

ф

ЭЧЗ

ФРЕЗЫ, РАБОТАЮЩИЕ МЕТОДОМ ОБКАТКИ

(ТЕОРИЯ, ПРОФИЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ)

он 1-52



ОНТИ — НКТП

243

Handwritten mark

ФРЕЗЫ, РАБОТАЮЩИЕ МЕТОДОМ ОБКАТКИ

(ТЕОРИЯ, ПРОФИЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ)



4881

Проверено 1956г.

~~БИБЛИОТЕКА
195-338~~

~~ТЕХНИЧЕСК. БИБЛИОТЕКА
ЗАВОД № 339
1956~~



ОБЪЕДИНЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДАТЕЛЬСТВ НАРКОМТЯЖПРОМА
СССР — ОНТИ

ЛООНТИ — ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ — 1935

ГОС. ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

6793 $\frac{2}{60}$

1
4260

Введение	3
Глава первая. Методы построения профиля червячных фрез	9
1. Метод обкатки	—
2. Аналитический метод построения профиля червячных фрез	12
3. Аналитическое определение окружности, заменяющей найденную кривую	17
4. Определение неточности при замене кривой окружностью	21
5. Графические методы построения профиля фрезы	38
А. Общий метод построения сопряженного профиля	41
В. Общий метод Рело построения сопряженного профиля по заданному	43
С. Упрощенный метод Рело	45
D. Способ построения профиля при помощи вычерчивания ряда последовательных положений изделия	47
Е. Построение профиля фрезы копированием последовательных положений чертежа изделия и обратная обкатка	48
6. Механический метод построения профиля	53
Глава вторая. О начальном диаметре изделия и переходной кривой	55
7. Выбор диаметра начальной окружности	—
8. Определение наименьшего допустимого диаметра начальной окружности	57
9. Выбор диаметра начальной окружности для изделий с поднутрением	59
10. Выбор диаметра начальной окружности для других видов изделий	60
11. Размеры переходной кривой	62
Глава третья. Червячные фрезы с удлиненным зубом	68
12. Конструирование червячных фрез с удлиненным зубом	—
13. Фрезы червячные с удлиненным зубом для многошпоночных валиков	69
14. Специальные шлицевые червячные фрезы	75
Глава четвертая. Червячные фрезы определенной установки	79
15. Фрезы для храповых колес	—
16. Фрезы „улитки“	87
Глава пятая. Определение размеров червячных фрез	106
17. Выбор наружного диаметра фрезы	—
18. Определение длины фрезы	109
19. Число зубцов и канавки для выхода стружек	114
20. Определение размеров зуба червячной фрезы в нормальном сечении	119
21. Углы передней заточки и задней обточке и углы в процессе резания	122
Глава шестая. Технические данные	129
22. Точность при обработке изделий червячными фрезами	—
23. Допуски и технические условия на червячные шлицевые фрезы	131
А. Материал для фрез	—
В. Порядок контроля и допуски на элементы червячной фрезы	—
С. Производственное испытание червячных фрез	136
Глава седьмая. Примеры	137
24. Пример расчета червячной фрезы с усиками для многошпоночного валика	—
25. Пример расчета червячной фрезы для большого шлицевого диска	141
26. Пример расчета червячной фрезы для валика с остроугольными шлицами	149
27. Пример расчета червячной фрезы с удлиненным зубом	154
28. Пример расчета фрезы „улитки“	157

АННОТАЦИЯ

В первых главах книги автором изложены вопросы теории и профилирования классических типов шлицевых червячных фрез, затем систематически разобраны новейшие конструкции, еще не освещенные в литературе.

В главах пятой и шестой приведены конструктивные и технические данные, на основе которых решены примеры в последней седьмой главе.

Достаточно полное решение вопросов, связанных с конструированием сложных видов режущего инструмента, вместе с тем наличие примеров и рабочих чертежей червячных фрез обеспечивают прохождение данной темы на факультете повышения квалификации ИТР, по циклу инструментальное дело, в Центральном заочном индустриальном институте, а также делают возможным использование данной книги как пособия для студентов вузов.

Книга может также служить руководством для конструкторов и инженеров-инструментальщиков, а также для технологов, работающих в зуборезном производстве.

ВВЕДЕНИЕ.

Около двадцати лет назад передовые заграничные фирмы начали выпускать фрезы для обработки изделий простейших профилей методом обкатки.

Этот принцип работы был уже известен; приблизительно десятью годами раньше были введены в употребление червячные фрезы, применявшиеся для нарезания эвольвентных зубчатых шестерен. Однако на первых порах ограничились областью шестерен в силу простоты геометрической формы режущей кромки червячных фрез для эвольвентных зубчатых колес.

Вскоре было обнаружено, что применение более сложных червячных фрез для обработки различных видов изделий, и прежде всего изделий с прямолинейными профилями, приносит большие преимущества перед их обработкой делительным способом дисковой фасонной фрезой. Эти преимущества следующие:

1. Рабочий процесс при обработке изделий непрерывен; следовательно отсутствует обратный холостой ход, неизбежный при фрезеровании каждой канавки в отдельности.

2. Большая точность и идентичность профиля выступов изделий.

3. Особо высокая точность окружного шага или углового деления между профилями обрабатываемого изделия.

4. Не требуется точной установки фрезы на оправке относительно изделия (для обычных типов червячных фрез).

5. В работе фрезерования принимает участие одновременно несколько зубцов.

Следовательно червячную фрезу можно охарактеризовать как инструмент высокой производительности, изготовляющий точные изделия.

Небольшое распространение этих фрез в период их появления можно объяснить небольшим развитием в то время массового производства взаимозаменяемых профильных деталей, в частности многошпоночных валов; кроме того применение червячных фрез требует специальных станков.

Широкое распространение получили червячные фрезы для различных целей лишь после мировой войны 1914—1918 гг., когда развилось массовое производство деталей, в особенности многошпоночных валов, применяющихся главным образом в автотракторной промышленности. Это обстоятельство дало возможность надлежащим образом оценить преимущества применения червячных фрез.

Распространение шлицевых червячных фрез в СССР нужно отнести к 1924—1925 годам, когда у нас начала развиваться автотракторная промышленность.

Последнее десятилетие за границей, а последние годы также у нас ознаменовались целой серией изобретений и предложений в области конструирования и изготовления червячных фрез для различных целей. Так например обыкновенная или классическая шлицевая червячная фреза, имеющая ряд недостатков, многие из которых заложены в самом принципе обработки изделий методом обкатки, подверглась различного рода усовершенствованиям.

В настоящее время можно насчитать около двенадцати различных типов шлицевых червячных фрез. Из этих фрез наиболее интересными являются полуглобоидальные или фрезы с удлиненным зубом, служащие для обработки изделий с заостренными впадинами, запатентованные в США в 1930 г.

Широкое развитие получили червячные фрезы для обработки различных прямолинейных профилей. Однако и здесь начали применяться специальные червячные фрезы, профиль которых не имеет формы профиля теоретической рейки. Эти фрезы обрабатывают изделия не методом обкатки, а методом фасонного фрезерования. Наиболее характерным применением этих червячных фрез (называемых фрезами определенной установки) является обработка храповых колес, а несколько усовершенствованный тип червячных фрез применяется для обработки многоходовых червяков. Этот тип червячных фрез называется „улитка“ (запатентованы в США в 1922 году).

Наконец в последние годы широко начали применяться червячные фрезы для обработки изделий с различными криволинейными профилями. Рис. 1 *a, b, c* и т. д. иллюстрируют наиболее характерные типы изделий, обрабатываемых червячными фрезами. Рис. 2 *a, b, c, d* иллюстрируют изделия с криволинейными профилями, а также и фрезы, их обрабатывающие.

В противовес обширной заграничной практике применения различных типов червячных фрез, литературное освещение данного

вопроса как в заграничной, так и в советской технической литературе сравнительно бедно.

Первые статьи о профилировании червячных фрез уже известными тогда общими методами изложены в журнале „Machinery“ (New-York) за 1917 год.

Из последующих статей заслуживает внимание статья Walker в № 26 журнала „Machinery“ (London) за 1925 г., в которой автор излагает упрощенный метод Релó профилирования червячных

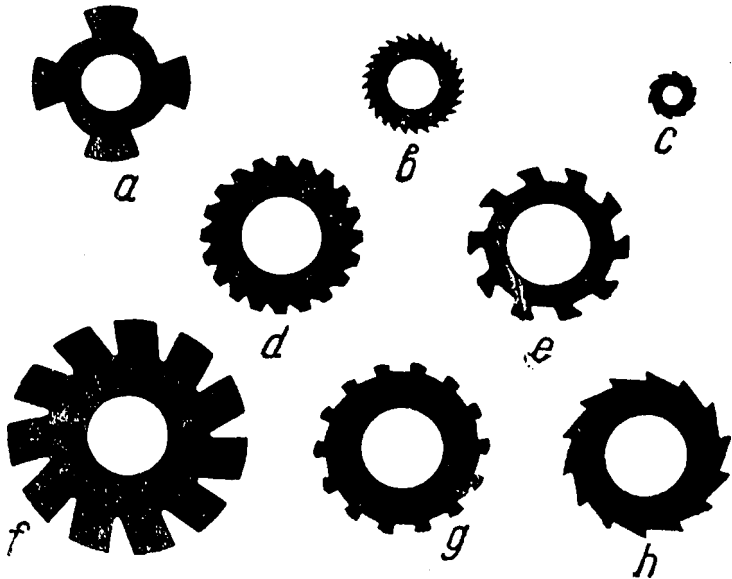


Рис. 1.

фрез для многошпоночных валиков, разбирает вопрос о выборе величины диаметра начальной окружности на поперечном сечении изделия с прямолинейным профилем и геометрическим способом находит уравнения профиля фрезы для многошпоночных валиков.

Ниже дается оценка упрощенному методу Релó построения сопряженного профиля. Попытка найти наименьшую допустимую величину диаметра начальной окружности привела к теоретически неправильному заключению вследствие того, что автор пользовался недостаточно строгим графическим методом исследования. Однако рекомендуемый автором диаметр начальной окружности, равный наружной окружности, довольно близок к наименьше допустимому. Хотя автор получил простые формулы, всё же геометрический вывод уравнения профиля фрезы громоздок и не может служить методом при решении подобных задач.

До последнего времени в заграничной и нашей литературе не вносится ничего нового.

Первые статьи, освещающие вопрос о шлицевых червячных фрезах, в советской литературе появились в 1930 году. Так в журнале „Предприятие“ за 1930 год помещены следующие статьи: „Опыт профилирования червячных фрез на заводах Форда“,

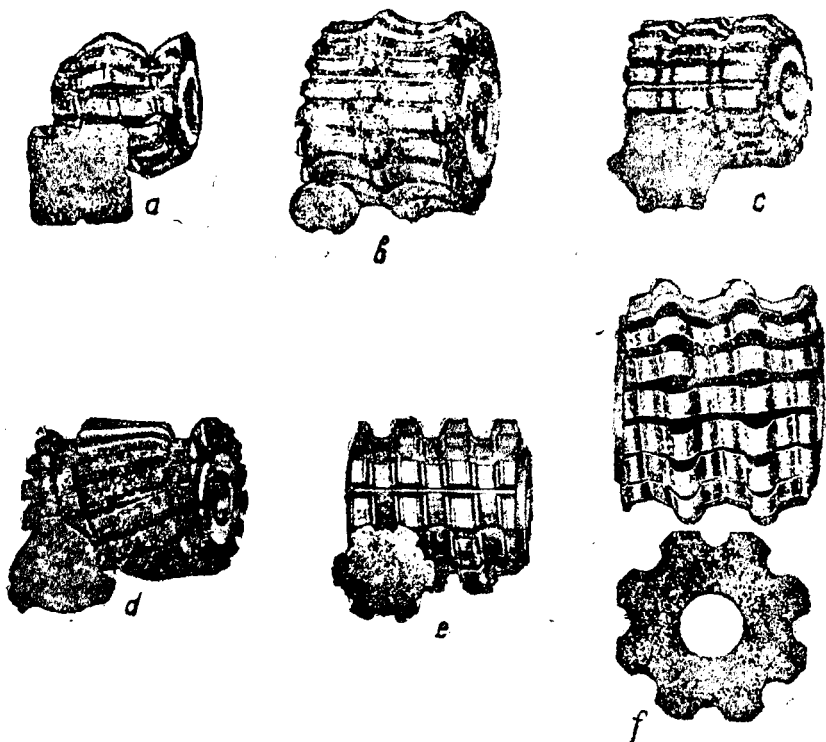


Рис. 2.

„Приспособление для механического воспроизведения профиля на червячной фрезе“ и др.

Следует отметить статью инж. Когана „Профилирование инструментов, работающих по принципу обкатки“, помещенную в № 1 журнала „Станки и инструмент“ за 1931 год, где автор находит уравнения профиля фрезы для изделия квадратного сечения и шестишпоночного валика. Принципиально эти два вида изделий друг от друга не отличаются, а между тем автором получены различные формы уравнений профиля фрезы для квадрата и шестишпоночного отверстия, что излишне, так как профиль фрезы для любого изделия с прямолинейными про-

филями определяется одним уравнением, отличающимся только величиной расстояния данной прямой профиля изделия до центра начальной окружности. Вывод уравнений несколько сложный, а сами уравнения недостаточно удобны для пользования, так как автором не установлено, какие значения параметра φ дадут нам требуемый рабочий участок профиля фрезы.

Таким образом статья не внесла ничего нового по сравнению с отмеченной выше статьей Wallker'a в журнале „Machinery“ за 1925 год.

В № 10 журнала „Станки и инструмент“ за 1933 год разбирается тип шлицевой червячной фрезы, имеющей профиль одинаковый с профилем впадины шлицевого валика. Идея этих фрез осуществлена в различной степени за границей для обработки различных типов изделий значительно раньше, в так называемых фрезах определенной установки.

Наконец в № 6 журнала НИИМАШ за 1934 год, в статье М. Д. Генкина, делается попытка систематизации существующего материала по червячным фрезам для нарезания различных профилей. Эту попытку следует считать неудачной, так как, не считая ряда неправильных заключений, автор статьи не дал объяснения противоречия между приводимой им наименьшей допустимой величиной диаметра начальной окружности из статьи Wallker'a и теми величинами начальной окружности, для определения которых он выводит эмпирические формулы.

Вообще следует отметить слабые попытки наших инженеров решать подобные вопросы теоретически, а также слабое знакомство с существующими за границей разнообразными конструкциями червячных фрез, так как в литературе эти фрезы совершенно не освещены.

Поэтому автором настоящей работы рассматриваются следующие вопросы:

а) Ставится задача систематического изложения методов построения профиля червячных фрез, в особенности для прямолинейных профилей изделий, с указанием границ их практического применения.

б) Изложение новых графических и аналитических методов.

в) Изучение важных вопросов, связанных с конструированием фрез, например: о начальной окружности, о переходных кривых, о неточности профиля и другие вопросы, которые в литературе вовсе или недостаточно освещены.

- г) Критика метода обкатки и решения вопросов, связанных с конструированием новейших типов червячных фрез.

д) Указание методов конструирования червячных фрез.

Автор настоящей работы оставляет открытым вопрос об отклонении профиля червячной фрезы в плоскости, нормальной к средней винтовой линии, от профиля теоретической рейки, отчасти из-за сложности данного вопроса, так как для более простых червячных фрез с трапециoidalным профилем теоретически-точного и практически простого способа решения этого вопроса до сих пор не найдено, несмотря на долгие и обширные исследования¹. С другой стороны теоретическое решение этого вопроса в отношении фрез для обработки прямолинейного профиля изделий не имеет столь решающего практического значения, так как существующие методы изготовления позволяют корректировать профиль фрезы добавочным пробным шлифованием, которое можно производить, покуда не получится правильный образец изделия. Правда, этот метод проверки правильности профиля фрезы, несмотря на его распространенность, признать удовлетворительным нельзя.

¹ Подобное решение изложено в книге „Buckingham—Olah“, немецкое издание 1932 г. раздел „Der Abwälzfräser für Evolventenverzahnung“, стр. 372—411.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ.

Профиль червячных фрез для обработки изделий с прямолинейным профилем, как и всякой червячной фрезы, может быть построен одним из следующих методов:

- 1) аналитическим,
- 2) графическим и
- 3) механическим.

Последовательно рассмотрим каждый метод, предварительно только рассмотрим сущность метода обкатки.

1. Метод обкатки.

Обработка изделий методом обкатки заключается в том, что режущий инструмент и заготовку приводят в относительное движение, определяемое качением без скольжения связанных с ними двух плоских кривых, называемых центроидами (рис. 3).

Ввиду этого профиль режущего инструмента и профиль, образующийся на заготовке, представляют собой взаимооггибающие кривые, которые, как известно, должны при взаимном перемещении удовлетворять следующим условиям:

1. В точках соприкосновения профили должны иметь общую касательную, а следовательно и общую нормаль.

2. Общая нормаль в точке соприкосновения профилей должна проходить через точку соприкосновения центроид, называемую полюсом зацепления (рис. 3).

Получающаяся на заготовке форма профиля, как видно из вышеизложенного, зависит от:

- а) профиля режущей кромки инструмента и
- б) формы и размеров центроид,

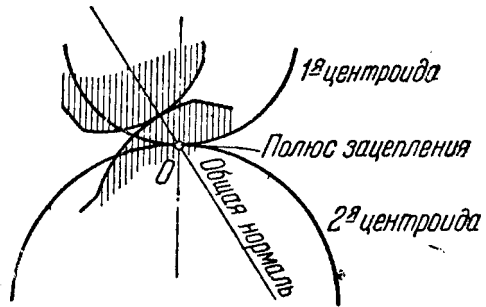


Рис. 3.

так что при заданных центроидах и одном из профилей вполне определяется форма другого профиля. Вследствие этого кривые профилей называются сопряженными кривыми.

Обработка изделий червячными фрезами представляет частный случай обработки методом обкатки. Этот случай характеризуется тем, что центроида, связанная с изделием, представляет собой окружность, называемую начальной окружностью, а центроида, связанная с фрезой, представляет прямую линию, называемую начальной прямой.

При конструировании профиля режущего инструмента, для изготовления заданного профиля методом обкатки, приходится решать задачу, обратную процессу, фактически происходящему при изготовлении изделий обкаткой. Здесь по заданному профилю изделия приходится находить профиль режущего инструмента.

Для случая обработки червячными фрезами при заданном профиле изделия требуется выбрать диаметр начальной окружности изделия и определить профиль фрезы.

Вопрос о рациональном выборе диаметра начальной окружности разбирается подробно в особой главе настоящей работы (см. § 7).

Первый вопрос, который возникает при конструировании инструмента, работающего по методу обкатки, это вопрос о том, каким условиям должен удовлетворять профиль изделий, чтобы он мог быть изготовлен методом обкатки, т. е. каким условиям должен удовлетворять заданный профиль изделия, чтобы по нему можно было построить и осуществить сопряженный профиль инструмента.

Этот вопрос может быть решен в каждом отдельном случае, так как исчерпывающих общих признаков невоз-

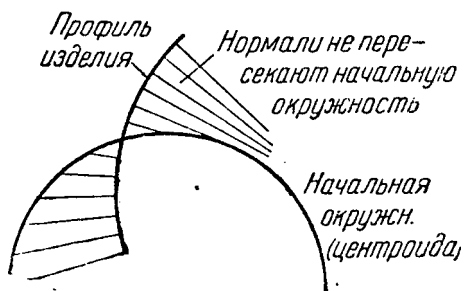


Рис. 4.

можности обработки данного профиля указать нельзя. Однако на некоторые признаки невозможности осуществления заданных профилей, часто встречающихся на практике, можно указать.

Для того чтобы сопряженный профиль существовал и его можно было построить, необходимо соблюдение следующего условия:

Нормали, проведенные к профилю изделия, должны пересекать центроиду (начальную окружность) (рис. 4).

Это правило вытекает из отмеченного выше пункта 2 необходимых условий правильного зацепления, которое накладывает ограничения также и на выбор диаметра начальной окружности.

Другим признаком возможности осуществления сопряженного профиля может служить то обстоятельство, что нормали к заданному профилю пересекают центриду (начальную окружность) в последовательном порядке (рис. 5). Таким образом во многих случаях профили изделий, состоящие из неплавных кривых, зигзагообразные, имеющие заостренные впадины с угловыми точками, и т. д. не могут изготавливаться методом обкатки.

Профиль изделия, удовлетворяющий вышеизложенным условиям, всё же в некоторых случаях не может быть осуществлен вследствие так называемого явления „подрезания“, которое состоит в том, что относительные траектории некоторых точек профиля режущего инструмента, обычно крайние точки его, пересекают профиль изделия, следовательно срезают некоторый участок уже образованной сопряженной кривой.

Таким образом для определения возможности обработки изделий обкаткой нужно в каждом отдельном случае профиль изделия исследовать аналитическим или графическим методами. Некоторые из этих методов будут указаны.

Однако в практике конструирования и изготовления червячных фрез были найдены такие решения, благодаря которым большинство встречающихся на практике профилей изделий обра-

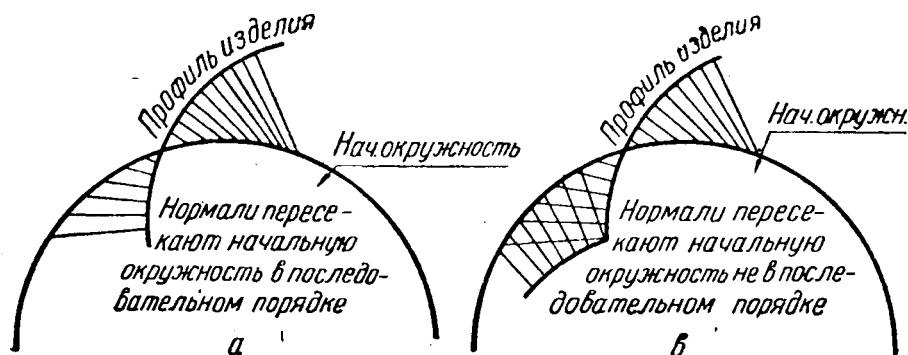


Рис. 5.

батываются полностью специальными червячными фрезами. Так например фирмы „Barber Colman“, „Walther—Hentzen“ и другие предлагают специальные червячные фрезы для обработки шлицевых валиков и других подобных изделий с заостренными углами у основания выступов, которые нельзя осуществить простой червячной фрезой.

Вопросы конструирования специальных червячных фрез требуют особого решения, а их изготовление представляет для некоторых профилей изделий большие трудности, чем в случае обычных червячных фрез.

Если по заданному профилю изделия полностью осуществить сопряженный профиль фрезы невозможно, то, при желании избегнуть построения специальной червячной фрезы, целесообразно профиль обыкновенной червячной фрезы построить таким, чтобы он обеспечил получение главных точных размеров изделия, а все остающиеся участки профиля изделия, которые не требуют точности, будут совпадать с заданным только приблизительно.

2. Аналитический метод построения профиля червячных фрез.

Аналитическим называется метод построения профиля червячной фрезы по координатам точек, найденных из уравнения кривой профиля расчетным путем.

Обычно аналитическим методом определяют положения нескольких точек профиля, а затем графическим или аналитическим путем проводят через найденные точки одну или несколько

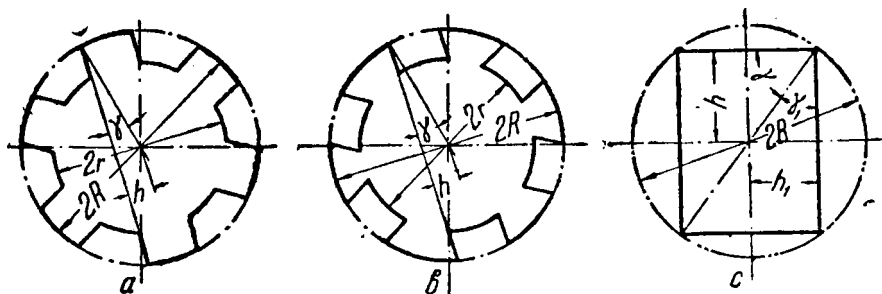


Рис. 6.

окружностей, дающих форму искомого профиля приблизительно, в большинстве случаев с достаточной для практики точностью.

Аналитический метод обладает тем преимуществом, что он позволяет определить положение точек искомого профиля с любой точностью и дает возможность численно определить неточность при замене кривой дугами окружности.

Для возможности применения аналитического метода нужно прежде всего найти формулы, дающие возможность по заданному профилю изделия находить координаты точек профиля червячной фрезы.

Найдем уравнение профиля для изделий с прямолинейным профилем.

Типовые изделия с прямолинейными профилями, обрабатываемые червячными фрезами, приведены на рис. 6. Как видно из рисунка, прямые участки профиля, связанные с выбранными начальными окружностями (для простоты берем диаметры начальных окружностей равными наибольшему диаметрам изделий), отличаются друг от друга, а следовательно характеризуются величиной угла γ или величиной h , где γ — угол между прямой

профиля изделия и диаметром, проведенным через точку пересечения прямой профиля с начальной окружностью, а h —расстояние от центра начальной окружности до прямой профиля изделия.

Если диаметр начальной окружности $D=2R$ задан, то, как видно из рис. 6,

$$\frac{h}{R} = \sin \gamma, \text{ или } h = R \sin \gamma. \quad (1)$$

Ввиду того, что профиль фрезы представляет огибающую семейства кривых профилей изделия при перекатывании начальной окружности по начальной прямой, то для нахождения уравнения профиля фрезы нам нужно найти уравнение семейства прямых, т. е. последовательных положений прямой профиля изделия при качении начальной окружности по начальной прямой, затем найти частную производную от этого уравнения по взятому параметру и приравнять ее нулю. Рассматривая два полученных уравнения совместно, получим параметрическое уравнение искомого профиля фрезы.

Найдем сначала уравнение семейства прямых. Как

видно из рис. 7, начальную окружность мы располагаем относительно осей координат так, чтобы ее центр лежал на оси Y , а ось X была касательной к ней и совпадала с начальной прямой, прямая же профиля изделия проходила через начало координат и составляла с диаметром угол γ .

Перекатим без скольжения начальную окружность по начальной прямой (по оси OX) и найдем уравнение прямой AB в зависимости от параметра φ —угла поворота начальной окружности от первоначального положения.

Свяжем с начальной окружностью подвижную систему координат $X'O_1Y'$, которая в начальном положении совпадает с системой XOY и при повороте начальной окружности также повернется на угол φ от первоначального положения. Уравнение прямой AB в системе координат $X'O_1Y'$ будет:

$$x' = y' \operatorname{tg} \gamma. \quad (2)$$

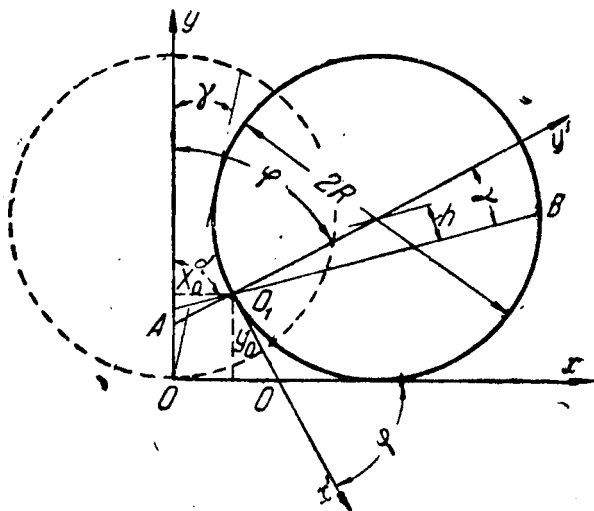


Рис. 7.

Чтобы найти уравнение прямой AB в системе координат XOY , напишем известные из аналитической геометрии формулы перехода от одной системы координат к другой, а именно:

$$\left. \begin{aligned} x' &= (x-x_0) \cos \varphi - (y-y_0) \sin \varphi \\ y' &= (x-x_0) \sin \varphi + (y-y_0) \cos \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где x_0 и y_0 — координаты подвижного начала O_1 ,
 φ — угол между осями O_1X' и OX .

Так как начало подвижной системы координат O_1 лежит на начальной окружности, то при перекатывании последней по начальной прямой точка O_1 опишет циклоиду; поэтому координаты подвижного начала нужно выразить уравнением циклоиды:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= R (\varphi - \sin \varphi) \\ y_0 &= R (1 - \cos \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Подставив выражения (3) и (4) в уравнение (2), получаем уравнение прямой AB в системе координат XOY ; преобразовывая это уравнение, получаем:

$$y = x \operatorname{ctg} (\varphi + \gamma) + R [1 - \cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{ctg} (\varphi + \gamma) - \varphi \operatorname{ctg} (\varphi + \gamma)]. \quad (5)$$

Если подставить в уравнение (5) $\alpha = \varphi + \gamma$ (α — угол между прямыми AB и OY) и упростить полученное уравнение, то будет:

$$y = x \operatorname{ctg} \alpha + R \left[1 - \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} - (\alpha - \gamma) \operatorname{ctg} \alpha \right]. \quad (6)$$

Так как α , вообще говоря, величина произвольная, то, придавая α различные значения, будем получать прямые, различно расположенные относительно осей координат; поэтому уравнение (6) будет уравнением семейства прямых в зависимости от параметра α .

Теперь найдем частную производную от уравнения (6) по параметру α :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(xy)}{\partial \alpha} &= \frac{\partial \left\{ y - x \operatorname{ctg} \alpha - R \left[1 - \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} - (\alpha - \gamma) \operatorname{ctg} \alpha \right] \right\}}{\partial \alpha} = \\ &= \frac{x}{\sin^2 \alpha} - R \left(\frac{\sin \gamma \cos \alpha}{\sin^2 \alpha} + \frac{\alpha - \gamma}{\sin^2 \alpha} - \operatorname{ctg} \alpha \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Приравнявая уравнение (7) нулю и решая относительно x , получаем:

$$x = R [(\alpha - \gamma) - \cos \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma)]. \quad (8)$$

Здесь угол $\alpha - \gamma$ дан в радианах; поэтому, при подстановке значений этих углов в градусах, следует вводить множитель 0,01745, как это сделано ниже в примере 1.

Подставляя найденное значение x в уравнение (6), получим значение

$$y = R \sin \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma). \quad (9)$$

Таким образом найденные значения (8) и (9) суть уравнения профиля фрезы, выраженные через параметр α .

Пример 1. Дан шлицевый валик следующих размеров (рис. 6):

Наружный диаметр	$2R_{\text{нар}} = 40$	мм
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 33$	"
Толщина шпонки	$b = 9,95$	"
Диаметр начальной окружности	$2R = 39$	"

Найти координаты точек профиля для различных значений параметра α .

Берем $\alpha = 24^\circ 42'$; $\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{9,95}{39} = 0,25488$; тогда $\gamma = 14^\circ 46'$.

$$x = R [(\alpha - \gamma) 0,01745 - \cos \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma)];$$

$$x = 19,5 [(24,7 - 14,767) \cdot 0,01745 - 0,90851 (0,41787 - 0,25488)];$$

$$x = 0,493 \text{ мм.}$$

$$y = R \sin \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma);$$

$$y = 19,5 \cdot 0,41787 (0,41797 - 0,25488) = 1,328 \text{ мм.}$$

Таким же способом находим координаты других точек профиля. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1.
Координаты точек профиля в зависимости от параметра α .

Параметр α	x	y
$\gamma = 14^\circ 46'$	0	0
$24^\circ 42'$	0,493	1,328
$27^\circ 29'$	0,753	1,859
$29^\circ 24'$	0,970	2,259
$30^\circ 37'$	1,124	2,527
$34^\circ 37'$	1,728	3,470
$36^\circ 12'$	2,012	3,866

Выше было отмечено, что для угла α можно брать произвольные значения. Во избежание лишних подсчетов, здесь они взяты такими, чтобы значения x и y привести в соответствие с теми, которые даны в таблице 2 (см. ниже).

Как будет видно в дальнейшем, для исследования вопроса о начальной окружности и для практического применения

формул (8) и (9) целесообразно заменить параметр α другим, к чему мы сейчас и переходим.

Найдем значение радиуса ρ той окружности на изделии, на которой находится точка M (рис. 8) соприкосновения сопряженных профилей при угле α между осью y и прямой изделия, т. е. в момент зацепления. Условимся в дальнейшем называть его радиусом зацепления. Эта точка M будет лежать на пересечении общей нормали с профилями, проведенной из точки соприкосновения начальной окружности с начальной прямой (полюса зацепления), т. е. нужно опустить перпендикуляр из точки O на прямую AB .

Как видно из треугольника CO_2M (рис. 8), ρ будет равняться:

$$\rho^2 = \overline{CO_2}^2 + \overline{CM}^2 = (R \cos \alpha)^2 + h^2;$$

Рис. 8.

тогда

$$\cos \alpha = \pm \sqrt{\frac{\rho^2 - h^2}{R^2}}, \quad (10)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{R^2 + h^2 - \rho^2}{R^2}}. \quad (11)$$

Подставив в уравнения (8) и (9) значения (10) и (11), получим:

$$x = R \left(\arccos \sqrt{\frac{\rho^2 - h^2}{R^2}} - \arcsin \frac{h}{R} \right) - \frac{\sqrt{\rho^2 - h^2} (\sqrt{R^2 + h^2 - \rho^2} - h)}{R^2}; \quad (12)$$

$$y = \frac{R^2 + h^2 - \rho^2 - h \sqrt{R^2 + h^2 - \rho^2}}{R}. \quad (13)$$

Таким образом, задаваясь различными значениями ρ , мы можем определить координаты точек сопряженного профиля фрезы.

Кроме того, как видно будет ниже, найденное выражение радиуса зацепления ρ чрезвычайно важно при отыскании наилучшей величины начальной окружности на изделии, а также при построении профиля фрезы.

57932
60

Пример 2. Дан шлицевый валик следующих размеров:

- Наружный диаметр $2R_{нар} = 40$ мм
- Диаметр впадин $2r_{вн} = 33$ мм
- Толщина шпонки $b = 9,95$ мм
- Диаметр начальной окружности $2R = 39$ мм
- Глубина канавки $t = R - r_{вн} = 19,5 - 16,5 = 3$ мм.

Найти координаты точек профиля для различных значений параметра ρ по формулам (12) и (13).

По заданным ρ подсчитанные координаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Координаты точек профиля в зависимости от параметра ρ .

Значения параметра ρ	x	y
18,4	0,493	1,328
18,0	0,753	1,859
17,7	0,970	2,259
17,5	1,124	2,527
16,8	1,728	3,470
16,5	2,012	3,866

3. Аналитическое определение окружности, заменяющей найденную кривую.

Несмотря на тенденции некоторых заводов, производящих червячные фрезы, воспроизводить профиль фрезы (или круга для шлифовки профиля) методом обкатки механически, на специальном приспособлении, точность которого еще трудно оценить, большинство заводов профиль фрезы обрабатывают еще фасонным инструментом, изготовленным по шаблону; кроме того профиль фрезы также проверяется шаблоном.

Профили шаблонов можно строить двумя способами: на чертеже задавать ряд размеров толщины зуба или для измерения шаблона зубомером, или для изготовления его на специальном станке.

В этом случае на шаблоне воспроизводится точный профиль кривой фрезы, и толщина зуба в различных местах профиля находится при помощи уравнений (8) и (9).

Шаблоны при таком способе изготовления дороже, чем шаблоны с профилем по окружности, заменяющей кривую профиля фрезы.

На наших заводах изготавливают шаблоны с профилем по окружности. Хотя при замене кривой окружностью получаются погреш-



ности, но они укладываются в существующие допуски на профили изделий; кроме того указанные шаблоны изготавливаются значительно проще. Неточность замены кривой дугами окружности, как видно будет ниже, может быть численно определена.

Теперь найдем аналитическим путем значение радиуса и координат центра той окружности, которой можно заменить профиль фрезы. Обычно начинают с аналитического нахождения точек теоретического профиля фрезы. Затем заменяют данную кривую окружностью и уже эту задачу решают графически, тем самым снижая значение метода аналитического.

Порядок расчета следующий. Находим координаты трех точек профиля фрезы по уравнениям (8) и (9), причем находим координаты двух крайних точек профиля и координаты третьей промежуточной точки. Чтобы определить координаты двух крайних точек, можно воспользоваться формулами (12) и (13), где координаты точек профиля фрезы выражены через ρ . Как мы раньше установили, радиус зацепления ρ есть радиус окружности, проведенной из центра изделия через точку, сопряженную с некоторой точкой профиля фрезы M , координаты которой x и y . Поэтому, чтобы найти координаты крайних и промежуточной точек профиля фрезы, нам нужно задать два крайних и одно промежуточное значение ρ на профиле изделия.

Координаты двух крайних точек профиля фрезы будут соответствовать двум крайним точкам профиля изделия в том случае, если мы в уравнениях (12) и (13) подставим значения $\rho_0 = R$ и $\rho_2 = r_{\text{вн}}$,

где R —радиус начальной окружности,

$r_{\text{вн}}$ —радиус окружности впадин изделия.

Положение промежуточной точки, через которую проводим заменяющую окружность, может быть выбрано, вообще говоря, произвольно на профиле фрезы. Величины координат центра и радиуса заменяющей окружности будут изменяться в зависимости от положения промежуточной точки, через которую проводим окружность, заменяющую профиль фрезы. Таким образом, изменяя положение промежуточной точки, мы можем провести бесчисленное множество окружностей, заменяющих кривую профиля фрезы.

Задача следовательно заключается в нахождении окружности наиболее близкой к профилю фрезы, т. е. чтобы отклонения окружности от теоретического профиля были наименьшими.

Аналитическое нахождение наиболее выгодной окружности слишком затрудняется тем, что уравнения профиля фрезы являются функциями трансцендентными и поэтому уравнения наивыгоднейшей окружности получаются слишком громоздкими и неудобными для практического пользования. Поэтому приходится пользоваться чисто практическими методами (пробными подсчетами) для определения наивыгоднейшей окружности.

Для нахождения наивыгоднейшей окружности следует произвести несколько пробных подсчетов радиуса заменяющей окружности для различных положений промежуточной точки и подсчитать неточность от замены. Наименьшая неточность определит наивыгоднейшую окружность.

Для предварительных же подсчетов следует положение промежуточной точки выбрать на середине профиля фрезы; тогда ρ_1 следует брать равным среднему арифметическому R и $r_{\text{вн}}$, т. е.

$$\rho_1 = \frac{R + r_{\text{вн}}}{2}.$$

Подставив последовательно в уравнения (12) и (13) значения ρ_0 , ρ_1 и ρ_2 , найдем координаты двух крайних и одной промежуточной точек профиля фрезы, через которые должна пройти окружность.

Для удобства подсчета лучше пользоваться формулами (8) и (9), преобразованными в следующий вид:

$$x = R [0,017453 (\alpha - \gamma) - \cos \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma)]; \quad (14)$$

$$y = R \sin \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma). \quad (15)$$

Углы α и γ выражены в этих формулах в градусах, $\sin \alpha$ находим через $\cos \alpha$ по формуле (10).

Таким образом находим координаты трех точек (рис. 9).

Обозначим координаты:

1-й точки через x' и y' ,

2-й точки через x_1 и y_1 ,

3-й точки через x_2 и y_2 .

Теперь проведем через найденные точки окружность. Как известно из аналитической геометрии, уравнение окружности с центром, не совпадающим с началом координат, будет:

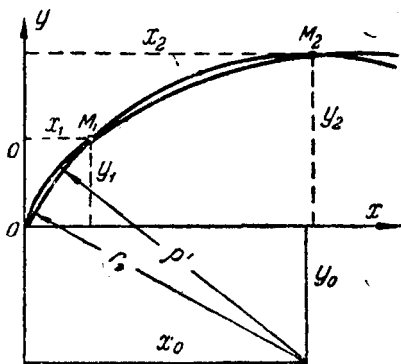


Рис. 9.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_1^2, \quad (16)$$

где x и y —текущие координаты точек окружности,
 x_0 и y_0 —координаты центра,
 r_1 —радиус окружности.

Но так как три найденные точки кривой лежат на одной окружности, то будут справедливы следующие три уравнения:

$$\left. \begin{aligned} (x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2 &= r_1^2 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 &= r_1^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 &= r_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Так как $\rho_0 = R$, то по формуле (10) $\cos \alpha = \cos \gamma$, следовательно $\alpha = \gamma$, т. е. первая точка профиля фрезы совпадает с началом координат. Тогда имеем: $x' = 0$ и $y' = 0$, и уравнения (17) переписутся:

$$\left. \begin{aligned} x_0^2 + y_0^2 &= r_1^2, \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 &= r_1^2, \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 &= r_1^2. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Решая совместно уравнения (18), имеем:

$$y_0 = \frac{x_1(x_2^2 + y_2^2) - x_2(x_1^2 + y_1^2)}{2(x_1y_2 - x_2y_1)}; \quad (19)$$

$$x_0 = \frac{y_1^2 - 2y_1y_0 + x_1^2}{2x_1}; \quad (20)$$

$$r_1 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}. \quad (21)$$

Во избежание ошибок при подсчете нужно иметь в виду, что координаты точек профиля фрезы и центра окружности здесь выражены не в абсолютных, а в алгебраических величинах. Следовательно значения координат центра окружности x_0 и y_0 также будут величинами алгебраическими.

Из уравнений (18) видно, что совершенно безразлично, какие значения будем давать x_1 и y_1 , x_2 и y_2 , т. е. можно допустить

$$x_1 \geq x_2 \text{ и } y_1 \geq y_2.$$

Пример 3. Дан шлицевый валик следующих размеров:

Наружный диаметр	$2R_{\text{нар}} = 40 \text{ мм}$
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 33 \text{ мм}$
Толщина шпонок	$b = 10_{-0,07}^{+0,03} \text{ мм}$
Диаметр начальной окружности	$2R = 39 \text{ мм}$
Глубина канавки	$t = R - r_{\text{вн}} = 19,5 - 16,5 = 3 \text{ мм}$

Найти радиус r_1 и координаты центра x_0 и y_0 окружности, заменяющей кривую профиля фрезы, по формулам (19), (20) и (21).

Для определения координат точек профиля фрезы, через которые проводим окружность, задаемся ρ_1 и ρ_2 :

$$\rho_1 = R - 0,5t = 19,5 - 1,5 = 18,0;$$

$$\rho_2 = R - 0,9t = 19,5 - 2,7 = 16,8.$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{1}{R} \sqrt{\rho_1^2 - h^2} = \frac{1}{19,5} \sqrt{18^2 - 4,97^2} = 0,88714;$$

$$\alpha_1 = 27^\circ 29' = 27,483^\circ; \quad \sin \alpha = 0,46149.$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{1}{R} \sqrt{\rho_2^2 - h^2} = \frac{1}{19,5} \sqrt{16,8^2 - 4,97^2} = 0,82297;$$

$$\alpha_2 = 34^\circ 37' = 34,617^\circ; \quad \sin \alpha_2 = 0,56808.$$

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{9,95}{39} = 0,25488;$$

$$\gamma = 14,767^\circ.$$

Определяем координаты точек профиля:

$$x_1 = R \left[\frac{(\alpha_1 - \gamma)\pi}{180} - \cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma) \right];$$

$$x_1 = 19,5 \left[\frac{(27,483 - 14,767) \cdot 3,1416}{180} - 0,8871 (0,4615 - 0,2549) \right];$$

$$x_1 = 0,753 \text{ мм.}$$

$$y_1 = R \sin \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma);$$

$$y_1 = 19,5 \cdot 0,4615 (0,4615 - 0,2549) = 1,859 \text{ мм.}$$

$$x_2 = R \left[\frac{(\alpha_2 - \gamma)\pi}{180} - \cos \alpha_2 (\sin \alpha_2 - \sin \gamma) \right];$$

$$x_2 = 19,5 \left[\frac{(34,617 - 14,767) \cdot 3,1416}{180} - 0,8230 (0,5681 - 0,2549) \right];$$

$$x_2 = 1,728 \text{ мм.}$$

$$y_2 = R \sin \alpha_2 (\sin \alpha_2 - \sin \gamma);$$

$$y_2 = 19,5 \cdot 0,5681 (0,5681 - 0,2549) = 3,470 \text{ мм.}$$

Определяем координаты центра и радиус заменяющей кривую окружности:

$$y_0 = \frac{x_1(x_2^2 + y_2^2) - x_2(x_1^2 + y_1^2)}{2(x_1y_2 - x_2y_1)} =$$

$$= \frac{0,753(1,728^2 + 3,470^2) - 1,728(0,753^2 + 1,859^2)}{2(0,753 \cdot 3,47 - 1,728 \cdot 1,859)} = -3,642 \text{ мм.}$$

$$x_0 = \frac{y_1^2 - 2y_1y_0 + x_1^2}{2x_1} = \frac{1,859^2 + 2 \cdot 1,859 \cdot 3,642 + 0,753^2}{2 \cdot 0,753};$$

$$x_0 = 11,662 \text{ мм.}$$

$$r_1 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{11,662^2 + 3,642^2} = 12,217 \text{ мм.}$$

4. Определение неточности при замене кривой окружностью.

Как видно из рис. 9, окружность и кривая профиля фрезы имеют три общие точки. Необходимо знать величину максимального отклонения окружности от данной кривой, с тем чтобы определить, насколько указанная величина укладывается в пределы допустимых отклонений профиля изделия.

Неточность профиля правильнее находить по направлению нормали к профилю фрезы, что примерно соответствует направлению радиуса окружности, заменяющей кривую профиля фрезы. Так как обрабатываемое изделие имеет прямолинейный профиль, то неточность профиля фрезы в направлении нормали к профилю повлечет такую же неточность и на изделии в направлении перпендикуляра к прямой профиля изделия.

Для того чтобы найти указанную выше неточность, найдем значение ρ' —расстояние от центра окружности, заменяющей профиль фрезы, до любой точки кривой профиля фрезы. Как видно из рис. 9,

$$\rho' = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (22)$$

где x_0 и y_0 —алгебраические значения координат центра окружности, а x и y —текущие координаты кривой профиля фрезы, определяемые по формулам (8) и (9).

Найдя значение ρ' для любой точки профиля, нетрудно определить неточность $\Delta\rho$, именно:

$$\Delta\rho = \rho' - r_1, \quad (23)$$

где r_1 —радиус окружности, заменяющей кривую профиля фрезы.

Пример 4. Для валика с размерами, приведенными в примере 3, а также по найденной для этого валика окружности, заменяющей профиль фрезы, найти отклонения данной окружности от кривой в точках, координаты которых найдены в примере 2.

Определяем сначала отклонения в 1-й точке с координатами

$$x = 0,493 \text{ и } y = 1,328.$$

Размеры, определяющие окружность, будут:

$$x_0 = 11,662; y_0 = -3,642; r_1 = 12,217;$$

тогда:

$$\rho' = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = \sqrt{(0,493 - 11,662)^2 + (1,328 + 3,642)^2};$$

$$\rho' = 12,225.$$

$$\Delta\rho = \rho' - r_1 = 12,225 - 12,217 = 0,008 \text{ мм.}$$

В таком же порядке находим отклонения для других точек профиля; результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

Отклонения $\Delta\rho$ точек профиля.

x	y	$\Delta\rho$
0,493	1,328	+ 0,008
0,753	1,859	0
0,970	2,259	- 0,005
1,124	2,527	- 0,006
1,728	3,472	0
2,012	3,866	+ 0,009

Нас главным образом интересует максимальная величина отклонения окружности от кривой профиля, следовательно нам нужно найти максимум функции (23) $(\Delta\rho)_{\max}$ или, что то же, максимум ρ' . Для определения $(\Delta\rho)_{\max}$ нам нужно найти первую производную от функции (23) и приравнять ее нулю.

Для этого найдем то значение α_M , при котором получаем $\Delta\rho_{\max}$.

