На правах рукописи

СУНГАТОВ ИЛЬНАЗ ЗУФАРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ С ВИНТОВЫМИ СТРУЖЕЧНЫМИ КАНАВКАМИ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск 2016

Работа выполнена на кафедре «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Набережночелнинского института (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: **Хисамутдинов Равиль Миргалимович**
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Набережночелнинского института (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Официальные оппоненты: **Шаламов Виктор Георгиевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Фомин Анатолий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»**

Защита диссертации состоится «_10_»_июня_2016 г, в _13:30_ часов на заседании диссертационного совета № Д 999.003.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый учебный корпус, ауд. 117 (почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, 32).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «_08_»_апреля_2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент Н.И. Веткасов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современном машиностроении широко используются изделия со сложными поверхностями, все многообразие которых по применению в технике и технологии можно разделить на инструменты для воспроизведения подобных деталей и собственно сами детали. Зачастую инструмент имеет более сложную поверхность, чем обрабатываемая деталь. Значительную часть сложных поверхностей составляют винтовые поверхности. Среди всего многообразия инструментов с винтовой поверхностью большую группу составляют сферические фрезы, которые применяются для обработки радиусных участков корпусных деталей, штампов и литейных форм. Современная промышленность, широко использующая станки с числовым программным управлением, в настоящее время нуждается в большом количестве сферических фрез с высокой работоспособностью при минимально возможной стоимости.

Для обработки винтовых поверхностей применяют в основном шлифовальный круг, профилирование которого, при условии отсутствия подрезов и неполного формирования профиля канавок, является одной из наиболее трудоемкой задачей в инструментальном производстве в виду того, что профиль винтовой поверхности ни в одном из сечений не соответствует профилю образующей шлифовального круга. Кроме этого, для определения направляющей винтовой поверхности применяется метод пересечения сферы с прямым архимедовым геликоидом, что сама по себе является сложной поверхностью и приводит к сложным расчетам. Методы определения профиля шлифовального круга для обработки винтовой поверхности разработаны для конических и цилиндрических поверхностей, в то время как наиболее общей и сложной является винтовая поверхность на сфере.

Стандартная сферическая фреза характеризуется простотой конструкции, но имеет недостаток в виде прямолинейной формы стружечной канавки. Для исключения зоны с нулевыми скоростями, существует методика проектирования и изготовления сферических фрез с групповым расположением винтовых стружечных канавок. Однако данная конструкция имеет существенные недостатки в виде сложности в изготовлении и малого количества зубьев на торце, которое обуславливается количеством групп. Некоторые изготовители сферических фрез зону с нулевыми скоростями избегают путем изготовления центрового отверстия на торце. В этом случае исключаются зона с нулевыми скоростями, но со временем отверстие забивается стружкой.

Цель работы: повышение работоспособности сферических фрез с винтовыми стружечными канавками на основе математического моделирования процесса обработки.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Модернизировать математическую модель процесса формирования винтовой поверхности сферической фрезы инструментом второго порядка.

2. Разработать компьютерную модель процесса обработки винтовой поверхности сферической фрезы инструментом второго порядка, составить алгоритм, разработать прикладную программу расчета параметров винтовой поверхности сферической фрезы.

3. Исследовать профиль образующей винтовой поверхности сферической фрезы на этапе компьютерного моделирования процесса обработки и уточнение

параметров взаимного расположения шлифовального круга и сферической фрезы на основе математических моделей.

4. Подтвердить адекватность математических моделей в промышленных условиях посредством изготовления опытной партии сферических фрез и сопоставления расчетных и фактических данных профилей винтовой стружечной канавки.

Научная новизна:

1. Математическая модель винтовой поверхности сферической фрезы, основанная на методе определения направляющей винтовой поверхности как следа пересечения сферы и цилиндра.

2. Методика определения производящего профиля шлифовального круга для обработки винтовых стружечных канавок на сферической фрезе.

Практическая значимость работы:

1. Прикладная программа расчета параметров винтовой поверхности сферической фрезы (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612411 РФ);

2. Конструкция сферической фрезы с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки и исключающей зоны с нулевыми скоростями (патент РФ на полезную модель № 90000).

Результаты работы используются в Технологическом центре ПАО КАМАЗ в виде руководящих технических материалов и в учебном процессе Набережночелнинского института (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы основные положения теории винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов, теории проектирования металлорежущих инструментов, технологии машиностроения, аналитической геометрии. При исследованиях применяли математическое и компьютерное аналитическое моделирование, язык программирования (Delphi 7), пакеты программ КОМПАС-3D V12 и Mathcad 14.0. Экспериментальные исследования проводили на пятикоординатном станке Michael Deckel S22p Num. Для контроля полученных результатов использовали универсально-измерительный микроскоп MEIJI MT 7530 и профилометр 296.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения направляющей винтовой поверхности как следа пересечения сферы и цилиндра.

2. Математическая модель винтовой поверхности сферической фрезы, позволяющая определить параметры производящего профиля шлифовального круга.

3. Методика определения профиля шлифовального круга для обработки винтовых стружечных канавок.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения диссертации докладывались на межрегиональной (Камские чтения, г. Набережные Челны: ИНЭКА, 2009), всероссийской (Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009», г. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009) и международных (XVI Туполевские чтения, г. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008; Современные технологии в машиностроении, г. Пенза: Приволжский дом знаний, 2008; XVII Туполевские чтения, г. Казань:

КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009; Образование и наука производству, г. Набережные Челны: ИНЭКА, 2010) научно-технических конференциях.

В полном объеме результаты работы были заслушаны и одобрены на расширенном заседании кафедр «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и «Машиностроение» Набережночелнинского института (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Публикации, патенты и свидетельства. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, из них 8 в изданиях, рекомендованных к публикации Высшей аттестационной комиссией, получен патент на полезную модель и свидетельство РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 119 наименований и приложения. Материал изложен на 131 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунков, 7 таблиц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе рассмотрены виды профилей и методы формообразования винтовых стружечных канавок. Так же рассмотрены и проанализированы методы определения профиля шлифовального круга и процесс обработки сферических фрез на станках с числовым программным управлением.

