

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации им. А. Буркитбаева

Кафедра «Индустриальная инженерия»

Выполнила: Избасарова Асия Данияровна

Проектирование червячной фрезы в САД/САЕ системах

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Специальность 5В071200 – Машиностроение

Алматы 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации им. А. Буркитбаева

Кафедра «Индустриальная инженерия»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Зав. кафедрой «Индустриальная  
инженерия»

Доктор PhD.

\_\_\_\_\_ Арымбеков Б.С.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: «Проектирование червячной фрезы в CAD/CAE системах»

по специальности 5В71200 – Машиностроение

Выполнила

Избасарова Асия Данияровна

Рецензент

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Ф.И.О.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Научный руководитель  
Канд. техн. наук, ассистент-  
профессор

\_\_\_\_\_ Орлова Е.П.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Алматы 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации им. А. Буркитбаева

Кафедра «Индустриальная инженерия»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Зав. кафедрой «Индустриальная  
инженерия»

Доктор PhD

\_\_\_\_\_ Арымбеков Б.С.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся *Избасаровой Асие Данияровна*

Тема: *«Проектирование червячной фрезы в CAD/CAE системах»*

Утверждена приказом Ректора Университета №762-б от «27» января 2020 г.

Срок сдачи законченной работы «20»\_04\_\_\_\_ 2020 г.

Исходные данные к дипломной работе:

1. Размеры готовой детали
2. Марка стали обрабатываемой заготовки

Краткое содержание дипломной работы:

- а) расчет и проектирование червячной фрезы для обработки зубчатого колеса;
- б) определение режима резания, сил и мощности при фрезеровании;
- в) расчет на прочность цилиндрической червячной фрезы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): чертеж цилиндрической червячной фрезы

Рекомендуемая основная литература:

1. Фрезерное дело. Издание 5-е, перераб. и доп., С. В. Аврутин, «Высшая школа», Москва, 1964. – 542 с.
2. Расчет и конструирование режущего инструмента, Г. А. Алексеев, В. А. Аршинов, Е. А. Смольников, «Машгиз», 1951. – 602 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В двух томах. Издание 4-е, перераб. и доп. Том 2. Под редакцией Косиловой А. Г., Мещерякова Р. П., Москва, "Машиностроение", 1986. – 495 с.

## ГРАФИК

### Подготовки дипломной работы (проекта)

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение Общие сведения о червячных фреззах	19.02.2020	
Проектирование и расчет цилиндрической червячной фрезы	27.03.2020	
Расчет на прочность цилиндрической червячной фрезы	29.04.2020	

### Подписи

Консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы(проекта)

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч.степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Орлова Е.П., канд.техн.наук	15.04.2020	
Нормоконтролер	Орлова Е.П., канд.техн.наук	20.05.2020	

Научный руководитель

\_\_\_\_\_

Орлова Е.П.

Задание принял к исполнению обучающийся

\_\_\_\_\_

Избасарова А.Д.

Дата

«30» января 2020г.

## АННОТАЦИЯ

Объект исследования: червячная фреза для обработки прямозубого цилиндрического зубчатого колеса.

В дипломную работу входят введение, один теоретический, три расчетных раздела и анализ результатов, заключение.

Цель и задачи, актуальность, теоретическая и методологическая основа дипломной работы приведены во введении.

В дипломном проекте произведен расчет геометрических параметров червячной фрезы, выбран материал для изготовления и разработан рабочий чертеж режущего инструмента; выбран станок и назначены режимы резания; определены составляющие сил резания и мощность; произведен расчет на прочность и анализ полученных результатов. Заключение содержит оценку результатов работы в целом с точки зрения ее соответствия заданию.

Объем дипломной работы: 27 страниц, 10 рисунков, 1 рабочий чертеж детали. При написании работы было использовано 8 библиографических источников.

## АҢДАТПА

Зерттеу объектісі: тісті доңғалақтың цилиндрлік тіктістілігін өңдеуге арналған бұрыштық фреза.

Дипломдық жұмыс құрылымына кіріспе, бір теориялық үш есептік бөлім, нәтижелерді талдау және қорытынды кіреді.

Дипломдық жұмыстың мақсаты мен міндеттері, өзектілігі, теориялық және әдіснамалық негіздері кіріспеде көрсетілген.

Дипломдық жобада бұрыштық фрезаның геометриялық параметрлерін есептеу жүргізілді, кесу құралының жұмыс сызбасы құрастырылды және әзірлеу үшін материал таңдап алынды; станок таңдап алынды және кесу режимі тағайындалды; кесу күші мен қуаты анықталды; беріктікке есептеу және алынған нәтижелерге талдау жүргізілді. Қорытынды оның тапсырмаға сәйкестігі тұрғысынан тұтастай алғанда жұмыс нәтижелерін бағалауды қамтиды.

Дипломдық жұмыстың көлемі: 27 беттен, 10 сурет, 1 бөлшектің жұмыс сызбасынан тұрады. Жұмысты жазуда 8 библиографиялық деректер қолданылды.

## ANNOTATION

Object of study: a worm-milling cutter for machining a spur gear.

The diploma work includes an introduction, one theoretical and three calculation sections and analysis of results, a conclusion.

The purpose and objectives, relevance, theoretical and methodical basis of the work are given in the introduction.

In this work the geometric parameters of the worm cutter were calculated, the material for manufacturing was selected and a working drawing of the cutting tool was developed; the machine is selected and cutting modes are assigned; components of cutting forces and power are determined; strength calculation and analysis of the results obtained. The conclusion contains an assessment of the results of the work in terms of its compliance with the task.

Volume of project: 27 pages, 10 drawings, 1 working drawing of the part, 8 sources.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Понятие о червячных фрезях. Виды и применение	10
2	Расчет червячной фрезы	12
2.1	Определение элементов профиля фрезы	12
2.2	Определение режущей части фрезы	13
3	Расчет режимов резания	17
4	Расчет на прочность червячной фрезы	21
5	Результаты	23
	Заключение	26
	Список использованной литературы	27

## ВВЕДЕНИЕ

Обработка червячными фрезами остается актуальной и на сегодняшний день. На современных заводах нарезание зубчатых колес производят червячными фрезами, которые необходимо спроектировать, учитывая все внешние и внутренние факторы, оказывающие влияние на работоспособность инструмента. Проектирование червячных фрез в CAD/CAE системах выполняется с целью обеспечить повышение точности и производительности, а также сократить влияние человеческого фактора. Проектирование режущих инструментов в CAD/CAE системах позволяет определить зоны и значения максимальных напряжений, чтобы в дальнейшем сделать вывод о правильности выбора материала фрезы и ее геометрических параметров, что позволит сэкономить материал в случае неправильного проектирования фрезы и ее разрушения в процессе резания.

Основная цель дипломного проекта: спроектировать пригодную для работы червячную фрезу с использованием CAD/CAE систем.

Задачи, которые следует выполнить для достижения поставленной цели:

1. задать исходные данные: чертеж обрабатываемой детали, вид обработки (чистовая), обрабатываемый материал, марку материала фрезы;
2. сформировать требования: задать шероховатость обрабатываемой поверхности по чертежу детали, задать коэффициент запаса прочности;
3. определить конструктивные параметры фрезы;
4. создать модель фрезы в CAD системе;
5. назначить предварительно режимы резания по справочным данным: глубину  $t$  и ширину  $B$  фрезерования, подачу  $S$  и скорость  $V$ ;
6. определить силы резания ( $P_{\text{окр}}$ ), крутящий момент на шпинделе  $M_{\text{кр}}$ , эффективную мощность  $N_e$ , мощность привода главного движения  $N_{\text{ст}}$ ;
7. сделать вывод о возможности выполнения обработки на данном станке;
8. задать нагрузку, закрепление в системе CAE;
9. разработать конечно-элементную модель в CAE системе;
10. задать свойства быстрорежущей стали P6M5;
11. сделать линейный статический расчет;
12. проанализировать полученные результаты;
13. сделать выводы о возможности выполнения чистовой обработки.