Из уравнения (23) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\rho}{d\alpha} &= \frac{d\rho'}{d\alpha} = \\ &= \frac{d\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}{d\alpha} = \frac{(x-x_0)\frac{dx}{d\alpha}+(y-y_0)\frac{dy}{d\alpha}}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Подставляя в уравнение (24) значения x и y , выраженные через параметр α в уравнениях (8) и (9), и найденные из этих уравнений $\frac{dx}{d\alpha}$ и $\frac{dy}{d\alpha}$, получим следующее равенство:

$$R(\alpha_M - \gamma) - x_0 - y_0 \operatorname{ctg} \alpha_M = 0. \quad (25)$$

Решить уравнение (25) относительно α_M невозможно, но мы можем α_M определить с достаточной точностью (для угла $\alpha_M = 30^\circ$ ошибка достигает 1'), разложив $\operatorname{ctg} \alpha_M$ в ряд и отбросив все члены выше второго порядка; тогда будем иметь:

$$\operatorname{ctg} \alpha_M = \frac{1}{\alpha_M} - \frac{\alpha_M}{3}.$$

Подставляя выражение $\operatorname{ctg} \alpha_M$ в уравнение (25) и решая это уравнение относительно α_M , имеем:

$$\alpha_M = \frac{R\gamma + x_0}{2\left(R + \frac{y_0}{3}\right)} \pm \sqrt{\left[\frac{R\gamma + x_0}{2\left(R + \frac{y_0}{3}\right)}\right]^2 + \frac{y_0}{R + \frac{y_0}{3}}}. \quad (26)$$

Здесь α_M и γ выражены в дуговых единицах (в радианах).

Два значения α_M соответствуют двум максимумам $\Delta\rho$, как видно из рис. 9. Эти максимумы расположены с двух сторон кривой, так как окружность пересекает кривую в промежуточной точке.

Определив α_M , мы теперь можем определить ρ_{\max} , упростив выражение (22), а именно из уравнения (25) имеем:

$$R(\alpha_M - \gamma) = x_0 + y_0 \operatorname{ctg} \alpha_M.$$

Подставив найденное значение в уравнение профиля фрезы (8) затем в уравнение (22), и упрощая, получим:

$$\rho'_m = R(\sin \alpha_m - \sin \gamma) + \frac{y_0}{\sin \alpha_m} \quad (27)$$

$$\text{и } \Delta \rho_m = \rho'_m - r_1. \quad (28)$$

Нетрудно убедиться, что при $\Delta \rho > 0$ будет происходить утолщение выступов изделия и при $\Delta \rho_m < 0$ выступы изделия будут утоняться.

Пример 5. Для валика с размерами, приведенными в примере 3, а также по найденной для этого валика окружности, заменяющей профиль фрезы, найти максимальные отклонения данной окружности от кривой профиля фрезы.

Размеры окружности будут:

$$x_0 = 11,662; y_0 = -3,642; r = 12,217.$$

Размеры изделия будут:

$$R = 19,5; \sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{9,95}{39} = 0,25488;$$

$$\gamma = 14,767^\circ.$$

Угол γ в радианах будет:

$$\gamma = \frac{\pi}{180} \gamma^\circ = 0,017453 \cdot 14,767;$$

$$\gamma = 0,25773.$$

$$\alpha_m = \frac{R\gamma + x_0}{2\left(R + \frac{y_0}{3}\right)} \pm \sqrt{\left[\frac{R\gamma + x_0}{2\left(R + \frac{y_0}{3}\right)}\right]^2 + \frac{y_0}{R + \frac{y_0}{3}}} =$$

$$= \frac{19,5 \cdot 0,25773 + 11,662}{2 \cdot \left(19,5 - \frac{3,642}{3}\right)} \pm$$

$$\pm \sqrt{\left[\frac{19,5 \cdot 0,25773 + 11,662}{2\left(19,5 - \frac{3,642}{3}\right)}\right]^2 - \frac{3,642}{19,5 - \frac{3,642}{3}}};$$

$$\alpha_m = 0,45620 \pm 0,09500.$$

$$\alpha_{m_1} = 0,55120.$$

$$\alpha_{m_2} = 0,36120.$$

В градусах будет:

$$\alpha_{m_1} = \frac{0,55120}{0,01745} = 31^\circ 35'; \sin \alpha_{m_1} = 0,52374.$$

$$\alpha_{m_2} = \frac{0,36120}{0,01745} = 20^\circ 42'; \sin \alpha_{m_2} = 0,35348.$$

$$\rho_{M_1} = R(\sin \alpha_{M_1} - \sin \gamma) - \frac{y_0}{\sin \alpha_{M_1}} = 19,5(0,52374 - 0,25488) + \frac{3,642}{0,52374};$$

$$\rho'_{M_1} = 12,197 \text{ мм.}$$

$$\rho'_{M_2} = 19,5(0,35348 - 0,25488) + \frac{3,642}{0,52374};$$

$$\rho'_{M_2} = 12,226 \text{ мм.}$$

$$\Delta\rho_{M_1} = \rho'_{M_1} - r = 12,197 - 12,217 = -0,020 \text{ мм.}$$

$$\Delta\rho_{M_2} = \rho'_{M_2} - r_1 = 12,226 - 12,217 = +0,009 \text{ мм.}$$

Ниже приводим подсчеты профилей, произведенные для двух различных размеров многошпоночных валиков.

Были произведены подсчеты радиусов окружностей, заменяющих кривую профиля, сначала при постоянных двух крайних точках профиля, причем изменялись только координаты промежуточной точки.

В то время как радиусы могут изменяться в довольно широких пределах, величина ошибки изменяется в небольших пределах, что видно из таблиц 4 и 5. Из таблиц также видно, что наименьшие отклонения окружности от профиля, для различных профилей, получаются не только при различном положении промежуточной точки, но и при различном положении нижней крайней точки профиля; через которую проводится окружность.

Наивыгоднейшей следует считать ту окружность, у которой положительные и отрицательные отклонения от кривой равны между собой по абсолютной величине.

Если провести окружность через точку, расположенную несколько выше крайней точки профиля фрезы, то она будет иметь три максимальных отклонения. В этом случае два максимальных отклонения подсчитываются по формулам (26) и (28); а отклонения крайней точки дуги окружности от профиля — по формулам (22) и (23). Как видно из таблицы, значения $\Delta\rho_{M_2}$ всегда отрицательные, а $\Delta\rho_{M_1}$ — положительные. Это значит, что верхняя часть профиля изделия будет утолщаться, а нижняя подрезаться на величину неточности профиля.

Как видно из изложенного, аналитический метод обладает тем преимуществом, что дает возможность точно вычислить радиус окружности и величину ошибки при замене кривой профиля фрезы окружностью. Кроме того попутно определяется теоретически необходимая высота профиля фрезы H от начальной прямой. Действительно, по формулам (9) и (10) определяется ордината крайней точки профиля фрезы y_2 при $\rho = r_{вн}$ (где $r_{вн}$ — радиус внутренней окружности изделия); но так как y_2 измеряется в направлении, перпендикулярном к оси OX (начальной прямой), то $y_2 = H$, где H — теоретически необходимая высота профиля фрезы.

Таблица 4.

Значение ρ_1 в зависимости от t	Значение ρ_2 в зависимости от t	ρ_1	ρ_2	x_1	y_1	x_2	y_2	x_0	y_0	r	$\Delta\rho_{M_1}$	$\Delta\rho_{M_2}$	$\Delta\rho_3$
$\rho_1 = R - 0,67t$	$\rho_2 = R - t$	17,5	16,5	1,124	2,527	2,012	3,866	12,465	-4,031	13,162	-0,019	+0,019	-
$\rho_1 = R - 0,5t$	$\rho_2 = R - t$	18,0	16,5	0,753	1,859	2,012	3,866	11,916	-3,745	12,490	-0,024	+0,011	-
$\rho_1 = R - 0,367t$	$\rho_2 = R - t$	18,4	16,5	0,493	1,328	2,012	3,866	11,406	-3,477	11,930	-0,030	+0,005	-
$\rho_1 = R - 0,5t$	$\rho_2 = R - 0,9t$	18,0	16,8	0,753	1,859	1,728	3,470	11,662	-3,642	12,217	-0,020	+0,009	+0,009
$\rho_1 = R - 0,55t$	$\rho_2 = R - 0,85t$	17,85	16,95	0,859	2,058	1,592	3,270	11,730	-3,688	12,296	-0,017	+0,011	+0,012
$\rho_1 = R - 0,6t$	$\rho_2 = R - 0,85t$	17,70	16,95	0,970	2,259	1,592	3,270	11,921	-3,781	12,506	-0,016	+0,011	+0,010
$\rho_1 = R - 0,5t$	$\rho_2 = R - 0,9t$	17,70	16,80	0,970	2,259	1,728	3,470	12,059	-3,840	12,655	-0,017	+0,014	+0,007

Примечания: 1. Размеры валика: $R_{нар} = 20$; $R = 19,5$; $r_{вн} = 16,5$; $\frac{b}{2} = 4,97$; $t = 3$.

2. По данным таблицы следует считать наименьшей окружность, полученную при следующих значениях ρ :

$$\rho_1 = R - 0,6t = 17,7 \quad \text{и} \quad \rho_2 = R - 0,85t = 16,95,$$

т. е. в этом случае получаются примерно одинаковые отклонения по абсолютной величине.

Таблица 5.

Значение ρ_1 в зависимости от t	Значение ρ_2 в зависимости от t	ρ_1	ρ_2	x_1	y_1	x_2	y_2	x_0	y_0	r_1	Δr_{m_1}	Δr_{m_2}	$\Delta \rho_3$
$\rho_1 = R - 0,625t$	$\rho_2 = R - t$	32,0	30,5	1,128	3,469	2,271	5,720	19,375	-4,385	19,865	-0,017	+0,024	-
$\rho_1 = R - 0,5t$	$\rho_2 = R - t$	32,5	30,5	0,814	2,725	2,271	5,720	18,582	-4,067	19,022	-0,025	+0,021	-
$\rho_1 = R - 0,375t$	$\rho_2 = R - t$	33,0	30,5	0,540	1,993	2,271	5,720	17,780	-3,700	18,160	-0,044	+0,012	-
$\rho_1 = R - 0,25t$	$\rho_2 = R - t$	33,5	30,5	0,303	1,268	2,271	5,720	16,706	-3,322	17,033	-0,048	+0,009	-
$\rho_1 = R - 0,375t$	$\rho_2 = R - 0,8t$	33,0	31,3	0,540	1,993	1,622	4,512	16,695	-3,454	17,048	-0,019	+0,010	+0,046
$\rho_1 = R - 0,55t$	$\rho_2 = R - 0,9t$	32,3	30,9	0,935	3,020	1,932	5,110	18,460	-4,059	18,900	-0,018	+0,018	+0,013

Примечания: 1. Размеры валика: $R_{\text{нер}} = 35$; $R = 34,5$; $r_{\text{вн}} = 30,5$; $\frac{b}{2} = 5,46$; $t = R - r_{\text{вн}} = 4$.

2. По данным таблицы следует считать наимыгоднейшей окружностью, полученную при следующих значениях ρ :

$$\rho_1 = R - 0,55t \quad \text{и} \quad \rho_2 = R - 0,9t.$$

Но, как видно будет ниже, действительная высота профиля фрезы берется несколько меньше теоретически необходимой.

Если неточность профиля фрезы при замене его окружностью превышает установленный допуск на изделие, то обычно профиль фрезы заменяют дугами двух различных окружностей. Так как аналитическое решение указанного вопроса громоздкое, то проще очерчивать профиль фрезы двумя радиусами, тщательно подобрав радиусы графически. Однако и в этом случае возможно подсчитать неточность $\Delta\rho_m$ по вышенайденным формулам (28) для первой и второй окружностей.

Если и в случае замены двумя окружностями получаются значительные отклонения, то уменьшить их можно, несколько изменив координаты центра окружностей x_0 и y_0 , оставляя радиусы r_1 окружностей неизменными. Порядок решения подобных задач виден из примера.

Пример 6. Валик имеет размеры (в миллиметрах):

$$\begin{aligned} \text{Наружный диаметр} & \dots\dots\dots 2R_{\text{нар}} = 38 \\ \text{Диаметр впадины} & \dots\dots\dots 2r_{\text{вн}} = 32,8_{-0,3}^{0,5} \\ \text{Ширину шпонки} & \dots\dots\dots b = 5,93_{-0,07}^{0,03} \\ \text{Радиус начальной окружности} & \dots\dots R = 18,828. \end{aligned}$$

Графическим способом найден профиль фрезы и заменен двумя подобранными окружностями следующих размеров:

Для участка кривой у начальной прямой:

$$x_0 = 6,900; \quad y_0 = -1,179; \quad r_1 = 7,00.$$

Для нижнего участка:

$$x_0 = 15,19; \quad y_0 = -4,70; \quad r_1 = 16,0.$$

Найти отклонения окружности от профиля фрезы. Определяем:

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{5,88}{37,656} = 0,15615;$$

$$\gamma = 8^\circ 59' = 8,98333;$$

в радианах будет:

$$\gamma = 0,01745 \cdot 8,98333;$$

$$\gamma = 0,15679.$$

Определяем максимальные отклонения первой окружности:

$$\alpha_m = \frac{R\gamma + x_0}{2\left(R + \frac{y_0}{3}\right)} \pm \sqrt{\left[\frac{R\gamma + x_0}{2\left(R + \frac{y_0}{3}\right)}\right]^2 + \frac{y_0}{R + \frac{y_0}{3}}};$$

$$\alpha_M = \frac{18,828 \cdot 0,15679 + 6,9}{2 \left(18,828 - \frac{1,179}{3} \right)} \pm$$

$$\pm \sqrt{\left[\frac{18,828 \cdot 0,15679 + 6,9}{2 \left(18,828 - \frac{479}{3} \right)} \right]^2 - \frac{1,179}{18,828 - \frac{1,179}{3}}};$$

$$\alpha_M = 0,26721 \pm 0,08629.$$

Итак:

$$\alpha_{M_1} = 0,35350 \text{ и } \alpha_{M_2} = 0,18092$$

в градусах будет:

$$\alpha_{M_1} = \frac{0,3535}{0,01745} = 20,2544^\circ = 20^\circ 15';$$

$$\alpha_{M_2} = \frac{0,18092}{0,01745} = 10,3661^\circ = 10^\circ 22' \text{ и}$$

$$\sin \alpha_{M_2} = 0,17995.$$

Нас интересует только α_{M_2} , так как данный параметр соответствует максимуму отклонений от верхней части кривой, нижняя же часть профиля заменяется другой окружностью, для которой мы ниже также находим отклонения. Тогда

$$\rho_{M_2} = R (\sin \alpha_{M_2} - \sin \gamma) - \frac{y_0}{\sin \alpha_{M_2}};$$

$$\rho_{M_2} = 18,828 (0,17995 - 0,15615) + \frac{1,179}{0,17995} = 6,9999.$$

$$\Delta \rho_{M_2} = \rho_{M_2} - r = 6,9999 - 7,000 = -0,0001 \text{ мм.}$$

Для второй окружности максимальное отклонение не следует определять, так как это отклонение может оказаться на участке кривой, лежащем за пределами рабочего участка профиля фрезы, что нас не интересует.

Поэтому определим отклонения второй окружности от кривой в последней точке профиля фрезы и еще в какой-либо промежуточной точке.

Координаты низшей точки профиля фрезы определяются:

$$\cos \alpha = \frac{1}{R} \sqrt{r_{\text{вн}}^2 - h^2} = \frac{1}{18,828} \sqrt{16,2^2 - 2,94^2} = 0,84619;$$

тогда $\alpha = 32^\circ 12' = 32,2^\circ$ и $\sin \alpha = 0,53288$.

$$x_1 = R \left[\frac{\pi}{180} (\alpha - \gamma) - \cos \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma) \right] =$$

$$= 18,828 \left[\frac{3,1416}{180} (32,2 - 8,9833) - 0,84619 (0,53288 - 0,15615) \right];$$

$$x_1 = 1,627.$$

$$y_1 = R \sin \alpha (\sin \alpha - \sin \gamma) = 0,18,828 \quad (0,53288 - 0,15615);$$

$$y_1 = 3,780.$$

Отклонение окружности в найденной точке будет:

$$\rho_1' = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} = \sqrt{(1,627 - 15,19)^2 + (3,78 + 4,70)^2};$$

$$\rho_1' = 15,996.$$

$$\Delta \rho_1' = \rho_1' - r_1 = 15,996 - 16,000 = -0,004.$$

Находим координаты промежуточной точки, задавшись промежуточным значением параметра α ; тогда будем иметь:

$$x_2 = 1,108; \quad y_2' = 2,908.$$

Отклонение окружности в этой точке будет:

$$\rho_2' = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} = \sqrt{(1,108 - 15,19)^2 + (2,908 + 4,7)^2};$$

$$\rho_2' = 16,005.$$

$$\Delta \rho_2' = \rho_2' - r = 16,005 - 16,000 = +0,005.$$

Как видно, найденные отклонения окружностей от кривой значительно меньше допуска на ширину шпонки.

Если бы отклонения окружности от профиля были больше найденного, то следовало бы изменить координаты центра заменяющей окружности x_0 и y_0 на несколько сотых миллиметра и затем найти отклонения вторично.

Ниже приводим разработанную нами таблицу профилей червячных фрез для облегчения и упрощения нахождения профиля фрезы.

В таблице даны профили для наиболее ходовых размеров изделий, имеющих от 4 до 18 выступов с параллельными сторонами и глубину впадины, измеренную по радиусу $t = R - r_{\text{вн}}$, не превышающих $t \leq 0,12 R$, где R — радиус начальной окружности. Для более глубоких профилей при замене кривой фрезы одной окружностью получаются значительные неточности. Поэтому таблицу профилей фрез для глубоких впадин следует составлять с двумя значениями радиусов окружностей, заменяющих профиль фрезы.

Так как относительные размеры профиля изделий, как мы выяснили раньше, определяются величиной

$$\sin \gamma = \frac{h}{R},$$

где h — расстояние прямой профиля изделия до центра начальной окружности,

R — радиус начальной окружности,

то за основную величину, определяющую размеры изделия, мы взяли

$$\gamma = \text{от } 5^\circ \text{ до } 18^\circ.$$

Как видно из формул (8), (9), (21) и (28), определяющих профиль фрезы, радиус заменяющей окружности и отклонение этой окружности, R —радиус начальной окружности—может быть во всех этих формулах вынесен как общий множитель за скобки. Тогда можно подсчитать значение всех коэффициентов при R в зависимости только от γ и полученные коэффициенты помножить на R .

Данная таблица 6 и есть таблица коэффициентов при R , т. е. все величины относятся к $R = 1$.

При построении таблицы были подобраны наиболее выгодные окружности, т. е. отклонения верхней и нижней части дуги окружности, заменяющей профиль, были подобраны приблизительно одинаковыми по абсолютной величине, а именно $[\Delta \rho_{M_1}] \approx [\Delta \rho_{M_2}]$, за исключением ряда профилей для значения γ от 14° до 18° . У последних профилей было бы необходимо промежуточную точку, через которую проводим окружность, брать на слишком близком расстоянии от крайней нижней точки профиля фрезы, чтобы получить равные значения $\Delta \rho_{M_1}$ и $\Delta \rho_{M_2}$.

Для уменьшения отклонения окружности $\Delta \rho_1$ и $\Delta \rho_2$, значения координат крайней точки профиля фрезы x_2 и y_2 соответствуют $0,9t$, где t —глубина канавки профиля изделия.

Следовательно крайняя точка заменяющей дуги, соответствующая крайней нижней точке профиля изделия, будет также отклоняться на незначительную величину от теоретического профиля фрезы. Это отклонение можно подсчитать по формулам (22) и (23), определив x и y соответственно нижней точки профиля изделия.

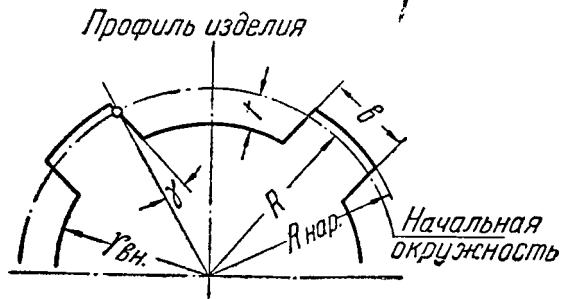
Приведенные координаты общих точек профиля фрезы и окружности могут служить для определения толщины зуба фрезы на различном расстоянии от начальной прямой, как для профилей с теоретической кривой, так и для профилей по окружности.

Градация углов γ через каждые $10'$ взята из тех соображений, что изменение радиуса начальной окружности при постоянной ширине шпоночного выступа, в пределах изменения γ через $10'$, очень незначительно, а поэтому практического значения эта величина изменения не имеет. Если всё же желательно пользоваться таблицей для данного радиуса начальной окружности, то для промежуточного значения γ величины профиля фрезы можно найти пропорциональным интерполированием.

Как видно из таблицы 6, для изделий, допускающих закругления у основания шпоночных выступов выше окружности впадин при обработке фрезами без усиков, допустимая глубина шлица, еще позволяющая пользоваться таблицей, может быть взята $t \leq 1,1y_2$, где y_2 —ордината второй точки профиля фрезы, через которую проведена окружность и которая находится по таблице и умножается на радиус начальной окружности R .

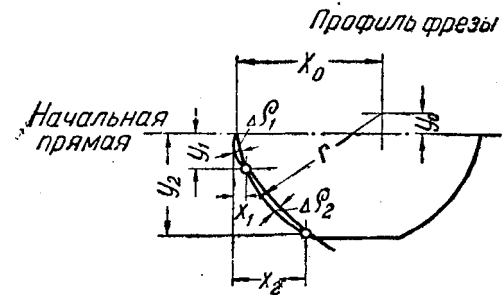
Порядок пользования и пример приведены на таблице.

Т а б
Профили червячных фрез для многошпоночных валиков



Относительные размеры изделия		Общие координаты точек профиля фрезы и заменяющей окружности			
γ	$\sin \gamma$	x_1	y_1	x_2	y_2
5°	0,08716	0,02142	0,08474	0,05987	0,17189
5°10'	0,09005	0,02153	0,08456	0,05975	0,17098
5°20'	0,09295	0,02164	0,08438	0,05964	0,17008
5°30'	0,09585	0,02174	0,08420	0,05952	0,16917
5°40'	0,09874	0,02184	0,08401	0,05940	0,16826
5°50'	0,10163	0,02195	0,08382	0,05928	0,16734
6°	0,10453	0,02211	0,08378	0,05915	0,16643
6°10'	0,10742	0,02227	0,08374	0,05914	0,16572
6°20'	0,11031	0,02243	0,08369	0,05913	0,16501
6°30'	0,11320	0,02259	0,08364	0,05911	0,16430
6°40'	0,11609	0,02274	0,08359	0,05909	0,16358
6°50'	0,11898	0,02290	0,08353	0,05907	0,16286
7°	0,12187	0,02312	0,08363	0,05904	0,16214
7°10'	0,12476	0,02334	0,08372	0,05902	0,16142
7°20'	0,12764	0,02355	0,08381	0,05899	0,16069
7°30'	0,13053	0,02371	0,08373	0,05896	0,15996
7°40'	0,13341	0,02393	0,08381	0,05893	0,15922
7°50'	0,13629	0,02414	0,08389	0,05889	0,15848
8°	0,13917	0,02436	0,08396	0,05885	0,15774
8°10'	0,14205	0,02458	0,08403	0,05882	0,15700
8°20'	0,14493	0,02486	0,08425	0,05878	0,15626
8°30'	0,14781	0,02514	0,08447	0,05873	0,15551
8°40'	0,15069	0,02542	0,08469	0,05880	0,15496

Лица 6.
и других изделий (с прямолинейными профилями).



Координаты центра и радиус заменяющей окружности			Максим. откл. окр. от теоретич. профиля		γ
x_0	y_0	r	$\Delta \rho_1$	$\Delta \rho_2$	
0,53730	0,09076	0,54491	+0,00075	-0,00065	5°
0,53665	0,09161	0,54441	—	—	5°10'
0,53631	0,09255	0,54424	—	—	5°20'
0,53576	0,09344	0,54385	—	—	5°30'
0,53521	0,09432	0,54346	—	—	5°40'
0,53465	0,09522	0,54306	—	—	5°50'
0,53442	0,09622	0,54301	—	—	6°
0,53430	0,09726	0,54308	—	—	6°10'
0,53423	0,09832	0,54320	—	—	6°20'
0,53402	0,09933	0,54318	—	—	6°30'
0,53390	0,10039	0,54326	—	—	6°40'
0,53378	0,10145	0,54334	—	—	6°50'
0,53396	0,10261	0,54373	+0,00065	-0,00060	7°
0,53415	0,10379	0,54414	—	—	7°10'
0,53413	0,10491	0,54434	—	—	7°20'
0,53410	0,10602	0,54452	—	—	7°30'
0,53421	0,10719	0,54486	—	—	7°40'
0,53422	0,10834	0,54510	—	—	7°50'
0,53429	9,10950	0,54540	—	—	8°
0,53456	0,11074	0,54591	—	—	8°10'
0,53475	0,11196	0,54635	—	—	8°20'
0,53512	0,11326	0,54697	—	—	8°30'
0,53557	0,11458	0,54769	—	—	8°40'

Относительные размеры изделия		Общие координаты точек профиля фрезы и заменяющей окружности			
γ	$\sin \gamma$	x_1	y_1	x_2	y_2
8°50'	0,15356	0,02570	0,08490	0,05886	0,15441
9°	0,15643	0,02598	0,08511	0,05892	0,15385
9°10'	0,15931	0,02627	0,08532	0,05898	0,15330
9°20'	0,16218	0,02655	0,08552	0,05903	0,15273
9°30'	0,16505	0,02683	0,08572	0,05909	0,15217
9°40'	0,16792	0,02712	0,08591	0,05914	0,15160
9°50'	0,17078	0,02740	0,08610	0,05919	0,15103
10°	0,17365	0,02776	0,08646	0,05923	0,15045
10°10'	0,17651	0,02812	0,08680	0,05928	0,14987
10°20'	0,17937	0,02848	0,08715	0,05932	0,14929
10°30'	0,18224	0,02884	0,08749	0,05936	0,14870
10°40'	0,18509	0,02920	0,08782	0,05940	0,14811
10°50'	0,18795	0,02956	0,08816	0,05943	0,14751
11°	0,19081	0,02993	0,08849	0,05946	0,14692
11°10'	0,19366	0,03029	0,08882	0,05949	0,14632
11°20'	0,19652	0,03066	0,08914	0,05952	0,14571
11°30'	0,19937	0,03103	0,08946	0,05966	0,14530
11°40'	0,20222	0,03140	0,08978	0,05979	0,14489
11°50'	0,20506	0,03177	0,09009	0,05992	0,14447
12°	0,20791	0,03214	0,09040	0,06005	0,14405
12°10'	0,21076	0,03252	0,09071	0,06018	0,14363
12°20'	0,21360	0,03289	0,09102	0,06031	0,14320
12°30'	0,21644	0,03327	0,09132	0,06043	0,14277
12°40'	0,21928	0,03365	0,09162	0,06055	0,14233
12°50'	0,22212	0,03403	0,09191	0,06067	0,14189
13°	0,22495	0,03441	0,09220	0,06078	0,14145
13°10'	0,22778	0,03479	0,09249	0,06089	0,14100
13°20'	0,23062	0,03517	0,09277	0,06101	0,14055
13°30'	0,23345	0,03564	0,09322	0,06111	0,14009
13°40'	0,23627	0,03611	0,09367	0,06122	0,13963
13°50'	0,23910	0,03658	0,09411	0,06132	0,13917
14°	0,24192	0,03706	0,09456	0,06142	0,13871
14°10'	0,24474	0,03754	0,09500	0,06152	0,13823
14°20'	0,24756	0,03802	0,09543	0,06161	0,13776
14°30'	0,25038	0,03851	0,09587	0,06182	0,13748

Координаты центра и радиус заменяющей окружности			Максим. откл. окр. от теоретич. профиля		γ
x_0	y_0	r	$\Delta\rho_1$	$\Delta\rho_2$	
0,53608	0,11593	0,54847	—	—	8°50'
0,53660	0,11729	0,54927	+ 0,00055	— 0,00050	9°
0,53704	0,11863	0,54999	—	—	9°10'
0,53754	0,12000	0,55077	—	—	9°20'
0,53806	0,12138	0,55158	—	—	9°30'
0,53848	0,12273	0,55229	—	—	9°40'
0,53906	0,12415	0,55317	—	—	9°50'
0,53973	0,12561	0,55415	—	—	10°
0,54028	0,12705	0,55502	—	—	10°10'
0,54107	0,12858	0,55608	—	—	10°20'
0,54170	0,13005	0,55709	—	—	10°30'
0,54235	0,13154	0,55807	—	—	10°40'
0,54295	0,13302	0,55901	—	—	10°50'
0,54376	0,13459	0,56017	+ 0,00055	— 0,00050	11°
0,54447	0,13613	0,56123	—	—	11°10'
0,54486	0,13756	0,56196	—	—	11°20'
0,54580	0,13919	0,56327	—	—	11°30'
0,54671	0,14083	0,56456	—	—	11°40'
0,54746	0,14241	0,56568	—	—	11°50'
0,54827	0,14402	0,56687	—	—	12°
0,54905	0,14563	0,56804	—	—	12°10'
0,54983	0,14725	0,56921	—	—	12°20'
0,55079	0,14896	0,57058	—	—	12°30'
0,55157	0,15060	0,57176	—	—	12°40'
0,55234	0,15224	0,57294	—	—	12°50'
0,55313	0,15391	0,57414	+ 0,00045	— 0,00050	13°
0,55390	0,15556	0,57533	—	—	13°10'
0,55475	0,15723	0,57660	—	—	13°20'
0,55557	0,15898	0,57787	—	—	13°30'
0,55658	0,16078	0,57934	—	—	13°40'
0,55754	0,16256	0,58076	—	—	13°50'
0,55858	0,16439	0,58227	—	—	14°
0,55944	0,16616	0,58359	—	—	14°10'
0,56039	0,16797	0,58502	—	—	14°20'
0,56146	0,16985	0,58659	—	—	14°30'

Относительные размеры изделия		Общие координаты точек профиля фрезы и заменяющей окружности			
γ	$\sin \gamma$	x_1	y_1	x_2	y_2
14°40'	0,25320	0,03899	0,00963	0,06203	0,13719
14°50'	0,25601	0,03948	0,09673	0,06223	0,13690
15°	0,25882	0,03997	0,09715	0,06244	0,13660
15°10'	0,26163	0,04047	0,09758	0,06264	0,13631
15°20'	0,26443	0,04106	0,09817	0,06284	0,13600
15°30'	0,26724	0,041650	0,09876	0,06303	0,13570
15°40'	0,27004	0,042250	0,09935	0,06322	0,13538
15°50'	0,27284	0,04294	0,10012	0,06342	0,13507
16°	0,27564	0,04365	0,10088	0,06361	0,13475
16°10'	0,27843	0,04436	0,10164	0,06379	0,13443
16°20'	0,28123	0,04508	0,10240	0,06398	0,13410
16°30'	0,28402	0,04580	0,10316	0,06416	0,13377
16°40'	0,28680	0,04653	0,10392	0,06434	0,13343
16°50'	0,28959	0,04727	0,10467	0,06451	0,13310
17°	0,29237	0,04801	0,10542	0,06469	0,13275
17°10'	0,29515	0,04876	0,10617	0,06486	0,13241
17°20'	0,29793	0,04951	0,10692	0,06503	0,13206
17°30'	0,30071	0,05027	0,10767	0,06520	0,13170
17°40'	0,30348	0,05104	0,10842	0,06536	0,13135
17°50'	0,30625	0,05181	0,10916	0,06564	0,13118
18°	0,30902	0,05259	0,10991	0,06593	0,13100

Примечания к таблице 6.

1. Данные этой таблицы соответствуют глубинам канавок изделий, не превышающим $t \leq 0,12R$, где R —радиус начальной окружности изделия.

Для черновых фрез допустима большая глубина в зависимости от требуемой точности предварительной обработки.

При обработке изделий фрезами без усиков глубины канавок изделий $t \leq 1,1y_2$ (y_2 находится по таблице).

2. Все приведенные данные в таблице относятся к радиусу начальной окружности изделия, равному единице.

3. Отклонение окружности, заменяющей кривую профиля фрезы, $\Delta \rho_1$ утолщает шлиц и обозначается знаком +; $\Delta \rho_2$ —подрезает шлиц и обозначается знаком — (минус).

4. Приближенные значения $\Delta \rho_1$ и $\Delta \rho_2$, не указанные для ряда профилей в таблице, находятся пропорциональным интерполированием.

Правила пользования таблицей.

1. Находим радиус начальной окружности изделия по формулам, приведенным ниже (см. § 8, 9 и 10).

Координаты центра и радиус заменяющей окружности			Максим. откл. окр. от теоретич. профиля		γ
x ₀		r	Δρ ₁	Δρ ₂	
0,56239	0,17166	0,58801	—	—	14°40'
0,56353	0,17358	0,58966	—	—	14°50'
0,56457	0,17552	0,59122	+ 0,00035	- 0,00055	15°
0,56570	0,17742	0,59287	—	—	15°10'
0,56705	0,17947	0,59477	—	—	15°20'
0,56824	0,18147	0,59651	—	—	15°30'
0,56961	0,18352	0,59844	—	—	15°40'
0,57064	0,18550	0,60003	—	—	15°50'
0,57204	0,18763	0,60203	—	—	16°
0,57345	0,18977	0,60403	—	—	16°10'
0,57471	0,19187	0,60589	—	—	16°20'
0,57602	0,19400	0,60781	—	—	16°30'
0,57733	0,19614	0,60974	—	—	16°40'
0,57875	0,19834	0,61179	—	—	16°50'
0,57999	0,20048	0,61366	+ 0,00030	0,00065	17°
0,58129	0,20266	0,61561	—	—	17°10'
0,58263	0,20481	0,61758	—	—	17°20'
0,58377	0,20699	0,61938	—	—	17°30'
0,58545	0,20939	0,62177	—	—	17°40'
0,58682	0,21165	0,62382	—	—	17°50'
0,58802	0,21384	0,62570	—	—	18°

2. Определяем γ; $\sin \gamma = \frac{h}{R} = \frac{b}{2R}$, где b —ширина шпоночного выступа, R —радиус начальной окружности.

3. По данной таблице отыскиваем ближайшее меньшее значение $\sin \gamma$.

4. Уточняем велич диаметра начальной окружности по принятому γ, а именно: $R = \frac{h}{\sin \gamma} = \frac{b}{2 \sin \gamma}$.

5. Определяем возможность пользования таблицей по формуле $t \leq 0,12 R$; t находится по разности $t = R - r_{\text{вн}}$, где $r_{\text{вн}}$ —радиус окружности впадин изделия.

6. Все требуемые величины профилей находим, помножая величину уточненного радиуса начальной окружности R на данные, указанные в таблице для найденного значения γ.

Пример. Дан многшпоночный валик следующих размеров:

диаметр окружности выступов $2R_{\text{нар}} = 40_{-0,04}^{-0,02}$;

диаметр окружности впадин $2r_{\text{вн}} = 35_{-0,07}^{-0,4}$;

толщина шлица $b = 10_{-0,03}^{-0,02}$.

Требуется определить размеры профиля фрезы.

1. Радиус начальной окружности будет:

$$R = \sqrt{R_{\text{нар}}^2 - 0,75h^2} = \sqrt{20^2 - 0,75 \cdot 4,97^2} = 19,53 \text{ мм.}$$

2. Определяем γ ; $\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{9,95}{39,06} = 0,25473$.

3. Ближайшее меньшее значение $\sin \gamma$ по таблице будет равно 0,25320 для $\gamma = 14^\circ 40'$.

4. Уточняем размер радиуса начальной окружности:

$$R = \frac{b}{2 \sin \gamma} = \frac{9,95}{2 \cdot 0,25320} = 19,648 \text{ мм.}$$

5. Глубина шлица будет $t = R - r_{\text{вн}} = 19,648 - 17,4 = 2,248 = 0,11R$, следовательно $t < 0,12R$, что позволяет пользоваться таблицей.

6. Определяем размеры профиля фрезы:

$$x_1 = 0,03899 \cdot 19,648 = 0,766 \text{ мм}; y_1 = 0,09630 \cdot 19,648 = 1,892 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,06203 \cdot 19,648 = 1,219 \text{ мм}; y_2 = 0,13719 \cdot 19,648 = 2,696 \text{ мм};$$

$$x_0 = 0,56239 \cdot 19,648 = 11,050 \text{ мм}; y_0 = 0,17166 \cdot 19,648 = 3,373 \text{ мм.}$$

$$r = 0,58801 \cdot 19,648 = 11,553 \text{ мм.}$$

Максимальное отклонение окружности от теоретического профиля будет:

$$\Delta p_1 = +0,00037 \cdot 19,648 = +0,007 \text{ мм.}$$

$$\Delta p_2 = -0,00054 \cdot 19,648 = -0,010 \text{ мм.}$$

5. Графические методы построения профиля фрезы.

Несмотря на значительные преимущества аналитического способа нахождения профиля фрезы перед графическим, главным образом в отношении точности, применялись до последнего времени почти исключительно графические методы. Всё же требования большой точности заставили решить эту задачу аналитически, по крайней мере для изделий с простейшими профилями. Однако, ввиду громоздкости аналитического нахождения профиля фрезы даже для простейшего случая, когда профиль изделия состоит из отрезков прямых линий, могут получаться

ошибки в подсчетах, и в этом случае графический метод может служить как вспомогательный для обнаружения грубых ошибок.

Если профиль изделия имеет большие допуски на неточность изготовления, или червячная фреза предназначается для предварительной обработки изделия, то разумеется нужно пользоваться графическим методом, как наиболее простым и быстрым способом нахождения профиля фрезы. Кроме того графический способ неизбежен при построении профиля фрезы для изделий с различными криволинейными профилями сложной конфигурации (рис. 2 а, б, с). Наконец некоторые графические методы наглядно иллюстрируют процесс образования профиля, также показывая конструктору, какие участки изделия можно обработать обкаткой и какие нельзя. Это дает возможность практически принять меры к устранению недостатков при обработке изделия обкаткой.

Из рассмотренных ниже графических методов построения профиля, предложенные нами методы А и Е (см. ниже) дали наиболее положительные результаты в смысле точности, простоты и быстроты исполнения; ранее однакоже применялись известные из литературы более сложные методы. Ради систематичности изложения ниже приведены все основные методы построения профиля фрезы.

Для построения профиля фрезы можно пользоваться одним из следующих графических методов, а именно:

А. Общий метод построения сопряженного профиля в применении к изделию с прямолинейным профилем.

В. Общий метод Рело построения сопряженного профиля по заданному.

С. Упрощенный метод Рело для построения сопряженного профиля, если заданный профиль прямолинейный.

Д. Вычерчивание последовательных положений заданного профиля с последующим нахождением обертывающей кривой.

Е. Вычерчивание последовательных положений профиля изделия методом копирования.

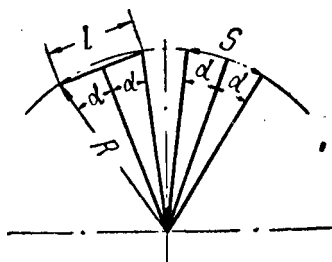


Рис. 10.

Рассмотрим последовательно каждый из указанных методов.

Прежде чем излагать способ построения сопряженных профилей, рассмотрим задачу о спрямлении дуги.

Для спрямления дуги и обратной задачи существует способ Ренкина¹. Для дуг, равных $\frac{1}{8}$ окружности, этот способ дает ошибку примерно в $0,1\%$, между тем с неточностью того же порядка можно спрямлять дуги, если брать их не свыше $\frac{1}{10} R$ и заменять их хордами. Этот прием откладывания нескольких одинаковых дуг, соответствующих одинаковым отрезкам прямых, чрезвычайно прост, как видно из рис. 10.

¹ См. собрание сочинений В. Л. Кирпичева, том I, год издания 1917, стр. 609—615.

$$\frac{S}{2} = R\alpha,$$

где S —длина дуги,
 R —радиус окружности,
 α —половина центрального угла в дуговых единицах, соответствующего половине дуги S .

С другой стороны

$$\frac{l}{2} = R \sin \alpha,$$

где l —длина хорды дуги S .

Известно, что при малых дугах $\sin \alpha = \alpha$; тогда $l = S$, т. е. длина хорды равна длине дуги.

Найдем неточность при замене дуги хордой $S = \frac{1}{10} R$. Разность длин дуги и хорды будет:

$$\Delta S = S - l = 2R (\alpha - \sin \alpha). \quad (29)$$

Так как:

$$S = \frac{1}{10} R = R2\alpha,$$

то $\alpha = \frac{1}{20} = 0,05$.

Переводя угол α в градусы, получим:

$$\alpha = \frac{180^\circ \cdot 0,05}{\pi} = \frac{9^\circ}{3,1415927} = 2^\circ,864789$$

$$\text{или } \alpha = 2^\circ 51' 53,2'';$$

тогда $\sin \alpha = 0,049979$.

Подставляя значение α и $\sin \alpha$ в формулу (29), получим величину ошибки:

$$\Delta S = 2R [\alpha - \sin \alpha] = 2R (0,05 - 0,049979) = 0,00002 R.$$

Величина же относительной ошибки:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{0,00002R}{0,1R} = 0,0002$$

или в процентах:

$$\frac{\Delta S}{S} = 0,02\%.$$

Для суммы отрезков, укладываемых в $\frac{1}{6}$ окружности, суммарная неточность не превышает $0,2\%$.

Как видно, ошибка по величине незначительна и поэтому никакого практического значения не имеет.

При откладывании одинаковых дуг, соответствующих отрезкам одинаковой длины на прямой, можно рекомендовать эти дуги брать не свыше $\frac{1}{10} R$, не прибегая к построению Ренкина.

А. Общий метод построения сопряженного профиля.

Если нужно построить сопряженный профиль, но нет необходимости вычерчивать линию зацепления, то можно применить весьма простой общий метод построения сопряженного профиля. Особенно простым является построение, если заданный профиль представляет прямую линию.

Покажем этот метод на примере, когда центроидами являются окружность и прямая линия. Построение производится следующим образом (рис. 11).

Вычерчиваем начальную окружность и начальную прямую. Параллельно начальной прямой проводим прямую профиля EF на расстоянии h от центра изделия O .

Чтобы найти для какой-нибудь точки M профиля изделия соответствующую точку на сопряженном профиле рейки, мы должны из указанной точки M опустить перпендикуляр до пересечения с начальной окружностью в точке B . Точке B на начальной окружности соответствует точка B_1 на начальной прямой. Из точки B_1 восставляем перпендикуляр к начальной прямой. Из той же точки проводим вторую прямую под углом $\alpha = \alpha_1$ к перпендикуляру и на ней откладываем отрезок $\overline{B_1M_1} = \overline{BM}$. Точка M на рейке и будет соответствовать точке M_1 на изделии.

Действительно, если начальная окружность перекатится по начальной прямой до совпадения точки B с точкой B_1 , то нормаль BM совпадет с прямой B_1M_1 , а следовательно и точка M совпадет с точкой M_1 .

Нетрудно видеть, что для $\overline{CM_2} = \overline{CM}$ должно быть $\alpha_2 = \alpha_1 = \alpha$, следовательно прямая $\overline{B_1M_1}$ параллельна $\overline{B_2O}$. Тогда построение сопряженного профиля, если профиль изделия прямолинейный, сведется к следующему (рис. 12).

На дуге начальной окружности, расположенной во впадине изделия, откладываем хорды, не превышающие $0,1R$, именно $\overline{12} = \overline{23}$ и т. д., а на начальной прямой в противоположную сторону откладываем отрезки $\overline{1'2'} = \overline{2'3'}$ и т. д., начиная от точки 1 , определяемой условием $\overline{O_11} = \overline{O_11}$. Из точек $1, 2, 3 \dots$ на начальной окружности опускаем на прямую профиля перпендикуляры $11', 22', 33'$ и т. д. и точки $1, 2, 3$ и т. д. соединяем с центром начальной окружности.

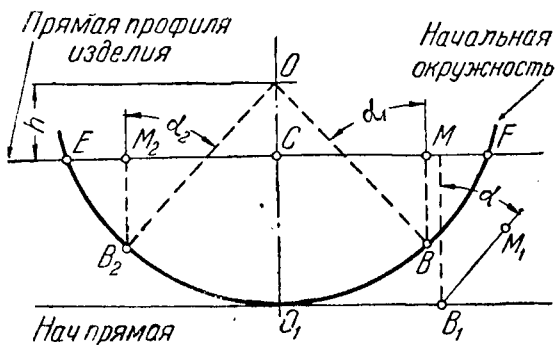


Рис. 11.

Из точек 1, 2, 3 и т. д. начальной прямой проводим прямые, параллельные лучам O_1I , O_12 и т. д., так что $11''$ параллельно O_1I и т. д., и откладываем на них отрезки:

$$\overline{11''} = \overline{11'}; \overline{22''} = \overline{22'}; \overline{33''} = \overline{33'} \text{ и т. д.}$$

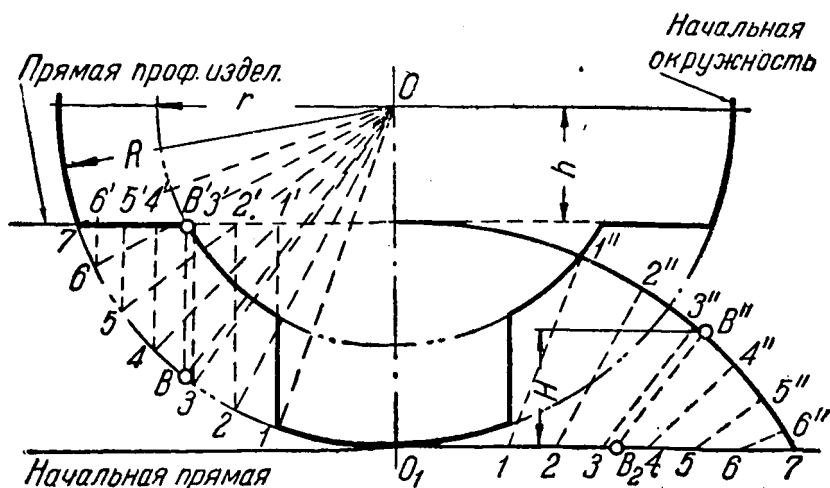


Рис. 12.

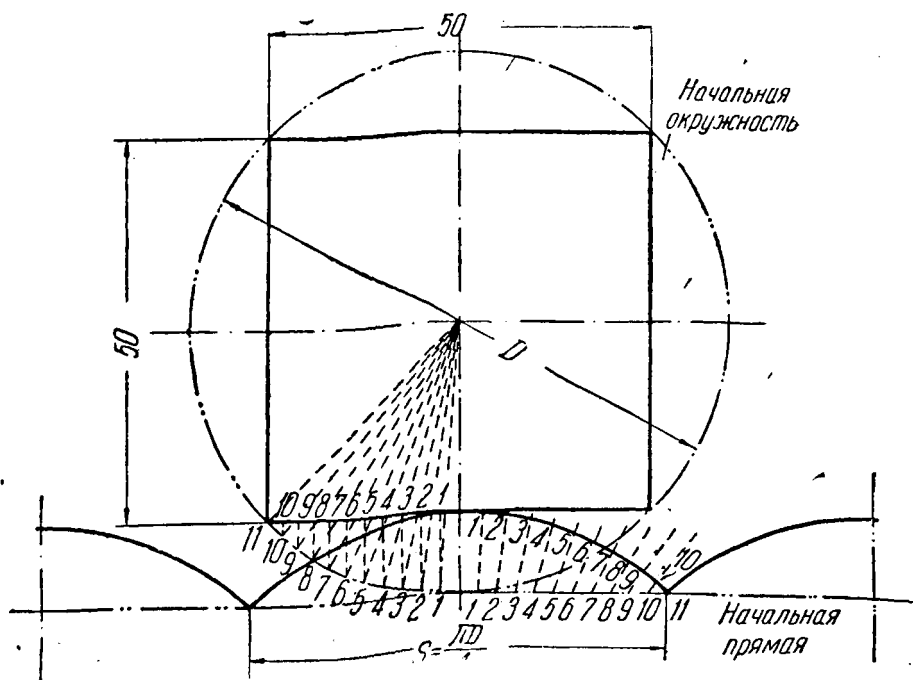


Рис. 13.

