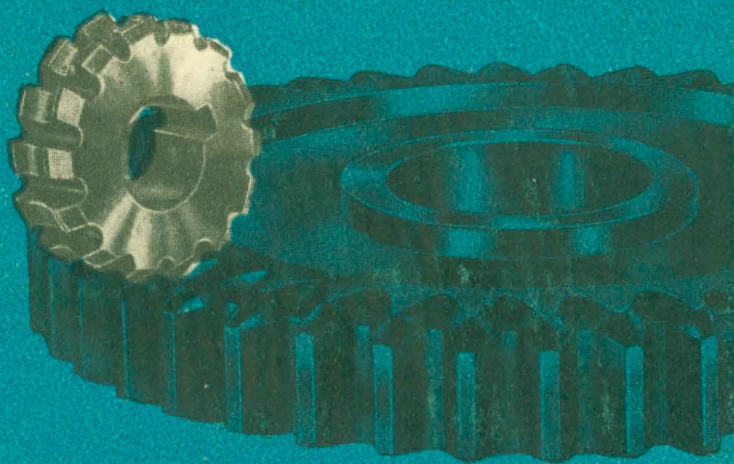


ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЗУБОЗАКРУГЛЕНИЯ

И. Е. БУРШТЕЙН

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ
ЗУБОЗАКРУГЛЕНИЯ



И. Е. БУРШТЕЙН

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ
ЗУБОЗАКРУГЛЕНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1963

В книге приведены данные по выбору рациональной формы закругления торца переключаемых зубчатых колес и рассмотрены существующие методы закругления.

Изложено существо нового метода зубозакругления, особенности процесса и конструкции инструмента; описаны конструкции приспособлений и станков для зубозакругления.

В книге дана также методика расчета кулаков для осуществления требуемой кинематики и приведены результаты испытания зубчатых колес, закругленных новым методом.

Книга рассчитана на конструкторов и технологов машиностроительных заводов, а также может быть использована студентами вузов.

Рецензент д-р техн. наук проф. Н. С. Ачеркан

*Редакция литературы по холодной обработке металлов и станкостроению
И. о. зав. редакцией инж. С. Л. МАРТЕНС*

ВВЕДЕНИЕ

В Программе КПСС, принятой XXII съездом, определено, что постоянное совершенствование технологии всех отраслей и видов производства — неперемнное условие их развития. Особенно эффективно совершенствование технологии производства изделий, имеющих широкое применение.

Изменение скоростей движения автомобилей, тракторов, вращения шпинделей станков и перемещение ряда других исполнительных органов машин производится коробками скоростей с переключаемыми зубчатыми колесами.

На основании произведенных работ по выбору рациональной формы торцевой поверхности зуба, обеспечивающей хорошую включаемость при наибольшей долговечности переключаемых зубчатых колес, установлено, что эта поверхность должна иметь бочкообразную форму закругления. Единственным из существующих методов выполнения этой операции, который обеспечивает получение требуемой формы закругления, является метод фрезерования пальцевой фрезой.

Изучение на заводах опыта выполнения зубозакругления с помощью пальцевой фрезы показало, что данный метод характеризуется низкой стойкостью и частыми поломками инструмента, травмированием рук рабочих тонкой игольчатой стружкой, срезаемой пальцевой фрезой при зубозакруглении, и другими недостатками.

Исследование нового метода зубозакругления с помощью дисковой фрезы, имеющей относительное движение вдоль высоты зуба, позволило рекомендовать его для широкого внедрения в промышленность.

Данная книга посвящена описанию нового метода зубозакругления и состоит из пяти основных разделов.

В первом разделе приводятся данные о состоянии вопроса выбора формы закругления торцевой поверхности зубьев переключаемых зубчатых колес и описаны существующие методы выполнения зубозакругления.

Во втором разделе излагаются сущность нового метода зубозакругления, исследование процесса, допустимые режимы обработки и конструкция режущего и вспомогательного инструмента.

Третий раздел посвящен контрольному испытанию на стенде, автомобилях и станках зубчатых колес, закругленных по новому методу.

В четвертом разделе приведены конструкции приспособлений и станков для осуществления нового метода зубозакругления.

В пятом разделе дана методика расчета и проектирования кулаков для различных схем осуществления нового метода зубозакругления.

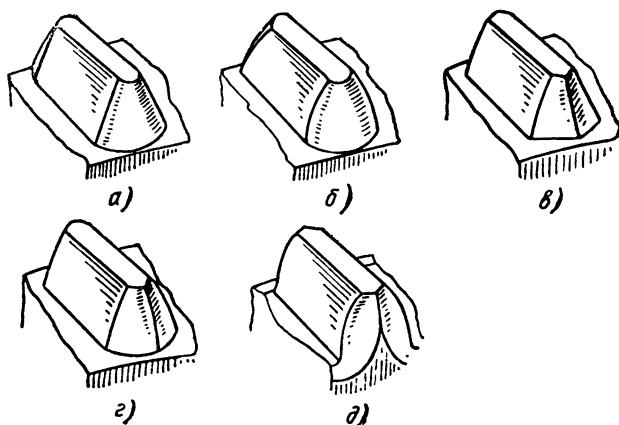
Исследование и отработка нового метода зубозакругления производились автором и под его руководством в отделе технологии машиностроения ЭНИМС с участием инж. А. Ф. Духовского, механика Б. И. Дороднова, слесарей А. К. Подымова и А. Д. Иванова, инженеров О. К. Гвоздева, В. М. Ларионовой, Н. Г. Бойм, М. А. Рупра, Е. С. Ковригиной, техников В. И. Маклакова, М. Т. Аверинной и др.

ФОРМА ЗАКРУГЛЕНИЯ ТОРЦОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКРУГЛЕНИЙ

1. ФОРМА ЗАКРУГЛЕНИЯ ТОРЦОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ

Свыше 90% переключаемых зубчатых колес коробок скоростей выходит из строя вследствие износа торцов зубьев.

Следовательно, уменьшение износа торцовых поверхностей зубьев зубчатых колес является весьма важной задачей.



Фиг. 1. Формы торцов зубьев переключаемых зубчатых колес.

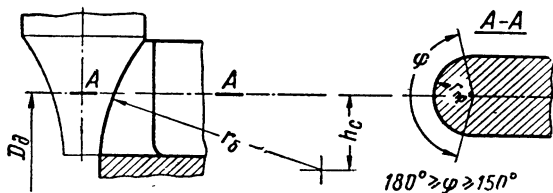
Долголетним опытом автомобильной промышленности, а также проведенными исследовательскими работами установлено, что конусная (фиг. 1, а) и заостренная (фиг. 1, в—д) формы торцов не обеспечивают необходимой долговечности переключаемых зубчатых колес. Это объясняется неблагоприятными условиями контактирования конусной, а также заостренной формы торцовых поверхностей: наличием кромочных давлений, контактированием сравнительно менее прочной вершины зуба и др.

Из различных форм заострения торцов зуба имеют применение симметричные формы. Геометрия симметричной формы заострения (см. фиг. 1, *в—д*) определяется углом заострения, формой поверхностей скосов, а также углом наклона центрального ребра заострения к плоскости торца зубчатого колеса. Угол заострения, образованный скосами торца зуба по двум плоскостям, выбирается в пределах 90—120°. Чрезмерное заострение торца не является целесообразным, так как при уменьшении угла заострения ниже определенного предела включаемость зубчатых колес ухудшается, а значительно ослабленная торцовая часть зуба быстро изнашивается. Центральное ребро часто делают несколько притупленным — оставляется часть фаски, сделанной предварительно при токарной обработке. Эксплуатационные качества заострения торцовой части зуба эвольвентно-винтовыми поверхностями незначительно отличаются от эксплуатационных качеств заострения, образованного двумя плоскостями.

Улучшение условий контактирования достигается применением бочкообразной формы торца (фиг. 1, *б*), при которой кромочные давления совершенно устраняются, а зона контакта переносится по высоте зуба в область делительной окружности. При этом по сравнению с конической и заостренной формами торца увеличивается долговечность и облегчается переключаемость.

Таблица 1

Параметры бочкообразной формы рабочих торцов переключаемых зубчатых колес



Модуль обрабатываемого зубчатого колеса в мм	Радиус вдоль высоты зуба r_b в мм		Радиус закругления $r_{пр}$ в мм	Расстояние h_c в мм от центра закругления до делительной окружности D_d	Модуль обрабатываемого зубчатого колеса в мм	Радиус вдоль высоты зуба r_b в мм		Радиус закругления $r_{пр}$ в мм	Расстояние h_c в мм от центра закругления до делительной окружности D_d
	Размер	Допуск				Размер	Допуск		
1,5	7		1,2	2,3	4	18		3,1	6
2	9		1,6	3	5	23	$\pm 0,75$	3,9	7,5
2,5	11	$\pm 0,5$	2	3,8	6	27		4,7	9
3	14		2,4	4,5	8	36	± 10	6,3	12

На базе проведенных исследований была разработана нормаль Н 22-1* на бочкообразную форму рабочих торцов переключаемых колес, охватывающая зубчатые колеса с модулями 1,5—10 мм (табл. 1).

Установлены следующие технические условия на зубозакругление:

а) шероховатость обрабатываемой поверхности должна соответствовать 5-му классу чистоты;

б) смещение центра закругления от плоскости симметрии зуба допускается не более: 0,2 мм при $m=1,5 \div 3$ мм, 0,3 мм при $m=3,5 \div 6$ мм, 0,4 мм при $m=8 \div 10$ мм.

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТОРЦОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В настоящее время торец зуба закругляется не только по бочкообразной поверхности, но и по конусу и даже заостряется.

В промышленности применяются следующие методы обработки торцовой поверхности зуба переключаемых зубчатых колес:

1) пальцевой фрезой, ось которой лежит в плоскости, перпендикулярной оси и параллельной торцу зубчатого колеса;

2) трубчатой фрезой;

3) резцовой головкой;

4) червячной фрезой;

5) фасонной пальцевой фрезой, ось которой лежит в плоскости, близкой к перпендикулярной торцу зубчатого колеса.

Из указанных методов обработки наибольшее применение имеет первый метод. Меньше применяется фрезерование трубчатой фрезой. Фрезерование же червячной фрезой и другие указанные выше методы имеют весьма ограниченное применение.

Закругление торца зуба с помощью пальцевой фрезы, ось которой параллельна торцу зубчатого колеса

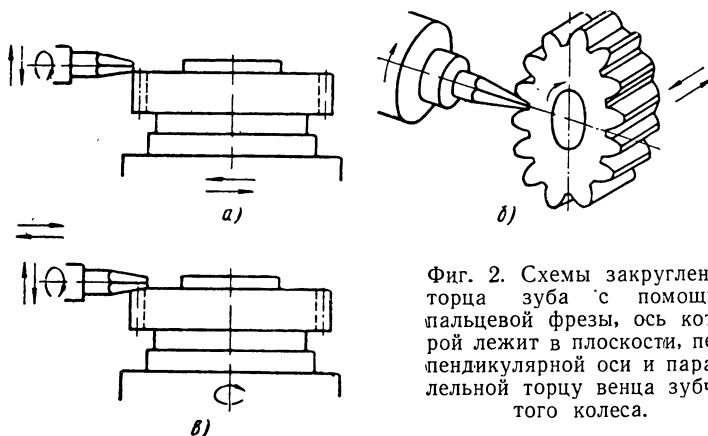
Обработка торцов зубьев этим методом производится по следующим схемам:

1. Зубозакругление с прерывным делением на каждый зуб обрабатываемого колеса при вращении и возвратно-колебательном движении пальцевой фрезы по радиусу вокруг зуба (фиг. 2, а). В этом случае в конце и начале цикла изделие со столом отводится и подводится к инструменту. По этой схеме спроектированы станки мод. 550 (завода «Комсомолец»), Кросс 35, Кросс 36 и Улих.

2. Зубозакругление с непрерывным делением и синхронным возвратно-поступательным движением изделия вдоль своей оси.

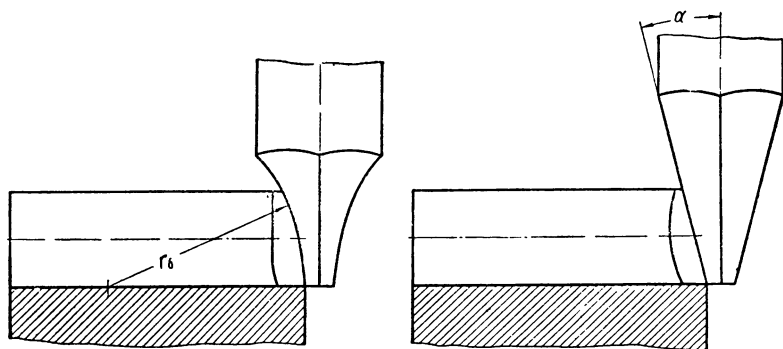
* Нормаль Н22-1 распространяется на прямозубые колеса, переключаемые осевым перемещением.

Возвратно-поступательное движение осуществляется от профильного копира на каждый зуб обрабатываемого колеса (фиг. 2, б). По этой схеме спроектированы станки мод. 558 (завода имени В. И. Ленина), Пирлес, Герберт.



Фиг. 2. Схемы закругления торца зуба с помощью пальцевой фрезы, ось которой лежит в плоскости, перпендикулярной оси и параллельной торцу венца зубчатого колеса.

