

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование кафедры)

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств

(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Исследование геометрии и области применения инструмента,  
оснащенного хвостовиком Capto

Студент	<u>А.Т. Касимов</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>Л.А. Резников</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Консультанты	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент Н.М. Бобровский \_\_\_\_\_ (личная подпись)  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия )

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов \_\_\_\_\_ (личная подпись)  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия )

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА.....	13
1.1 Конус Морзе.....	13
1.2 Метрические конуса.....	15
1.3 Укороченный конус Морзе. ....	16
1.4 Конус 7:24. ....	17
1.5 Конус Carto.....	19
2. АНАЛИЗ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРЛА, ОСНАЩЕННОГО ХВОСТОВИКОМ САРТО.....	22
3. АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЯ КОНУСА САРТО.....	30
3.1 Расчет максимального зазора для упрощенной геометрии конуса Carto. ....	30
3.2. Расчет максимального зазора при неупрощенной геометрии конуса Carto. ....	35
3.3. Построение графика зависимости максимального зазора от погрешности изготовления.....	47
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР В СВЕРЛЕ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ ANSYS.....	52
4.1 Краткая информация о программе ANSYS.....	52
4.2 Моделирование напряжений в сверле при воздействии на него крутящего момента сверления.....	54
4.3 Моделирование напряжений в сверле при воздействии на него силы резания, при изготовлении сверла на заточной операции. ....	57

4.3 Моделирование температурного поля в сверле при воздействии на него закалки ТВЧ.....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	68
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	72

## ВВЕДЕНИЕ

В конце двадцатого века компания «Сандвик Коромант» разработала новый элемент крепления режущей части инструмента к шпинделю станка – хвостовик Capto. Данный крепежный элемент был предложен для увеличения показателей надежности закрепления режущего инструмента. Сейчас данная система под брендом «Коромант Capto» приспособлена к применению абсолютно на любом станке, оборудовании. Ее применяют во всех областях обработки металлов резанием [1]. Большим плюсом данной системы является ее универсальность: инструмент, оборудованный таким хвостовиком можно использовать на любом станке вне зависимости от типа шпинделя и вариантом закрепления требуемого режущего инструмента. На рисунке 1 изображена модель сверла, оснащенного хвостовиком Capto. Данная модель выполнена в программе «Компас».

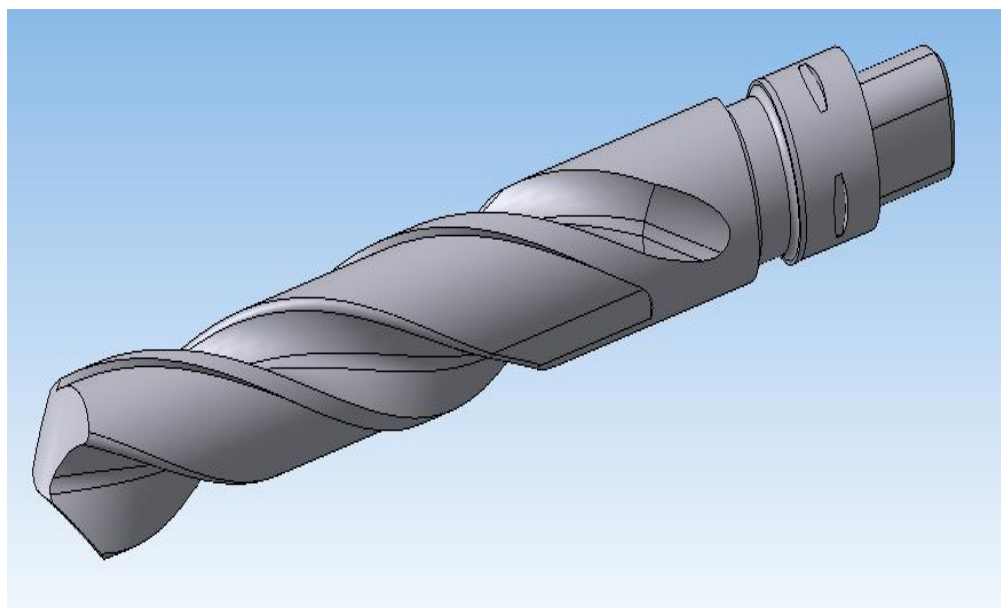


Рисунок 1 - Модель сверла с хвостовиком Capto

Основной идеей данного соединения является совокупная работа двух поверхностей, по которым происходит контакт конусов хвостовика и шпинделя станка (на шпинделе станка внутренний конус) используются

одновременно [2]. В данном случае это конический треугольник с симметричными сторонами (углы по  $60^\circ$ ) и фланец. Первая поверхность позволяет контролировать осевое перемещение, а вторая не дает инструменту перемещаться вдоль его оси. Наибольшей стабильности удалось добиться за счет использования контакта двух базовых поверхностей: посадка с натягом шлифованного конуса хвостовика режущего инструмента и такая же шлифованная опорная поверхность на внутреннем конусе (отверстие) в шпинделе станка. Таким образом конструкторам «Сандвик Коромант» удалось добиться жесткости соединения, его точности, соосности соединения. Так же данное соединение отлично подходит для передачи крутящего момента. При этой нагрузке от изгибающих напряжений не превышают допускаемые [3]. На рисунке 2 показано более подробное изображение хвостовика Carpo:



Рисунок 2 - Хвостовик Carpo

Обсуждая геометрию хвостовика Carpo, нельзя не отметить его криволинейный профиль. Данная особенность позволяет этому элементу режущей системы наиболее эффективно осуществлять передачу крутящего момента за счет отсутствия каких-либо крепежных элементов, например, шпонок или штифтов. Такая конструкция соединения Carpo позволяет

практически исключить вероятность осевого перемещения инструмента в любых направлениях.

Использование посадки с натягом в совокупности с высокой зажимной силой позволяет обеспечить полноценный контакт по обеим базовым поверхностям соединения Capto. Большим открытием для инженеров «Сандвик Коромант» стал тот факт, что профиль хвостовика соединения, имеющий криволинейные опорные поверхности большой площади и фланец, при обработке таким инструментом оказался равномерно нагруженным [4].

При таком распределении напряжений обеспечивается полная соосность режущей кромки и шпинделя станка, также несмотря на достаточно высокие силы резания пиковые нагрузки в этом случае отсутствуют. То есть при данном закреплении инструмента крутящий момент передается симметрично по профилю его крепления, в отличие от других способов закрепления, где момент кручения передается шпонкой или силами трения (контактными). На рисунке 3 показана эпюра распределения контактных напряжений в поперечном сечении:

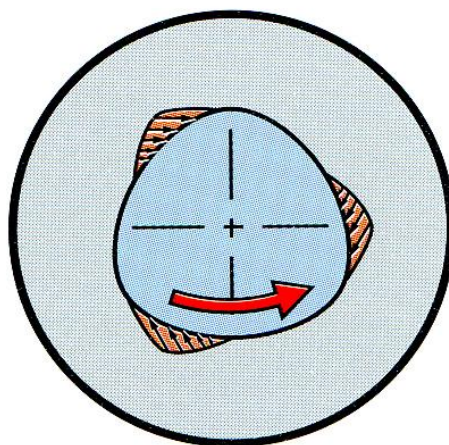


Рисунок 3 - Эпюра контактных напряжений в поперечном сечении

Стоит отметить, что в такой системе закрепления хвостовик очень жестко соединен со шпинделем станка, что благоприятно влияет на его сопротивляемость изгибающим и крутящим напряжениям (рис. 4).

Неотъемлемой частью данного соединения является его точность, которую называют повторяемостью по осям. Ее допуск не превышает  $\pm 2$  мкм. Все перечисленные выше плюсы в совокупности при использовании такого способа закрепления позволяют работать с увеличенными режимами резания, использовать более высокие значения подачи. А это в свою очередь позволяет предприятию экономить годовое машинное время [6]. Использование жесткого – а жесткость соединения «Коромант Сапо» стремится к жесткости цельной конструкции – и очень надежного закрепления позволяет не только снимать большие слои металла за проход, но и существенно снизить вероятность производственного брака. Все вышеперечисленное существенно увеличивает производительность применяемой обработки.

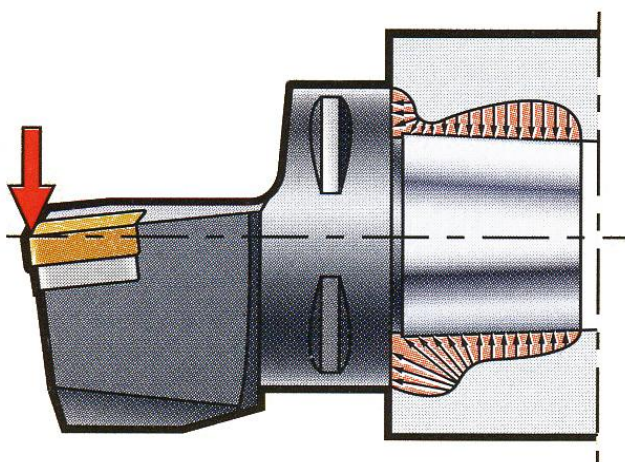


Рисунок 4 - Эпюра контактных напряжений в продольном сечении

Большим достоинством данной разработки является возможность менять инструмент максимально быстро [5]. Такая особенность существенно сокращает время технологического обслуживания.

Для примера возьмем токарную обработку: на этой операции применяется достаточно дорогое оборудование, однако, на токарной операции эффективное время обработки зачастую составляет лишь 1/3 часть

от всего фактически затраченного времени. То есть используемое дорогостоящее оборудование не приносит максимальной прибыли (отдачи).

Применяемая на большинстве предприятиях инструментальная оснастка, не обладает способностью быстро менять инструмент, заготовку [7]. Также нет возможности переналаживать и привязывать инструмент, сменять режущие кромки инструмента. Все вышеперечисленное существенно снижает соотношение эффективного времени обработки к фактическому. Применение быстросменной оснастки, например, оснастки Capto (см. рисунок 5), один из наиболее простых способов увеличить такое соотношение за счет снижения до минимума простоев, что сэкономит массу времени. По исследованиям инженеров «Коромант Capto» экономия времени составит в среднем 7 минут, что позволит дополнительно приобрести предприятию в районе 50 часов рабочего времени на каждый инструмент револьверной головки [8]. С точки зрения экономики, это выводит применение подобной оснастки на срок окупаемости всего в несколько месяцев (за счет использования простого, но эффективного модульного быстросменного соединения).



Рисунок 5 - Инструменты, оснащенные конусами Capto



Помимо массового производства, данная оснастка эффективно показывает себя и в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства, где требуется часто переналаживать используемое оборудование на новые детали [9]. Большим плюсом данной системы является также возможность менять державку с уже установленной вне станка пластиной, исключая замену на станке, что позволяет сэкономить львиную долю времени. Применение оснастки разработки и производства «Коромант Сапто» на токарных станках (рис. 6) позволяет сократить время, требующееся на замену инструмента, что в свою очередь позволяет увеличить показатели производительности: увеличивается эффективное время обработки, что приводит к увеличению выпуска деталей (за счет снижения вспомогательного времени). Другими словами применение данной модульной оснастки повышает эффективность работы предприятия [10].

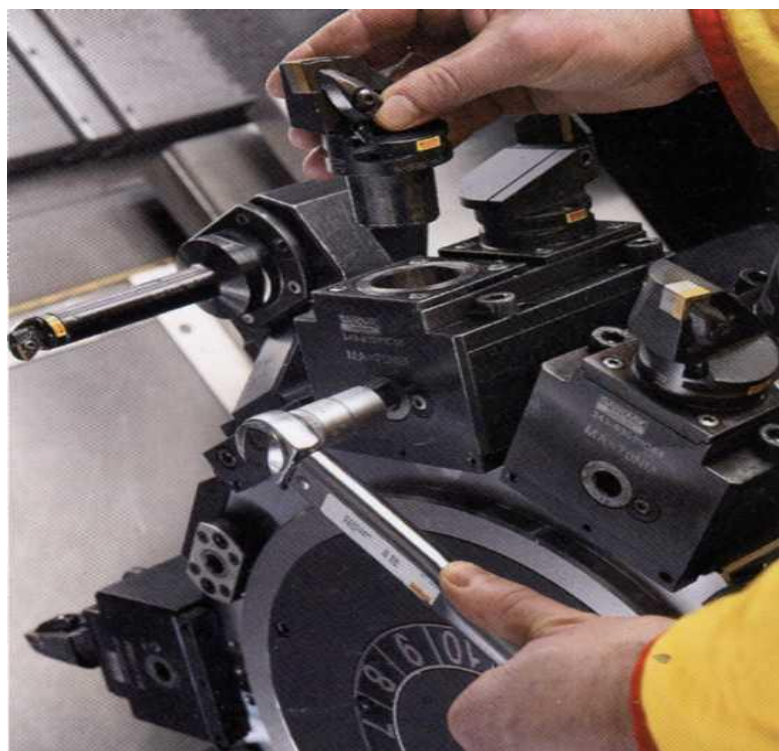


Рисунок 6 - Смена инструмента с модульной системой Coromant Capto

Оснастка Capto (рис. 7) включает в себя 6 типоразмеров хвостовика, начиная от минимального размера C3, выполненного диаметром 32 мм,

заканчивая размером C8XL, обладающего диаметром 100 мм. Наибольший размер применяют в основном для тяжелой работы, где от закрепления требуется максимальная жесткость соединения.

Анализируя конкурентный рынок производителей оснастки, конструктора «Сандвик Коромант» произвели два сравнительных теста с конкурирующими производителями оснастки для металлорежущих станков. Их целью было определение эффективности своей конструкции и демонстрация конструктивных особенностей оснастки собственного производства:

1) В первом тесте они измеряли величину изгиба резца под действием крутящих и изгибающих нагрузок (моментов) на токарной операции. В качестве основного конкурента Capto C5 была определена модель HSK50-A (система полых хвостовиков, которые обеспечивают правильное базирование и очень надежное закрепление при высокоскоростной обработке резанием – частота вращения в районе 7000 об/мин.). На токарной операции очень важным параметром является восприятие крутящего момента. Данный тест выявил, что прикладывание к модели HSK50-A силу в 4 кН приводит к значительному смещению соединения и нарушению соосности. Когда сила резания приблизилась к граничным значениям для полустогового точения – 17 кН отклонение уже было около 0,4 мм, тогда как C5 показывал существенно меньшее значение – всего лишь 0,1 мм. Таким образом модель HSK50-A оказалась применима исключительно для чистовой обработки точением из-за ограниченной способности передачи крутящего момента.

2) Во втором тесте производилось сравнение сопротивления изгибающим нагрузкам, то есть сравнивалось отклонение под действием таких нагрузок. Здесь C5 снова превзошел своего конкурента и показал лучшую эффективность. Оказалось, что благодаря наличию конуса большей длины с меньшей конусностью (1/20 у C5 против 1/10 у HSK50-A), большей площади контактной поверхности и, наконец, существенно большей зажимной силе Capto C5 обладает существенно большей изгибной

жесткостью, что позволяет ему лучше воспринимать нагрузку от изгибающего момента.

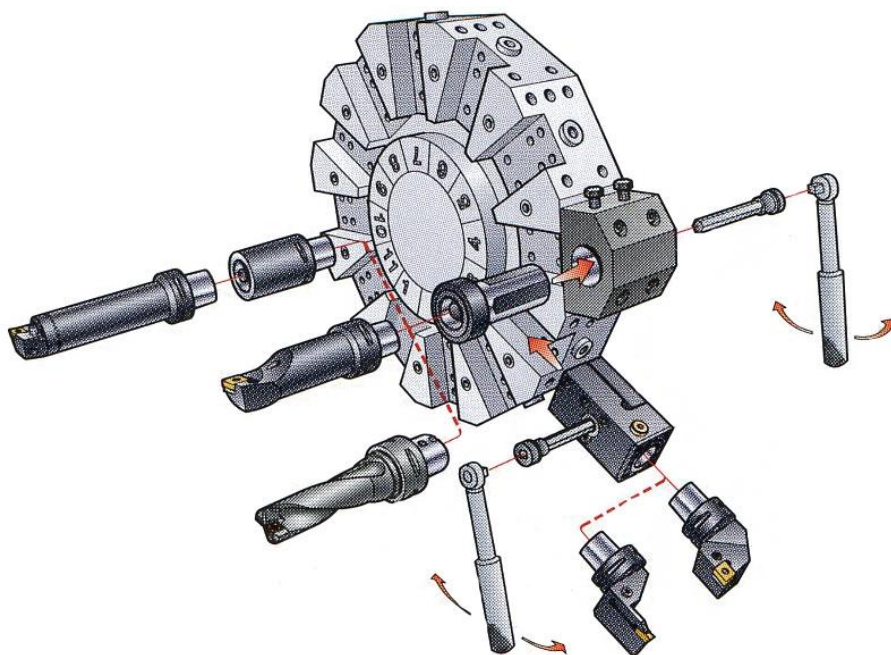


Рисунок 7 - Обычная револьверная головка, оснащенная базовыми блоками Coromant Capto

Подводя небольшой итог, системы «Коромант Capto» были на голову сильнее конкурента при определении параметра жесткости при полустивом точении. Применение таких систем обеспечивает существенный рост производительности обработки металлов резанием за счет возможности быстро сменять инструмент, использовать более жесткие режимы резания, в частности, большие значения скорости подачи, а также другие параметры обработки.

***Цель работы:***

Повышение надежности закрепления осевого инструмента в процессе резания за счет выбора целесообразной конфигурации хвостовика.

***Задачи работы:***

1. Провести литературный обзор общих способов закрепления осевого инструмента.

2. Используя силовые соотношения из теории резания и курса сопротивления материалов определить область применения сверла, оснащенного хвостовиком Carptо по сравнению со сверлом, оснащенным хвостовиком Морзе.

3. Проанализировать геометрию конуса Carptо, определить зависимость максимального зазора между конусами на шпинделе станка и на хвостовике сверла, от погрешности изготовления отверстия для упрощенной геометрии конуса Carptо.

4. Проанализировав геометрию конуса Carptо, определить зависимость максимального зазора между конусами на шпинделе станка и на хвостовике сверла, от погрешности изготовления отверстия для неупрощенной геометрии конуса Carptо.

5. Построить график зависимости максимального зазора, возникающего в соединении конуса на шпинделе станка и на хвостовике сверла, от погрешности изготовления внутреннего конуса.

6. Используя пакет программы ANSYS, произвести моделирование напряжений в сверле во время процесса обработки данным сверлом.

7. Используя пакет программы ANSYS, произвести моделирование напряжений в сверле во время изготовления данного сверла на заточной операции.

8. Используя пакет программы ANSYS, произвести моделирование расположения температурных полей при изготовлении данного сверла, а именно при его закалке токами высокой частоты (ТВЧ).

# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

В источнике [11] автор определил инструментальный конус как систему, состоящую из конического патрона инструмента (сверло, зенкер, фреза, развёртка) и конического отверстия соответствующего размера (гнездо) в шпинделе или задней бабке станка. Инструментальный конус предназначен для быстрой смены инструмента с высокой точностью центрирования и надёжностью крепления. Существует много стандартов на различные конусы, различающиеся по конусности и исполнению (рис. 8).

*Классификация:*

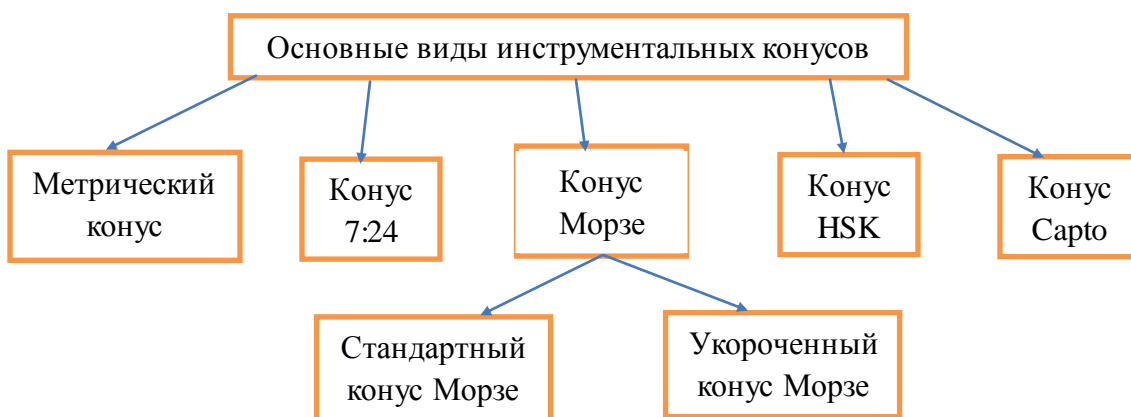


Рисунок 8 - Блок-схема

Рассмотрим основные виды инструментальных конусов.

## 1.1 Конус Морзе.

В источнике [12] автор выявил, что конус Морзе является одним из самых широко применяемых креплений инструмента. Он был изобретен Стивеном А. Морзе (приблизительно в 1864 году). На блок-схеме (рис. 9) ниже изображено несколько разновидностей конусов Морзе.

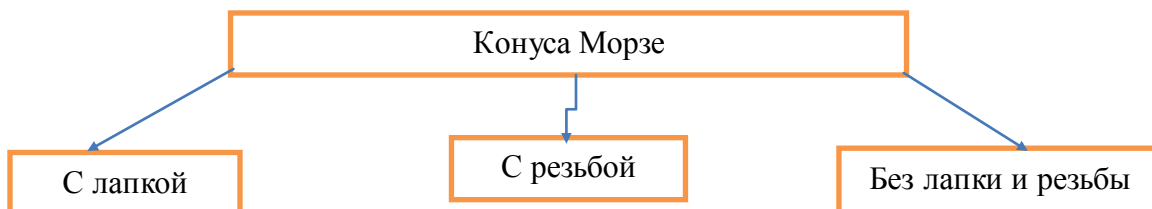


Рисунок 9 - Блок-схема

Конус Морзе подразделяется на восемь размеров, от КМ0 до КМ7.

Исходя из источника [13] , по словам автора, существует несколько исполнений хвостовика конуса: с лапкой, с резьбой, без лапки и резьбы (Рис. 10). Инструмент с лапкой крепится в шпинделе заклиниванием этой лапки (при помощи специального отверстия в шпинделе станка). Лапка предназначена для облегчения выбивания конуса из шпинделя и предотвращения проворачивания. Предназначение лапки – упрощение выбивания конуса из станка. Еще такая конструкция предотвращает проворачивание инструмента. Также существует инструмент, оснащенный внутренней резьбой (возможно использование в конструкции конуса системы для подачи СОЖ). Такая конструкция исключает выпадение конуса инструмента.

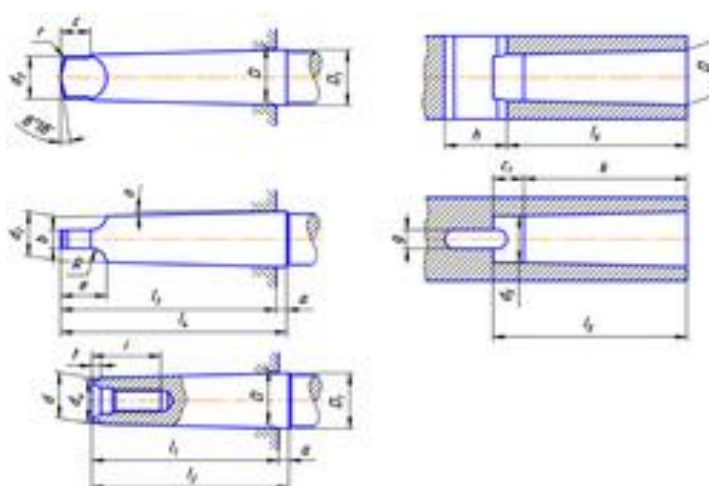


Рисунок 10 - Схема инструментального конуса (наружные конусы с лапкой, наружные конусы без лапки, внутренние конусы (гнезда))

### *Достоинства:*

- простота конструкции;
- дешевизна изготовления;
- позволяет быстро менять инструмент;
- крепится точно и центрировано.