Кривая, проведенная через точки $1''$, $2''$, $3''$ и т. д., и есть сопряженный профиль прямолинейного изделия.

Нетрудно видеть, что и теоретически необходимая высота профиля фрезы H может быть найдена, если для последней рабочей точки изделия B' построить сопряженную точку B'' .

Этот метод построения пригоден для любых заданных криволинейных профилей, но тогда не нужно проводить параллельных линий, так как нет симметрии, а нужно откладывать равные углы между нормальными к профилю и нормальными к центроидам (α и α_1 на рис. 11).

Как видно, построение выполняется чрезвычайно просто, а поэтому приведенный метод можно рекомендовать при проектировании червячных фрез.

Пример 7. Для изделия квадратного поперечного сечения 50×50 мм построить профиль фрезы общим методом.

На рис. 13 изображено изделие и изложенным выше способом построен профиль фрезы.

Для простоты диаметр начальной окружности здесь взят равным диаметру описанной окружности.

В. Общий метод Рело построения сопряженного профиля по заданному.

Не будем подробно останавливаться на методе Рело построения сопряженных профилей, так как в курсах прикладной механики этот метод изложен достаточно полно.

Следует указать, что нормальными для прямолинейных профилей будут перпендикуляры, опущенные из точек начальной окружности на данную прямую профиля. Если же часть данного профиля есть окружность, то нормальными очевидно должны считаться прямые, проведенные через центр заданной окружности.

Для построения сопряженного профиля методом Рело необходимо сначала построить линию зацепления, а по ней найти профиль. Очевидно этот метод вызывает необходимость в промежуточных построениях, а поэтому накапливаются ошибки от чего и получаются недостаточно точные результаты.

Поэтому, если нужно проанализировать полученный профиль, нужно пользоваться этим методом тогда, когда заданный профиль состоит не только из прямых линий, но—скажем—из комбинации прямых линий и окружности и т. д.

На рис. 14 показано построение сопряженного профиля (или профиля фрезы) по методу Рело для изделия с профилем $abcd$, где часть ab —отрезок прямой, а bcd —дуга окружности.

Для того чтобы найти для какой-нибудь точки B профиля изделия соответствующую точку профиля фрезы, мы должны из точки B восставить перпендикуляр до пересечения с начальной окружностью в точке B_1 и через ту же точку B провести окружность из центра O , а из точки O_1 радиусом равным $\overline{BB_1}$

сделать засечку на проведенной окружности в точке B' , которая и будет точкой линии зацепления.

Для того чтобы найти соответствующую сопряженную точку на фрезе, мы откладываем на начальной прямой отрезок $\overline{O_1B_2} = \overline{O_1B_1}$, из точки B_2 проводим прямую $\overline{B_2B_2'}$, параллельную O_1B_1 , а из точки B' проводим параллельную начальной прямой до пересечения с прямой $\overline{B_2B_2'}$. Точка B_2' на профиле фрезы будет соответствовать точке B на изделии.

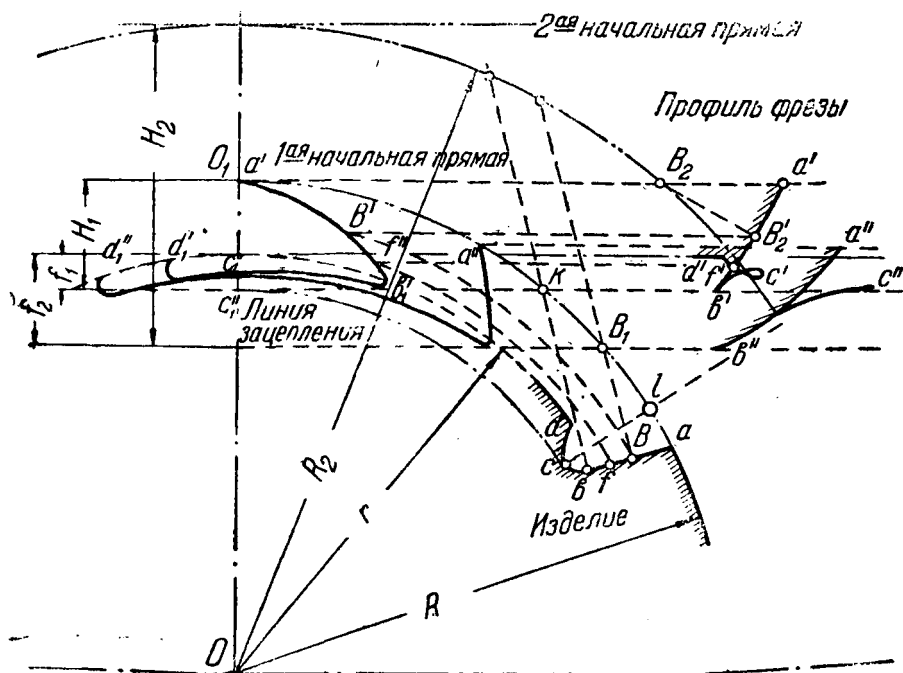


Рис. 14.

Построив для ряда точек профиля изделия соответствующие точки фрезы и соединяя их плавной кривой, получим профиль фрезы.

Точно так же мы поступаем при построении сопряженного профиля для дуги bcd , но здесь, как видно, нормальными будут прямые, проведенные через центр окружности \overline{bk} , \overline{cl} и т. д.

Построив этим методом весь профиль, мы можем легко увидеть, какие участки профиля срезаются и какие остаются рабочими. Действительно, на рис. 14 построен профиль фрезы для заданного профиля изделия $abcd$. Соответствующими точками профиля фрезы будут $a'b'c'd'$. Отрезку прямой на изделии \overline{ab} со-

ответствует часть профиля фрезы $a'b'$, дуге \overline{bc} соответствует $b'c'$ и дуге \overline{cd} соответствует $c'd'$ на фрезе.

Очевидно, узел $f'c'b'$ нельзя осуществить, т. е. такой профиль нельзя изготовить, поэтому за профиль фрезы мы берем $a'f'd'$; но точка f' на фрезе соответствует точке f на изделии, следовательно участок af на изделии мы получим прямолинейным, а из точки f начнется переходная кривая (соответствует траектории в относительном движении точки фрезы f').

Если же желательнее весь участок ab на изделии сохранить прямолинейным, то мы должны за профиль фрезы взять отрезок кривой $a'b'$; но в этом случае закругление bcd увеличится, так как расстояние самой нижней точки переходной кривой до начальной окружности будет равно H_1 —высоте профиля фрезы.

Как было установлено вначале, не по всякому заданному профилю изделия можно осуществить сопряженный профиль фрезы, а поэтому методом Рело можно построить линию зацепления и выяснить практическую осуществимость сопряженного профиля, а если оказывается, что найденный профиль практически нельзя осуществить, то можно заменить заданный профиль изделия практически допустимым профилем, который возможно осуществить методом обкатки.

Для практического нахождения сопряженного профиля по заданному прямолинейному профилю можно рекомендовать следующие методы:

С. Упрощенный метод Рело.

Для нахождения сопряженного профиля, если задан профиль в виде прямой линии, а центроидой является окружность, сопряженный же профиль имеет центроидой прямую линию, общий метод Рело построения сопряженного профиля упрощается и сводится к следующему.

Как показано на рис. 15, сначала нужно провести прямую AB и дугу Cd ; первая представляет начальную прямую сопряженного профиля, а вторая начальную окружность изделия. Из центра O проводим окружность q радиусом, равным расстоянию h от центра начальной окружности до продолжения прямой профиля изделия.

Откладываем на начальной окружности изделия ряд равных дуг [хорды которых не превышают $0,1R$] $\overline{ab} = \overline{bc} = \overline{cd}$ и т. д., а по начальной прямой AB равные им отрезки $\overline{ae} = \overline{ef} = \overline{fg}$ и т. д.; из точек a, b, c и т. д. проводим касательные к окружности q .

Из полюса зацепления a опускаем перпендикуляры al, am, an и т. д.

Из точек пересечения перпендикуляров с прямыми l, m, n и т. д. проводим прямые, параллельные начальной прямой AB .

Из точки e на начальной прямой проводим прямую, параллельную al ; из точки f проводим прямую, параллельную am ; из точки g проводим прямую, параллельную an , и т. д.

Точки пересечения L_1 , m_1 , n_1 этих прямых с соответствующими горизонталями и будут точками сопряженного профиля (профиля фрезы).

При замене кривой окружностью обычно подбором находят ее радиус. Чтобы найти центр и радиус окружности, можно рекомендовать соответствующее построение, а именно: произвольным радиусом из точки n_1 профиля фрезы проводим полуокружность и тем же радиусом проводим вторую полуокружность из точки m_1 , лежащей примерно на середине отрезка кривой. Через точки

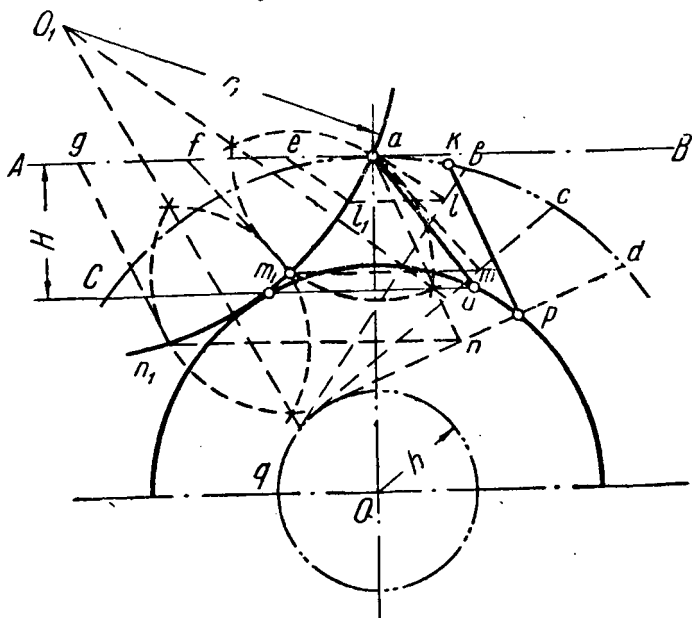


Рис. 15.

пересечения этих полуокружностей проводим прямую линию. То же построение повторяем из другой крайней точки профиля фрезы a и средней точки m_1 и проводим вторую прямую.

Точка пересечения этих прямых и дает центр искомой окружности O_1 . Таких построений делаем несколько, меняя положение m_1 , и выбираем наиболее близкую к кривой окружность.

Теоретически необходимая высота профиля фрезы H определяется следующим построением. Из точки p пересечения внутренней окружности изделия с прямой профиля восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с начальной окружностью в точке k . Радиусом, равным \overline{kp} , из полюса зацепления a производим засечку на внутренней окружности изделия в точке u . Расстояние от точки u до начальной прямой AB и будет равно высоте H рабочего участка профиля фрезы.

Упрощенный способ Рело можно рекомендовать применять в тех случаях, когда профиль изделия прямолинейный. Этот способ отнимает минимум времени, но требует точного выполнения чертежа.

Д. Способ построения профиля при помощи вычерчивания ряда последовательных положений изделия.

Этот способ дает наглядную картину относительного движения изделия и фрезы и дает очень точные результаты. Как и общий метод Рело, он пригоден для изделий с любым профилем, но обладает тем недостатком, что не указывает на точное соответствие полученного профиля профилю изделия, что, как будет видно ниже, определяется дополнительным построением.

Ввиду того, что вычерчивание большого количества последовательных положений отнимает много времени, этот способ можно рекомендовать применять в тех случаях, когда хотят наглядно проследить относительное перемещение фрезы и изделия

Построение сводится к следующему.

Профиль изделия вычерчивается в увеличенном масштабе (1:20 или 1:30), причем как бы катят начальную окружность изделия по начальной прямой. Вычерченный в различных положениях профиль изделия огибает зуб фрезы (рис. 16). При построении прежде всего вычерчивают начальную прямую AB и начальную окружность CD . Прямую AB , по которой катится начальная окружность CD , и прямую $O'F$, по которой движется центр окружности O' , делят на ряд малых отрезков (не превышающих $0,1 R$). Из центров O_1, O_2, O_3 и т. д. проводят окружности соответствующие начальной окружности. На них откладывают из точек: начальной прямой $1''$ дугу $1'1'' = O1$, из $2''$ дугу $2'2'' = O2$, из $3''$ дугу $3'3'' = O3$ и т. д., благодаря чему получаются точки $1', 2', 3'$ и т. д. Радиус OO' во время обкатки принимает положения $1'O_1, 2'O_2, 3'O_3$ и т. д.

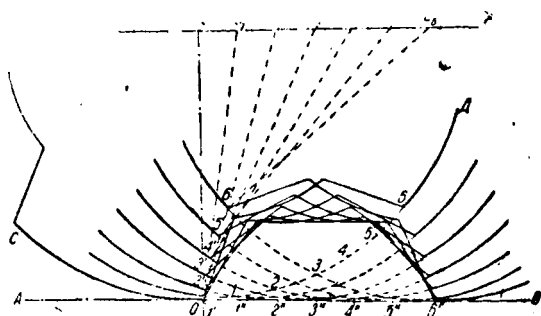


Рис. 16.

Профиль изделия вычерчивается относительно этих радиусов, как изображено на рис. 16, и полученная таким образом огибающая профилей изделия и есть профиль фрезы.

Теперь остается кривую профиля фрезы заменить окружностью по вышеизложенному способу.

Е. Построение профиля фрезы копированием последовательных положений чертежа изделия и обратная обкатка.

Этот способ в принципе не отличается от метода вычерчивания последовательных положений профиля изделия, изложенного выше, но благодаря его простоте отнимает минимум времени и не требует большой квалификации работников, а поэтому при значительном количестве проектируемых фрез можно рекомендовать пользоваться именно этим методом. Кроме этого им следует пользоваться при изделиях с криволинейными профилями или при сложной конфигурации профиля изделия.

Построение профиля фрезы этим методом производится следующим образом (рис. 17).

Вычерчивают изделие в большом масштабе. На дуге начальной окружности, расположенной во впадине, откладывают отрезки $\overline{O1} = \overline{12} = \overline{23}$ и т. д. (не превышающие $\frac{1}{10}R$), и из центра начальной окружности проводят прямые $00, 10, 20$ и т. д.

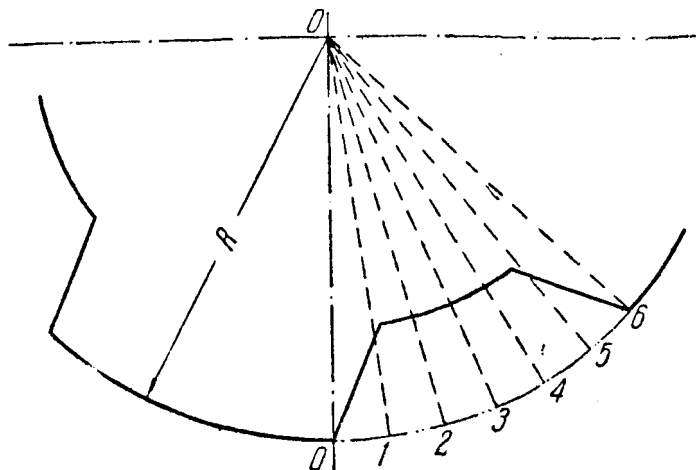


Рис. 17.

На отдельном листе кальки (рис. 18) проводят начальную прямую и на ней откладывают равные отрезки $\overline{O1} = \overline{12} = \overline{23}$, соответствующие дугам начальной окружности, и т. д. Из точек $O, 1, 2, 3$ и т. д. восстанавливают перпендикуляры $\overline{1O_1}, \overline{2O_2}$ и т. д., равные радиусу начальной окружности.

Совместив прямую на кальке 00 с прямой на бумаге 00 , копируют на кальке профиль изделия.

Совместив последовательно $\overline{1O_1}$ с $\overline{1O}$ и $2O_2$ с $2O$ и т. д. и последовательно копируя на кальке профили изделия, получают профиль фрезы как огибающую профилей изделия.

Этим же методом можно установить практическую осуществимость профиля изделия, не прибегая к специальному построению или исследованию профиля изделия, а пользуясь этим методом при проверке правильности построения профиля фрезы,

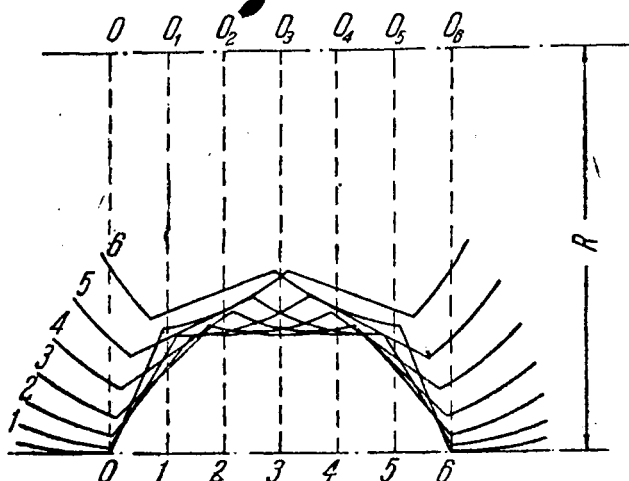


Рис. 18.

т. е. при обратной обкатке. Построение обратной обкатки заключается в том, что по заданному профилю фрезы находится профиль изделия.

Обратную обкатку следует строить, для проверки найденных размеров профиля фрезы, одним из вышеизложенных методов, а также для установления характера и приближенной величины отклонения профиля изделия при замене кривой фрезы окружностью.

Обратной обкаткой можно определить те участки профиля изделия, которые не соответствуют ранее заданным при построении профиля фрезы.

Обратная обкатка иллюстрирует действительный процесс образования фрезой профиля изделия.

Построение обратной обкатки производится следующим образом (рис. 19): на листе бумаги вычерчивают профиль фрезы (для

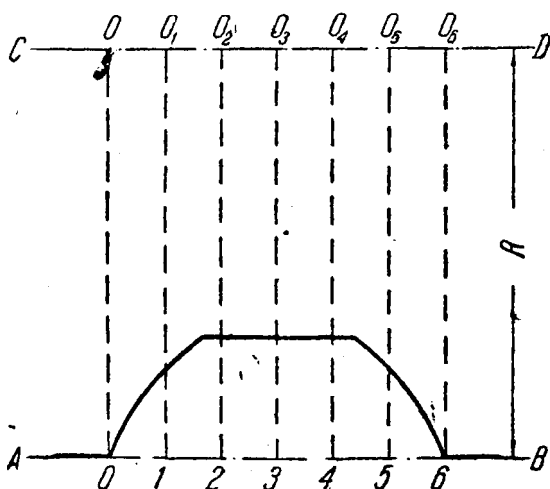


Рис. 19.

удобства сравнения в том же масштабе, в каком был получен профиль фрезы). От начальной прямой фрезы AB на расстоянии R проводят прямую CD . Толщину зуба фрезы по начальной прямой AB делят на ряд одинаковых отрезков (не превышающих $0,1 R$): $\overline{O1} = \overline{12} = \overline{23}$ и т. д.

Из точек $O, 1, 2, 3$ и т. д. проводят перпендикуляры к начальной прямой до пересечения с прямой CD в точках O_1, O_2, O_3 и т. д. Затем на листе кальки (рис. 20) вычерчивают (в том же масштабе,

в каком вычерчен профиль фрезы) начальную окружность радиусом R . На начальной окружности откладывают хорды, равные отрезкам на начальной прямой $\overline{O1} = \overline{12} = \overline{23}$ и т. д., столько раз, сколько отрезков на фрезе, и соединяют центр окружности O с точками $O, 1, 2, 3$ и т. д. прямыми.

Совмещая прямую \overline{OO} на бумаге (рис. 19) с прямой \overline{OO} на кальке (рис. 20), копируют на кальке профиль фрезы; затем, совмещая прямые $\overline{O1}$ с $\overline{O_11}$; $\overline{O2}$ с $\overline{O_22}$ и т. д., копируют последовательные положения профиля фрезы. Огибающая семейства профилей фрезы и является профилем изделия.

Для сверки отклонения профиля изделия, полученного обратной обкаткой, от заданного, следует наложить профиль изделия (по рис. 20) на заданный профиль по рис. 17.

Как видно из рис. 17, заданный нами профиль шлицевого валика не совпадает с обратной обкаткой (рис. 20) в углах, так как вместо заостренных впадин у дна канавки получают закругления.

Пример 8. Для нарезания зубцов у дисковой фрезы высокой производительности, с криволинейной спинкой, построить профиль червячной фрезы методом копирования последовательных положений изделия, и обратной обкаткой проверить найденный профиль червячной фрезы.

Размеры дисковой фрезы, как видно из рис. 21а, следующие:

наружный диаметр	$D_{\text{нар}} = 60 \text{ мм}$
высота зуба	$h = 7 \text{ мм}$
радиус окружности спинки	$R = 22 \text{ мм}$

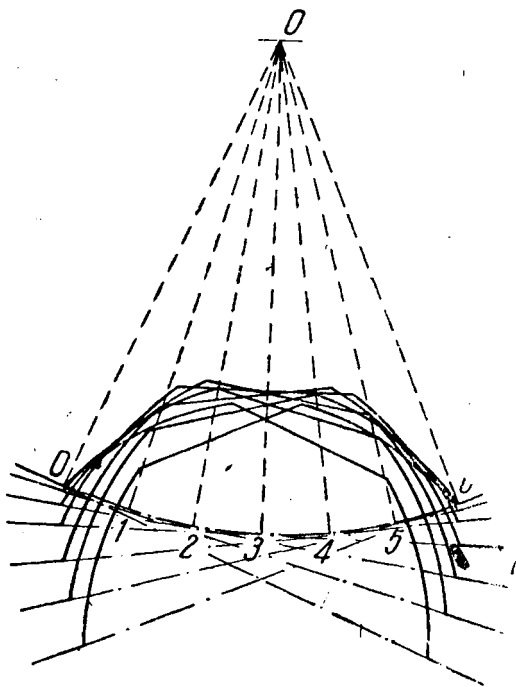


Рис. 20.

радиус закругления дна канавки $r = 2$ мм
 число зубцов $n = 8$.

Диаметр начальной окружности берем равным наружному диаметру изделия.

На рис. 21а вычерчено изделие, и расстояние от зуба до зуба разделено на 9 равных дуг.

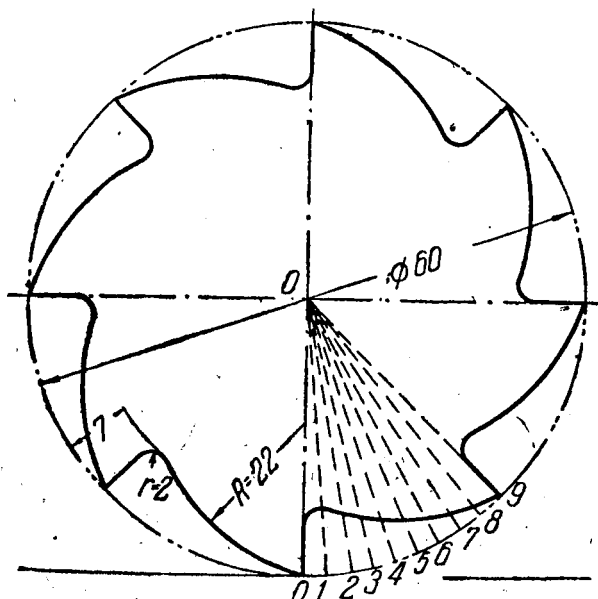


Рис. 21а.

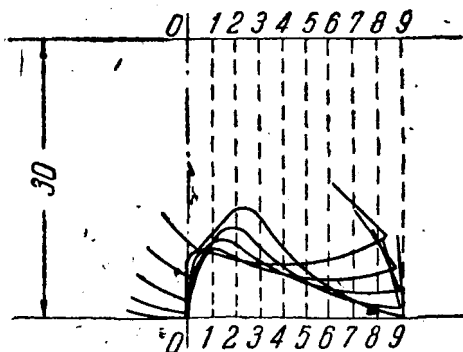


Рис. 21б.

На рис. 21б (который вычерчен на кальке) скопированы последовательные положения профиля изделия (дисковой фрезы) и найден профиль червячной фрезы.

На рис. 21с профиль червячной фрезы перечерчен с 21b отдельно. Как видно из рисунка, кривая профиля червячной фрезы, сопряженная передней грани зуба дисковой фрезы, заменена подобранной окружностью с радиусом $R=13$ мм. Часть профиля червячной фрезы, сопряженная криволинейной спинке дисковой фрезы, случайно получилась прямолинейной, располо-

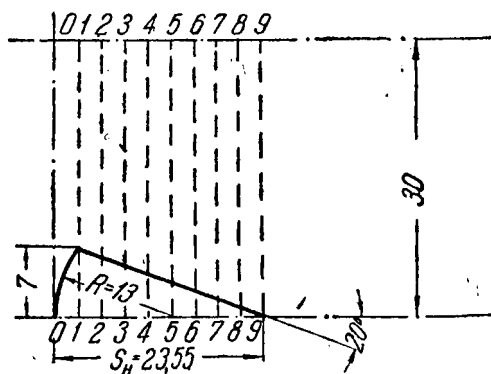


Рис. 21с.

женной под углом 20° к начальной прямой; по видимому окружность спинки дисковой фрезы очень близка к эвольвенте. Высота зуба червячной фрезы получилась равной высоте впадины дисковой фрезы, а длина зуба равна шагу изделия:

$$s_H = \frac{\pi D_{\text{нар}}}{n} = \frac{3,14 \cdot 60}{8} = 23,55 \text{ мм.}$$

На рис. 21d приведен профиль изделия (на кальке), полученный копированием последовательных положений профиля червячной

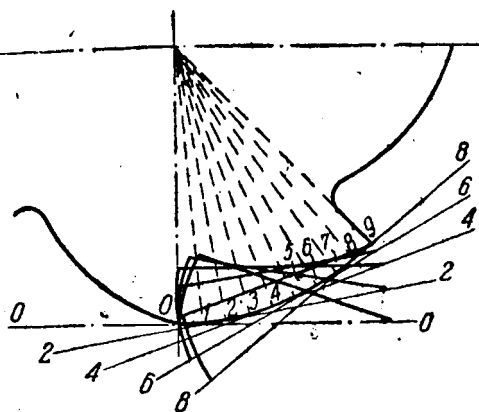


Рис. 21d.

фрезы по рис. 21с. Как видно из рисунка, отклонения полученного профиля изделия от исходного по рис. 21a почти незаметны.

6. Механический метод построения профиля.

Следует отметить, что механический метод построения профиля фрезы не тождественен с механическим методом воспроизведения профиля на фрезе или на инструменте, производящем профиль фрезы.

Здесь мы приводим описание схемы действия такого приспособления (рис. 22).

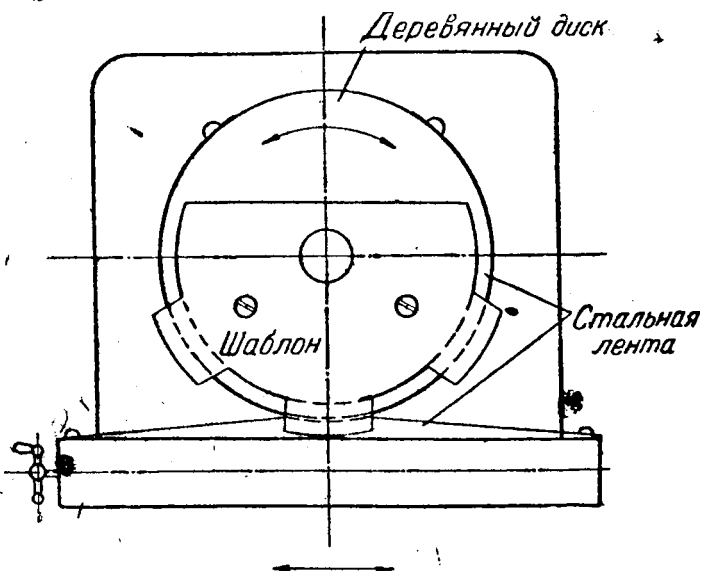


Рис. 22.

Основу приспособления составляет стол, на котором помещен вращающийся деревянный диск. Диаметр диска соответствует диаметру начальной окружности. Спереди стола помещены салазки, которые при вращении рукоятки передвигаются вправо и влево. Диск связан с салазками при помощи обвивающих его стальных лент.

Процесс соответствует действительному качению начальной окружности изделия по начальной прямой фрезы.

Для возможности вычерчивания профиля, шаблон укладывается точно в центре на деревянный диск, а на салазках прикрепляется кусок листового железа. Одна впадина шаблона посредством вращения рукоятки приводится в различные положения, которые размечаются на листе. Таким образом получается профиль фрезы как огибающая многочисленных положений профилей изделия (впадин шаблона).

Полученный при помощи этого приспособления профиль фрезы (в увеличенном масштабе) послужил для изготовления шаблона причем воспроизведение профиля шаблона в натуральную величину исполнялось при помощи пантографа.

При этом способе построения профиля фрезы прежде всего должен быть изготовлен шаблон профиля изделия в увеличенном масштабе. Кроме того необходимость специальных приспособлений делает этот способ и продолжительным и дорогим, не говоря уже о том, что могут получиться неточности при обчерчивании шаблона.

Этот прием получения профиля фрезы годен только как учебно-показательный, но негоден для применения его при конструировании и изготовлении фрез.

Из изложения методов нахождения сопряженных профилей вытекает, что для конструирования червячных фрез для изделий с прямолинейным профилем можно рекомендовать:

1. Аналитический метод.
2. Метод Рело (на случай исследования профиля фрезы).
3. Общий метод построения сопряженного профиля.
4. Метод копирования последовательных положений профиля изделия.

Преимущества и недостатки этих методов изложены выше.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

О НАЧАЛЬНОМ ДИАМЕТРЕ ИЗДЕЛИЯ И ПЕРЕХОДНОЙ КРИВОЙ.

7. Выбор диаметра начальной окружности.

Первый вопрос, который возникает при построении профиля червячной фрезы,—это выбор диаметра начальной окружности на поперечном сечении изделия. Если при построении профиля зубчатых колес начальная окружность задается из кинематических условий работы колес, то здесь—казалось бы—диаметр начальной окружности может быть каким угодно; на самом деле, как видно будет ниже, этот вопрос имеет вполне определенное решение.

Так как профили обрабатываемых изделий большей частью состоят из отрезков прямых линий, то разберем подробно те основания, которые служат для выбора диаметра начальной окружности для этого случая.

Прежде чем решать вопрос о наименьшем допустимом диаметре начальной окружности, решим вопрос о целесообразности его уменьшения. Как раньше было установлено, для определения высоты профиля фрезы H от начальной прямой, нам нужно в уравнение (13) подставить

$$\rho = r_{\text{вн}},$$

где $r_{\text{вн}}$ —радиус наименьшей внутренней окружности изделия, проходящей через последнюю точку прямолинейной части профиля, а ρ —радиус зацепления.

В этом случае имеем:

$$H = \frac{R^2 + h^2 - r_{\text{вн}}^2 - h\sqrt{R^2 + h^2 - r_{\text{вн}}^2}}{R}. \quad (30)$$

Нетрудно убедиться, что, при

$$R > r_{\text{вн}} > h > 0, \quad (31)$$

$$H > R - r_{\text{вн}}, \quad (32)$$

т. е. теоретически необходимая высота профиля фрезы больше, чем высота сопряженного отрезка прямой на изделии, измеренная в направлении радиуса.

Для того чтобы доказать, что $H > R - r_{\text{вн}}$, или, что то же, $H - (R - r_{\text{вн}}) > 0$, сначала нам нужно доказать по известным из математики правилам определения возрастающей функции, что

$$f = H - (R - r_{\text{вн}}) = r_{\text{вн}} - \frac{r_{\text{вн}}^2 - h^2}{R} - h \sqrt{1 - \frac{r_{\text{вн}}^2 - h^2}{R^2}} \quad (33)$$

есть функция возрастающая, т. е., при постоянных $r_{\text{вн}}$ и h , величина f увеличивается с увеличением радиуса начальной окружности R .

Действительно:

$$\frac{df}{dR} = \frac{r_{\text{вн}}^2 - h^2}{R^2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2 - r_{\text{вн}}^2}} \right), \quad (34)$$

откуда видно, что первая производная $f' > 0$ при условии (31), следовательно f —функция возрастающая.

Теперь докажем, что $H > R - r_{\text{вн}}$. Действительно:

$$\text{при } R = r_{\text{вн}} \text{ имеем } f = 0.$$

Но так как f —функция возрастающая, то при

$$R > r \text{ получим } f > 0,$$

$$\text{т. е. } f = H - (R - r_{\text{вн}}) > 0,$$

или $H > R - r$, что и требовалось доказать.

Понятно, что самая низкая точка фрезы, удаленная на расстояние H от начальной прямой, после соприкосновения с последней точкой прямолинейной части профиля изделия, лежащей на окружности радиуса $r_{\text{вн}}$, будет углубляться в изделие за пределы внутренней окружности радиуса $r_{\text{вн}}$ на глубину

$$f = H - (R - r_{\text{вн}}),$$

измеренную в направлении диаметра.

Профиль этого углубления в изделии будет определяться размерами траектории нижней точки фрезы в относительном движении.

Таким образом мы установили, что фреза после обработки прямолинейной части профиля делает закругление, т. е. на изделии получаются переходные кривые от одной части профиля к другой. Если мы обрабатываем например шлицевый валик, то понятно стремление уменьшить размеры переходных кривых, так как последние или ослабляют сечения валика, или уменьшают рабочий прямолинейный участок профиля изделия.

Теперь посмотрим, при каких условиях величина врезания или, что то же, глубина переходной кривой является наименьшей.

Раньше мы уже установили из уравнения (34), что f —функция возрастающая, т. е. f будет уменьшаться с уменьшением R —ра-

диуса начальной окружности, или, что то же, высота переходной кривой будет уменьшаться с уменьшением диаметра начальной окружности.

Для иллюстрации вышеуказанного положения приводим профили фрез (рис. 14), найденные методом Релё для шлицевого валика. Два профиля фрез соответствуют двум различным диаметрам начальной окружности. Первый профиль соответствует диаметру начальной окружности, который больше, чем наружный диаметр валика; для второго профиля диаметр начальной окружности равен наибольшему диаметру валика. Как видно из чертежа, величина врезания фрезы увеличивается с увеличением диаметра начальной окружности. Таким образом приходим к заключению, что диаметр начальной окружности должен быть наименьше допустимый, так как только в этом случае получатся наименьшие переходные кривые.

К этому заключению мы придем, если рассмотрим другие факторы, влияющие на величину диаметра начальной окружности.

8. Определение наименьшего допустимого диаметра начальной окружности.

Для определения наименьшего диаметра начальной окружности рассмотрим кривую, построенную по уравнениям (8) и (9). Как видно из рис. 23, кривая имеет две неодинаковые ветви.

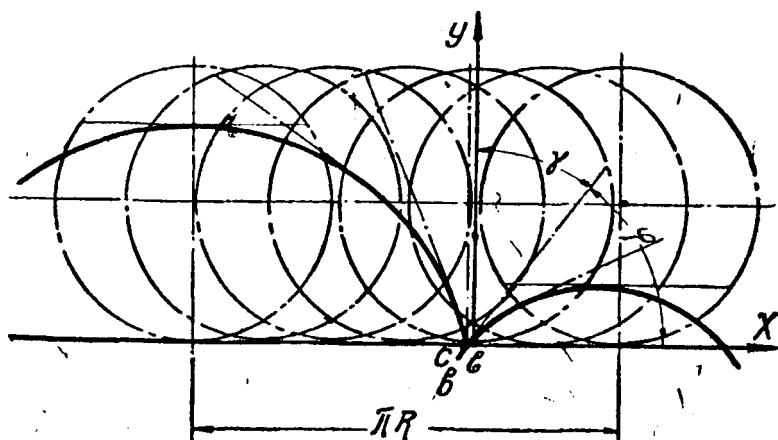


Рис. 23.

Может возникнуть вопрос: какую из этих ветвей выбрать для построения профиля фрезы?

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим два вида изделий с прямолинейными профилями: с поднутрением и без поднутрения

(рис. 6а и б). Геометрически это означает, что угол γ для первого случая лежит вне тела изделия, а для второго—измеряется в теле изделия.

Как мы раньше установили, положение прямой профиля изделия определяется углом γ ; значит профили изделия с поднутрением и без поднутрения могут определяться одним и тем же углом γ , а следовательно уравнения кривой профиля фрезы для первого и второго случаев должны совпасть. При этом казалось бы, и профили фрез для обоих случаев должны быть одинаковыми; на самом же деле профили фрез различны.

Из рис. 23 видно, что для получения огибающей семейства прямых, т. е. профиля фрезы для изделия без поднутрения, нам нужно начальную окружность катить по начальной прямой вправо, а для получения профиля фрезы для изделия с поднутрением начальную окружность нужно катить влево. Это означает, что одна и та же прямая, в зависимости от того, будет ли рабочей та ее сторона, которая обращена к центру начальной окружности, или другая сторона, не обращенная к центру, имеет своим сопряженным профилем (профилем фрезы) большую или меньшую ветвь кривой. Это обстоятельство имеет место и при нахождении любых криволинейных сопряженных профилей.

Практически никогда одновременно не могут быть рабочими обе стороны одной и той же прямой профиля изделия; поэтому рабочим профилем фрезы будет только одна ветвь кривой по уравнениям (8) и (9).

Очевидно, что одна сторона прямолинейного профиля изделия будет правильно сцепляться с сопряженным профилем фрезы до той точки, где начинается вторая ветвь кривой. Вторая же ветвь кривой начинается в точке, наиболее удаленной от начальной прямой (от оси X в сторону отрицательных Y -ов).

Теперь найдем тот радиус зацепления на изделии, который соответствует наиболее удаленной от начальной прямой/сопряженной точке на профиле фрезы. Значение этого радиуса ρ_n изделия мы найдем, если отыщем минимум функции по уравнению (13). Для этого нам нужно найти производную от

$$v = \frac{R^2 + h^2 - \rho_n^2 - h \sqrt{R^2 + h^2 - \rho_n^2}}{R}$$

и приравнять ее нулю. Действительно:

$$\frac{dy}{d\rho_n} = \frac{\rho_n}{R} \left(\frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2 - \rho_n^2}} - 2 \right) = 0,$$

откуда

$$\frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2 - \rho_n^2}} - 2 = 0 \quad \text{или} \quad \rho_n = \sqrt{R^2 + 0,75 h^2}. \quad (35)$$

В данном случае на окружности радиуса ρ_n на прямолинейном профиле изделия находится последняя точка, могущая правильно

сцепляться с профилем фрезы. Очевидно, $2\rho_n$ изделия больше диаметра начальной окружности $2R$.

Таким образом, если зададимся наружным диаметром изделия, равным $2\rho_n$, то радиус начальной окружности определится из уравнения (35):

$$R = \sqrt{\rho_n^2 - 0,75 h^2}. \quad (36)$$

Эта формула выражает размер наименьше допустимой начальной окружности, если профиль изделия прямолинейный.

Формула (36) применима только для изделий без поднутрения, так как по причинам практического характера для изделий с поднутрением выбор диаметра начальной окружности производится несколько иначе, что будет рассматриваться ниже.

Пример 9. Дано изделие квадратного сечения со стороной квадрата $b = 20$ мм. Определить диаметр начальной окружности.

Радиус наружной или описанной окружности будет:

$$\rho_n = b\sqrt{2} = 20\sqrt{2} = 28,28;$$

радиус начальной окружности будет:

$$R = \sqrt{\rho_n^2 - 0,75 h^2} = \sqrt{2b^2 - 0,75 \cdot \frac{b^2}{4}} = 1,346 b;$$

$$R = 1,346 \cdot 20 = 26,92 \text{ мм.}$$

9. Выбор диаметра начальной окружности для изделий с поднутрением.

Как видно из рис. 23, большая ветвь кривой, которая соответствует профилю фрезы для изделий с поднутрением, имеет участок bc , лежащий ниже начальной прямой. Для отрезка большей ветви кривой, расположенного выше начальной прямой, и отрезка bc , расположенного ниже начальной прямой, вогнутость направлена в сторону отрицательных X -ов.

Так как ось фрезы параллельна начальной прямой, то осуществить можно только участок профиля, лежащий выше начальной прямой (потому что снятие затылка при точных профилях производится в плоскости, перпендикулярной оси фрезы); иначе говоря, начиная с точки кривой, касательная к которой перпендикулярна оси фрезы (начальной прямой), профиль осуществим.

Так как α в уравнениях (8) и (9) кривой профиля фрезы выражает угол наклона касательной к оси OY , то нетрудно найти координаты той точки профиля, в которой касательная перпендикулярна оси OX (начальной прямой). Касательная перпендикулярна оси OX при $\alpha = 0$; но, подставляя в уравнение (9) профиля фрезы $\alpha = 0$, получаем $y = 0$, т. е. касательная, перпендикулярная начальной прямой, проходит через точку профиля, лежащую на начальной прямой.

Осуществить фрезу с подрезанным зубом, как раньше было выяснено, невозможно; поэтому нужно участок профиля bc , лежащий ниже начальной прямой, заменить по крайней мере прямой, перпендикулярной оси фрезы.

Но, заменяя прямой участок профиля фрезы bc , мы не получим на профиле изделия, лежащем выше начальной окружности, прямого участка. Чтобы этого не случилось, диаметр начальной окружности для изделий с поднутрением следует брать равным наружному диаметру изделия.

10. Выбор диаметра начальной окружности для других видов изделий.

Очень часто изделия, например шлицевые валики, имеют на вершинах шпоночных выступов прямолинейные срезы под углом δ к боковой поверхности выступа (рис. 24).

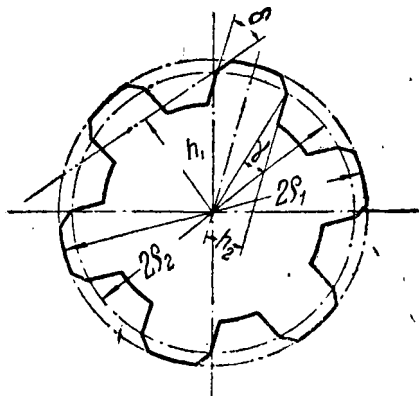


Рис. 24.

Обозначим через $2\rho_1$ наружный диаметр изделия, а через $2\rho_2$ — диаметр окружности, проходящей через точки пересечения отрезков прямых. Далее, через h_1 и h_2 обозначим расстояния прямых профилей изделия до центра. Тогда диаметр начальной окружности для прямолинейных срезов определяется по формуле (36), а именно:

$$R_1 = \sqrt{\rho_1^2 - 0,75 h_1^2}, \quad (37)$$

а для прямолинейных выступов:

$$R_2 = \sqrt{\rho_2^2 - 0,75 h_2^2}. \quad (38)$$

Из рис. 24 видно:

$$h_1 = \rho_2 \sin(\gamma + \delta), \quad (39)$$

где γ определяется по формуле: $\sin \gamma = \frac{h_2}{\rho_2}$.

Подставляя (39) в формулу (37), получим:

$$R_1 = \sqrt{\rho_1^2 - 0,75 \rho_2^2 \sin^2(\gamma + \delta)}. \quad (40)$$

Нетрудно убедиться, что нужно выбрать за диаметр начальной окружности то из значений R_1 и R_2 , рассчитанных по формулам (38) и (40), которое является большим. При большом угле δ следует пользоваться формулой (38).

Вместо прямолинейных срезов, изделия на вершинах шпоночных выступов часто снабжаются закруглениями (рис. 25). Поэтому разберем вопрос о сопряженной части фрезы для этого закругления.

Диаметр начальной окружности в этом случае нужно взять равным диаметру окружности, проведенной через центры этих закруглений.

Действительно, если мы возьмем меньший диаметр, то нормали к закруглениям будут пересекать начальную окружность не в последовательном порядке, т. е. некоторые нормали к прямой части профиля и закруглению будут пересекать начальную окружность в одной и той же точке. Кроме того может случиться, что некоторые нормали совсем не пересекутся с начальной окружностью, что противоречит первому из основных условий правильного зацепления (см. стр. 9).

Теперь докажем, что если центр закругления на изделии лежит на начальной окружности, то сопряженная часть профиля фрезы будет также окружностью и того же радиуса, что закругление на изделии.

Действительно, по методу Рело будем находить сопряженный профиль для окружности, центр которой лежит на начальной окружности (рис. 26). В этом случае все нормали к профилю

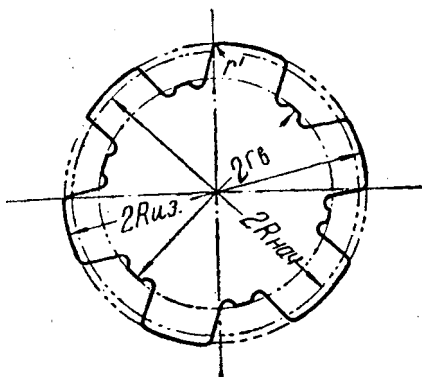


Рис. 25.

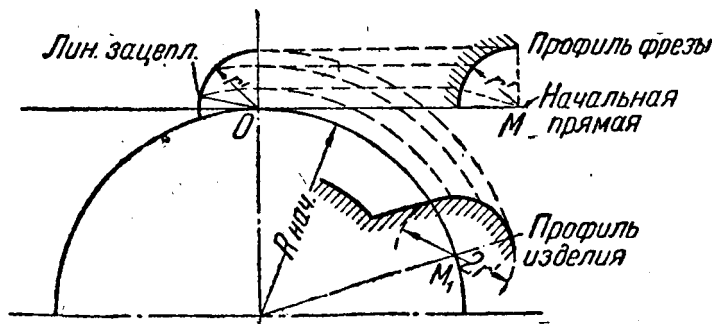


Рис. 26.

будут из полюса зацепления откладываться в виде постоянной величины r' (где r' — радиус окружности профиля на изделии), т. е. линия зацепления будет также окружностью с радиусом r' .

Теперь нужно из точки M начальной прямой (дуга OM_1 равна отрезку OM) делать засечки нормалей также радиусом r' , т. е. все нормали к сопряженному профилю фрезы будут откладываться из одной и той же точки и иметь постоянную величину, равную r' . Очевидно, что сопряженный профиль есть также окружность того же радиуса r' , что и требовалось доказать.

Таким образом, если мы выбрали диаметр начальной окружности таким, чтобы центр закругления лежал на этой окружности, то сопряженную часть профиля нужно вычертить как окружность с радиусом, равным закруглению на изделии.

Практически же целесообразнее сделать закругление на профиле фрезы процентов на 10 больше радиуса закругления на изделии.

11. Размеры переходной кривой.

Как раньше было установлено, высота профиля фрезы H всегда получается больше $R-r$. Поэтому фреза врезается за пределы внутренней окружности изделия на величину $f = H - (R-r)$.

Для того чтобы фреза могла правильно обработать внутреннюю окружность на шлицевых валиках, высота профиля фрезы должна быть равной $R-r$. Но в этом случае переходная кривая начинается выше внутренней окружности (рис. 27), и стороны выступа у основания получатся не прямолинейными.