Существуют 4 основные профили винтовой стружечной канавки. Профили с трапециевидной спинкой, с усиленной спинкой и параболической используются в концевых фрезах. Прямолинейный остроконечный профиль характерен для сферических фрез. Наиболее производительным методом формообразования винтовой стружечной канавки является обработка шлифовальным кругом. Вопросам определения профиля шлифовального круга посвящены работы многих советских и российских ученых. Существуют так называемые «прямая» и «обратная» задачи определения профиля. Преимущества решения «прямой» задачи очевидны. При относительной простоте решения задачи, профиль шлифовального круга вычисляется исходя из требований и параметров винтовой стружечной канавки. Основными требованиями, предъявляемыми к винтовым стружечным канавкам, являются обеспечение размещения и транспортировки стружки из зоны резания.

Все методы определения профиля шлифовального круга сводятся к двум группам методов или их комбинации: аналитические и численные (графоаналитические). К первой группе методов относятся методы общих нормалей, общих касательных и методы использующие пространственную линию контакта. Метод общих нормалей наиболее полно изложен в работах Г.Н. Кирсанова, суть которого является поиск общих нормалей в точке мгновенной линии контакта. Они всегда пересекают ось режущего инструмента, так как он представляет собой тело вращения. Г.Н. Кирсанов обобщил теорему Виллиса на область пространственных зацеплений, что позволило применить положения теории формообразования для определения профиля шлифовального круга. Метод общих касательных

С.И. Лашнева и итерационный метод Н.Н. Щеголькова основаны на методе общих нормалей. Вторую группу методов можно назвать общим термином «метод совмещенных сечений». Суть метода совмещенных сечений заключается в том, что винтовая поверхность рассекается плоскостями, проходящими через ось инструмента и параллельно ему. Образованные сечения проецируются на осевую плоскость инструмента. При этом образуется семейство круговых проекций сечений, огибающая к которым и является профилем инструмента. К методу совмещенных сечений можно отнести метод разработанный С.Ю. Илюхиным и названный им каркасно-кинематическим, который предназначен для решения обратной задачи. В работе Н.А. Чемборисова предложен инвариантный метод, который состоит из определения диапазона местонахождения точек мгновенной линии контакта, построения в указанном диапазоне круговых проекций винтовой линии на осевую плоскость режущего инструмента и поиска огибающей к семейству круговых проекций винтовой линии.

В заключение первой главы на основании анализа состояния проблемы и выбранного направления исследований сформулированы цель, задачи и научная новизна работы.

Во второй главе разработаны математические модели сферической фрезы с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок, шлифовального круга и процесса формообразования винтовых стружечных канавок шлифовальным кругом.

Сферическая фреза, с конструкцией одинакового расположения винтовых стружечных канавок, представляет собой сферическую поверхность со стружечными канавками выполненными по винтовой линии и сходящиеся к оси вращения сферической фрезы. Винтовая поверхность считается заданной, если известны параметры образующей и направляющей винтовой поверхности. Образующей винтовой поверхности является профиль винтовой стружечной канавки. Профиль винтовой стружечной канавки состоит из сопряженных между собой двух прямых линий и дуги окружности. (рис. 1).

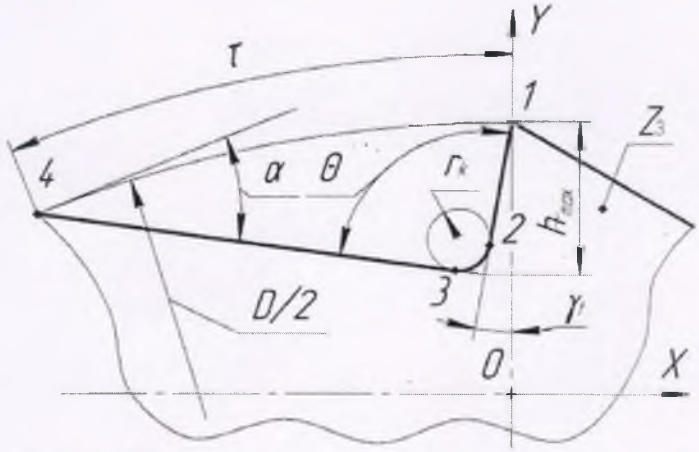


Рис. 1. Профиль винтовой стружечной канавкой

Необходимые исходные данные: D – диаметр, мм; Z_3 – количество зубьев; γ_t – передний угол, градус; α – задний угол, градус; r_k – радиус дна винтовой стружечной канавки, градус.

Рассчитываемые данные:

$\tau = \dfrac{2\pi}{Z_3}$ – окружной шаг, градус; (1)

$\theta = \dfrac{\pi}{2} + \tau + \gamma_t - \alpha$ – угол профиля канавки, градус; (2)

Для определения параметров профиля винтовой стружечной канавки необходимо определить координаты узловых точек участков 1-2, 2-3 и 3-4. Координаты узловых точек определяются исходя из конструктивных параметров винтовой

стружечной канавки сферической фрезы, которые рассмотрим в осевом и торцевом сечениях сферической фрезы. Плоскость осевого сечения проходит через оси *OZ* и *OY* (рис. 2).

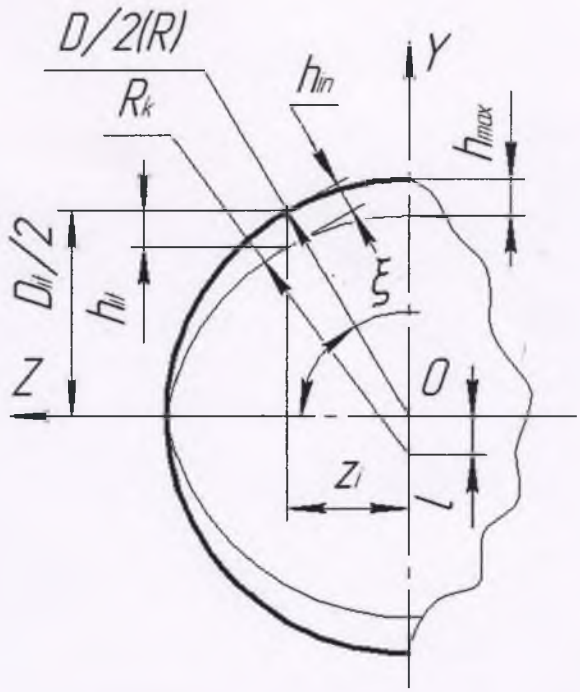


Рис. 2. Осевое сечение сферической фрезы с винтовыми стружечными канавками

Расстояние от оси *OZ* до центра радиуса огибающей дно винтовой стружечной канавки l и радиус огибающий дно винтовой стружечной канавки R_k обеспечивают свод винтовых стружечных канавок к оси *OZ* на торцевой части сферической фрезы. Необходимым условием для свода винтовых стружечных канавок является $R_k > D/2$. Из рисунка 3 очевидно, что

$$l + \frac{D}{2} = h_{\max} + R_k, \qquad (3)$$

где $h_{\max}$ – максимальная глубина винтовой стружечной канавки, мм.