### *Недостатки:*

- в станках с автоматической смены инструмента возникают сложности с фиксацией;
- в станках с автоматической смены инструмента возможно заклинивание при смене инструмента;
- при больших крутящих моментах возникает возможность проворачивания инструмента в шпинделе станка.

## 1.2 Метрические конуса.

В источнике [14] автором было выявлено, что по мере развития станкостроения понадобилось расширить диапазон размеров конусов Морзе как в большую, так и в меньшую стороны. Однако, рост промышленности требовал расширения перечня конусов Морзе. Для новых типоразмеров конуса, выбрали конусность ровно 1:20 и назвали их **метрическими конусами**. Конструктивных различий между конусом Морзе и метрическим нет. Типоразмер метрических конусов (см. таблицу 1) указывается по наибольшему диаметру конуса в миллиметрах. В таблице приведены все основные типоразмеры конусов Морзе и метрических конусов. В том числе диаметры, конусов, длин конусов, а так же обозначение используемой резьбы, если она имеет место быть. Как видно в таблице, метрические конуса обозначаются просто номерами, а конуса Морзе с добавлением «KM» перед номером. После таблицы приведены достоинства и недостатки метрических конусов в сравнении с конусами Морзе.

Таблица 1 – Типоразмеры конусов Морзе и метрических конусов

	Обозн. конуса	Кон-ть	D	D <sub>1</sub>	d	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub> max	d <sub>4</sub> max	d <sub>5</sub>	l <sub>1</sub> max	l <sub>2</sub> max	l <sub>3</sub> max
Метрический	№ 4	1:20	4	4	3	-	-	-	3	3	23	25	-
	№ 6	1:20	6	6	4	-	-	-	4	5	32	35	-
Морзе	KM0	01:19,2	9	9	6	-	6	6	6	7	50	53	56
	KM1	01:20,0	12	12	9	M6	9	9	9	10	54	57	62
	KM2	01:20,0	18	18	15	M10	14	14	14	15	64	69	75
	KM3	01:19,9	24	24	20	M12	19	19	19	20	80	86	94
	KM4	01:19,3	31	32	26	M16	25	25	24	27	103	109	118
	KM5	01:19,0	44	45	38	M20	37	36	36	38	130	136	150
	KM6	01:19,2	63	64	54	M24	52	51	51	55	182	190	210
	KM7	01:19,2	83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	286
Метрический	№ 80	1:20	80	80	70	M30	69	67	67	72	196	204	220
	№ 100	1:20	100	101	88	M36	87	85	85	90	232	242	260
	№ 120	1:20	120	121	107	M36	105	102	102	109	268	280	300
	№ 160	1:20	160	161	143	M48	141	138	138	146	340	356	380
	№ 200	1:20	200	201	179	M48	177	174	174	183	412	432	460

*Достоинства:*

- простота конструкции;
- дешевизна изготовления;
- позволяет быстро менять инструмент;
- крепится точно и центрированно.

*Недостатки:*

- меньшая точность центрирования;
- при больших крутящих моментах возникает возможность проворачивания инструмента в шпинделе станка.

### 1.3 Укороченный конус Морзе.

В [15] автором был сделан вывод, что для многих видов работ конус Морзе был слишком длинным. Для них придумали укороченные конуса Морзе. Цифра в обозначении короткого конуса — диаметр новой толстой части конуса в миллиметрах.



*Достоинства:*

- меньшая длина, что дает больше возможностей для использования.

*Недостатки:*

- меньшая точность центрирования;
- при больших крутящих моментах возникает возможность проворачивания инструмента в шпинделе станка.

#### 1.4 Конус 7:24.

По словам автора [16] был проанализирован конус **7:24** (см. рис 11). Автор утверждает, что данный конус широко распространен при работе на станках с числовым программным управлением, на которых смена инструмента происходит автоматизировано.



Рисунок 11 - Конус 7:24

В таблице 2 перечислен перечень основных типоразмеров конусов 7:24, применяемых в современном машиностроении, а также указаны геометрические параметры данного соединения.

Таблица 2 – Типоразмеры конусов 7:24

Конус	D	L	Резьба	DF
10	15,87	21,80	-	-
15	19,05	26,90	-	-
25	25,40	39,80	-	-
30	31,75	49,20	M12	50,00
35	38,10	57,20	-	-
40	44,45	65,60	M16	63,00
45	57,15	84,80	M20	80,00
50	69,85	103,70	M24	97,00
55	88,90	132,00	M24	130,00
60	107,95	163,70	M30	156,00
65	133,35	200,00	M36	195,00
70	165,10	247,50	M36	230,00
75	203,20	305,80	M40	280,00
80	254,00	390,80	M40	350,00

*Достоинства:*

- устранение основных недостатков использования конусов Морзе при автоматической смене инструмента; а именно: самозаклинивание конуса в шпинделе, малая площадь осевого упора, большая длина, сложность автоматической фиксации конуса в шпинделе, отсутствие зацепов для автоматической смены инструмента.

*Недостатки:*

- экономически целесообразно применять только для станков с автоматической сменой инструмента;

- при больших крутящих моментах возникает возможность проворачивания инструмента в шпинделе станка.

### 1.5 Конус Capto.

В [17] автором было выяснено, что компанией *Sandvik* для повышения надежности закрепления осевого инструмента и эффективной передачи на него крутящего момента было предложено использовать хвостовики в виде так называемого конуса *Capto*.

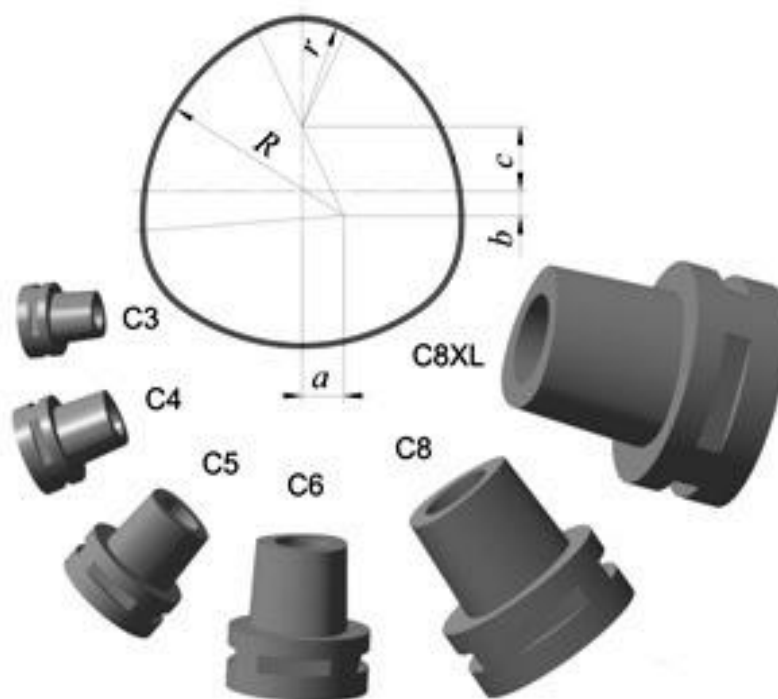


Рисунок 12 - Геометрия конуса Capto

Способ соединения хвостовика со шпинделем при применении конуса *Capto* основан на том, что две контактные поверхности – конус треугольного профиля (рис. 12), обеспечивающий самоцентрирование соединения, и фланец, ограничивающий осевое перемещение, – используются одновременно. Это обеспечивает требуемую жесткость и точность, передачу крутящего момента, а также восприятие изгибающей нагрузки. Для повышения стабильности соединения используется посадка с натягом. В [18] автор выяснил, что это позволяет отказаться от съемных элементов (штифтов, шпонок и т.п.) и снизить вероятность радиального и осевого смещения инструмента. Все вышеперечисленное позволяет осуществлять

работу (резание) инструментом, оснащенным подобным хвостовиком с увеличенными режимами резания, а именно:

- подача инструмента;
- скорость резания.

Таким образом, работа с увеличенными режимами резания позволяет увеличить производительность работы инструментом, оснащенным хвостовиком Capto, за счет снижения машинного времени обработки.

В [19] автор провел исследование и выявил, что эта вероятность, однако, возрастает при нарушении геометрии соединения вследствие погрешностей его изготовления. Из-за таких погрешностей возникают зазоры в оснастке Capto, а именно в соединении инструментального конуса с конусом на шпинделе станка. Диаметры конуса Capto (в зависимости от его обозначения) указаны на рисунке 13.

<b>Обозначение</b>	<b>Диаметр конуса Capto, мм</b>
C3	32
C4	40
C5	50
C6	63
C8	80
C8XL	100

Рисунок 13 - Конструкция и размеры конусов Capto

Таким образом, были выявлены следующие достоинства и недостатки хвостовиков Capto по сравнению с гладкими конусами.

*Достоинства:*

- автоматическая и быстрая смена инструмента;
- конструкция исключает возможность проворачивания инструмента в шпинделе станка;
- жесткость соединения стремится к жесткости цельной конструкции;
- сокращения машинного времени обработки за счет возможности работы с более жесткими режимами резания;
- возможность установки токарных резцов в шпиндель;

*Недостатки:*

- сложный профиль хвостовика;
- дороговизна изготовления;

## 2. АНАЛИЗ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРЛА, ОСНАЩЕННОГО ХВОСТОВИКОМ CARTO

Использование инструмента, оснащенного хвостовиком Морзе для закрепления режущего инструмента в шпинделе станка не всегда возможно, так как данный вид крепления имеет низкий КПД по передаче крутящего момента [20]. Данная проблема приводит к достаточно высокой вероятности проворачивания инструмента, оснащенного таким хвостовиком, в шпинделе станка, когда на инструмент воздействуют силы резания [21]. Использование конуса *Carpto* позволяет избавиться от этой проблемы, а также позволяет осуществлять обработку инструментом, оснащенный таким хвостовиком с существенно большими значениями подачи, что позволяет увеличить производительность обработки таким инструментом. Однако, и у данного соединения имеются свои недостатки. Оно имеет достаточно сложный профиль, что делает их изготовление более трудоемким. Таким образом, инструмент, оснащенный конусом *Carpto*, целесообразно использовать только для передачи больших крутящих моментов, где есть вероятность проворачивания инструмента, оснащенного конусом Морзе.

К вопросу об области целесообразного применения хвостовиков *Carpto* при работе осевого инструмента подойдем, основываясь на известном из теории резания положении, что проворачивание инструмента, оснащенного стандартными «гладкими» конусами в шпинделе станка происходит, если [22]:

$$M_T \geq M_{кр}, \quad (2.1)$$

где  $M_T$  – момент трения хвостовика инструмента в шпинделе станка;  $M_{кр}$  – максимальный крутящий момент, возникающий на инструменте в процессе резания.

Запишем условие целесообразного применения конусов *Carpto*:

$$M_T < M_{кр}. \quad (2.2)$$

Из теории резания определим момент трения [23]:

$$M_T = 10^{-3} \xi (1 - 0,04\Delta) P_o \frac{\bar{d}}{\rho}, \text{ Н.м}, \quad (2.3)$$

где  $\xi$  – коэффициент трения скольжения (для трения стали по стали можно принять  $\xi = 0,15$ );  $\Delta$  – угловая погрешность изготовления конуса (для конусов Морзе среднее значение  $\Delta = 20'$ ;  $P_o$  – осевая сила, действующая на инструмент;  $\frac{\bar{d}}{\rho}$  – геометрическая характеристика конуса ( $\bar{d}$  – средний диаметр,  $\rho$  – конусность)).

Найдем осевую силу по формуле [24]:

$$P_o = 10 C_p D^{q_p} s^{y_p} K_p, \text{ Н}, \quad (2.4)$$

где  $D$  – диаметр инструмента, мм;  $s$  – подача, мм/об. Для операции сверления значения коэффициентов и показателей степени в выражении (2.4) составляют  $C_p = 68$ ;  $q_p = 1$ ;  $y_p = 0,7$ ;  $K_p = 1$ .

С учетом (2.4) и приведенных значений  $\xi$ ,  $\Delta$ ,  $C_p$ ,  $q_p$ ,  $y_p$  и  $K_p$  преобразуем выражение (2.3):

$$M_T = 0,02 D s^{0,7} \frac{\bar{d}}{\rho}. \quad (2.5)$$

Найдем крутящий момент, возникающей на сверлильной операции [25]:

$$M_{кр} = 10C_M D^{q_M} s^{y_M} K_p, \text{ Н.м,} \quad (2.6)$$

где  $C_M = 0,0345$ ;  $q_M = 2$ ;  $y_M = 0,8$ ;  $K_p = 1$ .

Подставляя формулы (2.5) и (2.6) в формулу (2.1), получим следующее выражение:

$$0,02Ds^{0,7} \frac{\bar{d}}{\rho} \geq 0,345D^2 s^{0,8},$$

Откуда, выразив из формулы выше подачу  $s$ , получим следующее выражение:

$$s^{0,1} \leq \frac{0,058}{D} \cdot \frac{\bar{d}}{\rho}.$$

Таким образом, предельное значение подачи, с которой может работать сверло с хвостовиком Морзе,

$$s = \left( \frac{0,058}{D} \cdot \frac{\bar{d}}{\rho} \right)^{10}, \text{ мм/об.} \quad (2.7)$$

Произведем расчет, используя формулу (2.7) для диаметров 22...30 мм для КМ 3, а также 30...40 мм для КМ4. Полученные результаты занесем в таблицу 3:

Таблица 3 - Результаты расчетов предельного значения подачи

Конус	$d/\rho$ , мм	$D$ , мм	$s$ , мм/об
-------	---------------	----------	-------------



Продолжение таблицы 3

Морзе 3	432	22	3,672
		23	2,354
		24	1,538
		25	1,023
		26	0,691
		27	0,474
		28	0,329
		29	0,232
		30	0,165
Морзе 4	547	30	1,750
		32	0,991
		33	0,675
		34	0,500
		35	0,374
		36	0,283
		37	0,215
		38	0,165
		39	0,127
40	0,099		

Но, следует отметить, что необходимо учесть ограничение по прочности инструмента, которое возникает при больших значениях подачи (больших крутящих моментах), так как использование конуса *Carto* не обеспечивает безграничный диапазон подач (свыше минимальной из расчета по формуле 2.7), с которым может работать сверло, оснащенное подобным хвостовиком.

Для этого рассчитаем сверло на кручение. Обратившись к сопромату, вспомним, что по формуле 2.8 можно вычислить наибольшие касательные напряжения, которые возникают в стержне (круглом) диаметром  $D$ , который находится под воздействием крутящего момента  $M$  [26].

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot 10^3 M_{\text{кр}}}{\pi D^3}, \text{ МПа.} \quad (2.8)$$

Учитывая меньший диаметр сверла (по сравнению со стержнем), получим новое выражение для наибольших касательных напряжений (они в 5 раз больше):  $\tau_{\max}^{\text{св}} \approx 5\tau_{\max}$  [27].

Запишем описанное выше ограничение по прочности [28]:

$$\tau_{\max}^{\text{св}} \leq [\tau], \quad (2.9)$$

где  $[\tau]$  – допускаемое напряжение кручения, с учетом (2.8) и (2.6) получаем

$$5 \cdot \frac{16 \cdot 10^3}{\pi} \cdot \frac{10 C_M s^{y_M} D^{q_M} K_P}{D^3} \leq [\tau],$$

из этого выражения сможем выразить предельное значение подачи, учитывающее ограничение по прочности сверла:

$$s_{\text{пр}} = \left( \frac{\pi D^{3-q_M} [\tau]}{8 \cdot 10^5 C_M K_P} \right)^{1/y_M}.$$

Допускаемое напряжение кручения для сверла  $[\tau] = 250$  МПа. Тогда, с учетом приведенных выше значений  $C_M$ ,  $q_M$ ,  $y_M$  и  $K_P$ , получаем

$$s_{\text{пр}} = 0,0117 D^{1,25}, \quad (2.10)$$

Произведем расчет, используя формулу (2.10) для диаметров 22...30 мм для КМ 3, а также 30...40 мм для КМ4. Полученные результаты занесем в таблицу 4:

Таблица 4 - Результаты расчетов предельного значения подачи по прочности

Конус	$d/\rho$ , мм	$D$ , мм	$s$ , мм/об	$s_{np}$ , мм/об
Морзе 3	432	22	3,672	0,557
		23	2,354	0,589
		24	1,538	0,622
		25	1,023	0,654
		26	0,691	0,687
		27	0,474	0,720
		28	0,329	0,754
		29	0,232	0,787
		30	0,165	0,821
Морзе 4	547	30	1,750	0,821
		32	0,991	0,890
		33	0,675	0,925
		34	0,500	0,961
		35	0,374	0,996
		36	0,283	1,032
		37	0,215	1,068
		38	0,165	1,104
		39	0,127	1,140
		40	0,099	1,177

На рисунках 14 и 15 представлены графики зависимости предельного значения подачи от диаметра инструмента, а также графики зависимости предельного значения подачи, допускаемой прочностью сверла, а также выделены «зоны» использования конуса Морзе и конуса Сарто.

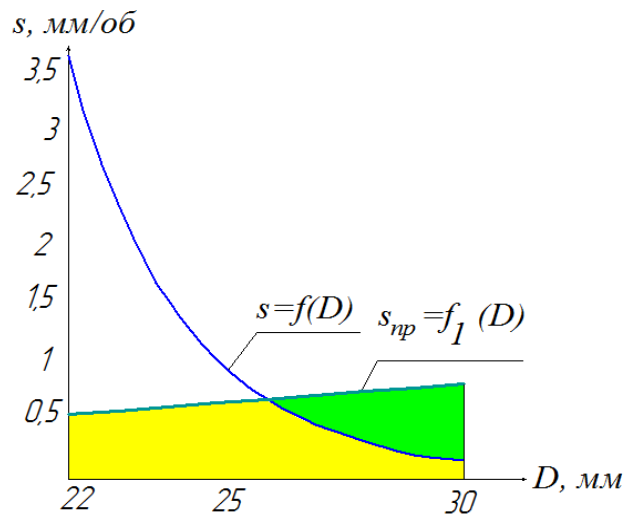


Рисунок 14 - Графическое определение «зон» использования конуса Морзе 3 и конуса Carpo. Желтым цветом обозначена «зона» действия конуса Морзе, а зеленым – «зона» действия конуса Carpo.

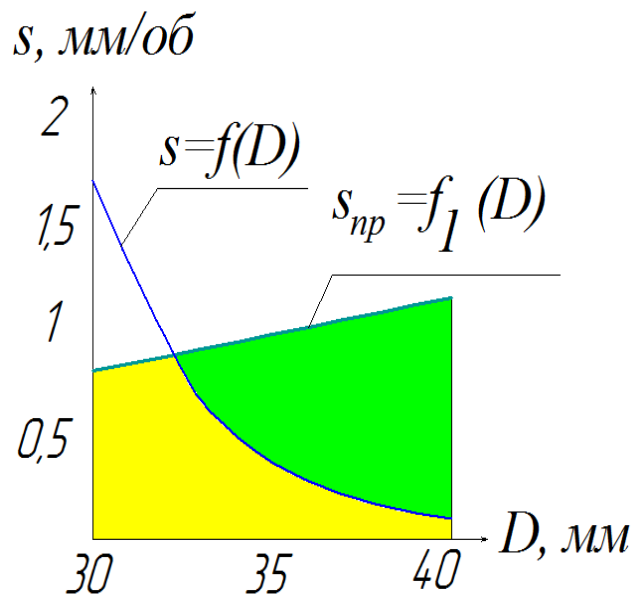


Рисунок 15 - Графическое определение «зон» использования конуса Морзе 4 и конуса Carpo. Желтым цветом обозначена «зона» действия конуса Морзе, а зеленым – «зона» действия конуса Carpo.

Таким образом, используя рис. 14 и 15 – и аналогичных им, построенные для других разновидностей «гладких» инструментальных конусов, – можно отметить зоны целесообразного использования стандартных конусов (выделена желтым цветом) и конусов Carpo (выделена

зеленым цветом). Т.е. в желтой области целесообразно применение инструмента, оснащенного стандартным хвостовиком Морзе, так как его простой профиль делает его изготовление существенно дешевле, чем конуса Carto. А в зеленой области целесообразно уже применение инструмента, оснащенного хвостовиком Carto, который несмотря на свою трудоемкость в изготовлении позволит исключить возможность проворота инструмента в шпинделе станка, в отличие от хвостовика Морзе, который в зеленой зоне с большой вероятностью провернется в шпинделе станка, так как подачи слишком высоки.