Теоретическую и методологическую основу дипломной работы составляют труды таких отечественных авторов как: Г. А. Алексеев, Е. А. Смольников, Р. П. Мещерякова, Е. В. Артамонов и В. В. Киреев.

Данная работа отражает навыки, полученные в ходе обучения по специальности «Машиностроение».

## 1 Понятие о червячных фрезах. Виды и применение

Червячная фреза – режущий инструмент, который работает по методу обкатки и применяется для нарезания зубчатых и червячных колес. Она представляет собой червяк, который образован прямой линией, движущейся по винтовой поверхности, и снабженный канавками.

Червячные фрезы делятся:

На цельные и сборные по внутреннему устройству. На хвостовые и насадные по конструкции крепления.

По типу нарезаемых колес:

- 1) Для нарезания прямозубых и косозубых цилиндрических колес;
- 2) червячных колес;
- 3) Конических колес с косыми зубьями;
- 4) Глобоидальных колес.

По типу образования:

- 1) Эвольвентные;
- 2) Архимедовы;
- 3) Фрезы с прямолинейным профилем в нормальном сечении.

Эвольвентные и архимедовы фрезы применяют для фрезерования червячных колес. Прямозубые и косозубые цилиндрические колеса в основном нарезают червячными фрезами с прямолинейным профилем в нормальном сечении, реже архимедовыми червячными фрезами.

На рисунке 1 показаны червячные фрезы, применяемые для нарезания зубчатых колес на цилиндрической поверхности делятся на черновые, чистовые, особо точные (прецизионные) и сборные.

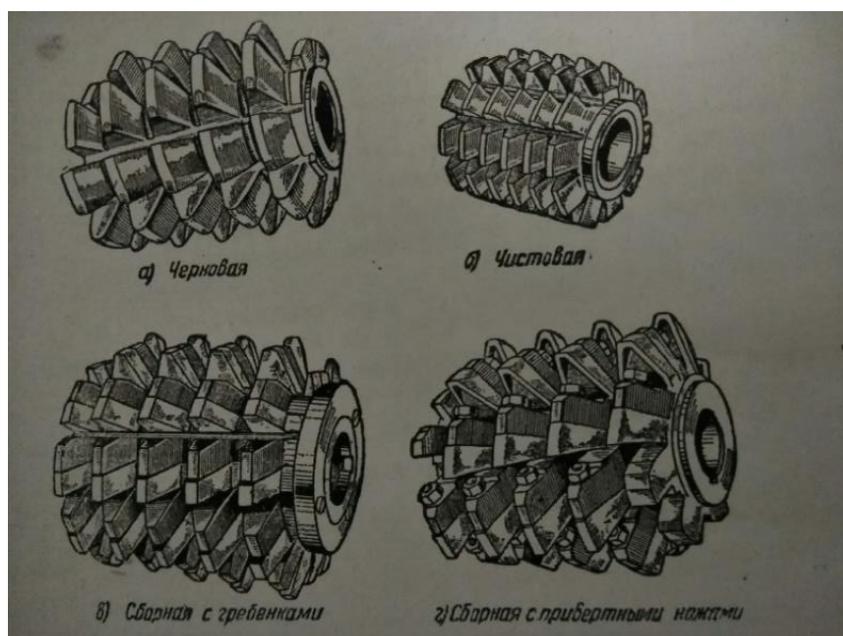


Рисунок 1 – Червячные фрезы для нарезания цилиндрических зубчатых колес

[1]

Черновая червячная фреза – фреза с нешлифованными зубьями пониженной точности. Бывают однозаходные, иногда двухзаходные (повышается производительность), однако на практике двухзаходные фрезы применяются редко, так как производительность повышается не более, чем на 20%.

Чистовая червячная фреза – однозаходная фреза с прямолинейным профилем в осевом или нормальном сечении. Размеры и технические требования стандартизованы по ГОСТ 9324-80.

Прецизионная червячная фреза отличается от чистовой жесткими допусками и диаметром, так как при его увеличении повышается точность профиля фрезы.

Сборные червячные фрезы изготавливают для цилиндрических зубчатых колес крупного модуля, в целях сокращения расхода быстрорежущей стали. Корпус таких фрез изготавливают из стали. Сборные червячные фрезы могут изготавливаться различными способами.

Основные конструктивные элементы червячной фрезы для цилиндрических зубчатых колес:

$h$  – высота зуба;  $h_1$  – высота головки зуба;  $h_2$  – высота ножки зуба;  $t_n$  и  $t_{oc}$  – шаг профиля зуба в нормальном и осевом сечениях соответственно;  $S_n$  и  $\alpha_n$  – толщина зуба и угол профиля в нормальном сечении;  $D_e$  – наружный диаметр фрезы;  $d$  – диаметр отверстия;  $D_t$  – диаметр делительной окружности фрезы;  $L$  – общая длина фрезы;  $z$  – число зубьев;  $H$  – глубина канавки;  $r_k$  – радиус закругления стружечной канавки;  $\alpha_1$  – задний угол;  $\gamma$  – передний угол;  $K$  и  $K_1$  – величина затылования [1].

## 2 Расчет червячной фрезы

Исходные данные в соответствии с рисунком 2:

Модуль  $m_{з.к.} = 2,5$  мм; угол зацепления –  $20^\circ$ ; число зубьев зубчатого колеса  $z_2 = 112$ ; степень точности 8-В; материал детали – Сталь 40Х.

ГОСТ 9324-2015: Твердость фрез должна быть не менее 63...65 HRC. Твердость фрез из быстрорежущей стали с содержанием ванадия 3% и более и кобальта 5% и более должна быть выше на 1-2 единицы HRC. Поэтому выбираем материал фрезы – быстрорежущая сталь P6M5.