Расстояние от оси *OZ* до центра радиуса огибающей дно винтовой стружечной канавки определяется из уравнения

$$l = \sqrt{R_k^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \qquad (4)$$

Диаметр i-го торцевого сечения выражается уравнением

$$D_{it} = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - z_i^{\,2}}, \qquad (5)$$

где z – положение текущего i-го сечения вдоль оси *OZ*, мм; i – индекс, обозначающий номер текущего сечения вдоль оси *OZ*.

Плоскость нормального сечения проходит через ось *OX* и нормаль к касательной сферической фрезы. Нормальное сечение при $z_i = 0$ совпадает с торцевым сечением, которое проходит через оси *OX* и *OY* (рис. 3). Глубина винтовой стружечной канавки в i-ом нормальном сечении h_{in} выражается следующим уравнением

$$h_{in} = R + l\sin\xi - \sqrt{R_k^2 - l^2\cos^2\xi} \qquad (6)$$

где $\xi = \arccos(z_i/R)$ – угол наклона i-го нормального сечения относительно оси *OZ*, градус.

Глубина винтовой стружечной канавки в i-ом торцевом сечении h_{it} выражается следующим уравнением

$$h_{it} = \sqrt{R_k^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} - \sqrt{R_k^{\,2} - z_i^{\,2}} + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - z_i^{\,2}} \qquad (7)$$

Выполнив преобразования с учетом выражений (4) и (5) получено

$$h_{it} = l + \frac{D_{it}}{2} - \sqrt{R_k^{\,2} - z_i^{\,2}}\ , \qquad (8)$$

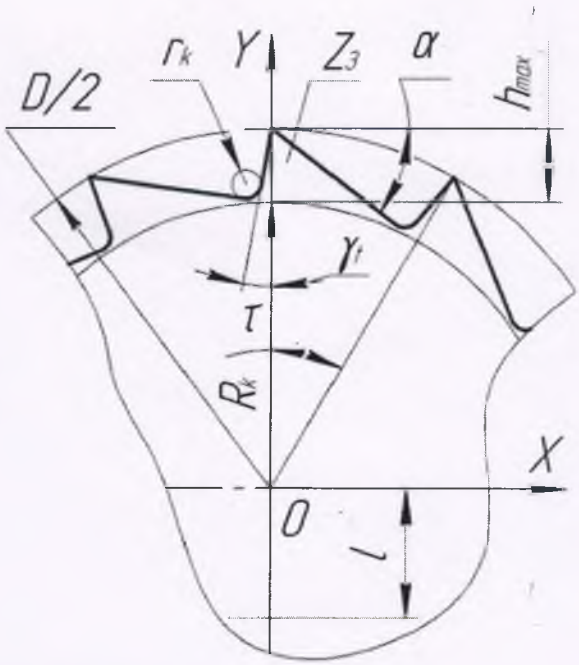


Рис. 3. Торцевое сечение сферической фрезы с винтовыми стружечными канавками

Следовательно, глубина винтовой стружечной канавки в i-ом торцевом сечении h_{it} зависит только от диаметра i-го торцевого сечения D_{it}. При условии, что τ и α постоянны, глубина винтовой стружечной канавки в i-ом торцевом сечении будет

$$h_{it} = \frac{D_{it}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\cos\alpha}{\cos(\tau - \alpha)}\right) \qquad (9)$$

После применения теоремы косинусов и преобразований с учетом выражения (9), получаем уравнение радиуса огибающей дно винтовой стружечной канавки

$$R_k = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(D - h_{\max})^2 + h_{\max}^{\ 2}}{1 - \cos\left(\pi - 2 \cdot \mathrm{arctg}\left(\frac{D}{D - 2h_{\max}}\right)\right)}} \qquad (10)$$

В торцевом сечении $z_i = 0$ глубина винтовой стружечной канавки принимает максимально значение $h_{\max}$, а при $z_i = D/2$ глубина винтовой стружечной канавки $h_{it} = h_{in} = 0$, при этом образуется зона с нулевыми скоростями.

Выведенные выражения конструктивных параметров винтовой стружечной канавки сферической фрезы позволяют определить координаты узловых точек профиля:

$$X_1 = 0\,;\ Y_1 = \frac{D_{it}}{2}; \qquad (11)$$

$$X_2 = h_{it}\ \mathrm{tg}\gamma_t;\ Y_2 = \frac{D_{it}}{2} - h_{it} + r_k \cos\gamma_t; \qquad (12)$$

$$X_3 = -h_{it} + \frac{D_{it}}{2}(1 - \cos\gamma_t + \sin\theta);$$

$$Y_3 = \left(h_{it} - \frac{D_{it}}{2}(\cos\theta - \sin\gamma_t)\right) tg\gamma_t - \frac{D_{it}}{2}(\cos\gamma_t - \sin\theta); \qquad (13)$$

$$X_4 = \frac{D_{it}}{2}\sin\tau;\ Y_4 = \frac{D_{it}}{2}\cos\tau. \qquad (14)$$

Определить параметры направляющей винтовой поверхности можно исходя из того, что направляющая (винтовая линия) представляет собой пересечение двух поверхностей: цилиндра с радиусом $R_Ц$ и сферой с радиусом $R_{СФ} = 2R_Ц$, центр которой лежит на поверхности цилиндра (рис. 4). Где $X_{СФ}Y_{СФ}Z_{СФ}$ – система координат сферы; $X_ЦY_ЦZ_Ц$ – система координат цилиндра, смещенная относительно $X_{СФ}Y_{СФ}Z_{СФ}$ на расстояние $R_Ц$.