### 3. АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЯ КОНУСА САРТО

#### 3.1 Расчет максимального зазора для упрощенной геометрии конуса Сарто.

При производстве системы оснастка - инструмент, оснащенной хвостовиком Сарто в том случае, когда речь идет о соединении конического хвостовика инструмента с отверстием в шпинделе станка, наиболее трудоемкой является задача правильного изготовления профиля внутреннего конуса на шпинделе станка [28]. С погрешностями могут быть изготовлены либо длины сторон треугольного профиля (рис. 17), либо углы при вершинах этих сторон (рис. 18). Эти погрешности напрямую влияют на возникновение зазора между конусами (внутренний - наружный) на инструменте и на шпинделе станка. Так как геометрия конуса Сарто весьма сложна, то в первой итерации вывода зависимости максимального зазора в соединении от погрешности изготовления отверстия в оснастке примем упрощенную форму (рис. 16):

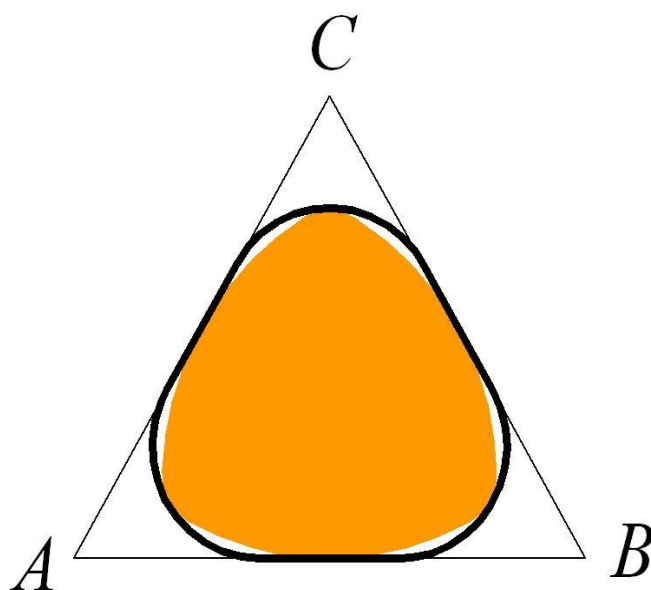


Рисунок 16 - Упрощение геометрии конуса Сарто

Погрешности изготовления сторон

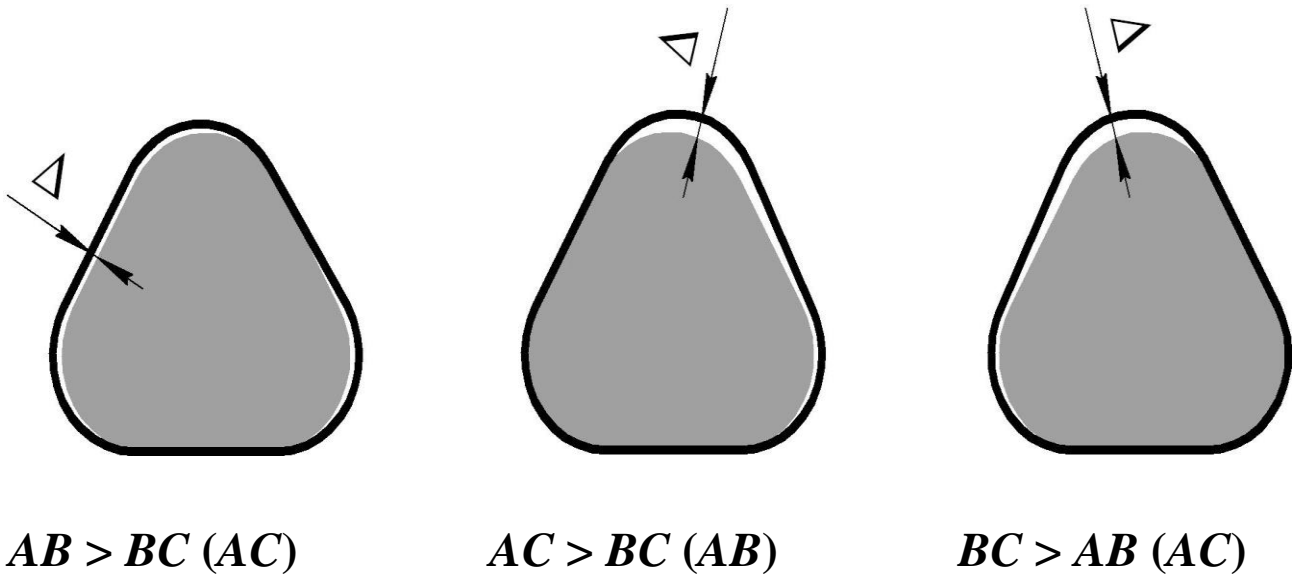


Рисунок 17 - Наибольшие зазоры при неточности длин сторон

Погрешности изготовления углов

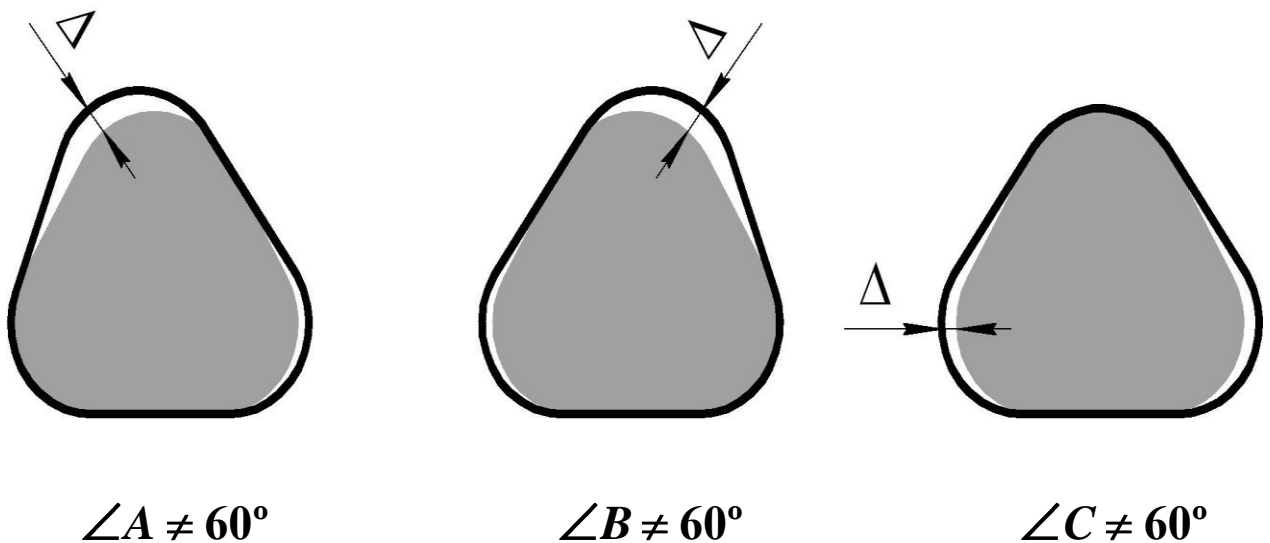


Рисунок 18 - Наибольшие зазоры при неточности углов при вершинах.

Расчет произведем по схеме последнего рисунка, у которого угол при вершине С треугольника выполнен с погрешностью. Для расчета необходимо внести эту схему в систему координат и написать уравнения сторон этого треугольника. Затем, пользуясь принципами аналитической геометрии [29], проведем прямую из начала координат под некоторым углом и примем, что

на этой прямой и располагается наш искомый наибольший зазор в соединении (рис. 19):

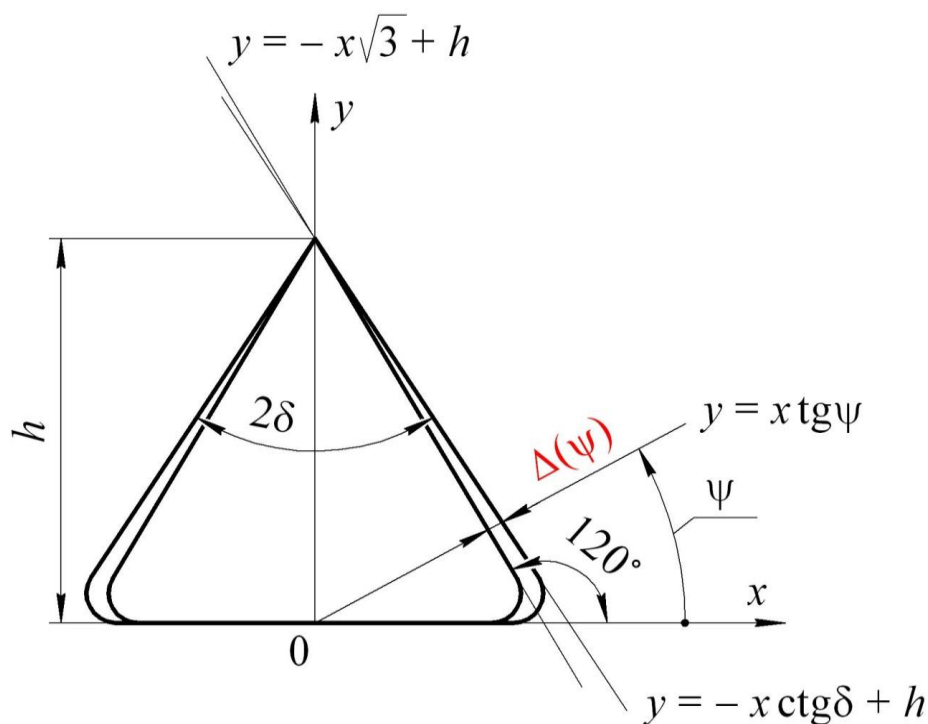


Рисунок 19 - Пример расчета максимального зазора  $\Delta$

Получаем уравнения (рис.19):

$$\begin{aligned}
 y &= -\sqrt{3} \cdot x + h \\
 y &= -x \cdot \text{ctg} \delta + h \\
 y &= -x \cdot \text{tg} \psi
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Теперь необходимо записать и решить уравнение, чтобы найти точки пересечения, расстояние между которыми по сути и является искомым наибольшим зазором в соединении:

$$\begin{aligned}
 y &= -\sqrt{3} \cdot x + h \\
 y &= -x \cdot \text{tg} \psi
 \end{aligned}
 \quad \text{И} \quad
 \begin{aligned}
 y &= -x \cdot \text{ctg} \delta + h \\
 y &= -x \cdot \text{tg} \psi
 \end{aligned}
 .$$



Получаем точки:

$$\begin{array}{l} \text{А:} \\ \text{В:} \end{array} \begin{array}{l} x = \frac{h}{\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3}} \\ y = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3}} \end{array} \quad \begin{array}{l} x = \frac{h}{\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta} \\ y = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta} \end{array} .$$

Следовательно, расстояние между ними  $\Delta$ :

$$\Delta = \sqrt{\left( \frac{h}{\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta} - \frac{h}{\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{h \cdot \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta} - \frac{h \cdot \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3}} \right)^2} \quad (3.2)$$

После упрощений (3.2) получаем:

$$\Delta = \frac{h \cdot (\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta) \cdot \sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}{(\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta) \cdot (\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3})} \quad (3.3)$$

Теперь взяв производную по переменной  $\Psi$  и приравняв ее к нулю, по законам высшей математики [30] получим максимальное значение данного выражения:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \psi} = \left( \frac{h \cdot (\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta) \cdot \sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}{(\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta) \cdot (\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3})} \right), \quad (3.4)$$

После преобразований получаем:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \psi} = \frac{h \cdot (\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta) \cdot (\operatorname{tg}^3 \psi + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot \operatorname{ctg} \delta + \operatorname{ctg} \delta - \operatorname{tg} \psi \cdot \sqrt{3} + \operatorname{tg} \psi - \operatorname{ctg} \delta \cdot \sqrt{3})}{(\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta)^2 \cdot (\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3})^2 \cdot \cos \psi} = 0. \quad (3.5)$$

Максимум ищем на промежутке  $t g \Psi = (0; 90)$ . Для решения числителя примем замену:

$$tg \psi = x. \quad (3.6)$$

Так как

$$h \neq 0 \text{ и } \bar{3} - ctg \delta \neq 0, \text{ то}$$

$$x^3 + x^2 \cdot ctg \delta + x - x \cdot \sqrt{3} + ctg \delta - ctg \delta \cdot \sqrt{3} = 0 \quad (3.7)$$

Сгруппируем:

$$(x^3 + x - x \cdot \sqrt{3}) + (x^2 \cdot ctg \delta + ctg \delta - ctg \delta \cdot \sqrt{3}) = 0 \quad (3.8)$$

Вынесем за скобки и найдем корни:

$$x(x^2 + 1 - \sqrt{3}) + ctg \delta(x^2 + 1 - \sqrt{3}) = 0;$$

$$(x + ctg \delta) \cdot (x^2 + 1 - \sqrt{3}) = 0;$$

$$x = -ctg \delta;$$

$$x = \pm \sqrt{\sqrt{3} - 1}. \quad (3.9)$$

Вернемся к замене, подставим:

$$tg \psi = -ctg \delta \quad ,(3.10)$$

при выполнении этого равенства знаменатель обращается в ноль;

$$tg \psi = \pm \sqrt{\sqrt{3} - 1};$$

$$\operatorname{tg}\psi = -\sqrt{\sqrt{3}-1} \Rightarrow \psi = 175,110^\circ,$$

это решение не удовлетворяет промежутку  $(0;90)$ ;

$$\operatorname{tg}\psi = \sqrt{\sqrt{3}-1} \Rightarrow \psi = 4,89^\circ \quad (3.11)$$

входит в промежуток  $(0;90)$ , следовательно, является углом, при котором  $\Delta$  принимает максимальное значение.

Подставим найденное значение  $\Psi$  (3.11) в (3.3), определим  $\Delta_{max}$ :

$$\Delta_{max} = \frac{h \cdot (\sqrt{3} - \operatorname{ctg}\delta) \cdot \sqrt{\sqrt{3}-1+1}}{(\sqrt{\sqrt{3}-1} + \operatorname{ctg}\delta) \cdot (\sqrt{\sqrt{3}-1} + \sqrt{3})} = \frac{h \cdot (\sqrt{3} - \operatorname{ctg}\delta) \cdot \sqrt[4]{3}}{(\sqrt{\sqrt{3}-1} + \operatorname{ctg}\delta) \cdot (\sqrt{\sqrt{3}-1} + \sqrt{3})}. \quad (3.12)$$

Для проверки подставим в (3.12) значение угла  $\delta=30^\circ$  (то есть угол при вершине  $2\delta = 60^\circ$ , а значит, выполнен без погрешности, следовательно, зазора быть не должно) получаем:

$$\Delta(30) = \frac{h \cdot (\sqrt{3} - \operatorname{ctg}30) \cdot \sqrt[4]{3}}{(\sqrt{\sqrt{3}-1} + \operatorname{ctg}30) \cdot (\sqrt{\sqrt{3}-1} + \sqrt{3})} = \frac{h \cdot (\sqrt{3} - \sqrt{3}) \cdot \sqrt[4]{3}}{(\sqrt{\sqrt{3}-1} + \sqrt{3}) \cdot (\sqrt{\sqrt{3}-1} + \sqrt{3})} = 0. \quad (3.13)$$

Проверка выполнена.

3.2. Расчет максимального зазора при неупрощенной геометрии конуса  $\text{CarpO}$ .

Однако, необходимо учесть, что в вышеизложенных расчетах была упрощена геометрия конуса  $\text{CarpO}$ . Произведем похожие расчеты для неупрощенной геометрии, используя аппарат аналитической геометрии [31]. Определим максимальный зазор в зависимости от погрешности изготовления

одного из радиусов внутреннего конуса (на шпинделе станка), вследствие этого данный зазор и образуется. Следует отметить, что при возникновении данного зазора, внутренний конус наклонится, т.е. изменится центр дуги внутреннего конуса. Что также следует считать погрешностью – смещение центра дуги радиуса конуса (см. рис. 20).

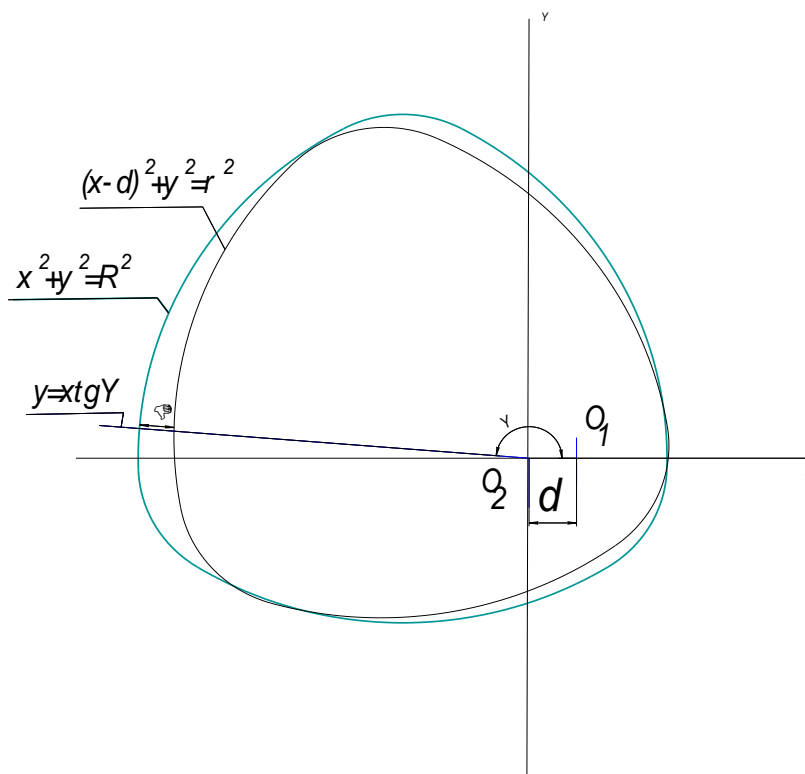


Рисунок 20 - Пример расчета максимального  $\Delta$  для неупрощенной геометрии

Получаем уравнения:

$$\begin{aligned}
 (x-d)^2 + y^2 &= r^2 \\
 x^2 + y^2 &= R^2 \\
 y &= x \cdot \operatorname{tg}\psi
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Решаем системы уравнений, чтобы найти точки пересечения:

$$\begin{array}{l} x^2 + y^2 = R^2 \\ y = x \cdot \operatorname{tg} \psi \end{array} \quad \text{и} \quad \begin{array}{l} (x-d)^2 + y^2 = r^2 \\ y = x \cdot \operatorname{tg} \psi \end{array} .$$

Решаем системы уравнений, чтобы найти точки пересечения:

1-ая система:

$$\begin{array}{l} x^2 + y^2 = R^2 \\ y = x \cdot \operatorname{tg} \psi \end{array} \quad (3.15)$$

Подставим  $y$  из второго уравнения в первое:

$$x^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \psi + x^2 = R^2 \quad (3.16)$$

Вынесем общий множитель за скобку:

$$x^2 \cdot (\operatorname{tg}^2 \psi + 1) = R^2 \quad (3.17)$$

Тогда:

$$x^2 = \frac{R^2}{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)} \quad (3.18)$$

Откуда:

$$x = \pm \frac{R}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)}} \quad (3.19)$$

Следовательно, подставив найденное значение  $x$  во второе уравнение, получим:

$$y = \pm \frac{R \cdot \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)}} \quad (3.20)$$

Получаем две точки:

$$1) \quad \begin{aligned} x &= \frac{R}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)}} & \text{и} & \quad 2) \quad x = -\frac{R}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)}} \\ y &= \frac{R \cdot \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)}} & & \quad y = -\frac{R \cdot \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Точка 1 не подходит, т.к. из рисунка 20 видно, что  $x < 0$ . Следовательно, в дальнейших расчетах принимаем точку 2.

2-ая система:

$$\begin{aligned} (x-d)^2 + y^2 &= r^2 \\ y &= x \cdot \operatorname{tg} \psi \end{aligned} \quad (3.22)$$

Подставив  $y$  из второго уравнения в первое, получим:

$$x^2 - 2xd + d^2 + x \cdot \operatorname{tg} \psi = r^2 \quad (3.23)$$

Решаем квадратное уравнение:

$$x^2 - 2xd + d^2 + x \cdot \operatorname{tg} \psi - r^2 = 0 \quad (3.24)$$

Откуда:

$$D = b^2 - 4ac = \operatorname{tg}^2 \psi - 4dr \cdot \operatorname{tg} \psi + 4r^2 d^2 \quad (3.25)$$

Далее:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{2d - tg\psi + \sqrt{tg^2\psi - 4dr \cdot tg\psi + 4r^2d^2}}{2} = \\
&= \frac{2d - tg\psi + \sqrt{(tg\psi - 2dr)^2}}{2} = \frac{2d - tg\psi + tg\psi - 2dr}{2} = \\
&= d - dr = d(1-r)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
x_2 &= \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} = \frac{2d - tg\psi - \sqrt{tg^2\psi - 4dr \cdot tg\psi + 4r^2d^2}}{2} = \\
&= \frac{2d - tg\psi - \sqrt{(tg\psi - 2dr)^2}}{2} = \frac{2d - tg\psi - tg\psi + 2dr}{2} = \\
&= (d + dr) - tg\psi = d(1+r) \cdot tg\psi
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Т.к. во 2 и 3 четверти  $tg\psi < 0$ , то  $x_2 > 0$ . Следовательно,  $x_2$  нам не подходит (см. рисунок 20). Тогда в дальнейших расчетах используем  $x_1$ :

$$y(x_1) = d \cdot tg\psi \cdot (1-r) \tag{3.28}$$

Получаем точку пересечения:

$$\begin{aligned}
x_1 &= d(1-r) \\
y &= d \cdot tg\psi \cdot (1-r)
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Итого, точки пересечения:

$$\begin{aligned}
\text{Точка А)} \quad x &= -\frac{R}{\sqrt{(tg^2\psi + 1)}} \quad \text{и точка В)} \quad x_1 = d(1-r) \\
y &= -\frac{R \cdot tg\psi}{\sqrt{(tg^2\psi + 1)}} \quad y = d \cdot tg\psi \cdot (1-r)
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Расстояние между ними и будет искомая  $\Delta$ :

$$\Delta = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (3.31)$$

Подставив в формулу (3.31), координаты найденных точек пересечения, получим:

$$\Delta = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} = \sqrt{\left(d - d \cdot r + \frac{R}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}\right)^2 + \left(d \cdot \operatorname{tg} \psi - d \cdot r \cdot \operatorname{tg} \psi + \frac{R \cdot \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}\right)^2} \quad (3.32)$$

Введем замену  $\Delta' = \Delta^2$ , тогда

$$\begin{aligned} \Delta' = \Delta^2 &= \left( \sqrt{\left(d - d \cdot r + \frac{R}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}\right)^2 + \left(d \cdot \operatorname{tg} \psi - d \cdot r \cdot \operatorname{tg} \psi + \frac{R \cdot \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}\right)^2} \right)^2 = \\ &= \left(d - d \cdot r + \frac{R}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}\right)^2 + \left(d \cdot \operatorname{tg} \psi - d \cdot r \cdot \operatorname{tg} \psi + \frac{R \cdot \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}\right)^2 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Раскроем скобки:

$$\begin{aligned} \Delta' = d^2 + d^2 r^2 + \frac{R^2}{\operatorname{tg}^2 \psi + 1} + 2 \frac{Rd}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}} - 2d^2 r - 2 \frac{Rdr}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}} + d^2 \operatorname{tg}^2 \psi + d^2 r^2 \operatorname{tg}^2 \psi + \\ + \frac{R^2 \operatorname{tg}^2 \psi}{\operatorname{tg}^2 \psi + 1} + 2 \frac{Rd \operatorname{tg}^2 \psi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}} - 2d^2 r \operatorname{tg}^2 \psi - 2 \frac{Rdr \operatorname{tg}^2 \psi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Сократим подобные члены уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta' = d^2 + d^2 r^2 + \frac{R^2}{\operatorname{tg}^2 \psi + 1} + 2 \frac{Rd}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}} - 2d^2 r - 2 \frac{Rdr}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}} + d^2 \operatorname{tg}^2 \psi + d^2 r^2 \operatorname{tg}^2 \psi + \\ + R^2 + 2Rd \cdot \sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1} - 2d^2 r \operatorname{tg}^2 \psi - 2 \frac{Rdr \operatorname{tg}^2 \psi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}} \end{aligned} \quad (3.35)$$



После упрощений получим:

$$\Delta' = \frac{R^2 - r^2 + d^2 + d^2 r \cdot \sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1} + d^2 r^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \psi - 2Rdr}{(\operatorname{tg}^2 \psi + 1)^{3/2}} \quad (3.36)$$

Так как в уравнении с представлены только слагаемые вида  $\operatorname{tg}^2 \psi$ , включающие угол  $\psi$ , то искать сам угол нет никакого смысла. Достаточно определить квадрат тангенса данного угла, при котором будет располагаться наибольший зазор. Данная замена существенно упростит расчеты при нахождении частной производной:

$$\operatorname{tg}^2 \psi = x_\psi \quad (3.37)$$

Необходимо принять условие 1:

$$x_\psi \geq 0. \quad (3.38)$$

Приняв данную замену (формула 3.37), подставим ее в выражение для нахождения максимального зазор и найдем частную производную по переменной  $x_\psi$ , затем приравняем найденное значение к нулю:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \Delta'}{\partial x_\psi} \right) &= \left( \frac{R^2 - r^2 + d^2 + d^2 r \cdot \sqrt{x_\psi + 1} + d^2 r^2 \cdot x_\psi - 2Rdr}{(x_\psi + 1)^{3/2}} \right)' = \\ &= \frac{\left( \frac{d^2 r}{2\sqrt{x_\psi + 1}} + d^2 r^2 \right) \cdot (x_\psi + 1)^{3/2} - 1,5\sqrt{x_\psi + 1} \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2 r \cdot \sqrt{x_\psi + 1} + d^2 r^2 - 2Rdr}{(x_\psi + 1)^3} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Приравняем к нулю:

$$\frac{\left(\frac{d^2r}{2\sqrt{x_\psi+1}} + d^2r^2\right) \cdot (x_\psi+1)^{3/2} - 1,5\sqrt{x_\psi+1} \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r \cdot \sqrt{x_\psi+1} + d^2r^2 - 2Rdr}{(x_\psi+1)^3} = 0 \quad (3.40)$$

Дробь равна нулю, когда ее знаменатель не равен нулю, а числитель равен нулю:

$$(x_\psi+1)^3 \neq 0 \Rightarrow x_\psi \neq -1 \quad (3.41)$$

Найдем значение  $x_\psi$ , при котором числитель данного уравнения обращается в 0:

$$\left(\frac{d^2r}{2\sqrt{x_\psi+1}} + d^2r^2\right) \cdot (x_\psi+1)^{3/2} - 1,5\sqrt{x_\psi+1} \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r \cdot \sqrt{x_\psi+1} + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \quad (3.43)$$

Раскроем скобки:

$$\begin{aligned} & 0,5d^2r \cdot (x_\psi+1) + d^2r^2 \cdot (x_\psi+1)^{3/2} - 1,5\sqrt{x_\psi+1} \cdot \\ & \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r \cdot \sqrt{x_\psi+1} + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Примем замену, для упрощения нахождения решения данного уравнения:

$$x_\psi + 1 = t \quad (3.45)$$

По условию 1 (формула 3.38):

$$x_\psi = t - 1 \geq 0 \quad (3.46)$$

Следовательно, получаем условие 2:

$$t \geq 1 \quad (3.47)$$

Подставим данную замену в уравнение:

$$0,5d^2r \cdot t + d^2r^2 \cdot t^{3/2} - 1,5\sqrt{t} \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r \cdot \sqrt{t} + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \quad (3.48)$$

Вынесем  $\sqrt{t}$  за скобку:

$$\sqrt{t} \cdot 0,5d^2r \cdot \sqrt{t} + d^2r^2 \cdot t - 1,5 \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r \cdot \sqrt{t} + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \quad (3.49)$$

Получаем 2 уравнения:

1-ое уравнение:

$$\sqrt{t} = 0 \quad (3.50)$$

Следовательно:

$$t = 0 \quad (3.51)$$

Данный корень уравнения не удовлетворяет условию 2.