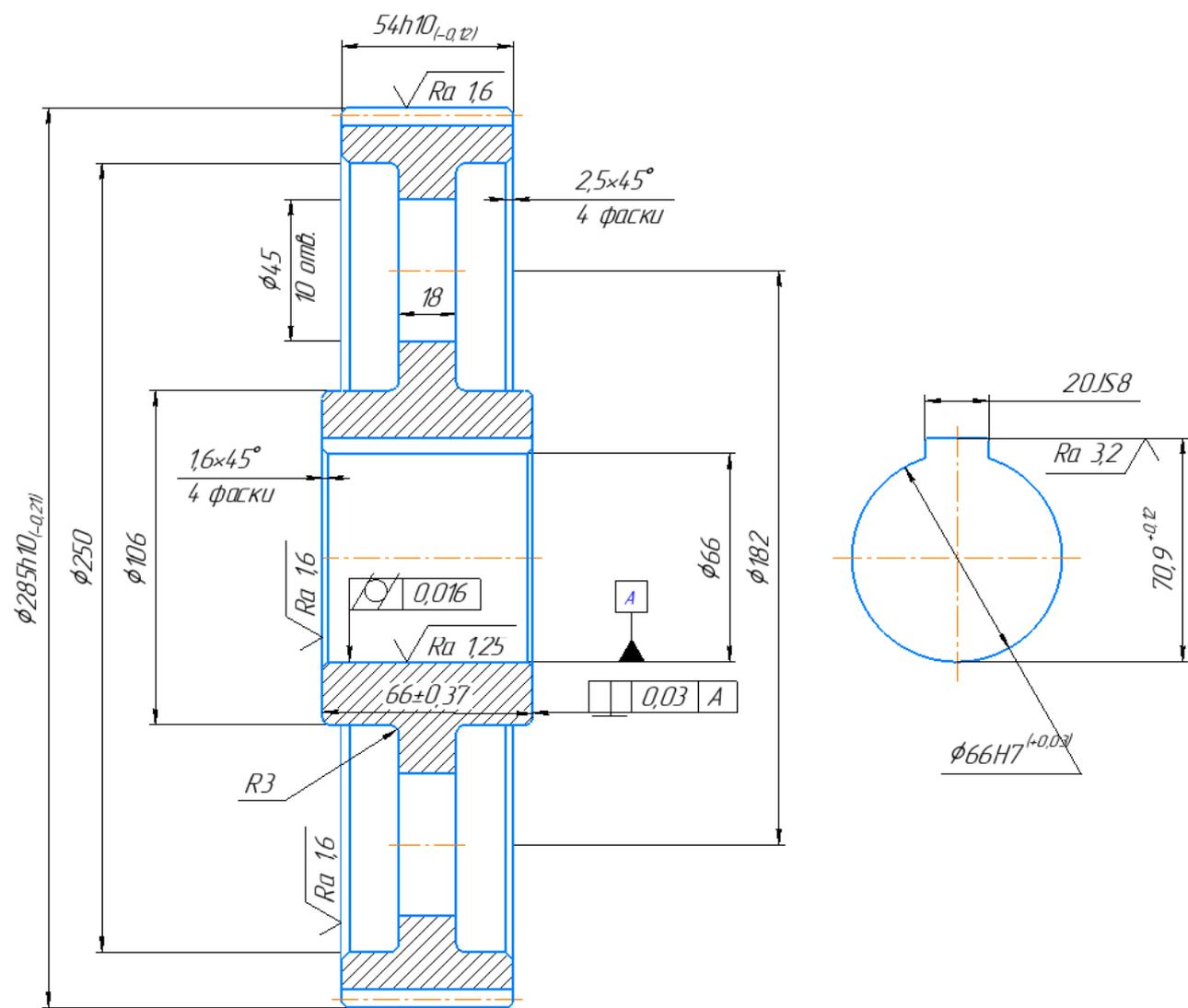


Рисунок 2 – Прямозубое цилиндрическое зубчатое колесо

### 2.1 Определение элементов профиля (размеров профиля в нормальном к виткам фрезы сечении)

1. Модуль фрезы  $m = m_{з.к.} = 2,5$  мм.

- Угол профиля  $\alpha_n$  в нормальном сечении можно принят равным углу  $\alpha$  зацепления колеса. Соответственно,  $\alpha_n = 20^\circ$ .
- Определяем шаг по нормали по формуле:

$$t_n = \pi \cdot m = 3,14 \cdot 2,5 = 7,85 \text{ мм.} \quad (1)$$

- Толщина зуба в нормальном сечении на делительной прямой:

$$S_n = \frac{\pi \cdot m}{2} = \frac{3,14 \cdot 2,5}{2} = 3,925 \text{ мм.} \quad (2)$$

- Высота головки зуба  $h_1$  фрезы равна высоте ножки зубчатого колеса и определяется по формуле:

$$h_1 = 1,25 \cdot m = 1,25 \cdot 2,5 = 3,125 \text{ мм.} \quad (3)$$

- Высота ножки зуба  $h_2$  фрезы:

$$h_2 = 1,25 \cdot m = 1,25 \cdot 2,5 = 3,125 \text{ мм.} \quad (4)$$

- Полная высота зуба:

$$h = h_1 + h_2 = 2,5 \cdot m = 2,5 \cdot 2,5 = 6,25 \text{ мм.} \quad (5)$$

- Радиус закругления головки зуба равен:

$$r_1 = (0,25 \dots 0,3) \cdot m = 0,3 \cdot m = 0,3 \cdot 2,5 = 0,75 \text{ мм.} \quad (6)$$

- Радиус закругления ножки зуба:

$$r_2 = (0,25 \dots 0,3) \cdot m = 0,3 \cdot m = 0,3 \cdot 2,5 = 0,75 \text{ мм.} \quad (7)$$

- Угол наклона винтовой линии канавок принимаем ориентировочно  $\approx 3^\circ$ .

## **2.2 Определение конструктивных размеров фрезы (элементов режущей части)**

11. Наружный диаметр фрезы рекомендовано принимать по ГОСТ 9324-2015 при отсутствии специальных требований. Для модуля 2,5 и колеса 3-го класса точности диаметр рекомендуется брать не менее 40 мм [1, стр. 466, табл. 64].

Наружный диаметр фрезы  $D_e = 71$ ;  $z = 12$ .

12. Передний угол  $\gamma$  выбираем равным 0.

13. Задний угол фрезы по боковым сторонам профиля  $\neq$  задний угол фрезы по вершине.

Задний угол  $\alpha_\chi$  по боковой стороне профиля в нормальном сечении режущей кромке определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_\chi = \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \sin \varphi, \quad (8)$$

где  $\varphi$  применительно к червячной фрезе есть ничто иное, как угол зацепления  $\alpha$ . Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_\chi = \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Минимальный задний угол  $\alpha_\chi = 4^\circ$ , получим задний угол  $\alpha_1 = 11 \dots 12^\circ$ .

14. Величина затылования  $K$ :

$$K = \frac{\pi \cdot D}{z} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{3,14 \cdot 71}{12} \cdot \operatorname{tg} 11^\circ \approx 3,6 = 3 \text{ мм.} \quad (10)$$

15. Для обеспечения выхода шлифовального круга делают двойное затылование. Величина второго затылования  $K_1$ :

$$K_1 = (1,2 \dots 1,7) \cdot K = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ мм.} \quad (11)$$

16. Определяем размеры канавки для выхода стружки:

17. Угол стружечной канавки  $\nu = 22 \dots 25^\circ = 25^\circ$ .

18. Глубина канавки  $H$  для фрезы со шлифованным профилем определяется по формуле:

$$H = h + \frac{K + K_1}{2} + 1,5 = 6,25 + 1,5 + \frac{3 + 4,5}{2} = 11,5 \text{ мм.} \quad (12)$$

19. Определим радиус закругления стружечной канавки  $r_k$  по формуле:

$$r_k = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot H)}{10 \cdot z} = \frac{3,14 \cdot (71 - 2 \cdot 11,5)}{10 \cdot 12} = 1,5 \text{ мм.} \quad (13)$$

20. Доля шлифовальной части зуба  $k_{ш} = (0,5 \dots 0,8) = 0,5$ .

21. Диаметр фрезы по буртикам  $d_1$  определяем по формуле:

$$d_1 \leq D - 2 \cdot H \leq 71 - 23 \leq 48. \quad (14)$$

Принимаем  $d_1 = 40$  мм.

22. Средний расчетный диаметр  $D_t$  (диаметр делительной окружности):

$$D_t = D - 2,5 \cdot m - 0,25 \cdot K = 71 - 6,25 - 0,75 = 64 \text{ мм.} \quad (15)$$

23. Определяем угол подъема витков фрезы на начальной окружности по формуле:

$$\sin \omega = \frac{m \cdot a}{D_t} = \frac{2,5 \cdot 1}{63,85} = 0,0392 \quad (16)$$

где  $a = 1$  – число заходов фрезы.

$$\angle \omega = 2,25^\circ = 2^\circ 20'$$

24. Шаг витков по оси:

$$t_{oc} = \frac{tn}{\cos \omega} = \frac{7,85}{0,999} = 7,86 \text{ мм.} \quad (17)$$

25. Ход витков по оси фрезы:

$$t_x = t_{oc} \cdot a = 7,86 \text{ мм.} \quad (18)$$

26. Стружечные канавки выполняют винтовыми, их направление противоположно направлению витков фрезы.