Для того чтобы получить стороны шпоночного выступа прямолинейными до основания, т. е. до внутренней окружности валика, на концах зуба фрезы часто делают усики, как изображено на рис. 62. Но зуб

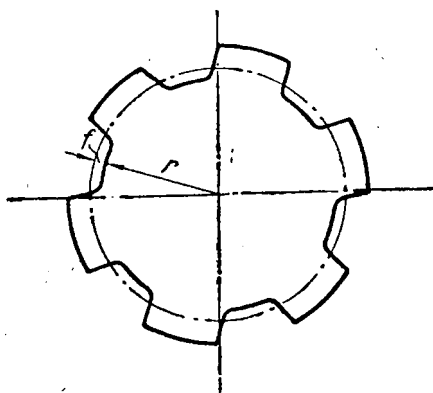


Рис. 27.

Фрезы, снабженный усиками, делает углубление за внутренней окружностью валика (рис. 25).

Теоретически необходимая высота углубления f определяется по формуле (33):

$$f = r - \frac{r^2 - h^2}{R} - h \sqrt{1 - \frac{r^2 - h^2}{R^2}}$$

Если обозначить

$$\frac{r}{R} = c; \quad R - r = t; \quad \frac{h}{R} = \sin \gamma,$$

и подставить в формулу (33), то получим

$$f = t \left(c + \frac{\sin^2 \gamma}{1 - c} - \frac{\sin \gamma}{1 - c} \cdot \sqrt{1 - c^2 + \sin^2 \gamma} \right) = kt. \quad (41)$$

Назовем коэффициент K при t (высота профиля изделия) относительной высотой переходной кривой. Ниже приводим таблицу значений относительной высоты переходной кривой для наиболее часто встречающихся значений $\frac{r}{R}$ и γ , причем γ соответствует числу шлицев от 4 до 18.

Для сравнения в таблице также приведены значения K для различных отношений $\frac{r}{R}$.

Таблица 7.

Значения K для числа шлицев от 4 до 18.

$r/R \backslash \gamma$	18°	15°	11°	8°	5°
0,9	0,20	0,26	0,36	0,46	0,59
0,85	0,23	0,28	0,38	0,47	0,59
0,8	0,23	0,29	0,38	0,47	0,57
0,75	0,23	0,28	0,37	0,45	0,55

Как видно из таблицы, коэффициент K зависит главным образом от γ , т. е. при постоянном радиусе начальной окружности R относительная высота переходной кривой K у шлицевых валиков зависит только от ширины шпоночного выступа ($2h$).

Чем шире шпоночный выступ (при постоянстве остальных элементов), тем меньше высота переходной кривой.

Из таблицы 7 также видно, что для малых значений γ , т. е. для изделий с большим количеством шпоночных выступов, высота переходной кривой сильно возрастает, доходя до величины, равной примерно половине высоты шпоночного выступа.

Этим можно объяснить то обстоятельство, что изделия, имеющие большое количество шлицев, не могут быть обработаны по диаметру впадин методом обкатки, так как окружность впадин срезается вершиной зуба фрезы, и профиль впадин соответствует относительной траектории вершины зуба фрезы, которая является удлиненной эвольвентой (см. рис. 35 г). Это обстоятельство правильно учитывается в иностранных стандартах на глубокие шлицевые соединения для десяти- и более многошпоночных валиков.

Однако, как видно из таблицы, для угла $\gamma = 8^\circ$ и меньше, что соответствует примерно изделиям с числом шлицев 10 и больше, высота переходной кривой равна приблизительно $0,5t$ —половине высоты шпоночного выступа; между тем закругления, предусмотренные рядом заграничных стандартов на шлицевые соединения, дают высоту этого закругления равной $0,2t$. Кроме этого ряд стандартов четырех-, шести- и десятишлицевых соединений пре-

дусматривают закругления глубиной значительно меньше $0,2t$, которые, как видно из таблицы, недостаточны при обработке изделий методом обкатки.

С другой стороны некоторые заграничные фирмы, изготовляющие червячные фрезы, рекомендуют на изделиях, обрабатываемых червячными фрезами, делать закругления у основания шпоночного выступа равными по высоте $0,2t$, что, как видно из таблицы, достаточно только для неглубоких четырехшлицевых валков.

Такое небольшое значение глубины врезания, которое дается фирмами, можно объяснить тем, что вначале переходная кривая очень слабо отклоняется от прямолинейного очертания шпоночного выступа, а поэтому практически высоту усиков у фрез, которая должна быть рассчитана по формуле (41) или взята по таблице 7, можно несколько уменьшить по сравнению с расчетной.

Однако это уменьшение следует производить осмотрительно, особенно в тех случаях, где допуски на шлицевые соединения малы, так как значительное отклонение от прямолинейного профиля переходного закругления у основания шпоночного выступа может послужить причиной невозможности посадки многошпоночного вала в шлицевое отверстие.

Очень часто при проектировании фрез интересно узнать, какую величину и форму имеют закругления на многошпоночном валике при обработке его червячными фрезами с усиками. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Очевидно, что форма и размеры этого углубления будут определяться формой траектории, описываемой самой низкой точкой фрезы в относительном движении.

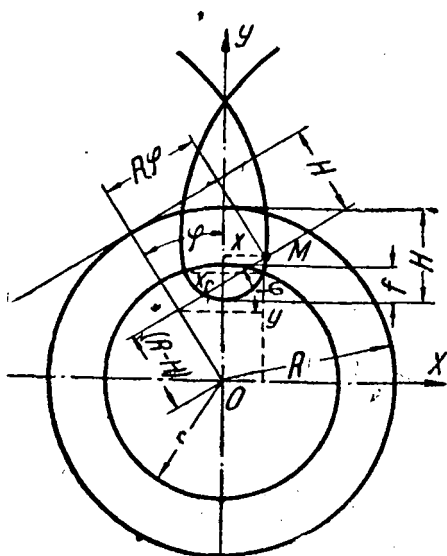


Рис. 28.

Легко убедиться, что самая низкая точка фрезы описывает так называемую удлиненную эвольвенту. Чтобы определить форму этой кривой, сначала получим ее уравнение (рис. 28).

Если M будет самая низкая точка фрезы, то ее расстояние до начальной прямой будет H . Поместим оси координат в центре начальной окружности, а начальное положение начальной прямой установим перпендикулярно к оси OY . Через φ обозначим угол между осью OY и направлением радиуса, перпендикулярным к начальной прямой (при повороте на угол φ от первоначального положения).

значим угол между осью OY и направлением радиуса, перпендикулярным к начальной прямой (при повороте на угол φ от первоначального положения).

Тогда координаты точки M определяются, как видно из рис. 28, следующим образом:

$$y = R\varphi \sin \varphi + (R - H) \cos \varphi; \quad (42)$$

$$x = R\varphi \cos \varphi - (R - H) \sin \varphi. \quad (43)$$

Возвышая в квадрат x и y и складывая, мы получим следующее уравнение удлинённой эвольвенты:

$$x^2 + y^2 = R^2 \varphi^2 + (R - H)^2. \quad (44)$$

Для того чтобы определить координаты точек пересечения кривой с диаметром впадин изделия, нам нужно решить совместно два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} x^2 + y^2 &= r^2, \\ x^2 + y^2 &= R^2 \varphi^2 + (R - H)^2, \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

где $2r$ —диаметр окружности впадин изделия.

Решая уравнения (45), имеем:

$$r^2 = R^2 \varphi^2 + (R - H)^2$$

или

$$\varphi = \pm \frac{1}{R} \sqrt{r^2 - (R - H)^2}. \quad (46)$$

Отсюда координаты точки пересечения определяются, если по найденному значению φ определим $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ и подставим в уравнения (42) и (43), а также подставим значение (46) в уравнения (42) и (43). Получим координаты точек пересечения:

$$\begin{aligned} Y_r &= \sqrt{r^2 - (R - H)^2} \sin \sqrt{\frac{r^2 - (R - H)^2}{R^2}} + \\ &+ (R - H) \cos \sqrt{\frac{r^2 - (R - H)^2}{R^2}}; \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} X_r &= \sqrt{r^2 - (R - H)^2} \cos \sqrt{\frac{r^2 - (R - H)^2}{R^2}} - \\ &- (R - H) \sin \sqrt{\frac{r^2 - (R - H)^2}{R^2}}. \end{aligned} \quad (48)$$

Уравнениями (47) и (48) мы определили ширину переходной кривой; глубину же можно определить, найдя самое низкое положение точки M . Очевидно, что глубина будет равна f (рис. 28), где $f = H - (R - r)$.

В действительности ширина углубления немного больше чем $2x_r$, так как усик у фрезы, образующий это углубление, не заканчивается острием, а имеет некоторую ширину q (рис. 62), в противном случае он во время работы может сломаться; но

тогда по видимому ширина переходной кривой будет равна $2x_r + q$, где q —ширина фаски у вершины усика.

Размер x_r переходной кривой можно легко построить графически.

Действительно, по формуле (46) имеем:

$$r^2 = (R\varphi)^2 + (R - H)^2.$$

Отрезки r , $R\varphi$ и $(R - H)$ суть стороны прямоугольного треугольника, из которых $(R - H)$ и r заданы. Нужно следовательно определить $R\varphi$; зная же $R\varphi$, мы легко можем определить x_r (рис. 29).

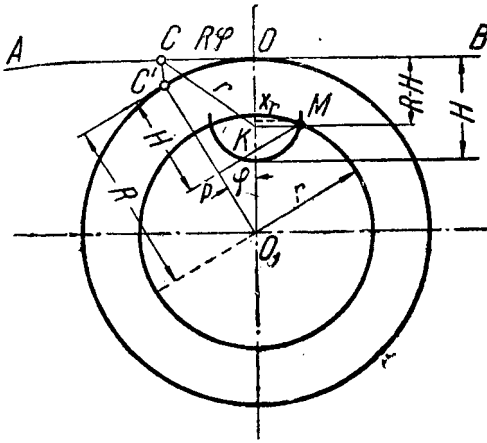


Рис. 29.

Построение производим следующим образом.

Проводим окружность радиусом R , равным радиусу начальной окружности. Проводим начальную прямую AB . Из того же центра проводим окружность радиусом окружности впадин изделия. На прямой, проходящей через центр окружности и перпендикулярной к начальной прямой, откладываем от точки O отрезок $\overline{OK} = R - H$ и из точки K делаем

засечку радиусом r на начальной прямой. Отрезок OC и будет равен $R\varphi$. Сгибаем отрезок OC на начальную окружность и точку C' соединяем прямой с центром.

Из центра окружности делаем засечку на этой прямой радиусом $O_1P = R - H$ и из точки P восстанавливаем перпендикуляр. Точка пересечения перпендикуляра с окружностью впадин и будет искомая точка M переходной кривой.

Проводя через точку M и самую низшую точку окружности, получаем приблизительную форму переходной кривой.

Таким образом построением на рис. 29 мы можем определить, если нас это интересует, основные размеры и приблизительную форму переходной кривой.

Пример 10. Для валика с размерами, приведенными в примере 6, найти ширину и глубину переходной кривой, если высота зуба равна теоретически необходимой высоте зуба фрезы.

Теоретически необходимая высота зуба фрезы равна ординате y крайней точки профиля, найденной в вышеуказанном примере:

$$H = y = 3,78 \text{ мм.}$$

Определяем ширину переходной кривой:

$$x_r = \sqrt{r^2 - (R-H)^2} \cos \sqrt{\frac{r^2 - (R-H)^2}{R^2}} + \\ + (R-H) \sin \sqrt{\frac{r^2 - (R-H)^2}{R^2}};$$

$$\sqrt{r^2 - (R-H)^2} = \sqrt{16,2^2 - (18,82 - 3,78)^2} = 6,02.$$

$$\sin \sqrt{\frac{r^2 - (R-H)^2}{R^2}} = \sin \frac{6,02}{18,82} = \sin 0,3198.$$

В градусах будет:

$$\sin 0,3198 = \sin 18^\circ 20' = 0,3145;$$

$$\cos 0,3198 = \cos 18^\circ 20' = 0,9492.$$

Тогда $x_r = 6,02 \cdot 0,949 - 15,04 \cdot 0,315 = 0,98$ мм, и ширина переходной кривой на окружности впадин будет:

$$2 x_r = 1,96 \text{ мм};$$

глубина определится

$$f = H - (R - r) = 3,78 - (18,82 - 16,2) = 1,16 \text{ мм}.$$

Если считать, что усик фрезы имеет у вершины фаску шириной 0,3 мм, то ширина переходной кривой будет:

$$1,96 + 0,3 \approx 2,3 \text{ мм}.$$

Так как впадина имеет с двух сторон переходные кривые, то они в сумме будут равны 4,6 мм, что на незначительную величину меньше ширины впадины; следовательно впадины валика, очерченные окружностью, будут почти полностью срезаны.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ С УДЛИНЕННЫМ ЗУБОМ.

12. Конструирование червячных фрез с удлиненным зубом.

Раньше было установлено, что не всякий профиль изделия может быть осуществлен обработкой методом обкатки. Однако некоторыми фирмами предлагаются червячные фрезы, позволяющие осуществить такие профили изделий, которые простыми обкаточными червячными фрезами осуществить нельзя. Эти фрезы являются по видимому предметом патента фирмы, и их конструирование и изготовление держится в секрете.

Следует остановиться на типе червячных фрез, служащих для обработки многошпоночных валов и подобных изделий с заостренными впадинами у основания (указанные фрезы не производят переходных кривых у основания шпоночного выступа).

Эта фреза изобретена на заводах Адлера во Франкфурте на Майне и запатентована в Германии в 1926 г.¹ Идея ее заключается в том, что по форме она представляет глобондальный червяк (рис. 30). В осевом сечении фреза имеет профиль впадин обрабатываемого изделия, так что ось симметрии профиля любого зуба фрезы проходит по радиусу через ось шлицевого вала.

Конструктивная идея этих фрез не представляет ничего оригинального; между тем главные затруд-

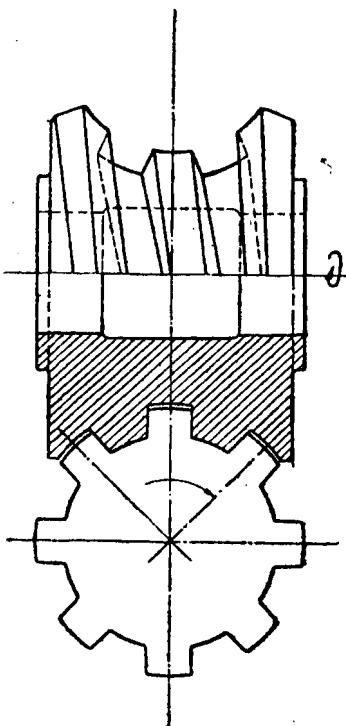


Рис. 30.

¹ См. германские патенты „Heinrich Kleyer“ № 500026, класс 49b, группа 12, от 22 мая 1930 г.

нения могут произойти при их изготовлении и в особенности при снятии затылков.

Автором вышеуказанного патента это было учтено, и в этом же патенте он предлагает специальное приспособление для изготовления указанных фрез. Всё же это приспособление сложное, поэтому фрезы повидимому дороги, вследствие чего они не получили распространения.

В Америке в 1926 году фирмой „Барбер Кольман“ изобретена и запатентована ¹ специальная червячная фреза для тех же целей. По конструкции она несколько напоминает глобоидальную червячную фрезу, но значительно проще в изготовлении. Конструкцию этих фрез рассмотрим более подробно.

Эти фрезы имеют название: фрезы червячные с удлиненным зубом или фрезы червячные для обработки полного профиля изделия (Vollprofilwälzfräsern).

Червячной фрезой с удлиненным зубом она называется потому, что у обыкновенных червячных фрез без усиков высота зуба фрезы до начальной прямой равна $H = R - r$, т. е. разности радиусов начальной и внутренней окружностей, а у фрез с удлиненным зубом высота зуба больше $R - r$; в данном случае H определяется по формуле (30).

Фрезы червячные с удлиненным зубом сконструированы таким образом, чтобы одна часть зуба обрабатывала изделие по методу обкатки, а другая часть зуба обрабатывала изделие по методу фасонного фрезерования.

Разница в работе снятия стружек обкаткой и фасонным фрезерованием заключается в том, что при снятии стружек обкаткой режущая кромка сцепляющихся с профилем изделий зубцов фрезы соприкасается с изделием теоретически в одной только точке, а при фасонном фрезеровании зуб фрезы соприкасается с изделием по всей длине режущей кромки.

Казалось бы, что если задача конструирования червячных фрез с удлиненным зубом и разрешима, то изготовление их должно повидимому представлять значительные трудности. На самом деле, как видно будет из дальнейшего, находятся, такие частные случаи профилей изделий (часто встречающихся на практике), для обработки которых конструирование и изготовление червячных фрез с удлиненным зубом не представляет по крайней мере большей трудности, чем при конструировании и изготовлении простых обкаточных червячных фрез.

13. Фрезы червячные с удлиненным зубом для многошпоночных валиков.

Многошпоночный валик, изображенный на рис. 6а и б, имеющий у основания шпоночных выступов остроконечные углы, не может быть осуществлен обыкновенной червячной фрезой, так как у

¹ См. американский патент „John Edhard“ № 1760125 от 27 мая 1930 г.

основания при обработке обкаткой всегда получают закругления (переходные кривые), как изображено на рис. 27. Так как переходные кривые начинаются выше внутреннего диаметра валика, то последний не соединялся бы с многошпоночным отверстием в случае центрирования валика по внутреннему (меньшему) диаметру, или по крайней мере пришлось бы делать большой зазор между валиком и отверстием по внутреннему диаметру.

Для того чтобы шпоночный выступ валика имел прямолинейные стороны до внутреннего диаметра, у фрезы делаются усики, которые образуют на изделии углубления (переходные кривые), расположенные ниже внутренней окружности валика. С другой стороны усики на фрезе делаются для того, чтобы углубления, образованные ими на изделии, способствовали лучшему выходу шлифовального круга, если шпоночный выступ после фрезеровки шлифуется.

Фрезы с усиками имеют тот недостаток, что при работе усики нагреваются и быстро изнашиваются, а следовательно не достигается цель, для которой усики сделаны. Кроме того, очень часто необходимо шпоночные выступы на валике сохранять прямолинейными до самого основания, т. е. до внутреннего диаметра, без того, чтобы делать углубления ниже внутреннего диаметра.

Это требование необходимо выполнить тогда, когда диаметр многошпоночного валика мал, а углубления, образованные усиками фрезы, значительно ослабляют поперечное сечение валика.

Для того чтобы получить на валике выступы с прямолинейным профилем до основания (до окружности впадин), т. е. чтобы получить заостренные углы у основания шпоночного выступа, необходимо применять червячные фрезы с удлиненным зубом. Такая фреза (рис. 31) дает прямолинейные шлицы до окружности впадин и производит у основания выступа закругления, не превышающие 0,1—0,15 мм.

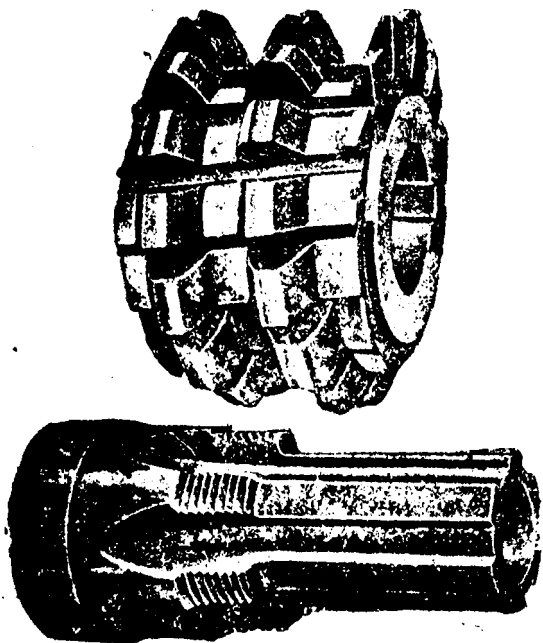
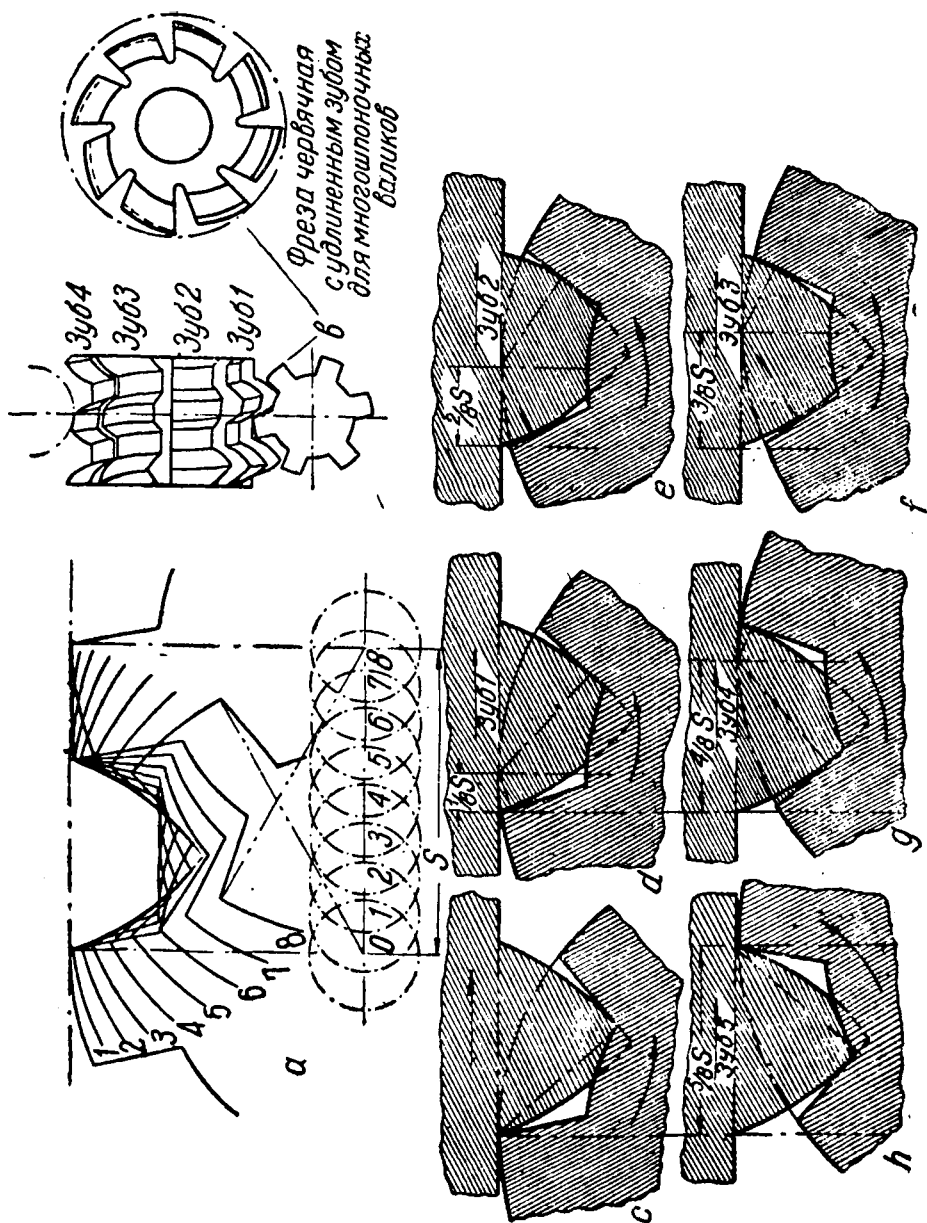


Рис. 31.

Разберем конструкцию фрезы такого типа. Для простоты рассмотрим фрезу для шестишпоночного валика, имеющую по

окружности 8 зубцов. Так как один выступ на валике обрабатывается за один оборот фрезы, то каждый выступ обрабатывается 8 зубцами. На рис. 32а изображены 8 последовательных



положений впадин изделия относительно зуба фрезы при перекатывании начальной окружности изделия по начальной прямой на один шаг = S.

Таким образом каждое новое положение впадины изделия сцепляется с зубом фрезы при повороте последней на 1 зуб. Номера зубцов соответствуют отдельно изображенным положениям зубцов фрезы на рис. 32 *c*, *d* и т. д. Последние два положения не показаны, так как шпоночный выступ валика в последних положениях не сцепляется с зубом фрезы, как видно из рис. 32 *a*.

Чтобы вершина зубца фрезы обрабатывала внутренний диаметр валика методом фасонного фрезерования, необходимо профиль вершины зубцов очертить по дуге окружности, радиус которой равен радиусу внутренней окружности валика. Хотя каждый зубец и очерчивается одной и той же окружностью, но центр этой окружности располагается относительно оси симметрии зубцов различно.

Фреза, изготовленная с такими зубцами, будет обрабатывать методом обкатки боковые прямолинейные стороны валика, а методом фасонного фрезерования будет обрабатывать валик по внутреннему диаметру.

Очевидно, каждый зубец на фрезе будет по форме отличаться от других. Для того чтобы уяснить, какого рода поверхностью очерчиваются вершины зубцов, рассмотрим перемещение зубцов фрезы относительно валика.

Из рис. 32 *d* видно, что начальная окружность первого зубца перекатилась по начальной прямой от первоначального положения слева направо на $\frac{1}{8} S$, где S —шаг фрезы (на $\frac{1}{8} S$ потому, что всего 8 зубцов на фрезе), на втором зубце начальная окружность переместилась слева направо от начала зубца на $\frac{2}{8} S$ и т. д.

Так как зубцы расположены на фрезе по винтовой линии, то первый зубец в свою очередь переместился от первоначального положения справа налево на $\frac{1}{8} S$; второй зубец переместился справа налево на $\frac{2}{8} S$ и т. д.

Отсюда видно, что абсолютное перемещение центра начальной окружности валика равно 0, т. е. центр окружности, по которой должны очерчиваться вершины всех зубцов, не смещается вдоль оси фрезы.

Таким образом приходим к заключению, что вершины зубцов фрезы с удлиненным зубом для шлицевых валиков должны очерчиваться по окружности, диаметр которой равен диаметру впадины валика, и что центр этой окружности для всех зубцов не смещается вдоль оси фрезы. Следовательно вершины всех зубцов фрезы расположены на поверхности тела вращения, которое имеет профиль в осевом сечении в виде полуокружности с радиусом, равным радиусу окружности впадин валика.

К этому заключению можно прийти и другим путем. Действительно, абсолютное перемещение отдельного зубца фрезы есть вращение вокруг оси фрезы; если предположить, что обрабатываемый валик не вращается вокруг своей оси, то зубец фрезы должен работать по методу фасонного фрезерования; имея же очертание внутренней окружности валика, он произведет

в этом случае своей вершиной такой же профиль на изделии. Очевидно, что и при вращении валика вокруг своей оси зубец, имея по вершине очертание внутренней окружности валика, будет производить на изделии такой же профиль.

Из изложенного можно заключить, что возможности осуществления фрезы с удлиненным зубом для шлицевых валиков по крайней мере не более сложны, чем осуществление обычной червячной фрезы. Нужно только при изготовлении и эксплуатации этих фрез учесть следующие моменты:

1. Центр окружности, по которой очерчиваются вершины профилей зубцов, должен быть расположен относительно оси фрезы точно на таком же расстоянии, какое имеется между центром начальной окружности валика и осью фрезы.

2. С другой стороны необходимо, чтобы затылок зубца фрезы по всему профилю снимался с одним и тем же эксцентриситетом, т. е. эксцентриситет на боковых сторонах зубца и на вершине должен быть одинаковым.

Для соблюдения первого условия при изготовлении фрез видимому потребуются специальные шаблоны простейшего типа; а для выполнения второго условия необходимо снимать затылок (задней обточкой или задней шлифовкой) у вершины зуба и по боковому профилю при помощи одного и того же кулачка; тогда падение затылка по всему профилю будет постоянным.

Благодаря тому, что затылок на боковых сторонах зубца снимается по винтовой поверхности, а на вершине зубца снятие затылка производится в плоскости, перпендикулярной оси фрезы, при последующей заточке фрезы окружность, по которой очерчена вершина зубца, будет перемещаться относительно бокового профиля зуба. Не трудно убедиться, что это обстоятельство не вызовет никакого изменения профиля обрабатываемого изделия.

Если простые червячные фрезы при обработке изделия могут устанавливаться вдоль оси фрезы относительно изделия—вообще говоря—как угодно, то фрезы червячные с удлиненным зубом для шлицевых валиков должны устанавливаться таким образом, чтобы центр окружности, по которой очерчены вершины зубцов, совпал с центром обрабатываемого валика, в противном случае профиль валика по окружности впадин получит неправильное очертание (не по окружности). Поэтому фрезы червячные с удлиненным зубом также называются фрезами определенной установки.

Правильную установку фрезы с удлиненным зубом относительно валика можно произвести при помощи простейшего шаблона, или при помощи цилиндрического калибра, установленного в центрах.

Изготовление фрез с удлиненным зубом отличается от изготовления простых червячных фрез для шлицевых валиков тем, что вместо усиков или вместо прямолинейной вершины зуба предварительная обработка и снятие затылка по вершине зуба производятся фасонным резцом (при снятии затылка шлифовкой,

фасонным кругом) с профилем по окружности, равной внутренней окружности валика, причем долбление затылка производится не по винтовой линии, а по окружности, а передняя грань резца устанавливается нормально к средней винтовой линии фрезы, следовательно резец перемещения вдоль оси фрезы не имеет. Из сказанного видно, что изготовление этих фрез не представляет больших трудностей, чем при изготовлении обычных червячных фрез.

Из всех фрез с удлиненным зубом фрезы для шлицевых валиков, т. е. для изделий, у которых дно шлицевой канавки очер-

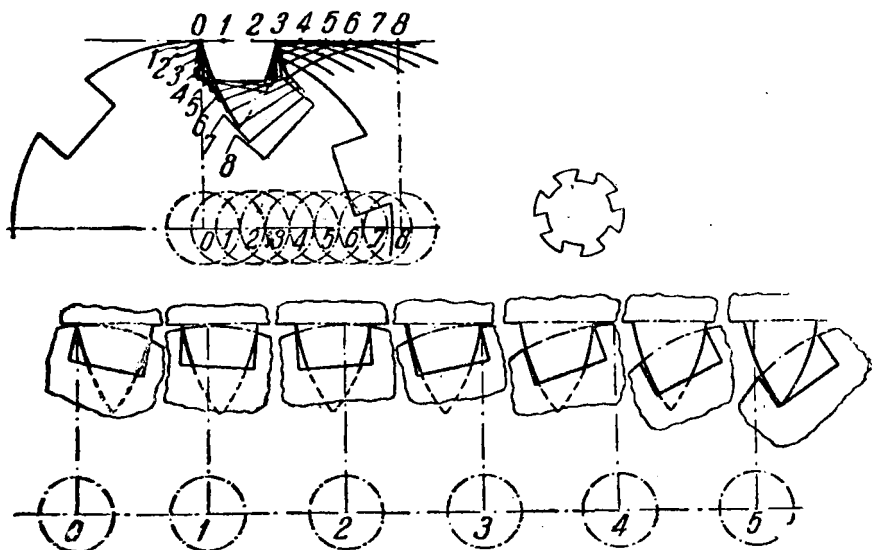


Рис 33.

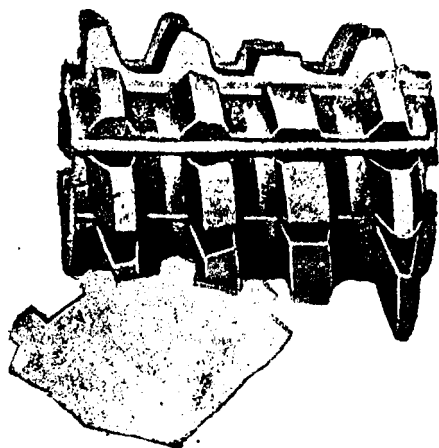


Рис. 34.

чено по окружности, являются простейшими. Но на практике встречаются изделия, у которых дно очерчено прямой линией (плоское). В этом случае, как видно из рис. 33, где изображены различные положения зубцов фрезы и изделия во время обработки, вершины зубцов фрезы должны также очерчиваться по прямой, расположенной у различных зубцов под различными углами к оси фрезы, величину которых можно легко вычислить.

Повидимому для осуществления такой вершины на зубце фрезы следует применить специальное приспособление.

Не разбирая пока вопроса о возможности осуществления такой фрезы, ограничимся указанием на то, что некоторыми фирмами выпускаются фрезы указанного типа, т. е. червячные фрезы с удлиненным зубом для изделий со шлицами с плоским дном впадины (рис. 34).

14. Специальные шлицевые червячные фрезы.

Раньше мы рассматривали главным образом червячные фрезы простейших конструкций, применяемые для обработки многошпоночных валиков и других изделий; однако особые требования при изготовлении шлицевых валиков породили различные конструкции шлицевых червячных фрез. Для систематического изложения особенностей указанных конструкций, приведем сначала профили зубцов фрез, уже ранее рассмотренных.

На рис. 35 *a* изображен зуб червячной шлицевой фрезы без усиков. Эта фреза, как раньше отмечалось, производит острым

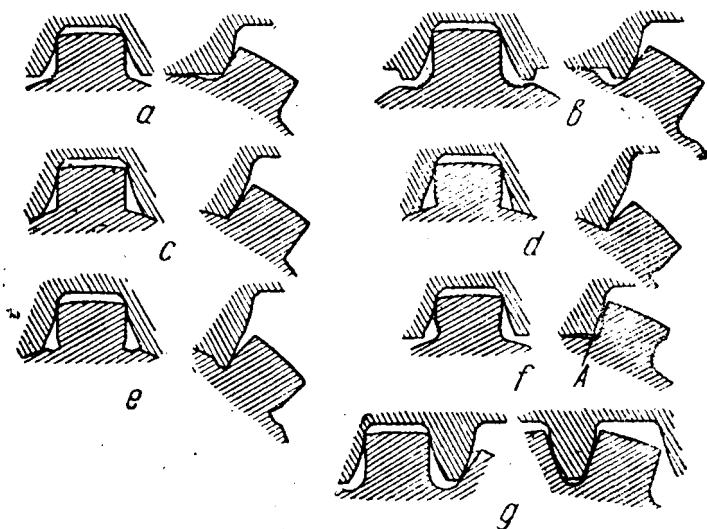


Рис. 35.

краем зуба закругление (в форме удлиненной эвольвенты) у основания шпоночного выступа (рис. 27).

Для того чтобы увеличить прямолинейную часть шпоночного выступа, зуб фрезы снабжен усиками, как изображено на рис. 35 *b*, которые производят закругления, расположенные ниже окружности впадин валика. Для валов с четырьмя и шестью шпонками, т. е. в тех случаях, когда шпоночные канавки у основания вала достаточно широки, этот способ вполне пригоден; но для валов, имеющих восемь, десять или больше шпонок, т. е. когда расстояние между шпонками очень мало, эти закругления будут слишком большими и исключат всякую возможность касания прямо-

линейной части вершины зуба фрезы с окружностью впадин валика (см. рис. 35*g*).

В тех случаях, когда центрирование и посадка валика производятся по наружному диаметру или по бокам шлицевых выступов, обработка производится фрезой без усиков, зуб которой изображен на рис. 35*g*.

На рис. 35*с* изображен зуб фрезы „с удлиненным зубом“, который, как было подробно выяснено раньше, не производит закругления у основания шпоночного выступа.

В тех случаях, когда необходима шлифовка только боковых сторон шпоночного выступа и желательно, чтобы за окружностью впадин не были канавки, то на валике у основания шпоночного выступа делается подрез, как изображено на рис. 35*d*. При этом край шлифовального круга не участвует в работе, следовательно не изнашивается.

Этот подрез осуществляется также червячной фрезой с удлиненным зубом, т. е. указанная фреза осуществляет обработку боковых сторон шпоночных выступов, подрезает бока у основания и обрабатывает окружность впадин точно по заданным размерам чертежа валика.

Подрезание боковых сторон шпоночного выступа можно было бы произвести и простой червячной фрезой, зуб которой имеет два небольших боковых выступа; однако такая фреза, как видно из рис. 35*f*, образует очень высокий подрезанный участок, причем форма его соответствует удлиненной эвольвенте, которую описывает крайняя точка зуба фрезы А. Кроме того всё же получается небольшое закругление у основания шпонки. Поэтому необходимо в этом случае применять червячные фрезы с удлиненным зубом.

Разница между профилями фрез с удлиненным зубом для валиков, разобранных раньше, и для шлицевых валиков с подрезом заключается в том, что фреза, служащая для подрезания, имеет двойной ломаный профиль, верхний участок которого образует прямолинейную боковую сторону шпонки, а нижний — подрез у основания шпонки. Ломаный профиль фрезы для шлицевых выступов с подрезом находится одним из методов построения профиля фрезы по заданному профилю изделия, изложенных раньше.

Для наглядности на рис. 36*a* приведены последовательные положения профиля фрезы относительно изделия с подрезом боковых сторон шпоночных выступов.

Для полного обеспечения неучастия краев шлифовального круга, чтобы последние не изнашивались при шлифовке боковых сторон шпоночных выступов и окружности впадин, у шлицевого валика образуются одновременно боковой подрез и углубление за окружностью впадин. Изготовление такого валика производится при помощи фрезы с удлиненным зубом типа, разобранного в предыдущем случае, но с усиками, как изображено на рис. 35*e*.

На первый взгляд может показаться затруднительной возможность точной обработки валика по окружности впадин из-за су-

a

b

c

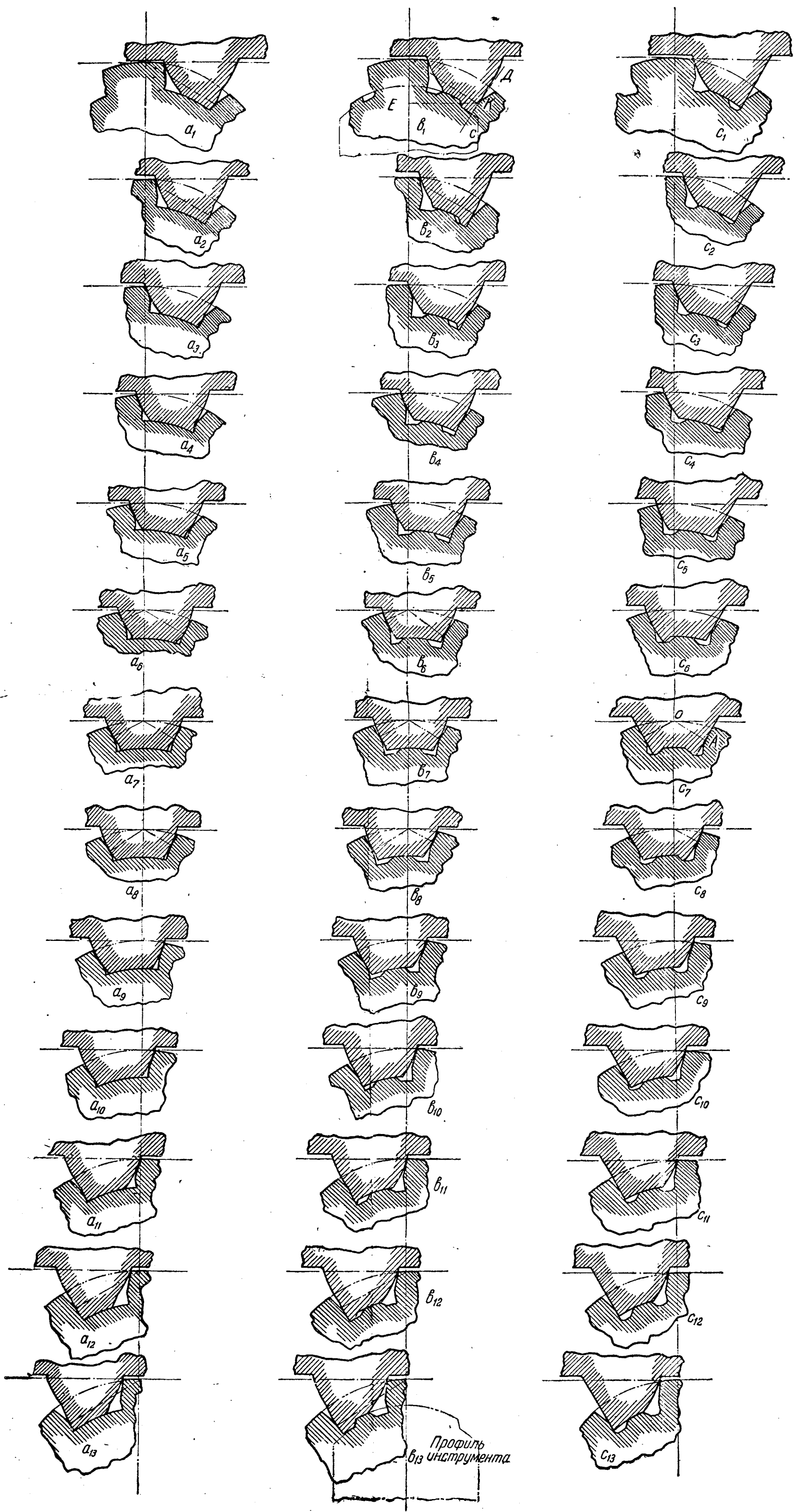


Рис. 36.

ществования усиков; на самом деле усики у фрезы имеются только на некоторых крайних зубцах, на остальных же они отсутствуют. На рис. 36 *b* изображены последовательные положения зубцов рассматриваемой фрезы. Как видно из рисунка, только на двух зубцах с правой и с левой стороны имеются усики, размеры которых полностью совпадают с размерами углубления на изделии; на остальных нескольких зубцах усики неполные. Такое расположение и строение усиков получается благодаря способу изготовления этих фрез, заключающемуся в том, что инструмент, которым обрабатывают вершину зуба, имеет профиль впадины, соответствующий профилю зубцов фрезы с полными усиками (пунктирное построение на рис. 36 *b*).

Инструмент, обрабатывающий вершины зубцов, имея форму по рис. 36 *b*₁ и *b*₂ (показан пунктиром), производит обработку фрезы не по винтовой поверхности, а по поверхности тела вращения, т. е. инструмент во время обработки вершин зубцов не имеет подачи вдоль оси фрезы. Благодаря этому и получается, что крайние зубцы имеют полные усики, а последующие—срезанные или их совсем не имеют.

Количество зубцов, имеющих неполные усики, зависит от числа зубцов фрезы и шага. При конструировании этих фрез может возникнуть вопрос, на каких зубцах фрезы следует расположить первые полные усики. Для решения этого вопроса рассмотрим последовательные положения зубцов фрезы по рис. 36 *b*.

Перпендикуляры, опущенные на прямые профили изделий, которые изображены пунктирными линиями, из полюса зацепления, являются общими нормальными к сопряженным профилям. Следовательно в точке пересечения этих нормалей с профилями происходит зацепление.

Очевидно точка зацепления постепенно передвигается вниз по правой части профиля фрезы. Одновременно точка зацепления левой части профиля передвигается снизу вверх. После зацепления прямолинейного участка профиля шпоночного выступа вступает в зацепление подрезываемый участок.

Положение валика в момент начала подрезания определяет тот зуб фрезы, на котором располагается первый полный усик. Для этого следует из точки *K* (рис. 36 *b*₁) восстановить перпендикуляр к прямой \overline{CD} . Точка пересечения этого перпендикуляра с начальной окружностью будет для точки *K* полюсом зацепления. Хорда \overline{KE} определит форму и ширину инструмента для обработки вершин зубцов фрезы с удлиненным зубом с усиками, как изображено на рис. 36 *b*₁ пунктиром.

Описанный тип фрез для подрезания за окружностью впадин и одновременно бокового подрезания шлицевых выступов предлагается американской фирмой „Barber Colman“. Однако для той же цели германская фирма „Leuchtturm“ предлагает червячную фрезу, но совсем иной конструкции, чем было рас-

смотрено выше. Как видно из рис. 37, где изображены обрабатываемое изделие и этого типа фреза, последняя имеет только один зуб с полными усиками (остальные усики уменьшаются), причем этот зуб не работает методом обкатки, а работает методом фасонного фрезерования, так как он имеет профиль, соответствующий впадине шлицевого валика, но не имеет профиля зубчатой рейки.

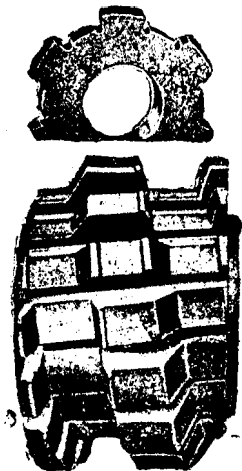


Рис. 37.

Этот зуб фрезы служит для измерения толщины зубцов фрезы, а также для калибровки шлица и установки фрезы в центральное положение относительно оси валика. С одной стороны—справа сверху, с другой—слева внизу от центрального трапециoidalного зуба расположены зубцы, имеющие с одной стороны форму зубчатой рейки, а с другой—профиль очерчен по прямой, проведенной под таким же углом, как у трапециoidalного центрального зуба.

Вершина зубцов очерчена по дуге окружности, равной окружности впадин обрабатываемого изделия.

Для того чтобы было понятно, каким образом указанная фреза подрезает дно и боковые стороны шпоночных выступов, рассмотрим последовательные положения зубцов фрезы, изображенных на рис. 36 с.

Как видно из рисунка, в то время когда криволинейная сторона зуба фрезы образует прямолинейную часть шпоночного выступа, другая прямолинейная сторона производит своей вершиной боковое подрезание, а вершина зуба одновременно обрабатывает окружность впадин валика по методу фасонного фрезерования.

После калибровочного трапециoidalного зуба (рис. 36 с₇) обрабатывается вторая прямолинейная сторона впадины, а у противоположной стороны производится подрезание. Очевидно, начиная с центрального трапециoidalного зуба, у которого точка зацепления (при обработке изделия методом обкатки) находится на перпендикуляре OA , ниже точки A происходит обработка изделия трапециoidalной стороной зуба фрезы по эвольвенте на небольшом участке, а затем происходит подрезание.

Конструкция фрезы фирмы „Leuchtturm“—более сложная, нежели рассмотренная конструкция фирмы „Barber Colman“; кроме того германская конструкция повидимому сложнее в изготовлении. Всё же их полную сравнительную оценку может установить практика их изготовления и применения.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ ОПРЕДЕЛЕННОЙ УСТАНОВКИ.

15. Фрезы для храповых колес.

Червячная фреза определенной установки, как показывает само название, может быть установлена на оправке, так же как и простые фасонные фрезы, только в одном положении относительно обрабатываемого изделия. По своей конструкции эта фреза подобна обычной фасонной фрезе за исключением того, что имеет спиральный зуб.

Наиболее характерным типом фрез определенной установки являются червячные фрезы для храповых колес (рис. 38). Обычно требуется, чтобы зуб у храповых колес был прямолинейным до основания и имел заостренную впадину.

Если обработать храповое колесо червячной фрезой, работающей по методу обкатки, профиль которой построен одним из изложенных выше методов, то такая фреза образовала бы у дна впадины закругление (переходную кривую, которая примерно равна $\frac{1}{3}$ полной высоты зуба). Если указанный размер закругления велик, то необходимо применять червячные фрезы определенной установки. Даже в том случае, когда целесообразно иметь закругление у дна впадины, применение фрез определенной установки является тоже рациональным, так как эти фрезы имеют простейшую геометрическую форму профиля, т. е. они имеют такой же профиль, как у изделия, поэтому изготовление этих фрез менее сложно, чем обычных червячных фрез.

Червячные фрезы определенной установки обрабатывают профиль изделия точно.

Для того чтобы разобрать вопрос о конструировании фрез определенной установки, рассмотрим червячные фрезы для храповых колес. Как раньше было установлено, профиль фрезы определенной установки тот же, что и у обрабатываемого изделия.

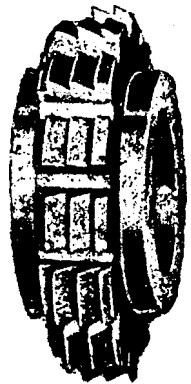


Рис. 38.