2-ое уравнение:

$$0,5d^2r \cdot \sqrt{t} + d^2r^2 \cdot t - 1,5 \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r \cdot \sqrt{t} + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \quad (3.52)$$

Примем замену:

$$\sqrt{t} = a \quad (3.53)$$

Получим условие 3:

$$\sqrt{t} = a \geq 0 \quad (3.54)$$

Подставим замену в уравнение:

$$0,5d^2r \cdot a + d^2r^2 \cdot a^2 - 1,5 \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r \cdot a + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \quad (3.55)$$

После упрощения получим:

$$d^2r^2 \cdot a^2 - d^2r \cdot a - 1,5 \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \quad (3.56)$$

Получаем обычное квадратное уравнение. Решаем его, для нахождения значения  $a$ :

$$d^2r^2 \cdot a^2 - d^2r \cdot a - 1,5 \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r^2 - 2Rdr = 0 \quad (3.57)$$

Найдем дискриминант:

$$D = b^2 - 4ac = d^4r^2 + 6 \cdot d^2r^2 \cdot R^2 - r^2 + d^2 + d^2r^2 - 2Rdr \quad (3.58)$$

Вынесем общий множитель за скобку:

$$D = d^2r^2 \cdot 6R^2 - 6r^2 + 7d^2 + 6d^2r^2 - 12Rdr \quad (3.59)$$

Из выражения в скобках нет возможности извлечь корень, поэтому для упрощения записи примем, что:

$$D' = 6R^2 - 6r^2 + 7d^2 + 6d^2r^2 - 12Rdr \quad (3.60)$$

Тогда:

$$D = d^2r^2 \cdot D' \quad (3.61)$$

Найдем корни уравнения:

$$a_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} = \frac{d^2r + dr\sqrt{D'}}{2dr} = \frac{d \pm \sqrt{D'}}{2} \quad (3.62)$$

Корень, в котором в числителе знак «-» не удовлетворяет условию 3.

Следовательно:

$$a = \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \quad (3.63)$$

Подставив данное выражение, найдем t:

$$\sqrt{t} = a \quad (3.64)$$

Следовательно:

$$t = a^2 = \left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 \quad (3.65)$$

Отсюда найдем  $x_\psi$  :

$$x_{\psi} = \left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 + 1 \quad (3.66)$$

Подставим данное выражение в формулу для нахождения максимального зазора:

$$\Delta_{\max} = \frac{R^2 - r^2 + d^2 + d^2 r \cdot \sqrt{\left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 + 1} + 1 + d^2 r^2 \cdot \left( \left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 + 1 \right) - 2Rdr}{\left( \left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 + 1 + 1 \right)^{3/2}} \quad (3.67)$$

Упростив, получим:

$$\Delta_{\max} = \frac{R^2 - r^2 + d^2 + d^2 r \cdot \sqrt{\left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 + 2} + d^2 r^2 \cdot \left( \left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 + 1 \right) - 2Rdr}{\left( \left( \frac{d + \sqrt{D'}}{2} \right)^2 + 2 \right)^{3/2}} \quad (3.68)$$

#### Проверка:

Если отверстие в шпинделе станка выполнено без зазора по отношению к конусу сверла, тогда погрешность равна 0, т.е. центры дуг находятся в одной точке и радиусы этих дуг равны. Т.е.:

$$d = 0 \quad (3.69)$$

$$R = r \quad (3.70)$$

В таком случае значение максимального зазора должно получиться равным 0.

Проверим, подставив 3.69 и 3.70 в формулу 3.68:

$$\Delta_{\max} = \frac{R^2 - R^2 + 0^2 + 0^2 \cdot R \cdot \sqrt{\left(\frac{d + \sqrt{D'}}{2}\right)^2 + 2} + 0^2 R^2 \cdot \left(\left(\frac{0 + \sqrt{D'}}{2}\right)^2 + 1\right) - 2R^2 \cdot 0}{\left(\left(\frac{0 + \sqrt{D'}}{2}\right)^2 + 2\right)^{3/2}} = 0 \quad (3.71)$$

Проверка выполнена.

3.3. Построение графика зависимости максимального зазора от погрешности изготовления.

Для построения графика используем выражение, полученное для расчета максимального зазора (формула 3.68):

$$\Delta_{\max} = \frac{R^2 - r^2 + d^2 + d^2 r \cdot \sqrt{\left(\frac{d + \sqrt{D'}}{2}\right)^2 + 2} + d^2 r^2 \cdot \left(\left(\frac{d + \sqrt{D'}}{2}\right)^2 + 1\right) - 2Rdr}{\left(\left(\frac{d + \sqrt{D'}}{2}\right)^2 + 2\right)^{3/2}}$$

Необходимо отметить, что  $R$  является радиусом, выполненным с погрешностью, следовательно:

$$R = r + \Delta r, \quad (3.72)$$

где  $\Delta r$  - погрешность изготовления радиуса.

Таким образом, у нас получается уравнение с двумя неизвестными. Однако методом построения была получена эмпирическая зависимость между погрешностью изготовления радиуса  $\Delta r$  и смещением центра этого радиуса. На основании данных построений был разработан график

зависимости этих двух величин. Этот график представлен на рисунке 21. На нем мы видим, что зависимость получилась практически линейная, следовательно, можно записать уравнение зависимости  $\Delta r$  от  $d$  [30].

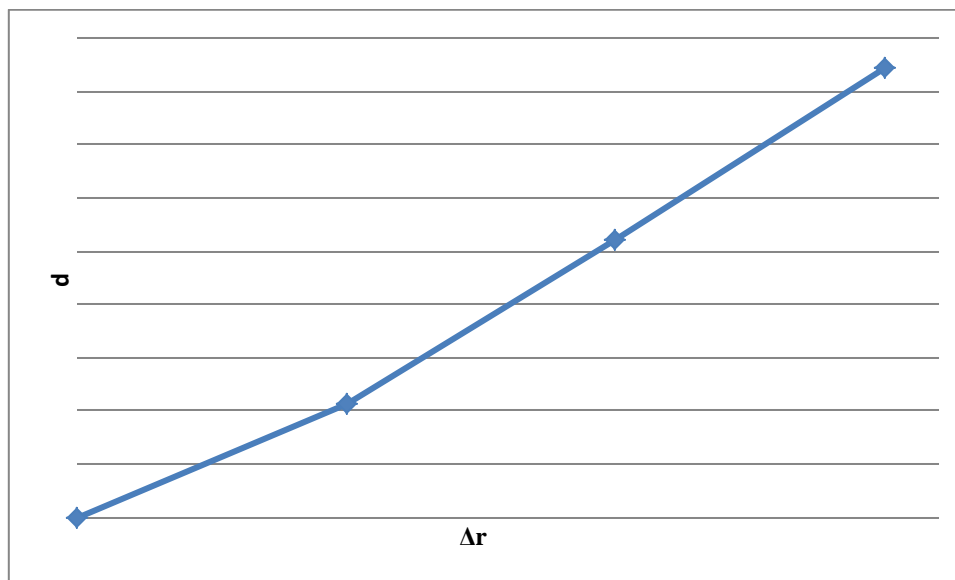


Рисунок 21 - График зависимости  $d$  от  $\Delta r$

Так как на графике (рис. 21) мы наблюдаем практически линейную зависимость, то получим уравнение вида:

$$y = kx + b \quad (3.73)$$

Так как в при  $\Delta r=0$  и  $d=0$ , то и слагаемое  $b=0$ . Тогда уравнение преобразовывается в вид:

$$y = kx \quad (3.74)$$

Заменяя переменные  $x$  и  $y$  на  $\Delta r$  и  $d$ , получим следующее уравнение зависимости:

$$d = k \cdot \Delta r \quad (3.75)$$



Коэффициент  $k$  из курса высшей математики является ничем иным, как тангенсом угла наклона этой прямой. Вычислив среднее значение такого тангенса для множества точек, получим значение этого коэффициента, который назовем  $k_K$ :

$$k = k_K = \operatorname{tg} \alpha = 0,467 \quad (3.76)$$

Таким образом, получаем зависимость, между погрешностью изготовления радиуса отверстия шпинделя и смещение центра этого радиуса:

$$d = k_K \cdot \Delta r = 0,467 \cdot \Delta r \quad (3.77)$$

Подставив формулу 3.77 и формулу 3.72 в выражение 3.71, получаем обновленное уравнение зависимости максимального зазора от погрешности изготовления радиуса отверстия:

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{(r + \Delta r)^2 - r^2 + (0,467 \Delta r)^2}{\left( \left( \frac{(0,467 \Delta r) + \sqrt{6(r + \Delta r)^2 - 6r^2 + 7(0,467 \Delta r)^2 + 6(0,467 \Delta r)^2 r^2 - 12(r + \Delta r)(0,467 \Delta r)r}}{2} \right)^2 + 2 \right)^{3/2} +} \\ & + \frac{(0,467 \Delta r)^2 r \sqrt{\left( \frac{(0,467 \Delta r) + \sqrt{6(r + \Delta r)^2 - 6r^2 + 7(0,467 \Delta r)^2 + 6(0,467 \Delta r)^2 r^2 - 12(r + \Delta r)(0,467 \Delta r)r}}{2} \right)^2 + 2}}{\left( \left( \frac{(0,467 \Delta r) + \sqrt{6(r + \Delta r)^2 - 6r^2 + 7(0,467 \Delta r)^2 + 6(0,467 \Delta r)^2 r^2 - 12(r + \Delta r)(0,467 \Delta r)r}}{2} \right)^2 + 2 \right)^{3/2} +} \quad (3.78) \\ & + \frac{(0,467 \Delta r)^2 r^2 \left( \left( \frac{(0,467 \Delta r) + \sqrt{6(r + \Delta r)^2 - 6r^2 + 7(0,467 \Delta r)^2 + 6(0,467 \Delta r)^2 r^2 - 12(r + \Delta r)(0,467 \Delta r)r}}{2} \right)^2 + 1 \right) - 2(r + \Delta r)(0,467 \Delta r)r}{\left( \left( \frac{(0,467 \Delta r) + \sqrt{6(r + \Delta r)^2 - 6r^2 + 7(0,467 \Delta r)^2 + 6(0,467 \Delta r)^2 r^2 - 12(r + \Delta r)(0,467 \Delta r)r}}{2} \right)^2 + 2 \right)^{3/2}} \end{aligned}$$

После упрощения получим:

$$\Delta = \frac{2r\Delta r + 1,218\Delta r^2 + 0,218r\Delta r^2 \sqrt{\left(\frac{0,467\Delta r + \sqrt{D''}}{2}\right)^2 + 2} + 0,218r^2\Delta r^2 \left(\left(\frac{0,467\Delta r + \sqrt{D''}}{2}\right)^2 + 1\right) - 0,934r\Delta r(r + \Delta r)}{\left(\left(\frac{0,467\Delta r + \sqrt{D''}}{2}\right)^2 + 2\right)^{3/2}} \quad (3.79)$$

В выражении выше  $D''$  является  $D'$  после преобразования (то есть после подстановки в  $D'$  зависимости  $\Delta r$  от  $d$ ):

$$D'' = 12r\Delta r + 7,526\Delta r^2 + 1,308\Delta r^2 r^2 - 5,604r\Delta r(r + \Delta r) \quad (3.80)$$

Теперь, когда мы получили окончательную зависимость между значением максимального зазора в соединении  $\Delta$  от погрешности изготовления радиуса внутреннего конуса на шпинделе станка  $\Delta r$  (формула 3.80), построим график этой зависимости (рис. 22). Диаметр  $r$  хвостовика примем равным 40 мм (именно такое сверло было спроектировано в выпускной квалификационной работе).

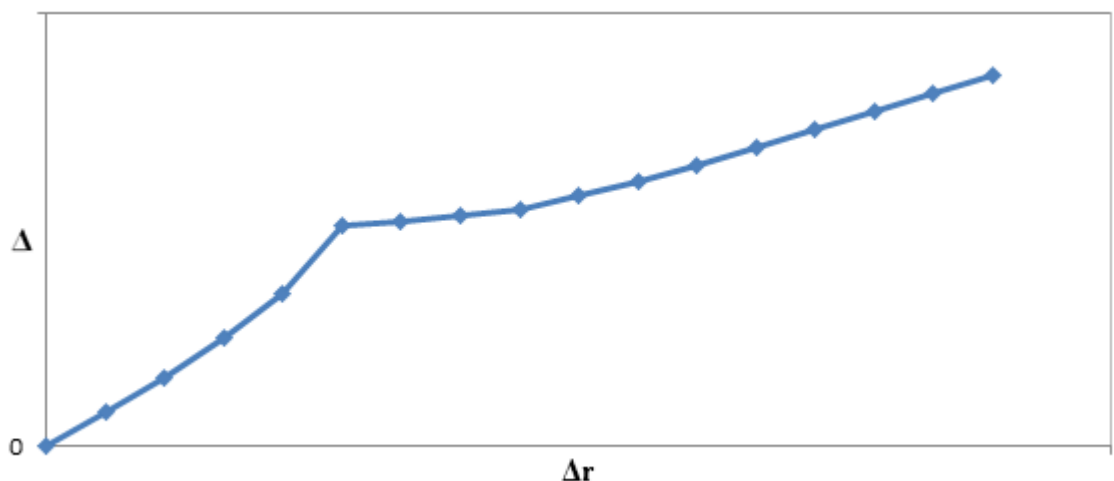


Рисунок 22 - График зависимости между значением максимального зазора в соединении  $\Delta$  от погрешности изготовления радиуса внутреннего конуса на шпинделе станка  $\Delta r$

Таким образом, в данном разделе была найдена зависимость между погрешностью изготовления отверстия в виде конуса *Carpto* на шпинделе и максимальным зазором, возникающим в соединении шпиндель – инструмент. Для начала в расчетах, для упрощения, использовалась упрощенная геометрия конуса *Carpto*. Во второй части расчет велся по реальной геометрии конуса, была получена требуемая зависимость (формула 3.79), а также построен график этой зависимости (рис. 22).

## 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР В СВЕРЛЕ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ ANSYS

### 4.1 Краткая информация о программе ANSYS.

ANSYS является программой анализа методом конечных элементов, динамично развивающейся и обновляющейся на протяжении уже 30 лет. Данная программа широко распространена среди специалистов, занимающихся автоматизированными расчетами в области инженерии (САПР), расчетов методом конечных элементов в различных областях теоретической механики, механики деформации твердых тел, механики различных конструкций (сопромат) [32]. Также программа решает ряд задач в области механики жидкости и газа, теплопередачи, теплообмена, электродинамики и т.д.

Также программа ANSYS применима к достаточно перспективным областям бизнеса, например, 3D печать, так как она позволяет создавать инструменты, благодаря которым возможно визуализировать 3D печать. Программа позволяет производить проектирование деталей трехмерной печать, состоящую из разнообразных материалов, например, лазерную печать SLM, которая состоит из большого количества мелкодисперсных порошков из металла. Сейчас нет практически ни одного инженерного направления, в котором не было бы решения в программе ANSYS. Ее применяют и для оборонной промышленности, и для аэрокосмических объектов. Наглось ей применение также и в области микроэлектроники, медицины и даже в области симуляторов, предназначенных для тестирования программного обеспечения.

Во многих отраслях промышленности предварительное моделирование и анализ помогают предприятиям избегать достаточно дорогих вложений, а также существенных затрат времени, так как позволяет исключить полноценную разработку, которая состоит из проектирования, изготовления

и испытания. В основе геометрии системы лежит ядро Parasolid, а система анализа методом конечных элементов была разработана непосредственно американской компанией ANSYS.

Система ANSYS хороша еще тем, что используемые в ней средства моделирования и анализа возможно совместить с другими пакетами CAD программ, например, CATIA, SolidEdge, NX, SolidWorks и некоторыми другими.

Программа, которая появилась первой 30 лет назад, практически не имеет ничего общего с современным вариантом. Она позволяла решать только теплофизические задачи и задачи по линейной прочности. Работала такая программа только в связке с электро-вычислительными машинами (ЭВМ).

В начале 1970-х годов XX века в систему были внедрены абсолютно новые вычислительные технологии, а также было сделано много изменений по запросу пользователей. Самое основное дополнение – это появление нелинейностей в различных вариациях. Также появилась возможность использовать метод подконструкций. Наконец, разработчики расширили библиотеку конечных элементов. Много усилий разработчиками было потрачено на изобретение программных разработок, предназначенных на начавшиеся появляться в то время персональные компьютеры и векторные графические терминалы.

В конце 1970-х годов главным достижением и обновлением стала возможность интерактивной работы в программе ANSYS. Такой подход позволил сделать проще процесс создания модели методом конечных элементов, а также упростило оценку результатов. Также появилась возможность применять интерактивную график с целью уточнения геометрии модели, свойств заданного материала, а также заданных граничных условий перед началом расчета. Это позволило выводить графическую информацию для контроля над результатами решения.

## 4.2 Моделирование напряжений в сверле при воздействии на него крутящего момента сверления.

Цель данного раздела является сравнение максимальных напряжений, возникающих в сверле под воздействием крутящего момента сверления, с допусковым напряжением кручения.

Для этого необходимо определить максимальное напряжение, возникающее в сверле при воздействии на него крутящего момента сверления при помощи программы ANSYS, и сравнить его с допусковым напряжением кручения.

1. Допускаемое напряжение кручения сверла примем  $[\tau]=250$  МПа (см. главу 2).
2. Импортируем геометрию модели из программы Компас (рисунок 23):

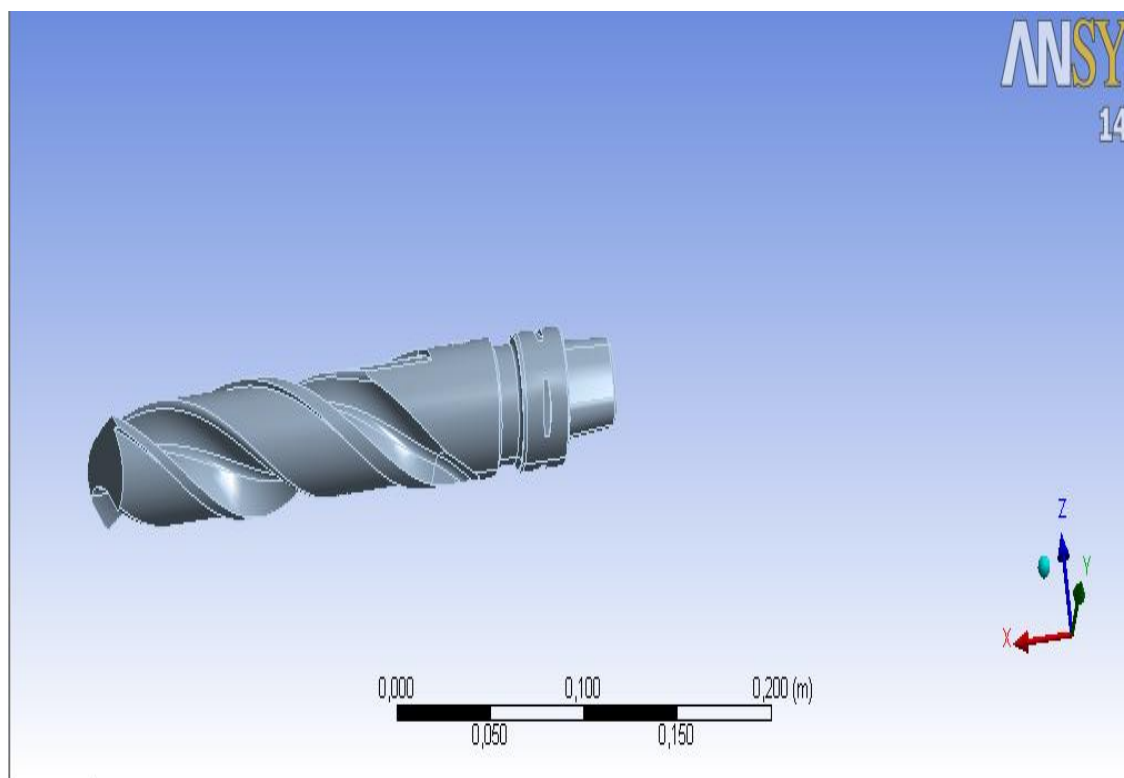


Рисунок 23 -. Импорт геометрии из программы Компас

3. Построим сетку конечных элементов (рис. 24):

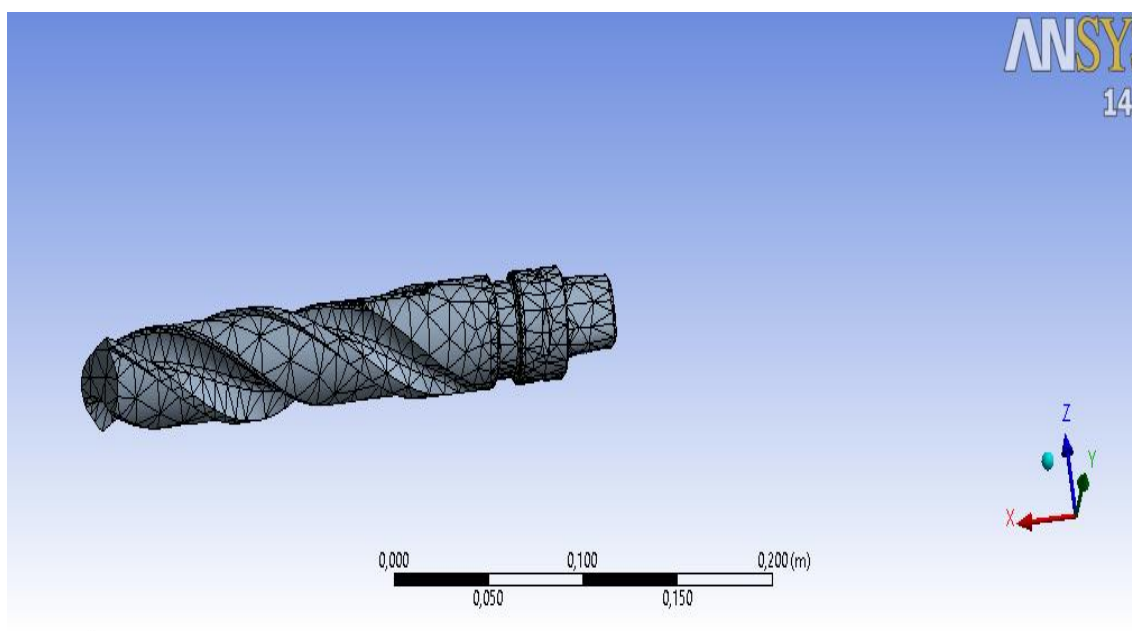


Рисунок 24 - Сетка конечных элементов

4. Приложим усилие закрепления сверла в шпинделе станка (рис. 25):

