drilling of aluminium cast alloy using twist drills and MQL / D. Biermann, I. Iovkov, H. Blum, A. Rademacher, K. Taebi, F.T. Suttmeier, N. Klein // *Procedia CIRP*. – Vol. 3. – P. 245–250. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.043.

21. Image processing of advance milling cutters to automate the measurement of the geometric parameters of the cutting edge on optical measuring systems / P.M. Pivkin, I.V. Minin, M.A. Volosova, V.B. Romanov, A.B. Nadykto // *Proceedings SPIE*. – 2021. – Vol. 11914. – P. 1191412. – DOI: 10.1117/12.2605754.

22. Wang Q., Wang D., Fang Y. Research on chip mechanism of Inconel 718 with ultrasonic assisted drilling by step drill // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126 (5–6). – P. 2579–2594. – DOI: 10.1007/s00170-023-11212-8.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science





Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)







## Influence of the shape of the toroidal flank surface on the cutting wedge angles and mechanical stresses along the drill cutting edge

Petr Pivkin <sup>a, \*</sup>, Artem Ershov <sup>b</sup>, Nikita Mironov <sup>c</sup>, Alexey Nadykto <sup>d</sup>

Moscow State University of Technology “STANKIN”, 3a Vadkovski Lane., Moscow, 127055, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7547-4652>,  [PMPivkin@gmail.com](mailto:PMPivkin@gmail.com); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3966-7032>,  [a.ershov@stankin.ru](mailto:a.ershov@stankin.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-4205-6996>,  [dzr1380im@gmail.com](mailto:dzr1380im@gmail.com); <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3652-7421>,  [a.nadykto@stankin.ru](mailto:a.nadykto@stankin.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 01 September 2023

Revised: 18 September 2023

Accepted: 27 September 2023

Available online: 15 December 2023

#### Keywords:

Drill  
 Toroidal flank surface  
 Cutting wedge  
 FEM

#### Funding

This project has received funding from the Russian Science Foundation (Project No. 23-29-00999, <https://rscf.ru/project/23-29-00999/>).

The authors carried out research on the equipment of the Center of collective use of MSTU “STANKIN” (agreement No. 075-15-2021-695, 26/07/2021).

### ABSTRACT

**Introduction.** Drilling holes with standard tolerance varying from *IT8* to *IT12* is widely used in industrial production. However, at present time, there are neither comprehensive studies, nor scientifically justified recommendations for the rational choice of the geometry of the cutting part of drills with a toroidal flank surface. Therefore, the computer-aided design (*CAD*) of new drill designs with a toroidal flank surface and finite element modeling (*FEM*) of the stressed state of its cutting part are important tasks. **The purpose of the work** is reducing both the range of change in the rake angle and the wedge angle of the cutting wedge along the cutting edge from the periphery to the center and the equivalent stresses in the cutting wedge. In this paper we investigate changes in the rake and wedge angles of the cutting wedge depending on the radius of the generatrix line of the toroidal flank surface as well as changes in equivalent stresses in the cutting wedge, which depend on changes in the radius of the generatrix line of the toroidal flank surface. **The research methods** include the fundamentals of the theory of cutting, *CAD* methods, and the *FEM*, which was applied in this work to new drill designs. **Results and discussion.** It is found that the range of changes in the rake angle and the wedge angle of the cutting wedge of the drill decreases compared to the standard design with decreasing radius of the generatrix line of the flank surface. A *CAD* system for drills with a toroidal flank surface is developed. As a result, the range of changes in the rake angle along the cutting edge decreased by 86 % for a drill with a minimum radius of the generatrix line of the toroidal surface compared to that with the conical flank surface, the range of the wedge angle of the cutting wedge decreased by 56 %, and the maximum equivalent stresses decreased by 2.13 times. It is also important to note that in this case, the wedge angle is close to constant for half of the drill tooth. These indicators exceed those for existing designs of the twist drills that indicate the key achievement of this paper.

**For citation:** Pivkin P.M., Ershov A.A., Mironov N.E., Nadykto A.B. Influence of the shape of the toroidal flank surface on the cutting wedge angles and mechanical stresses along the drill cutting edge. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 151–166. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-151-166. (In Russian).

### References

1. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.L., Kirsanov S.V., Kokarev V.I., Skhirtladze A.G. *Rezhushchii instrument* [Cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 528 p. ISBN 978-5-217-03373-7.
2. Semenchenko I.I., Matyushin V.M., Sakharov G.N. *Proektirovanie metallorazhushchikh instrumentov* [Design of cutting tools]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 952 p.
3. Zeng T., Chen Z.C., Liu Z., Yi Z., Wang S. An applied explicit mathematical model of conical drill point geometry without flank rubbing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106 (9–10), pp. 3707–3720. DOI: 10.1007/s00170-019-04759-y.