3. Зубозакругление с непрерывным делением и синхронным возвратно-поступательным движением инструмента вдоль оси изделия. Возвратно-поступательное движение осуществляется от профильного копира на каждый зуб обрабатываемого колеса



Фиг. 3. Формы пальцевой фрезы для получения бочкообразного или конического закругления.

(фиг. 2, в). По этой схеме спроектированы станки мод. 5582 ХМАС, Кросс 50, Рейнекер мод. FAP, ЭНИМС мод. Э106. У станков Рейнекер изделие и инструмент имеют горизонтальное расположение оси.

При обработке по этому методу можно получить коническое под углом α или бочкообразное по радиусу r_b закругление торцо-

вой части зубьев зубчатого колеса в зависимости от применяемой формы инструмента (фиг. 3). Этот метод является универсальным и единственным из существующих методов, с помощью которого можно образовать на торце зубьев бочкообразное закругление. Время закругления по этому методу одного зуба зубчатых колес на различных предприятиях приведено в табл. 2.

Таблица 2

Время обработки зуба при закруглении пальцевой фрезой

Завод	Модуль колеса	Время обработки одного зуба в сек
Фрезерных станков (г. Горький)	3—4	2—3
Малолитражных автомобилей (г. Москва)	2,5	2,3
Тракторный (г. Минск)	4,5	3,5—4
ЭНИМС	3	2—4,2
«Красный пролетарий» (мод. 5582)	3	3,0
«Красный пролетарий» (мод. Э106 в автоматической линии)	3	1,5—2,0
Имени Лихачева	4,23/3,175	2,2

Режимы и время закругления зубьев зубчатых колес по руководящим материалам ЭНИМС, рекомендуемые для вновь проектируемых станков, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Режимы, число проходов и время обработки зуба пальцевой фрезой

Режущий инструмент	Наибольшая скорость резания в м/мин		Круговая подача в мм/зуб	Число оборотов заготовки за время ее обработки			Время обработки зуба за один проход в сек	
	для т в мм			для т в мм			для т в мм	
	до 6	6—12		1—2	3—4	5—6	до 6	6—12
Пальцевая фреза . .	45	35	0,08—0,12	1—2	2—3	3—4	1,0—3	2—6

Пальцевые фрезы не обеспечивают требуемого качества обрабатываемой поверхности при обработке закругления за один оборот заготовки. Кроме того, при такой обработке на профиле со стороны выхода фрезы образуются прочные заусенцы, снимаемые при дальнейшей обработке шевером. При снятии заусенцы забивают канавки шеверов, что приводит к быстрому износу последних.

Поэтому в настоящее время обработку закругления производят за 2—4 оборота заготовки.

Этот метод имеет ряд крупных недостатков.

1. Низкая стойкость и частые поломки инструмента, вызывающие большие простои и большой расход инструмента. Операция является лимитирующей при создании автоматических линий по

производству зубчатых колес, так как при каждой остановке зубозакругляющих станков останавливается вся автоматическая линия.

Всесоюзный научно-исследовательский инструментальный институт (ВНИИ) в течение продолжительного времени изыскивал возможности повышения стойкости и уменьшения числа случаев аварийного выхода из строя пальцевых зубозакругляющих фрез в условиях работы в автоматической линии зубчатых колес на заводе «Красный пролетарий».

Испытанию подвергались фрезы двух вариантов:

а) четырехгранные (фиг. 4, а), имевшие большой отрицательный передний угол (-45°);

б) трехзубые затылованные (фиг. 4, б), имевшие за счет стружечных канавок нулевой передний угол и задний угол в пределах $12-15^\circ$ (кулак для затылования с $k=1$ мм).

Наряду с испытанием фрез из стали марки Р18 испытывались фрезы, изготовленные из быстрорежущих сталей марок Р9К15, Р18Ф3 и др. Также была сделана попытка применить для изготовления фрез твердый сплав марки ВК15.

Результаты испытания показали, что из десяти фрез с затылованными зубьями восемь сломались, и поэтому такой тип фрез не может быть рекомендован для практического применения. Такой же вывод был сделан на ЗИЛе.

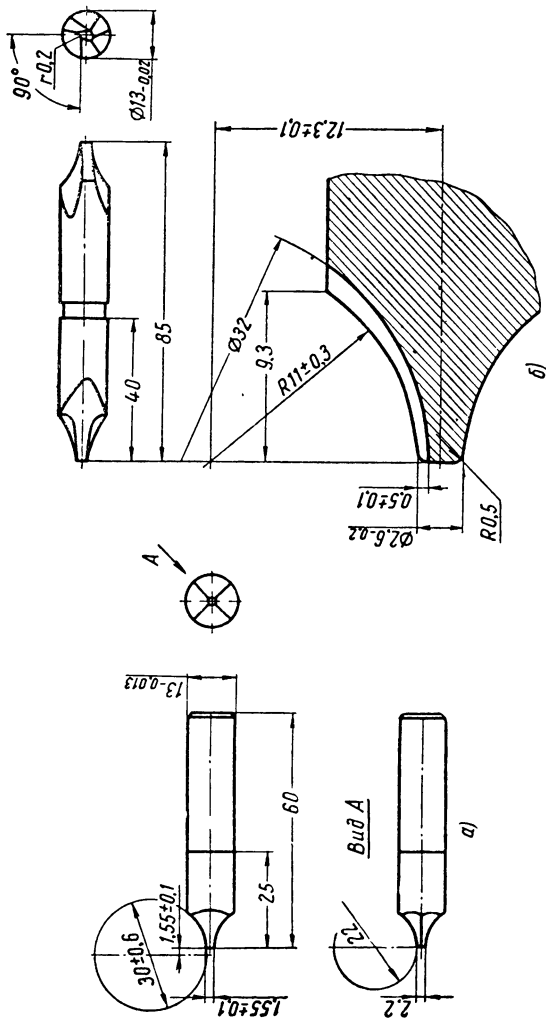
На основании испытаний ВНИИ рекомендовал применение четырехгранных фрез из быстрорежущей стали марки Р18 при $n=1400 \div 1650$ об/мин. До нормального затупления фреза должна обрабатывать около 25 зубчатых колес $t=2,5$ мм с $z=88$.

Целесообразность применения специальных быстрорежущих сталей для изготовления зубозакругляющих фрез ВНИИ не была подтверждена.

На основании испытаний ВНИИ не рекомендовал применение твердого сплава марки ВК15 для изготовления зубозакругляющих фрез, так как эти фрезы оказались менее стойкими, чем фрезы из стали марки Р18.

Проведенные нами наблюдения на заводах показали, что стойкость фрез весьма низка и они часто имеют аварийный выход из строя. Например, на заводе имени Лихачева при обработке зубчатых колес ЗИЛ 120-1701127 $t=4,23/3,175$ из стали марки 30ХГТ с $z=41$ фрезы снимаются для переточки после обработки 15 зубчатых колес в два прохода при $n=2000$ об/мин и 60 дв.ход./мин. Примерно такое же положение имеет место при обработке зубчатых колес ЗИЛ 120-1701112 $t=4,23/3,175$ и $z=49$. В последнем случае фрезу снимают на заточку после обработки с двух сторон восьми-десяти зубчатых колес. По данным лиц, ведающих инструментальным хозяйством цеха коробок скоростей ЗИЛ, средний аварийный выход из строя инструмента составляет не менее 30%.

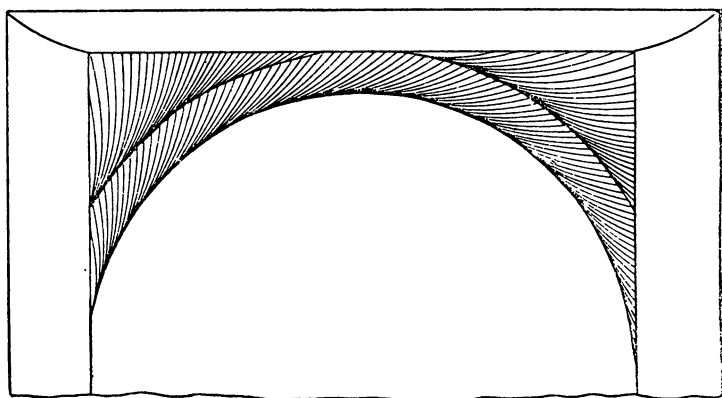
2. При работе по этому методу получается тонкая игольчатая стружка, которая опасна для рук работающего — возможны травмы.



Фиг. 4. Пальцевые фрезы $m = 2,5$ мм для закругления зубьев:
 а — четырехгранная; б — трехзубая заточиванная.

На фиг. 5 дана схема закругления торца зуба пальцевой фрезой за два прохода в его сечении по делительной окружности ($S = 4,7$ мм). Пальцевая фреза, имеющая четыре зуба, делает 1400 об/мин, а так как время одного прохода 1,5 сек, то, чтобы обойти зуб по делительной окружности, фреза должна сделать за каждый проход 35 оборотов. При этом в работе будут участвовать 140 зубьев.

При первом проходе 20 зубьев в начале и 22 зуба в конце не снимают стружки, т. е. работают вхолостую; таким образом, при



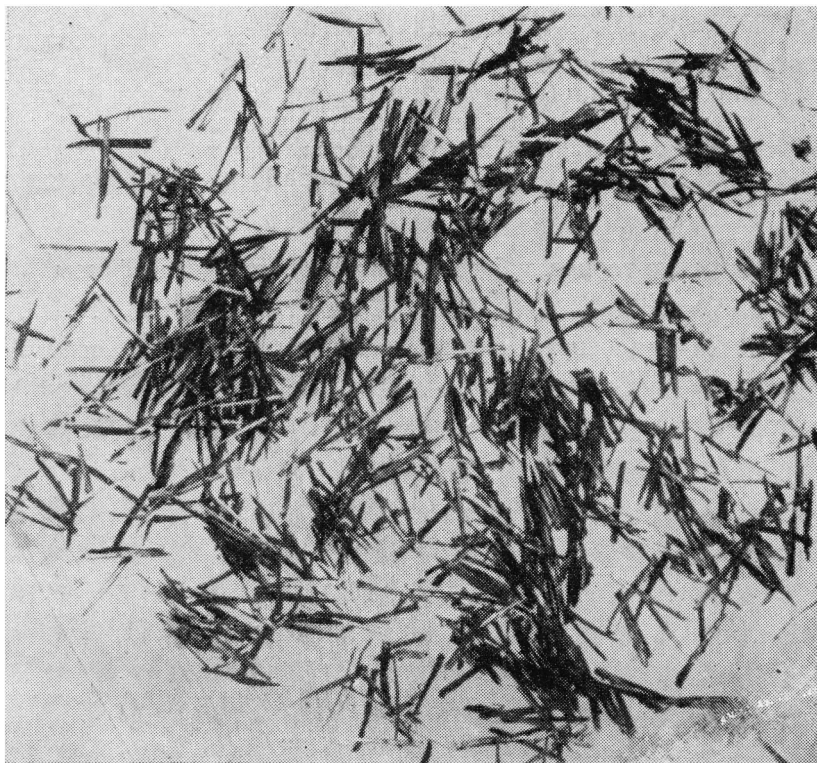
Фиг. 5. Схема закругления торца зуба пальцевой фрезой за два прохода.

первом проходе фреза снимает 98 стружек. При втором проходе в работе участвуют все 140 зубьев.

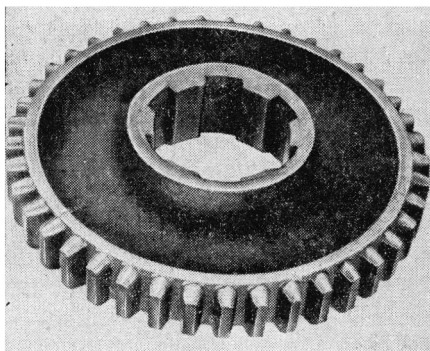
При первом проходе толщина среза 0,0066—0,013 мм, при втором проходе средние толщины среза находятся в пределах 0,0275—0,011 мм. Ширина фрезерования в данном случае также переменна и определяется величиной контакта фрезы по высоте зуба.

Таким образом, пальцевая фреза снимает тонкие иглообразные стружки (фиг. 6), которые имеют большую сцепляемость и приводят к травмированию рук работающего. Увеличить толщину среза не представляется возможным из-за недостаточной прочности инструмента и наволакивания при этом на профиль зуба зубчатого колеса со стороны выхода фрезы плотного заусенца, который при дальнейшей обработке зубчатого колеса забивает канавки шеверов и ведет к их повышенному износу.

3. Большая трудоемкость получения требуемого вогнутого профиля пальцевой фрезы при каждой переточке. Кроме того, вогнутый профиль ослабляет фрезу. Обе причины значительно ог-



Фиг. 6. Стружки, снимаемые пальцевой фрезой, при закруглении торца зубьев переключаемых зубчатых колес.



Фиг. 7. Зубчатое колесо, закругленное с помощью пальцевой фрезы.

раничивают применение оптимального (бочкообразного) профиля закругления торцевой части зуба.

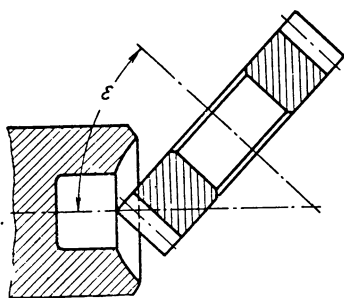
4. Заусенцы, получающиеся в результате закругления, требуют последующего снятия.

5. Наличие уступа (фиг. 7) при переходе от закругленной к незакругленной части вызывает концентрацию напряжений.