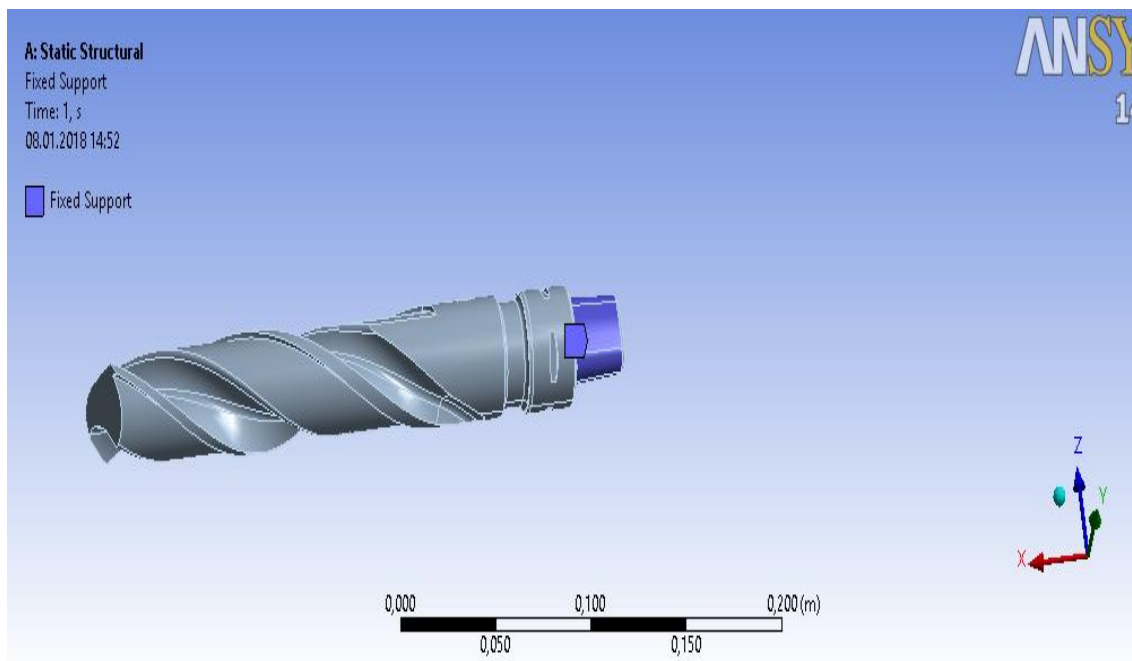


Рисунок 25 - Усилие закрепления

5. Приложим изгибающий момент (момент сверления, рис. 26)  $M_{св} = 50H$ :

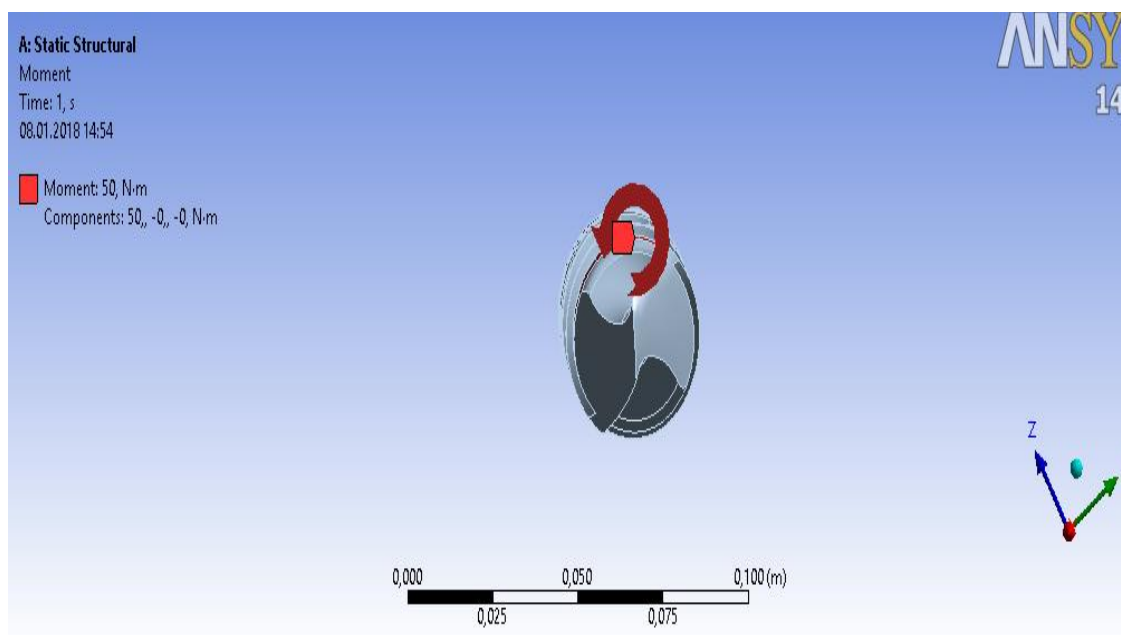


Рисунок 26 - Момент сверления

6. Произведем расчет максимального напряжения, возникающего из-за нагрузки кручения от момента сверления (рис. 27):

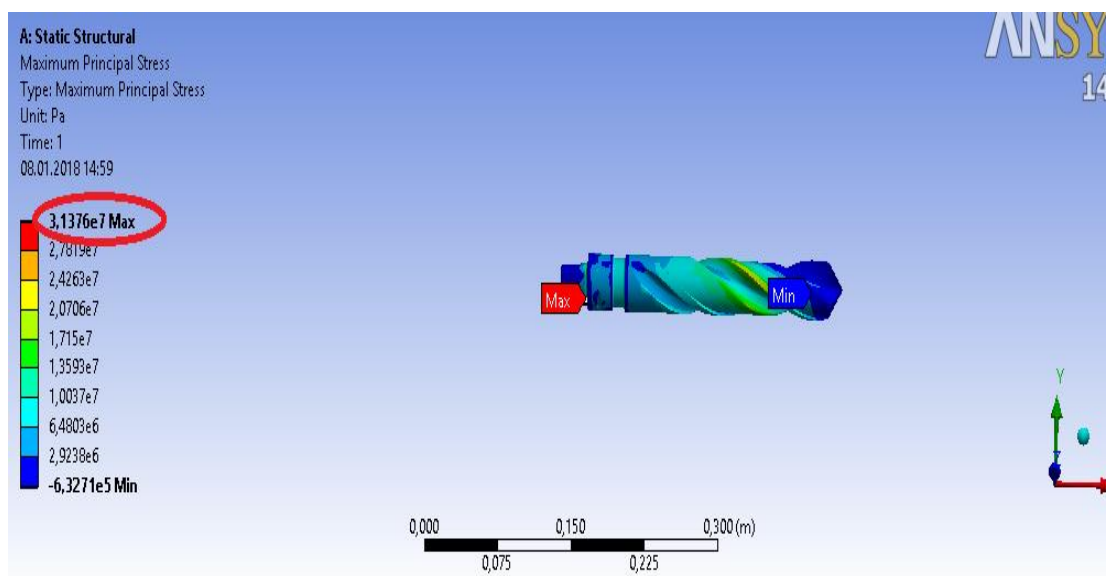


Рисунок 27 - Расчет максимального напряжения



Как видно из рисунка 27, максимальное напряжение:

$$\tau_{\max} = 3,14 \cdot 10^7 \text{ Па} = 31,4 \text{ МПа.} \quad (4.1)$$

7. Сравним допускаемое и максимальное напряжение:

$$\tau_{\max} = 31,4 \text{ МПа} < [\tau] = 250 \text{ МПа} \quad (4.2)$$

**Вывод:** максимальное напряжение от крутящей нагрузки момента сверления меньше допускаемого напряжения.

4.3 Моделирование напряжений в сверле при воздействии на него силы резания, при изготовлении сверла на заточной операции.

Цель данного раздела является сравнение максимальных напряжений, возникающих в сверле под воздействием силы резания с допускаемым напряжением.

Для этого необходимо определить максимальное напряжение, возникающее в сверле под воздействием силы резания при помощи программы ANSYS, и сравнить его с допускаемым напряжением. Максимальное напряжение должно быть меньше допускаемого.

1. Допускаемое напряжение сверла примем  $[\tau] = 250$  МПа (см. главу 2).
2. Геометрия модели идентична геометрии из раздела 4.2 (см. рисунок 28):

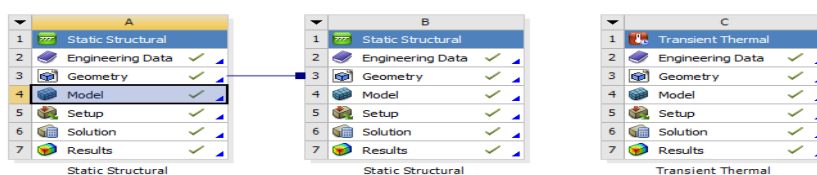


Рисунок 28 - Выбор геометрии модели

3. Построим сетку конечных элементов (рис. 29):

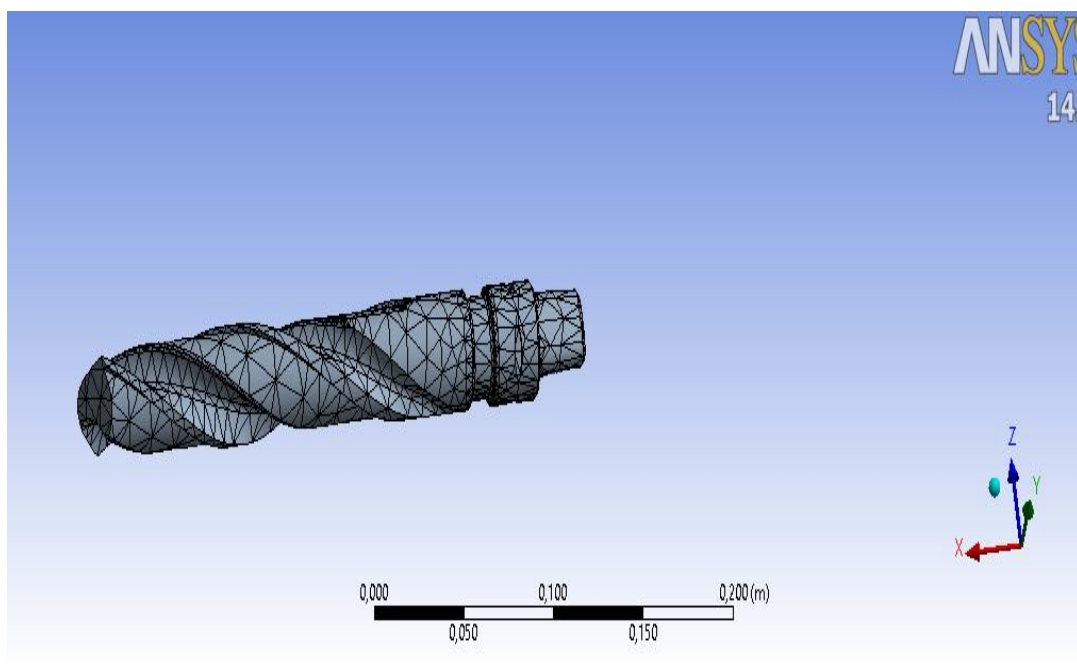


Рисунок 29 - Сетка конечных элементов

4. Приложим усилие консольного закрепления сверла (рис. 30):

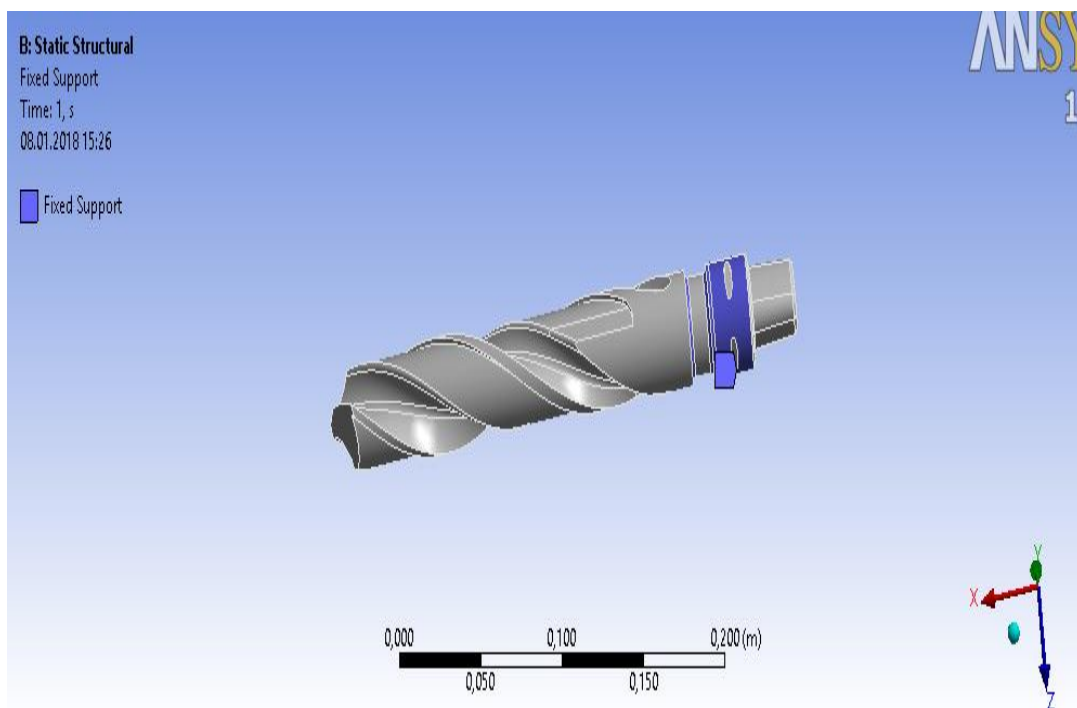


Рисунок 30 - Усилие закрепления

5. Приложим силу резания  $F = 1000H$  (рис. 31):

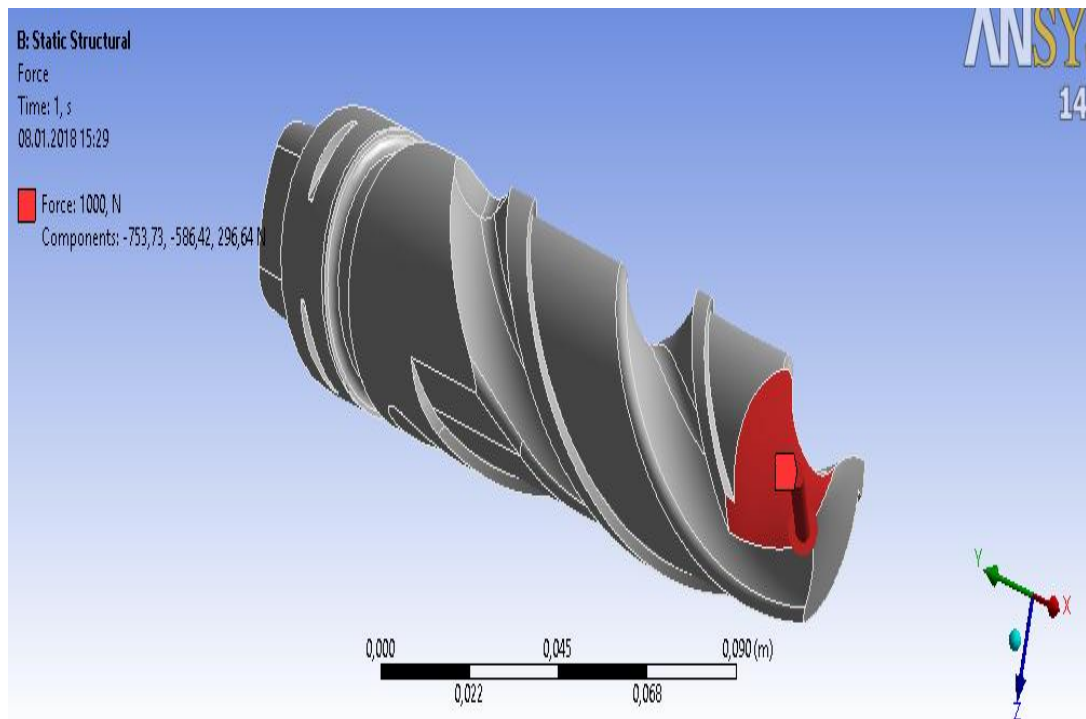


Рисунок 31 - Сила резания

6. Произведем расчет максимального напряжения, возникающего при изготовлении сверла под действием силы резания на заточной операции (рис. 32):

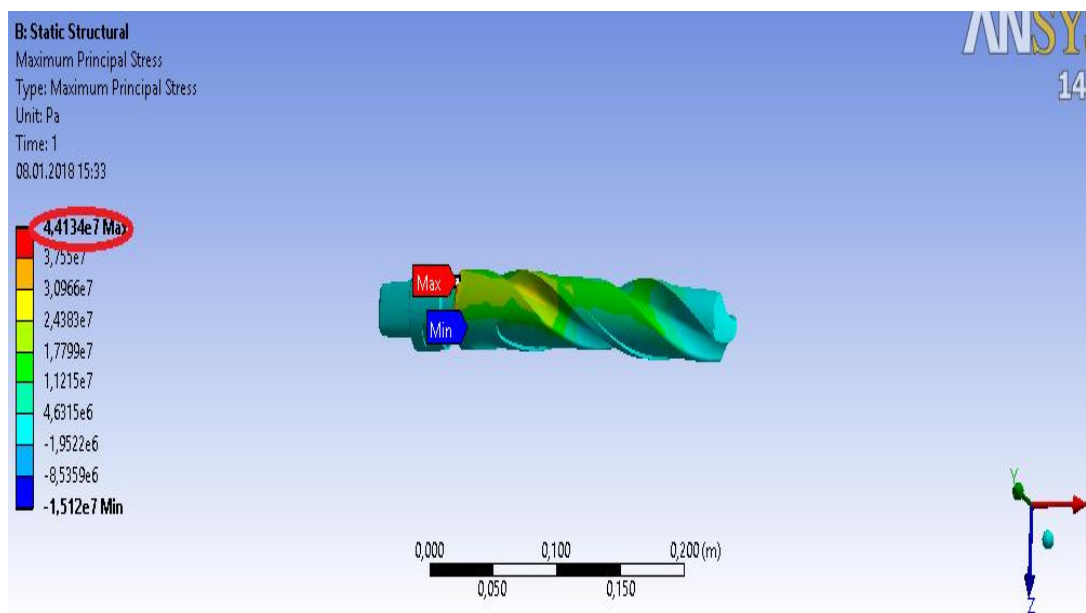


Рисунок 32 - Расчет максимального напряжения

Как видно из рисунка 32, максимальное напряжение:

$$\tau_{\max} = 4,41 \cdot 10^7 \text{ Па} = 44,1 \text{ МПа} \quad (4.3)$$

7. Сравним допускаемое и максимальное напряжение:

$$\tau_{\max} = 44,1 \text{ МПа} < [\tau] = 250 \text{ МПа} \quad (4.4)$$

**Вывод:** максимальное напряжение, возникающего при изготовлении сверла под действием силы резания, на заточной операции **меньше** допускаемого напряжения.

4.3 Моделирование температурного поля в сверле при воздействии на него закалки ТВЧ.

Цель данного раздела является определение глубины прогрева сверла при поверхностной закалке токами высокой частоты (ТВЧ).

Для этого необходимо определить приложить температуру в программе ANSYS (предварительно разрезав модель), затем в программе определить глубину прогрева, т.е. посмотреть на температурные поля в разрезе сверла.

Закаливание металлов токами высокой частоты, сокращенно закалка ТВЧ, является одним из самых распространенных методов поверхностной термообработки деталей [33]. Данный метод применяется для деталей, изготовленных из таких материалов как стали (углеродистые и конструкционные), а также для деталей, изготовленных из чугуна [34]. Основным преимуществом закалки токами высокой частоты является ее экономичность. Также при использовании данного метода закалки мы можем закаливать не только все поверхности детали, а также какие-либо ее отдельные зоны, по которым будет распространяться наибольшая (критическая) нагрузка.

Плюс данного метода еще и в том, что, несмотря на закаленность верхних слоев детали, внутренние слои остаются такими же вязкими, как и до термообработки. То есть заготовка приобретает повышенную поверхностную твердость, но при этом не приобретает хрупкость, оставаясь стойкой и надежной. Вдобавок, на нагрев не всей детали, а только ее поверхности, предприятие затрачивает существенно меньшее количество электрической энергии, следовательно, экономит переменные затраты на производство конкретной детали.

Закалка токами высокой частоты происходит в три основных этапа:

- 1) Нагрев в индукционной печи до температуры закалки;
- 2) Выдержка детали при такой температуре;
- 3) Быстрое охлаждение.

Нагревание при закалке токами высокой частоты происходит в индукционной печи. Там же происходит и выдерживание нагретой детали. Охлаждение производят в специальной ванне, наполненной охлаждающей жидкостью, в качестве которой могут выступать вода, масло, эмульсии [35]. Также для охлаждения используют специальные установки, которые разбрызгивают охлаждающую жидкость на заготовку.

Перечислим основные достоинства данного метода термической обработки. Достоинства закалки токами высокой частоты:

1) Сохранение у заготовки после закалки токами высокой частоты незакаленной сердцевины, что снижает хрупкость детали после такой поверхностной термообработки.

2) Нагрев только поверхностей, которые испытывают максимальные или критические нагрузки, позволяет экономить переменные затраты на производство детали за счет экономии электрической энергии.

3) Если производство не единичное, то при правильной настройке автоматизации процесса, он обеспечит автоматическое выполнение и поддержание требуемого качества закалки.

4) Есть возможность регулировать глубину прогрева заготовки, что позволяет понимать глубину закаленного слоя.

5) Непрерывно-последовательный метод закалки позволяет использовать оборудование малой мощности.

6) Небольшое время нагревания и выдерживания при такой высокой температуре исключает возможность окисления верхнего и образования окалины на поверхности заготовки.

7) Быстрый нагрев и охлаждение не дают большого коробления и поводок, что позволяет уменьшить припуск на чистовую или получистовую обработку.

#### Ход работы:

1. Температуру закалки токами высокой частоты примем в диапазоне 700-950 °С.

2. Геометрию модели импортируем из программы Компас (рис. 33). Данная геометрия является почти такой же, как сверло из разделов 4.2 и 4.3, но с выполненным разрезом, для возможности отслеживания глубины прогрева заготовки.