Рассмотрим, как такая фреза производит обработку зубцов храпового колеса. Из рис. 39, где изображены последовательные положения зубцов этой фрезы относительно изделия, видно, что зубцы врезаются в материал постепенно до тех пор, пока не выйдет из работы последний зуб фрезы, после которого обработка впадины прекращается.

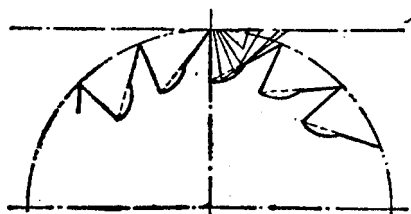


Рис. 39.

Если фрезу установить так, чтобы продолжение стороны прямолинейного профиля зубца проходило через ось обрабатываемого изделия, то передняя грань зубца храпового колеса осталась бы также прямолинейной и была бы радиальной. Таким образом, благодаря вращению изделия вокруг своей оси и относительному перемещению зубцов фрезы, на каждый новый зуб подается некоторый слой материала; но последний зуб фрезы, снимая последний слой материала, определяет положение и форму передней грани зуба храпового колеса.

Если бы за последним зубом фрезы были расположены еще зубцы, то они подрезали бы переднюю грань, отчего получился бы искаженный профиль на изделии.

Поэтому обработка впадины прекращается после образования правильного профиля на изделии последним зубом фрезы, благодаря тому, что зубцы фрезы после чистового удалены (рис. 40).

Следует отметить, что при неудачном выборе шага фрезы может получиться также срезание вершины зуба храпового колеса, что будет подробно рассмотрено ниже.

С другой стороны, как видно из рис. 39, где изображено несколько последовательных положений последних зубцов фрезы, вершины этих зубцов подрезают спинку зуба храпового колеса, отчего последняя получается неправильного очертания.

Во избежание подрезания спинки (рис. 41) необходимо срезать вершины зубцов фрезы, как указано пунктирными линиями; чтобы весь профиль предпоследних зубцов фрезы не заходил за пределы профиля впадины храпового колеса. Не трудно убедиться, что

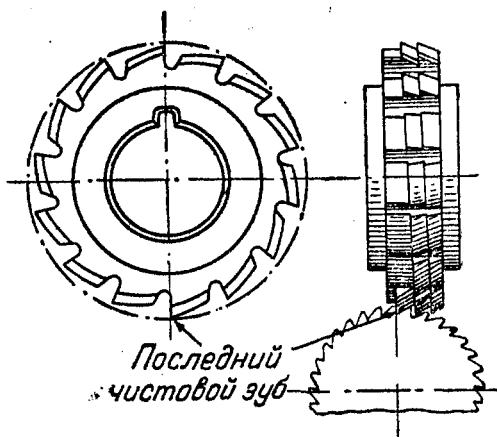


Рис. 40.

Для получения зубцов фрезы со срезанными вершинами нужно, чтобы червячная фреза располагать на конической поверхности, т. е. червячную фрезу необходимо изготовить с конусной нарезкой. На рис. 42 показано, что в последовательных положениях зубцы конусной фрезы не подрезают зуб изделия.

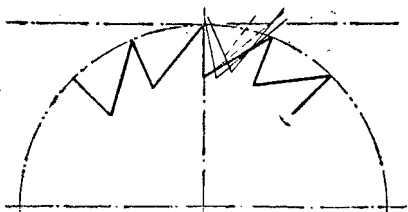


Рис. 41.

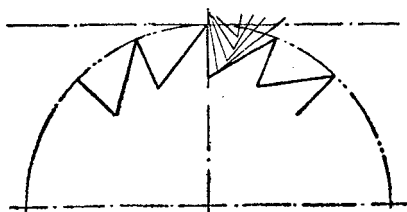


Рис. 42.

Таким образом червячная фреза определенной установки должна иметь следующие конструктивные особенности:

1. Профиль фрезы должен совпадать с профилем впадины на изделии.
2. Нарезка профиля фрезы должна быть конусной.
3. Зубцы фрезы, расположенные после чистового зуба, должны быть удалены.
4. Фрезу при обработке изделия необходимо установить таким образом, чтобы последний чистовой зуб совпал с профилем впадины изготавливаемого изделия.

Из перечисленных особенностей фрезы некоторые затруднения могут встретиться при определении величины наименьше допустимой конусности нарезки червячной фрезы. Действительно, конусность фрезы нужно выбрать вполне определенной, так как при малой конусности может всё еще получаться подрезание спинки зуба изделия. При большой же конусности будет в работе принимать участие небольшое количество зубцов фрезы, так как расстояние последовательных зубцов фрезы от оси последней будет быстро уменьшаться, а следовательно нагрузка на каждый работающий зуб будет возрастать, что ухудшит условия работы фрезы и чистоту обрабатываемой поверхности.

Прежде чем определить конусность нарезки фрезы, отметим следующее важное обстоятельство, имеющее отношение к конструированию фрез определенной установки. Кроме обычных способов, нарезку конусной резьбы можно осуществить, нарезав

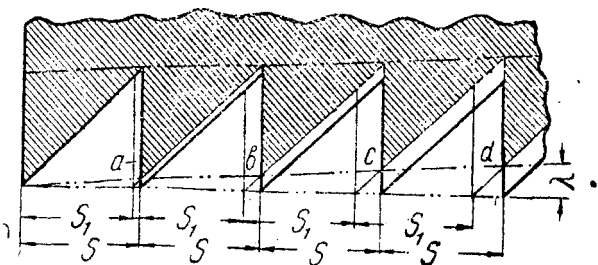


Рис. 43.

предварительно цилиндрическую резьбу с одним шагом S_1 , а затем цилиндрическую резьбу с другим шагом S_2 . Действительно, на рис. 43 вычерчено осевое сечение профиля цилиндрической резьбы с шагом S . На указанный профиль нанесен пунктиром линия такой же профиль, но с шагом S_1 .

Очевидно, их общие точки пересечения a, b, c и т. д. лежат на конической поверхности. Таким же способом можно нарезать червячные фрезы определенной установки. Этот способ осуществления конусной нарезки для данного случая чрезвычайно прост и не требует специальных приспособлений к станку.

Таким образом задача отыскания конусности нарезки червячной фрезы определенной установки сводится к задаче определения первичной нарезки с шагом S_1 и вторичной нарезки с шагом S_2 .

Определение шагов первичной и вторичной нарезок фрезы можно произвести графическим или аналитическим путем.

Следует указать на то обстоятельство, что относительное перемещение зубцов фрезы определенной установки (относительно обрабатываемого изделия) нельзя рассматривать как движение взаимных сопряженных профилей, так как указанная фреза не имеет профиля сопряженной рейки; поэтому задача отыскания первичной и вторичной нарезок излишне усложнилась бы, если бы мы при решении этой задачи ввели понятия о начальной окружности и начальной прямой. Поэтому правильнее непосредственно рассмотреть два последовательных положения изделия и зубцов фрезы.

Неточность шагов фрезы определенной установки не влияет на точность профиля изделия, как это имеет место у червячных фрез, рассмотренных раньше; поэтому графический метод определения шага первичной и вторичной нарезок вполне допустим при конструировании указанных фрез. Однако для большей гарантии того, что подрезания зуба изделия не будет, следует больший шаг фрезы несколько увеличить, а меньший несколько уменьшить по сравнению с полученными графическим способом величинами шагов.

Графическое нахождение шагов первичной и вторичной нарезок производим следующим образом (рис. 44). Вычерчиваем в увеличенном масштабе профиль изделия (как указано на рисунке пунктиром), затем вычерчиваем профиль изделия в повер-

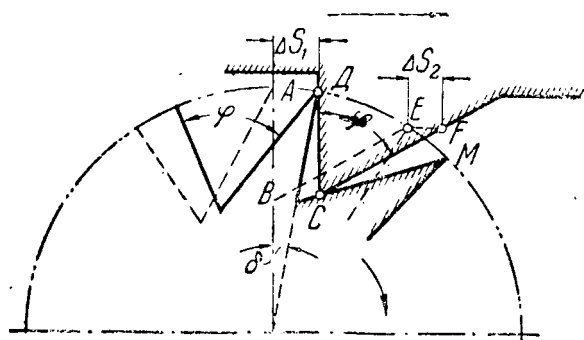


Рис. 44.

ной нарезки производим следующим образом (рис. 44). Вычерчиваем в увеличенном масштабе профиль изделия (как указано на рисунке пунктиром), затем вычерчиваем профиль изделия в повер-

нотом относительно первоначального положении на угол δ , где δ —угол поворота изделия за время поворота фрезы вокруг своей оси на один зуб.

Так как за один оборот фрезы изделие поворачивается на угол, равный $\frac{360^\circ}{n}$, где n —число зубцов изделия, то при повороте фрезы на один зуб изделие повернется на угол

$$\delta = \frac{360^\circ}{n \cdot z}, \quad (49)$$

где z —число зубцов фрезы. При повороте изделия на угол δ , а следовательно при повороте фрезы на один зуб, образующая зуба фрезы AB должна переместиться вдоль оси фрезы от первоначального положения по крайней мере в положение DC , т. е. не меньше чем на величину ΔS_1 , в противном случае будет срезаться вершина зуба изделия D .

Поэтому для графического определения шага первичной нарезки достаточно через точку D провести линию, параллельную первоначальному положению левой стороны зуба фрезы AB . Расстояние от прямой CD до прямой AB и будет равно ΔS_1 —расстоянию вдоль оси фрезы между двумя соседними зубцами, расположенными по окружности.

Следовательно шаг первичной нарезки фрезы будет

$$S_1 \geq \Delta S_1 z, \quad (50)$$

где z —число зубцов фрезы.

Для определения величины вторичной нарезки ΔS_2 нам нужно правую образующую зуба фрезы \overline{CF} расположить таким образом, чтобы вершина зуба фрезы C по крайней мере лежала на прямой профиля изделия \overline{CM} , чтобы не было подрезки спинки зуба изделия. Следовательно из точки C проводим прямую CF , параллельную первоначальному положению прямой профиля изделия, а следовательно и фрезы \overline{BE} .

Расстояние от точки E до прямой профиля фрезы CF , измеренное в направлении, параллельном оси фрезы, $EF = \Delta S_2$. Отсюда шаг вторичной нарезки будет

$$S_2 = \Delta S_2 z, \quad (51)$$

где z —число зубцов фрезы.

Несколько сложнее, зато с любой степенью точности, можно определить шаги первичной и вторичной нарезок аналитическим путем (рис. 45).

Для решения этой задачи считаем известными следующие размеры профиля обрабатываемого изделия:

$2R$ —диаметр вершин зубцов,

H —высота зуба (от вершины выступа до дна впадины),

- φ —угол впадины профиля изделия, а следовательно и зуба фрезы,
 δ —угол поворота изделия на 1 зуб фрезы, определяемый по формуле (49),
 θ —центральный угол впадины изделия,
 n —число зубцов изделия,
 z —число зубцов фрезы.

На рис. 45 изображено пунктиром первоначальное положение изделия, так же как при графическом построении, сплошной

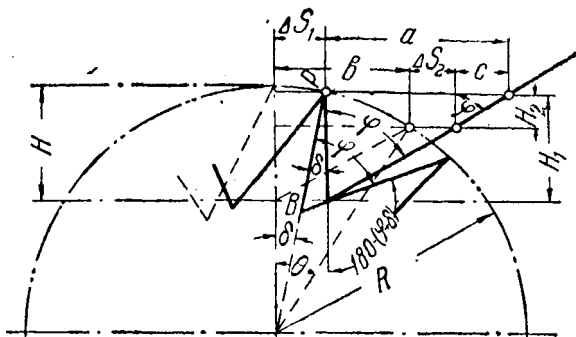


Рис. 45.

линией—изделие повернуто на угол δ .

Задача заключается в отыскании ΔS_1 и ΔS_2 .

Из рис. 45 видно:

$$\Delta S_1 = R \sin \delta. \quad (52)$$

Обозначая отрезки буквами, имеем:

$$\Delta S_2 = \Delta S_1 + a - b - c. \quad (53)$$

Из треугольника, образованного передними гранями зубцов фрезы и изделия, имеем:

$$\frac{H_1}{\sin \varphi} = \frac{H}{\sin (180 - \varphi - \delta)},$$

откуда

$$H_1 = \frac{H \sin \varphi}{\sin (\varphi + \delta)}.$$

Тогда

$$a = H_1 \operatorname{tg} \varphi = \frac{H \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi}{\sin (\varphi + \delta)},$$

$$b = R \sin \theta,$$

$$H_2 = R \cos \delta - R \cos \theta,$$

откуда

$$c = H_2 \operatorname{tg} \varphi = R \operatorname{tg} \varphi (\cos \delta - \cos \theta).$$

Подставляя значения ΔS_1 , a , b и c в формулу (53) для ΔS_2 , имеем:

$$\Delta S_2 = R \sin \delta + \frac{H \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi}{\sin (\varphi + \delta)} - R \sin \theta - R \operatorname{tg} \varphi (\cos \delta - \cos \theta).$$

Упрощая, получаем:

$$\Delta S_2 = H \frac{\sin \varphi \operatorname{tg} \varphi}{\sin (\varphi + \delta)} - \frac{2R}{\cos \varphi} \sin^{1/2} (\theta - \delta) \cos^{1/2} (2\varphi - \theta - \delta). \quad (54)$$

Определение шагов первичной и вторичной нарезок производим, как раньше было изложено, а именно:

$$S_1 = z \Delta S_1 \text{ и } S_2 = z \Delta S_2,$$

где z —число зубцов фрезы.

Как видно из рис. 45, полученное по формуле (52) значение ΔS_1 определяет минимально допустимую величину шага S_1 .

Мы произвели расчет шага S_1 при условии, что первый зуб после чистового зуба фрезы не срезает вершину зуба изделия. Нетрудно доказать в этом случае, что последующие зубцы фрезы подавно не будут срезать вершину зуба изделия. Для этого нам нужно доказать, что величина шага $\Delta S'$ фрезы, рассчитанной для поворота изделия на угол 2δ , меньше чем $2\Delta S_1$, т. е. необходимо, чтобы $\Delta S' < 2\Delta S_1$. Действительно, из формулы (52) получаем $\Delta S' = R \sin 2\delta$, $\Delta S_1 = R \sin \delta$. Но $\sin 2\delta = 2 \sin \delta \cos \delta$, откуда видно, что $2 \sin \delta > \sin 2\delta$, а следовательно $2\Delta S_1 > \Delta S'$.

Определение конусности нарезки можно произвести следующим образом, зная шаги первичной и вторичной нарезок S_1 и S_2 .

На рис. 46 буквой k обозначена величина срезания соседнего зуба фрезы, ΔS есть разность шагов первичной и вторичной нарезок. Отсюда имеем:

$$k = \Delta S \operatorname{ctg} \varphi = (S_1 - S_2) \operatorname{ctg} \varphi. \quad (55)$$

Половина угла конуса нарезки λ определяется

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{k}{S_1} = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1} \right) \operatorname{ctg} \varphi$$

или

$$\operatorname{tg} \lambda = \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \operatorname{ctg} \varphi. \quad (56)$$

Как видно из рис. 44, ΔS_2 может быть больше, меньше или равно ΔS_1 , т. е. $\Delta S_2 \geq \Delta S_1$, или, что то же, $S_2 \geq S_1$.

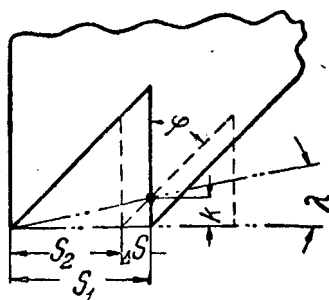


Рис. 46.

В этом случае может получиться конусность различного направления, и в частном случае при $S_2 = S_1$ фреза будет иметь цилиндрическую нарезку.

Червячные фрезы определенной установки можно применять также и для других профилей изделий с симметричным или несимметричным угловым профилем, в частности при обработке храповых колес с поднутренной передней гранью. В последнем случае фрезу необходимо конструировать и устанавливать так, чтобы продолжение прямолинейной передней части профиля фрезы отстояло от центра изделия и было на расстоянии

$$h = R \sin \beta, \quad (57)$$

где R —наружный радиус изделия,
 β —угол поднутрения, как изображено на рис. 47.

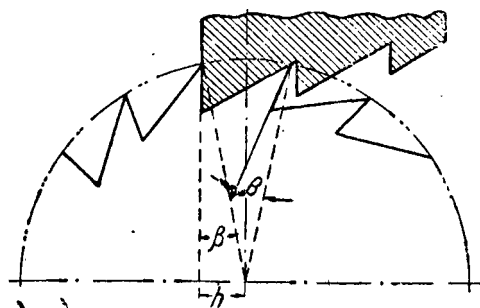


Рис. 47.

Из недостатков этих фрез следует отметить их невысокую производительность. В самом деле, только последний зуб калибрует профиль изделия, а следовательно определяет размеры изделия. Поэтому придется давать фрезу небольшую подачу на один оборот фрезы, что является недостаточно экономичным.

Пример 11. Определить шаги первичной и вторичной нарезок, а также конусность фрезы определенной установки для храпового колеса следующих размеров:

Диаметр вершин зубцов	$2R = 80$ мм
Угол впадины	$\varphi = 60^\circ$
Число зубцов колеса	$n = 20$
Центральный угол зуба	$\theta = \frac{360}{n} = \frac{360}{20} = 18^\circ$
Высота зуба колеса	$H = 9,1$ мм.

Задаемся числом зубцов (заточных канавок) фрезы $z = 14$. Тогда угол поворота изделия за время поворота фрезы на 1 зуб будет:

$$\delta = \frac{360}{nz} = \frac{360}{20 \cdot 14} = 1,286^\circ = 1^\circ 17'.$$

Шаг первичной нарезки будет

$$\Delta S_1 = R \sin \delta = 40 \cdot 0,0224 = 0,896 \text{ мм};$$

$$S_1 = z \Delta S_1 = 14 \cdot 0,896 = 12,54 \text{ мм}.$$

Определяем шаг вторичной нарезки:

$$\Delta S_2 = \frac{H \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi}{\sin (\varphi + \delta)} - \frac{2R}{\cos \varphi} \sin \frac{1}{2} (\theta - \delta) \cos \frac{1}{2} (2\varphi - \theta - \delta);$$

$$\Delta S_2 = \frac{9,1 \cdot \sin 60^\circ \operatorname{tg} 60^\circ}{\sin 61^\circ 17'} - \frac{80}{\cos 60^\circ} \sin 8^\circ 21' \cos 50^\circ 21';$$

$$\Delta S_2 = \frac{9,1 \cdot 1,5}{0,877} - \frac{80}{0,5} \cdot 0,145 \cdot 0,638 = 0,75;$$

$$S_2 = z \Delta S_2 = 14 \cdot 0,75 = 10,50 \text{ мм.}$$

Определяем конусность нарезки фрезы:

$$\operatorname{tg} \lambda = \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \operatorname{ctg} \varphi = \left(1 - \frac{10,5}{12,54} \right) \cdot 0,577;$$

$$\operatorname{tg} \lambda = 0,09388 \text{ и } \lambda = 5^\circ 22'.$$

16. Фрезы „улитки“¹.

Эти фрезы служат главным образом для нарезания многоходовых и одноходовых червяков. Такими же фрезами могут быть обработаны и другие виды изделий. Название „улитки“ эти фрезы получили на наших заводах благодаря расположению зубцов по винтовой линии и возрастанию их высоты по радиусу (рис. 48).

Червячные фрезы „улитки“ являются также фрезами определенной установки и ничем в принципе от приведенного выше типа фрез для храповых колес не отличаются, за исключением того, что у фрез „улиток“ работа резания распределена между зубцами более рационально, чем у фрез для храповых колес. Форма профиля у этих фрез такая же, как у изделия.

Обыкновенно эти фрезы имеют только от полутора до двух витков, благодаря чему все зубцы фрезы участвуют в работе.

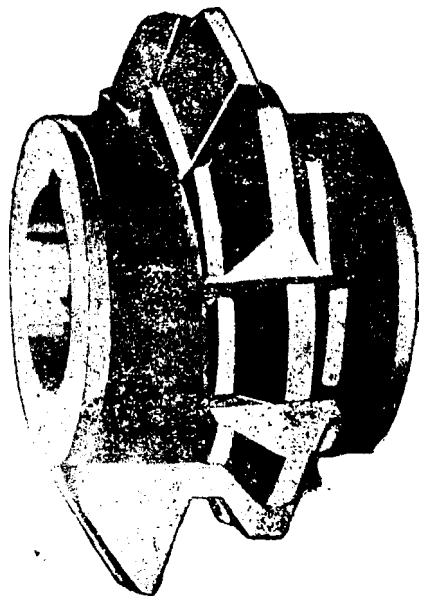


Рис. 48.

¹ Фреза „улитка“ изобретена в Америке в 1921 г. и запатентована 26 сентября 1922 г. (см. американские патенты от 26 сентября 1922 г. № 1430485 и серийный № 440782).

При обработке многоходовых червяков с углом подъема средней винтовой линии $\alpha_ч$, фреза устанавливается таким образом, чтобы витки фрезы совпали с направлением впадин ниток червяка; поэтому фреза поворачивается на угол между осью фрезы и червяка $\alpha = \alpha_ч \pm \alpha_ф$, где $\alpha_ф$ — угол подъема фрезы.

Знак $+$ или $-$ берется в зависимости от того, является фреза правой или левой.

Если бы в данном случае применить обычные червячные фрезы, то было бы необходимо делать фрезу очень длинной из-за того, что при сечении червяка плоскостью, нормальной к средней винтовой линии, радиус кривизны идеальной наружной окружности очень велик и в зацеплении одновременно находилось бы большее количество зубцов.

При обработке изделий простыми червячными фрезами величина снимаемого одним зубцом слоя материала определяется, при постоянном числе зубцов фрезы, величиной шага фрезы и передаточным отношением между числами оборотов фрезы и изделия. При этом каждый зубец снимает различный по величине слой материала. Это обстоятельство между прочим характеризует недостатки и всех других червячных фрез.

У фрез-„улиток“ величина снимаемого слоя материала зависит в меньшей степени от кинематических условий работы фрезы, а в большей степени от конструкции „улитки“. Для этого, как было указано выше, работа резания распределяется между зубцами „улитки“ главным образом по вершинам, именно вершины зубцов „улитки“ последовательно срезаются таким образом, что их высота изменяется от некоторого минимума до высоты, равной полной глубине канавки профиля изделия.

Для установления целесообразности такого уменьшения высоты зубцов рассмотрим случаи изготовления фрезой-улиткой зубчатой рейки.

Изготовить рейку при помощи червячной фрезы можно, придавая фрезе вращательное движение, а рейке—

поступательное вдоль оси фрезы. При этом за один оборот фрезы рейка должна продвинуться вперед на один шаг. Профиль рейки в данном случае будет в точности соответствовать профилю фрезы. Если нарезать рейку простой червячной фрезой

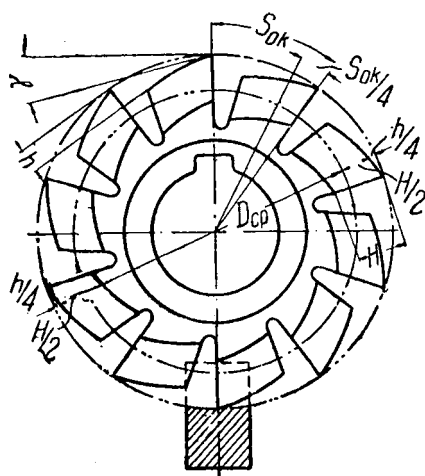


Рис. 49.

с трапециoidalным профилем, то мы рейку получим с таким же трапециoidalным профилем.

Теперь рассмотрим, как в данном случае будет распределена работа резания между зубцами фрезы.

Как видно из рис. 49, первый зубец, выйдя из зацепления, будет последовательно входить и снимать новый слой материала на полную глубину профиля, а все последующие зубцы фрезы будут проходить по тем же местам, где был первый зубец, так как первым зубцом снят материал на полную глубину, последующим зубцам нечего будет снимать (предполагается, что фреза не имеет подачи) и они будут работать вхолостую. Если бы работа такой фрезой имела место, то, ввиду большой нагрузки на первый зуб, последний мог бы сломаться.

Совсем иначе будет сниматься материал, если нарезать рейку червячной фрезой с постепенно увеличивающейся высотой зуба. Как видно из рис. 50, последующие зубцы фрезы снимают слой материала, толщина которого равна разности высот двух соседних зубцов по окружности. Все зубцы такой фрезы принимают участие в работе, причем нагрузка на зуб определяется разностью высот двух соседних зубцов. Величина нагрузки задается из наилучших условий работы фрезы.

Таким образом работа резания фрезы с постепенно увеличивающейся высотой зуба аналогична работе резания червячной фрезы с заборным конусом, служащей для нарезания червячных колес при осевой подаче фрезы. При обработке колес или червяков фрезой „улиткой“ работа резания несколько отличается от работы резания при нарезании рейки, что ниже будет рассмотрено подробнее.

Фрезы „улитки“ имеют, так же как и фрезы для храповых колес, конусную нарезку, которая может осуществляться также изменением шага вторичной нарезки. Благодаря этому зубцы фрезы изменяются не только по высоте, но и по толщине. Необходимость конической нарезки на фрезе „улитке“ обусловливается тем же, что и у фрез для храповых колес.

В данном случае определение необходимой конусности нарезки фрезы производится несколько иначе, чем у фрез для храповых колес. Рассмотрим случай нарезки многоходового червяка с числом заходов n .

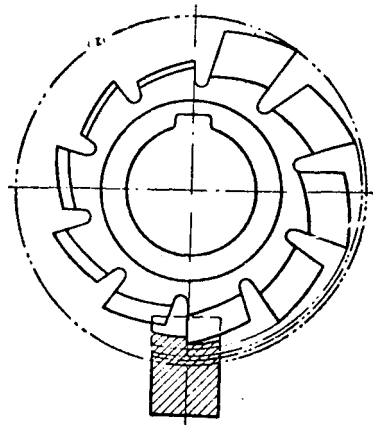


Рис. 50.

Профиль фрезы должен совпасть с профилем червяка в сечении по нормали к средней винтовой линии; поэтому и весь расчет конусности фрезы несколько видоизменится.

Сначала определим угол δ_n поворота червяка в нормальной плоскости при повороте фрезы на 1 зуб.

При определении угла поворота изделия на 1 зуб фрезы у храповых колес мы получили значение (49) $\delta = \frac{360}{nz}$; но в данном случае нам нужно определить поворот изделия в нормальной плоскости к средней винтовой линии. Здесь угол поворота изделия также определится по формуле (49) с той только разницей, что вместо действительного числа зубцов (или заходов) изделия n нужно поставить идеальное число зубцов, которое определяется, как у винтовых зубчатых колес, по формуле:

$$n_n = \frac{n}{\sin^3 \alpha_q}, \quad (58)$$

где n — число зубцов (заходов) изделия,

α_q — угол подъема средней винтовой линии изделия.

Тогда угол поворота изделия в нормальной плоскости за поворот фрезы на 1 зуб будет:

$$\delta_n = \frac{360}{zn_n}. \quad (59)$$

Подставив значение (58) в формулу (59), получим:

$$\delta_n = \frac{360 \sin^3 \alpha_q}{n \cdot z}, \quad (60)$$

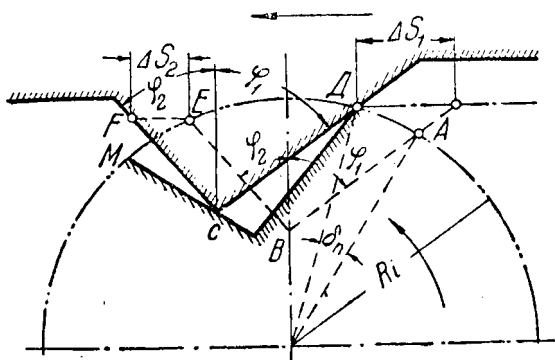


Рис. 51.

где α_q — угол подъема червяка,
 n — число заходов,
 z — число зубцов фрезы.

Определение шага первичной и вторичной нарезок фрезы производится в таком же порядке, как у фрез для храповых колес. Здесь также можно решить эту задачу графическим или аналитическим путем.

Для охвата решением данной задачи возможно большего количества случаев, ниже рассматриваем тот случай, когда профиль изделия двухугловой и несимметричный (рис. 51). Затем

Находим данные для частного случая, когда профиль изделия симметричный.

Ниже мы определяем шаги первичной и вторичной нарезок для обработки многоходового червяка. Все формулы, полученные для указанной фрезы, будут справедливы также для фрез, обрабатывающих изделия с угловыми прямолинейными (не спиральными) шлицами. Разница в подсчете будет заключаться в том, что угол поворота изделия с прямолинейными шлицами, за время поворота фрезы на один зуб, будет в этом случае определяться, как у фрез для храповых колес:

$$\delta = \frac{360}{n \cdot z},$$

где n —число зубцов изделия,
 z —число зубцов фрезы.

Кроме этого при расчете фрезы для обработки многоходового червяка, вместо действительного радиуса наружной окружности R , в формулах должен фигурировать идеальный радиус изделия R_1 , взятый в плоскости, нормальной к средней винтовой линии червяка. Радиус этот определится так же, как у винтовых зубчатых колес, по формуле:

$$R_1 = \frac{R}{\sin^2 \alpha_q}, \quad (61)$$

где R_1 —радиус идеальной окружности,

R —радиус наружной окружности червяка,

α_q —угол подъема средней винтовой линии обрабатываемого червяка.

Для изделий с прямолинейными шлицами $\alpha_q = 90^\circ$, следовательно $R_1 = R$, и в этом случае в расчете будет фигурировать R —радиус наружной окружности изделия.

Графическое определение шагов первичной и вторичной нарезок фрезы можно произвести следующим построением (рис. 51).

Вычерчиваем заданный профиль изделия в нормальной плоскости к средней винтовой линии червяка (см. пунктирное построение). За радиус наружной окружности принимаем радиус идеальной окружности R_1 , определяемый по формуле (61). Затем вычерчиваем профиль изделия в повернутом относительно первоначального положения на угол δ_n , определяемый по формуле (60).

При повороте изделия на угол δ_n и следовательно при повороте фрезы на угол зуба, образующая зуба фрезы \overline{AB} должна переместиться вдоль оси фрезы от первоначального положения по крайней мере в положение \overline{DC} , т. е. не меньше, чем на величину ΔS_1 , в противном случае будет срезаться вершина зуба изделия D . Поэтому для определения шага первичной нарезки

достаточно через точку D провести линию, параллельную первоначальному положению левой стороны зуба AB .

Расстояние от прямой \overline{CD} до прямой \overline{AB} , измеренное в направлении, параллельном оси фрезы, и будет равно ΔS_1 —расстоянию по оси фрезы между двумя соседними зубцами, расположенными по окружности.

Следовательно шаг правой поверхности фрезы будет

$$S_1 = \Delta S_1 z, \quad (62)$$

где z —число зубцов фрезы.

Для определения величины вторичной нарезки ΔS_2 нам нужно правую образующую зуба фрезы \overline{CF} расположить таким образом, чтобы она была параллельна первоначальному положению образующей фрезы \overline{BE} и проходила через точку C пересечения прямой \overline{DC} с образующей профиля изделия \overline{BM} . Если образующая зуба будет расположена за точкой C , то профиль изделия будет подрезаться.

Расстояние от точек E до прямой профиля фрезы \overline{CF} , измеренное в направлении, параллельном оси фрезы,

$$EF = \Delta S_2.$$

Отсюда шаг вторичной нарезки будет

$$S_2 = \Delta S_2 z, \quad (63)$$

где z —число зубцов фрезы.

Для аналитического определения шагов нарезки S_1 и S_2 считаем известными следующие размеры изделия:

$2R$ —диаметр наружной окружности,

φ_1 —угол между прямой профиля изделия, расположенной справа, и радиусом, проходящим через впадину профиля,

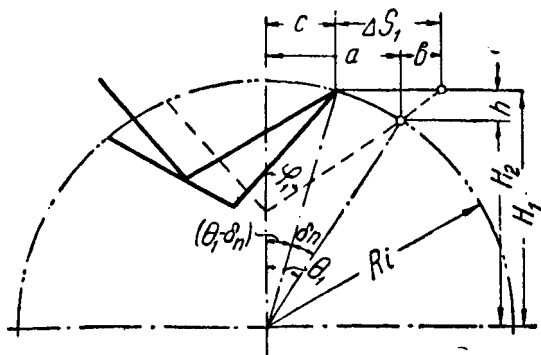


Рис. 52.

φ_2 —угол левой части профиля,

θ_1 —угол между радиусом, проведенным через точку пересечения правой стороны профиля с наружной окружностью, и радиусом, проведенным через нижнюю точку впадины профиля,

θ_2 — такой же угол для левой стороны профиля,
 δ_n — угол поворота изделия в нормальной плоскости за время поворота фрезы
 на угол зуба, определенный по формуле (60),
 n — число зубцов (для червяков число заходов) изделия,
 z — число зубцов фрезы,
 R_1 — радиус идеальной окружности изделия.

Определяем сначала ΔS_1 (рис. 52). Для удобства обозначаем отрезки буквами a , b , c и ΔS_1 . Вычерченные два положения профиля изделия и фрезы для большей ясности приведены в соответствие с рис. 51, где графически определяются ΔS_1 и ΔS_2 :

$$\Delta S_1 = a + b - c. \quad (64)$$

$$a = R_1 \sin \theta_1;$$

$$H_2 = R_1 \cos \theta_1; \quad H_1 = R_1 \cos (\theta_1 - \delta_n);$$

$$h = H_1 - H_2 = R_1 [\cos (\theta_1 - \delta_n) - \cos \theta_1];$$

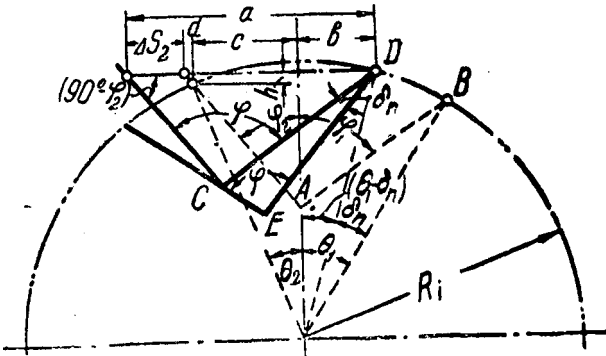


Рис. 53.

$$b = h \operatorname{tg} \varphi_1 = R_1 \operatorname{tg} \varphi_1 [\cos (\theta_1 - \delta_n) - \cos \theta_1];$$

$$c = R_1 \sin (\theta_1 - \delta_n).$$

Подставляя найденные величины в формулу (64), имеем:

$$\Delta S_1 = a + b - c =$$

$$= R_1 \left\{ \sin \theta_1 + \operatorname{tg} \varphi_1 [\cos (\theta_1 - \delta_n) - \cos \theta_1] - \sin (\theta_1 - \delta_n) \right\}.$$

Преобразовывая, получаем:

$$\Delta S_1 = \frac{2R_1}{\cos \varphi_1} \cdot \sin \frac{\delta_n}{2} \cdot \cos \left(\varphi_1 + \frac{\delta_n}{2} - \theta_1 \right); \quad (65)$$

и шаг правой стороны профиля фрезы будет $S_1 = \Delta S_1 z$.

Как видно из формулы, ΔS_1 зависит только от размеров правой стороны профиля изделия, но не зависит от элементов левой стороны профиля.

Определение величины ΔS_2 производим следующим образом (рис. 53):

$$\Delta S_2 = a - b - c - d. \quad (66)$$

$$\frac{\overline{AB}}{\sin \theta_1} = \frac{R_1}{\sin \varphi_1}, \text{ откуда } \overline{ED} = \overline{AB} = \frac{R_1 \sin \theta_1}{\sin \varphi_1}.$$

Из $\triangle ECD$ имеем

$$\frac{\overline{CD}}{\sin \varphi} = \frac{\overline{ED}}{\sin(\varphi + \delta_{II})}, \text{ откуда } \overline{CD} = \frac{\overline{ED} \sin \varphi}{\sin(\varphi + \delta_{II})},$$

где $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$.

Подставляя значения \overline{ED} , имеем:

$$\overline{CD} = \frac{R_1 \sin \theta_1 \sin \varphi}{\sin \varphi_1 \sin(\varphi + \delta_{II})}.$$

С другой стороны

$$\frac{a}{\sin \varphi} = \frac{\overline{CD}}{\cos \varphi_2} \text{ или } a = \frac{\overline{CD} \sin \varphi}{\cos \varphi_2}.$$

Подставляя значения \overline{CD} , имеем:

$$a = \frac{R_1 \sin \theta_1 \sin^2 \varphi}{\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin(\varphi + \delta_{II})}; \quad b = R_1 \sin(\theta_1 - \delta_{II}); \quad c = R_1 \sin \theta_2;$$

$$h = R_1 \cos(\theta_1 - \delta_{II}) - R_1 \cos \theta_2 = R_1 [\cos(\theta_1 - \delta_{II}) - \cos \theta_2];$$

$$d = h \cdot \operatorname{tg} \varphi_2.$$

Подставляя значения h , имеем:

$$d = h \operatorname{tg} \varphi_2 = R_1 \operatorname{tg} \varphi_2 [\cos(\theta_1 - \delta_{II}) - \cos \theta_2].$$

Подставляя значения a , b , c и d в формулу (66) и вынося R_1 за скобки, имеем:

$$\Delta S_2 = R_1 \left\{ \frac{\sin \theta_1 \sin^2 \varphi}{\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin(\varphi + \delta_{II})} - \sin(\theta_1 - \delta_{II}) - \sin \theta_2 - \operatorname{tg} \varphi_2 [\cos(\theta_1 - \delta_{II}) - \cos \theta_2] \right\}.$$

Преобразовывая, получаем:

$$\Delta S_2 = \frac{R_1}{\cos \varphi_2} \left[\frac{\sin \theta_1 \sin^2 \varphi}{\sin \varphi_1 \sin(\varphi + \delta_{II})} - \right.$$

$$-2 \sin \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2 - \delta_n) \cdot \cos \frac{1}{2}(2\varphi_2 + \theta_1 - \theta_2 - \delta_n) \Big]. \quad (67)$$

Теперь найдем значения ΔS_1 и ΔS_2 для того частного случая, когда профиль изделия симметричный. В этом случае будем иметь:

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta; \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\varphi}{2}.$$

Подставляя эти значения в формулы (65) и (67), получаем:

$$\Delta S_1 = \frac{2R_1}{\cos \frac{\varphi}{2}} \cdot \sin \frac{\delta_n}{2} \cdot \cos \left(\frac{\varphi + \delta_n}{2} - \theta \right) \quad (68)$$

$$\Delta S_2 = 2R_1 \left[\frac{\sin \theta \sin \varphi}{\sin(\varphi + \delta_n)} - \frac{\sin^{1/2}(2\theta - \delta_n) \cdot \cos^{1/2}(\varphi - \delta_n)}{\cos \frac{\varphi}{2}} \right]. \quad (69)$$

Отсюда шаги определяются:

$$S_1 = \Delta S_1 z \quad \text{и} \quad S_2 = \Delta S_2 z,$$

где z — число зубцов фрезы.

Формулы (68) и (69) таким образом определяют шаги у фрез-,улиток“ с симметричным профилем.

Расчет шагов фрезы мы вели из условия, что профиль обрабатываемого изделия остроугольный, между тем как большинство изделий имеют не остроугольный, а трапециoidalный профиль.

В этом случае ΔS_1 определится по формуле (68), а ΔS_2 может быть несколько увеличено. Поэтому, пользуясь формулой (69) для отыскания ΔS_2 для трапециoidalного профиля, мы создаем некоторую гарантию отсутствия подрезания профиля изделия. Но у трапециoidalных профилей с большим притуплением вершины профиля, ΔS_2 может быть значительно увеличено по сравнению с величиной, найденной по формуле (69).

Для примера рассмотрим тот случай, когда фрезой определенной установки желают нарезать многошпоночный валик. В этом случае профиль чистового зуба фрезы, в точности соответствующий профилю впадины шлицевого валика, имеет по вершине профиль, очерченный по окружности, радиус которого равен радиусу окружности впадины шлицевого валика.

Как мы раньше установили для фрез с удлиненным зубом, канавка на вершинах зубцов фрезы, очерченных по окружности, должна быть не винтовой, а кольцевой.

Вершина зуба фрезы определенной установки очерчивается точно так же, как у фрез с удлиненным зубом.

Нетрудно убедиться (сравнивая рис. 52 и 54), что для такой фрезы шаг первичной нарезки ΔS_1 определяется так же, как для фрез „улиток“ по вышенайденной формуле (68):

$$\Delta S_1 = \frac{2R}{\cos \frac{\varphi}{2}} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \cos \left(\frac{\varphi + \delta}{2} - \theta \right).$$

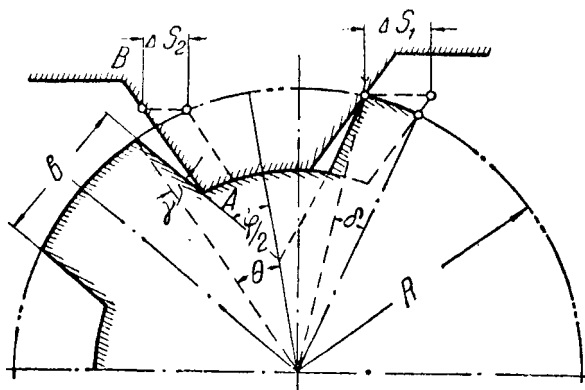


Рис. 54.

Несколько иначе определяется ΔS_2 (рис. 54).

Для шлицевых валиков с параллельными сторонами шлицов

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{180}{n}, \text{ где } n \text{ — число шлицов.}$$

$$\theta = \frac{\varphi}{2} - \gamma,$$

$$\text{где } \sin \gamma = \frac{b}{2R},$$

b — толщина шпоночного выступа,
 $2R$ — наружный диаметр.

Подставляя значения θ и $\frac{\varphi}{2}$ в формулу (68), получаем:

$$\Delta S_1 = \frac{2R}{\cos \frac{180}{n}} \sin \frac{\delta}{2} \cos \left(\frac{\delta}{2} + \gamma \right). \quad (70)$$

Графическое построение величин ΔS_1 и ΔS_2 для шлицевых червячных фрез производится точно в таком же порядке, как это было изложено для фрез с остроугольным профилем. Разница только в том, что вторую сторону профиля фрезы \overline{AB} (рис. 54) проводим из угловой точки впадины A , так как проведение прямой профиля фрезы за точку A слева подрезало бы шлиц, про-

ведение же прямой за точку A вправо ослабляло бы зуб фрезы. Кроме того на долю чистового зуба выпало бы снятие более значительного количества материала.

Аналитическое выражение ΔS_2 для шлицевой фрезы находим следующим образом ¹.

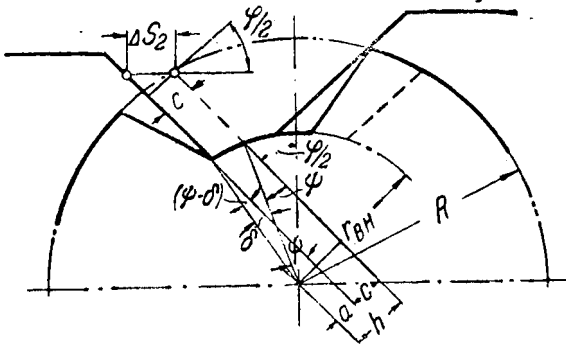


Рис. 55.

Из рис. 55:

$$\sin \psi = \frac{h}{r_{\text{вн}}},$$

где h — расстояние прямой профиля изделия до центра.

Для многошпоночных валиков с параллельными сторонами шпонок $h = \frac{b}{2}$, где b — толщина шпоночного выступа, так что:

$$\sin \psi = \frac{h}{r_{\text{вн}}} = \frac{b}{2r_{\text{вн}}}. \quad (71)$$

Здесь $2r_{\text{вн}}$ — диаметр окружности впадин валика.

Затем определяем: $a = r_{\text{вн}} \sin(\psi - \delta)$.

Угол поворота валика за время поворота фрезы на один зуб

$$\delta = \frac{360}{n \cdot z}.$$

¹ В данном случае, так же как во всех предыдущих случаях, мы определяем ΔS_1 и ΔS_2 непосредственно, рассматривая два взаимных последовательных положения зубцов фрезы и изделия, так как профили не являются сопряженными. Следовательно нужно считать необоснованным введение в данном случае понятий о начальной окружности и начальной прямой. Между тем в статье Хоровича „Освоение производства многошпоночных валиков“, помещенной в журнале „Станки и инструмент“ № 10 за 1933 г., при решении указанной задачи, несмотря на оговорку, сделанные автором, он всё же в расчете оперирует несуществующими начальной окружностью и начальной прямой. Следовательно определение шага по начальной окружности изделия и по нему угла спирали фрезы следует считать неправильным, так как шаг фрезы, определенный указанным способом, не соответствует ни одному из существующих на фрезе шагов.

Из рис. 55 имеем:

$$\Delta S_2 = \frac{c}{\cos \frac{\varphi}{2}} = \frac{h-a}{\cos \frac{\varphi}{2}}. \quad (72)$$

Подставляя найденные значения в формулу (72), получаем:

$$\Delta S_2 = \frac{1}{\cos \frac{\varphi}{2}} \left[r_{\text{вн}} \sin \psi - r_{\text{вн}} \sin (\psi - \delta) \right].$$

Преобразовывая, получаем:

$$\Delta S_2 = \frac{2r_{\text{вн}} \sin \frac{\delta}{2} \cos \left(\psi - \frac{\delta}{2} \right)}{\cos \frac{180}{n}}. \quad (73)$$

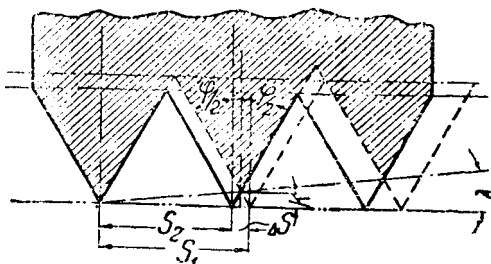


Рис. 56.

Шаги S_1 и S_2 определяем как в предыдущих случаях. Зная величины шагов правой и левой сторон винтовых поверхностей фрезы, нетрудно определить конусность нарезки последней.

Как видно из рис. 56,

$$K = \frac{\Delta S}{2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \frac{S_1 - S_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}},$$

откуда половина угла конусности нарезки фрезы λ определится:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{K}{S_2 + \frac{\Delta S_1}{2}} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}. \quad (74)$$

Пример 12. Дан многозаходный червяк следующих размеров:

Наружный диаметр	$2R = 90 \pm 0,5 \text{ мм}$
Число заходов	$n = 3$
Шаг червяка по оси	$S_0 = 62,1 \text{ мм}$
Расстояние между витками по оси	20,7 "
Угол подъема средней винтовой линии червяка	$\alpha_{\text{ч}} = 15^\circ 8'$
Угол профиля впадины червяка в осевой плоскости	$\varphi = 55^\circ$
Угол профиля впадины червяка в плоскости, нормальной к средней винтовой линии	$\varphi_{\text{н}} = 53^\circ 22'$

Найти величины шагов первичной и вторичной нарезок и конусность фрезы „улитки“ (определенной установки).

Для простоты расчета предполагаем, что витки не имеют при-
тупления по вершине, т. е. они по вершине заострены.