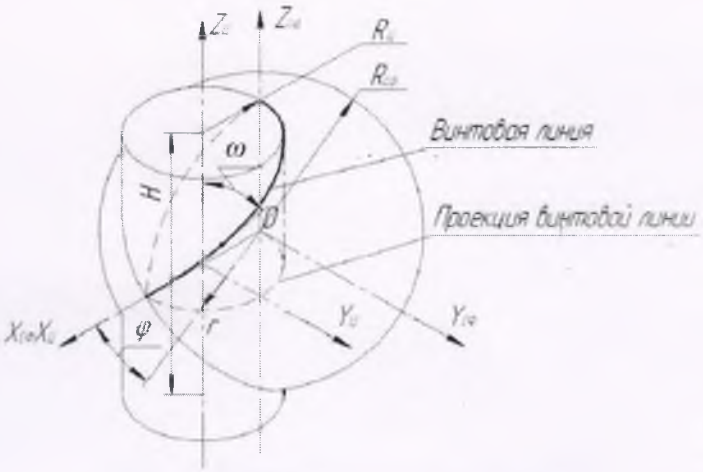


Рис. 4. Пересечение сферы с цилиндром

В виду того, что пересекающиеся поверхности вращения симметричны, для математического описания направляющей достаточно рассмотреть лишь 1/4 часть пересечения.

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_{СФ}{}^2;$$
$$(x - R_Ц)^2 + y^2 = R_Ц{}^2 \Leftrightarrow x^2 + y^2 = 2R_Ц x. \quad (15)$$

Отсюда следует уравнение

$$z^2 = 4R_Ц{}^2 - 2R_Ц x. \quad \text{или} \quad (16)$$

$$z^2 = R_{СФ}{}^2 - R_{СФ} x. \quad (17)$$

Если учесть, что уравнение проекции винтовой линии на плоскость $OX_{СФ}Y_{СФ}$ в полярной системе координат выглядит как

$$x = r\cos\varphi;$$
$$y = r\sin\varphi; \quad (18)$$
$$x^2 + y^2 = r^2.$$

где r – радиальная координата; φ – угловая координата.

Тогда уравнение (15) выразиться как

$$x^2 + y^2 = R_{СФ} x;$$
$$r^2 = R_{СФ} r\cos\varphi; \quad (19)$$
$$r = R_{СФ}\cos\varphi.$$

Тогда, с учетом (18) и $R_{СФ} = 2R_Ц$ уравнение (19) будет выглядит как

$$x = r\cos\varphi = 2R_Ц\cos^2\varphi = R_Ц(1 + \cos 2\varphi),$$
$$y = r\sin\varphi = 2R_Ц\sin\varphi\cos\varphi = R_Ц\sin 2\varphi, \quad (20)$$
$$z = 2R_Ц\sin\varphi; \text{ и } p = R_Ц / \mathrm{tg}\omega = H / 2\pi.$$

Уравнение направляющей (винтовой линии) винтовой поверхности на сфере в параметрическом виде запишется

$$\begin{cases} x_в = p\mathrm{tg}\omega\, 2\cos^2 2\varphi, \\ y_в = p\mathrm{tg}\omega\sin 2\varphi, \\ z_в = 2p\mathrm{tg}\omega\sin\varphi. \end{cases} \quad (21)$$

где p – параметр винта; ω – угол наклона винтовой линии, градус; H – шаг винтовой линии, мм.

Таким образом, определены параметры винтовой стружечной канавки, по которым определим параметры профиля шлифовального круга. Задача определения профиля шлифовального круга состоит из этапов построения круговых проекций направляющей на осевую плоскость шлифовального круга $O_И X_И Y_И$ (рис. 5) и поиска огибающей к семейству круговых проекций направляющей.

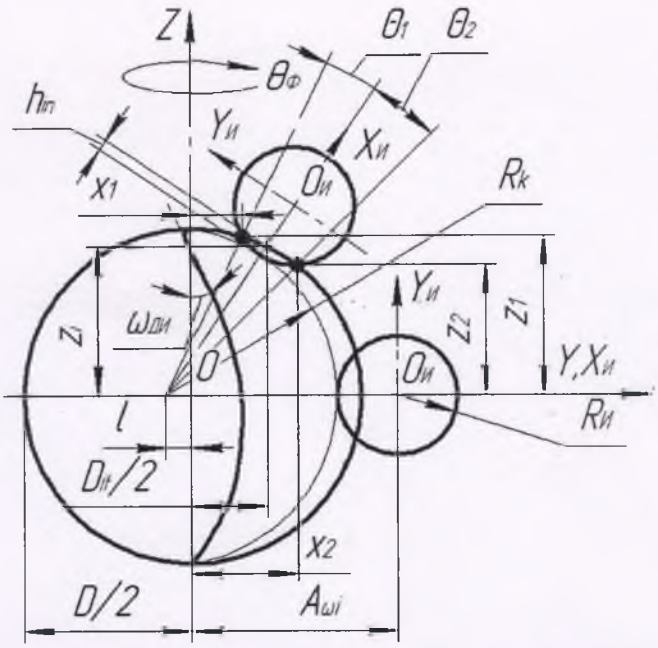


Рис. 5. Схема определения диапазона изменения винтового угла

При построении круговых проекций направляющей винтовой поверхности на сфере необходимо задать диапазон изменения значения угла φ_i, определяющего положение радиус-вектора точки образующей. В наиболее точном приближении диапазоном изменения угла φ_i будет угол между двумя наиболее удаленными точками касания винтовой поверхности на сфере и шлифовального круга. Задача поиска касания винтовой поверхности на сфере и шлифовального круга является сложной, так как требует решения пространственной задачи с применением численных методов.