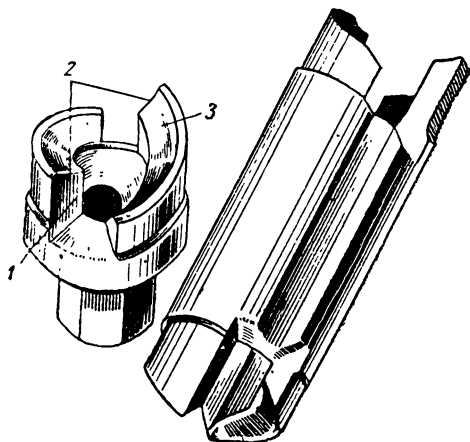
6. Недостаточная чистота поверхности, быстро ухудшающаяся по мере износа фрезы. Часто процесс обработки сопровождается вибрацией.

Заострение торцов зубьев с помощью трубчатой фрезы

Заострение торцов зубьев с помощью трубчатой фрезы (фиг. 8) производится при непрерывном синхронном вращении изделия и режущего инструмента. Фрезы, с помощью которых осуществляют-



Фиг. 8. Схема заострения торцов зубьев с помощью торцевой трубчатой фрезы.



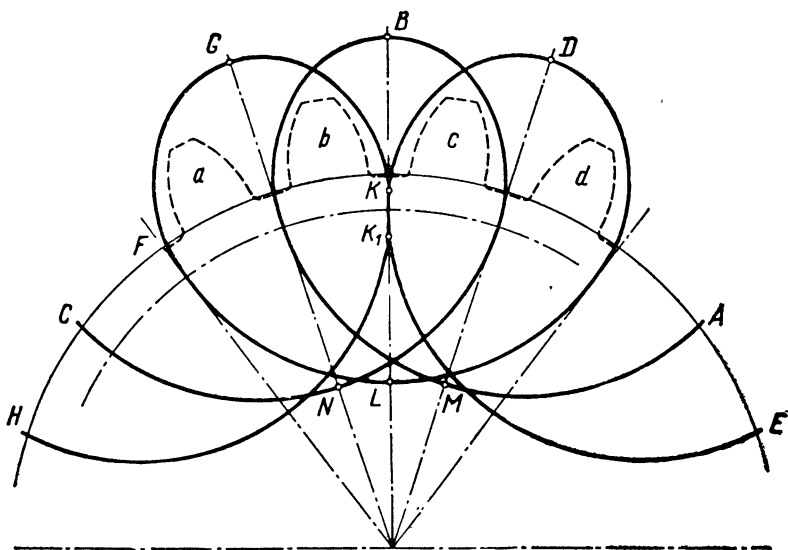
Фиг. 9. Торцевые фасонные фрезы для образования скосов на зубьях зубчатых колес.

ся этот метод заострения зубьев, имеют два зуба (фиг. 9), передние поверхности 1 которых расположены в общей осевой плоскости. Профиль режущей кромки 2 в этой плоскости соответствует торцовому профилю скоса на зубе зубчатого колеса. Задняя поверхность 3 зуба фрезы имеет торцевую затыловку по винтовой линии. Переточка фрезы производится по передней поверхности. Установка инструмента на станке схематически представлена на фиг. 8. Ось зубчатого колеса расположена под углом ϵ к оси инструмента.

Рекомендуемые значения угла установки равны приблизительно 45° . За один оборот фрезы зубчатое колесо поворачивается на

два зуба. Подача фрезы осуществляется вдоль ее оси при перемещении инструментальной головки станка вдоль оси инструментального шпинделя. Как правило, торцовые фрезы изготавливаются леворезущими (левого рабочего вращения). Обрабатываемое зубчатое колесо в этом случае также имеет левое вращение (если смотреть со стороны шпинделя инструмента). По этому принципу работают станки мод. 557 завода «Комсомолец» и Кросс 60.

На фиг. 10 показана траектория относительного движения крайней точки режущей кромки, расположенной на наружной ок-



Фиг. 10. Траектория относительного движения крайней точки режущей кромки, расположенной на наружной окружности фрезы.

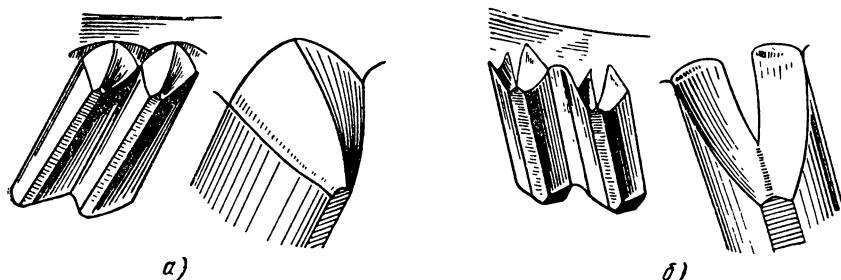
ружности фрезы. Предполагается, что зубчатое колесо неподвижно, а фреза участвует в двух вращательных движениях вокруг своей оси и одновременно вокруг оси изделия при передаточном отношении $i = \frac{z}{2}$, где z — число зубьев зубчатого колеса [2].

Кривую ABC описывает крайняя точка режущей кромки одного зуба фрезы, а кривую EDF описывает точка диаметрально противоположной режущей кромки фрезы. За один оборот фрезы точка режущей кромки описывает кривую MBN , а точка противоположной кромки опишет кривую DLG .

Таким образом, за один оборот фрезы обрабатываются полностью два зуба: левые стороны зубьев a и b и правые стороны зубьев c и d . При этом каждая кромка фрезы работает через один зуб (впадину) зубчатого колеса, как это видно на траектории $EDLGH$. При вращении фрезы и зубчатого колеса осуществляется

качение без скольжения начальной окружности фрезы по внутренней стороне начальной окружности зубчатого колеса, т. е. осуществляется как бы внутреннее зацепление.

Так как форма траектории относительного движения режущей кромки определяется передаточным отношением i , начальным диаметром зубчатого колеса и размером наружного диаметра фрезы, которые не могут быть выбраны произвольно, то кривая траектории обычно значительно отклоняется от эвольвентного профиля зуба зубчатого колеса. Поэтому в разные моменты времени в резании будут участвовать различные участки режущей кромки. К тому же положение передней поверхности фрезы относительно торцовой плоскости зубчатого колеса значительно меняется, что



Фиг. 11. Форма скосов на торцах зубьев, обработанных торцовой фасонной фрезой.

влечет за собой изменение профиля торцового скоса зуба зубчатого колеса.

Профиль торцового скоса в данном случае рассматривается как профиль сечения поверхности скоса плоскостью, касательной к основному цилиндру зубчатого колеса. С помощью торцовой фрезы можно выполнить скосы (заостренный профиль) на зубчатых колесах прямолинейного профиля с переменным углом или незначительно изогнутого криволинейного профиля. Указанным способом нельзя получить плавный переход от поверхности скоса к эвольвентной поверхности зуба зубчатого колеса.

На фиг. 11, а приведена форма заострения зубьев, образованных торцовыми фасонными фрезами.

Притупленная форма скосов (фиг. 11, б) достигается тем, что фреза подается в осевом направлении не на полную глубину.

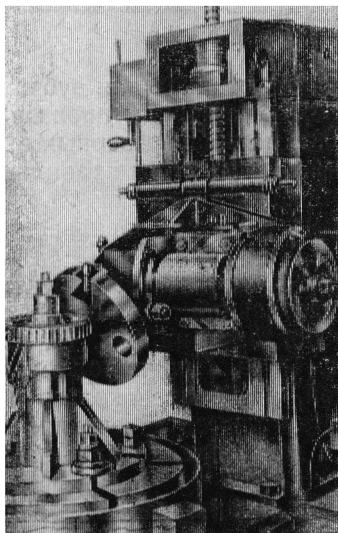
По литературным данным, время фрезерования по этому методу заострений на зубе зубчатого колеса с $t = 3$ мм составляет 0,8 сек.

На заводе «Красный пролетарий» время обработки по этому методу зубьев зубчатого колеса с $t = 3$ мм составляет 1,3 сек, а зубьев зубчатого колеса с $t = 2,5$ мм составляет 1,1 сек.

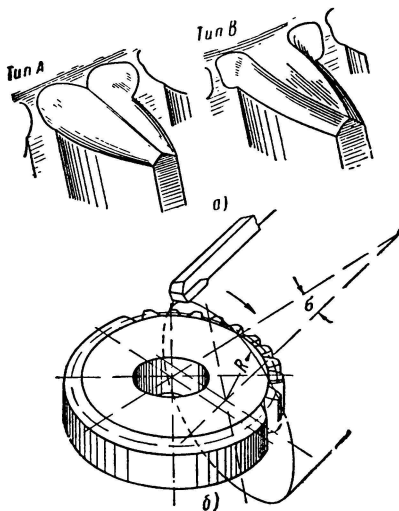
Заострение зубьев с помощью торцевой головки и приспособления к зубофрезерному станку

Обработка по этому методу производится на зубофрезерном станке (фиг. 12). При этом можно получить два вида заострений торцевой части зуба (фиг. 13, *a*).

Заострение типа *A* [4] образовано двумя поверхностями, приближающимися к цилиндрическим и пересекающимися вдоль прямой, которая является образующей конуса фаски на торце зубчатого колеса.



Фиг. 12. Зубофрезерный станок с наладкой для заострения торцов зубьев с помощью торцевой головки.



Фиг. 13. Заострение торцов зубьев с помощью торцевой головки:

a — виды заостренной торцевой части зуба, получаемые с помощью торцевой головки на зубофрезерном станке; *б* — принципиальная схема образования скосов с помощью торцевой головки.

Заострение типа *B* образовано также двумя поверхностями фаски. Оба заострения могут быть получены и при работе на вертикально-фрезерном станке с использованием делительной головки. При этом инструментом служит резец типа токарного подрезного, закрепленный в специальной оправке.

Принцип работы приспособления похож на принцип работы специального станка с трубчатой фрезой.

На фиг. 13, *б* изображена принципиальная схема образования скосов на торцах зубьев инструментом, имеющим режущую кромку, перемещающуюся в процессе резания по поверхности цилиндра радиуса R и расположенную вдоль образующей этого цилиндра. В зависимости от числа зубьев зубчатого колеса, требуемого

Наклона скосов, размеров фаски на торце зуба может быть аналитически определен радиус цилиндрической поверхности, образующей скос, и угол σ между осью зубчатого колеса и осью, образующего скос цилиндра. Эти данные являются единственными, требующимися для настройки станка и производства закругления как при работе способом индивидуального деления, так и при работе способом обкатки.

Геометрический расчет формы торцовых цилиндрических скосов и подсчет данных для наладки производится соответственно типу скоса и способу деления [4].

Заострение зубьев с помощью червячной фрезы

В связи с отсутствием зубозакругляющих станков для зубчатых колес больших диаметров и модулей некоторые заводы производят заострение переключаемых зубчатых колес на зубофрезерных станках с помощью червячных фрез. В этом случае, при правильных конструкции инструмента и наладке зубофрезерного станка торцу зуба сообщается заострение двумя симметричными эвольвентно-винтовыми поверхностями [3].

Если расечь зубчатый венец зубчатого колеса с эвольвентными и винтовыми скосами плоскостью, касательной к ее основному цилиндру (с радиусом r_0) так, как это показано на фиг. 14, а, то получим сечение, изображенное на фиг. 14, б. Предположим, что плоскость сечения остается неподвижной, а зубчатое колесо равномерно вращается вокруг своей оси. Тогда элементы сечения, изображенные на фиг. 14, б, придут также в движение, которое характеризуется следующим.

Линии 1—1, 2—2, 3—3, 4—4, а также линии 4'—4', 5'—5', 6'—6', 7'—7' благодаря известным свойствам эвольвентного зацепления придут в равномерное поступательное движение с равными скоростями. Скорость же движения линий 1'—1', 2'—2', 3'—3' и 5—5, 6—6, 7—7 будет иметь переменные значения; при этом чем дальше указанные линии будут удалены от прямой 1—1, тем больше будет увеличиваться абсолютное значение их скоростей.

Описанный закон движения элементов сечения рассматриваемого зубчатого колеса позволяет спроектировать червячную фрезу, осевая рейка которой изображена на фиг. 14, в*.