Находим радиус идеальной наружной окружности изделия:

$$R_1 = \frac{R}{\sin^2 \alpha_q} = \frac{45}{\sin^2 15^\circ 8'} = 660,1 \text{ мм.}$$

Находим идеальное число зубцов (заходов) в плоскости, нор-
мальной к средней винтовой линии:

$$n_n = \frac{n}{\sin^3 \alpha_q} = \frac{3}{\sin^3 15^\circ 8'} = 168,5.$$

Определяем половину центрального угла зуба, предполагая,
что вершины зубцов заострены:

$$\theta_n = \frac{360}{2 \cdot n_n} = \frac{360}{2 \cdot 168,5} = \frac{360}{337} = 1,068^\circ = 1^\circ 4'.$$

Задаемся числом зубцов (заточных канавок) фрезы-„улитки“
 $z = 10$.

Определяем угол δ_n :

$$\delta_n = \frac{360 \sin^3 \alpha_q}{n \cdot z} = \frac{360 \cdot \sin^3 15^\circ 8'}{3 \cdot 10} = 0,213^\circ;$$

$$\delta_n \approx 12'.$$

Определяем шаг первичной нарезки:

$$\Delta S_1 = \frac{2R_1}{\cos \frac{\varphi_n}{2}} \sin \frac{\delta_n}{2} \cos \left(\frac{\varphi_n + \delta_n}{2} - \theta_n \right);$$

$$\Delta S_1 = \frac{2 \cdot 660,1}{\cos 26^\circ 41'} \sin 6' \cdot \cos 25^\circ 43' =$$

$$= \frac{1320,2}{0,8935} \cdot 0,9010 \cdot 0,0017 = 2,32 \text{ мм.}$$

$$S_1 = \Delta S_1 \cdot z = 2,32 \cdot 10 = 23,2.$$

Для большей гарантии отсутствия срезания вершины зуба
округляем в большую сторону $S_1 = 23,5$.

Определяем шаг вторичной нарезки:

$$\Delta S_2 = 2R_1 \left[\frac{\sin \theta_n \sin \varphi_n}{\sin (\varphi_n + \delta_n)} \frac{\sin \frac{1}{2} (2\theta_n - \delta_n) \cos \frac{1}{2} (\varphi_n - \delta_n)}{\cos \frac{\varphi_n}{2}} \right];$$

$$\Delta S_2 = 2 \cdot 660,1 \left[\frac{\sin 1^\circ 4' \cdot \sin 53^\circ 22'}{\sin 53^\circ 34'} \frac{\sin 58' \cdot \cos 26^\circ 35'}{\cos 26^\circ 41'} \right];$$

$$\Delta S_2 = 2,15. \quad S_2 = \Delta S_2 \cdot z = 2,15 \cdot 10 = 21,5.$$

Для большей гарантии округляем в меньшую сторону:

$$S_2 = 21,2.$$

Определяем конусность нарезки фрезы:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi_n}{2} = \frac{23,5 - 21,2}{23,5 + 21,2} \operatorname{ctg} 26^\circ 41';$$

$$\operatorname{tg} \lambda = 0,1015.$$

Половина угла конуса нарезки будет:

$$\lambda = 5^\circ 48'.$$

Пример 13. Дан четырехшпоночный валик следующих размеров:

Наружный диаметр	$2R = 20 \text{ мм}$
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 15,4^{0,2}$
Ширина шпонки	$b = 6^{0,025}_{-0,065}$

Определить шаги первичной и вторичной нарезок и конусность червячной фрезы определенной установки.

Задаемся числом зубцов фрезы:

$$z = 10.$$

Тогда угол поворота валика на 1 зуб фрезы будет:

$$\delta = \frac{360}{n \cdot z} = \frac{360}{4 \cdot 10} = 9^\circ;$$

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{5,96}{20} = 0,298;$$

$$\gamma = 17^\circ 20'.$$

Определяем шаг первичной нарезки:

$$\Delta S_1 = \frac{2R}{\cos \frac{180}{n}} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \cos \left(\frac{\delta}{2} + \gamma \right);$$

$$\Delta S_1 = \frac{20}{\cos 45^\circ} \cdot \sin 4^\circ 30' \cdot \cos 21^\circ 50' = \frac{20}{0,7071} \cdot 0,0785 \cdot 0,9283 \cdot$$

$$\Delta S_1 = 2,061 \text{ мм.}$$

$$S_1 = \Delta S_1 \cdot z = 2,061 \cdot 10 = 20,61 \text{ мм.}$$

Округляем в большую сторону: $S_1 = 20,8 \text{ мм}$.

Определяем шаг вторичной нарезки:

$$\sin \psi = \frac{b}{2r_{\text{вн}}} = \frac{5,96}{15,3} = 0,3895;$$

$$\psi = 22^\circ 56'.$$

$$\Delta S_2 = \frac{2r_{\text{вн}} \sin \frac{\delta}{2} \cos \left(\psi - \frac{\delta}{2} \right)}{\cos \frac{180}{n}} = \frac{15,3 \cdot \sin 4^\circ 30' \cos 18^\circ 26'}{\cos 45^\circ} =$$

$$= \frac{15,3 \cdot 0,0785 \cdot 0,9487}{0,7071} = 1,617 \text{ мм.}$$

$$S_2 = \Delta S_2 \cdot z = 1,617 \cdot 10 = 16,17 \text{ мм.}$$

Округляем в меньшую сторону $S_2 = 16,0 \text{ мм.}$

Определяем конусность нарезки:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{20,8 - 16}{20,8 + 16} \cdot \operatorname{ctg} 45^\circ;$$

$$\operatorname{tg} \lambda = 0,1304 \text{ и } \lambda = 7^\circ 26'.$$

Следует отметить, что осуществление конусной нарезки на фрезях определенной установки производят, предварительно нарезав заготовку с шагом, равным среднему арифметическому от шагов S_1 и S_2 , рассчитанным по вышенайденным формулам, т. е. шаг предварительной нарезки равен:

$$S_{\text{ср}} = \frac{S_1 + S_2}{2}. \quad (75)$$

Затем срезают виток с одной стороны, производя нарезку с шагом S_1 , и с другой стороны—с шагом S_2 .

Нетрудно убедиться, что для изготовления фрезы можно обойтись только двумя нарезками, нарезав предварительно фрезу с шагом S_1 , а затем с шагом S_2 .

Не решая пока вопроса о выборе элементов общих типов червячных фрез, попутно отметим основные особенности конструирования фрез-„улиток“. Фрезы-„улитки“, служащие для нарезания многоходовых червяков, конструируются таким образом, чтобы они имели 2—3 чистовых зубца, так как, при наличии только одного чистового зуба, фреза-„улитка“ при последующих переточках будет менять свой профиль. Действительно, если предположить, что у фрезы-„улитки“ не снимается затылок, то прямые вершины, ограничивающие зубцы, расположенные по архимедовой спирали, будут последовательно уширяться. При этом самая широкая вершина зуба будет у первого черного зуба „улитки“. Точно так же спинка одного зуба такой незатылованной фрезы уширится. Такое же уширение спинки зуба будет и у затылованной фрезы, если бока и вершина будут затыловываться при помощи одного и того же кулачка, следовательно при последующих переточках чистового зуба мы получим уширенную вершину зуба против первоначального профиля. Чтобы избежать указанного искажения профиля чистового зуба при последующих переточках, следует иметь 2 или 3 зуба чистовых, нарезанных как с одной, так и с другой стороны

одним шагом $S_{\text{ср}}$, равным среднему арифметическому от S_1 и S_2 , а уменьшенным и увеличенным шагами нарезать и снимать затылок у фрезы начиная со второго или третьего после чистового зуба.

Чистовых зубцов можно допустить больше одного только в том случае, когда нарезается изделие с большим количеством зубцов, т. е. когда δ_n — угол поворота изделия на один зуб фрезы — незначителен, так как в этом случае получается незначительное подрезание зуба изделия, которым можно пренебречь.

Такое решение возможно только для того случая, когда дно впадины профиля изделия очерчено прямой линией. Если дно очерчено кривой, например окружностью, и вершины зубцов не срезаются как у „улитки“, затылки с боков и вершины нужно снимать так, чтобы получить зуб обычной фасонной фрезы, который, как известно, при последующей переточке не будет менять свой профиль. Не приводя доказательств, укажем, что этого можно достигнуть, если осуществить падение затылка по вершине зуба при помощи кулачка с подъемом h , а падение затылка на боковых сторонах осуществить при помощи кулачков, подъемы которых подсчитаны по следующим формулам:

$$h_1 = h - \frac{S_1}{Z} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2};$$

$$h_2 = h + \frac{S_2}{Z} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2},$$

где h_1 — падение затылка правой стороны зуба (для правой нарезки, если смотреть на фрезу во время долбления затылка),

h_2 — падение левой стороны,

S_1 — шаг нарезки правой стороны,

S_2 — шаг нарезки левой стороны,

Z — число зубцов фрезы,

h — падение затылка по вершине зуба,

$\frac{\varphi}{2}$ — половина угла профиля нарезки.

Для создания заднего угла в процессе резания следует соблюсти условие, чтобы падение затылка по вершине было

$$h \geq \frac{2S_1}{Z} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}.$$

Теперь разберем вопрос о распределении работы резания между отдельными зубцами фрезы-„улитки“. Как раньше было установлено, глубина снимаемого одним зубцом слоя материала равна (приблизительно) разности высот двух соседних зубцов.

В тех случаях, когда хотят получить более чистую обработанную поверхность, рекомендуется конструировать зубцы „улитки“ таким образом, чтобы разность высот соседних зубцов, располо-

женных за чистовыми, была примерно в два раза меньше, чем разность высот предварительных зубцов. В этом случае вершины половины числа зубцов „улитки“ располагаются по архимедовой спирали с одним подъемом за оборот спирали, а вершины другой половины располагаются также по архимедовой спирали, но с другим подъемом за оборот.

Для простоты изготовления падение высоты зубцов следует брать постоянным для всех зубцов „улитки“, особенно в случаях предварительной обработки изделий. Фрезы „улитки“, применяющиеся на наших заводах, имеют разность высот между соседними зубцами t от 0,5 до 1,5 мм. Повидимому эти величины в случае надобности могут быть несколько изменены.

При конструировании „улиток“ следует задаться величиной t . Кроме этого следует задаться числом витков на „улитке“. Обычно оказывается достаточным 1,5 или 2 витка.

Задавшись числом витков, следует определить высоту первого предварительного зуба. Так как первый предварительный зуб отстоит от последнего чистового на расстоянии $l = (1,5 \text{ или } 2) S_{\text{ср}}$, где $S_{\text{ср}}$ —среднее арифметическое шагов S_1 и S_2 , то в том случае, когда указанный зуб имеет только высоту, равную разности высот двух соседних зубцов t , он может не участвовать в работе (рис. 57).

На первый предварительный зуб допустима несколько большая нагрузка, чем на последующие зубцы „улитки“. Кроме этого, как видно из рис. 57, первому зубу придется снимать стружку краем зуба; поэтому считаем допустимым, если первый зуб будет снимать стружку шириной, равной примерно ширине вершины указанного зуба.

Отсюда определится высота f первого зуба, равная стрелке хорды, проведенной из точки C

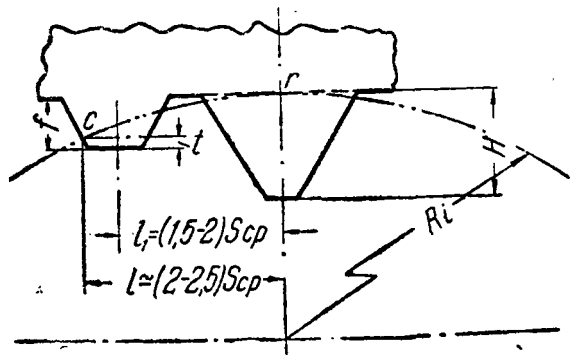


Рис. 57.

пересечения профиля первого предварительного зуба с наружной (идеальной) окружностью изделия, плюс толщина снимаемого одним зубцом слоя:

$$f = R_1 - \sqrt{R_1^2 - l^2} + t, \quad (76)$$

где R_1 —идеальный радиус наружной окружности изделия, $S_{\text{ср}}$ —средний шаг фрезы, определяемый по формуле (75).

Для простоты расчета у фрезы с 1,5 витками берем $l = 2S_{\text{ср}}$, для фрезы с 2 витками берем $l = 2,5S_{\text{ср}}$.

Определив высоту первого зуба, можно определить общее необходимое количество зубцов „улитки“.

Полную высоту профиля изделия обозначим через H . Разность высот двух соседних зубцов обозначим через t , число чистовых зубцов через p , высоту первого зуба через f ; тогда общее число режущих зубцов будет:

$$z_0 = \frac{H-f}{t} + p. \quad (77)$$

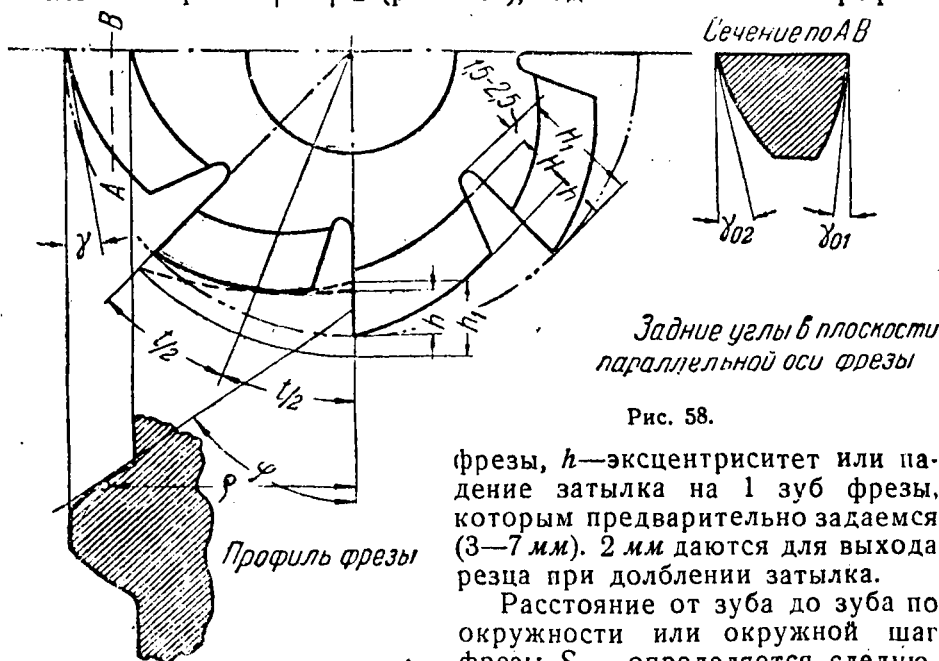
Определив общее число рабочих зубцов „улитки“, мы можем определить число зубцов фрезы по окружности или число спиральных канавок z для выхода стружки. Для этого нам нужно полученное значение z_0 по формуле (77) разделить на ранее выбранное нами число витков „улитки“, которое берется равным 1,5 или 2.

Таким образом

$$z = \frac{z_0}{(1,5 \text{ или } 2)}. \quad (78)$$

Округлив найденное значение z до целого и четного числа и решив по формуле (77) относительно t , уточняем величину разности высот двух соседних зубцов.

Зная числа зубцов фрезы по окружности z и высоту профиля фрезы H , нетрудно определить наружный диаметр „улитки“. Для этого определим сначала глубину канавки для выхода стружки, а именно $H_1 = H + h + 2$ (рис. 58), где H — высота профиля



фрезы, h — эксцентриситет или падение затылка на 1 зуб фрезы, которым предварительно задаемся (3—7 мм). 2 мм дается для выхода резца при долблении затылка.

Расстояние от зуба до зуба по окружности или окружной шаг фрезы $S_{\text{окр}}$ определяется следую-

щим образом. Обыкновенно для фрез „улиток“ $S_{\text{окр}}$ берется равным: $S_{\text{окр}} = 1,5 H_1$, где H_1 —глубина канавки для выхода стружки.

Отсюда наружный диаметр фрезы определится:

$$D_{\phi} = \frac{S_0 z}{\pi}. \quad (79)$$

Полученный диаметр округляем до 5.

Следует еще отметить некоторую особенность „улитки“ для нарезания многоходовых червяков. Установка „улитки“ относительно обрабатываемого червяка производится таким образом, чтобы ось симметрии первого чистового зуба пересеклась с осью обрабатываемого червяка, а передняя грань этого зуба должна быть нормальна к средней винтовой линии червяка. Для удобства установки „улитки“ в таком положении обыкновенно ось симметрии первого чистового зуба располагается на расстоянии 0,5'' (12,7 мм) от торцевой плоскости фрезы. Но по мере переточки фрезы чистовой зуб смещается от торцевой плоскости, так как зуб спиральный. Поэтому следует по мере переточки фрезы торцовую плоскость сошлифовывать, постоянно сохраняя размер от оси симметрии чистового зуба до торцевой плоскости 12,7 мм.

Раньше мы отметили, что фрезой „улиткой“ можно нарезать не только червяки, но и изделия, имеющие шлицы, параллельные оси. Однако между „улитками“, изготовленными для этих двух типов изделий, есть существенная разница. Если фрезой, служащей для нарезания многоходовых червяков (рис. 48), нарезать рейку, то последняя должна иметь равномерное поступательное движение в направлении, параллельном оси фрезы, от зубцов с большей высотой к зубцам фрезы с меньшей высотой. При нарезании этой фрезой шлицевого валика вращение этого валика должно бы проходить также в направлении от больших зубцов к меньшим зубцам, т. е. в работу должны вступать раньше чистовые зубцы, а затем предварительные, что лишено смысла.

Совсем другое получается при нарезании данной фрезой многоходового или одноходового червяка. Это легче себе представить, если обрабатываемый червяк имеет очень небольшой угол подъема. В этом случае ось „улитки“ устанавливается почти параллельно оси обрабатываемого червяка. Тогда при наличии подачи фрезы вдоль оси червяка, в направлении от больших зубцов фрезы к меньшим, последние будут непрерывно встречаться еще с необработанным слоем материала, а на долю зубцов большей высоты будет выпадать снятие чистовой стружки.

Из сказанного можно вывести следующее правило: для обработки изделий с прямыми шлицами, фрезы „улитки“ следует конструировать таким образом, чтобы передняя грань любого зуба фрезы была обращена в сторону возрастающих зубцов по высоте; для обработки же червяков, фрезы „улитки“ следует конструировать таким образом, чтобы передняя грань любого зуба фрезы была обращена в сторону убывающих по высоте зубцов.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ.

Производительность и точность червячной фрезы зависят от удачного выбора размеров самой фрезы. Так же как у многих других инструментов, у червячных фрез увеличение производительности влечет во многих случаях уменьшение точности. В зависимости от того или иного требования, предъявляемого к червячным фрезам, выбираются те или иные их размеры.

В отличие от других инструментов, червячная фреза имеет ряд особенностей, влияющих на производительность и точность обработки.

Ниже мы рассмотрим особенности и условия, влияющие на выбор элементов червячной фрезы.

17. Выбор наружного диаметра фрезы.

Так же как у простых фрез, с увеличением наружного диаметра:

- 1) увеличивается крутящий момент на оправке,
- 2) увеличивается стоимость фрезы,
- 3) увеличиваются чистота и точность обрабатываемого изделия,
- 4) уменьшается число оборотов фрезы в минуту, при сохранении постоянной скорости резания, а следовательно числа оборотов изделия.

С увеличением крутящего момента на оправке необходимо увеличить размеры самой оправки; кроме того требуется более мощный станок.

С увеличением наружного диаметра фрезы, для сохранения постоянной скорости резания, необходимо уменьшить число оборотов фрезы в минуту, а так как фреза и изделие кинематически связаны, то уменьшается также число оборотов изделия, а следовательно при постоянной подаче за один оборот фрезы уменьшается и производительность фрезы.

С увеличением наружного диаметра червячной фрезы точность и чистота обрабатываемого изделия увеличиваются благодаря тому, что с увеличением диаметра при постоянном шаге фрезы уменьшается угол подъема средней винтовой линии. Для зуборезных червячных фрез с трапецидальным профилем установлено¹

¹ См. Die Grundlagen Zahnradbearbeitung Bahrt.

что с увеличением угла подъема средней винтовой линии фрезы точность обрабатываемого зубчатого колеса уменьшается. Это же можно отнести и к другим типам червячных фрез.

Из сказанного можно сделать следующее заключение. Для точных работ необходимо выбирать такой диаметр фрезы, чтобы угол подъема средней винтовой линии был возможно мал. Для неточных работ (обдирка изделий, фрезеровка под шлифовку и т. д.) угол подъема средней винтовой линии можно допустить в два или в три раза больше, чем для точных работ.

Так для чистовых червячных фрез со шлифованным профилем угол подъема средней винтовой линии наиболее ходовых фрез лежит в пределах от $1^{\circ}30'$ до 5° , причем малые углы подъема соответствуют малым диаметрам, а большие—большим диаметрам червячных фрез.

Для больших диаметров чистовых червячных фрез очень часто допускают угол подъема средней винтовой линии до 7° . Это возможно благодаря тому, что при обработке изделий с большим шагом по начальной окружности фреза также имеет большой шаг. Но угол подъема фрезы определяется по формуле:

$$\sin \alpha = \frac{S_n}{\pi D_{cp}},$$

где S_n —шаг изделия по начальной окружности,

D_{cp} —средний диаметр червячной фрезы.

Из этой формулы видно, что для сохранения постоянства угла подъема средний диаметр, а следовательно и наружный диаметр фрезы, необходимо увеличить при увеличении шага изделия.

Для изделий с большим шагом, чтобы не превзойти угла подъема в 5° , пришлось бы изготавливать фрезы со слишком большим диаметром, которые в большинстве случаев трудно осуществлять. Поэтому в этих случаях допускают угол подъема до 7° . Но относительная неточность профиля изделия, изготовленного этими фрезами, несколько больше, чем у фрез с меньшим углом подъема.

Для черновых червячных фрез допускают α до $9-10^{\circ}$. Часто для увеличения производительности обдирочные червячные фрезы делают многоходовыми (2—3 захода); но и в этом случае угол подъема средней винтовой линии не превышает 10° .

При выборе наружного диаметра фрезы нужно прежде всего задаться приближенным значением угла подъема средней винтовой линии α . Зная α и S_0 (шаг фрезы по оси), средний диаметр фрезы определяют из следующей общеизвестной формулы:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_0}{\pi D_{cp}}, \quad (80)$$

откуда

$$D_{cp} = \frac{S_0}{\pi \operatorname{tg} \alpha}. \quad (81)$$

Нужно иметь в виду, что $D_{\text{ср}}$ у фрез, обрабатывающих изделия с прямолинейными профилями, не совпадает с начальным диаметром $D_{\text{нач}}$ фрезы.

Затем приближенно определяют значение наружного диаметра фрезы по формуле:

$$D_{\text{ф}} = D_{\text{ср}} + H + (2-3 \text{ мм}),$$

где H —высота рабочего участка профиля фрезы.

Округляя полученное значение $D_{\text{нар}}$ фрезы до 5 мм, подсчитывают более точное значение угла подъема средней винтовой линии α , учитывая следующие поправки.

Определение угла подъема средней винтовой линии по формуле (80) будет правильно в том случае, когда при обработке изделия ось фрезы устанавливается перпендикулярно к оси изделия.

Если же ось фрезы поворачивается на угол α (угол подъема средней винтовой линии) относительно перпендикулярного положения к оси изделия, то расчет угла α производится так: у фрезы различают два шага: S_0 —осевой шаг, измеренный в плоскости, проходящей через ось фрезы, и $S_{\text{н}}$ —нормальный шаг, измеренный в плоскости, нормальной к средней винтовой линии. При установке

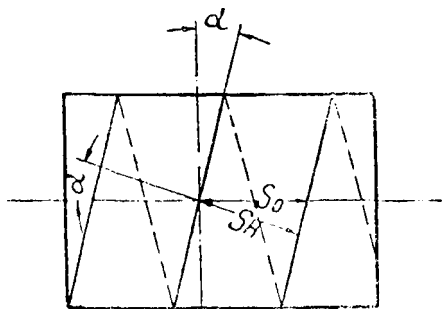


Рис. 59.

оси фрезы относительно перпендикулярного положения к оси изделия на угол подъема средней винтовой линии α , шаг фрезы по нормали $S_{\text{н}}$ должен соответствовать шагу изделия по начальной окружности. Как видно из рис. 59, если известен нормальный шаг фрезы и угол подъема средней винтовой линии α , то осевой шаг определится из соотношения:

$$S_0 = \frac{S_{\text{н}}}{\cos \alpha}.$$

Как известно, угол подъема средней винтовой линии определяется по формуле (80):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_0}{\pi D_{\text{ср}}}.$$

Подставляя значение S_0 в формулу (80), имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_0}{\pi D_{\text{ср}}} = \frac{S_{\text{н}}}{\pi D_{\text{ср}} \cos \alpha},$$

откуда

$$\sin \alpha = \frac{S_H}{\pi D_{\text{ср}}}, \quad (82)$$

где S_H равен шагу по начальной окружности изделия и шагу фрезы по нормали, при повороте оси фрезы от перпендикулярного положения к оси изделия на угол α .

Для более точного определения угла α нужно учесть переточку фрезы, так как при последующем стачивании зубцов средний диаметр фрезы $D_{\text{ср}}$ уменьшается, а следовательно увеличивается угол винтовой линии, что влечет дополнительные искажения профиля обрабатываемого изделия. Поэтому при подсчете угла подъема винтовой линии нужно средний диаметр брать равным среднему диаметру при сточенных зубцах фрезы на $1/4$ окружного шага фрезы (см. рис. 49).

Так как обычно стачивание зуба производится примерно до половины окружного шага фрезы, то, при подсчете угла подъема с учетом сточенного зуба на $1/4$ шага, отклонение от среднего угла подъема распределится по обе стороны от заданного сечения.

Обычно затылок у червячных фрез снимается по архимедовой спирали; в этом случае средний диаметр определится по следующей формуле:

$$D_{\text{ср}} = D_{\text{ф}} - H - 2 \frac{h}{4}, \quad (83)$$

где $D_{\text{ф}}$ — наружный диаметр фрезы,

H — высота рабочего участка (профиля фрезы),

h — эксцентриситет, т. е. падение затылка на один окружной шаг фрезы.

Обычно h определяется по следующей известной формуле:

$$h = \frac{\pi D_{\text{ф}} \operatorname{tg} \gamma}{z}, \quad (84)$$

где γ — задний угол,

z — число зубцов фрезы.

Определив $D_{\text{ср}}$ таким образом по формуле (83), легко найти угол подъема средней винтовой линии по формуле (82).

18. Определение длины фрезы.

Минимальная длина червячной фрезы, имеющей профиль теоретической рейки, должна определиться следующим образом. Началу и концу сцепления профиля фрезы с профилем изделия соответствует вполне определенная длина отрезка начальной прямой фрезы. Эта длина равна длине проекции линии зацепления фрезы и изделия на начальную прямую фрезы. Если длина фрезы меньше длины проекции линии зацепления на начальную прямую, то очевидно мы не получим на изделии требуемого

профиля. Кроме того зубцы червячной фрезы вступают в работу раньше начала сцепления сопряженных профилей фрезы и изделия.

Зубцы фрезы, до сцепления с теоретически правильным профилем изделия, предварительно выбирают материал из канавок обрабатываемого изделия. Если длину фрезы сделать равной длине проекции линии зацепления на начальную прямую, то первый зубец фрезы, сразу погрузившись в обрабатываемое изделие, снимет настолько большую стружку, что может вызвать поломку зубцов и порчу всей фрезы; следовательно длину фрезы следует брать больше величины проекции линии зацепления на начальную прямую.

Чтобы определить положение, отвечающее началу вступления зубцов фрезы в работу, рассмотрим более простой случай фрезерования валика обыкновенной цилиндрической фрезой, которое производится таким образом, чтобы ось фрезы была перпендикулярна к оси обрабатываемого валика, а валик при его обработке вращался вокруг своей оси (рис. 60).

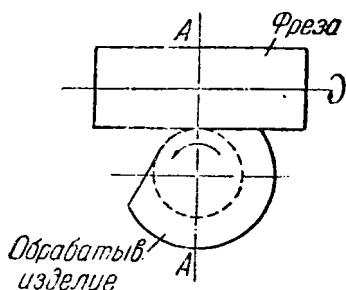


Рис. 60.

В этом случае длина рабочего участка фрезы, как видно из рисунка, будет равна половине хорды, для которой дуга имеет стрелку, равную максимальной глубине фрезерования. Часть фрезы, которая расположена за радиальной

прямой AA , перпендикулярной к оси фрезы, не принимает никакого участия в работе снятия стружки.

Приблизительно так же работает и червячная фреза. Разница заключается в том, что участок червячной фрезы, лежащий за радиальной прямой, перпендикулярной к оси изделия, еще принимает участие в работе на длине, равной половине проекции линии зацепления на начальную прямую, так как за указанной радиальной прямой еще происходит зацепление профилей фрезы и изделия.

Таким образом минимальная длина фрезы должна быть равна половине длины проекции линии зацепления на начальную прямую плюс половина хорды наружной окружности изделия, дуга которой имеет стрелку, равную высоте рабочего участка фрезы H .

Длина проекции линии зацепления на начальную прямую зависит от формы и величины обрабатываемого изделия. Построением по методу Релё можно определить длину указанной проекции. Однако, для большинства шлицевых червячных фрез, обрабатываемые изделия не превосходят 250 мм диаметром, и длина проекции линии зацепления на начальную прямую меньше на незначительную величину длины указанной выше хорды. Поэтому за минимальную длину червячных фрез, обрабатывающих изделия диаметром не свыше 300 мм, можно принять длину

хорды, дуга которой имеет стрелку, равную высоте рабочего участка фрезы H .

В этом случае минимальная длина фрезы определится (рис. 61) по следующей формуле:

$$l = 2 \sqrt{\frac{D_{\text{н}}^2}{4} - \left(\frac{D_{\text{н}}}{2} - H\right)^2} = 2 \sqrt{H(D_{\text{н}} - H)}, \quad (85)$$

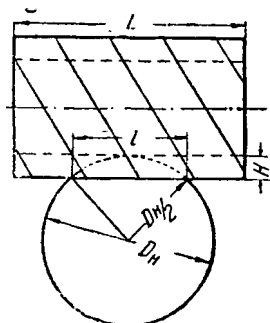


Рис. 61.

где $D_{\text{н}}$ — наружный диаметр изделия,
 H — высота рабочего участка зуба фрезы.

Для больших диаметров обрабатываемых изделий найденная по формуле (85) длина фрезы дает значительное расхождение с длиной проекции линии зацепления на начальную прямую. Поэтому длину зуборезных червячных фрез, нарезающих зубчатые шестерни большого диаметра, берут равной величине проекции линии зацепления. Но для избежания большой нагрузки на первый зуб фрезы часть фрезы, вступающую в работу, делают с заборным конусом, наподобие червячных фрез для нарезания червячных колес. Это позволяет первым зубцам фрезы произвести предварительную обработку, а на долю остальных зубцов выпадает только снятие чистой стружки.

Поэтому при проектировании червячных фрез для изделий больших диаметров следует длину фрезы взять равной величине проекции линии зацепления на начальную прямую плюс 1,5—3 шага; кроме того вступающая в работу часть фрезы должна иметь короткий заборный конус.

Обыкновенно длину червячных фрез более ходовых размеров берут равной наружному диаметру фрезы плюс 5—15 мм. Эта длина фрезы примерно от двух до пяти раз превосходит минимальную необходимую длину, рассчитанную по формуле (85). Такой запас по длине служит, для возможности последовательной перестановки фрезы вдоль оси, при затуплении рабочего участка фрезы. Запас длины следовательно увеличивает ее долговечность.

Пример 14. Дан многошпоночный валик следующих размеров:

Наружный диаметр	$2R_{\text{нар}} = 22_{-0,04}^{+0,02}$ мм
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 18_{-0,34}^{+0,12}$ "
Ширина шпонки	$b = 5_{-0,06}^{+0,02}$ "
Число шпонок	$n = 6$
Радиус закругления краев шпоночных выступов	$r = 0,25$ "

Определить основные габаритные размеры червячной фрезы для данного валика.

Задаемся приближенным значением угла подъема α средней винтовой линии фрезы. Так как валик должен быть изготовлен со средней точностью, то задаемся средней величиной угла подъема

$$\alpha = 3^\circ.$$

Определяем шаг фрезы по нормали, равный шагу валика по дуге начальной окружности. Радиус начальной окружности валика будет:

$$R = R_{\text{нар}} - r = 11 - 0,25 = 10,75 \text{ мм.}$$

Шаг по начальной окружности будет:

$$S_H = \frac{2\pi R}{n} = \frac{3,1416 \cdot 21,5}{6} = 11,26 \text{ мм.}$$

Определяем приближенную величину среднего диаметра фрезы:

$$D_{\text{ср}} = \frac{S_H}{\pi \sin \alpha} = \frac{11,26}{3,14 \cdot 0,0523} \approx 68 \text{ мм.}$$

Высота рабочего участка зуба фрезы будет:

$$h_1 = R_{\text{нар}} - r_{\text{вн}} = 11 - 8,88 = 2,12 \text{ мм.}$$

Задаемся величиной падения затылка:

$$h = 2 \text{ мм.}$$

Определяем наружный диаметр фрезы:

$$D_{\text{ф}} = D_{\text{ср}} + \frac{h}{2} + H_1 = 68 + 2,12 + 1 \approx 71 \text{ мм.}$$

Округляем до $D_{\text{ф}} = 75 \text{ мм.}$

Определяем глубину канавки для стружки:

$$H_1 = h_3 + h + 2 = 4 + 2 + 2 \approx 8 \text{ мм.}$$

где h_3 полная высота зуба до выточки.

Окружной шаг фрезы будет:

$$S_{\text{окр}} = 2H_1 = 2 \cdot 8 = 16 \text{ мм.}$$

Определяем число зубцов фрезы:

$$z = \frac{\pi D_{\text{ф}}}{S_{\text{окр}}} = \frac{3,14 \cdot 75}{16} = 14,8.$$

Округляем число зубцов до $z = 14$.

Найдем требуемое значение эксцентриситета при заднем угле $\gamma = 7^\circ$:

$$h = \frac{\pi D_{\phi} \operatorname{tg} \gamma}{z} = \frac{3,14 \cdot 75 \cdot \operatorname{tg} 7^\circ}{14} \approx 2 \text{ мм.}$$

Определяем точное значение среднего диаметра фрезы, учитывая переточку:

$$D_{\text{ср}} = D_{\phi} - H - \frac{h}{2} = 75 - 2,12 - 1 = 71,88 \text{ мм.}$$

Определяем уточненную величину угла подъема средней винтовой линии:

$$\sin \alpha = \frac{S_{\text{H}}}{\pi D_{\text{ср}}} = \frac{11,26}{3,14 \cdot 71,88} = 0,04988;$$

$$\alpha = 2^\circ 51'.$$

Округляем до $\alpha = 2^\circ 50'$.

Тогда шаг фрезы по оси определится:

$$S_0 = \frac{S_{\text{H}}}{\cos \alpha} = \frac{11,26}{\cos 2^\circ 50'} = 11,27 \text{ мм.}$$

Определяем шаг канавки фрезы для выхода стружки:

$$T = S_0 \operatorname{ctg}^2 \alpha = 11,27 \cdot 20,206^2 = 4601 \text{ мм.}$$

Длину фрезы берем равной

$$L \approx D_{\text{нар}} + 5 = 75 + 5 = 80 \text{ мм.}$$

Проверяем достаточность длины фрезы:

$$l = 2 \sqrt{H(D_{\text{H}} - H)} = 2 \sqrt{2,12(22 - 2,12)};$$

$$l \approx 13 \text{ мм.}$$

Следовательно выбранная длина фрезы приблизительно в 6 раз больше минимально необходимой.

Диаметр отверстия берем равным $0,4 D_{\phi} = 0,4 \cdot 75 = 30 \text{ мм.}$

Округляем до ближайшего размера по ОСТу:

$$d = 32.$$

Известная американская фирма зуборезных станков и инструментов „Garber-Colman Company“ выпускает шлицевые червячные фрезы, габариты которых даются в зависимости от числа и глубины шлицевых канавок. Известно, что высота шлица характеризует наружный диаметр, а следовательно и шаг изделия, при данном числе шлицев. Ниже приводим габариты фрез указанной фирмы, данные в зависимости от числа и глубины шлицевых канавок.

Таблица 8.

Габариты фрез Barber-Colman Co.

Размеры валика		Размеры фрезы (в дюймах)		
Число шлицев	Высота шлица (в дюймах)	Наружный диаметр	Длина	Диаметр отверстия
3 и 4	до 0,125	3	3	1 $\frac{1}{4}$
3 и 4	0,126—0,1562	3 $\frac{1}{4}$	3 $\frac{1}{4}$	1 $\frac{1}{4}$
3 и 4	0,157—0,1875	3 $\frac{1}{2}$	3 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{4}$
3 и 4	0,188—0,250	4	4	1 $\frac{1}{4}$
6, 8, 10 и пр.	до 0,125	2 $\frac{3}{4}$	2 $\frac{3}{4}$	1 $\frac{1}{4}$
6, 8, 10 и пр.	0,126—0,1562	3	3	1 $\frac{1}{4}$
6, 8, 10 и пр.	0,157—0,1875	3 $\frac{1}{4}$	3 $\frac{1}{4}$	1 $\frac{1}{4}$
6, 8, 10 и пр.	0,188—0,250	3 $\frac{1}{2}$	3 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{4}$

Указанная фирма рекомендует для валиков, имеющих небольшой диаметр и сравнительно мелкую шлицевую канавку, т. е. в случае, когда берется легкая стружка, брать фрезу малых размеров и работать ею на легком станке.

Для этого предлагаются червячные фрезы следующих размеров:

Наружный диаметр	Длина	Диаметр отверстия
2''	2''	$\frac{3}{4}$ ''
2''	2''	$\frac{5}{8}$ ''
2''	2''	1''

Указанные размеры относятся как к шлифованным, так и нешлифованным фрезам.

Некоторые фирмы предлагают червячные фрезы более короткие, чем указано выше. Особенно это относится к специальным червячным фрезам (фрезы с удлиненным зубом и определенной установки), которые при затуплении не переставляются вдоль оси оправки.

19. Число зубцов и канавки для выхода стружек.

Выбор числа зубцов также зависит от назначения фрезы. Чистовые фрезы должны иметь возможно большее количество зубцов, черновые—возможно меньшее.

Если при фрезеровании изделий простыми фрезами обрабатываемая поверхность получается волнистой в направлении подачи фрезы, то при обработке червячными фрезами обрабатываемая

поверхность получается волнистой еще и в плоскости, перпендикулярной к направлению подачи. Так как при обработке изделия червячными фрезами изделие и фреза кинематически связаны, т. е. за один оборот фрезы изделие поворачивается на шаг, то каждый участок изделия обрабатывается вполне определенным количеством зубцов. Таким образом при большем числе зубцов у червячной фрезы обрабатываемая поверхность изделия получается более чистой.

При черновом фрезеровании к фрезе предъявляются требования максимальной производительности. В этом случае, как известно, выгоднее брать возможно меньшее число зубцов.

При выборе числа зубцов у чистовых фрез нужно учесть следующее обстоятельство: зубцы точных червячных фрез шлифуются по затылку специальным профильным шлифовальным кружком. Диаметр этого шлифовального кружка нужно выбрать таким, чтобы при шлифовке затылка кружок не задевал за вершину следующего зубца фрезы. Поэтому кружок приходится выбирать возможно малого диаметра или шлифовать фрезу специальным торцовым кружком. Но производительность малого шлифовального кружка чрезвычайно низка, и операция шлифовки затылка в этом случае затрудняется.

На величину диаметра шлифовального кружка (при неторцовой шлифовке), при постоянном диаметре фрезы, влияют число зубцов, угол задней обточке и длина шлифованной части зуба. Из рис. 58 видно, что если считать достаточной шлифовку зуба по затылку на половину окружного шага, то с увеличением числа зубцов, т. е. с уменьшением окружного шага, диаметр шлифовального кружка уменьшается.

Не давая расчетных формул, приводим таблицу допустимых отношений диаметра кружка d к диаметру фрезы D при заданном числе зубцов фрезы для заднего угла $\gamma = 7^\circ$, так как для шлифованных фрез такая величина заднего угла в большинстве случаев достаточна. Заданные значения предусматривают шлифовку до половины окружного шага фрезы.

Таблица 9.

Допустимые отношения $\frac{d}{D}$.

z	$\frac{d}{D}$
6	1,9
8	1,5
10	1,2
12	0,6
14	0,33
16	0,3
18	0,28

За диаметр фрезы D следует принимать наружный диаметр, минус удвоенная высота шлифуемого профиля.

Как видно из таблицы, с увеличением числа зубцов диаметр шлифовального кружка быстро уменьшается. Для определения необходимого числа зубцов фрезы нужно прежде всего приблизительно определить глубину канавки для выхода стружки (рис. 58):

$$H_1 = H + h + (1,5 - 2), \quad (86)$$

где H — высота профиля фрезы,
 h — величина эксцентриситета.

Для выхода резца при снятии затылка дается 1,5—2 мм.

Величина $h = \frac{\pi D \operatorname{tg} \gamma}{z}$ и определяется приблизительно, так как z еще неизвестно.

Для предварительного определения числа зубцов может служить следующая приближенная формула:

$$z \approx \frac{D_{\phi}}{0,8 H + 1}, \quad (87)$$

где D_{ϕ} — диаметр фрезы,

H — высота профиля фрезы в мм.

Для чистовых червячных фрез обыкновенно выбирают окружный шаг фрезы по формуле:

$$S_{\text{окр}} = (1,5 - 2) H_1, \quad (88)$$

где H_1 — глубина канавки для стружек.

Для черновых червячных фрез:

$$S_{\text{окр}} = (2 - 2,5) H_1. \quad (89)$$

Зная окружный шаг фрезы, нетрудно определить необходимое число зубцов:

$$z = \frac{\pi D_{\phi}}{S_{\text{окр}}}, \quad (90)$$

где D_{ϕ} — наружный диаметр фрезы.

Полученное число следует округлить до целого или до ближайшего четного числа.

Теперь рассмотрим вопрос о канавках для выхода стружки. Как известно, обычные червячные фрезы при обработке изделий устанавливаются таким образом, чтобы ось фрезы составляла с перпендикуляром к оси изделия, шлицы которого расположены параллельно оси, угол, равный углу подъема средней винтовой линии фрезы. В этом случае, как будет доказано ниже, направление резания зубцов фрезы совпадает с направлением касательной к средней винтовой линии фрезы.

Требуется создать благоприятные условия резания зуба фрезы, т. е. угол резания ни с одной стороны зуба не должен по край-

ней мере превосходить 90° . Для этого необходимо, чтобы передняя грань зуба фрезы была перпендикулярна (или нормальна, если передняя грань зуба является поверхностью) к направлению резания. Но при вышеуказанном способе установки направление резания, как мы отметили выше, совпадает с касательной к средней винтовой линии фрезы, следовательно передняя грань зуба фрезы должна быть нормальна (перпендикулярна к касательной) к средней винтовой линии фрезы.

Поэтому-то у обычных червячных фрез канавки для выхода стружек, которые определяют переднюю грань зуба, изготавливаются спиральными. При этом направление средней винтовой линии спиральной канавки для стружек нормально к средней винтовой линии витка профиля фрезы. Тогда угол между касательной к средней винтовой линии спиральной канавки для стружек и осью фрезы должен быть равен углу подъема средней винтовой линии α нарезки фрезы.

В этом случае шаг T спирали канавки для стружек определится так:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_0}{\pi D_{\text{ср}}}.$$

$$\text{Но } \operatorname{tg} (90^\circ - \alpha) = \frac{T}{\pi D_{\text{ср}}}, \text{ откуда } T = S_0 \operatorname{ctg}^2 \alpha.$$

Необходимость спиральных канавок для стружки значительно усложняет процесс изготовления, заточки и контроля червячных фрез. Многие иностранные фирмы выпускают шлицевые червячные фрезы не со спиральными канавками для стружек, а с канавками, параллельными оси фрезы. Эти фрезы часто смешивают с 90° -градусными червячными фрезами. Однако между ними есть различие. Ось 90° -градусной фрезы устанавливается перпендикулярно к оси обрабатываемого изделия; кроме того она в осевом сечении имеет скорректированный профиль рейки.

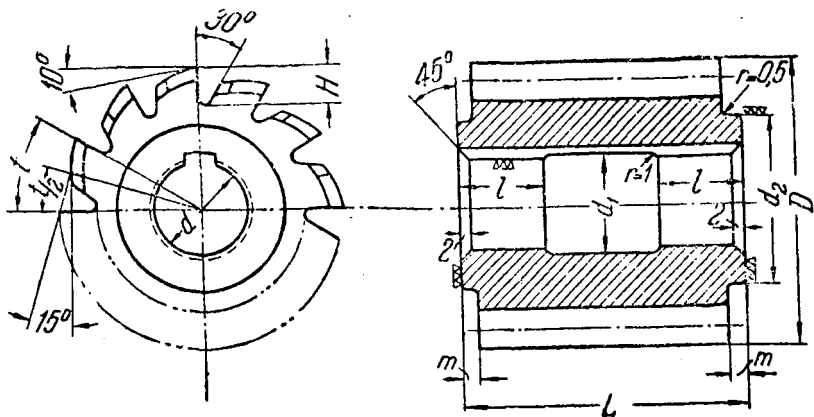
Некоторые иностранные фирмы выпускают чистовые шлицевые червячные фрезы с углом подъема средней винтовой линии фрезы, достигающим до 5° , но с прямыми канавками для стружек. Искажение профиля фрезы, которое получается от указанного расположения канавок, повидимому устраняется пробным шлифованием профиля фрезы и повторными нарезаниями контрольных образцов изделий.

Вообще говоря, червячная фреза со спиральными канавками, нормальными к средней винтовой линии фрезы, обладает тем преимуществом, что у данной фрезы с двух сторон режущего зуба получаются одинаковые или почти одинаковые условия резания, между тем как у фрезы с канавками, параллельными оси, с одной стороны зуба угол резания меньше 90° , а с другой — больше 90° , что значительно ухудшает условия резания фрезы.

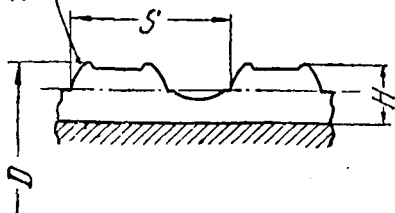
Ниже приводим таблицу размеров червячных фрез для многих поочных валиков. В этой таблице сделана попытка систе-

Таблица 10.

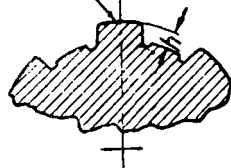
Червячные фрезы для шлицевых валиков.



Профиль фрезы



Профиль изделия



Шаг S	Макс. глубина канавки изделия h	D	H	L		d	Число зубцов z	d ₁	l		d ₂	m
				корот.	длин.				корот.	длин.		
С 5 до 10	4	50	От 5 до 8	25	50	22	От 12 до 14	23	6	12	32	3
" 8 " 12	5	60	" 6 " 10	35	60				8	15		
" 10 " 15	6,5	70	" 6 " 12	40	75	27	" 14 " 16	29	10	18	40	
" 13 " 20	8	80	" 7 " 14	50	85				12	20		
" 18 " 25	10	90	" 8 " 15	60	95	32	" 14 " 18	34	15	24	50	
" 23 " 30		100	" 9 " 16	60	110				15	28		
" 27 " 35		110	" 9 " 16	70	120	40	" 16 " 18	42	17	30	60	4
" 32 " 40		125	" 10 " 16	70	140				17	35		

Шпонки и отверстия по ОСТ 1489.

Для фрез с углом подъема средней винтовой линии до 5° допустимы прямые канавки для стружек.

Профиль фрезы изготавливается по правой спирали, а канавки для стружек — по левой.

Изменение направления спиралей должно быть оговорено.