В практических целях нет необходимости точного определения зоны контакта, являющейся искомым диапазоном изменения винтового угла φ_i. Достаточно определить угловую область, полностью включающую зону контакта винтовой поверхности на сфере и шлифовального круга. Для этого достаточно определить угол между точками пересечения торцевого сечения шлифовального круга и окружности, образованного пересечением этой плоскостью наружного диаметра сферической фрезы. Зона расположения круговых проекций равна диапазону изменения винтового угла φ_i от θ_1 до θ_2, образованных между осью $OX_И$ с отрезками, соединяющим точку O и точки пересечения окружности с дугой окружности в торцевом сечении шлифовального круга

$$\varphi_i = \theta_1 + \theta_2 \tag{22}$$

Межосевое расстояние переменно в каждом i-ом сечении и выражается следующим уравнением

$$A_{\omega i} = \sqrt{z_i^2 + \left(l + \frac{D_{ii}}{2}\right)^2} - h_{in} + R_И \tag{23}$$

При формообразовании винтовых стружечных канавок необходимо поворот сферической фрезы вокруг собственной оси OZ согласовать с остальными движениями так, чтобы выполнялось:

$$\theta_Ф = 2\pi \pm \varphi_i \tan\omega + \frac{\tau}{\cos(\pm\varphi_i)} \tag{24}$$

Для сохранения неизменным профиля винтовой стружечной канавки, обеспечения постоянства переднего угла и размеров впадины между соседними зубьями необходимо, чтобы торец шлифовального круга всегда был параллелен вектору результирующей линейной скорости вращательных движений инструмента вокруг собственной и вертикальной оси. То есть отсутствие подрезания или неполного формирования винтовой стружечной канавки обеспечивается при следующем законе изменения угла наклона шлифовального круга:

$$\omega_{ШК} = \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\,\omega\cos(\pm\varphi_i) + \tau\cdot\mathrm{tg}(\pm\varphi_i)\right) \tag{25}$$

Координаты точек пересечения торцевого сечения шлифовального круга и окружности, образованного пересечением плоскостью сечения наружного диаметра сферической фрезы

$$\begin{cases} z^2 + (x - A_{\omega i})^2 - R_И^2 = 0, \\ x^2 + z^2 - 1 = 0. \end{cases} \text{ или } 1 - 2xA_{\omega i} + A_{\omega i}^2 - R_И^2 = 0. \tag{26}$$

Решением системы (26) является система уравнений:

$$\begin{cases} x_{1,2} = A_{\omega i} \pm R_И^2; \\ z_{1,2} = \pm\sqrt{1 - x_{1,2}^2}, \end{cases} \tag{27}$$

Откуда можно определить углы θ_1 до θ_2, как:

$$\begin{cases} \theta_1 = arctg\left(\dfrac{z_1}{x_1}\right), \\ \theta_2 = arctg\left(\dfrac{z_2}{x_2}\right). \end{cases} \tag{28}$$

В результате приведенных выкладок получен диапазон расположения зоны контакта поверхности шлифовального круга и сферической фрезы, что позволяет определить диапазон дальнейших расчетов. Профиль шлифовального круга можно получить выполнив круговое проецирование винтовых линий на осевую плоскость шлифовального круга (рис. 6).

Образующая винтовой поверхности задана в системе координат $X_0Y_0Z_0$. Каждой точке образующей соответствует своя винтовая линия ($x_в$,$y_в$,$z_в$). Круговые проекции каждой винтовой линии на осевую плоскость инструмента $Y_иZ_и$ определяются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} x_{кп} = 0; \\ y_{кп} = \sqrt{x_и^2 + y_и^2}; \\ z_{кп} = z_и, \end{cases} \tag{29}$$

где $x_и$,$y_и$,$z_и$ – координаты точек винтовых линий изделия в системе $X_иY_иZ_и$, связанной с шлифовальным кругом.

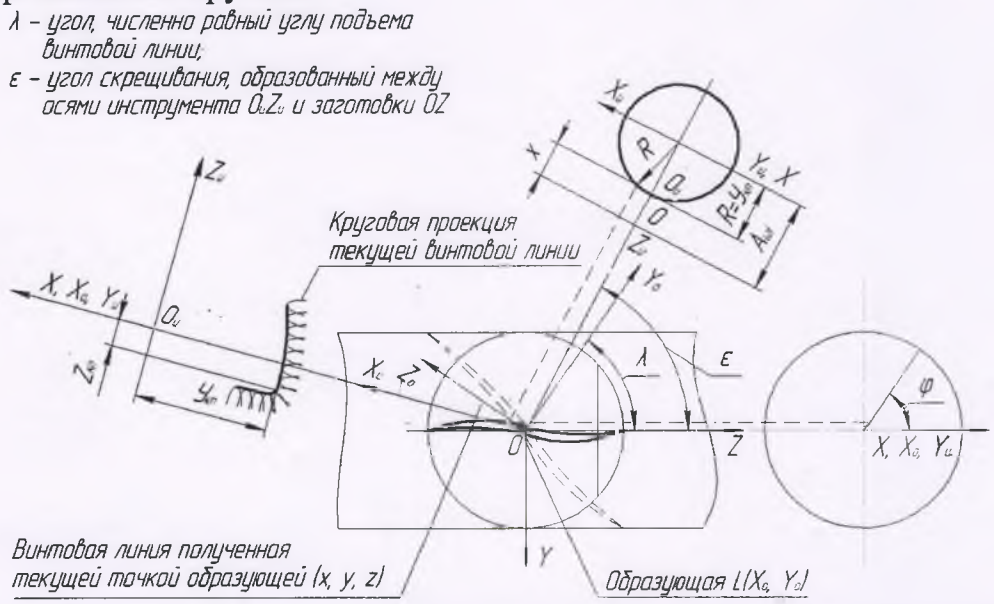


Рис. 6. Расчетная схема определения профиля шлифовального круга

Для их определения необходимо пересчитать координаты точек винтовых линий из системы координат $X_в Y_в Z_в$ в систему координат $X_и Y_и Z_и$ с помощью матрицы вращения и вектора переноса:

$$\begin{vmatrix} x_и \\ y_и \\ z_и \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -\cos\varepsilon & \sin\varepsilon & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -A_{\omega i} \\ 0 & \sin\varepsilon & \cos\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_в \\ y_в \\ z_в \\ 1 \end{vmatrix} \qquad (30)$$

При раскрытии матричного выражения получается система уравнений, определяющая координаты точек винтовых линий в системе координат шлифовального круга:

$$\begin{cases} x_и = -y_в \cos\varepsilon + z_в \sin\varepsilon; \\ y_и = x - A_{\omega i}; \\ z_и = y_в \sin\varepsilon + z_в \cos\varepsilon. \end{cases} \qquad (31)$$

При подстановке (29) в (30) получается система уравнений кругового проецирования винтовых линий на осевую плоскость шлифовального круга:

$$\begin{cases} x_{кп} = 0; \\ y_{кп} = \sqrt{(-y_в \cos\varepsilon + z_в \sin\varepsilon)^2 + (x_в - A_{\omega i})^2}; \\ z_{кв} = y_в \sin\varepsilon + z_в \cos\varepsilon. \end{cases} \qquad (32)$$

Полученная система (32) аналитически описывает круговые проекции винтовых линий на осевую плоскость шлифовального круга. В результате проецирования формируется семейство круговых проекций винтовых линий. Искомый профиль шлифовального круга представляет собой огибающую к полученным кривым.