27. Угол установки фрезы на станке для нарезания прямозубого колеса равняется углу подъема витков фрезы.

$$\Psi = \omega = 2,25^\circ. \quad (19)$$

28. Расчетная минимальная длина фрезы для  $20^\circ$  зацепления:

$$L_{1min} \geq h \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0 + t + t \geq 13 \cdot m \geq 13 \cdot 2,5 \geq 32,5 \text{ мм [1].} \quad (20)$$

29. Длина буртика  $l_6 = 4$  [1].

30. Общая длина фрезы:

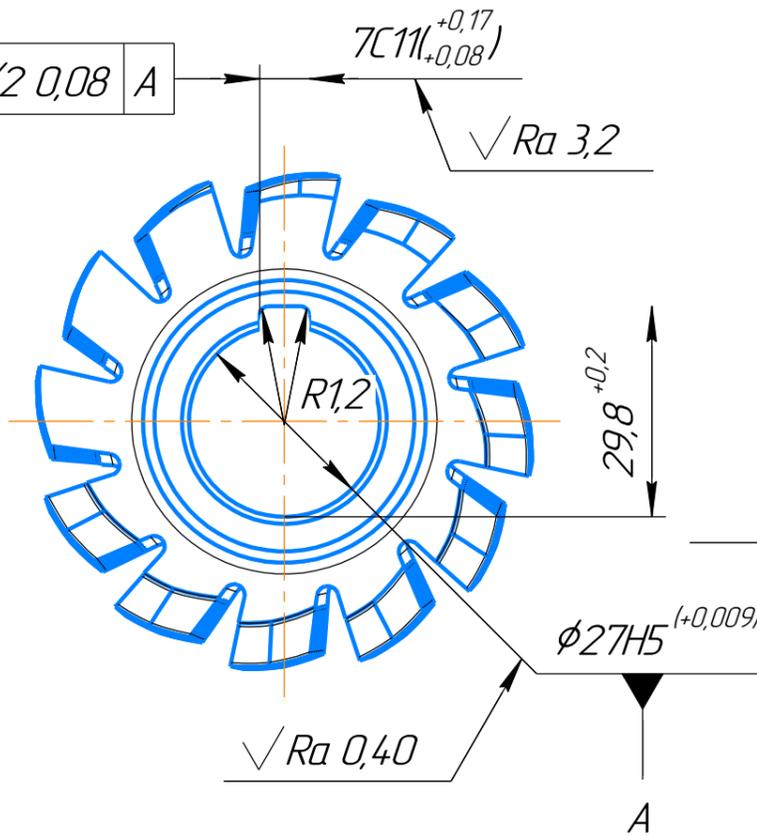
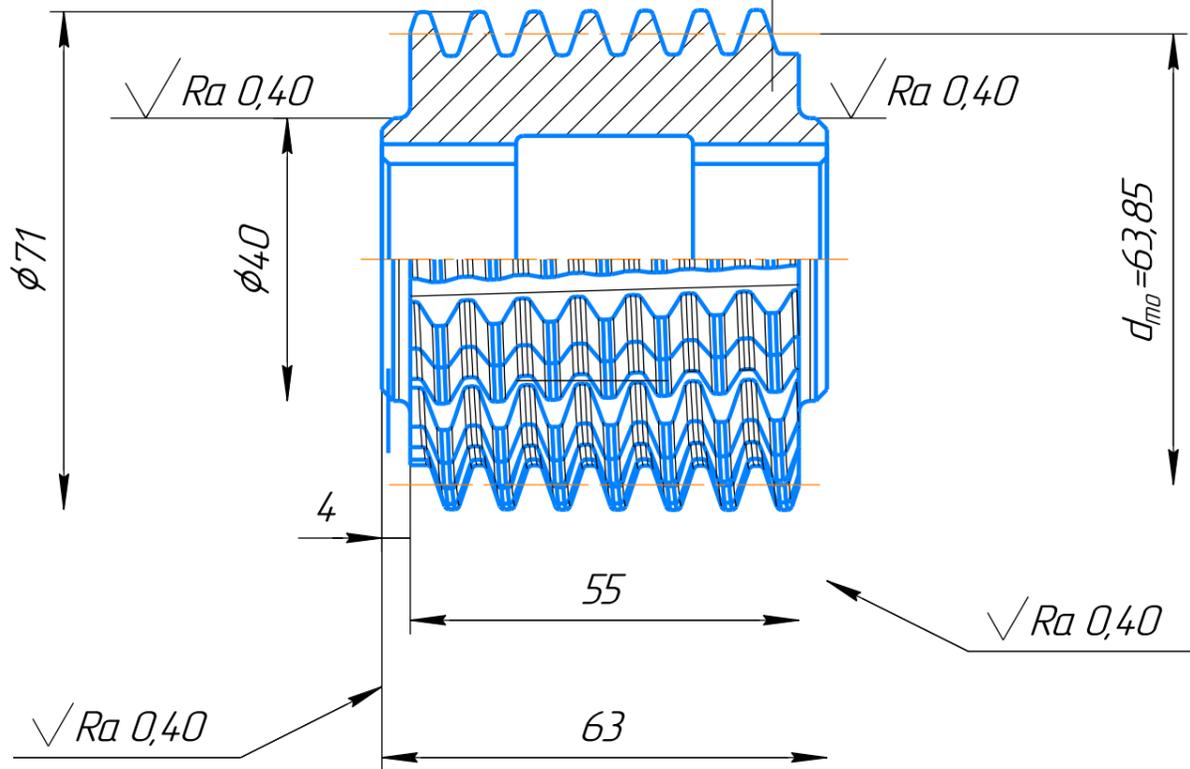
$$\begin{aligned} L &= 2 \cdot l_6 + 2 \cdot h \cdot \operatorname{ctg} 20^\circ + x \cdot \pi \cdot m = \\ &= 2 \cdot 4 + 2 \cdot 6,25 \cdot 2,747 + 2,6 \cdot 3,1416 \cdot 2,5 = 62,78 = \\ &= 63 \text{ [2].} \end{aligned} \quad (21)$$

31. Допуски на фрезу принимаем по ГОСТ 29092-91 [3].

ДР 05071200

Перв. примен.