Вторичное снятие затылка у фрез со шлифованным профилем производить с половины окружности шага t (см. эскиз).

Вместо фасок у отверстия фрезы допустимы закругления радиусом r = от 1 до 2 мм.

матизации существующих размеров червячных фрез в зависимости от шага обрабатываемого изделия (см. таблицу 10).

Нужно считать, что порядок установления размеров фрезы в зависимости от шага—наиболее правильный, так как мы ранее установили, что наружный диаметр фрезы находят, задаваясь предварительно углом подъема средней винтовой линии, но угол подъема зависит от шага фрезы.

Как видно из таблицы, некоторые фрезы, имеющие одинаковые шаги, могут иметь различные габариты в зависимости от глубины канавок обрабатываемого изделия. В таблице даны ориентировочные величины глубины канавки и чисел зубцов для данного диаметра фрезы. Все эти величины уточняются при наличии данных о размерах изделия. Далее в таблице даны два ряда длин. Фрезы длинные следует применять для обычных типов червячных фрез, короткие следует применять для специальных типов червячных фрез.

20. Определение размеров зуба червячной фрезы в нормальном сечении.

При установке оси червячной фрезы относительно изделия под углом, равным углу подъема средней винтовой линии, профиль фрезы в сечении, нормальном к средней винтовой линии, должен соответствовать профилю теоретической рейки. Из этого условия находим основные размеры профиля.

Как видно из рис. 62, толщина зуба фрезы по начальной прямой B определится следующим образом. При качении началь-

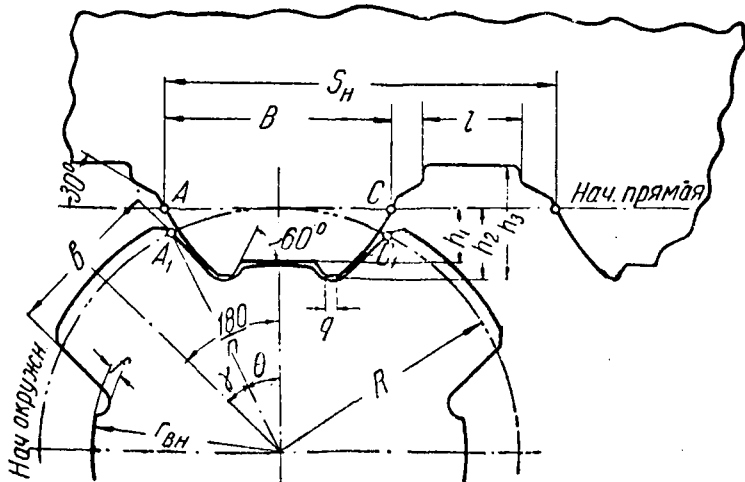


Рис. 62.

ной окружности по начальной прямой точка A_1 , лежащая на пересечении профиля изделия с начальной окружностью, совпадет с точкой A , лежащей на пересечении начальной прямой с профилем фрезы. Точно так же совпадет точка C , лежащая

на пересечении начальной прямой со второй стороной профиля фрезы, с точкой C_1 , лежащей на профиле изделия. Так как начальная прямая катится по начальной окружности без скольжения, то длина отрезка $\overline{AC} = \overline{C_1A_1}$, следовательно толщина зуба фрезы по начальной прямой равна длине дуги начальной окружности, заключенной между выступами обрабатываемого изделия.

Длина дуги $\overline{A_1C_1}$ определится следующим образом:

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R},$$

где b —толщина выступа изделия,

R —радиус начальной окружности изделия.

Угол между осью симметрии выступа и осью симметрии впадины изделия будет равен $\frac{180}{n}$, где n —число выступов на изделии. Тогда половина угла впадины θ° , как видно из рисунка, определится:

$$\theta^\circ = \frac{180}{n} - \gamma, \quad (91)$$

и длина дуги

$$\overline{A_1C_1} = B = 2R\theta,$$

где θ выражен в дуговых единицах. Как известно, в градусах это будет:

$$\frac{\theta^\circ}{180} = \frac{\theta}{\pi} \text{ или } \theta = \frac{\pi\theta^\circ}{180},$$

откуда толщина зуба фрезы по начальной прямой будет:

$$B = \frac{2\pi R\theta^\circ}{180}. \quad (92)$$

Толщину B следует определить точно, учитывая допуск на размер выступа b . Именно при расчете γ следует b брать по среднему значению от верхнего и нижнего пределов допуска на толщину шлица.

Следующим важным размером профиля фрезы является высота h_1 от начальной прямой до нижней площадки фрезы, которая обрабатывает окружность впадин изделия. Эта высота определяет размер диаметра окружности впадин $2r_{\text{вн}}$:

$$h_1 = R - r_{\text{вн}}. \quad (93)$$

Величину $r_{\text{вн}}$ следует брать также по среднему значению верхнего и нижнего пределов допуска.

Полная высота зуба до начальной прямой h_2 определится:

$$h_2 = h_1 + f,$$

где f —глубина закругления, которая берется из чертежа изделия.

Если на чертеже изделия глубина f не задана, то высоту усика выбирают, учитывая сказанное выше о переходных кривых, а также данные, приведенные в таблице 7.

У шлифованных червячных фрез между выступами прорезается винтовая канавка для выхода шлифовального круга. Глубина этой канавки до начальной прямой берется от 2 до 5 мм, при этом канавка имеет долбленный затылок. Тогда h_3 —глубина этой канавки—определится:

$$h_3 = h_2 + (\text{от } 2 \text{ до } 5 \text{ мм}). \quad (94)$$

Часто указанную канавку прорезают, не производя долбления затылка; в этом случае глубину h_3 следует брать равной глубине канавки фрезы для выхода стружки, определяемой по формуле (86), так как только в этом случае будет создана гарантия, что при снятии затылка шлифовкой по профилю шлифовальный круг не будет упираться в дно канавки.

Этот способ прорезания канавки, как более простой, следует рекомендовать производить в тех случаях, когда это не вызывает значительного уменьшения прочности зуба.

Ширина канавки l берется:

$$l = S_n - B - (\text{от } 2 \text{ до } 5 \text{ мм}), \quad (95)$$

где S_n —шаг фрезы по нормали,

B —толщина зуба фрезы,

2—5 мм—соответствуют длинам уступов у профиля фрезы, служащих для снятия фасок у обрабатываемого изделия.

Так как фаски у вершин выступов обрабатываемых изделий расположены в большинстве случаев под углом 45° к боковой стороне выступа, то, как установлено практикой; соответствующий ему уступ на профиле фрезы следует расположить под углом $30-35^\circ$ к начальной прямой.

Если вершина шпоночного выступа закруглена радиусом r , то у зуба фрезы выше начальной прямой также делают закругление, как было рассмотрено выше.

Ширину площадки у усиков q следует брать от 0,2 до 1,2 мм для наиболее ходовых размеров червячных фрез. С уменьшением этой ширины уменьшается стойкость усика. С другой стороны при увеличении ее уширяется переходная кривая, что не всегда желательно.

В данном случае мы привели расчет наиболее типичного профиля. Для других профилей расчет несколько видоизменится.

Пример 15. Дан многошпоночный валик следующих размеров:

Наружный диаметр	$2R_{\text{нар}} = 60_{-0,10}^{+0,06}$	мм
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 52_{-0,6}^{+0,2}$	"
Ширина шпонки	$b = 9_{-0,085}^{+0,035}$	"
Глубина переходной кривой канавки у основания шпонки ниже окружности впадин . . .	$f = 0,8$	"

$$\text{Радиус закругления краев шпоночных выступов } r = 0,5 \text{ мм}$$

$$\text{Число шпонок } \dots \dots \dots n = 10$$

В этом случае радиус начальной окружности равен:

$$R = R^b - r = 30 - 0,5 = 29,5 \text{ мм.}$$

Определить размеры зуба фрезы в нормальном сечении к средней винтовой линии.

Определяем толщину зуба фрезы B по начальной прямой:

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{8,94}{59} = 0,15136; \gamma = 8^\circ 42'.$$

Половина центрального угла впадины валика будет:

$$\theta^\circ = \frac{180}{n} - \gamma = 18^\circ - 8^\circ 42' = 9^\circ 18' = 9,3^\circ;$$

$$B = \frac{2\pi R \theta^\circ}{180} = 0,01745 \cdot 2R \theta^\circ = 0,01745 \cdot 59 \cdot 9,3 = 9,58 \text{ мм.}$$

Определяем высоту зуба от нижней площадки до начальной прямой:

$$h_1 = R - r_{\text{вн}} = 29,5 - 25,8 = 3,7 \text{ мм.}$$

Полная высота зуба до площадки усика будет:

$$h_2 = h_1 + f = 3,7 + 0,8 = 4,5 \text{ мм.}$$

Высота зуба до канавки фрезы для выхода шлифовального кружка

$$h_3 = h_2 + 2,5 = 4,5 + 2,5 = 7 \text{ мм.}$$

Ширина канавки для выхода шлифовального кружка будет:

$$S_n = \frac{2\pi R}{n} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 29,5}{10} = 18,54 \text{ мм.}$$

$$l = 18,54 - 9,58 - 2 \approx 7 \text{ мм.}$$

Ширину площадки усика берем равной $q = 0,4 \text{ мм}$.

Профиль зуба фрезы выше начальной прямой очерчиваем радиусом $r = 0,6 \text{ мм}$, а продолжение этого закругления—прямой под углом 30° к начальной прямой фрезы.

21. Углы передней заточки и задней обточке и углы в процессе резания.

Углом передней заточки β у червячных фрез условимся считать угол, измеряемый в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, и лежащий между передней гранью зуба фрезы и радиусом, проведенным через вершину профиля. Указанный угол β для черновых червячных фрез берется $5^\circ - 10^\circ$. Для черновых червячных фрез с канавкой для выхода стружки, параллельной оси, можно допустить передний угол $\beta = 10^\circ$.

Для черновых червячных фрез со спиральными канавками для выхода стружки следует передний угол брать $5^\circ - 6^\circ$, так как на

спиральных канавках трудно, а в некоторых случаях даже невозможно, осуществить больший передний угол. Причина заключается в том, что при фрезеровке и шлифовке спиральной канавки для выхода стружки передняя грань зуба получается не радиальной, а закругленной у вершины. Устранить или уменьшить это можно, фрезеруя или шлифуя канавку для стружки таким образом, чтобы угловатая фреза или шлифовальный круг касались передней грани зубцов червячной фрезы не плоской, а своей конической стороной; кроме того в этом случае следует увеличивать угол канавки для стружки.

Передний угол β у червячных фрез вносит искажение профиля обрабатываемого изделия. Поэтому чистовые червячные фрезы не имеют переднего угла.

Задний угол γ у фасонных фрез с задней обточкой по архимедовой спирали обыкновенно задается в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, и считается углом между прямой, перпендикулярной к радиусу, проходящему через вершину зуба, и касательной к затылочной кривой у вершины зуба.

Задний угол в этом случае, как известно, определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{zh}{2\pi R_{\phi}}, \quad (96)$$

где z — число зубцов фрезы,

h — эксцентриситет затылочной кривой, т. е. величина падения затылка до следующего зуба фрезы,

$2R_{\phi}$ — наружный диаметр фрезы.

При последующей заточке фрезы по передней грани (рис. 58) происходит уменьшение наружного диаметра фрезы. Весь профиль как бы сдвигается в этом случае к центру.

Задний угол у вершины зуба при последующей заточке фрезы меняется, так как затылочная кривая есть архимедова спираль.

Задний угол у вершины зуба переточенной фрезы также определится по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{zh}{2\pi \rho}, \quad (97)$$

где ρ — радиус наружной окружности переточенной фрезы,

h и z — остаются такими же, как у новой фрезы.

Деля правые и левые части формул (96) и (97) друг на друга, получаем:

$$\frac{\operatorname{tg} \gamma_1}{\operatorname{tg} \gamma} = \frac{R_{\phi}}{\rho}$$

или

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{R_{\phi}}{\rho} \operatorname{tg} \gamma. \quad (98)$$

Таким образом, зная задний угол γ у вершины новой фрезы, мы можем определить задний угол γ_1 в любой точке затылованной поверхности фрезы, расположенной на расстоянии ρ от оси фрезы.

Формулой (97) мы определяем задний угол γ_1 у фасонных фрез в плоскости, перпендикулярной к оси. Во многих случаях нас интересует величина заднего угла в плоскости, параллельной оси фрезы. Как известно, этот угол определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \gamma_0 = \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \varphi, \quad (99)$$

где γ — задний угол в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, φ — угол между осью фрезы и касательной к профилю в рассматриваемой точке (рис. 58).

Рассуждая вышеизложенным способом, мы найдем задний угол γ_0 в плоскости, параллельной оси в любой точке профиля фрезы, расположенной на расстоянии ρ от оси последней:

$$\operatorname{tg} \gamma_0 = \frac{R_\phi}{\rho} \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \varphi. \quad (100)$$

Как видно, формула (99) тождественна с (100) только при $\rho = R_\phi$, т. е. у вершины зуба фрезы.

Формулы (98) и (100) выражают значения углов задней отточки у простых фасонных фрез.

Для простоты дальнейшего исследования будем пользоваться формулами (96) и (99).

У червячных фрез задний угол в плоскости, параллельной оси фрезы, несколько изменится по сравнению с задним углом у простых фасонных фрез, так как снятие затылка у червячных фрез производится по винтовой поверхности, т. е. боковые поверхности профиля получают дополнительный наклон в направлении подъема винтовой линии.

В этом случае задний угол в плоскости, параллельной оси, с одной стороны увеличится на угол подъема винтовой линии, а с другой стороны уменьшится на эту величину. Тогда формулы задних углов в плоскости, параллельной оси, примут такое значение (рис. 58). С одной стороны поверхности зуба:

$$\operatorname{tg} \gamma_{01} = \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \varphi - \operatorname{tg} \alpha. \quad (101)$$

С другой стороны поверхности зуба: ²

$$\operatorname{tg} \gamma_{02} = \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \alpha. \quad (102)$$

¹ См. журнал „Machinenbau“ за 1930)г., № 24, статья Windmüller: „Определение размеров червячных фрез для цилиндрических колес“.

² Для простоты не приводим более полного вывода формул (101) и (102), что усложнило бы задачу значительными выкладками. Автором решен этот вопрос следующим образом. Найдено уравнение затылованной поверхности зуба червячной фрезы трапециoidalного профиля, затем найдено уравнение линии пересечения зуба затылованной поверхности фрезы с плоскостью, перпендикулярной к перед-

Как видно из (101), $\operatorname{tg} \gamma_{01}$ может быть равен или меньше нуля, что—казалось бы—ухудшило условия резания или сделало бы резание невозможным; на самом деле, как видно из дальнейшего, угол подъема фрезы α на условия резания влияния не оказывает, т. е. величина заднего угла фрезы в плоскости, параллельной оси, при резании не зависит от угла подъема винтовой линии.

Для доказательства рассмотрим случай резания фрезой, ось которой установлена перпендикулярно к оси изделия.

Фрезу (рис. 63) берем с правой нарезкой, т. е. вращение фрезы происходит по часовой стрелке, если смотреть с правого торца фрезы. В этом случае изделие будет вращаться по часовой стрелке, если смотреть на торец изделия снизу. Для удобства будем рассматривать относительное движение фрезы, т. е. будем считать, что изделие не вращается вокруг своей оси, а вращается фреза вокруг оси изделия. Кроме этого фреза вращается вокруг своей оси; в этом случае каждый зуб фрезы будет совершать движение в плоскости, перпендикулярной к оси изделия, и вращательное вокруг оси фрезы, направленное перпендикулярно к оси фрезы.

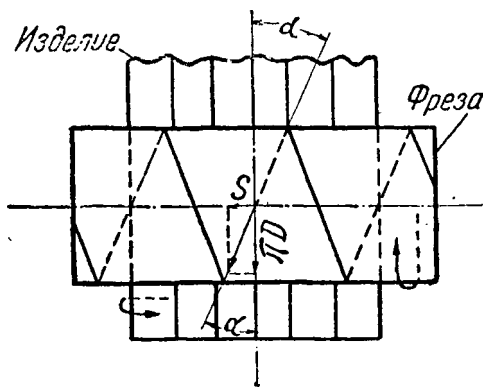


Рис. 63.

Эти два движения между собою связаны. Действительно, за один оборот фрезы изделие поворачивается на шаг; поэтому эти движения можно обозначить векторами (рис. 63), равными S (шаг изделия) и πD (D —диаметр фрезы).

Скорость движения зуба фрезы относительно изделия будет равна геометрической сумме S и πD и направлена под углом α к оси изделия, так как $\frac{S}{\pi D} = \operatorname{tg} \alpha$, где α —угол подъема винтовой линии фрезы.

ней грани зуба и параллельной оси фрезы. Затем при помощи дифференциального уравнения тангенса угла касательной найдены задние углы с одной и другой сторон зуба.

Полученные этим методом значения задних углов следующие:

$$\operatorname{tg} \gamma_{01} = \frac{R_{\Phi}}{\rho} \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \varphi - \frac{R_{\Phi}}{\rho} \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_{02} = \frac{R_{\Phi}}{\rho} \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \varphi + \frac{R_{\Phi}}{\rho} \operatorname{tg} \alpha,$$

где ρ —произвольный радиус до любой точки профиля фрезы,

R_{Φ} —радиус наружной окружности фрезы,

α —угол подъема винтовой линии на наружной окружности фрезы.

Из сказанного можно сделать заключение, что движение зуба фрезы, или направление резания, совпадают с направлением витка фрезы. К этому придем, если будем таким же образом рассматривать резание фрезой, ось которой установлена под углом α к прямой, перпендикулярной оси изделия. В этом случае, как видно из рис. 64, относительное движение зуба фрезы совпадает также с направлением витка фрезы.

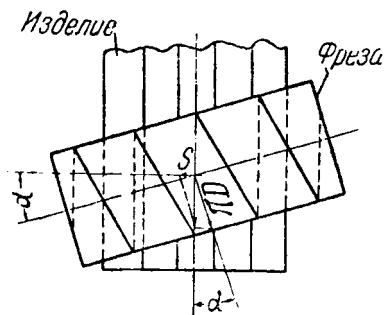


Рис. 64.

Таким образом задние углы червячной фрезы во время резания с одной стороны витка увеличиваются, а с другой уменьшаются углы задней обточки на величину α угла подъема винтовой линии фрезы.

Как известно, для малых углов $\alpha = \text{tg } \alpha$, $\gamma_{01} = \text{tg } \gamma_{01}$ и $\gamma_{02} = \text{tg } \gamma_{02}$, и тогда формулы (101) и (102) как для правой, так и для левой сторон витка фрезы, будут равны:

$$\text{tg } \gamma_0 = \text{tg } \gamma_{01} + \text{tg } \alpha = \text{tg } \gamma_{02} - \text{tg } \alpha = \text{tg } \gamma \cos \varphi, \quad (103)$$

где γ — задний угол в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, φ — угол между касательной к профилю и осью фрезы.

Формула (103) для задних углов в осевом сечении червячных фрез ничем не отличается от формулы (99) для фасонных фрез; следовательно и в нормальной плоскости к профилю червячной фрезы задний угол определится как у фасонных фрез по формуле:

$$\text{tg } \gamma_n = \frac{R_\phi}{\rho} \text{tg } \gamma \cos \varphi. \quad (104)$$

Величины задних углов у червячных фрез в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, берутся от 7° до 11° . Для шлифованных фрез следует брать задний угол $\gamma = 7^\circ$, так как большие углы, как было выяснено раньше, препятствуют шлифовке профиля дисковым кружком. Для нешлифованных фрез следует брать $\gamma = 10^\circ - 11^\circ$.

Из формулы (104) видно, что если профиль фрезы имеет участки, касательная к которым составляет с осью фрезы угол φ , близкий к 90° , то задний угол γ_n приближается к нулю. Условия резания у такой фрезы плохие. Увеличение γ в данном случае нецелесообразно из-за невозможности шлифовки. Следовательно необходимо уменьшить по возможности значение φ .

Но значение φ у червячных фрез зависит от формы профиля. Форма же профиля зависит, при постоянных прочих условиях, от радиуса начальной окружности обрабатываемого изделия. Нетрудно убедиться, что для уменьшения значения φ на крутых

участках профиля червячной фрезы следует увеличить радиус начальной окружности изделия. Действительно, для определения заднего угла γ_n в нормальном сечении к профилю фрезы мы раньше получили соотношение (104):

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{R_\phi}{\rho} \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi.$$

Здесь ρ и φ являются переменными.

Для определения значения φ у червячных фрез для обработки прямолинейных профилей, рассмотрим уравнения профиля фрезы.

Как видно из рис. 8, параметр α уравнений (8) и (9) есть угол между касательной к профилю фрезы и прямой, перпендикулярной к начальной прямой OX . Но так как начальная прямая параллельна оси фрезы, то α есть угол между касательной к профилю фрезы и перпендикуляром к оси фрезы. Следовательно φ есть угол, дополнительный к 90° , т. е.:

$$\alpha = 90^\circ - \varphi.$$

Но из уравнения (10)

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{\rho^2 - h^2}{R^2}}$$

или

$$\cos(90^\circ - \varphi) = \sin \varphi = \sqrt{\frac{\rho^2 - h^2}{R^2}}, \quad (105)$$

где ρ —произвольный радиус из центра до точки профиля изделия, h —расстояние от центра до прямой профиля изделия, R —радиус начальной окружности изделия.

Как видно из (105), с увеличением R —радиуса начальной окружности изделия—угол φ в рассматриваемой точке профиля уменьшается, следовательно γ_n по формуле (104) увеличивается, т. е. увеличивается задний угол в нормальном сечении.

Задний угол в плоскости, нормальной к профилю фрезы у начальной прямой, определится, если мы в формулу (105) подставим вместо $\rho = R$. Тогда

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{h}{R}\right)^2} = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma_{из}} = \cos \gamma_{из}$$

$$\text{или } \cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = \sqrt{1 - \cos^2 \gamma_{из}} = \sin \gamma_{из}.$$

Подставляя это значение в формулу (104), получим:

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{R_\phi}{\rho} \operatorname{tg} \gamma \sin \gamma_{из}. \quad (106)$$

Пример 16. Для многошпоночного валика с диаметром начальной окружности $2R = 59$ мм и шириной шпонки $b = 8,94$ сконструирована червячная фреза с наружным диаметром $2R_\phi = 75$

и высотой зуба до начальной прямой $H=4,5$, с эксцентриситетом задней обточки $h=2,5$ и числом зубцов $z=14$.

Определить задний угол γ_n в плоскости, нормальной к профилю зуба фрезы, в точке пересечения профиля с начальной прямой.

Задний угол в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы у вершины зуба, будет:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h \cdot z}{2\pi R_\phi} = \frac{2,5 \cdot 14}{3,14 \cdot 75} = 0,14861;$$

$$\gamma = 8^\circ 27'.$$

Угол наклона касательной к профилю фрезы в точке пересечения с начальной прямой определится из

$$\sin \gamma_{\text{из}} = \frac{b}{2R} = \frac{8,94}{59} = 0,15136;$$

$$\gamma_{\text{из}} = 8^\circ 42'.$$

Расстояние от точки профиля, в которой определяем задний угол, до оси фрезы будет:

$$\rho = R_\phi - H = 37,5 - 4,5 = 33.$$

Тогда задний угол в нормальной плоскости определится:

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{R_\phi}{\rho} \operatorname{tg} \gamma \sin \gamma_{\text{из}} = \frac{37,5}{33} \operatorname{tg} 8^\circ 27' \sin 8^\circ 42';$$

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{37,5}{33} 0,14861 \cdot 0,16136 = 0,02560.$$

$$\gamma_n = 1^\circ 28'.$$

Такая величина заднего угла для червячных фрез допустима.

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ.

22. Точность при обработке изделий червячными фрезами.

Известная американская фирма „Illinois tool works“ гарантирует следующие точности обрабатываемых изделий при применении предлагаемых данной фирмой шлифованных и нешлифованных червячных шлицевых фрез.

Нешлифованные шлицевые червячные фрезы указанная фирма рекомендует применять в том случае, когда допуск на ширину шпоночного выступа и диаметр впадин изделия равны или больше 0,075 мм. Эту точность фирма гарантирует для всех стандартных американских шлицевых валиков с числом шпонок 4 и больше, за исключением четырехшпоночных валов диаметром больше 2 дюймов. Применяемые для последних валов шлифованные червячные фрезы дают точность на ширину шпонки и окружности впадин не меньше 0,075 мм.

За этим исключением шлифованные червячные фрезы применяются для валов с допуском на ширину шпонки и диаметр не меньше 0,025 мм.

Наиболее передовая американская фирма по производству зуборезных станков и инструментов „Barber-Colman Company“, имеющая большой опыт в производстве различных типов червячных фрез, дает следующие указания о достигаемой шлицевыми червячными фрезами точности на обрабатываемых изделиях (табл. 11—13).

Таблица 11.

Точность при обработке шлицевых валиков однозаходными нешлифованными фрезами.

(Размеры в дюймах)

Наружный диаметр шлицевого вала	3 или 4 шпонки		6 шпонок или 8		10 шпонок и больше, с закруглением у основания	
	Ширина	Диаметр окружности впадин	Ширина	Диаметр окружности впадин	Ширина	Диаметр окружности впадин
До 1 1/2	0,002	0,004	0,002	0,002	—	—
От 1 1/2 до 2 1/2	0,003	0,005	0,002	0,004	—	—
2 1/2 и больше . .	0,003	0,006	0,003	0,005	—	—
2 и меньше	—	—	—	—	0,002	} Приближенно
2 и больше	—	—	—	—	0,003	

Таблица 12.

Точность при обработке шлицевых валиков однозаходными шлифованными фрезами.

(Размеры в дюймах).

Наружный диаметр шлицевого вала	3 или 4 шпонки		6 или 8 шпонок		10 шпонок и больше, с закруглением у основания	
	Ширина	Диаметр окружности впадин	Ширина	Диаметр окружности впадин	Ширина	Диаметр окружности впадин
До 1 $\frac{1}{2}$	0,001	0,002	—	—	—	—
От 1 $\frac{1}{2}$ и больше	0,002	0,003	—	—	—	—
До 2 $\frac{1}{2}$	—	—	0,001	0,001	—	—
2 и больше	—	—	0,002	0,002	—	—
2 и меньше	—	—	—	—	0,001	} Приближенно
Больше 2	—	—	—	—	0,0015	

Таблица 13.

Точность при обработке шлицевых валиков двухзаходными шлифованными фрезами.

(Размеры в дюймах).

Наружный диаметр шлицевого вала	6 и 10 шпонок		10 шпонок и больше, с закруглением у основания		Ошибка в шаге от шпонки до шпонки, независимо от числа шпонок
	Ширина	Диаметр окружности впадин	Ширина	Диаметр окружности впадин	
2 и меньше	0,002	0,002	0,0015	Приблж.	0,0005
Больше 2	0,002	0,004	0,002	.	0,0007

Не рекомендуется применять двухзаходные чистовые нешлифованные червячные фрезы.

Для валов с числом шпонок 4 и меньше не рекомендуется применять двухзаходные шлифованные червячные фрезы.

23. Допуски и технические условия на червячные шлицевые фрезы.¹

А. Материал для фрез.

Червячные фрезы изготавливаются из высокосортной быстрорежущей стали марки РФ-1 ОСТ 4957, или из стали, по химическому составу близкой к данной марке.

От каждой плавки быстрорежущей стали в лабораторию завода должен отправляться кованный образец от пробного слитка, квадратного сечения 25×25 , с клеймом номера плавки. Здесь определяется содержание плавки, качество стали в отношении загрязненности, в отношении термических свойств стали, а также группы инструмента, для которой предназначается сталь.

Заготовки из быстрорежущей стали, предназначенные для червячных фрез диаметром до 90 мм, должны отковываться в виде штангового материала. Для фрез диаметром свыше 90 мм сталь должна быть исключительно в виде индивидуальных болванок (изготовление этих размеров фрез из штангового материала не допускается). Контроль качества заготовок для червячных фрез по микроструктуре производится в металлографической лаборатории завода, по эталонным микрофотографиям быстрорежущей стали. Заготовки должны поступать в Инструментальный цех в отожженном виде и не иметь внешних пороков, как-то: складок, вмятин, трещин, раковин, волосовин и пр.

Твердость червячных фрез определяется прибором Роквелла и маятником Герберта. Твердость должна быть равномерной на всех рабочих участках фрезы. Пределы твердости термически обработанных червячных фрез по Роквеллу 62—66, шкала С, нагрузка 150 кг, конус алмаза 120°. Проверяется каждая фреза в двух точках на торцовой плоскости с каждой стороны. По Герберту твердость должна быть $\geq 90^\circ$. Проверка твердости обезуглероженных поверхностей зубцов производится напильниками по эталонам твердости.

Сдаваемые готовые червячные фрезы должны быть совершенно размагничены.

В. Порядок контроля и допуски на элементы червячной фрезы.

Таблица 14.

Допуски на наружный диаметр.

Наружный диаметр фрезы в мм	Знак допуска	До 70	Свыше 70 до 100	Свыше 100
Шлифованный профиль	+	0,4	0,5	0,7
Нешлифованный профиль . .	+	0,5	0,7	0,9

¹ Разработаны по данным Кировского завода в Ленинграде, а также других заводов.

Обмер наружного диаметра фрез с нечетным числом зубцов производится на центрах штанген-рейсмусом от плиты. Обмер фрез с четным числом зубцов—штанген-циркулем.

Таблица 15.

Допуски на конусность по наружному диаметру.

Наружный диаметр фрезы в мм	Знак допуска	До 70	Свыше 70 до 100	Свыше 100
Шлифованные	+	0,02	0,03	0,05
Нешлифованные	+	0,05	0,08	0,10

Проверка конусности производится при помощи индикатора. Изделие закрепляется в центрах.

Таблица 16.

Допуск на высоту профиля до окружности впадин.

Шаг фрезы	Знак допуска	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные	\pm	0,1	0,15	0,2
Нешлифованные	\pm	0,1	0,15	0,2

Обмер производится глубомером или шаблоном.

Ступица, являясь базой для установки фрезы при расшлифовке отверстия, определяет эксцентricность наружного диаметра по отношению к отверстию.

Таблица 17.

Допуски на битье ступицы (эксцентricность).

Шаг фрезы	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные	0,01	0,015	0,02
Нешлифованные	0,02	0,03	0,05

Проверка производится индикатором, изделие закрепляется в центрах.

Таблица 18.

Допуск на диаметр отверстия.

Для шлифованных по профилю, отверстия у фрез производятся по 1-му классу точности (А₁) ОСТ—1011.
 Для нешлифованных—по 2-му классу точности (А) ОСТ—1012.

Допуск на овальность и конусность должен лежать в пределах допуска на диаметр отверстия.

Обмер производится пассиметром или микроустом.

Отверстие полируется. Чистота полировки должна быть такой, чтобы в лупу десятикратного увеличения не было видно никаких рисок и царапин.

Таблица 19.

Допуски на линейные размеры фрезы.

Допуски на длину фрезы	
Для длин до	120 мм ± 0,5 мм
Для длин свыше 120 мм	± 1,0 мм

Допуск на толщину зуба на любом расстоянии от начальной прямой может быть взят от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{2}$ допуска на толщину зуба обрабатываемого изделия.

Таблица 20.

Допуски на толщину зуба.

Шаг фрезы	Знак допуска	Допуски на толщину зуба				
		До 8	Свыше 8 до 13	Свыше 13 до 22	Свыше 22 до 35	Свыше 35
Шлифованные . . .	—	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03
Нешлифованные . .	—	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05

Обмер производится специальным шаблоном для проверки толщины или шаблоном для проверки профиля фрезы. Обмер производится также зубомером.

Боковые поверхности зубцов не должны у шлифованных по профилю фрез иметь черновин. Чистота шлифовки должна быть такой, чтобы невооруженным глазом не было видно рисок и царапин.

Нешлифованные по профилю фрезы не должны иметь рисок и следов от резца, оплавленных и пузырчатых мест, и должны быть очищены песком так, чтобы цвет их был равномерный серебристо-матовый.

Таблица 21.

Колебание шага за один любой полный оборот фрезы
(допуски на шаг фрезы по оси).

Шаг фрезы	Знак допуска	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные	—	0,01	0,015	0,02
Нешлифованные	—	0,02	0,025	0,03

Таблица 22.

Допуск на суммарную ошибку в шаге на длине 75 мм

Шаг	Знак допуска	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные	—	0,02	0,03	0,04
Нешлифованные	—	0,05	0,06	0,07

Таблица 23.

Отклонение положения зубцов фрезы от теоретической винтовой линии.

Шаг	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные	0,007	0,01	0,015
Нешлифованные	0,015	0,02	0,03

Проверка шага производится при помощи прибора с индикатором фирмы „Illinois tool works“ Lead Fester for Hobs—№ 76 и др.
Допуск на длину шлифованной части затылка $\pm 0,5$ мм.

Таблица 24.

Допуск на глубину канавки заточки.

Шаг	Знак допуска	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные и нешлифованные	\pm	0,2	0,3	0,4

Таблица 25.

Допуск на радиальность передней грани
(для фрез без переднего угла).

Шаг	Знак допуска	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные и нешлифованные	±	0,02	0,03	0,04

Обмер производится индикатором на специальном приспособлении.

Таблица 26.

Допуски на битье (эксцентricность) наружного диаметра.

Шаг	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные	0,015	0,02	0,03
Нешлифованные	0,05	0,075	0,1

Битье обмеряется индикатором и определяется разностью показаний его.

Таблица 27.

Допуски на боковое (торцовое) битье
(перпендикулярность к оси фрезы).

Шаг	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные и нешлифованные	0,01	0,015	0,02

Битье обмеряется индикатором при поворотах фрезы, установленной на центральной оправке, и определяется разностью показаний индикатора.

Таблица 28.

Допуск на неравномерность окружного шага
(от зуба до зуба).

Шаг	До 15	Свыше 15 до 30	Свыше 30
Шлифованные и нешлифованные	0,02	0,03	0,05

Проверка производится оптической делительной головкой и индикатором.

С. Производственное испытание червячных фрез.

1. Производятся два рода испытаний:

а) испытуемой фрезой нарезаются пробные образцы изделий (испытание на точность),

б) производятся испытания на стойкость.

2. Образец испытания червячной фрезы на точность сопровождает производившую его фрезу.

3. Окончательная проверка правильности профиля зуба определяется по размерам образца.

4. Требуемая стойкость червячных фрез обеспечивается правильным процессом термической обработки и соблюдением требуемой твердости после закалки.

Производственное испытание на стойкость выполняется при следующем режиме резания:

а) скорость резания 25 м/мин,

б) подача ~ 0,13 мм на 1 оборот фрезы,

в) охлаждение веретенным маслом.

5. Червячная фреза (из стали РФ-1) должна проработать до затупления не меньше 3 час. 30 мин. машинного времени.

6. Нормальным считается затупление до 0,25 мм.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

ПРИМЕРЫ.

24. Пример расчета червячной фрезы с усиками для многошпоночного валика.

Рассчитать червячную шлицевую фрезу с усиками со шлифованным профилем.

Дан валик следующих размеров:

Наружный диаметр	$2R_{\text{нар}} = 108_{-0,4}^{-0,2}$ мм
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 100_{-0,105}^{-0,23}$.
Ширина шпонки	$b = 17_{-0,105}^{-0,045}$.
Число шпонок	$n = 10$
Глубина канавки (переходной кривой) у основания шпонки	$f = 0,8$ мм
Радиус закругления краев шпоночных выступов	$r = 0,5$.

Сконструировать червячную шлифованную фрезу с расчетом профиля и подбором допусков по техническим условиям.

Определяем радиус и координаты центра окружности заменяющей кривую профиля фрезы аналитическим способом. Радиус начальной окружности берем равным радиусу окружности, проведенному через центры закруглений краев шпонок:

$$R = R_{\text{нар}} - r = 54 - 0,5 = 53,5 \text{ мм.}$$

Глубина шпоночной канавки валика будет равна:

$$t = R - r_{\text{вн}} = 53,5 - 49,75 = 3,75 \text{ мм.}$$

Задаемся двумя радиусами зацепления и находим соответствующие им параметры:

$$\rho_1 = R - 0,5t = 53,5 - 0,5 \cdot 3,75 = 51,625 \text{ мм.}$$

$$\rho_2 = R - 0,9t = 53,5 - 0,9 \cdot 3,75 = 50,125 \text{ мм.}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{\sqrt{\rho_1^2 - h^2}}{R} = \frac{\sqrt{51,625^2 - 8,46^2}}{53,5} = 0,95195;$$

$$\alpha_1 = 17,833^\circ;$$

$$\sin \alpha_1 = 0,30625.$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{\sqrt{p_2^2 - h^2}}{R} = \frac{\sqrt{50,125^2 - 8,46^2}}{53,5} = 0,92343;$$

$$\alpha_2 = 22,567^\circ;$$

$$\sin \alpha_2 = 0,38376.$$

Находим координаты точек, соответствующие найденным параметрам:

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{8,46}{53,5} = 0,15816;$$

$$\gamma = 9,1^\circ.$$

$$x_1 = R [0,01745 (\alpha_1 - \gamma) - \cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma)];$$

$$x_1 = 53,5 [0,01745 (17,833 - 9,1) - 0,95195 (0,30625 - 0,15816)];$$

$$x_1 = 0,611 \text{ мм.}$$

$$x_2 = R [0,01745 (\alpha_2 - \gamma) - \cos \alpha_2 (\sin \alpha_2 - \sin \gamma)];$$

$$x_2 = 53,5 [0,01745 (22,567 - 9,1) - 0,92343 (0,38376 - 0,15816)];$$

$$x_2 = 1,427 \text{ мм.}$$

$$y_1 = R \sin \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma) = 53,5 \cdot 0,30625 (0,30625 - 0,15816);$$

$$y_1 = 2,426 \text{ мм.}$$

$$y_2 = R \sin \alpha_2 (\sin \alpha_2 - \sin \gamma) = 53,5 \cdot 0,38376 (0,38376 - 0,15816);$$

$$y_2 = 4,632 \text{ мм.}$$

Находим координаты центра и радиус окружности, заменяющей кривую:

$$y_0 = \frac{x_1 (x_2^2 + y_2^2) - x_2 (x_1^2 + y_1^2)}{2 (x_1 y_2 - x_2 y_1)} =$$

$$= \frac{0,611 (1,427^2 + 4,632^2) - 1,427 (0,611^2 + 2,426^2)}{2 (0,611 \cdot 4,632 - 1,427 \cdot 2,426)};$$

$$y_0 = -4,290 \text{ мм.}$$

$$x_0 = \frac{y_1^2 - 2 y_1 y_0 + x_1^2}{2 x_1} = \frac{2,426^2 + 2 \cdot 2,426 \cdot 4,29 + 0,611^2}{2 \cdot 0,611};$$

$$x_0 = 22,154 \text{ мм.}$$

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{22,154^2 + 4,29^2} = 22,561 \text{ мм.}$$

Находим максимальное отклонение окружности от профиля фрезы. Параметр, соответствующий максимальному отклонению, найдется в радианах при $\gamma = 9,1 \cdot 0,01745 = 0,1588$.

$$\alpha_M = \frac{R\gamma + x_0}{2 \left(R + \frac{y_0}{3} \right)} \pm \sqrt{\left[\frac{R\gamma + x_0}{2 \left(R + \frac{y_0}{3} \right)} \right]^2 + \frac{y_0}{R + \frac{y_0}{3}}};$$

$$\alpha_M = \frac{53,5 \cdot 0,1588 + 22,154}{2 \left(53,5 - \frac{4,29}{3} \right)} \pm$$

$$\pm \sqrt{\left[\frac{53,5 \cdot 0,1588 + 22,154}{2 \left(53,5 - \frac{4,29}{3} \right)} \right]^2 - \frac{429}{53,5 - \frac{4,29}{3}}};$$

$$\alpha_M = 0,29422 \pm 0,06502.$$

$$\alpha_{M_1} = 0,35924.$$

$$\alpha_{M_2} = 0,22920.$$

В градусах будет:

$$\alpha_{M_1} = \frac{0,35924}{0,01745} = 20,587^\circ = 20^\circ 35';$$

$$\alpha_{M_2} = \frac{0,2292}{0,01745} = 13,135^\circ = 13^\circ 8'.$$

Определяем расстояние от центра заменяющей окружности до наиболее удаленной точки кривой:

$$\rho_{M_1}' = R (\sin \alpha_{M_1} - \sin \gamma) - \frac{y_0}{\sin \alpha_{M_1}};$$

$$\rho_{M_1}' = 53,5 (\sin 20^\circ 35' - \sin 9^\circ 6') + \frac{4,29}{\sin 20^\circ 35'} = 22,551 \text{ мм.}$$

$$\rho_{M_2}' = R (\sin \alpha_{M_2} - \sin \gamma) - \frac{y_0}{\sin \alpha_{M_2}};$$

$$\rho_{M_2}' = 53,5 (\sin 13^\circ 8' - \sin 9^\circ 6') + \frac{4,29}{\sin 13^\circ 8'} = 22,676 \text{ мм.}$$

Максимальные отклонения будут:

$$\Delta \rho_{M_1} = \rho_{M_1}' - r = 22,551 - 22,561 = -0,010 \text{ мм.}$$

$$\Delta \rho_{M_2} = \rho_{M_2}' - r = 22,576 - 22,561 = +0,015 \text{ мм.}$$

Как видно, отклонения меньше допуска на ширину шпонки, поэтому допустимы.

Определение размеров зуба фрезы в нормальной плоскости (профиля теоретической рейки).

Находим шаг фрезы в нормальной плоскости:

$$S_n = \frac{2\pi R}{n} = \frac{3,1416 \cdot 107}{10} = 33,615 \text{ мм.}$$

Определяем толщину зуба фрезы B по начальной прямой. Как раньше было найдено, $\gamma = 9,1^\circ$; тогда

$$\theta = \frac{180}{n} - \gamma = 18 - 9,1 = 8,9^\circ.$$

$$B = \frac{2\pi R \theta^\circ}{180} = 0,01745 \cdot 107 \cdot 8,9 = 16,62 \text{ мм.}$$

Определяем высоту зуба от нижней площадки до начальной прямой:

$$h_1 = R - r_{\text{вн}} = 53,5 - 49,75 = 3,75 \text{ мм.}$$

Для проверки профиля фрезы зубомером задаем одно промежуточное значение толщины зуба на некотором расстоянии от начальной прямой. Для этого используем найденные выше общие координаты точек теоретического профиля фрезы и заменяющей окружности:

$$x_1 = 0,611 \text{ и } y_1 = 2,426.$$

Тогда толщина зуба на высоте $y_1 = 2,426$ мм от начальной прямой будет:

$$B_1 = B - 2x_1 = 16,62 - 2 \cdot 0,611 = 15,40 \text{ мм.}$$

Полная высота зуба до площади усика будет:

$$h_2 = h_1 + f = 3,75 + 0,8 = 4,55 \text{ мм.}$$

Высота зуба до канавки фрезы для выхода шлифовального кружка будет:

$$h_3 = h_2 + 3,5 = 4,55 + 3,5 \approx 8 \text{ мм.}$$

Ширина канавки будет:

$$l = S_{\text{н}} - B - 3 = 33,615 - 16,62 - 3 \approx 14,0 \text{ мм.}$$

Профиль зуба фрезы выше начальной прямой очерчивается радиусом $r = 0,6$ мм, а продолжение этого закругления—прямой под углом 30° к начальной прямой фрезы.

Площадку усика берем:

$$q = 0,6 \text{ мм.}$$

Определение размеров фрезы.

Наружный диаметр фрезы берем по таблице шлицевых червячных фрез для найденного выше шага $S_{\text{н}} = 33,615$.

Этому шагу соответствует наружный диаметр фрезы $D_{\text{ф}} = 110$ мм и число зубцов $z = 18$.

Тогда эксцентриситет задней обточке будет:

$$h = \frac{\pi D_{\text{ф}} \operatorname{tg} \gamma}{z} = \frac{3,14 \cdot 110 \cdot \operatorname{tg} 8^\circ}{18} \approx 2,7 \text{ мм.}$$

Округляем до ближайшего размера кулачка станка: $h = 3$ мм; эксцентриситет второго затылка берем: $h' = 4,5$ мм.

Определяем глубину канавки для выхода стружки:

$$H = h_3 + h + 2,5 = 8 + 3 + 2 = 13,0 \text{ мм.}$$

Находим средний диаметр фрезы:

$$D_{\text{ср}} = D_{\text{ф}} - h_2 - \frac{h}{2} = 110 - 4,55 - 1,5 = 103,95 \text{ мм.}$$

Угол подъема средней винтовой линии определится:

$$\sin \alpha = \frac{S_{\text{н}}}{\pi D_{\text{ср}}} = \frac{33,615}{3,1416 \cdot 103,95} = 0,10308;$$

$$\alpha = 5^{\circ}55'.$$

Шаг фрезы по оси будет:

$$S_0 = \frac{S_{\text{н}}}{\cos \alpha} = \frac{33,615}{\cos 5^{\circ}55'} = 33,80 \text{ мм.}$$

Шаг спиральной канавки для выхода стружки будет:

$$T = S_0 \operatorname{ctg}^2 \alpha = 33,80 \operatorname{ctg}^2 5^{\circ}55' = 3145 \text{ мм.}$$

Длину фрезы берем по таблице:

$$L = 120 \text{ мм.}$$

Проверяем достаточность длины фрезы:

$$l = 2 \sqrt{h_2 (D_{\text{нар}} - h_2)} = 2 \sqrt{4,55 (108 - 4,55)};$$

$$l \approx 43 \text{ мм.}$$

Выбранная длина почти в 3 раза больше минимально необходимой.

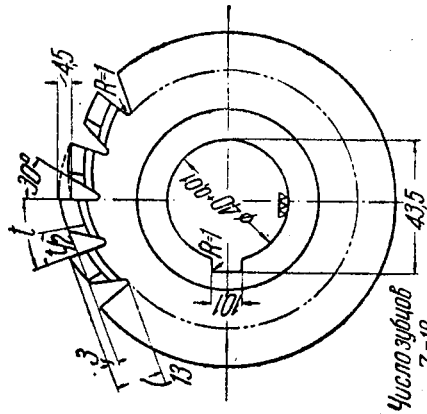
Остальные размеры берем по таблице, а допуски на элементы фрезы—по техническим условиям на червячные шлицевые фрезы. Рабочий чертеж фрезы с найденными размерами приведен на рис. 65.

25. Пример расчета червячной фрезы для большого шлицевого диска.

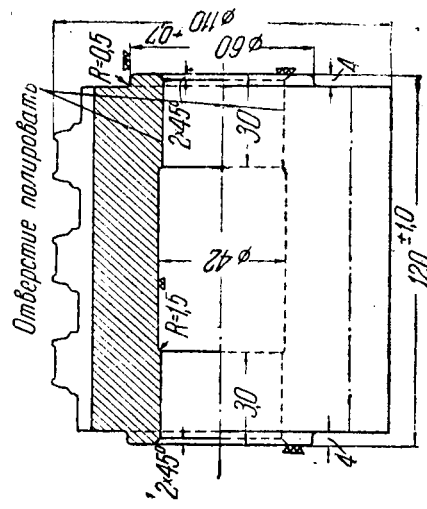
Рассчитать червячную фрезу со шлифованным профилем для обработки многошпоночного диска. Дан шлицевый диск следующих размеров:

Наружный диаметр	$D_{\text{нар}} = 270_{-0,68}^{+0,34} \text{ мм}$
Диаметр впадин	$d_{\text{вн}} = 250_{-1,0}^{+0,4} \text{ мм}$
Ширина шпонки	$b = 35_{-0,50}^{+0,34} \text{ мм}$
Глубина переходной кривой	$f = 1,2 \text{ мм}$
Закругление краев шпоночных выступов	$r = 0,5 \text{ мм}$
Число шпонок	$n = 12$

Сконструировать червячную шлицевую фрезу с расчетом профиля и проставлением допусков по техническим условиям.