В третьей главе проведены компьютерные моделирования сферической фрезы с конструкцией одинакового расположения винтовых стружечных канавок, шлифовального круга и процесса формообразования винтовой стружечной канавки шлифовального круга. Разработана прикладная программа расчета параметров винтовой стружечной канавки. Исходными данными для компьютерного моделирования являются параметры профиля шлифовального круга. Профиль шлифовального круга может быть задан в виде набора геометрических примитивов – точек, линий, дуг окружности. При этом необходимо получить для каждого участка аналитические выражения и рассчитать требуемое для решения задачи количество точек (рис. 7).

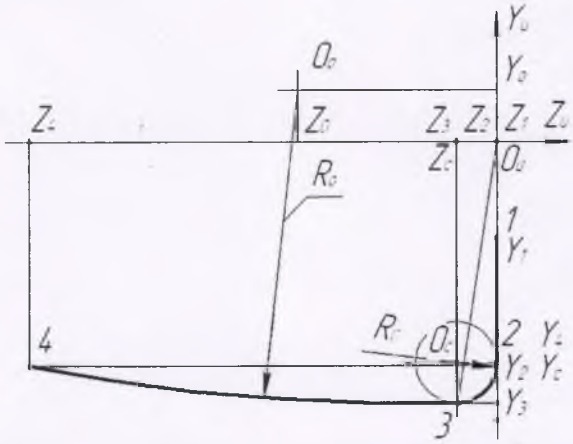


Рис. 7. Схема расчета точек профиля шлифовального круга

Участок в виде прямой задается координатами точки начала 1 (y_1; z_1) и координатами конечной точки отрезка 2 (y_2; z_2). Тогда уравнение прямой (1-2):

$$y_u = \frac{(z_u - z_1)(y_2 - y_1)}{(z_2 - z_1)} + y_1 \qquad (33)$$

Участок в виде дуги окружности (2-3) задается координатами центра дуги $O_c(y_c; z_c)$, радиусом дуги R_c. Уравнение дуги окружности имеет вид:

$$\begin{cases} z_u = R_c + z_c; \\ y_u = R_c + y_c. \end{cases} \qquad (34)$$

Участок в виде дуги окружности (3-4) задается координатами центра дуги $O_o(y_o; z_o)$, радиусом дуги R_o. Уравнение дуги окружности в системе координат инструмента имеет вид:

$$\begin{cases} z_u = R_o + z_o; \\ y_u = R_o + y_o. \end{cases} \qquad (35)$$

Для получения полной поверхности шлифовального круга в компьютерной системе профилю шлифовального круга необходимо придать движение вращения вокруг оси O_uZ_u (рис. 8). Уравнение шлифовального круга в параметрическом виде примет вид

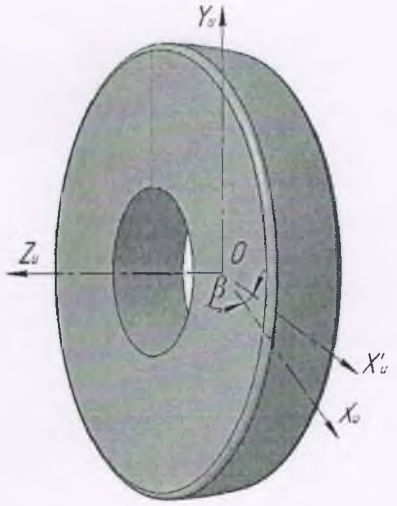


Рис. 8. Шлифовальный круг

$$\begin{cases} x'_u = (R_o + R_c + z_o + z_c)\cos\beta; \\ y'_u = (R_o + R_c + z_o + z_c)\sin\beta; \\ z'_u = z_u. \end{cases} \qquad (36)$$

где β – угол поворота точки профиля шлифовального круга относительно системы $X_uY_uZ_u$; R – текущий радиус профиля инструмента.

Для моделирования процесса обработки необходимы параметры заготовки сферической фрезы, которая представляет собой сферическую поверхность в оправке.

Для моделирования процесса обработки компьютерные модели шлифовального круга и заготовки сферической фрезы были импортированы в систему проектирования КОМПАС-3D V12. По расчетным данным параметров установки шлифовального круга смоделирован процесс обработки сферической фрезы шлифовальным кругом (рис. 9).