* Здесь допускается возможность обработки эвольвентного скоса архимедовой фрезой, что практически полностью оправдывается. Теоретически же эта фреза должна быть эвольвентной с радиусом основного цилиндра

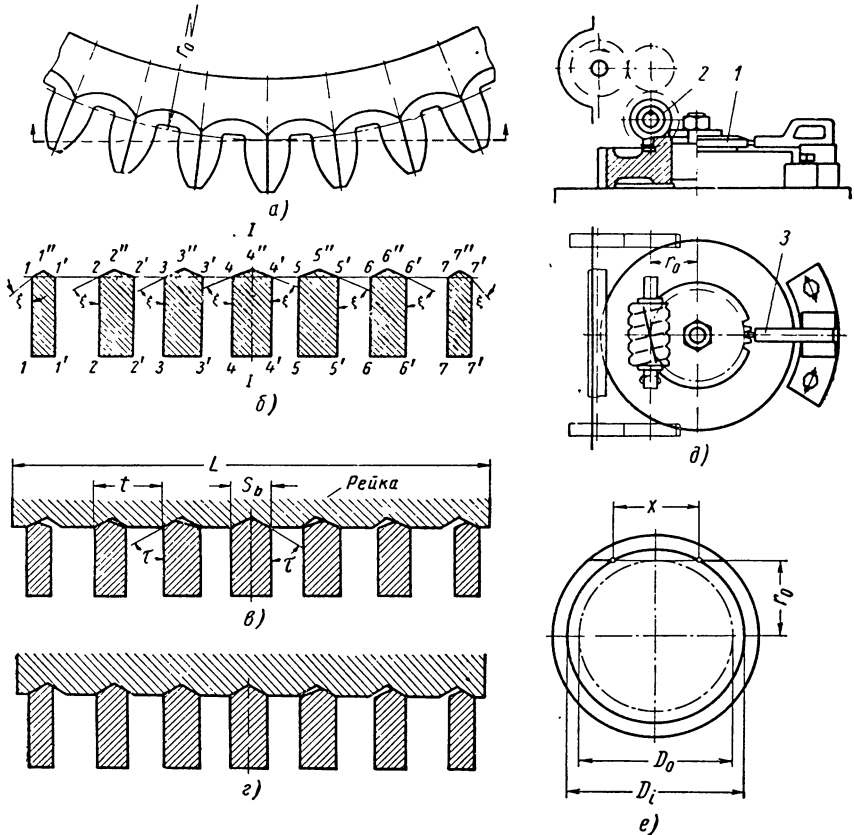
$$r_{0\phi} = \frac{m \cos \alpha_0}{2 \operatorname{tg} \tau},$$

где m — модуль зуба обрабатываемого зубчатого колеса; α_0 — профильный угол; τ — угол наклона образующей эвольвентной винтовой поверхности скоса к оси зубчатого колеса.

Профиль фрезы должен быть прямым не в осевом сечении фрезы, а в сечении ее плоскостью, касательной к основному цилиндру. Указанная плоскость

Профили этой рейки прямолинейны, так как прямые линии 1—1, 2—2, 3—3, 4—4, 5—5, 6—6, 7—7—сечения эвольвентных скосов (фиг. 14, а и б).

Шаг осевой рейки фрезы постоянен и равен основному шагу зубчатого колеса, так как расстояния между линиями 1—1 и 2—2,



Фиг. 14. Схемы кинематики образования заострения зубьев с помощью червячной фрезы:

а и б — торцы зубьев, обработанные с помощью червячной фрезы; в — осевая рейка фрезы; г — взаимодействие между осевой рейкой фрезы и обрабатываемым зубчатым колесом; д — схема окончательной установки червячной фрезы и обрабатываемого зубчатого колеса; е — схема для определения расстояния между двумя червячными фрезами.

2—2 и 3—3, 3—3 и 4—4, 4—4 и 5—5, 5—5 и 6—6, 6—6 и 7—7 равны основному шагу зубчатого колеса и основная окруж-

должна быть плоскостью зацепления и одновременно касаться основного цилиндра зубчатого колеса. Нетрудно убедиться в том, что построение геометрически точной фрезы для одновременной обработки обеих сторон зубьев зубчатого колеса невозможно.

ность зубчатого колеса является начальной окружностью при обработке скосов. Ширина режущей впадины осевой рейки фрезы равна толщине зуба зубчатого колеса по основной окружности, так как наибольшая толщина сечения зуба равна его толщине, измеренной по дуге основной окружности.

Рабочая длина осевой рейки фрезы равна длине хорды окружности, радиус которой равен внешнему радиусу зубчатого колеса; хорда проведена от центра этой окружности на расстоянии, равном радиусу основной окружности зубчатого колеса.

Образование эвольвентных винтовых поверхностей скосов в процессе фрезерования происходит путем непрерывной обкатки изделия при помощи червячной фрезы. Линейчатость эвольвентной винтовой поверхности скосов создается в результате непосредственного переноса формы прямолинейной режущей кромки фрезы на изделие; все остальные элементы поверхности скоса получаются как огибающие различных положений режущих кромок фрезы.

На фиг. 14, *г* показано взаимодействие между осевой рейкой фрезы и обрабатываемым зубчатым колесом.

При выбранном направлении обката все левые профили режущих впадин левой части фрезы являются профилирующими. Правые профили тех же впадин той же стороны фрезы осуществляют лишь частичный съем металла, производя как бы предварительную обработку тех поверхностей зубьев зубчатого колеса, которые окончательно профилируются правыми профилями режущих впадин правой части фрезы. Левые профили режущих впадин правой части фрезы не работают при данном направлении обката.

Приводим определение основных элементов фрезы для обработки эвольвентных скосов зубчатых колес внешнего зацепления.

Шаг фрезы подсчитывается по формуле

$$t_0 = \pi m \cos \alpha_0,$$

где m — модуль зуба обрабатываемого изделия;

α_0 — угол профиля его исходной рейки.

Ширина режущей впадины (фиг. 14, *в*) подсчитывается по формуле

$$S_b = m \left(\frac{\pi}{2} \cos \alpha_0 + 2\xi \sin \alpha_0 + z \cos \alpha_0 \operatorname{inv} \alpha_0 \right),$$

где ξ — коэффициент коррекции обрабатываемого зубчатого колеса;

z — число зубьев зубчатого колеса.

Если фреза предназначена для обработки нескольких зубчатых колес с различными ξ и z , то значение величины S_b подсчитывается для каждого зубчатого колеса отдельно и принимается наибольшее из найденных значений.

Наименьшая длина рабочей части фрезы определяется по формуле

$$L > 2\sqrt{R_g^2 - r_0^2},$$

где R_e — внешний радиус наибольшего из обрабатываемых зубчатых колес;

r_0 — радиус основной окружности наибольшего зубчатого колеса.

Угол профиля (фиг. 14, в) $\varepsilon = \tau$, где τ — угол наклона образующих эвольвентной поверхности к оси зубчатого колеса. Этот угол должен измеряться в осевом сечении боковой поверхности зуба фрезы, которое принято прямолинейным.

Остальные параметры фрезы определяются по конструктивным соображениям.

Червячные фрезы для обработки скосов цилиндрических колес внешнего зацепления устанавливаются строго параллельно плоскости торца колеса.

Фрезы для обработки эвольвентных винтовых скосов являются фрезами неопределенной установки и поэтому их положение на оправке относительно центра станка произвольно, если, конечно, имеется достаточный запас длины фрезы.

Расстояние между осью изделия 1 (фиг. 14, д) и проекцией оси фрезы 2, предназначенной для фрезерования эвольвентных винтовых скосов зубьев зубчатых колес, равно радиусу основной окружности обрабатываемого зубчатого колеса.

Поворотом вокруг собственной оси нарезаемое зубчатое колесо должно быть установлено так, чтобы элементы торцевой части его зубьев приходились против соответствующих им участков режущих элементов фрезы. Для достижения такого соответствия в положении зубьев зубчатого колеса и фрезы может быть применен шариковый или конусный радиальный упор-фиксатор 3, устанавливаемый по первой детали из партии. После установки правильного положения зубчатого колеса по упору-фиксатору оно жестко крепится на столе станка.

Подача врезания осуществляется при вертикальном перемещении (опускании) суппорта с фрезой.

Допуски на изготовление фрез могут быть приняты такими же, как у черновых червячных фрез класса В, используемых при обработке цилиндрических зубчатых колес.

Поскольку каждая сторона профиля заостренной поверхности торцевой части зуба обрабатывается одной стороной профиля зуба фрезы, то средняя часть фрезы оказывается неработающей. Это позволяет в ряде случаев вести обработку заострения с помощью двух отдельных червячных фрез, установленных на некотором расстоянии друг от друга (фиг. 14, е).

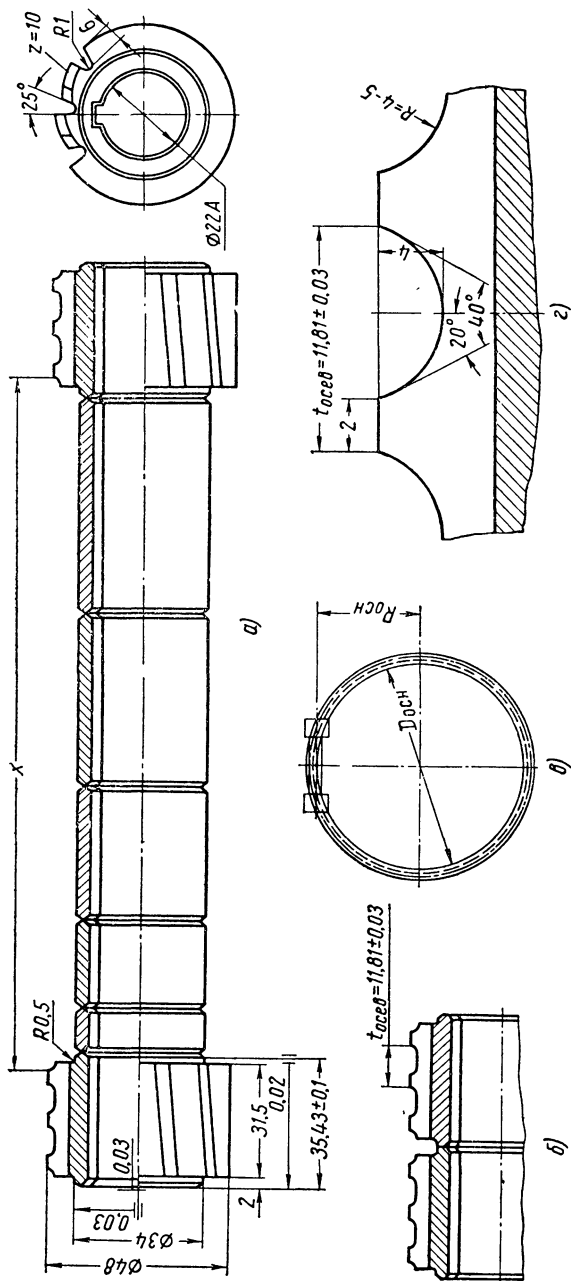
Расстояние между фрезами

$$x = 2 \sqrt{\left(\frac{D_i}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_0}{2}\right)^2} \text{ мм,}$$

где D_i — диаметр впадин зубьев;

D_0 — диаметр основной окружности;

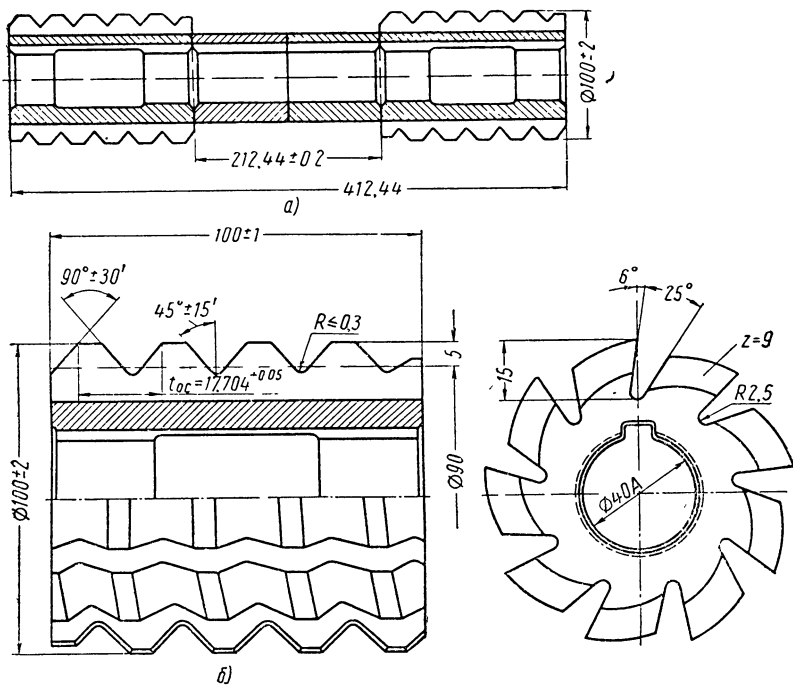
$$D_0 = mz \cos \alpha = m(z \cos \alpha).$$



Фиг. 15. Примерная конструкция отдельных червячных фрез для обработки торцов зубьев зубчатых колес $m = 4$ мм диаметром до 1000 мм.

Примерная конструкция отдельных червячных фрез, разработанных на заводе имени А. И. Ефремова, для заострения торцов зубьев зубчатых колес $m = 4$ мм диаметром до 1000 мм приведена на фиг. 15, а.

При посадке на шпонку витки профиля одной фрезы должны быть прямым продолжением витков профиля второй фрезы как без промежуточных колес (фиг. 15, б), так и с установленными требуемого размера промежуточными кольцами (фиг. 15, а).



Фиг. 16. Примерная конструкция отдельных червячных фрез для обработки торцов зубьев зубчатых колес $m = 6$ мм с $z = 194$ и меньше.

Эти фрезы устанавливаются так, чтобы их ось была касательной к основному цилиндру обрабатываемого зубчатого колеса. Эскиз установки показан на фиг. 15, в. Количество промежуточных колес между двумя червячными фрезами, т. е. размер x (фиг. 15, а и фиг. 14, е) определяется по ранее приведенной формуле и выдерживается при установке фрез на оправку между внутренними сторонами первых зубьев фрез. Профиль фрезы в осевом сечении показан на фиг. 15, г.

На фиг. 16 представлены отдельные червячные фрезы для снятия скосов, применяемые на Уралмашзаводе.