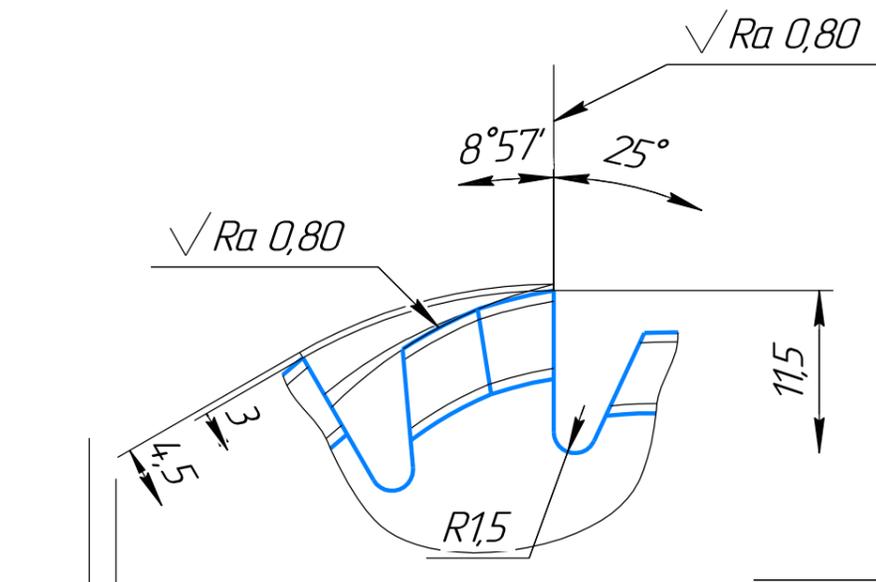
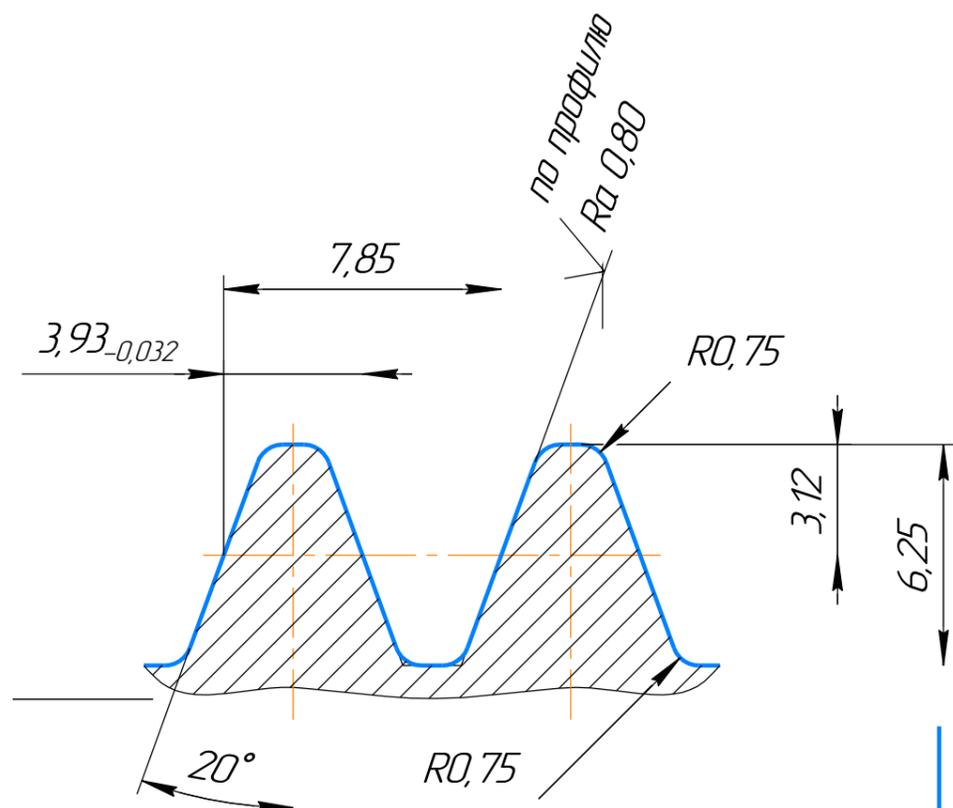
Справ. №



Фреза 2510-4152 А ГОСТ 9324-80		
Модуль	$m$	2,5
Число стружечных канавок	$z_0$	12
Число заходов	$n$	1
Направление витков фрезы	-	правое
Угол подъема витка фрезы на среднем расчетном диаметре	$\gamma_{mo}$	$2^\circ 15'$
Направление стружечных канавок	-	левое
Угол наклона линии канавки на среднем расчетном диаметре	$\lambda_{mo}$	$2^\circ 15'$
Ход винтовых стружечных канавок	$p_{zo}$	5119
Исходный контур зубчатых колес	-	ГОСТ 13755-2015
Класс точности по ГОСТ 9324-80	-	A
Радиальное биение дуртиков	$f_y$	0,005
Торцевое биение дуртиков	$f_t$	0,004
Радиальное биение по вершинам зубьев	$f_{rda}$	0,025
Профиль передней поверхности	$f_\gamma$	0,025
Разность соседних окружных шагов стружечных канавок	$f_{uo}$	0,025

### Зуб фрезы (2:1)

### Профиль зуба в нормальном сечении (5:1)



ДР 05071200				Лист	Масса	Масштаб
Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата			1:1
Разраб.	Издасарова А. Д.		26.04			
Пров.	Орлова Е. П.					
Т.контр.				Лист	Листов	1
Н.контр.				Сталь Р6М5 ГОСТ 19265-73		
Утв.				SU		

Подп. и дата

Интв. № дубл.

Взам. интв. №

Подп. и дата

Интв. № подл.

### 3 Расчет режима резания (фрезерование прямозубого цилиндрического зубчатого колеса)

Фрезерование производится на широкоуниверсальном консольно-фрезерном станке 6Р81Ш повышенного класса точности. Материал заготовки Сталь 40Х. Чистовая обработка ( $R_a = 1,6$ ).

Паспортные данные станка 6Р81Ш: Рабочая поверхность стола (длина<sup>х</sup> ширина) = 1000 × 250 мм. Мощность электродвигателя станка 5,5 кВт; КПД  $\eta = 0,84$ . Частоты вращения шпинделя 32,5...1600, в том числе 1250 ( $\text{мин}^{-1}$ ) [4].

1. Глубина фрезерования  $t = 2,5$  мм для чистого фрезерования; ширина  $B = 4,5$  мм.

2. Подача на один оборот фрезы  $s = 0,6...1,5 = 1,2$  мм/об [5, стр. 285, табл. 36];

Подача на один зуб:

$$s_z = \frac{s}{z} = \frac{1,2}{12} = 0,1 \text{ мм.} \quad (22)$$

3. Скорость резания – окружная скорость фрезы, м/мин:

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K_v, \quad (23)$$

где  $z$  – число зубьев фрезы

$C_v$  - коэффициент;

$q, x, y, u, p, m$  - показатели степени;

$T$  - период стойкости;

$D$  – диаметр фрезы.

$C_v = 35,4$ ;  $q = 0,45$ ;  $x = 0,3$ ;  $y = 0,4$ ;  $u = 0,1$ ;  $p = 0,1$ ;  $m = 0,33$  [5, стр. 286 табл. 39];

$T = 180$  мин (для  $D = 75$ ) [5, стр. 290 табл. 40].;

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{Пv} \cdot K_{Иv}, \quad (24)$$

где  $K_{Mv}$  – коэффициент качества стали 40Х;

$K_{Пv}$  – коэффициент состояние поверхности заготовки (сортовой прокат);

$K_{Иv}$  – коэффициент, учитывающий материал инструмента.

$$K_{Mv} = K_r \cdot \left(\frac{750}{\sigma_R}\right)^n = 0,85 \cdot \left(\frac{750}{610}\right)^{1,45} = 0,85 \cdot (1,23)^{1,45} = 1,15; \quad (25)$$

$K_{Пv} = 0,9$ ;  $K_{Иv} = 0,8$ . [5, стр. 261-263, табл. 1-5].

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{Пv} \cdot K_{Иv} = 1,15 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 0,83.$$

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K_v = \frac{35,4 \cdot 71^{0,45} \cdot 0,83}{180^{0,33} \cdot 2,5^{0,3} \cdot 0,1^{0,4} \cdot 4,5^{0,1} \cdot 12^{0,1}} =$$

$$= \frac{35,4 \cdot 0,83 \cdot 6,809}{5,55 \cdot 1,316 \cdot 0,4 \cdot 1,16 \cdot 1,28} = \frac{200,06}{4,34} = 46,1 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$$

4. Частота вращения шпинделя:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 46,1}{3,14 \cdot 71} = 206,78 = 200 \text{ (мин}^{-1}\text{)} \text{ по паспорту станка.} \quad (26)$$

5. Фактическая скорость резания:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 71 \cdot 200}{1000} = 44,6 \frac{\text{м}}{\text{мин}}. \quad (27)$$

6. Минутная подача:

$$S_M = S_z \cdot z \cdot n = 0,1 \cdot 12 \cdot 200 = 240 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}. \quad (28)$$

7. Окружная сила, Н – главная составляющая силы резания:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{Mp}, \quad (29)$$

где  $n$  – частота вращения шпинделя;

$C_p$  - коэффициент;

$x, y, u, q, w$  - показатели степени.