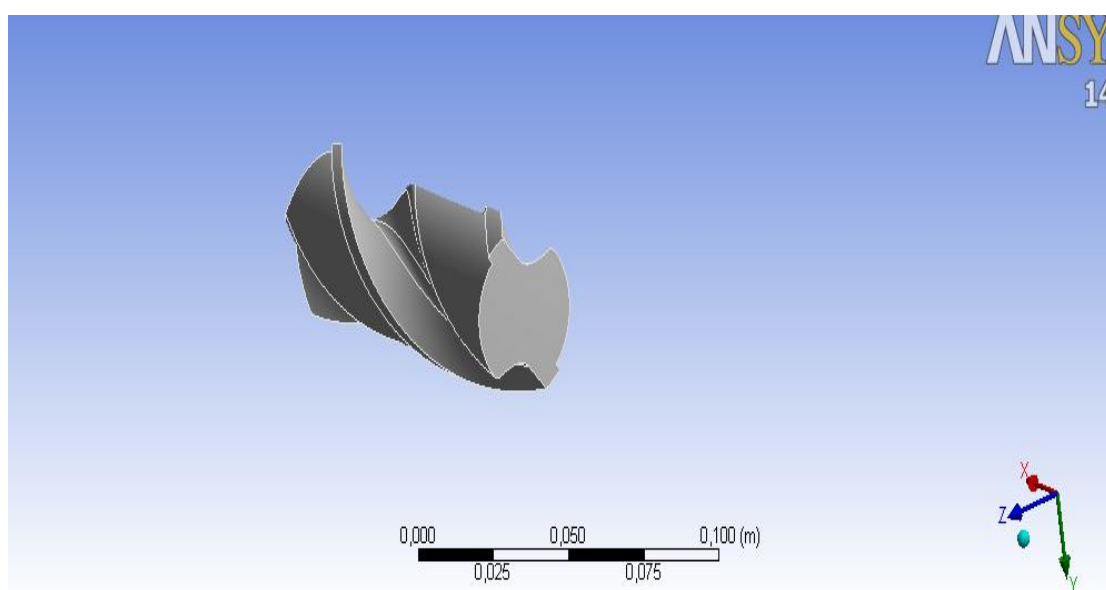


Рисунок 33 - Импорт геометрии модели

3. Построим сетку конечных элементов (рис. 34):

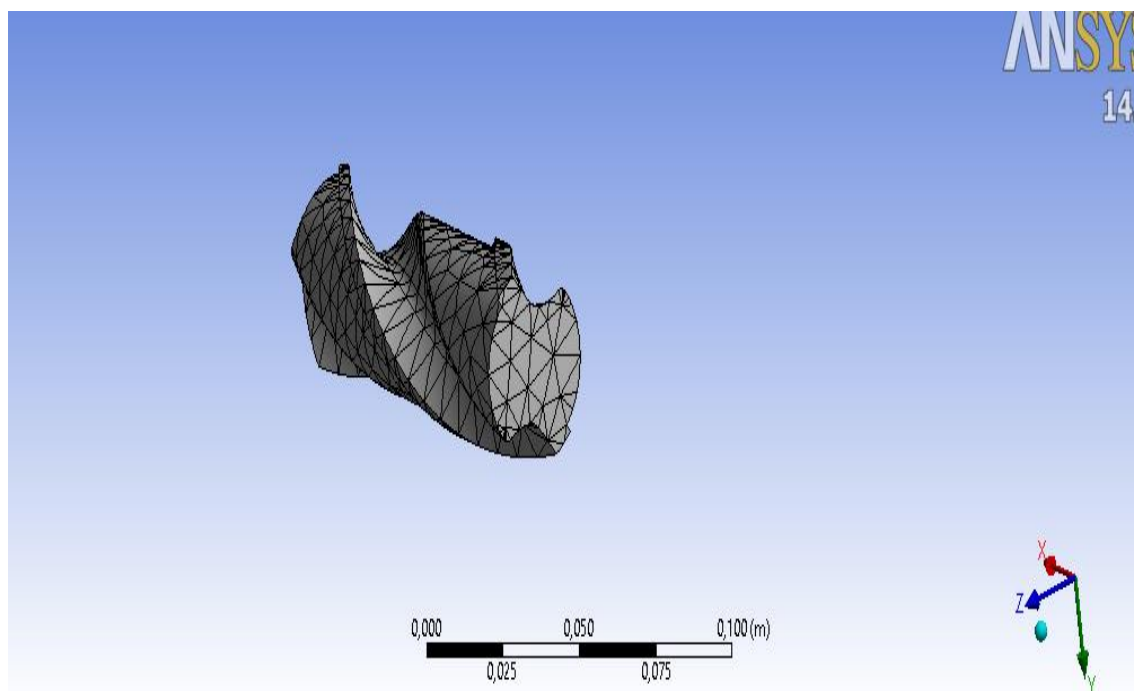


Рисунок 34 - Сетка конечных элементов

4. Приложим температуру закалки ТВЧ  $T=900^{\circ}\text{C}$  (рис. 35):

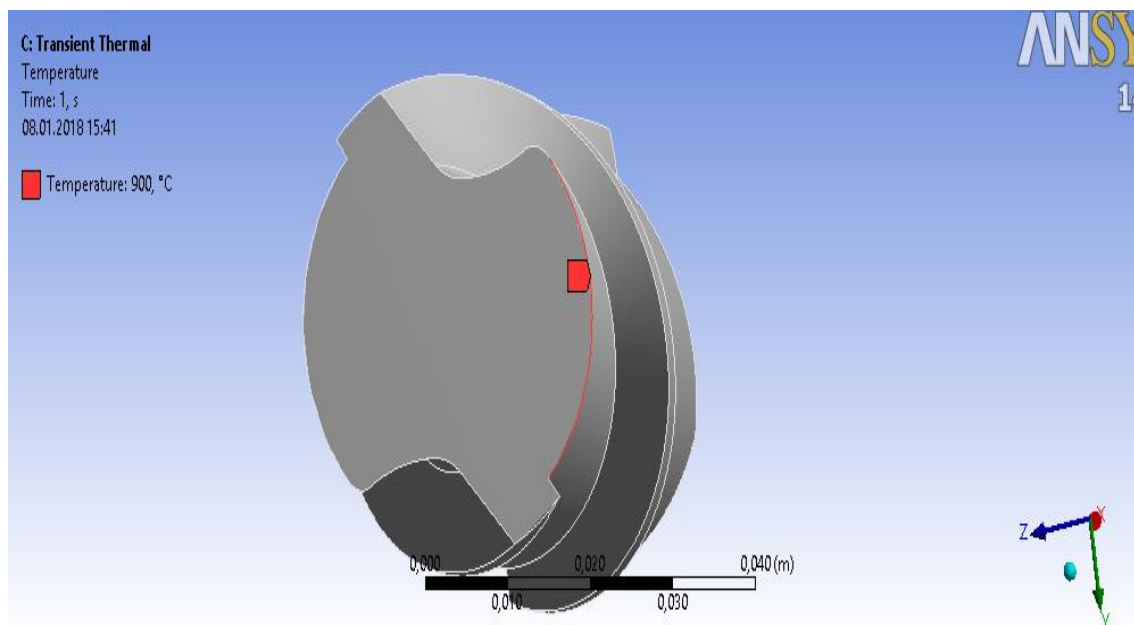


Рисунок 35 - Приложение температуры

5. Произведем температурный расчет, для определения глубины прогрева сверла при закалке ТВЧ (рис. 36):

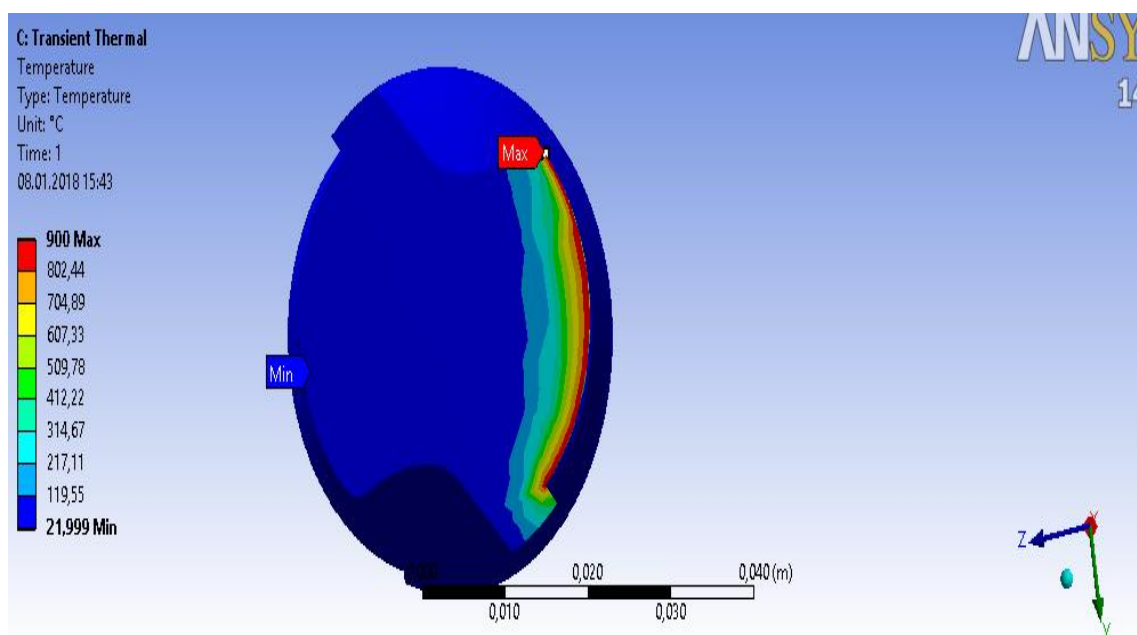


Рисунок 36 - Температурный расчет

6. Так как в результатах температурных расчетов нельзя замерить глубину прогрева линейкой из-за отсутствия функционала в ANSYS 14.0 [36], то используем линейку и программу Paint (рис. 37):

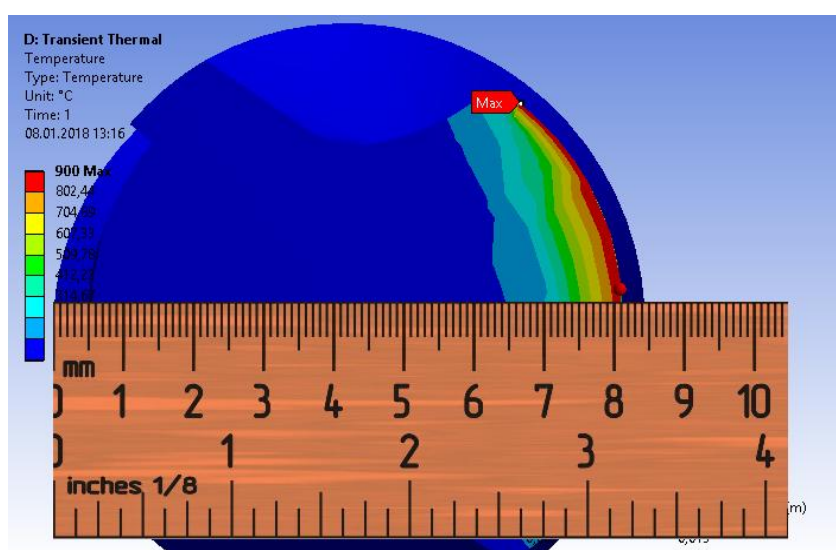


Рисунок 37 - Температурный расчет с приложением линейки



Используя рисунок 37 (с линейкой) и зная диаметр сверла  $D=40\text{мм}$ , по соотношению найдем глубину прогрева:

Глубина прогрева ( $T>700\text{ °C}$ ):

$$\frac{40}{84} = \frac{a}{8} \Rightarrow a = \frac{40 \cdot 8}{84} = 3,809 \text{ мм} \quad (4.5)$$

Глубина прогрева ( $T>500\text{ °C}$ ):

$$\frac{40}{84} = \frac{b}{10} \Rightarrow b = \frac{40 \cdot 10}{84} = 4,762 \text{ мм} \quad (4.6)$$

**Вывод:** Глубина прогрева сверла при закалке ТВЧ составила:  $a=3,809$  мм ( $T>700\text{ °C}$ ), и  $b=3,809$  мм ( $T>500\text{ °C}$ ). Это обозначает, что основные структурные изменения, связанные с изменением температуры под действием поверхностной закалки токами высокой частоты, происходят исключительно на поверхности сверла. Такое распределение температурных полей позволяет, в свою очередь, уменьшить пластическую деформацию (т.к. закалена только поверхность) при увеличении до требуемых значений твердости поверхности режущего инструмента, в данном случае сверла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации были рассмотрены и решены следующие задачи:

1. Был проведен литературный обзор общих способов закрепления осевого инструмента: системы «Коромант Capto» оказались сильнее конкурента при определении параметра жесткости при полусточном точении. Применение таких систем обеспечивает существенный рост производительности обработки металлов резанием за счет возможности быстро сменять инструмент, использовать более жесткие режимы резания, в частности, большие значения скорости подачи, а также другие параметры обработки.

2. Используя силовые соотношения из теории резания и курса сопротивления материалов, были определены области применения сверла, оснащенного хвостовиком Capto по сравнению со сверлом, оснаненным хвостовиком Морзе.

3. На основании расчетов, были построены графики, на которых было наглядно продемонстрировано две области – область применения инструмента, оснащенного хвостовиком Морзе и область применения инструмента, оснащенного хвостовиком Capto.

4. Была проанализирована геометрия конуса Capto, определена зависимость максимального зазора между конусами на шпинделе станка и на хвостовике сверла, от погрешности изготовления отверстия для упрощенной геометрии конуса Capto.

4. Была проанализирована геометрия конуса Capto, определена зависимость максимального зазора между конусами на шпинделе станка и на хвостовике сверла, от погрешности изготовления отверстия для неупрощенной геометрии конуса Capto.

5. Был построен график зависимости максимального зазора, возникающего в соединении конуса на шпинделе станка и на хвостовике сверла, от погрешности изготовления внутреннего конуса.

6. Используя пакет программы ANSYS, было произведено моделирование напряжений в сверле во время процесса обработки данным сверлом.

6. Используя пакет программы ANSYS, было произведено моделирование напряжений в сверле во время изготовления данного сверла на заточной операции.

7. Используя пакет программы ANSYS, было произведено моделирование расположения температурных полей при изготовлении данного сверла, а именно при его закалке токами высокой частоты (ТВЧ).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. McClarence, Elain. Be a time bandit: make tool changing quicker / E. McClarence // *Metalworking world*. Vol. 3. – Sweden : Spoon publishing, 2007. – p. 6–7. ISBN 1652-5825.
2. Livia, Dana. A generalized approach of the holder systems for cutting tools / D. Livia, D. Paul // *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. – Jun. 2011. – Vol. 9. – Issue 2. – P. 12–17.
3. Determination of Capto C5 shank's key dimensions / Shi Xiang-yun, Jiang Hong, Zhju Hong-da, Wang Shu-lin // *Materials Science Forum*, 2014. – Vol. 800–801. – P. 417–423.
4. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов : справочник / В.И. Баранчиков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. Левашкин, Д.Г. Размерный анализ процесса обработки базирующих отверстий автоматически сменных узлов призматической формы / Д.Г. Левашкин // Труды II Международной науч.-техн. конф. «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении» (Резниковские чтения). – Тольятти : ТГУ, 2008. – Т.1. – С. 212–219.
6. *Mechanical Engineering* / Ed. Murat Gokcek. – InTech, 2012. – 682 p. ISBN 978-953-51-0505-3.
7. Ермолаев, В.В. Технологическая оснастка. Лабораторно-практические работы и курсовое проектирование : учеб. пособ. – М. : Академия, 2012. – 320 с.
8. Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов. В 2 кн. Кн.1. Основы технологии машиностроения / Э.Л. Жуков [и др.] ; под ред. С.Л. Мурашкина. – М. : Высшая школа, 2005. – 278 с.
9. Григорьев, С. Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ : справочник / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов ; под общ. ред. А.Р. Маслова. – М. : Машиностроение, 2006. – 544 с.

10. Маслов, А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств : учеб. для вузов / А.Р. Маслов. – М. : Машиностроение, 2006. – 335 с.
11. <http://www.morsecuttingtools.com>
12. <http://www.loganact.com/tips/tapers.htm>.
13. Малышев В.И. Технология изготовления режущего инструмента : [учебное пособие для вузов по направлению подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"] / В. И. Малышев. - Старый Оскол : ТНТ, 2015. - 439 с.
14. Станочные приспособления : справочник. В 2 т. Т. 2 / редсовет: Б. Н. Вардашкин (пред.) [и др.] ; ред. тома Б. Н. Вардашкин [и др.]. - Москва : Машиностроение, 1984. - 655 с.
15. Сахаров, Г.Н. Металлорежущие инструменты : учеб. для вузов / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.
16. Гиловой Л. Я., Молодцов В. В. Исследование влияния центробежных сил на эксплуатационные свойства соединения HSK методами имитационного моделирования //СТИН. – 2011. – №. 12. – С. 2-7.
17. Johnson, G.R. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proc. of the 7th Int. Symp. on Ballistics. – 1983. – P. 541–547.
18. Савилов А. В., Николаев Д. Ю., Николаев А. Ю. Исследование влияния дисбаланса инструментальных наладок на выходные показатели фрезерования //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №. 7 (102).
19. Касимов А.Т. Исследование геометрии режущего инструмента, оснащенного хвостовиком Capto / А.Т. Касимов // Сборник докладов 64-й международный молодежный научно-технической конференции «Молодежь. Наука. Инновации» №1.- Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2016.- С. 535-538.

20. Бочкарева, И.О. Целесообразность применения режущего инструмента, оснащенного конусом *Carpto* / И.О. Бочкарева, Л.А. Резников // Труды III Международной конференции (Резниковские чтения). – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2011. – 454 с.
21. Малышев В.И. Технология изготовления режущего инструмента : [учеб. пособие по направлению "Конструкторско-технол. обеспечение машиностр. производств"]/ В.И. Малышев - Тольятти : Издательство Тольяттинского гос. университета, 2013. - 367 с.
22. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
23. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2003 г. – Т. 1 – 912 с. – Т. 2 – 944 с.
24. Режимы резания металлов : справочник / Ю.В. Барановский [и др.] ; под ред. А.Д. Корчемкина. – М. : НИИТавтопром, 1995. – 456 с.
25. Романенко, А.М. Режущий инструмент [электронный ресурс] : учебн. пособие. – Кемерово : КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2012. – 103 с.
26. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
27. Резников, Л.А. Проектирование сложнопрофильного режущего инструмента / Л.А. Резников. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 208 с.
28. Резников Л.А. Исследование геометрии и области применения режущего инструмента с хвостовиком *Carpto* / Л.А. Резников, И.О. Бочкарева, А.Т. Касимов // Вектор науки. №3.- Тольятти : ТГУ, 2016.- С. 16-23.
29. ВАСИН С. И., ИВАНОВ В. И. Аналитическая геометрия. – 1981.
30. Александров П. С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. – 1979.
31. Привалов И. И. Аналитическая геометрия. – Рипол Классик, 1957.
32. Fluent A. 12.0 Theory Guide //Ansys Inc. – 2009. – Т. 5. – №. 5.

33. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров [и др.] ; под ред. Н.Н. Зорева. – М. : Машиностроение, 1967. – 415 с.

34. Марочник сталей и сплавов / сост. А. С. Зубченко [и др.] ; под ред. А. С. Зубченко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 2003. - 782 с.

35. Технологические наладки механической обработки и сборки в машиностроении : учеб. пособие / А. Г. Схиртладзе [и др.]. - Гриф УМО ; ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2003. - 179 с.

36. Fluent A. 12.0 User's guide //Ansys Inc. – 2009.

# ПРИЛОЖЕНИЯ



# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Публикации

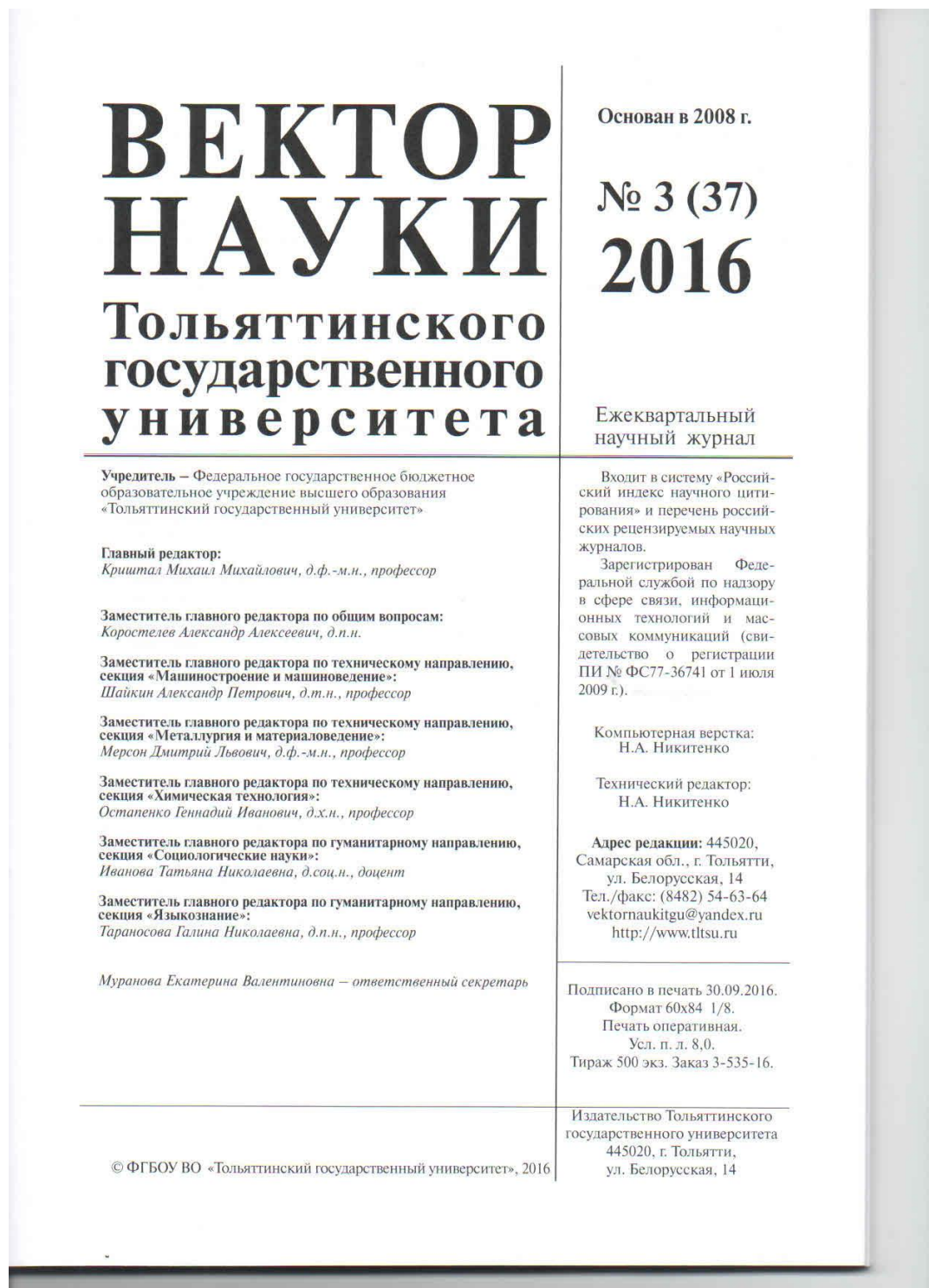


Рисунок А1 – Титульный лист журнала «Вектор науки ТГУ»

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ А.Ю. Краснопевцев, И.А. Гуренков, К.А. Матосов, И.В. Краснопевцева.....	9
---	---

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ХВОСТОВИКОМ <i>Capto</i> Л.А. Резников, А.Т. Касимов, И.О. Бочкарёва.....	16
--	----

### ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

СЕМАНТИКО-ГРАММАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕЙТ-ОБРАЗОВАНИЙ РУССКОГО ЯЗЫКА И.В. Гурова.....	23
--	----

ГРАЖДАНСКАЯ ИДЕНТИЧНОСТЬ СОВРЕМЕННОГО РОССИЙСКОГО ПОКОЛЕНИЯ X (НА ПРИМЕРЕ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ) В.В. Дьякова.....	28
--	----

ВНЕШНЯЯ ТРУДОВАЯ МИГРАЦИЯ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ А.А. Мамедов.....	32
--	----

ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕНОТАТИВНОЙ ОБЛАСТИ СЕМАНТИКИ НЕВЫРАЗИМОГО М.Ю. Михайлова.....	41
--	----

СОЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИЩЕННОСТЬ: СУТЬ И ЗНАЧЕНИЕ В.А. Никонов.....	46
--	----

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ПРИМЕРЕ ПЯТИ ЯЗЫКОВ Е.С. Ошанова.....	52
---	----

НЕКОТОРЫЕ СЕМАНТИЧЕСКИЕ КЛАССЫ ОБЪЕКТО НЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ АКЦИОНАЛЬНЫХ ГЛАГОЛОВ Л.В. Стахова.....	56
---	----

ЛИНГВОКОГНИТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРЕЗИДЕНТСКОГО ДИСКУРСА А.В. Худяков.....	60
---	----

НАШИ АВТОРЫ.....	66
------------------	----

Рисунок А2 – Содержание журнала «Вектор науки ТГУ»

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ХВОСТОВИКОМ *Capto*

© 2016

*Л.А. Резников*, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
*А.Т. Касимов*, студент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*  
*И.О. Бочкарёва*, ведущий инженер разработки ходовой части автомобиля  
*NISSAN Manufacturing Russia, Санкт-Петербург (Россия)*

**Ключевые слова:** конус Морзе; соединение *Capto*; сверло; прочность.

**Аннотация:** В статье рассмотрен вопрос целесообразного применения инструмента с хвостовиком *Capto*, а также условия возникновения зазора в соединении «инструмент – инструментальный шпиндель» и зависимость этого зазора от погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка.