Схема набора фрез дана на фиг. 16, а. На фиг. 16, б показан профиль червячной фрезы в нормальном сечении. Для одной фрезы устанавливаются следующие технические условия:

Допуск на шаг	$\pm 0,05$ мм
Допуск на длине 5 шагов	$\pm 0,15$ мм
Радиальное биение по наружному диаметру	0,1 мм
Наибольшая накопленная ошибка окружного шага винтовых канавок	0,12 мм
Конусность по наружному диаметру на длине 100 мм . .	0,25 мм
Биение по торцам не более	0,03 мм

Разность наружных диаметров в одном наборе должна быть в пределах $\pm 0,3$ мм. Обработка профиля и заточка фрез обычно производится одновременно на одной оправке.

После обработки червячными фрезами на торце остаются заусенцы, которые удаляются слесарной опиловкой.

Опыт заводов не подтвердил эффективности применения червячных и одновитковых червячных фрез для зубозакругления.

Исходя из изложенного выше о заострении эвольвентно-винтовыми поверхностями, можно заключить, что фрезерование червячной одновитковой фрезой также не может обеспечить получение оптимальной формы торцевой части зуба.

Себестоимость червячных фрез, изготавливаемых на заводах своими силами, весьма высока.

Изготовление червячных фрез на специализированных инструментальных заводах также довольно трудоемко.

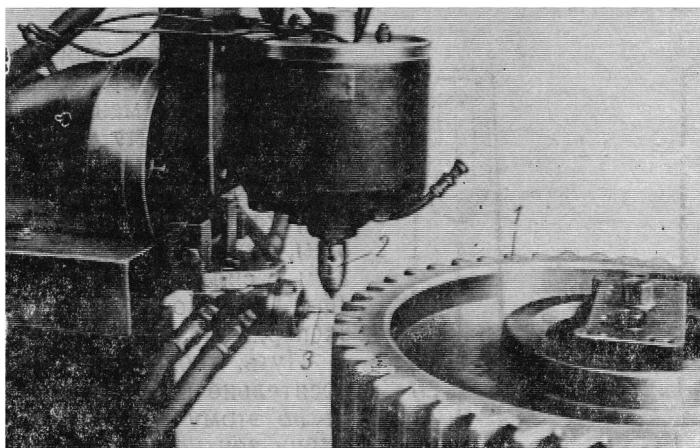
О производительности и стойкости инструмента при фрезеровании червячными фрезами заостренных профилей установленных данных нет.

Заострение пальцевой фрезой, ось которой лежит в плоскости, перпендикулярной торцу зубчатого колеса

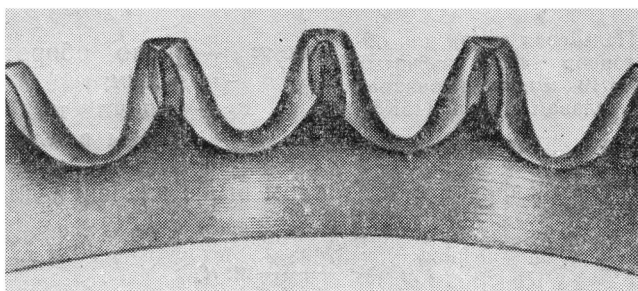
На фиг. 17 приведена принципиальная часть гидрокопировального станка для заострения зубьев зубчатых колес $m = 6 \div 24$ мм [5]. Для этого диапазона модулей зубчатых колес наша промышленность не выпускает зубозакругляющих станков. Попытки внедрения обработки торцевой части зуба крупных зубчатых колес на зубофрезерных станках с помощью специальных червячных фрез часто не дают положительных результатов из-за их высокой себестоимости при большой номенклатуре, что заставляет искать другие пути.

Работа станка основана на принципе копирования. Копирами служат зубья обрабатываемого зубчатого колеса. Изделие 1 вращается с заданной скоростью и вместе со столом перемещается поступательно относительно фрезы 2 и щупа 3 копировальной головки. Ось шпинделя наклонена под углом 5—7°.

Вид получаемого заострения показан на фиг. 18.



Фиг. 17. Головка гидроконтрольного зубозаостряющего станка.



Фиг. 18. Заостренные зубья.

Станок имеет гидравлическую следящую систему, которая управляет цилиндром возвратно-поступательного перемещения стола с изделием.

Копировальная головка устроена таким образом, что боковые усилия на шариковый конец щупа перемещают золотник в положение, при котором шток цилиндра отводит стол с изделием от щупа и фрезы.

Вращение изделия также осуществляется с помощью гидромотора. Инструментом для обработки по данному методу служит фасонная двухперая концевая фреза из стали марок Р9 и Р18 или, как предполагается в будущем, фреза, армированная твердым сплавом марки Т15К6 (фиг. 19). Последняя требует еще экспериментальной проверки.

Путь, проходимый фрезой относительно изделия при обработке по этому методу, составляет длину контура зуба и впадины.

Путь фрезы при обработке зубчатого колеса

$$L = 2,4zm \pi = 7,536zm.$$

Машинное время одного прохода при обработке по данному методу

$$T_M = \frac{L}{n_{\phi} \cdot s_z z_{\phi}} \text{ мин.},$$

где n_{ϕ} — число оборотов фрезы в мин;

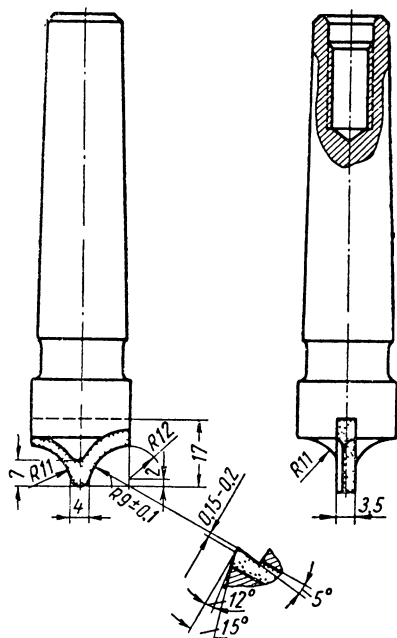
s_z — подача на один зуб фрезы в мм;

z_{ϕ} — число зубьев фрезы.

При двухзубой фрезе и указанном выше значении длины обработки

$$T_M = \frac{3768 zm}{n_{\phi} \cdot s} \text{ мин.}$$

В процессе эксплуатации станка освоена обработка зубчатого колеса $m = 10$ мм из стали марки 40Х с числом зубьев $z = 60$ за 32 мин машинного времени на один проход. Этот результат получен при 720 об/мин и подаче на зуб 0,1 мм. По данным автора [5], внедрение этого процесса по сравнению с ручной обработкой торцов зубьев увеличило производительность труда в 5 раз.



Фиг. 19. Пальцевая фреза для обработки торцов зубьев зубчатых колес $m = 10$ мм, армированная твердым сплавом марки Т15К6.

Результаты контрольного испытания стойкости пальцевых фрез

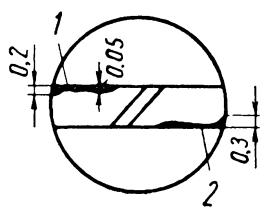
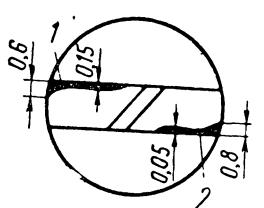
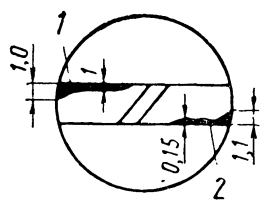
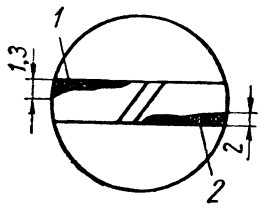
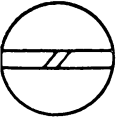

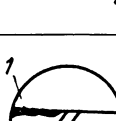
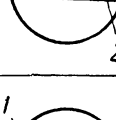


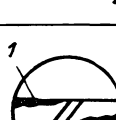
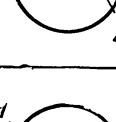
№ перехода	Зубчатое колесо		Т _ж в мин	ΣТ _ж в мин	Износ в мм				Эскиз	Класс чистоты обработанной поверхности
	m	z			по радиусу		на уголках			
					1-й зуб	2-й зуб	1-й зуб	2-й зуб		
1	10	23	12	12	0,05	—	0,2	0,3		6
2	10	23	12	24	0,15	0,05	0,6	0,8		4
3	10	23	12	36	0,3	0,15	1,0	1,1		4
4	10	23	12	48	0,7	0,5	1,3	2,0		3

Таблица 5

Результаты контрольного испытания стойкости пальцевых фрез

№ пере- хода	Зубчатое колесо		Т _ж в мин	ΣТ _ж в мин	Износ в мм				Эскиз	Класс чистоты обработан- ной поверх- ности
	m	z			по радиусу		на уголках			
					1-й зуб	2-й зуб	1-й зуб	2-й зуб		
1	10	12	6,3	6,3	—	—	0,05	0,1		6
2	10	11	5,7	12	0,1	0,2	0,2	0,3		6
3	10	12	6,3	18,3	0,2	0,4	0,3	0,6		4
4	10	11	5,7	24	0,4	0,6	0,5	0,8		4
5	10	12	6,3	30,3	0,45	0,7	0,7	1,0		4
6	10	11	5,7	36	0,6	1,0	0,9	1,4		4
7	10	12	6,3	42,3	0,7	1,4	1,0	1,7		3
8	10	11	5,7	48	0,8	1,6	1,2	2,0		

В табл. 4 и 5 приведены данные наблюдений за стойкостью фрез диаметром 22 мм с передним углом $\gamma = 5^\circ$ и задним углом $\alpha = 12^\circ$, изготовленных из стали марки Р9. Обработка производилась без охлаждения со скоростью резания $v = 47$ м/мин и подачей на зуб $s_z = 0,1$ мм. Как видно из таблиц, износ инструмента нарастает довольно быстро. Износ по уголкам достигает 0,2—0,3 мм уже после обработки 23 зубьев, а после обработки 92 зубьев износ по уголкам достиг 2 мм. После обработки 23 зубьев чистота обработанной поверхности соответствовала 6-му классу, а после обработки 92 зубьев чистота обработанной поверхности соответствовала 3-му классу и фрезу сняли для переточки. Примерно такие же данные получены во втором опыте (табл. 5).

Как видно из фиг. 19, инструмент имеет недостаточную прочность. Это может вызывать его аварийный выход из строя.

Зубья зубчатых колес после обработки подвергаются зачистке напильником.

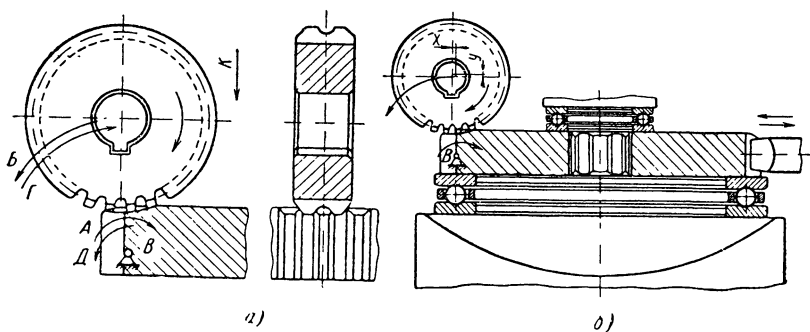
Таким образом, придание торцам зубьев рациональной бочкообразной формы до настоящего времени было возможно лишь с помощью пальцевой фрезы путем изменения профиля режущего инструмента.

Однако этот метод имеет ряд больших недостатков, которые были детально разобраны выше. Создание рациональных методов закругления торцевой поверхности зубьев переключаемых колес является большой и важной проблемой, касающейся многих отраслей промышленности, в том числе тракторной, автомобильной, станкостроительной и др.

ЗАКРУГЛЕНИЕ ТОРЦА ЗУБЬЕВ ДИСКОВОЙ ФАСОННОЙ ФРЕЗОЙ, ИМЕЮЩЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВДОЛЬ ВЫСОТЫ ЗУБА

1. СУЩНОСТЬ НОВОГО МЕТОДА ЗУБОЗАКРУГЛЕНИЯ

Закругление торца зуба переключаемых зубчатых колес по новому методу¹ производится (фиг. 20) дисковой фасонной насадной или хвостовой фрезой с профилем, соответствующим поперечному сечению закругляемой части зуба [6] — [8].



Фиг. 20. Схема осуществления нового метода зубозакругления с помощью дисковой фасонной фрезы.

При формообразовании торца каждого зуба инструмент и изделие осуществляют относительно друг друга непрерывно два последовательных движения.

Первое из них — врезание в торец зубчатого колеса на полную глубину закругления. Оно может осуществляться инструментом с зубьями, расположенными на одной окружности, проведенной из центра вращения, путем относительного перемещения изделия или инструмента в направлении, перпендикулярном к торцу зубчатого колеса (фиг. 20, *a*, стрелка *K*). При отсутствии этого движения врезание может осуществляться за счет участка инст-

¹ Авторское свидетельство 130321-49d 13 от 6 апреля 1959 г.

румента, на котором каждый последующий зуб имеет подъем (центр смещен в направлениях x и y) (фиг. 20, б). При втором, формообразующем движении производится обработка поверхности торца зуба по заданной кривой профиля или траектории движения вдоль высоты зуба зубчатого колеса, которое осуществляется за счет относительного поворота изделия (фиг. 20, а, стрелки A и D) или инструмента (стрелки B и Γ) или того и другого вокруг заданного на изделии центра поворота B .