$C_p = 68,2; x = 0,86; y = 0,72; u = 1; q = 0,86; w = 0$  [5, стр. 291, табл. 41].

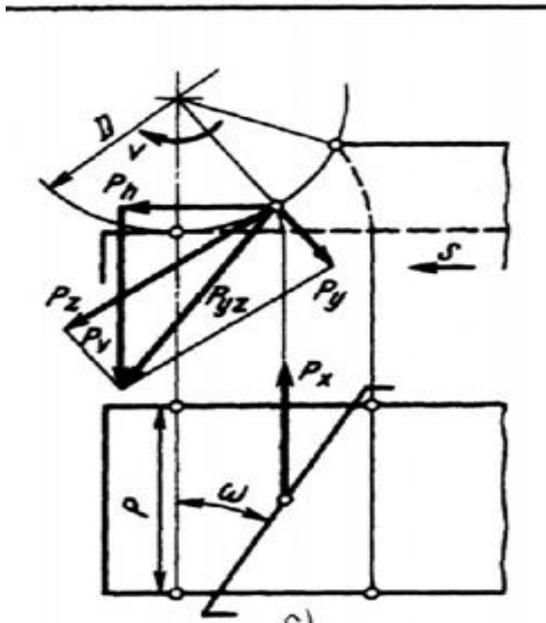
Поправочный коэффициент на качество Стали 40Х  $K_{Mp}$ :

$$K_{Mp} = \left( \frac{\sigma_B}{750} \right)^n = \left( \frac{610}{750} \right)^{0,3} = 0,813, \quad (30)$$

где  $n = \frac{0,3}{0,3}$  [5, стр. 264, табл. 9].

$$\begin{aligned}
 P_z &= \frac{10 \cdot 68,2 \cdot 2,5^{0,86} \cdot 0,1^{0,72} \cdot 4,5^1 \cdot 12}{71^{0,86} \cdot 200^0} \cdot 0,813 = & (31) \\
 &= \frac{10 \cdot 68,2 \cdot 2,2 \cdot 0,19 \cdot 4,5 \cdot 12 \cdot 0,813}{39,1 \cdot 1} = \frac{12515,4}{39,1} = \\
 &= 320,1 = 320 \text{ Н.}
 \end{aligned}$$

8. При чистовой обработке используют попутное фрезерование – «под зуб», составляющие сил резания при такой обработке показаны на рисунке 3. Величины остальных составляющих сил резания находим из соотношения с главной составляющей  $P_z$  [5, стр. 292, табл. 42].



Тогда

$$\frac{P_h}{P_z} = -(0,8 \dots 0,9);$$

$$\frac{P_v}{P_z} = 0,7 \dots 0,9;$$

$$\frac{P_y}{P_z} = 0,4 \dots 0,6;$$

$$\frac{P_x}{P_z} = (0,7 \dots 0,9) \cdot \operatorname{tg} \omega.$$

Рисунок 3 – составляющие силы резания при попутном фрезеровании [5]

Сила подачи  $P_h = -0,8 \cdot P_z = -0,8 \cdot 320 = -256 \text{ Н}$ ;

вертикальная  $P_v = 0,8 \cdot P_z = 0,8 \cdot 320 = 256 \text{ Н}$ ;

радиальная  $P_y = 0,5 \cdot P_z = 0,5 \cdot 320 = 160 \text{ Н}$ ;

осевая  $P_x = 0,7 \cdot P_z \cdot \operatorname{tg} \omega = 0,7 \cdot 320 \cdot \operatorname{tg} 2,25^\circ = 224 \cdot 0,39 = 87 \text{ Н}$ .

9. Составляющая для расчета поправки на изгиб:

$$P_{yz} = \sqrt{P_y^2 + P_z^2} = \sqrt{(256)^2 + (320)^2} = \sqrt{167936} = 409,8 \text{ Н.} \quad (32)$$

10. Крутящий момент на шпинделе:

$$M_{\text{кр}} = \frac{P_z \cdot D}{z \cdot 100} = \frac{320 \cdot 71}{12 \cdot 100} = \frac{22720}{1200} = 18,93 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (33)$$

11. Эффективная мощность:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 1020} = \frac{320 \cdot 44,6}{60 \cdot 1020} = \frac{14272}{61200} = 0,233 \text{ кВт}. \quad (34)$$

12. Мощность привода главного движения  $N_{\text{ст}} = 5,5 \cdot 0,84 = 4,62 \text{ кВт}$ .  
Обработка на станке 6Р81Ш возможна [5].

#### 4 Расчет на прочность червячной фрезы

Для расчета на прочность червячной фрезы в APM Structure 3D необходимо задать закрепления, материал и нагрузку. Коэффициент запаса прочности при фрезеровании  $K = 1,7$ .

*Закрепление.* Фрезы закрепляются на станке при помощи фрезерных оправок, конический хвостовик которых вставляется в отверстие на шпинделе. Фреза устанавливается на оправку при помощи установочных колец, которые надеты на оправку.

*Материал* фрезы быстрорежущая сталь P6M5, механические свойства которой можно найти в таблице стандартных справочных данных [6].

*Нагрузка.* На каждый зуб фрезы, который находится в процессе резания действует сила сопротивления срезаемого слоя. Эти силы можно разложить на составляющие  $P_{z1}, P_{z2}, \dots, P_{z12}$ , которые действуют по касательной к зубьям фрезы и на  $P_{y1}, P_{y2}, \dots, P_{y12}$ , которые действуют по радиусу фрезы.

$\sum (P_{z1} + P_{z2} + \dots + P_{z12}) = P_z$  – окружная сила. Она производит основную работу резания.

$\sum (P_{y1} + P_{y2} + \dots + P_{y12}) = P_y$  – радиальная сила. Это усилие обрабатываемой заготовки, с которым она отталкивает фрезу.

Равнодействующую  $R$  этих двух сил можно разложить на горизонтальную силу  $P_h$  и вертикальную силу  $P_v$ .

Сила подачи  $P_h$  - сила, прикладываемая к столу станка для осуществления подачи. При попутном фрезеровании она совпадает с направлением движения стола.

Вертикальная сила  $P_v$  – сила, прижимающая заготовку к столу. При попутном фрезеровании данная сила улучшает процесс обработки.

Осевая  $P_x$  оказывает давление на подшипники (упорные) шпинделя станка [7].

Значения этих сил были рассчитаны теоретически.

Окружная сила  $P_z = 320\text{Н}$ ; радиальная  $P_y = 160\text{Н}$ ; сила подачи  $P_h = 256\text{ Н}$ ; вертикальная  $P_v = 256\text{ Н}$ ; осевая  $P_x = 25\text{ Н}$  – суммарные значения сил для 12 зубьев.

Делаем еще один расчет на прочность, где увеличиваем заданную нагрузку в 10 раз (Нагружение №2), так как теоретически определенные значения сил слишком малы. Сравниваем 2 расчета и анализируем: как меняются перемещения и напряжения.