Были проведены расчеты момента трения и крутящего момента при сверлении отверстий инструментом со стандартным хвостовиком Морзе и хвостовиком *Capto*. На основе этих расчетов было получено первое техническое ограничение – зависимость предельного значения подачи, обеспечивающего отсутствие проворачивания сверла в шпинделе станка, от диаметра инструмента. С учетом максимальных касательных напряжений в сверле было получено второе техническое ограничение – зависимость предельного значения подачи от диаметра сверла, основанная на требуемой прочности инструмента. Указанные технические ограничения были положены в основу определения областей целесообразного использования стандартных хвостовиков (в частности, конусов Морзе) и хвостовиков *Capto*.

С помощью аппарата аналитической геометрии была проанализирована геометрия соединения *Capto* и выявлены области появления максимального зазора в соединении. В первом приближении поперечное сечение соединения было представлено в виде треугольников со скругленными вершинами, а суммарная погрешность изготовления соединения была отнесена к углу при вершине отверстия в шпинделе. Это позволило математически обосновать область появления максимального зазора и получить зависимость максимального зазора от погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее распространенным является закрепление осевого режущего инструмента в шпинделе станка и придание ему крутящего момента с помощью гладких конических хвостовиков, как правило, выполненных в виде конусов Морзе. Основным недостатком гладкого конического соединения является весьма высокая вероятность проворачивания инструмента в шпинделе под действием сил резания.

Компанией *Sandvik* для повышения надежности закрепления осевого инструмента и эффективной передачи на него крутящего момента было предложено использовать хвостовики в виде так называемого конуса *Capto* [1].

Способ соединения хвостовика со шпинделем при применении конуса *Capto* основан на том, что две контактные поверхности – конус треугольного профиля (рис. 1), обеспечивающий самоцентрирование соединения, и фланец, ограничивающий осевое перемещение, – используются одновременно. Для повышения стабильности соединения используется посадка с натягом [2; 3]. Это позволяет отказаться от съемных элементов (штифтов, шпонок и т. п.) и снизить вероятность радиального и осевого смещения инструмента [4–6]. Эта вероятность, однако, возрастает при нарушении геометрии соединения вследствие погрешностей изготовления инструмента [7–10].

Сложная конфигурация соединения существенно удорожает инструмент с хвостовиком *Capto* по сравнению с инструментом, оснащенным стандартным хвостовиком Морзе.

В данной работе рассмотрены два вопроса: 1) как максимальный зазор в соединении *Capto* зависит от угловой погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка и 2) каковы условия рационального применения инструментов с хвостовиком *Capto*.

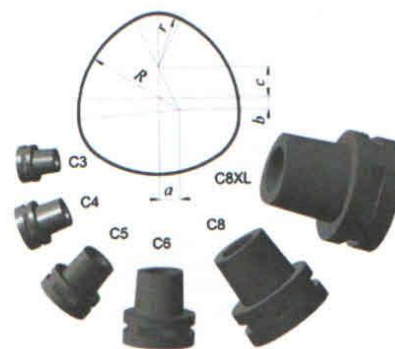


Рис. 1. Конструкция и размеры конусов *Capto* [1]

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились аналитическим путем. При точностных расчетах использовались положения аналитической геометрии на плоскости.

При определении областей рационального применения стандартных конусов Морзе и конусов *Carpto* использовались силовые соотношения из теории резания материалов и эмпирические зависимости силовых факторов от элементов режима резания.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании зазора в соединении *Carpto* была принята следующая схематизация соединения:

1. В первом приближении поперечное сечение соединения было представлено в виде треугольников со скругленными вершинами.

2. Суммарная погрешность изготовления соединения была отнесена к углу  $2\delta > 60^\circ$  при вершине отверстия в шпинделе, а профиль хвостовика инструмента считали равносторонним треугольником (рис. 2).

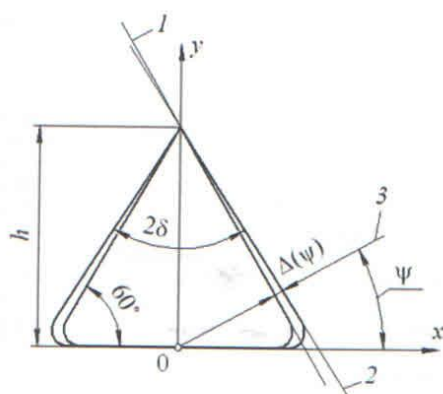


Рис. 2. К расчету максимального зазора в соединении

При такой схематизации уравнение боковой поверхности профиля хвостовика в системе координат  $xOy$  (рис. 2, прямая 1) имеет вид

$$y = -x\sqrt{3} + h, \quad (1)$$

а уравнение боковой поверхности профиля отверстия в шпинделе (рис. 2, прямая 2) имеет вид

$$y = -x \operatorname{ctg} \delta + h, \quad (2)$$

где  $h$  – теоретическая высота профиля.

Для нахождения текущего зазора в соединении проведем из начала координат луч 3 (см. рис. 2), который составляет с осью  $x$  некоторый угол  $\psi \in [0; 90]$  и описывается зависимостью

$$y = x \operatorname{tg} \psi. \quad (3)$$

Расстояние между точками пересечения луча 3 с прямыми 1 и 2 будет являться текущим зазором  $\Delta(\psi)$ . Решая совместно (1), (2) и (3), получаем

$$\Delta(\psi) = \frac{h(\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}{(\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta)(\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3})}. \quad (4)$$

Максимальный зазор в соединении отвечает условию  $d\Delta/d\psi = 0$ . Взяв производную от (4), приравняв ее к нулю и отбросив посторонние корни, не отвечающие условию  $\psi \in [0; 90]$ , получаем, что при принятой схематизации соединения максимальный зазор в нем возникает при текущем угле

$$\psi_0 = \arctg \sqrt{\sqrt{3} - 1}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (4) позволяет получить зависимость максимального зазора от суммарной погрешности изготовления угла  $2\delta$ :

$$\Delta_{\max}(\delta) = \frac{h\sqrt{3}}{\sqrt{\sqrt{3} - 1} + \sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta}{\sqrt{\sqrt{3} - 1} + \operatorname{ctg} \delta}. \quad (6)$$

Расчет по формуле (6) показывает, что при суммарной погрешности изготовления угла  $2\delta$  в пределах  $1^\circ (\pm 30')$  наибольший относительный зазор в соединении *Carpto* составляет  $\Delta_{\max}/h = 0,0135$ .

К вопросу об области целесообразного применения хвостовиков *Carpto* при работе осевого инструмента подойдем, основываясь на известном из теории резания положении, что проворачивание инструмента, оснащенного стандартными «гладкими» конусами в шпинделе станка происходит, если

$$M \geq M_{mp}, \quad (7)$$

то есть крутящий момент на инструменте в процессе резания превышает момент трения хвостовика инструмента в шпинделе станка [11; 12].

Неравенство (7) фактически представляет собой условие целесообразного применения конусов *Carpto*. Конкретизируем величины, входящие в (7).

Момент трения ( $H \cdot M$ ) на стандартном конусе со средним диаметром  $\bar{d}$  и конусностью  $\rho$  описывается соотношением

$$M_{mp} = 10^{-3} \xi (1 - 0,04\Delta) P_o \frac{\bar{d}}{\rho}, \quad (8)$$

где  $\xi$  – коэффициент трения скольжения (для трения стали по стали можно принять  $\xi = 0,15$ );

$\Delta$  – угловая погрешность изготовления конуса (для конусов Морзе среднее значение  $\Delta = 20'$ );

$P_o$  – осевая сила, действующая на инструмент.

В [13–15] приведено выражение для осевой силы (в ньютонах) в виде

$$P_o = 10 C_p D^{2r} s^{3r} K_p, \quad (9)$$

где  $D$  – диаметр инструмента, мм;  $s$  – подача, мм/об. При сверлении значения коэффициентов и показателей

степени в выражении (9) составляют:  $C_p=68$ ;  $q_p=1$ ;  $y_p=0,7$ ;  $K_p=1$ .

С учетом (9) и приведенных выше значений  $\xi$ ,  $\Delta$ ,  $C_p$ ,  $q_p$ ,  $y_p$  и  $K_p$  выражение (8) принимает вид

$$M_{np} = 0,02Ds^{0,7} \frac{\bar{d}}{\rho} \quad (10)$$

Крутящий момент (Н·м) при сверлении

$$M = 10C_m D^{q_m} s^{y_m} K_p, \quad (11)$$

где  $C_m=0,0345$ ;

$q_m=2$ ;  $y_m=0,8$ ;

$K_p=1$  [13–15].

Подставляя (10) и (11) в (7), имеем

$$s^{0,1} \geq \frac{0,058}{D} \frac{\bar{d}}{\rho} \quad (12)$$

Из выражения (12) может быть найдено минимальное значение подачи на один оборот сверла диаметром  $D$ , при котором имеет смысл оснащать инструмент и шпиндель станка конусами *Capto*. (Напомним, что это же значение подачи будет максимально допустимым при работе инструментом с «гладким» коническим хвостовиком.) Зависимость  $s(D)$  для конуса Морзе 4 ( $\bar{d}/\rho = 547$ ) показана на рис. 3. Ниже кривой  $s(D)$  – зона целесообразного использования конуса Морзе 4, а выше – зона целесообразного использования конуса *Capto*.

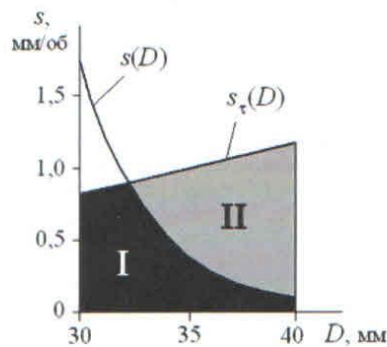


Рис. 3. Зоны целесообразного использования хвостовиков в виде конусов Морзе 4 (I) и *Capto* (II)

Однако применение конуса *Capto* не означает, что сверло с таким хвостовиком может работать с любой подачей свыше минимальной, рассчитанной по формуле (12). При больших подачах и, как следствие, больших крутящих моментах ограничение на значение подачи накладывает прочность инструмента [16; 17].

Сверла рассчитывают на кручение [18–20]. Из курса сопротивления материалов известно, что в круглом

стержне диаметром  $D$  (мм), на который действует крутящий момент  $M$  (Н·м), возникают наибольшие касательные напряжения (МПа):

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot 10^3 M}{\pi D^3} \quad (13)$$

Из-за стружечных канавок сечение сверла меньше сечения сплошного круглого стержня, поэтому, как показывает анализ, наибольшие касательные напряжения в сверле  $\tau_{\max}^{св} \approx 5\tau_{\max}$ .

Записывая ограничение по прочности сверла в виде  $\tau_{\max}^{св} \leq [\tau]$ , где  $[\tau] \approx 250$  МПа – допускаемое напряжение кручения, с учетом (11) и (13) получаем

$$s_\tau \leq 0,0117D^{1,25} \quad (14)$$

Неравенство (14), определяющее область подач, допускаемых прочностью сверла, на рис. 3 описывается зоной ниже кривой  $s_\tau(D)$ .

Таким образом, на рис. 3 (и аналогичных ему, построенных для других разновидностей «гладких» инструментальных конусов) можно отметить зону целесообразного использования стандартных конусов (выделена черным цветом и обозначена римской цифрой I) и зону целесообразного использования конусов *Capto* (выделена серым цветом и обозначена цифрой II).

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ

В работе предложена методика оценки зазоров в соединении *Capto* и пути определения диапазона подач осевого инструмента (в частности, сверл), при котором это соединение целесообразно использовать.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McClarence E. Be a time bandit: make tool changing quicker // *Metalworking world*. 2007. Vol. 3. P. 6–7.
2. Livia D., Paul D. A generalized approach of the holder systems for cutting tools // *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 2011. Vol. 9. № 2. P. 12–17.
3. Xiang-yun S., Hong J., Hong-da Z., Shu-lin W. Determination of *Capto* C5 shank's key dimensions // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 800–801. P. 417–423.
4. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов / под. ред. В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
5. *Mechanical Engineering* / ed. M. Gokcek. Rijeka: InTech, 2012. 682 p.
6. Технология машиностроения. В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения / под ред. С.Л. Мурашкина. М.: Высшая школа, 2005. 278 с.
7. Ермолаев В.В. Технологическая оснастка. Лабораторно-практические работы и курсовое проектирование. М.: Академия, 2012. 320 с.
8. Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств. М.: Машиностроение, 2006. 335 с.
9. Григорьев С.Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

10. Левашкин Д.Г. Размерный анализ процесса обработки базирующих отверстий автоматически сменных узлов призматической формы // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: труды II Международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). Тольятти: ТГУ, 2008. Т. 1. С. 212–219.
11. Резников Л.А. Проектирование сложнопрофильного режущего инструмента. Тольятти: ТГУ, 2016. 208 с.
12. Развитие науки о резании металлов / под ред. Н.Н. Зорева. М.: Машиностроение, 1967. 415 с.
13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. / под ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 2003. Т. 1. 912 с. Т. 2. 944 с.
15. Режимы резания металлов / под ред. А.Д. Корчемкина. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.
16. Бочкарёва И.О., Резников Л.А. Целесообразность применения режущего инструмента, оснащенного конусом *Capto* // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды III Международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). Тольятти: ТГУ, 2011. С. 213–225.
17. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic. Hague: Netherlands, 1983. P. 541–547.
18. Романенко А.М. Режущий инструмент. Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2012. 103 с.
19. Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л. Металлорежущие инструменты. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
20. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
7. Ermolaev V.V. *Tekhnologicheskaya osnastka. Laboratorno-prakticheskie raboty i kursovoe proektirovanie* [Technological equipment. Laboratory and practical works and course projecting]. Moscow, Akademiya Publ., 2012. 320 p.
8. Maslov A.R. *Instrumentalnye sistemy mashinostroitelnykh proizvodstv* [Tooling systems of mechanical engineering productions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 335 p.
9. Grigorev S.N., Kokhomskiy M.V., Maslov A.R. *Instrumentalnaya osnastka stankov s ChPU* [Tool equipment of CNC machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.
10. Levashkin D.G. The dimensional analysis of processing of the basing apertures of automatically replaceable knots of a prismatic form. *Teplofizicheskie i tekhnologicheskije aspekty upravleniya kachestvom v mashinostroenii: trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Reznikovskie chteniya)*. Togliatti, TGU Publ., 2008. Vol. 1, pp. 212–219.
11. Reznikov L.A. *Proektirovanie slozhnoprofilnogo rezhushchego instrumenta* [Designing of geometrically-complex cutting tool]. Togliatti, TGU Publ., 2016. 208 p.
12. Zorev N.N., ed. *Razvitie nauki o rezanii metallov* [The development of the science of cutting metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 415 p.
13. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of technologist-mechanician]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. Vol. 2, 496 p.
14. Dal'skiy A.M., ed. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of technologist-mechanician]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. Vol. 1, 912 p. Vol. 2, 944 p.
15. Korchemkin A.D., ed. *Rezhimy rezaniya metallov* [Metal cutting modes: handbook]. Moscow, NIITavtoprom Publ., 1995. 456 p.
16. Bochkareva I.O., Reznikov L.A. Reasonability of application of cutting tool equipped with *Capto* cone. *Teplofizicheskie i tekhnologicheskije aspekty povysheniya effektivnosti mashinostroitelnogo proizvodstva: trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Reznikovskie chteniya)*. Togliatti, TGU Publ., 2011, pp. 213–225.
17. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic*. Hague, Netherlands Publ., 1983, pp. 541–547.
18. Romanenko A.M. *Rezhushchiy instrument* [Cutting tool]. Kemerovo, KuzGTU im. T.F. Gorbacheva Publ., 2012. 103 p.
19. Sakharov G.N., Arbutov O.B., Borovoy Yu.L. *Metallorazhushchie instrumenty* [Metal cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 328 p.
20. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p.

## REFERENCES

1. McClarence E. Be a time bandit: make tool changing quicker. *Metalworking world*, 2007, vol. 3, pp. 6–7.
2. Livia D., Paul D. A generalized approach of the holder systems for cutting tools. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 12–17.
3. Xiang-yun S., Hong J., Hong-da Z., Shu-lin W. Determination of *Capto* C5 shank's key dimensions. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 800–801, pp. 417–423.
4. Baranchikov V.I., ed. *Progressivnye rezhushchie instrumenty i rezhimy rezaniya metallov* [Advanced cutting tools and cutting metals: handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 400 p.
5. Gokcek M., ed. *Mechanical Engineering*. Rijeka, InTech Publ., 2012. 682 p.
6. Murashkina S.L., ed. *Tekhnologiya mashinostroeniya. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Manufacturing technology. Fundamentals of manufacturing technology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. Kn. 1. 278 p.

THE STUDY OF GEOMETRY AND THE APPLICATION AREA  
OF CUTTING TOOL WITH *Capto* SHANK

© 2016

*L.A. Reznikov*, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair "Equipment and Technology of Engineering Production"

*A.T. Kasimov*, student of Chair "Equipment and Technology of Engineering Production"

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*I.O. Bochkareva*, Chassis Senior Engineer

*Nissan Manufacturing Russia, Saint Petersburg (Russia)*

*Keywords:* Morse cone; *Capto* joint; drilling tool; strength.

*Abstract:* The paper covers the issue of rational application of a tool with *Capto* shank, as well as the conditions for clearance occurrence in the "tool – tool spindle" joint and the dependence of this clearance on the error of manufacturing a hole in the machine spindle.

The authors carried out the calculations of friction and torsion moment when drilling holes using the tool with standard Morse taper shank and *Capto* shank. Based on these calculations, the first technical limitation was obtained – the dependence of feed threshold ensuring the absence of drill turning in machine spindle on the tool diameter. Taking into account the maximum value of tangential stresses in the drilling tool, second technical limitation was obtained – the dependence of feed threshold on a drill diameter based on the necessary tool strength. These technical limitations were used as a principle to define the areas of rational application of standard tool shanks (Morse taper shank in particular) and *Capto* shank.

Using the analytic geometry method, the geometry of *Capto* joint was analyzed and the areas of maximum clearance occurrence in a joint were identified. At a first approximation, the cross section of a joint was displayed as the triangles with rounded corners and the joint total manufacturing error was referred to the vertex angle of a spindle hole. It allowed proving mathematically the area of maximum clearance occurrence and identifying the dependence of maximum clearance on the error of manufacturing a hole in the tool spindle.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**МОРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. АДМ. Г.И. НЕВЕЛЬСКОГО**

## **СБОРНИК ДОКЛАДОВ**

64-й международной молодежной  
научно-технической конференции  
**МОЛОДЕЖЬ. НАУКА. ИННОВАЦИИ**  
21-25 ноября

I ТОМ



Владивосток  
2016

Рисунок А8 – Титульный лист сборника «Молодежь. Наука. Инновации»



УДК 656.6.08 (06)

Сборник докладов 64-й Международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь.Наука.Инновации», 21-25 ноября 2016 г. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2016. – 725 с.

В первом томе сборника содержится 209 докладов курсантов и студентов, аспирантов и молодых ученых учебных заведений и научно-исследовательских институтов Дальневосточного федерального региона, России и стран СНГ. Работы распределены по 13 секциям конференции, относящихся к техническому и естественно-научному направлениям исследований.

ISBN

© МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2016

Рисунок А9 – 1 страница сборника «Молодежь. Наука. Инновации»

## МОРСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

<i>Бужин И.О.</i> Разработка лазерной сенсорики подводной робототехники с использованием метода лазерной индуцированной флуоресценции .....	530
<i>Есин А.Е.</i> Мобильный анализатор подводных сигналов на базе АНПА .....	532
<i>Касимов А.Т.</i> Исследование геометрии режущего инструмента оснащенного хвостовиком Capto .....	535
<i>Коровецкий Д.А.</i> Разработка аппаратно-программного комплекса для регистрации нефтяных пленок на базе БПЛА ...	538

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

<i>Гудзь А.С.</i> Порт Ванино – вчера, сегодня, завтра .....	543
<i>Захарова В.П.</i> Оценка молодых специалистов в нефтегазовых предприятиях .....	545
<i>Иващенко Е.Г.</i> Современное состояние морского транспорта в Приморском крае, его проблемы и пути их решения .....	549
<i>Ким А.Ю.</i> Перспективы развития порта Восточный .....	551
<i>Колянички П.А., Бажин А.С.</i> Сравнительный анализ подходов к определению экономической основы управления интеллектуальным капиталом в организации .....	553
<i>Кузнецова В.В., Левченко Н.Г.</i> Автоматизация управления транспортно-логистическим процессом .....	558
<i>Леонова Е.В., Фисенко А.И.</i> Способности развития международных транспортных коридоров «Приморье-1» и «Приморье-2» .....	561
<i>Losev A.S., Bulgakov Y.V.</i> Analysis of sea goods turnover in Russia .....	564
<i>Меркулов И.С., Сироткин А.Д.</i> Перевалка гуманитарного груза в морском порту как часть логистического процесса .....	567
<i>Неякина Е.В., Гулая Т.В.</i> Проблема безработицы в России .....	570
<i>Неякина Е.В., Колесникова В.А.</i> Особенности и проблемы предпринимательства в России .....	573
<i>Неякина Е.В., Сергеева Е.В.</i> Экономика Дальнего Востока: проблемы и перспективы развития .....	575
<i>Серебрякова М.С., Бажин А.С.</i> Экономические компоненты системы материального стимулирования персонала в современной организации .....	578
<i>Филаткина И.Д., Филаткина М.Д., Бажин А.С.</i> Гендерные факторы развития предпринимательства в странах Азиатско-Тихоокеанского региона .....	582
<i>Филаткина М.Д., Филаткина И.Д., Бажин А.С.</i> Возможности карьерного выбора выпускников вуза в сторону предпринимательства и самозанятости .....	588
<i>Фомина Н.И., Бажин А.С.</i> Рынок интеллектуального капитала как необходимое связующее звено в процессах капитализации знаний .....	591
<i>Янченко А.А., Радочинская А.Ж., Костин А.В., Жихарева А.В.</i> Предварительное информирование таможенных органов – новое направление организации контейнерных перевозок в условиях функционирования свободного порта Владивосток (на примере компании ООО «ФИТ») .....	597

получение частотного спектра сигнала используется быстрый алгоритм дискретного преобразования Фурье:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

Где  $N$  – количество значений сигнала, измеренных за период и количество компонент разложения,  $x_n$  = 0, ...,  $N-1$ , - измеренные значения сигнала,  $k = 0, \dots, N-1$ , -  $N$  комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, слагающих исходной сигнал,  $n$  – индекс частоты.

Полученный спектр сигнала предполагается обрабатывать системой распознавания на основе баз данных сигналов подводных млекопитающих, созданных в результате многолетнего исследования. Сотрудниками лаборатории морских млекопитающих Института океанологии имени П.П. Ширшова в рамках изучения белух была собрана фонотека, насчитывающая 90000 образцов. Согласно их данным, характерные особенности акустических сигналов этих китов позволяют не только отличить вид от других млекопитающих, но также выделяются особенности использования сигналов в разных ареалах обитания, и даже отдельные черты присущие конкретным особям. [3]

Увеличение степени применения автономных подводных аппаратов и систем автоматизации в изучении и освоении морского пространства является лишь вопросом времени. Уже сейчас обитаемые аппараты активно используются в решении задач обнаружения источников природных ресурсов и морской картографии. С постоянным спиралеобразным развитием средств приёма и обработки данных, потенциальный объём задач, эффективное решение которых возможно с использованием подобных аппаратов может многократно возрасти. Поэтому, на данном этапе необходимо активно развивать данное направление для того, чтобы нарабатывать опыт разработок в этой области и обеспечить конкурентоспособность.

#### Литература

- 1 Non-lethal research techniques for studying whales Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, 2010.
- 2 Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машонин А.И. «Об амплитудной модуляции подводного шума» Акустический журнал том 49 №2 2003г.
- 3 <http://www.ocean.ru/content/view/129/51/> Сайт лаборатории морских млекопитающих Института океанологии им. П.П.Ширшова.