Процесс может осуществляться без врезания за счет одногo вращательного движения при обработке по направлению от вершины к основанию зуба (стрелка Γ или D).

Обработка может вестись в направлении от корня зуба к вершине, от вершины к корню зуба или попеременно через зуб в обе стороны. Предпочтительно вращение фрезы по часовой стрелке.

Обработка вдоль высоты зуба может производиться путем качательного движения изделия или инструмента, или сочетания двух движений изделия или инструмента, направленных одно вдоль высоты зуба, а другое в поперечном направлении.

Указанные движения могут осуществляться с помощью кулачковых механизмов, копирувальных или программных систем.

Новый метод зубозакругления может в виде варианта осуществляться червячным инструментом. В этом случае обработка должна производиться методом обкатки при дополнительном движении по заданной кривой вдоль высоты зуба.

2. ВРЕЗАНИЕ В ТОРЕЦ ВЕНЦА ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Врезание в торец зубчатого колеса производится на полную глубину закругления (фиг. 21, а). Положение центра O_0 фрезы в конце врезания определяется положением центра O_0 закругления торца зуба, радиусом закругления вдоль высоты зуба r_0 и радиусом фрезы r_{ϕ} .

$$\sin \alpha = \frac{h_c - h''}{r_0},$$

где h_c — расстояние между делительной окружностью и центром закругления в мм;

h'' — высота ножки зуба зубчатого колеса в мм;

r_0 — радиус закругления вдоль высоты зуба.

При установке положения оси фрезы относительно обрабатываемого зубчатого колеса необходимо знать расстояние между осью фрезы и осью колеса, а также расстояние между осью фрезы и торцом зубчатого колеса.

Рассмотрим два случая, т. е. когда врезание осуществляется путем качательного движения изделия (фиг. 21, б) или путем вертикального перемещения изделия вдоль его оси (фиг. 21, в). В первом случае положение II (фиг. 21, б) соответствует концу врезания, когда $AO = r_0 + r_{\phi}$. Определив AD из треугольника

АДО и сложив с известной величиной x' , получим горизонтальное расстояние x'' между центром фрезы A и осью обрабатываемого зубчатого колеса в положении II

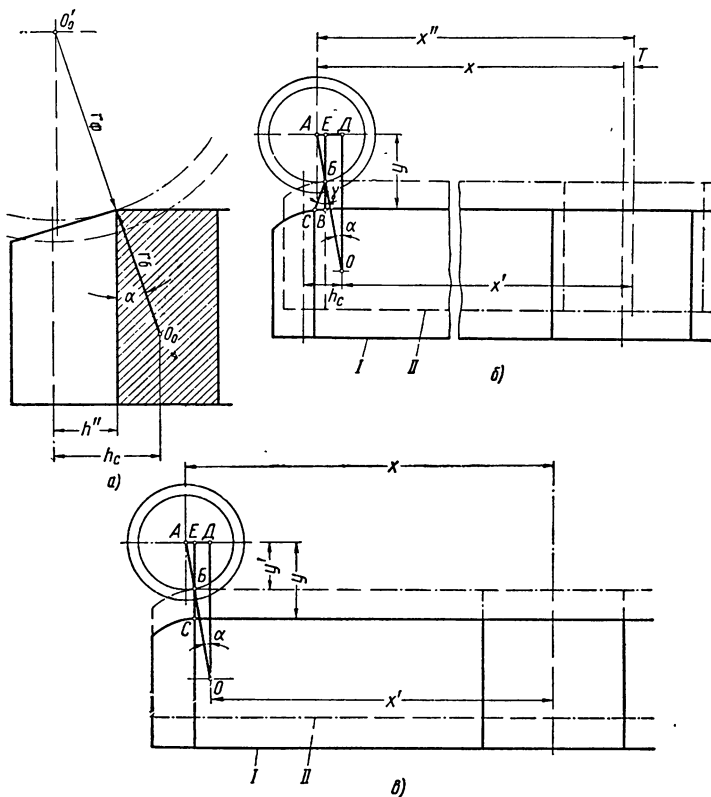
$$x'' = x' + AD = x' + (r_{\sigma} + r_{\phi}) \sin \alpha.$$

В свою очередь,

$$x' = \frac{d_{\partial}}{2} - h_c,$$

где h_c — расстояние от делительной окружности до центра закругления в мм;

d_{∂} — диаметр делительной окружности в мм.



Фиг. 21. Схемы для определения положения центра фрезы относительно оси обрабатываемого изделия и центра закругления вдоль высоты зуба.

Но исходным положением заготовки относительно фрезы будет положение I и горизонтальное расстояние между центром фрезы и осью зубчатого колеса x . Из фиг. 21, б видно, что x меньше x'' на величину $T = CB$. Из треугольника $СВВ$, угол $СВВ$ ко-

того при обработке одновенцовых колес примерно равен $\gamma = 20^\circ$, а для двухвенцовых должен быть определен согласно далее изложенной методике,

$$CB = CB \cdot \sin \gamma.$$

Величина CB равна подъему кривой кулака станка на участке до начала обработки вдоль высоты зуба, умноженному на соотношение плеч зубозакругляющего устройства (см. раздел «Расчет и проектирование кулаков»).

Таким образом, горизонтальное расстояние между центром фрезы и осью зубчатого колеса в их исходном положении (положение I) будет

$$x = x' - CB = x' + (r_\sigma + r_\phi) \sin \alpha - CB \cdot \sin \gamma.$$

Вертикальное расстояние от центра фрезы до торца заготовки (фиг. 21, б)

$$y = EB + BB.$$

Из треугольника AEB

$$EB = AB \cdot \cos \alpha,$$

где $AB = r_\phi$.

Из треугольника CBB

$$BB = CB \cdot \cos \gamma.$$

Таким образом,

$$y = r_\phi \cdot \cos \alpha + CB \cdot \cos \gamma.$$

Во втором случае (фиг. 21, в) горизонтальное расстояние от центра фрезы до оси зубчатого колеса определяется по формуле

$$x = x' + AD = x' + (r_\sigma + r_\phi) \sin \alpha,$$

где x' — расстояние от оси зубчатого колеса до центра O закругления вдоль высоты зуба.

В данном случае уравнение изменилось, так как заготовка перемещается из положения I в положение II по вертикали.

Вертикальное расстояние между центром фрезы и торцом обрабатываемого зубчатого колеса при обработке в направлении от основания зуба будет

$$y = y' + CB,$$

где y' — вертикальное расстояние между центром инструмента и торцом зубчатого колеса при обработке в направлении от вершины зуба.

Из треугольника AEB

$$y' = EB = AB \cdot \cos \alpha.$$

Так как $AB = r_\phi$, то $y' = r_\phi \cdot \cos \alpha$, а значит

$$y = r_\phi \cdot \cos \alpha + CB.$$

По нормали на бочкообразное закругление $h_c = 1,5 m$, а $r_c = 4,5 m$.

В этом случае

$$\sin \alpha = \frac{1,5m - 1,25m}{4,5m} = \frac{0,25m}{4,5m} = 0,0556,$$

откуда $\alpha = 3^\circ 11'$.

По чертежам зубчатых колес этот угол имеет разные значения: от 0° (когда центр фрезы расположен в вертикальной плоскости, проходящей через дно впадины зуба) до 6° и даже 15° .

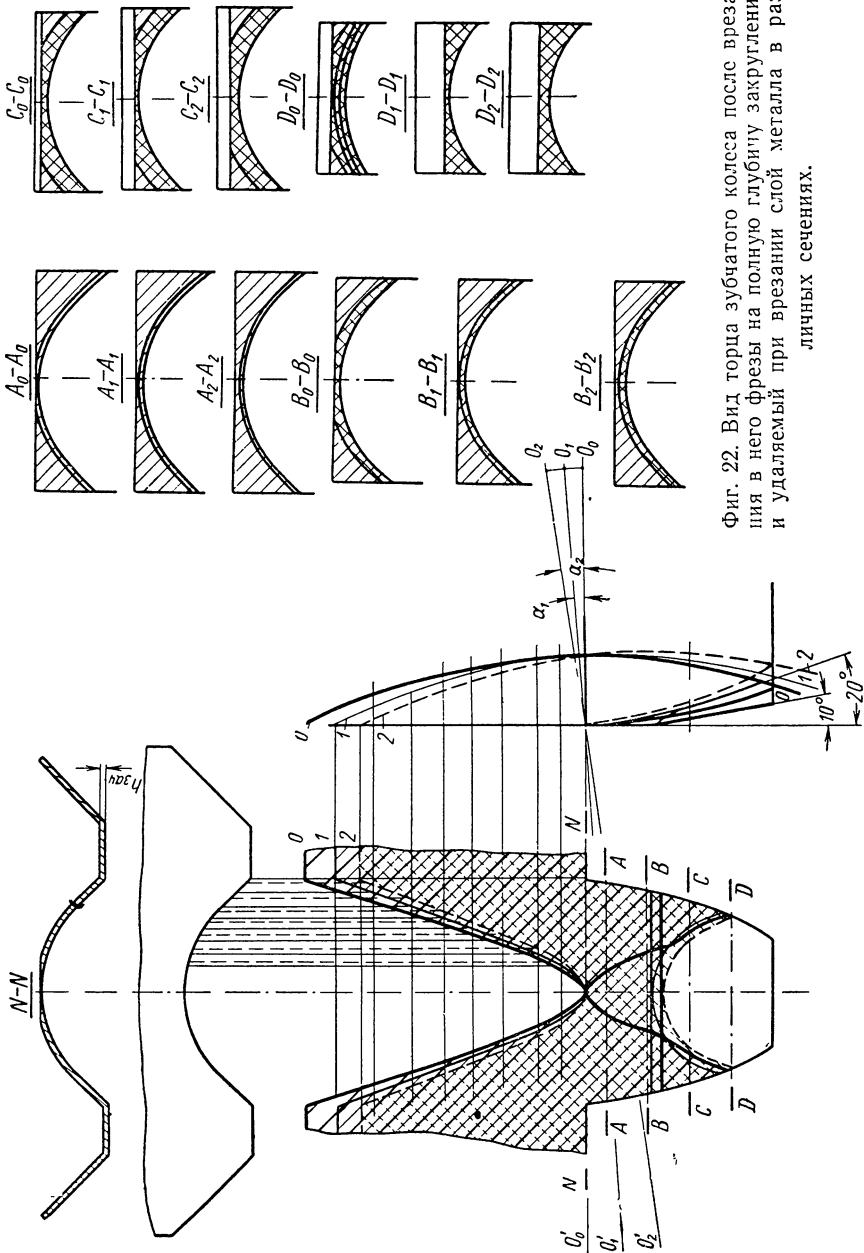
На фиг. 22 слева приведен вид торца зубчатого колеса после врезания в него фрезы на полную глубину закругления, а справа — удаляемый при врезании слой металла в различных сечениях по высоте зуба, показанный на чертеже односторонней крупной штриховкой. Профиль торца, полученный после врезания, построен для зуба зубчатого колеса $m = 5/3,75$. Профиль закругления зуба получается в данном случае при обработке фрезой, имеющей радиусный профиль ($R = 4,5 \text{ мм}$) при вершине (показан слева вверху) и крайние участки по касательной к этому радиусу под углом 50° .

На чертеже (слева) приведены три формы торца, получаемые в зависимости от конечного положения центра фрезы O_0 , O_1 , O_2 при врезании относительно центра закругления вдоль высоты зуба O_0 , O_1 , O_2 , т. е. в зависимости от значения угла α . Жирной линией, а в сечениях (справа) индексом 0, отмечено все относящееся к $\alpha = 0^\circ$, тонкой сплошной линией и индексом 1 в сечениях отмечено все относящееся к $\alpha_1 = 3^\circ$ и штриховой линией и индексом 2 в сечениях отмечено все, что относится к $\alpha_2 = 6^\circ$.

Как видно из чертежа, при врезании с торца венца и зуба снимается значительный слой металла, показанный в сечениях справа крупной односторонней штриховкой, а слева заштрихованный, соответственно значениям угла $\alpha = 0, 3$ и 6° , — жирной сплошной линией, тонкой сплошной линией и штриховой линией. Перекрестной штриховкой в сечениях справа показан слой металла, подлежащий удалению при обработке вдоль высоты зуба. Как видно, при $\alpha = 0^\circ$ внутренние поверхности, ограниченные двумя треугольниками, при врезании не обрабатываются.

При $\alpha = 3$ и 6° величина срезаемого при врезании металла увеличивается. Если в первом случае, т. е. при установке фрезы под углом $\alpha = 0^\circ$, вершины двух треугольников (торцов венца и зуба) совпадают, то во втором случае вершина треугольника торца венца остается на том же месте, а вместо треугольника на торце зуба не обрабатываемую при врезании часть зуба ограничивают кривые, близкие к радиусным, проведенные тонкой сплошной и штриховой линиями. При этом дополнительно обрабатывается часть поверхности торца зуба.

В конце хода врезания предусматривается слой $h_{зач}$ на зачистку (см. слева вверху), т. е. слой, который снимается с умень-



Фиг. 22. Вид торца зубчатого колеса после врезания в него фрезы на полную глубину закругления и удаляемый при врезании слой металла в различных сечениях.

шенной примерно в 3 раза подачей на зуб. Подача на зуб при зачистке составляет 0,04—0,05 мм. Величина слоя на зачистку принимается в пределах 0,2—0,3 мм.