#### \* Corresponding author

Pivkin Petr M., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Moscow State University of Technology “STANKIN”,  
 3a Vadkovsky Lane,  
 127055, Moscow, Russian Federation  
 Tel.: +7 (903) 231-66-80, e-mail: PMPivkin@gmail.com

4. Petukhov J.E., Vodovozov A.A. *Spiral'noe sverlo s krivolineinymi rezhushchimi kromkami* [Twist drill with curvilinear lip]. Patent RF, no. 2528593, 2014.
5. Yavuz M., Gökçe H., Çiftçi İ., Gökçe H., Yavaş Ç., Şeker U. Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106 (9–10), pp. 4623–4633. DOI: 10.1007/s00170-019-04843-3.
6. Abele E., Fujara M. Simulation-based twist drill design and geometry optimization. *CIRP Annals*, 2010, vol. 59 (1), pp. 145–150. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.063.
7. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45 (11), pp. 1271–1281. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.004.
8. Ren K., Ni J. Analyses of drill flute and cutting angles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, vol. 15 (8), pp. 546–553. DOI: 10.1007/s001700050100.
9. Pivkin P.M., Grechishnikov V.A., Ershov A.A., Nadykto A.B. A new method for the precise determination of rational geometric parameters of the helical groove and cutting part of high-performance tri-flute. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11540, p. 1154014. DOI: 10.1117/12.2574392.
10. Grigor'ev S.N., Volosova M.A. Complex surface hardening of oxide-carbide ceramic cutting tools. *Russian Engineering Research*, 2005, vol. 25 (9), pp. 7–12.
11. Baumann A., Oezkaya E., Biermann D., Eberhard P. Geometry modifications of single-lip drills to improve cutting fluid flow. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121 (3–4), pp. 1689–1695. DOI: 10.1007/s00170-022-09400-z.
12. Grigor'ev S.N., Myachenkov V.I., Kuzin V.V. Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31 (11), pp. 1060–1066. DOI: 10.3103/S1068798X11110086.
13. Wang J., Zhang X., Fang F., Xu F., Chen R., Xue Z. Study on nano-cutting of brittle material by molecular dynamics using dynamic modeling. *Computational Materials Science*, 2020, vol. 183, pp. 109851. DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109851.
14. Chen D., Wu S., He Y., Luo Y., Wang X. A review of simulation and experiment research on cutting mechanism and cutting force in nanocutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121 (3–4), pp. 1533–1574. DOI: 10.1007/s00170-022-09051-0.
15. Yang D., Wei F., Wang W., Zhang Y., Zeng L. Finite element modelling and experimental validation of the graphite cutting process. *Processes*, 2023, vol. 11 (9), p. 2546. DOI: 10.3390/pr11092546.
16. Wang J., Fang F., Li L. Cutting of graphite at atomic and close-to-atomic scale using flexible enhanced molecular dynamics. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2022, vol. 5 (3), pp. 240–249. DOI: 10.1007/s41871-022-00128-8.
17. Wang J., Fang F. Nanometric cutting mechanism of silicon carbide. *CIRP Annals*, 2021, vol. 70 (1), pp. 29–32. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.068.
18. Lei X., Wang L., Shen B., Sun F., Zhang Z. Effect of boron-doped diamond interlayer on cutting performance of diamond coated micro drills for graphite machining. *Materials*, 2013, vol. 6 (8), pp. 3128–3138. DOI: 10.3390/ma6083128.
19. Agapiou J.S., DeVries M.F. On the determination of thermal phenomena during drilling. Part I. Analytical models of twist drill temperature distributions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1990, vol. 30 (2), pp.203–215. DOI: 10.1016/0890-6955(90)90130-B.
20. Biermann D., Iovkov I., Blum H., Rademacher A., Taebi K., Suttmeier F.T., Klein N. Thermal aspects in deep hole drilling of aluminium cast alloy using twist drills and MQL. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 3, pp. 245–250. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.043.
21. Pivkin P.M., Minin I.V., Volosova M.A., Romanov V.B., Nadykto A.B. Image processing of advance milling cutters to automate the measurement of the geometric parameters of the cutting edge on optical measuring systems. *SPIE Proceedings*, 2021, vol. 11914, p. 1191412. DOI: 10.1117/12.2605754.
22. Wang Q., Wang D., Fang Y. Research on chip mechanism of Inconel 718 with ultrasonic assisted drilling by step drill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 126 (5–6), pp. 2579–2594. DOI: 10.1007/s00170-023-11212-8.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.