1) *Закрепление* задаем на внутренние грани фрезы и фиксируем перемещение по осям  $x, y, z$  (Рисунок 4.1);

2) Задаем *материал* фрезы P6M5 всей детали из базы данных или добавив его самостоятельно, задав при этом параметры материала;



Рисунок 4.1 – Закрепления фрезы

- 3) Задаем *нагрузку* - распределенную силу на грань зуба фрезы, которая участвует в срезании слоя материала с заготовки. По оси  $x$  -  $P_h = 45$  Н, по оси  $z$  -  $P_v = 45$  Н и по оси  $y$  -  $P_x = 7$  Н (Нагрузка №1) и строим КЭ сетку (Рисунок 4.2). Для расчета №2  $P_h = 450$  Н,  $P_v = 450$  Н;

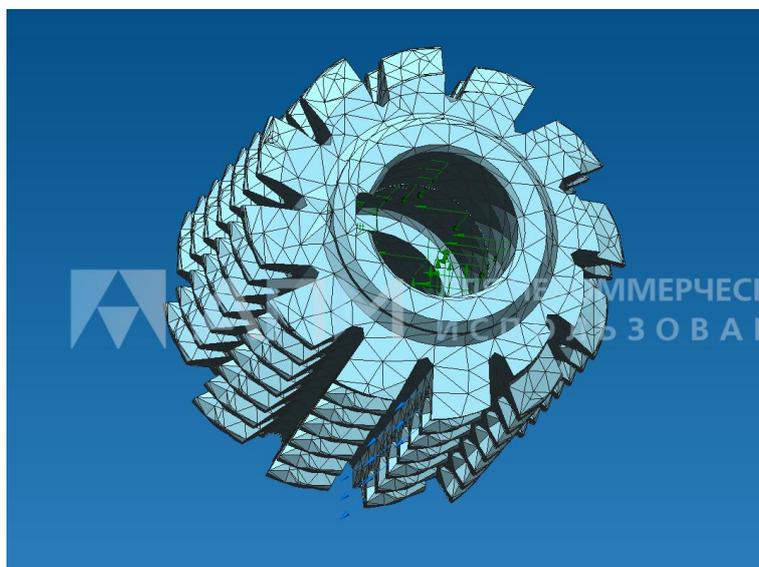


Рисунок 4.2 – Фреза, разбитая на конечные элементы, с заданной нагрузкой

4) Отправляем КЭ сетку в APM Structure 3D и делаем линейный статический расчет.

5) Открываем карту результатов, с помощью которой можем узнать: какие части зуба испытывают максимальную нагрузку и ее значение, где сосредоточены максимальные напряжения, коэффициент запаса по пределам текучести и прочности, а также перемещения.

## 5 Результаты

### Перемещения:

Максимальное перемещение – 0,34 нм (на крайнем зубе). Такие незначительные перемещения не скажутся на дальнейшей работоспособности фрезы. Мы можем увидеть: как будут деформироваться зубья фрезы под действием силы сопротивления срезаемого слоя (Рисунок 5.1).

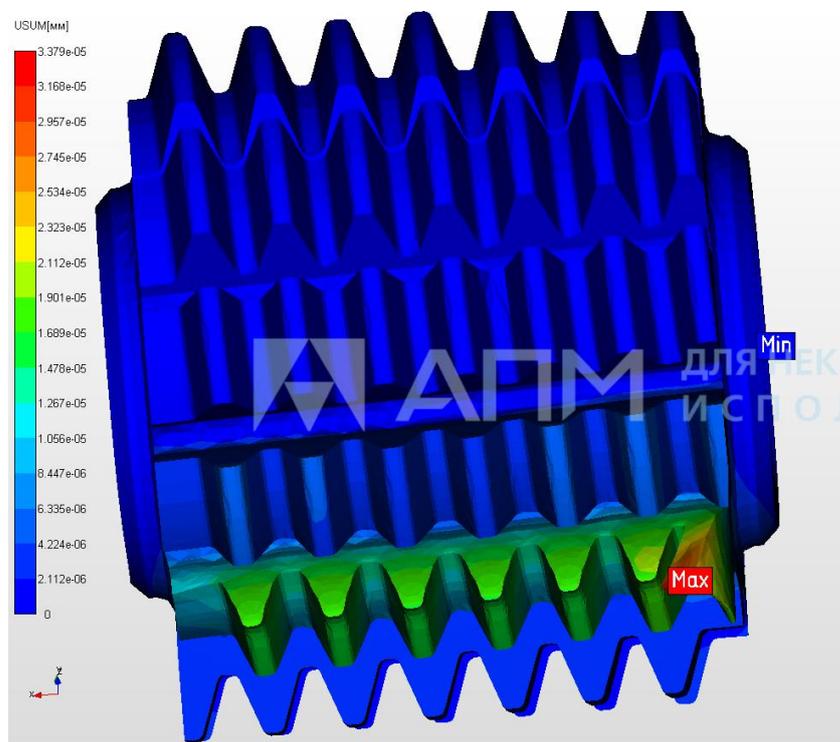


Рисунок 5.1 – Деформации зубьев фрезы под действием нагружения №1

На рисунке 5.2 мы видим, что при нагрузке, увеличенной в 10 раз, максимальные перемещения достигают значения 0,24 мкм.

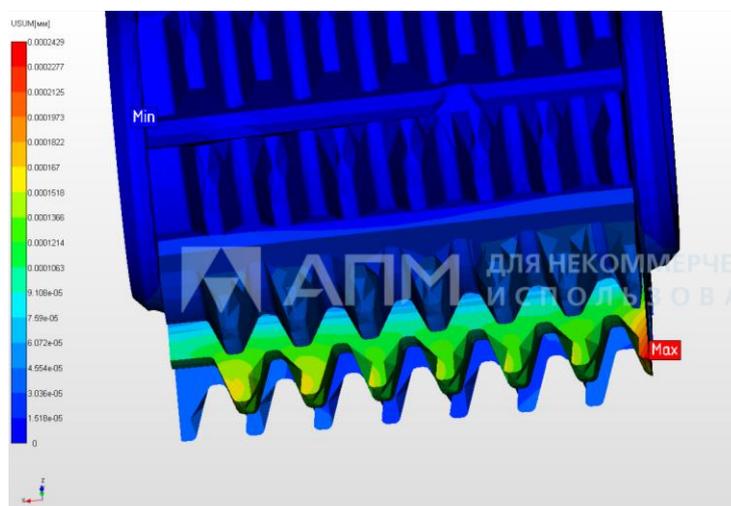


Рисунок 5.2 – Деформации зубьев фрезы под действием нагружения №2

Сравнивая 2 расчета на прочность, можно сделать вывод: при увеличении нагрузки в 10 раз, значительно растут перемещения.

*Нагрузки:*

На рисунке 5.3 а показаны зоны максимальных нагрузок и их значения при нагружении №1. Под действием нагружения №2, максимальные нагрузки достигают значения 53 Н (Рисунок 5.3 б).