Определим длину периметра режущих кромок, контактирующих с металлом по мере врезания фрезы в торец зубчатого колеса для фрез, имеющих рабочий профиль, состоящий из радиусной части и крайних участков по касательной к этому радиусу (фиг. 23, а).

Периметр

$$P = 2(p' + l + p'') \text{ мм},$$

где p' — половина длины прямолинейной рабочей части профиля фрезы в пределах глубины H в мм;

l — половина длины радиусной внутренней рабочей части профиля фрезы в мм;

p'' — половина длины прямолинейных боковых наружных кромок в мм, не вошедших в p' , т. е. выше глубины H .

Рассмотрим каждое из слагаемых в отдельности, причем, так как профиль симметричен, то расчет ведется для одной его половины.

Вначале фреза врезается на глубину H своими прямолинейными кромками. На этом участке при обработке первого зуба зубчатого колеса в работе участвуют две кромки, расположенные по наружному диаметру фрезы, две внутренние прямолинейные кромки и две боковые прямолинейные наружные кромки. На этом участке врезания половина длины, работающей части профиля зуба фрезы, может быть определена по формуле

$$p_1 = a + n_1 \frac{s_z}{\cos \alpha_u} + n_1 \frac{s_z'}{\cos \alpha_u'} = \left[a + n_1 s_z \left(\frac{1}{\cos \alpha_u} + \frac{1}{\cos \alpha_u'} \right) \right] \text{ мм}.$$

где a — ширина площадки по наружному диаметру профиля инструмента в мм;

n_1 — порядковый номер работающего зуба инструмента, начиная от первого участвующего во врезании зуба;

s_z — подача на зуб в мм;

α_u — половина угла прямолинейной части рабочего профиля (внутренней);

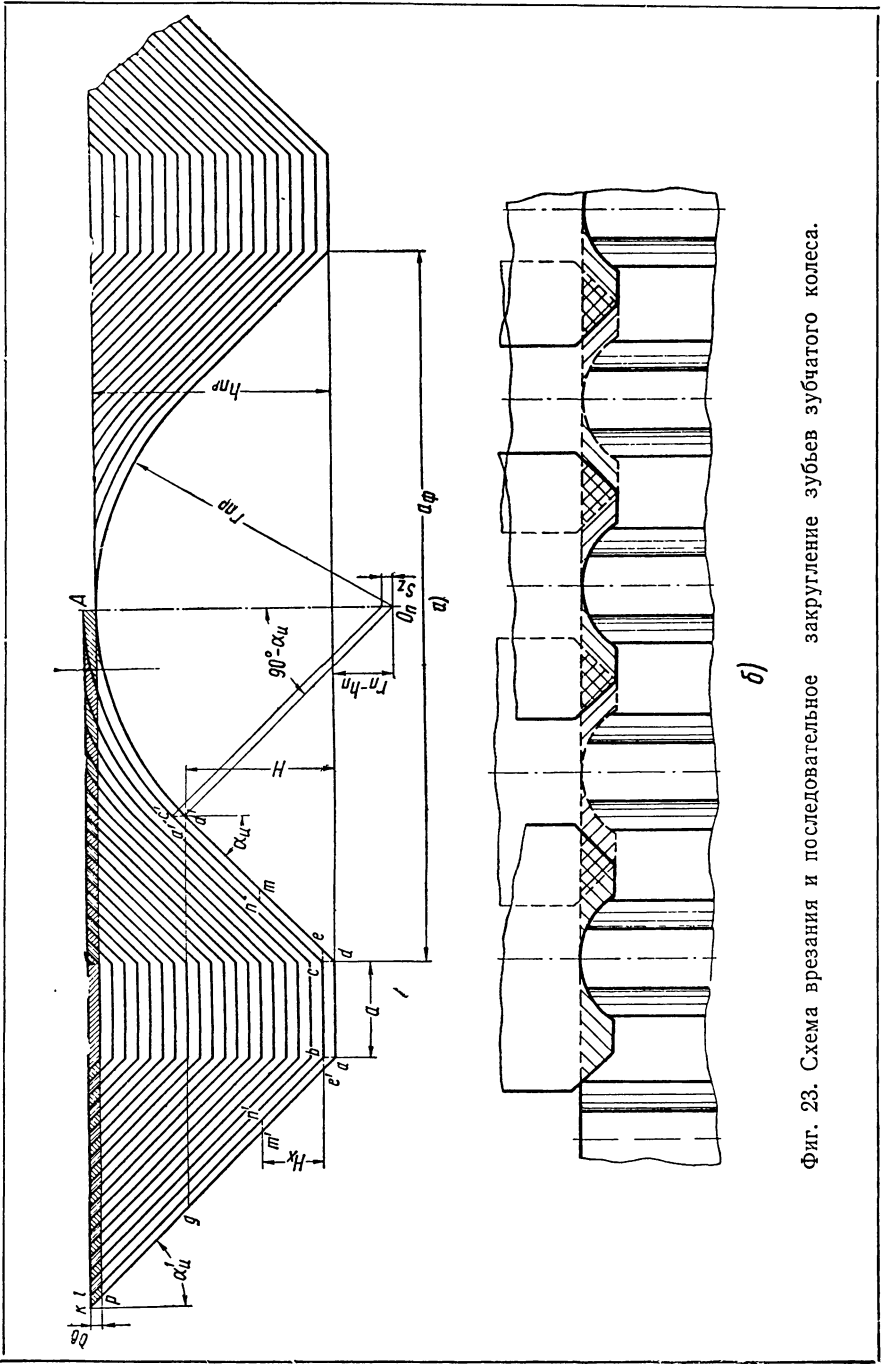
α_u' — угол боковых наружных кромок (наружный).

Часть периметра профиля зуба фрезы, завершающего врезание на глубину H , определяется по формуле

$$p' = a + H \left(\frac{1}{\cos \alpha_u} + \frac{1}{\cos \alpha_u'} \right) \text{ мм}.$$

Здесь $H = n_1 s_z$.

$$H = \frac{a_{\phi} - 2r_{np} \cos \alpha_u}{2 \operatorname{tg} \alpha_u}, \quad (\text{фиг. 23а})$$



Фиг. 23. Схема врезания и последовательное закругление зубьев зубчатого колеса.

где a_{ϕ} — ширина внутренней рабочей части профиля фрезы определяется толщиной зуба на окружности впадин с ее превышением на 0,1—0,2 мм, т. е. $a_{\phi} = s_i + (0,1 \div 0,2)$ мм.

Тогда

$$p' = a + \left(\frac{a_{\phi} - 2r_{np} \cos \alpha_u}{2 \operatorname{tg} \alpha_u} \right) \left(\frac{1}{\cos \alpha_u} + \frac{1}{\cos \alpha'_u} \right) \text{ мм.}$$

При дальнейшем врезании фрезы в торец зубчатого колеса увеличение периметра по внутренней поверхности происходит вследствие увеличения длины дуги внутренней радиусной поверхности, а увеличение периметра наружных боковых поверхностей за счет дальнейшего врезания в торец зубчатого колеса боковых прямолинейных кромок.

Половина длины радиусной поверхности профиля зуба фрезы, завершающего врезание, определяется по формуле

$$l = 0,01745r_{np}(90^\circ - \alpha_u) \text{ мм.}$$

Половина длины боковых наружных кромок, не вошедших в p' , т. е. выше глубины H , определяется по формуле

$$p'' = \frac{n_2 s_z + n_3 s_z}{\cos \alpha'_u} \text{ мм,}$$

где n_2 — порядковый номер работающего зуба инструмента, начиная со следующего после врезания прямолинейных кромок на глубину H ;

n_3 — порядковый номер зуба инструмента, снимающий дополнительный припуск δ_s .

Конечное значение суммы, стоящей в числителе,

$$h_{np} - H + \delta_s,$$

где δ_s — дополнительный припуск, определяемый отклонением в высоте венца зубчатого колеса.

Таким образом, в конце обработки

$$p'' = \frac{h_{np} - H + \delta_s}{\cos \alpha'_u} \text{ мм.}$$

Приведенные формулы определения периметра работающей части зуба инструмента относятся только к обработке первого зуба зубчатого колеса, когда обе боковые режущие кромки фрезы врезаются в необработанный торец зубчатого колеса. Начиная со второго зуба, часть торца уже обработана при предыдущем проходе (фиг. 23, б), вследствие чего периметр уменьшается на полную длину одной боковой кромки, т. е. на величину

$$\Delta p = \frac{h_{np} + \delta_s}{\cos \alpha'_u} \text{ мм.}$$

Таким образом определены:

1) наибольший периметр обработки первого зуба зубчатого колеса

$$P_1 = 2 \left[a + \frac{h_{np} + \delta_s}{\cos \alpha'_u} + \frac{a_\phi - 2r_{np} \cos \alpha_u}{2 \sin \alpha_u} + 0,01745 r_{np} (90^\circ - \alpha_u) \right] \text{ мм};$$

2) наибольший периметр обработки любого последующего зуба зубчатого колеса

$$P_2 = 2 \left[a + \frac{a_\phi - 2r_{np} \cos \alpha_u}{2 \sin \alpha_u} + 0,01745 r_{np} (90^\circ - \alpha_u) \right] + \frac{h_{np} + \delta_s}{\cos \alpha'_u} \text{ мм}.$$

Приближенно найдем постепенно увеличивающуюся площадь сечения слоя, срезаемого каждым зубом фрезы по мере врезания фрезы в торец зубчатого колеса (фиг. 23, а).

Площадь сечения слоя, срезаемая первым режущим зубом фрезы с подачей s_z , составит из двух площадей прямоугольников $abcd$, расположенных с обеих сторон внутреннего профиля фрезы и площадей треугольников ced и $e'ab$.

Площадь прямоугольника $abcd$

$$F'_1 = a s_z \text{ мм}^2,$$

где

$$a = \left[\frac{\pi D_u}{2z} + (0,2 \div 0,5) \right] - \frac{a_\phi}{2} \text{ мм}.$$

Площади треугольников

$$F'_{2ced} = \frac{1}{2} cd \cdot ce = \frac{1}{2} s_z \cdot s_z \operatorname{tg} \alpha_u = \frac{1}{2} s_z^2 \operatorname{tg} \alpha_u \text{ мм}^2;$$

$$F''_{2e'ab} = \frac{1}{2} s_z \cdot s_z \operatorname{tg} \alpha'_u = \frac{1}{2} s_z^2 \operatorname{tg} \alpha'_u \text{ мм}^2.$$

Таким образом, площади треугольников, срезаемых одной стороной профиля первого зуба фрезы, составят:

$$F_2 = F'_2 + F''_2 = \frac{1}{2} s_z^2 (\operatorname{tg} \alpha_u + \operatorname{tg} \alpha'_u) \text{ мм}^2.$$

$$\text{При } \alpha_u = \alpha'_u = 45^\circ \quad F_2 = s_z^2 \text{ мм}^2.$$

Площадь сечения слоя, срезаемая каждым последующим зубом в пределах высоты профиля H , будет увеличиваться на величину площади параллелограммов $e'bn'm'$ и $setn$. Площади параллелограммов

$$\begin{aligned} F'_{3e'bn'm'} &= H_x e'b = H_x \cdot s_z \operatorname{tg} \alpha_u = s_z (n_1 - 1) s_z \operatorname{tg} \alpha'_u = \\ &= s_z^2 (n_1 - 1) \operatorname{tg} \alpha'_u \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

где H_x — текущая высота профиля до высоты H ;
 n_1 — порядковый номер зуба, начиная от первого, работающего в пределах высоты H .

$$F_3''_{\text{сепн}} = H_x c e = H_x s_z \operatorname{tg} \alpha_u = s_z^2 (n_1 - 1) \operatorname{tg} \alpha_u \text{ мм}^2.$$

Тогда $F_3 = F_3' + F_3'' = s_z^2 (n_1 - 1) (\operatorname{tg} \alpha_u' + \operatorname{tg} \alpha_u)$.

При $\alpha_u = \alpha_u' = 45^\circ$

$$F_3 = 2s_z^2 (n_1 - 1) \text{ мм}^2.$$

Определим площадь треугольника $a'd'c'$

$$F_{4a'd'c'} = \frac{1}{2} s_z^2 \operatorname{tg} \alpha_u \text{ мм}^2.$$

Дальнейшее увеличение площади сечения слоя, срезаемого зубьями фрезы по внутреннему профилю, будет идти за счет добавления площади сечения, образованной двумя дугами и взаимно-перпендикулярными прямыми (фиг. 24, а).

На этом чертеже из центра O_1 прямоугольных осей координат проведена окружность радиуса r_{np} . Вторая окружность также радиуса r_{np} проведена из точки O_2 , расположенной на оси координат и смещенной вверх относительно центра осей координат на величину s_z . Пересекаясь, эти окружности образуют два полумесяца. Рассмотрим полумесяц, расположенный выше оси x . Параллельно оси ординат проведены прямые, выраженные уравнениями $x = b$ и $x = -b$. Эти прямые отсекают от полумесяца какую-то часть его площади. Прямая mm проведена параллельно оси абсцисс и выражена уравнением $y = c$. Прямая mm также отсекает от полумесяца какую-то часть его площади. Задача состоит в нахождении площади фигуры, ограниченной двумя дугами и прямыми nn , $n'n'$ и mm , т. е. удвоенной площади фигуры $ABCD$, так как участки образуемых площадей симметричны.

Задача решается в следующей последовательности:

1) определим площадь фигуры $ABEK$;

2) определим площадь фигуры $CEKD$;

3) вычитая из первого результата второй, найдем искомую площадь.