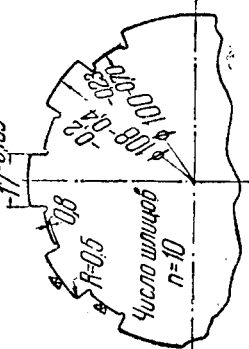
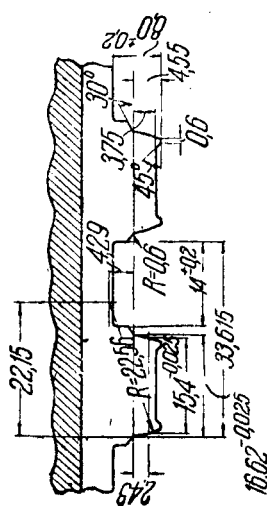


Число зубцов
 $Z=18$



Отверстие полировано

Профиль по нормали M2:1



Нарезка одноходовая правая.
Шаг нарезки по оси
 $S_0=33,80-0,02$.
Канавки для выхода стружки спиральные. Угол подъема средней винтовой линии 5°55'. Профиль шлифовать. Шаг спирали 3145.
Твердость по Роквеллу 62—66.

Фреза червячная шлицевая.

и координаты центра и радиус наивыгоднейшей окружающей профиль фрезы, аналитическим способом.

Радиус начальной окружности будет:

$$R = R_{\text{нар}} - r = 135 - 0,5 = 134,5 \text{ мм.}$$

Глубина шпоночной канавки будет:

$$t = R - r_{\text{вн}} = 134,5 - 124,7 = 9,8 \text{ мм.}$$

Задаемся двумя радиусами зацепления и находим соответствующие им параметры α :

$$\rho_1 = R - 0,55t = 134,5 - 0,55 \cdot 9,8 = 129,22.$$

$$\rho_2 = R - 0,9t = 134,5 - 0,9 \cdot 9,8 = 125,86.$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{\sqrt{\rho_1^2 - h^2}}{R} = \frac{\sqrt{129,22^2 - 17,29^2}}{134,5} = 0,95213;$$

$$\alpha_1 = 17,8^\circ;$$

$$\sin \alpha_1 = 0,30569.$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{\sqrt{\rho_2^2 - h^2}}{R} = \frac{\sqrt{125,86^2 - 17,29^2}}{134,5} = 0,92686;$$

$$\alpha_2 = 22,05^\circ;$$

$$\sin \alpha_2 = 0,37541.$$

Находим координаты точек, соответствующие найденным параметрам:

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{34,58}{269} = 0,12855;$$

$$\gamma = 7,385^\circ.$$

$$x_1 = R [0,01745 (\alpha_1 - \gamma) - \cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma)];$$

$$x_1 = 134,5 [0,01745 (17,8 - 7,385) - 0,95213 (0,30569 - 0,12855)];$$

$$x_1 = 1,763.$$

$$x_2 = 134,5 [0,01745 (22,05 - 7,385) - 0,92686 (0,37541 - 0,12855)];$$

$$x_2 = 3,652.$$

$$y_1 = R \sin \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma) = 134,5 \cdot 0,30569 (0,30569 - 0,12855);$$

$$y_1 = 7,283.$$

$$y_2 = 134,5 \cdot 0,37541 (0,37541 - 0,12855) = 12,465.$$

Находим координаты центра и радиус окружности, замещающей профиль:

$$y_0 = \frac{x_1 (x_2^2 + y_2^2) - x_2 (x_1^2 + y_1^2)}{2 (x_1 y_2 - x_2 y_1)};$$

$$y_0 = \frac{1,763 (3,652^2 + 12,465^2) - 3,652 (1,763^2 + 7,283^2)}{2 (1,763 \cdot 12,465 - 3,652 \cdot 7,283)} = -10,0.$$

$$x_0 = \frac{y_1^2 - 2y_1y_0 + x_1^2}{2x_1} = \frac{7,283^2 + 2 \cdot 7,283 \cdot 10 + 1,763^2}{2 \cdot 1,763};$$

$$x_0 = 57,210.$$

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{57,21^2 + 10^2} = 58,077.$$

Находим максимальное отклонение окружности от профиля фрезы. Параметр, соответствующий максимальному отклонению, найдется при γ (в радианах):

$$\gamma = 0,01745 \cdot 7,385 = 0,12887.$$

$$\alpha_m = \frac{R\gamma + x_0}{2 \left(R + \frac{y_0}{3} \right)} \pm \sqrt{\left[\frac{R\gamma + x_0}{2 \left(R + \frac{y_0}{3} \right)} \right]^2 + \frac{y_0}{R + \frac{y_0}{3}}};$$

$$\alpha_m = \frac{134,5 \cdot 0,12887 + 57,21}{2 \left(134,5 - \frac{10}{3} \right)} \pm$$

$$\pm \sqrt{\left[\frac{134,5 \cdot 0,12887 + 57,21}{2 \left(134,5 - \frac{10}{3} \right)} \right]^2 - \frac{10}{134,5 - \frac{10}{3}}};$$

$$\alpha_m = 0,28410 \pm 0,06713.$$

$$\alpha_{m_1} = 0,35123; \quad \alpha_{m_2} = 0,21697.$$

В градусах будет:

$$\alpha_{m_1} = \frac{0,35123}{0,01745} = 20^\circ 8';$$

$$\alpha_{m_2} = \frac{0,21697}{0,01745} = 12^\circ 26'.$$

Определяем расстояние от центра заменяющей окружности до наиболее удаленной точки кривой:

$$\rho'_{m_1} = R (\sin \alpha_{m_1} - \sin \gamma) - \frac{y_0}{\sin \alpha_{m_1}};$$

$$\rho'_{m_1} = 134,5 \cdot 0,34421 - 0,12855 + \frac{10}{0,34421};$$

$$\rho'_{m_1} = 58,058.$$

$$\rho'_{m_2} = 134,5 (0,21530 - 0,12855) + \frac{10}{0,2153};$$

$$\rho'_{m_2} = 58,114.$$

Отсюда отклонения найдутся:

$$\Delta \rho_{m_1} = \rho'_{m_1} - r = 58,058 - 58,077 = -0,019;$$

$$\Delta \rho_{m_2} = \rho'_{m_2} - r = 58,114 - 58,077 = +0,037.$$

Как видно, отклонения по абсолютной величине не равны между собой, поэтому найденная окружность не является наиболее выгодной; но так как отклонения укладываются в допуски на толщину шпонки, то величины найденных отклонений считаем допустимыми.

Определение размеров зуба фрезы в нормальной плоскости к средней винтовой линии.

Находим шаг фрезы в нормальной плоскости:

$$S_n = \frac{2\pi R}{n} = \frac{3,1416 \cdot 269}{12} = 70,424 \text{ мм.}$$

Определяем толщину зуба B по начальной прямой.

Как раньше было найдено, $\gamma = 7,385^\circ$; тогда половина центрального угла впадины будет:

$$\theta^\circ = \frac{180^\circ}{n} - \gamma = 15 - 7,385 = 7,615^\circ.$$

$$B = 0,01745 \cdot 2R\theta^\circ = 0,01745 \cdot 269 \cdot 7,615 = 35,75 \text{ мм.}$$

Определяем высоту зуба от нижней площадки до начальной прямой:

$$h_1 = R - r_{\text{вн}} = 134,5 - 124,6 = 9,85 \text{ мм.}$$

Для проверки профиля фрезы зубомером задаем одно промежуточное значение толщины зуба. Для этого используем найденные выше координаты точек профиля x_1 и y_1 :

$$x_1 = 1,763 \text{ и } y_1 = 3,652.$$

Тогда толщина зуба фрезы на расстоянии 3,652 мм от начальной прямой будет:

$$B_1 = B - 2x_1 = 35,75 - 3,526 = 32,224 \text{ мм.}$$

Полная высота зуба до площадки усика будет:

$$h_2 = h_1 + f = 9,85 + 1,2 = 11,05 \text{ мм.}$$

Высоту зуба до дна канавки фрезы для выхода шлифовального кружка находим, исходя из образования недолбленной канавки:

$$h_3 = h_1 + h + 5 = 11 + 7 + 5 = 23.$$

Эксцентриситетом $h = 7$ задаемся.

Ширина канавки будет:

$$l = S_n - B - 8 = 70,42 - 32,22 - 8 \approx 30.$$

Профиль выше начальной прямой очерчиваем радиусом $r = 0,6$ мм и прямой под углом 30° к начальной прямой.

Площадку у усика берем:

$$q = 1,5 \text{ мм.}$$

Определение размеров фрезы.

Задаемся углом подъема средней винтовой линии фрезы.

Для достижения приведенных выше допусков на диск, принимаем угол подъема фрезы $\alpha = 7^\circ$.

Определяем приближенную величину среднего диаметра фрезы:

$$D_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{н}}}{\pi \sin \alpha} = \frac{70,42}{3,14 \cdot 0,12187} \approx 184 \text{ мм.}$$

Наружный диаметр фрезы будет:

$$D_{\text{ф}} = D_{\text{ср}} + h_2 + 4 = 184 + 11 + 4 = 199 \text{ мм};$$

округляем:

$$D_{\text{ф}} = 200 \text{ мм.}$$

Определяем глубину канавки для стружек:

$$H_1 = h_3 + 3 = 23 + 3 = 26 \text{ мм.}$$

Эксцентриситетом задней обточке $h = 7$ предварительно задаемся.

Окружный шаг фрезы будет:

$$S_{\text{окр}} = 1,7 H = 1,7 \cdot 26 \approx 46 \text{ мм.}$$

Тогда число зубцов фрезы:

$$z = \frac{\pi D_{\text{ф}}}{S_{\text{окр}}} = \frac{3,14 \cdot 200}{46} \approx 14.$$

Определяем величину эксцентриситета:

$$h = \frac{\pi D_{\text{ф}} \operatorname{tg} \gamma}{z} = \frac{3,14 \cdot 200 \cdot \operatorname{tg} 7^\circ}{14} \approx 6 \text{ мм.}$$

Второй эксцентриситет берем $h = 10 \text{ мм.}$

Тогда действительная глубина канавки для стружек будет:

$$H_1 = h_2 + h + 5 + 3 = 11 + 6 + 5 + 3 = 25.$$

Определяем точное значение среднего диаметра, учитывая переточку:

$$D_{\text{ср}} = D_{\text{ф}} - h_2 - \frac{h}{2} = 200 - 11 - 3 = 186 \text{ мм.}$$

Определяем точное значение угла подъема средней винтовой линии:

$$\sin \alpha = \frac{S_{\text{н}}}{\pi D_{\text{ср}}} = \frac{70,42}{3,14 \cdot 186} = 0,12051;$$

$$\alpha = 6^\circ 55'.$$

Тогда шаг фрезы по оси будет:

$$S_0 = \frac{S_{\text{н}}}{\cos \alpha} = \frac{70,42}{\cos 6^\circ 55'} = 70,94 \text{ мм.}$$

Определяем шаг канавки фрезы для выхода стружки:

$$T = S_0 \operatorname{ctg}^2 \alpha = 70,94 \operatorname{ctg}^2 6^\circ 55' = 4820 \text{ мм.}$$

Длину фрезы, ввиду наличия частых затруднений с получением больших поковок высокосортных быстрорежущих сталей, берем равной:

$$L = 160 \text{ мм.}$$

Проверяем достаточность длины фрезы:

$$l = 2\sqrt{h_2(D_n - h_2)} = 2\sqrt{11(270 - 11)} = 106,7 \text{ мм.}$$

Как видно, длина L примерно в 1,5 раза больше необходимой. Диаметр отверстия берем:

$$d = 0,3 D_\phi = 0,3 \cdot 200 = 60 \text{ мм.}$$

Остальные размеры фрезы выбираем конструктивно.

Допуски выбираем, исходя из допусков на точность изготовления диска.

Определяем задний угол в плоскости, нормальной к профилю у начальной прямой.

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{hz}{\pi D_\phi} = \frac{6 \cdot 14}{3,14 \cdot 200} = 0,13375;$$

$$\gamma = 7^\circ 37'.$$

$$\sin \gamma_{\text{из}} = \frac{b}{2R} = \frac{34,58}{269} = 0,12855;$$

$$\gamma_{\text{из}} = 7^\circ 23'.$$

$$r_\phi = R_\phi - h_2 = 100 - 11 = 89 \text{ мм.}$$

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{R_\phi}{r_\phi} \operatorname{tg} \gamma \sin \gamma_{\text{из}} = \frac{100}{89} \cdot 0,13375 \cdot 0,12855;$$

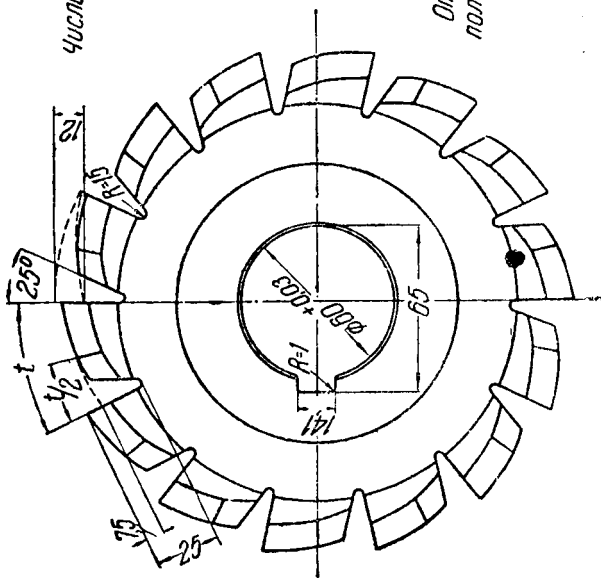
$$\operatorname{tg} \gamma_n = 0,01933.$$

$$\gamma_n = 1^\circ 6'.$$

Как видно, задний угол получился малый. Поэтому увеличиваем эксцентриситет затылочной кривой шлифованной части зуба до $h = 7,5 \text{ мм.}$

Тогда, подсчитывая γ_n вышеуказанным способом, найдем $\gamma_n = 1^\circ 25'$, который следует считать допустимым.

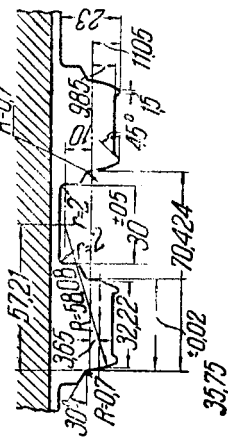
Рабочий чертеж фрезы с найденными размерами приведен на рис. 66.



Число зубцов Z=14

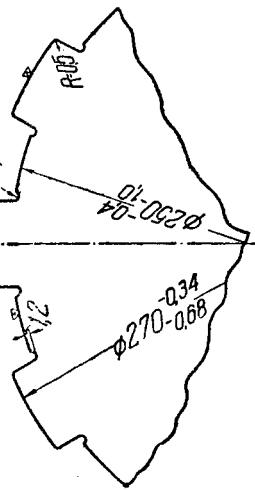
Отверстие
полировать

Профиль фрезы по нормали М11



Профиль изделия

Число шлицов 12



Нарезка одноходовая правая.

Шаг нарезки по оси $S_0 = 70,94 \pm 0,015$.

Канавки для выхода стружки спиральные.

Угол подъема средней винтовой линии $6^\circ 55'$.

Профиль шлифовать. Твердость по Роквеллу 62—66.

Шаг спирали 4820.

Червячная фреза для обработки многошпоночного диска.

26. Пример расчета червячной фрезы для валика с остроугольными шлицами.

Дан валик с остроугольными (елочными) шлицами, имеющий следующие размеры:

Наружный диаметр	$2R_{\text{нар}} = 40_{-0,35}^{0,50}$ мм
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 35,95$ "
Теоретический диаметр до впадин теоретического треугольника	$2r_{\text{т}} = 35,15$ "
Радиус закругления впадин	$r = 0,4$ "
Число шлицов	$n = 36$
Угол впадины	$\eta = 60^\circ$

Сконструировать червячную фрезу для данного валика.

Определяем радиус и координаты центра окружности, заменяющей профиль фрезы. Так как угол между осью симметрии впадины и прямой профиля изделия равен $\eta/2 = 30^\circ$, то расстояние прямой профиля впадины валика до центра начальной окружности будет:

$$h = r_{\text{т}} \sin \eta/2 = 17,58 \cdot 0,5 = 8,79 \text{ мм.}$$

Тогда радиус начальной окружности определится:

$$R = \sqrt{R_{\text{нар}}^2 - h^2} = \sqrt{20^2 - 0,75 \cdot 8,79^2} = 18,5 \text{ мм.}$$

Задаемся двумя радиусами зацепления и находим соответствующие им параметры α .

Берем значения ρ , соответствующие крайним точкам профиля изделия:

$$\rho_1 = R_{\text{нар}} = 19,8 \text{ и } \rho_2 = r_{\text{вн}} = 18,0.$$

Взятые нами значения ρ расположены по обе стороны начальной окружности; поэтому, как видно будет ниже, координаты x_1 и y_1 , отвечающие ρ_1 , должны получиться отрицательными, так как соответствующая точка профиля фрезы расположена выше начальной прямой. За этим исключением порядок расчета профиля ничем не отличается от порядка решения предыдущих примеров.

Соответствующие параметры найдутся:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\sqrt{\rho_1^2 - h^2}}{R} = \frac{\sqrt{19,8^2 - 8,79^2}}{18,5} = 0,95882.$$

$$\alpha_1 = 16^\circ 30' = 16,5^\circ.$$

$$\sin \alpha_1 = 0,28401.$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{\sqrt{\rho_2^2 - h^2}}{R} = \frac{\sqrt{18^2 - 8,79^2}}{18,5} = 0,84912.$$

$$\alpha_2 = 31^\circ 53' = 31,883^\circ.$$

$$\sin \alpha_2 = 0,52819.$$

Определяем координаты точек, соответствующие найденным параметрам:

$$x_1 = R [0,01745 (\alpha_1 - \gamma) - \cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma)].$$

$$\sin \gamma = \frac{h}{R} = \frac{8,79}{18,5} = 0,47513.$$

$$\gamma = 28^\circ 22' = 28,367^\circ.$$

$$x_1 = 18,5 [0,01745 (16,5 - 28,367) - 0,95882 (0,28401 - 0,47513)];$$

$$x_1 = -0,439.$$

$$x_2 = R [0,01745 (\alpha_2 - \gamma) - \cos \alpha_2 (\sin \alpha_2 - \sin \gamma)].$$

$$x_2 = 18,5 [0,01745 (31,883 - 28,367) - 0,84912 (0,52819 - 0,47513)];$$

$$x_2 = 0,3016.$$

$$y_1 = R \sin \alpha_1 (\sin \alpha_1 - \sin \gamma) = 18,5 \cdot 0,28401 (0,28401 - 0,47513);$$

$$y_1 = -1,004.$$

$$y_2 = R \sin \alpha_2 (\sin \alpha_2 - \sin \gamma) = 18,5 \cdot 0,52819 (0,52819 - 0,47513);$$

$$y_2 = 0,5185.$$

Находим координаты центра и радиус окружности, заменяющей кривую:

$$y_0 = \frac{x_1(x_2^2 + y_2^2) - x_2(x_1^2 + y_1^2)}{2(x_1 y_2 - x_2 y_1)};$$

$$y_0 = \frac{-0,439(0,3016^2 + 0,5185^2) - 0,3016(0,439^2 + 1,004^2)}{2(-0,439 \cdot 0,5185 + 0,3016 \cdot 1,004)};$$

$$y_0 = -3,46.$$

$$x_0 = \frac{y_1^2 - 2y_1 y_0 + x_1^2}{2x_1} = \frac{1,004^2 - 2 \cdot 1,004 \cdot 3,46 + 0,439}{2 \cdot 0,439};$$

$$x_0 = 6,54.$$

$$r = \sqrt{6,54^2 + 3,46^2} = 7,40.$$

Находим максимальные отклонения окружности от профиля фрезы. Параметры, соответствующие максимальным отклонениям, найденные в таком же порядке, как было изложено в вышеприведенных примерах, будут:

$$\alpha_{M_1} = 30^\circ 6' \text{ и } \sin \alpha_{M_1} = 0,50151.$$

$$\alpha_{M_2} = 21^\circ 45' \text{ и } \sin \alpha_{M_2} = 0,37056.$$

Находим максимальные расстояния от центра заменяющей кривую окружности до наиболее удаленных точек кривой:

$$\rho'_{M_1} = R (\sin \alpha_{M_1} - \sin \gamma) - \frac{y_0}{\sin \alpha_{M_1}};$$

$$\rho'_{M_1} = 18,5 (0,50151 - 0,47513) + \frac{3,46}{0,50151} = 7,388.$$

$$\rho'_{m_2} = 18,5 (0,37056 - 0,47513) + \frac{3,46}{0,37056} = 7,403.$$

Максимальные отклонения будут:

$$\Delta\rho_{m_1} = \rho'_{m_1} - r = 7,388 - 7,400 = -0,002.$$

$$\Delta\rho_{m_2} = \rho'_{m_2} - r = 7,403 - 7,400 = +0,003.$$

Как видно, отклонения малы и практического значения поэтому не имеют.

Определение размеров профиля зуба фрезы в нормальной плоскости.

Находим шаг фрезы в нормальной плоскости:

$$S_n = \frac{2\pi R}{n} = \frac{3,1416 \cdot 37}{36} = 3,23 \text{ мм.}$$

Определяем толщину зуба фрезы по начальной прямой. Как раньше было найдено:

$$\gamma = 28,367^\circ.$$

Половина центрального угла впадины по начальной окружности будет:

$$\theta = \eta/2 - \gamma = 30 - 28,367 = 1,733^\circ.$$

Тогда толщина зуба, равная отрезку дуги начальной окружности во впадине, будет:

$$B = 0,01745 \cdot 2R\theta = 0,01745 \cdot 37 \cdot 1,733.$$

$$B = 1,055 \text{ мм.}$$

Определяем высоту зуба до начальной прямой:

$$h = R - r_{вн} = 18,50 - 17,98 = 0,52 \text{ мм.}$$

Для большей гарантии увеличиваем несколько высоту до $h_1 = 0,65 \text{ мм.}$

Толщину зуба выше начальной прямой определим, взяв найденные выше общие координаты точки профиля фрезы и заменяющей окружности x_1 и y_1 :

$$x_1 = -0,439;$$

$$y_1 = -1,004.$$

Тогда толщина зуба фрезы на высоте, равной $y_1 = 1,004 \text{ мм}$ от начальной прямой, будет:

$$B_1 = B - 2x_1 = 1,055 - 2 \cdot 0,439 = 1,933 \text{ мм.}$$

Полную высоту зуба берем несколько больше глубины шлица для избежания участия в работе дна впадины профиля фрезы:

$$h_2 = R_{нар} - r_{вн} + 0,5 = 20 - 18 + 0,5 = 2,5 \text{ мм.}$$

Ширину зуба у дна находим из известного уже геометрического построения профиля зуба фрезы:

$$B_2 = 2,42 \text{ мм.}$$

Радиус закругления вершины зуба также находим из геометрического построения и известной высоты зуба до начальной прямой:

$$r = 0,27 \text{ мм.}$$

Определение размеров фрезы.

Ввиду применения этой фрезы на станке, имеющем фрезерную оправку диаметром 32 мм, выбираем наружный диаметр фрезы, исходя из диаметра отверстия в 32 мм. Поэтому, учитывая глубину канавки для стружек и толщину тела, определяющую прочность фрезы, задаемся наружным диаметром:

$$D_{\phi} = 60 \text{ мм.}$$

Определяем приблизительную глубину канавки для стружек, задавшись предварительно эксцентриситетом $h = 2 \text{ мм}$:

$$H = h_3 + h + 1,5 = 2,5 + 2 + 1,5 = 6 \text{ мм.}$$

Окружный шаг фрезы будет:

$$S_{\text{окр}} = 1,8 H = 1,8 \cdot 6 \approx 11 \text{ мм.}$$

Тогда число зубцов фрезы определится:

$$z = \frac{\pi D_{\phi}}{S_{\text{окр}}} = \frac{3,14 \cdot 60}{11} \approx 18 \text{ мм.}$$

Определяем уточненную величину эксцентриситета:

$$h = \frac{\pi D_{\phi} \operatorname{tg} \gamma}{z} = \frac{3,14 \cdot 60 \operatorname{tg} 10^{\circ}}{18} \approx 1,5 \text{ мм.}$$

Определяем точное значение глубины канавки для стружек:

$$H = h_3 + h + 1,5 = 2,5 + 1,5 + 1,5 = 5,5 \text{ мм.}$$

Находим средний диаметр фрезы:

$$D_{\text{ср}} = D_{\phi} - H' - \frac{h}{2} = 60 - 1,8 - \frac{1,5}{2} = 57,45 \text{ мм.}$$

Здесь высота рабочего участка профиля фрезы:

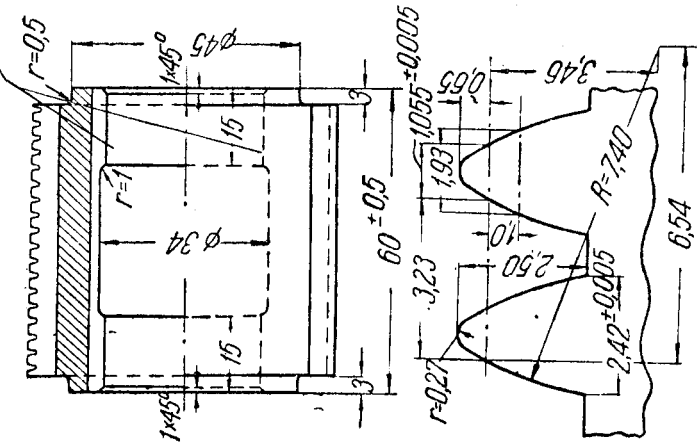
$$H' = R_{\text{нар}} - r_{\text{вн}} = 19,8 - 18 = 1,8 \text{ мм.}$$

Угол подъема средней винтовой линии определится:

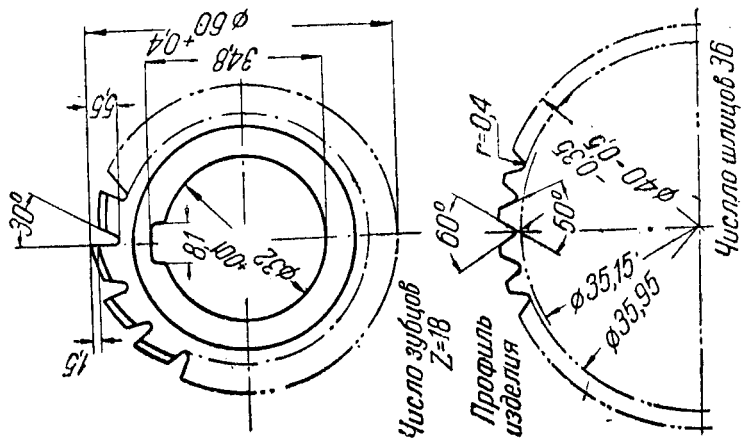
$$\sin \alpha = \frac{S_{\text{н}}}{\pi D_{\text{ср}}} = \frac{3,23}{3,142 \cdot 57,45} = 0,01789;$$

$$\alpha = 1^{\circ}.$$

Отверстие полировать



Профиль фрезы М 10-1



Число зубцов
 $Z=18$

Профиль
изделия

Число шлицов 36

Нарезка однозаходная правая.
Шаг нарезки по оси $S_0 = 3,23 \pm 0,005$.
Канавки для выхода стружек пружимые.
Угол подъема средней винтовой
линии— $1^\circ 0'$.
Твердость по Роквеллу 62—66.

Фреза червячная шлицевая для остроугольных шлицов.

Шаг по оси:

$$S_0 = \frac{S_n}{\cos \alpha} = \frac{3,23}{\cos 1^\circ} = 3,23 \text{ мм.}$$

Ввиду незначительности угла подъема средней винтовой линии делаем прямые канавки для стружек.

Длину фрезы берем равной диаметру:

$$L = D_\phi = 60 \text{ мм.}$$

Проверяем достаточность длины фрезы:

$$l = 2 \sqrt{H'(D_n - H')} = 2 \sqrt{1,8(40 - 1,8)} = 16,5 \text{ мм.}$$

Как видно, длина фрезы примерно в 3,5 раза превосходит минимально необходимую длину.

Остальные размеры фрезы выбираем конструктивно, допуски на изготовление фрезы берем по техническим условиям.

Рабочий чертеж фрезы с найденными размерами приведен на рис. 67.

27. Пример расчета червячной фрезы с удлиненным зубом.

Дан многошпоночный валик следующих размеров:

Наружный диаметр	$2R_{\text{нар}} = 38^{+0,17}$	мм
Диаметр впадин	$2r_{\text{вн}} = 32,8^{+0,30}_{-0,50}$	"
Ширина шпонки	$b = 5,93^{+0,03}_{-0,07}$	"
Число шпонок	$n = 10$	

Сконструировать червячную шлицевую фрезу с удлиненным зубом.

Определяем размеры профиля фрезы.

Радиус начальной окружности валика будет:

$$R = \sqrt{R_{\text{нар}}^2 - 0,75h^2} = \sqrt{19^2 - 0,75 \cdot 2,94^2} = 18,828 \text{ мм.}$$

Построение профиля производим графически, методом копирования последовательных положений чертежа изделия, в 30-кратном увеличении. Производим только прямую обкатку. Так как толщина шпонки имеет небольшой допуск на неточность изготовления, поэтому тщательным подбором радиусов заменяем полученный профиль двумя дугами окружности. По найденным графическим способом координатам центров и радиусов окружности, заменяющих профиль фрезы, находим максимальные отклонения окружностей от теоретического профиля фрезы в таком же порядке, как это было сделано в примере 6. Полученные большие отклонения окружностей от профиля уменьшаем изменением координат центров окружностей и затем вторично находим отклонения. Порядок нахождения отклонений после второго изменения координат центров приведен для данного валика в примере 6. Приведем результаты.

Размеры первой окружности:

$$\begin{aligned}x_0 &= 6,90 \text{ мм.} & y_0 &= -1,179 \text{ мм.} \\ r &= 7,00 \text{ мм.} & \Delta\rho_{M_1} &= 0,0001 \text{ мм.}\end{aligned}$$

Размеры второй окружности:

$$\begin{aligned}x_0 &= 15,19. & y_0 &= -4,70. \\ & & r &= 16,0.\end{aligned}$$

Отклонения в двух крайних точках данной окружности будут:

$$\Delta\rho_1 = -0,004 \text{ мм.} \quad \Delta\rho_2 = +0,005 \text{ мм.}$$

Как видно, полученные отклонения незначительны и вполне укладываются в заданный допуск на ширину шпонки.

Определение размеров зуба фрезы в нормальной плоскости.

Находим нормальный шаг фрезы:

$$S_n = \frac{2\pi R}{n} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 18,828}{10} = 11,83 \text{ мм.}$$

Определяем толщину зуба B по начальной прямой:

$$\sin \gamma = \frac{b}{2R} = \frac{5,88}{37,656} = 0,15615;$$

$$\gamma = 8^\circ 59' = 8,9833^\circ.$$

$$\theta^\circ = \frac{180}{n} - \gamma = \frac{180}{10} - 8,9833^\circ = 9,0167^\circ.$$

$$B = 0,01745 \cdot 2R\theta^\circ = 0,01745 \cdot 37,656 \cdot 9,0167;$$

$$B = 5,93 \text{ мм.}$$

Определяем полную высоту зуба до начальной прямой. Для того чтобы фреза с удлиненным зубом могла обработать полностью прямолинейные стороны шпонок до окружности впадин, зуб фрезы должен иметь теоретически необходимую высоту, которая равна ординате y_1 точки профиля фрезы, сопряженной точке шпоночного выступа на окружности впадин. Эта ордината определена в примере 6 для радиуса зацепления $\rho = r_{\text{вн}} = 16,2 \text{ мм.}$ В этом случае получена высота $H' = y_1 = 3,78 \text{ мм.}$

Полную высоту зуба до дна впадины берем $h_3 = 6 \text{ мм}$ для полной гарантии неучастия дна впадины фрезы в работе резания.

Для того чтобы зубцы обрабатывали валик по внутреннему диаметру методом фасонного фрезерования, вершины средних зубцов фрезы очерчиваем окружностью, радиус которой равен радиусу впадин валика $r_{\text{вн}} = 16,2$. Центр этой окружности располагаем на расстоянии R (радиус начальной окружности валика) от начальной прямой фрезы:

$$R = 18,83 \text{ мм.}$$

Определение размеров фрезы.

Так как фрезу следует изготавливать точной, задаемся углом подъема средней винтовой линии фрезы $\alpha = 2^\circ 30'$. Тогда приближенное значение среднего диаметра фрезы будет:

$$D_{\text{ср}} = \frac{11,83}{3,141 \cdot \sin 2^\circ 30'} = 86,5 \text{ мм.}$$

Наружный диаметр фрезы найдется из соотношения:

$$D_{\text{ф}} = D_{\text{ср}} + h_s = 86,5 + 6 = 92,5.$$

Округляем до $D_{\text{ф}} = 90 \text{ мм.}$

Определяем глубину канавки для стружек, предварительно задавшись эксцентриситетом $h = 2,5$:

$$H = h_s + h + 2,5 = 6 + 2,5 + 2,5 = 11 \text{ мм.}$$

Окружный шаг фрезы будет:

$$S_{\text{окр}} = 1,7 \cdot H = 1,7 \cdot 11 = 18,7 \text{ мм.}$$

Тогда число зубцов фрезы будет:

$$z = \frac{\pi D_{\text{ф}}}{S_{\text{окр}}} = \frac{3,14 \cdot 90}{18,7} = 15,2.$$

Округляем до $z = 16$.

Определяем точную величину эксцентриситета для шлифованной части зуба:

$$h = \frac{\pi D_{\text{ф}} \operatorname{tg} \gamma}{z} = \frac{3,14 \cdot 90 \cdot \operatorname{tg} 7^\circ}{16} = 2,5 \text{ мм.}$$

Для нешлифованной части зуба:

$$h' = \frac{\pi D_{\text{ф}} \operatorname{tg} \gamma'}{z} = \frac{3,14 \cdot 90 \cdot \operatorname{tg} 13^\circ}{16} = 4 \text{ мм.}$$

Точное значение среднего диаметра будет:

$$D_{\text{ср}} = D_{\text{ф}} - H' - \frac{h}{2} = 90 - 3,78 - 1,25 = 85,97 \text{ мм.}$$

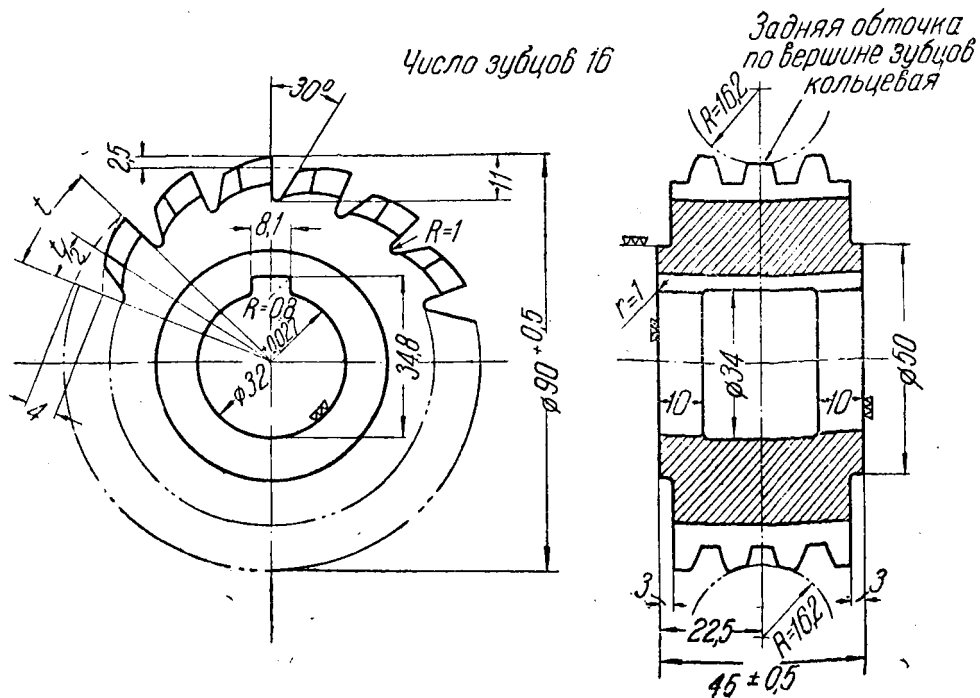
Тогда угол подъема средней винтовой линии будет:

$$\sin \alpha = \frac{S_{\text{н}}}{\pi D_{\text{ср}}} = \frac{11,83}{3,142 \cdot 85,97} = 0,04379;$$

$$\alpha = 2^\circ 30'.$$

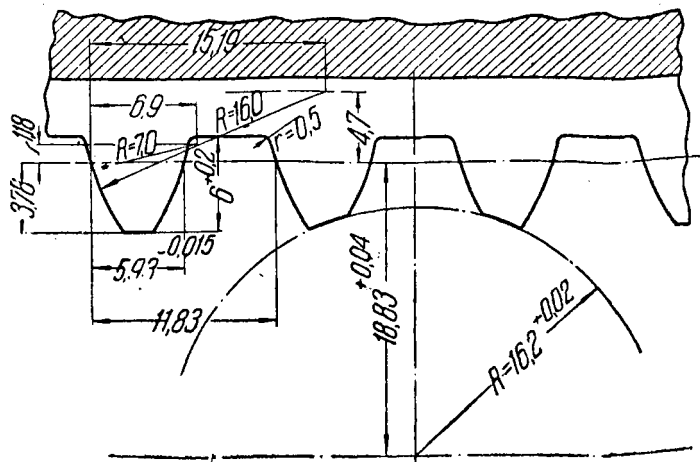
Шаг фрезы по оси будет:

$$S_0 = \frac{S_{\text{н}}}{\cos \alpha} = \frac{11,83}{\cos 2^\circ 30'} = \frac{11,83}{0,99905} = 11,84 \text{ мм.}$$



Нарезка однозаходная правая.
 Шаг нарезки по оси $S_0 = 11,84^{+0,01}$.
 Угол подъема средней винтовой линии $2^\circ 30'$.
 Профиль шлифовать.
 Канавки для выхода стружек прямые.
 Твердость по Роквеллу 62—66.

Профиль фрезы



Фреза червячная шлицевая с удлиненным зубом для десятишпоночного валика.

Канавки фрезы для выхода стружки делаем прямые, что допустимо, так как фреза имеет небольшой угол подъема средней винтовой линии.

Так как фреза после затупления вдоль оси не переставляется, то ее длину берем равной минимально необходимой плюс 2 шага. Тогда будет:

$$l = 2 \sqrt{H(D_n = H)} = 2 \sqrt{4(38 - 4)} = 23,4 \text{ мм.}$$

$$L = l + 2S = 23,4 + 2 \cdot 11,83 \approx 45 \text{ мм.}$$

Диаметр отверстия берем равным:

$$d = 0,35 D_{\phi} = 0,35 \cdot 90 \approx 32 \text{ мм.}$$

Допуски берем по техническим условиям.

Рабочий чертеж фрезы с найденными размерами приведен на рис. 68.

28. Пример расчета фрезы-„улитки“.

Дан многозаходный червяк следующих размеров:

Наружный диаметр $2R_{\text{нар}} = 90 \pm 0,5 \text{ мм}$

Число заходов $n = 3$

Шаг червяка по оси $S'_2 = 62,10 \text{ мм}$

Расстояние между соседними витками по оси 20,7 .

Высота зуба червяка $H = 15,2$.

Угол подъема средней винтовой линии червяка:

$$\alpha_{\text{ч}} = 15^\circ 8'.$$

Угол профиля впадины червяка в осевой плоскости:

$$\varphi_0 = 55^\circ.$$

Угол профиля впадины червяка в плоскости, нормальной к средней винтовой линии:

$$\varphi = 53^\circ 22'.$$

Сконструировать фрезу-„улитку“ для обработки данного червяка.

Определение шагов первичной и вторичной нарезок и конусности фрезы производим в таком же порядке, как это было сделано в примере 12.

Найденные в том же примере для данного случая шаги имеют следующие величины:

$$S_1 = 23,5 \text{ мм} \text{ и } S_2 = 21,2 \text{ мм.}$$

Половина угла конусности нарезки получилась равной:

$$5^\circ 48'.$$

Средний шаг будет:

$$S_{\text{ср}} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{23,5 + 21,2}{2};$$

$$S_{\text{ср}} = 22,35 \text{ мм.}$$

Радиус идеальной окружности $R_1 = 660$ мм.

Задаемся числом витков фрезы, равным 1,5; тогда высота первого зуба определится:

$$f = R_1 - \sqrt{R_1^2 - l^2} + t,$$

где

$$l = 2S_{cp} = 2 \cdot 22,35 = 44,7 \text{ мм},$$

откуда

$$f = 660 - \sqrt{660^2 - 44,7^2} + 1,5 \approx 3 \text{ мм}.$$

Задаемся числом чистовых зубцов $p = 2$.

Числом заточных канавок фрезы мы раньше задались:

$$z = 10.$$

Тогда общее количество зубцов фрезы на 1,5 витках будет

$$z_0 = z \cdot 1,5 = 10 \cdot 1,5 = 15.$$

Величина разности высот двух соседних зубцов в этом случае получится:

$$t = \frac{H - f}{z_0 - p} = \frac{15,2 - 3}{15 - 2} = 0,94 \text{ мм}.$$

Тогда подъем архимедовой спирали, по которой расположены вершины зубцов, за один полный оборот этой спирали будет:

$$h' = tz = 0,94 \cdot 10 = 9,4 \text{ мм}.$$

Определение наружного диаметра фрезы.

Задаемся предварительно эксцентриситетом $h = 7$ мм. Тогда приблизительная глубина канавки для выхода стружки будет:

$$H_1 = H + h + 2 = 15,2 + 7 + 2 \approx 24 \text{ мм}.$$

Окружный шаг будет:

$$S_0 = 1,5H_1 = 1,5 \cdot 24 = 36 \text{ мм}.$$

Наружный диаметр фрезы будет:

$$D_\phi = \frac{S_0 z}{\pi} = \frac{36 \cdot 10}{3,14} = 110 \text{ мм}.$$

Определяем величину эксцентриситета:

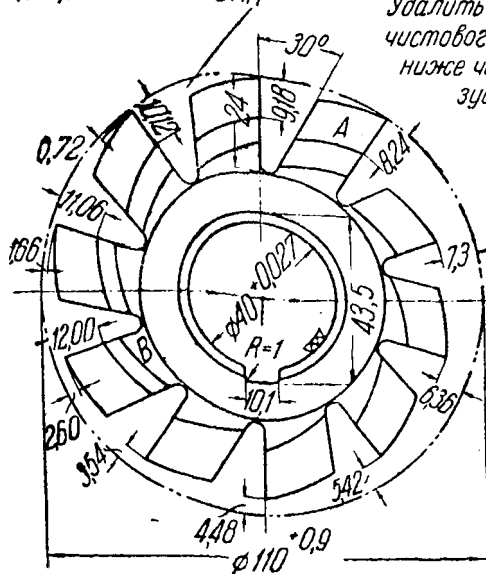
$$h = \frac{\pi D_\phi \operatorname{tg} \gamma}{z} = \frac{3,14 \cdot 110 \operatorname{tg} 10^\circ}{10} \approx 6 \text{ мм}.$$

Во избежание резания дном канавки, увеличиваем высоту профиля фрезы до $H = 16$ мм.

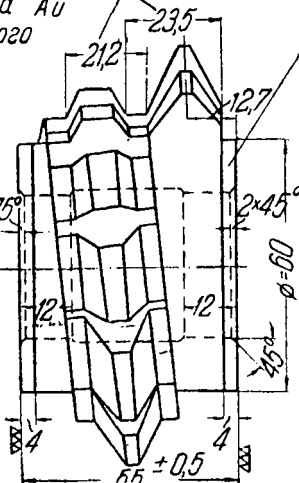
Тогда уточненная величина глубины канавки для стружек будет:

$$H_1 = 16 + 6 + 2 = 24 \text{ мм}.$$

Эксцентриситет-б.м.р.



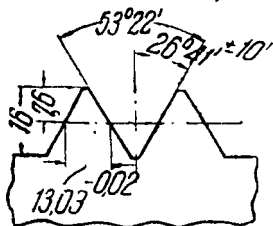
Удалить все зубцы выше
чистового зуба А и
ниже черного
зуба В



По нормали
чистового зуба
По мере переточки фрезы шлифовать
эту сторону до размера 12,7 от оси сим-
метрии 1го чистового зуба

Число зубцов
 $Z=10$

Профиль фрезы по нормали



Профиль чистового зуба

Нарезка однозаходная правая.
Шаг первичной нарезки по оси
 $S_{01} = 23,57^{-0,04}$.
Шаг вторичной нарезки по оси
 $S_{02} = 21,27^{-0,04}$.
Средний шаг по оси $S'_{cp} = 22,42^{-0,04}$.
Канавки для выхода стружек спиральные.
Угол подъема-средней винтовой линии $4^{\circ}25'$.
Шаг спирали канавок для стружек $T = 3746$.
Вершины зубцов расположить по архиме-
довой спирали с подъемом за один
оборот $h' = 9,4$.
Твердость по Роквеллу 62—66.

Фреза червячная „улитка“ для обработки трехзаходного червяка.

Толщина зуба на середине профиля, т. е. на высоте $\frac{15,2}{2} = 7,6$ мм от вершины, будет равняться половине расстояния между двумя соседними витками изделия по нормали:

$$\frac{S_H}{2} = \frac{S_0 \cos \alpha}{2} = \frac{20,7 \cdot \cos 15^\circ 8'}{2} = 13,03 \text{ мм.}$$

Определение угла подъема средней винтовой линии.

Находим средний диаметр:

$$D_{\text{ср}} = D_{\text{нар}} - H - \frac{h}{2} = 110 - 15,2 - 3 = 91,8 \text{ мм.}$$

Угол подъема средней винтовой линии будет:

$$\sin \alpha = \frac{S_{\text{ср}}}{\pi D_{\text{ср}}} = \frac{22,35}{3,14 \cdot 91,8} = 0,07753; \\ \alpha = 4^\circ 25'.$$

Шаги фрезы по оси будут:

$$S_{01} = \frac{S_1}{\cos \alpha} = \frac{23,5}{\cos 4^\circ 25'} = 23,57 \text{ мм.}$$

$$S_{02} = \frac{S_2}{\cos \alpha} = \frac{21,2}{\cos 4^\circ 25'} = 21,27 \text{ мм.}$$

$$S^1_{\text{ср}} = \frac{S_{01} + S_{02}}{2} = 22,42 \text{ мм.}$$

Шаг спирали канавок для стружек будет:

$$T = S^1_{\text{ср}} \operatorname{ctg}^2 \alpha = 22,42 \cdot \operatorname{ctg}^2 4^\circ 25' = 3746 \text{ мм.}$$

Длину фрезы берем равной:

$$L = 2,5 S^1_{\text{ср}} = 2,5 \cdot 22,42 \approx 55 \text{ мм.}$$

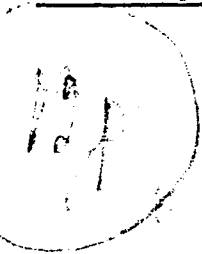
Диаметр отверстия берем:

$$d = 0,35 \cdot D_{\text{ф}} = 0,35 \cdot 110 \approx 40 \text{ мм.}$$

Остальные размеры выбираем конструктивно.

Рабочий чертеж фрезы с найденными размерами см. на рис. 69.

Цена 4 р. 50 к.



A
4260

343