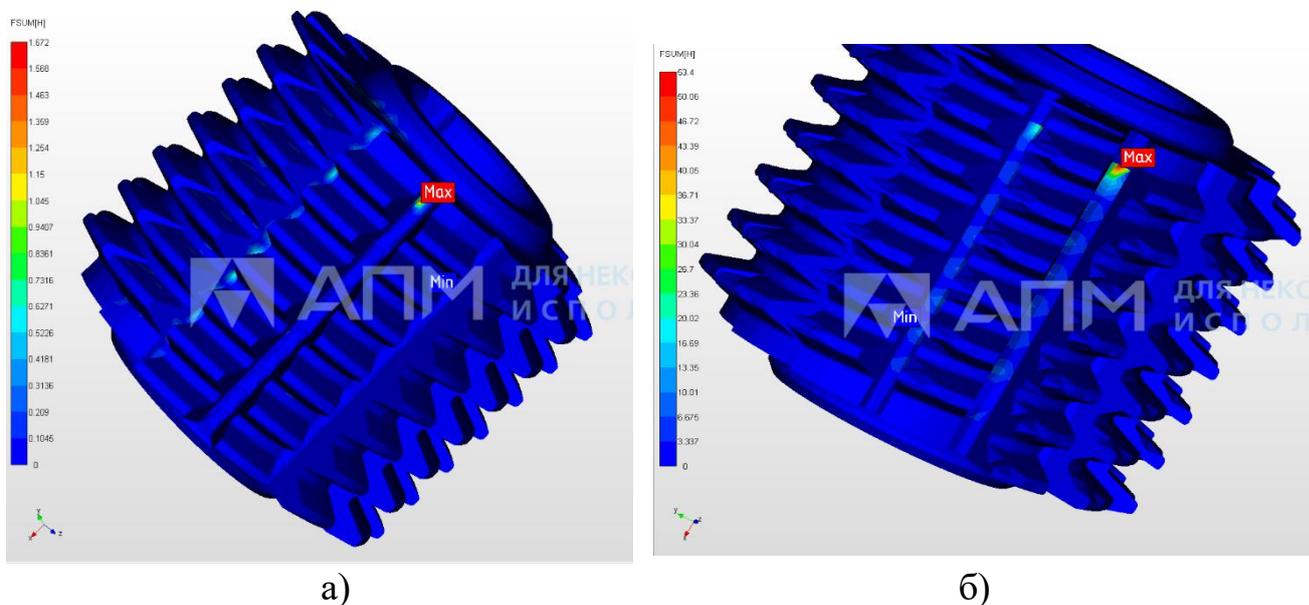


Рисунок 5.3 – Нагрузки при фрезеровании зубчатого колеса: а – максимальная нагрузка – 1,7 Н (расчет №1); б – максимальная нагрузка – 53,4 Н (расчет №2)

*Напряжения:* Максимальные напряжения в соответствии с рисунком 5.4 сосредоточены в правом углу зубьев фрезы, где их толщина наименьшая. Напряжения равномерно распределены по всей поверхности зубьев и их значения колеблются от 0 до 1 Н/мм<sup>2</sup> (МПа).

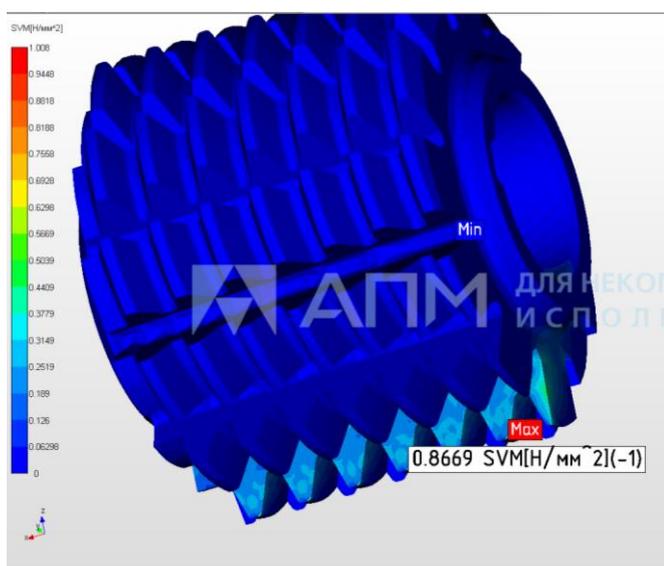


Рисунок 5.4 – Напряжения при фрезеровании под действием нагружения №1

При нагружении №2 максимальные напряжения в соответствии с рисунком 5.5 сосредоточены в той же зоне и равны 25 Н/мм<sup>2</sup> (МПа).



Рисунок 5.5 – Напряжения при фрезеровании (расчет №2)

Допускаемое напряжение:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{K}, \quad (35)$$

где  $\sigma_{\text{пред}}$  – предельное напряжение;

$K$  – коэффициент запаса прочности при фрезеровании.

Максимальное напряжение - 25 Н/мм<sup>2</sup> (Рисунок 5.5)

$$[\sigma] = \frac{490 \text{ МПа}}{1,7} = 288 \text{ МПа} \geq 25 \text{ МПа.}$$

Максимальное напряжение не превышает допускаемого, обработка возможна.

Коэффициент запаса по пределу прочности  $K = 10$  и значительно превосходит рекомендованный коэффициент запаса при фрезеровании  $K = 1,7$ .

При нарезании зубьев цилиндрического прямозубого зубчатого колеса зубья фрезы неоднократно участвуют в процессе резания. Правильно выбранный материал обеспечивает нормальную работоспособность фрезы. Результаты расчета на прочность позволяют с уверенностью сказать, что зубья фрезы не разрушатся под действием силы сопротивления срезаемого слоя. А деформации зубьев слишком малы. Коэффициент запаса по пределу прочности  $K = 10$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломного проекта мной был спроектирован режущий инструмент – червячная фреза с использованием CAD/CAE систем. После изучения теоретической и методологической базы был произведен расчет червячной фрезы, создана ее модель в САД системе – КОМПАС-3D. Предварительно назначен режим резания, выполнена поправка по паспорту станка, найдены составляющие силы резания для дальнейшего проектирования в САЕ системах. В 3 разделе принято, что установленный вид обработки возможен на станке 6Р81Ш.

После изучения действующих сил в процессе резания, проведен расчет на прочность в САЕ системе – APM Integrator, где сначала в APM Studio были заданы крепления, материал и нагрузки и построена конечно-элементная модель, а далее в APM Structure 3D произведен линейный статический расчет и получены результаты.

Анализ полученных результатов показал, что спроектированная червячная фреза способна выдержать нагрузку, возникающую в процессе резания, а коэффициент запаса по пределу прочности  $K=10$ , что превышает рекомендуемый коэффициент запаса ( $K=1,7$ ). Поскольку коэффициент запаса слишком велик, мы можем сделать выводы о возможности выбора менее прочного материала.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет и конструирование режущего инструмента, Г. А. Алексеев, В. А. Аршинов, Е. А. Смольников, «Машгиз», 1951. – 602 с.
2. И. В. Туманов. Курсовой проект на тему: «Расчет мателлорежущих инструментов» [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Донецк, 2005 – Режим доступа: <https://www.bestreferat.ru/referat-146726.html>
3. ГОСТ 29092-91. Фрезы цилиндрические. – Москва: Изд-во стандартов, 2004.
4. 6Р81Ш станок консольно-фрезерный широкоуниверсальный [Электронный ресурс]: справочник «Металлорежущие станки» Иллюстрированный каталог / ООО Рубикон – электронный справочник – Москва, 2000-2020 – Режим доступа: [http://stanki-katalog.ru/sprav\\_6r81sh.htm](http://stanki-katalog.ru/sprav_6r81sh.htm)
5. Справочник технолога-машиностроителя. В двух томах. Издание 4-е, перераб. и доп. Том 2. Под редакцией Косиловой А. Г., Мещерякова Р. П., Москва, "Машиностроение", 1986. – 495 с.
6. ГСССД 9-79. Таблицы стандартных справочных данных. Сталь инструментальная быстрорежущая. Механические свойства в состоянии поставки и в термически обработанном состоянии, А. Я. Забежинский, Б. П. Прибылов, А. М. Фаткина, М. И. Зюльков, Б. Е. Желнов.
7. Фрезерное дело. Издание 5-е, перераб. и доп., С. В. Аврутин, «Высшая школа», Москва, 1964. – 542 с.
8. Расчет и проектирование зубообрабатывающих фрез с инструментальным червяком со сменными твердосплавными пластинами, Е. В. Артамонов, В. В. Киреев, Д. В. Васильев, В. А. Василькович, Р. С. Чуйков. Под редакцией доктора технических наук профессора Утешева М. Х. Тюмень, «Тюменский индустриальный университет», 2016. – 115 с.