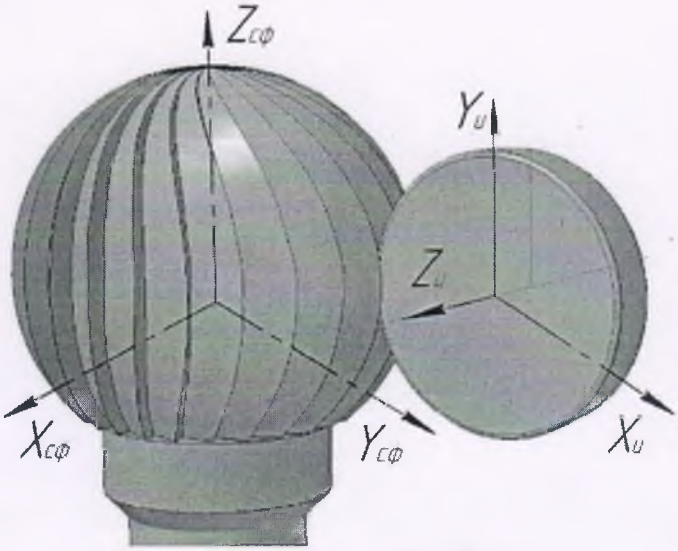


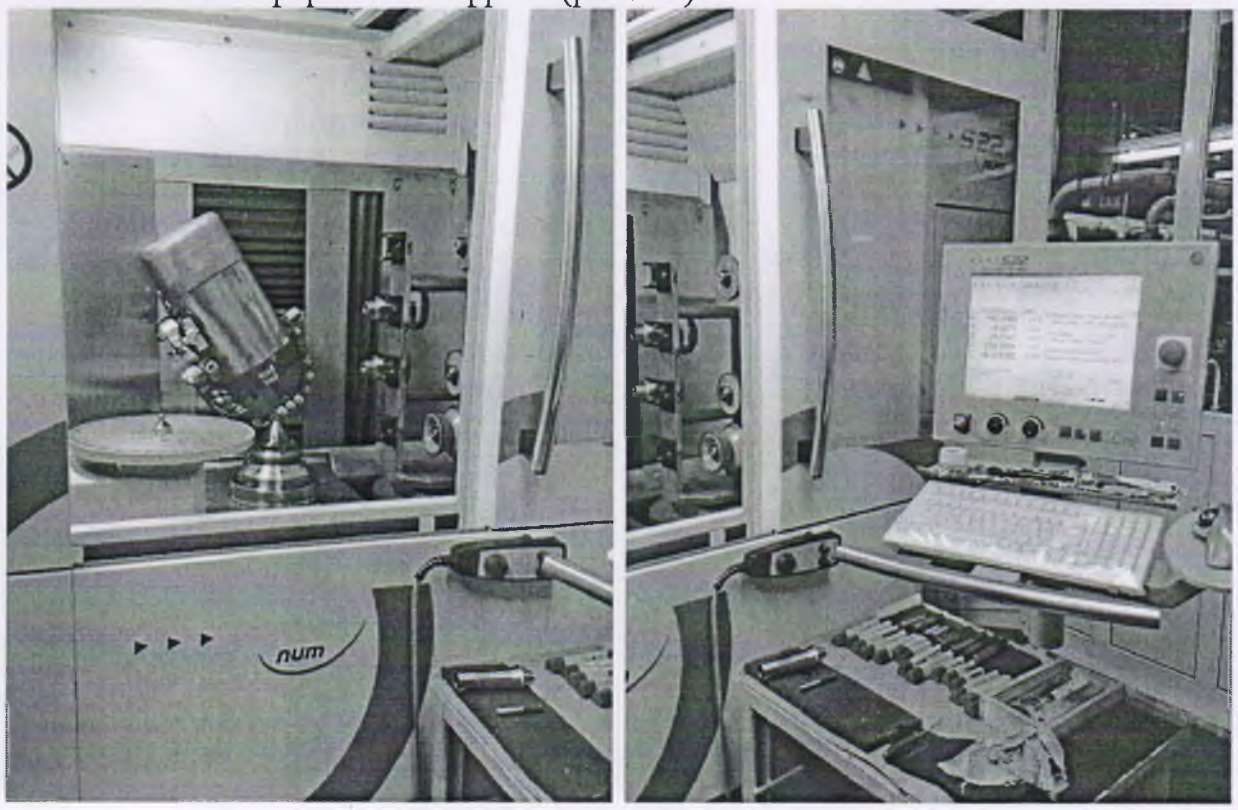
Рис. 9. Процесс обработки сферической фрезы

На основе математической модели винтовой стружечной канавки разработан алгоритм и составлена программа расчета параметров винтовой стружечной канавки и координат точек профиля винтовой поверхности сферической фрезы на языке программирования Delphi. На программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612411 РФ.

Программа позволяет рассчитать конструктивные параметры винтовой стружечной канавки в любом торцовом сечении и координаты всех точек образующей на всей винтовой поверхности сферы.

Четвертая глава посвящена технологическому обеспечению процесса формообразования винтовых стружечных канавок и подтверждению адекватности математических моделей в промышленных условиях при изготовлении опытной партии сферических фрез путем сопоставления расчетных и фактических размеров профилей винтовой стружечной канавки.

Выходные данные из разработанной программы ввели в управляющую программу пятикоординатного станка Michael Deckel S22p Num (рис. 10) и одноугловым шлифовальным кругом (марка $ЛКВ_{40}$ 63/50 ГОСТ 24106-80) в ручном режиме была изготовлена сферическая фреза (рис. 11).



а) рабочая область; б) консоль управления.

Рис. 10. Обработка сферической фрезы на пятикоординатном станке Michael Deckel S22p Num

Рис. 11. Сферическая фреза

Для установки адекватности компьютерной модели провели разрушающий контроль партии сферических фрез. Каждый полученный образец для измерения поместили в форму и залили эпоксидной смолой. После затвердевания эпоксидной смолы, извлекли образец из формы, технологически разрезали и прошлифовали торец.

Профиль винтовой стружечной канавки измерялся на измерительном микроскопе марки MEIJI MT 7530. (рис. 12).

Рис. 12. Профиль винтовой стружечной канавки

Результаты измерений изготовленных сферических фрез показали что средняя погрешность профиля винтовой стружечной канавки составляет δ=0,045.

Параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73 передних и задних поверхностей винтовой стружечной канавки сферических фрез повышенной точности должны быть не более Ra 0,4 мкм. В лаборатории технических измерений были произведены измерения шероховатости на профилометре 296. Результаты измерения показали, что шероховатость передней и задней поверхностей винтовой стружечной канавки партии изготовленных сферических фрез составляет Ra 0,25 мкм.

Рис. 13. Сферическая фреза со сквозным осевым отверстием

Для исключения зоны с нулевыми скоростями в сферической фрезе с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки и возможности подачи смазочно-охлаждающей жидкости было предложено центровое отверстие прожигать насквозь (рис. 13). Для прожига сквозного осевого отверстия использовалась электроэрозионная обработка. Данное решение исключает зону с нулевыми скоростями в сферических фрезах, а так же обеспечивает возможность подачи охлаждающего средства по сквозному осевому отверстию, что исключает забивание стружкой, как самого осевого отверстия, так и винтовой стружечной канавки, а также положительно влияет на процесс обработки в целом, а значит и качество обрабатываемой поверхности. На данную конструкцию получен патент РФ на полезную модель № 90000.

В соответствии с теоретическими исследованиями сферических фрез с винтовыми стружечными канавками проведены исследования, которые позволили установить повышение работоспособности инструмента и доказать преимущества над стандартным инструментом. Для проведения экспериментального исследования было выбрано, в виду повсеместного применения в машиностроении, 3 вида обрабатываемого материала: Сплав ВТ5Л, Сталь 20Х13, Сталь 5ХНМ. Обработка проводилась плоской поверхности заготовки на глубину не более 1 мм и на длину не более 100 мм. Размеры заготовок 400х200х40. Сферическая фреза относительно заготовки наклонена на 75°. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялась водосмешиваемая СОЖ Аквол-2.