УДК 621.95.025

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ОСНАЩЕННОГО ХВОСТОВИКОМ САРТО

Касимов А.Т.

ТГУ, г. Тольятти

[kasim1200000@yandex.ru](mailto:kasim1200000@yandex.ru)

**Ключевые слова:** соединение Сарто, сверло.

*В статье рассмотрены условия возникновения зазора в соединении «инструмент – инструментальный шпиндель» и зависимость этого зазора от погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка*

*С помощью аппарата аналитической геометрии была проанализирована геометрия соединения Сарто и выявлены области появления максимального зазора в соединении. В первом приближении поперечное сечение соединения было представлено в виде треугольников со скругленными вершинами, а суммарная погрешность изготовления соединения была отнесена к углу при вершине отверстия в шпинделе. Это позволило математически обосновать область появления*

максимального зазора и получить зависимость максимального зазора от погрешности изготовления отверстия в шпинделе станка.

## RESEARCH GEOMETRY OF TOOLS WITH CAPTO SHANK

Kasimov A.T.

TSU, Togliatti

*kasim1200000@yandex.ru.*

**Key words:** Capto joint, drilling tool.

*The article covers also conditions when clearance occurs in joint «tool – tool spindle» and how this clearance depends on manufacturing error of spindle hole.*

*Using analytic geometry method the geometry of Capto joint was analyzed and the areas where maximum clearance occurs in joint identified. To a first approximation a cross section of joint was considered as triangles with chamfered vertexes and total manufacturing error of joint ascribed to vertex angle in spindle. This made possible to justify mathematically the area where maximum clearance occurs and identify dependence of maximum clearance on manufacturing error of tool spindle hole.*

### Введение

В настоящее время наиболее распространенным является закрепление осевого режущего инструмента в шпинделе станка и придание ему крутящего момента с помощью гладких конических хвостовиков, как правило, выполненных в виде конусов Морзе. Основным недостатком гладкого конического соединения является весьма высокая вероятность проворачивания инструмента в шпинделе под действием сил резания.

Компанией Sandvik для повышения надежности закрепления осевого инструмента и эффективной передачи на него крутящего момента было предложено использовать хвостовики в виде так называемого конуса Capto [1].



Рис.1. Конструкция и размеры конусов Capto [1]

Способ соединения хвостовика со шпинделем при применении конуса Capto основан на том, что две контактные поверхности – конус треугольного профиля (рис. 1), обеспечивающий самоцентрирование соединения, и фланец, ограничивающий осевое перемещение, – используются одновременно. Для повышения стабильности соединения используется посадка с натягом [2, 3]. Это позволяет отказаться от съемных элементов (штифтов, шпонок и т.п.) и снизить вероятность радиального и осевого смещения инструмента [4-6].

Эта вероятность, однако, возрастает при нарушении геометрии соединения вследствие погрешностей его изготовления [7-10].

Сложная конфигурация соединения существенно удорожает инструмент с хвостовиком Capto по сравнению с инструментом, оснащенным стандартным хвостовиком Морзе. В данной работе рассмотрены условия рационального применения инструментов с хвостовиком Capto.

### Методика проведения исследования

Исследования проводились аналитическим путем.

При точностных расчетах использовались положения аналитической геометрии на плоскости.

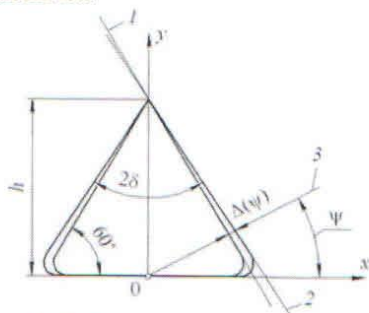


Рис. 2. К расчету максимального зазора в соединении

При такой схематизации уравнение боковой поверхности профиля хвостовика в системе координат  $xOy$  (рис. 2, прямая 1) имеет вид

$$y = -x\sqrt{3} + h, \quad (1)$$

а уравнение боковой поверхности профиля отверстия в шпинделе (рис. 2, прямая 2) имеет вид

$$y = -x \operatorname{ctg} \delta + h, \quad (2)$$

где  $h$  – теоретическая высота профиля.

Для нахождения текущего зазора в соединении проведем из начала координат луч 3 (см. рис. 2), который составляет с осью  $x$  некоторый угол  $\psi \in [0; 90]$  и описывается зависимостью

$$y = x \operatorname{tg} \psi, \quad (3)$$

Расстояние между точками пересечения луча 3 с прямыми 1 и 2 будет являться текущим зазором  $\Delta(\psi)$ . Решая совместно (1), (2) и (3), получаем

$$\Delta(\psi) = \frac{h(\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \psi + 1}}{(\operatorname{tg} \psi + \operatorname{ctg} \delta)(\operatorname{tg} \psi + \sqrt{3})}. \quad (4)$$

Максимальный зазор в соединении отвечает условию  $d\Delta/d\psi = 0$ . Взяв производную от (4), приравняв ее к нулю и отбросив посторонние корни, не отвечающие условию  $\psi \in [0; 90]$ , получаем, что при принятой схематизации соединения максимальный зазор в нем возникает при текущем угле

$$\psi_0 = \arctg \sqrt{\sqrt{3} - 1}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (4) позволяет получить зависимость максимального зазора от суммарной погрешности изготовления угла  $2\delta$ :

$$\Delta_{\max}(\delta) = \frac{h^2 \sqrt{3}}{\sqrt{\sqrt{3} - 1} + \sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \delta}{\sqrt{\sqrt{3} - 1} + \operatorname{ctg} \delta}. \quad (6)$$

Расчет по формуле (6) показывает, что при суммарной погрешности изготовления угла  $2\delta$  в пределах  $1^\circ (\pm 30')$  наибольший относительный зазор в соединении Capto составляет  $\Delta_{\max}/h = 0,0135$  [11].

#### Выводы

В работе предложена методика оценки зазоров в соединении Capto.

Литература:

1. McClarence, Elain. Be a time bandit: make tool changing quicker / E. McClarence // Metalworking world. Vol. 3. – Sweden : Spoon publishing, 2007. – p. 6–7. ISBN 1652-5825.
2. Livia, Dana. A generalized approach of the holder systems for cutting tools / D. Livia, D. Paul // Academic Journal of Manufacturing Engineering. – Jun. 2011. – Vol. 9. – Issue 2. – P. 12–17.
3. Determination of Capto C5 shank's key dimensions / Shi Xiang-yun, Jiang Hong, Zhju Honga-da, Wang Shu-lin // Materials Science Forum, 2014. – Vol. 800–801. – P. 417–423.
4. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов : справочник / В.И. Баранчиков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. Mechanical Engineering / Ed. Murat Gokcek. – InTech, 2012. – 682 p. ISBN 978-953-51-0505-3.
6. Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов. В 2 кн. Кн.1. Основы технологии машиностроения / Э.Л. Жуков [и др.]; под ред. С.Л. Мурашкина. – М. : Высшая школа, 2005. – 278 с.
7. Ермолаев, В.В. Технологическая оснастка. Лабораторно-практические работы и курсовое проектирование : учеб. пособ. – М. : Академия, 2012. – 320 с.
8. Маслов, А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств : учеб. для вузов / А.Р. Маслов. – М. : Машиностроение, 2006. – 335 с.
9. Григорьев, С. Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ : справочник / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов ; под общ. ред. А.Р. Маслова. – М. : Машиностроение, 2006. – 544 с.
10. Левашкин, Д.Г. Размерный анализ процесса обработки базирующих отверстий автоматически сменных узлов призматической формы / Д.Г. Левашкин // Труды II Международной науч.-техн. конф. «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении» (Резниковские чтения). – Тольятти : ТГУ, 2008. – Т.1. – С. 212–219.
11. Резников Л.А. Исследование геометрии и области применения режущего инструмента с хвостовиком Capto / Л.А. Резников, И.О. Бочкарева, А.Т. Касимов // Вектор науки. №3.- Тольятти : ТГУ, 2016.- С. 16-23.

УДК 504.064

**РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ  
РЕГИСТРАЦИИ НЕФЯНЫХ ПЛЕНОК НА БАЗЕ БПЛА**

*Коровецкий Д.А.*

*МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток*

*Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Букин О.А.  
318704@mail.ru*

**Ключевые слова:** МБЛА, беспилотник, спектрометр, нефтяной разлив, нефтяная плёнка, мониторинг.

*Проект рассматривает использование МБЛА со встроенным активным лазерным спектрометром, для проведения мониторинга морской поверхности на предмет наличия нефтяных загрязнений.*

**UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR OILSPILL MONITORING ON THE SEA SURFACE**

*Korovetsky D.A.*

*MSU named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok*

*Scientific adviser: PhD, professor Bukin O.A.*

*318704@mail.ru*

**Keywords:** UAV, drone, spectrometer, oil spill, oil film, monitoring.

*The project aims to develop hardware and software complex (HSC), and new method of recording and measuring parameters of oil spills on the sea surface by small-sized unmanned aerial vehicles (UAV).*

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет

# **СТУДЕНЧЕСКИЕ ДНИ НАУКИ В ТГУ**

**Научно-практическая конференция**

**Тольятти, 3–29 апреля 2017 года**

**Сборник  
студенческих работ**

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный  
университет», 2017



Рисунок А15 – Титульный лист сборника «Студенческие дни науки в ТГУ»

УДК 001.89  
ББК 4-2.4(2)

Ответственный за выпуск С.Х. Петерайтис

«Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 3–29 апреля 2017 года) : сборник студенческих работ /отв. за вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. – 1 оптический диск.

В сборнике содержатся работы студентов, представленные на научно-практической конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ» в 2017 году.

В сборнике отражены результаты научных исследований студентов Тольяттинского государственного университета по двенадцати направлениям («Архитектура, строительство», «Филология, лингвистика, журналистика, история, социология, философия», «Педагогика и психология», «Изобразительное искусство, дизайн, культурология», «Машиностроение», «Математика, физика, IT», «Юриспруденция», «Физическая культура, спорт, здоровье», «Финансы, экономика и управление», «Химия, рациональное природопользование и биотехнологии», «Энергетика и электротехника», «Охрана труда и техносферная безопасность») и по двум англоязычным секциям для студентов языковых и неязыковых направлений.

Студенческие работы представлены по десяти институтам, а также по двум англоязычным секциям для студентов языковых и неязыковых направлений.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию оргкомитетом научно-практической конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ» Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИИ 500 МГц или эквивалент, 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2017

Рисунок А16 – 1 страница сборника «Студенческие дни науки в ТГУ»



<i>Д.М. Глоев, И.К. Михалюк.</i> Энергетические установки на альтернативных и возобновляемых видах топлива .....	106
<i>Р.О. Черксов.</i> Разработка и расчет виртуального испытания удара головы о подголовник сиденья автомобиля с использованием САПР .....	108
<i>Е.А. Антонов, Е.А. Смирнов.</i> Разработка методов проектирования поверхностей деталей экстерьера автомобиля в САПР .....	111
<i>А.М. Остряко.</i> Технология формирования жаростойких кокильных покрытий системы Ni-Al .....	113
<i>А.Н. Грунюшкин.</i> Оптимальное проектирование процессов листовой штамповки в программе LS-OPT .....	116
<i>А.Г. Бочков.</i> Влияние легирующих элементов на свойства наплавленных сплавов системы Fe-Al .....	120
<i>А.Т. Косов.</i> Исследование области применения режущего инструмента с хвостовиком CARTO .....	123
<i>Институт энергетики и электротехники</i>	
<i>И.А. Ахметханов, К.В. Еськин.</i> Установка для исследования пробоя воздушной среды: выбор компонентов системы управления .....	129
<i>О.Д. Власов.</i> Виртуальный лабораторный стенд: моделирование высоковольтного источника на обратноходовом преобразователе .....	132
<i>Д.М. Гизатуллин.</i> Выбор схемы коррекции коэффициента мощности для светодиодного источника питания .....	134
<i>С.В. Гуцин, В.В. Богатырев.</i> Особенности позиционирования мобильных робототехнических комплексов в помещениях ...	136
<i>К.В. Еськин, И.А. Ахметханов.</i> Установка для исследования пробоя воздушной среды: выбор компонентов силовой части .....	139
<i>С.Е. Кочев.</i> Устройство для заряда конденсаторного накопителя энергии кодоимпульсного сейсмоисточника .....	141

---

Рисунок А17 – Содержание сборника «Студенческие дни науки в ТГУ»

2. Третьяков К.В. Фазовые и структурные превращения в алюминиды переходных металлов Fe, Co и Ni при механохимическом синтезе и механоактивации : дис. канд. хим. наук: защищена 17.02.2006 / К.В. Третьяков. – М., 2006. – 139 с.
3. Ковтунов А.И. Физико-химическая кинетика взаимодействия алюминия со сталью при формировании металла шва с заданными свойствами : дисс. док. тех. наук: защищена / А.И. Ковтунов – Тольятти, 2011. – 357 с.
4. Ковтунов А.И. Особенности применения сплавов системы железо-алюминий для наплавки покрытий литейных форм / А.И. Ковтунов, Д.И. Плахотный, А.Г. Бочкарев // Сварочное производство. – 2017. – №1. – С. 31–35.

УДК 621.95.025

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ХВОСТОВИКОМ *САРТО*

*А.Т. Кимов*

В статье рассмотрен вопрос целесообразного применения инструмента с хвостовиком *Сарто*.

Были проведены расчеты момента трения и крутящего момента при сверлении отверстий инструментом со стандартным хвостовиком Морзе и хвостовиком *Сарто*. На основе этих расчетов было получено первое техническое ограничение – зависимость предельного значения подачи, обеспечивающего отсутствие проворачивания сверла в шпинделе станка, от диаметра инструмента. С учетом максимальных касательных напряжений в сверле было получено второе техническое ограничение – зависимость предельного значения подачи от диаметра сверла, основанная на требуемой прочности инструмента. Указанные технические ограничения были положены в основу определения областей целесообразного использования стандартных хвостовиков (в частности, конусов Морзе) и хвостовиков *Сарто*.

В настоящее время наиболее распространенным является закрепление осевого режущего инструмента в шпинделе станка и придание ему крутящего момента с помощью гладких конических хвостовиков, как правило, выполненных в виде конусов Морзе. Основным недостатком гладкого конического соединения является весьма вы-

Рисунок А18 – 1 страница публикации в сборнике «Студенческие дни науки  
в ТГУ»

сокая вероятность проворачивания инструмента в шпинделе под действием сил резания.

Компанией *Sandvik* для повышения надежности закрепления осевого инструмента и эффективной передачи на него крутящего момента было предложено использовать хвостовики в виде так называемого конуса *Capto* [1].



Рис. 1. Конструкция и размеры конусов *Capto* [1]

Способ соединения хвостовика со шпинделем при применении конуса *Capto* основан на том, что две контактные поверхности – конус треугольного профиля (рис. 1), обеспечивающий самоцентрирование соединения, и фланец, ограничивающий осевое перемещение, – используются одновременно. Для повышения стабильности соединения используется посадка с натягом [2, 3]. Это позволяет отказаться от съемных элементов (штифтов, шпонок и т. п.) и снизить вероятность радиального и осевого смещения инструмента [4–6]. Эта вероятность, однако, возрастает при нарушении геометрии соединения вследствие погрешностей его изготовления [7–10].

Сложная конфигурация соединения существенно удорожает инструмент с хвостовиком *Capto* по сравнению с инструментом, оснащенным стандартным хвостовиком Морзе.

В данной работе рассмотрен вопрос рационального применения инструментов с хвостовиком *Capto*.

Исследования проводились аналитическим путем.

При определении областей рационального применения стандартных конусов Морзе и конусов *Capto* использовались силовые соотношения из теории резания материалов и эмпирические зависимости силовых факторов от элементов режима резания.

**Результаты исследований и их обсуждение.** К вопросу об области целесообразного применения хвостовиков *Capto* при работе осевого инструмента подойдем, основываясь на известном из теории резания положении, что проворачивание инструмента, оснащенного стандартными «гладкими» конусами в шпинделе станка происходит, если

$$M \geq M_{\text{тр}}, \quad (1)$$

то есть крутящий момент на инструменте в процессе резания превышает момент трения хвостовика инструмента в шпинделе станка [11, 12].

Неравенство (1) фактически представляет собой условие целесообразного применения конусов *Capto*. Конкретизируем величины, входящие в (1).

Момент трения (Н.м) на стандартном конусе со средним диаметром  $\bar{d}$  и конусностью  $\rho$  описывается соотношением

$$M_{\text{тр}} = 10^{-3} \xi (1 - 0,04 \Delta) P_o \frac{\bar{d}}{\rho}, \quad (2)$$

где  $\xi$  – коэффициент трения скольжения (для трения стали по стали можно принять  $\xi = 0,15$ );  $\Delta$  – угловая погрешность изготовления конуса (для конусов Морзе среднее значение  $\Delta = 20^\circ$ );  $P_o$  – осевая сила, действующая на инструмент.

В [13-15] приведено выражение для осевой силы (в Ньютонах) в виде

$$P_o = 10 C_p D^{q_p} s^{y_p} K_p, \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр инструмента, мм;  $s$  – подача, мм/об. При сверлении значения коэффициентов и показателей степени в выражении (3) составляют  $C_p = 68$ ;  $q_p = 1$ ;  $y_p = 0,7$ ;  $K_p = 1$ .

С учетом (3) и приведенных выше значений  $\xi$ ,  $\Delta$ ,  $C_p$ ,  $q_p$ ,  $y_p$  и  $K_p$  выражение (3) принимает вид

$$M_{\text{тр}} = 0,02 D s^{0,7} \frac{\bar{d}}{\rho}. \quad (4)$$

Крутящий момент (Н.м) при сверлении

$$M = 10C_m D^{q_m} s^{y_m} K_p, \quad (5)$$

где  $C_m = 0,0345$ ;  $q_m = 2$ ;  $y_m = 0,8$ ;  $K_p = 1$  [13-15].

Подставляя (4) и (5) в (1), имеем

$$s^{0,1} \geq \frac{0,058}{D} \cdot \frac{\bar{d}}{\rho}. \quad (6)$$

Из выражения (6) может быть найдено минимальное значение подачи на один оборот сверла диаметром  $D$ , при котором имеет смысл оснащать инструмент и шпиндель станка конусами *Capto*. (Напомним, что это же значение подачи будет максимально допустимым при работе инструментом с «гладким» коническим хвостовиком). Зависимость  $s(D)$  для конуса Морзе 4 ( $\bar{d}/\rho = 574$ ) показана на рис. 2. Ниже кривой  $s(D)$  – зона целесообразного использования конуса Морзе 4, а выше – зона целесообразного использования конуса *Capto*.

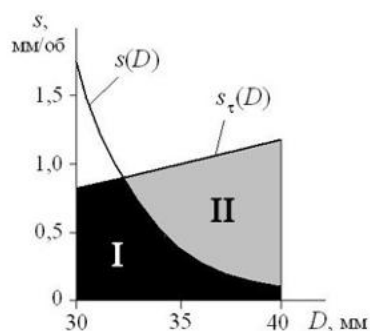


Рис. 2. Зоны целесообразного использования хвостовиков в виде конусов Морзе 4 (I) и *Capto* (II)

Однако применение конуса *Capto* не означает, что сверло с таким хвостовиком может работать с любой подачей свыше минимальной, рассчитанной по формуле (6). При больших подачах и, как следствие, больших крутящих моментах ограничение на значение подачи накладывает прочность инструмента [16, 17].

Сверла рассчитывают на кручение [18-20]. Из курса сопротивления материалов известно, что в круглом стержне диаметром  $D$  (мм), на который действует крутящий момент  $M$  (Н.м), возникают наибольшие касательные напряжения (МПа)

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot 10^3 M}{\pi D^3}, \quad (7)$$

Из-за стружечных канавок сечение сверла меньше сечения сплошного круглого стержня, поэтому, как показывает анализ, наибольшие касательные напряжения в сверле  $\tau_{\max}^{cb} \approx 5\tau_{\max}$ .

Записывая ограничение по прочности сверла в виде  $\tau_{\max}^{cb} \leq [\tau]$ , где  $[\tau] \approx 250$  МПа – допускаемое напряжение кручения, с учетом (5) и (7) получаем

$$s_{\tau} \leq 0,0117D^{1,25}. \quad (8)$$

Неравенство (8), определяющее область подач, допускаемых прочностью сверла, на рис. 3 описывается зоной ниже кривой  $s_{\tau}(D)$ .

Таким образом, на рис. 2 – и аналогичных ему, построенных для других разновидностей «гладких» инструментальных конусов, – можно отметить зоны целесообразного использования стандартных конусов (выделена черным цветом и обозначена римской цифрой I) и конусов *Capto* (выделена серым цветом и обозначена цифрой II).

**Выводы.** В работе предложены пути определения диапазона подач осевого инструмента (в частности, сверл), при котором соединение *Capto* целесообразно использовать.

#### *Литер тур*

1. McClarence, Elain. Be a time bandit: make tool changing quicker / E. McClarence // *Metalworking world*. Vol. 3. – Sweden : Spoon publishing, 2007. – p. 6–7.
2. Livia, Dana. A generalized approach of the holder systems for cutting tools / D. Livia, D. Paul // *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. – Jun. 2011. – Vol. 9. – Issue 2. – P. 12–17.
3. Determination of Capto C5 shank's key dimensions / Shi Xiang-yun, Jiang Hong, Zhju Honga-da, Wang Shu-lin // *Materials Science Forum*, 2014. – Vol. 800–801. – P. 417–423.
4. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов : справочник / В.И. Баранчиков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. *Mechanical Engineering* / Ed. Murat Gokcek. – InTech, 2012. – 682 p.
6. *Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов. В 2 кн. Кн.1. Основы технологии машиностроения* / Э.Л. Жуков [и др.] ; под ред. С.Л. Мурашкина. – М. : Высшая школа, 2005. – 278 с.
7. Ермолаев, В.В. *Технологическая оснастка. Лабораторно-практические работы и курсовое проектирование : учеб. пособ.* – М. : Академия, 2012. – 320 с.

8. Маслов, А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств : учеб. для вузов / А.Р. Маслов. – М. : Машиностроение, 2006. – 335 с.
9. Григорьев, С. Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ : справочник / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов ; под общ. ред. А.Р. Маслова. – М. : Машиностроение, 2006. – 544 с.
10. Левашкин, Д.Г. Размерный анализ процесса обработки базирующих отверстий автоматически сменных узлов призматической формы / Д.Г. Левашкин // II Междунар. науч.-техн. конф. «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении» (Резниковские чтения). – Тольятти : ТГУ, 2008. – Т. 1. – С. 212–219.
11. Резников, Л.А. Проектирование сложнопрофильного режущего инструмента / Л.А. Резников. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 208 с.
12. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров [и др.] ; под ред. Н.Н. Зорева. – М. : Машиностроение, 1967. – 415 с.
13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х тт. / под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2003 г. – Т. 1 – 912 с. – Т. 2 – 944 с.
15. Режимы резания металлов : справочник / Ю.В. Барановский [и др.] ; под ред. А.Д. Корчемкина. – М. : НИИТавтопром, 1995. – 456 с.
16. Бочкарева, И.О. Целесообразность применения режущего инструмента, оснащенного конусом *Carpo* / И.О. Бочкарева, Л.А. Резников // III Междунар. конф. (Резниковские чтения). – Тольятти : ТГУ, 2011. – 454 с.
17. Johnson, G.R. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proc. of the 7th Int. Symp. on Ballistics. – 1983. – P. 541–547.
18. Романенко, А.М. Режущий инструмент [электронный ресурс] : учебн. пособие. – Кемерово : КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2012. – 103 с.
19. Сахаров, Г.Н. Металлорежущие инструменты : учеб. для вузов / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.
20. Резников Л.А. Исследование геометрии и области применения режущего инструмента с хвостовиком *Carpo* / Л.А. Резников, И.О. Бочкарева, А.Т. Касимов // Вектор науки. №3.- Тольятти : ТГУ, 2016.- С. 16-23.

Рисунок А23 – 6 страница публикации в сборнике «Студенческие дни науки в ТГУ»