Результаты эксперимента показали что шероховатость обработанной поверхности стандартными и экспериментальными сферическими фрезами одинакова, но стойкость экспериментальных сферических фрез выше на 17-23%.

Использование сферической фрезы с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок позволяет достичь снижение затрат на инструмент в 1,22 раза, при этом снижение затрат на производство составляет 7,07%.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математические модели и алгоритмы расчета параметров винтовой стружечной канавки сферической фрезы и шлифовального круга.
2. Разработана математическая модель обработки сферической фрезы шлифовальным кругом с учетом угла скрещивания при взаимном положении инструмента и заготовки, которая позволяет обеспечить заданный профиль.
3. Выявлено, что профилирующий участок режущей кромки шлифовального круга, формирующий дно винтовой стружечной канавки, для исключения подрезания или неполного формирования, необходимо править с радиусом на 0,1-0,2 мм меньше, чем радиус дна винтовой стружечной канавки сферической фрезы.
4. Проведено компьютерное моделирование процесса обработки винтовой стружечной канавки сферической фрезы шлифовальным кругом.
5. Установлено, что для обеспечения возможности обработки винтовой стружечной канавки сферической фрезы шлифовальным кругом необходимо, чтобы у винтовой линии на сфере параметр винта был не более 0,5.
6. Подтверждена адекватность алгоритмов, математических и компьютерных моделей в промышленных условиях при изготовлении опытной партии путем сопоставления профилей винтовой стружечной канавки изготовленных сферических фрез с результатами компьютерного моделирования.
7. Разработаны методика создания сферических фрез с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок, обеспечивающая отсутствие подрезов или неполного формирования профиля и конструкция сферической фрезы со сквозным осевым отверстием, исключающая зону с нулевыми скоростями.
8. Результаты эксперимента показали что шероховатость обработанной поверхности стандартными и экспериментальными сферическими фрезами одинакова, но стойкость экспериментальных сферических фрез выше на 17-23%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по перечню ВАК РФ, патенты на изобретения и свидетельства о госрегистрации программ на ЭВМ

1. Чемборисов, Н.А. Математические зависимости торцового сечения сферической бор-фрезы / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // СТИН № 8, 2009. – с. 23-24.

2. Чемборисов, Н.А. Математическая модель формообразующей части сферической бор-фрезы / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // Металлообработка № 5(53), 2009. – с. 6-9.

3. Чемборисов, Н.А. Математическое описание винтовой линии на сфере – сообщение первое / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // СТИН № 1, 2010. – с. 36-40.

4. Чемборисов, Н.А. Математическое описание винтовой линии на сфере – сообщение второе / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // СТИН № 2, 2010. – с. 25-29.

5. Чемборисов, Н.А. Определение зоны контакта при обработке фасонной сферической фрезы дисковым инструментом / Н.А. Чемборисов, Р.М. Хисамутдинов, И.З. Сунгатов // СТИН № 9, 2012. – с. 34-35.

6. Симонова, Л.А. Имитационное моделирование формообразования специального дискового инструмента на этапе технологической подготовки производства на примере сферической фрезы / Л.А. Симонова, Р.М. Хисамутдинов, И.З. Сунгатов // КШП-ОМД. 2015. – № 3. С. 30-33.

7. Симонова, Л.А. Автоматизированная подсистема формообразования специального дискового инструмента фрезы / Л.А. Симонова, Р.М. Хисамутдинов, И.З. Сунгатов // Металлообработка № 6(90), 2015. – с. 60-65.

8. Хисамутдинов, Р.М. Расчет параметров винтовой стружечной канаки на сфере / Р.М. Хисамутдинов, И.З. Сунгатов // СТИН № 2, 2016. – с. 19-21.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612411 Российская Федерация. Расчет конструктивных параметров винтовой стружечной канавки и координат точек профиля винтовой поверхности (FSF v. 0.1) / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов (RU); Правообладатели: Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов (RU) – № 2010610758; заявл. 17.02.2010; зарегистр. 06.04.2010.

10. Патент РФ № 90000. Борфреза со сферическим торцом со сквозным осевым отверстием / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов – № 2009125388/22; заявл. 02.07.09; опубл. 27.12.09 Бюл. № 36. – 3 с.

Публикации в других изданиях

11. Чемборисов, Н.А. Профилирование винтовых поверхностей дисковой фрезой / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // Ученые записки, Том VI. – Альметьевск: АГНИ, 2008, С.135.

12. Сунгатов, И.З. Кинематические параметры процесса формообразования винтовой поверхности дисковой фрезой // Студенческая наука в России на современном этапе, Сборник докладов. – Набережные челны: ИНЭКА, 2008, С.163.

13. Чемборисов, Н.А. Математические зависимости сферической бор-фрезы / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // Наука и технологии. Том 2. Труды

XXVIII Российской школы. Специальный выпуск, посвященный 65-летию Южно-Уральского государственного университета, РАН. – Москва, 2008. С.227.

14. Сунгатов, И.З. Задачи формообразования сложных поверхностей / И.З. Сунгатов // XVI Туполевские чтения, Том I. Труды международной молодежной научной конференции. – Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. С.79.

15. Сунгатов, И.З. Математическая модель винтовой линии на исходной инструментальной поверхности // Камские чтения, Часть 3. Сборник материалов 1-й межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Набережные Челны, 2009, С.165.

16. Сунгатов, И.З. Элементы теории сферических винтовых поверхностей / И.З. Сунгатов // XVII Туполевские чтения, Том I. Труды международной молодежной научной конференции. – Казань, 2009, С.69.

17. Чемборисов, Н.А. Конструктивные параметры винтовой стружечной канавки бор-фрез / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009». Том 2. Сборник материалов V всероссийской научно-технической конференции. – Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009. С.225.

18. Сунгатов, И.З. Бор-фрезы с групповыми и длинными зубьями / И.З. Сунгатов, Н.А. Чемборисов // Инструменты и факты. – 2010. – №1. С.41

19. Чемборисов, Н.А. Бор-фреза со сферическим торцом со сквозным осевым отверстием / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // Образование и наука производству. Часть 1, книга 2. Сборник трудов международной научно-технической и образовательной конференции. – Набережные Челны: ИНЭКА, 2010. – С.224