Решим задачу для первой четверти осей координат.

Напишем уравнение окружностей

$$x^2 + y^2 = r_{np}^2; \quad x^2 + (y - s_z)^2 = r_{np}^2.$$

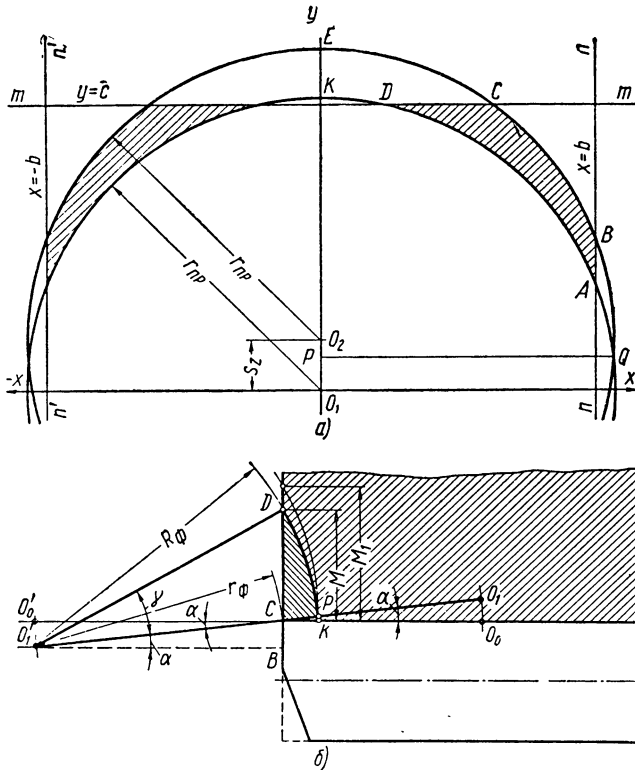
Так как площадь определяется интегралом $2 \int_{x_1}^{x_2} y dx$, найдем значения y для обоих уравнений

$$y_1 = + \sqrt{r_{np}^2 - x^2}; \quad y_2 = + \sqrt{r_{np}^2 - x^2} + s_z.$$

Найдем площадь фигуры $ABEK$

$$F_{ABEK} = \int_0^b (\sqrt{r_{np}^2 - x^2} + s_2) dx - \int_0^b \sqrt{r_{np}^2 - x^2} dx =$$

$$= \int_0^b \sqrt{r_{np}^2 - x^2} dx + \int_0^b s_2 dx - \int_0^b \sqrt{r_{np}^2 - x^2} dx = \int_0^b s_2 dx = s_2 x \Big|_0^b = s_2 b.$$



Фиг. 24. Схемы:

a — определения площади сечения, срезаемого зубом, по радиусной части профиля закругления торца зуба; b — определения длины прорезания торца венца зубчатого колеса при закруглении новым методом.

Величина $s_2 b$ для данного профиля режущего инструмента постоянная, так как абсцисса прямой $x = b$ — постоянная.

$$F_{ABEK} = s_2 r_{np} \cos \alpha, \text{ так как } b = r_{np} \cos \alpha.$$

Площадь фигуры $CEKD$ определится как разность интегралов

$$F_{CEKD} = \int_c^{r_{np} + s_2} x_2 dy - \int_c^{r_{np}} x_1 dy.$$

Решим уравнение окружностей относительно x :

$$x_1 = +\sqrt{r_{np}^2 - y^2}; \quad x_2 = +\sqrt{r_{np}^2 - (y - s_2)^2},$$

$$F_{CEKD} = \int_c^{r_{np} + s_2} \sqrt{r_{np}^2 - (y - s_2)^2} dy - \int_c^{r_{np}} \sqrt{r_{np}^2 - y^2} dy.$$

Заменяв $y - s_2$ через z , получим $dy = dz$,
тогда

$$\begin{aligned} F_{CEKD} &= \int_c^{r_{np} + s_2} \sqrt{r_{np}^2 - z^2} dz - \int_c^{r_{np}} \sqrt{r_{np}^2 - y^2} dy = \frac{1}{2} \left[z \sqrt{r_{np}^2 - z^2} + \right. \\ &+ \left. r_{np}^2 \arcsin \frac{z}{r_{np}} \right] \Big|_c^{r_{np} + s_2} - \frac{1}{2} \left(y \sqrt{r_{np}^2 - y^2} + r_{np}^2 \arcsin \frac{y}{r_{np}} \right) \Big|_c^{r_{np}} = \\ &= \frac{1}{2} \left[(y - s_2) \sqrt{r_{np}^2 - (y - s_2)^2} + r_{np}^2 \arcsin \frac{y - s_2}{r_{np}} \right] \Big|_c^{r_{np} + s_2} - \\ &- \frac{1}{2} \left(y \sqrt{r_{np}^2 - y^2} + r_{np}^2 \arcsin \frac{y}{r_{np}} \right) \Big|_c^{r_{np}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{np}^2 \pi}{2} - \\ &- \frac{1}{2} \left[(c - s_2) \cdot \sqrt{r_{np}^2 - (c - s_2)^2} + r_{np}^2 \arcsin \frac{c - s_2}{r_{np}} \right] - \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{np}^2 \pi}{2} + \\ &+ \frac{1}{2} \left[c \sqrt{r_{np}^2 - c^2} + r_{np}^2 \arcsin \frac{c}{r_{np}} \right] = \frac{1}{2} \left[c \sqrt{r_{np}^2 - c^2} - \right. \\ &- \left. (c - s_2) \sqrt{r_{np}^2 - (c - s_2)^2} + r_{np}^2 \left(\arcsin \frac{c}{r_{np}} - \arcsin \frac{c - s_2}{r_{np}} \right) \right]. \end{aligned}$$

Определение сечения слоя, срезаемого боковыми режущими кромками выше высоты H , производится по формуле

$$F_5 = s_z^2 (n_2 + n_3) \operatorname{tg} \alpha'_u.$$

На основании изложенного выше определение площади сечения слоя, срезаемого каждым зубом фрезы, может быть произведено по следующим формулам:

1) общая формула определения сечений слоев, срезаемых при обработке первого зуба зубчатого колеса:

$$\begin{aligned} F &= 2as_z + s_z^2 (\operatorname{tg} \alpha_u + \operatorname{tg} \alpha'_u) + 2s_z^2 (n_1 - 1) \operatorname{tg} \alpha_u + \\ &+ 2s_z^2 (n_1 + n_2 + n_3 - 1) \operatorname{tg} \alpha'_u + M. \end{aligned}$$

Член M — определяет площадь сечения слоя, считаемого выше высоты H ,

$$M = s_z^2 \operatorname{tg} \alpha + 2s_z r_{np} \cos \alpha - [(c - s_z) \sqrt{r_{np}^2 - (c - s_z)^2} - c \sqrt{r_{np}^2 - c^2} + r_{np}^2 \left(\operatorname{arc} \sin \frac{c - s_z}{r_{np}} - \operatorname{arc} \sin \frac{c}{r_{np}} \right)],$$

где c текущая ордината прямой $y = c$ (фиг. 24, а) и изменяется от величины $c = H + r_{np} - h_{np}$ до величины $c = r_{np} + s_z$;

2) формула для определения наибольшего сечения слоя, срезаемого при обработке зубчатого колеса с наибольшей шириной венца:

$$F = 2as_z + s_z^2 (\operatorname{tg} \alpha_u + \operatorname{tg} \alpha'_u) + 2s_z (H - s_z) \operatorname{tg} \alpha_u + 2s_z (h_{np} + \delta_s - s_z) \operatorname{tg} \alpha'_u + M_1,$$

где

$$M_1 = s_z^2 \operatorname{tg} \alpha_u + 2s_z r_{np} \cos \alpha_u;$$

3) общая формула определения сечений слоев, срезаемых при обработке всех последующих (после первого) зубьев:

$$F = 2as_z + s_z^2 (\operatorname{tg} \alpha_u + 0,5 \operatorname{tg} \alpha'_u) + 2s_z^2 (n_1 - 1) \cdot \operatorname{tg} \alpha_u + s_z^2 (n_1 + n_2 + n_3 - 1) \operatorname{tg} \alpha'_u + M.$$

В конце врезания, как показано на фиг. 24, б, прорезается часть торца венца зубчатого колеса. Определим длину врезания фрезы в торец венца.

$$\angle CO_1B = \angle O_1CO_0 = \alpha; \quad \angle O_1BC = 90^\circ.$$

Длина врезания

$$M = DC = DB - CB \text{ мм.}$$

Значения DB и CB определяются из треугольников O_1BC и ΔO_1BD .

$$BC = O_1C \cdot \sin \alpha = r_\phi \cdot \sin \alpha; \quad O_1B = O_1C \cdot \cos \alpha = r_\phi \cdot \cos \alpha;$$

Тогда

$$DB = \sqrt{(O_1D)^2 - (O_1B)^2} = \sqrt{R_\phi^2 - (r_\phi \cdot \cos \alpha)^2} \text{ мм.}$$

Следовательно,

$$M = DC = DB - BC = \sqrt{R_\phi^2 - (r_\phi \cdot \cos \alpha)^2} - r_\phi \sin \alpha \text{ мм.}$$

Таким образом, длина врезания фрезы в торец венца зубчатого колеса зависит от наружного диаметра фрезы, глубины профиля закругления $h_{np} = R_\phi - r_\phi$ и угла α . Причем с увеличением угла α и уменьшением глубины профиля закругления и диаметра фрезы длина врезания уменьшается.

В случае, если $\alpha = 0$, т. е. когда центр фрезы в конце врезания будет в точке O'_0 , то

$$M_1 = \sqrt{R_{\phi}^2 - r_{\phi}^2} \text{ мм.}$$

Наибольшая длина дуги в конце врезания фрезы в торец венца зубчатого колеса равна дуге DPK .

Из $\Delta O'_1 BD$ найдем угол $BO'_1 D$;

$$\cos \rightarrow BO'_1 D = \frac{O'_1 B}{O'_1 D} = \frac{r_{\phi} \cos \alpha}{R_{\phi}}.$$

Тогда

$$\gamma = \rightarrow BO'_1 D - \alpha.$$

Найдя угол γ , определяем величину дуги DP .

$$\cup DP = 0,01745 R_{\phi} \gamma.$$

Если принять отрезок дуги PK за прямую, то она, как катет прямоугольного треугольника ΔCPK , будет равна

$$PK = CP \sin \alpha = (R_{\phi} - r_{\phi}) \sin \alpha.$$

Наибольшая длина дуги в конце врезания определяется по формуле

$$l_{\partial} = \cup DPK = \cup DP + \cup PK,$$

или подставляя

$$l_{\partial} = 0,01745 R_{\phi} \gamma + (R_{\phi} - r_{\phi}) \sin \alpha = 0,01745 R_{\phi} \gamma + h_{np} \sin \alpha \text{ мм.}$$

Контрольная проверка стойкости фрез при врезании проводилась при обработке цилиндрических зубчатых колес станка мод. 1К62, имеющих $z = 45$ и $m = 3$ мм. Материал зубчатого колеса — сталь марки 40Х.

Ниже приведен химический состав в % материала, обработанных зубчатых колес, а на фиг. 25 его микроструктура, состоящая из пластинчатого перлита и феррита.

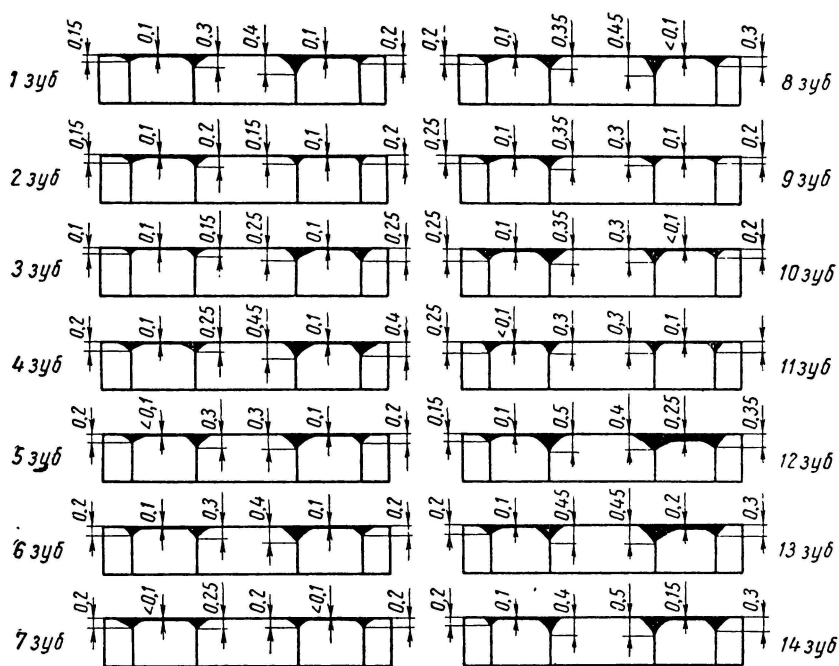
Углерод	0,40	Никель	0,27 — 0,30
Марганец	0,6	Сера	0,033 — 0,040
Кремний	0,18 — 0,22	Фосфор	0,030 — 0,034
Хром	1,1		

Заготовка выполнялась с фаской по торцу зуба под углом 15° . Нижний предел размеров фаски определялся ее длиной от вершины зуба $l = 5,6$ мм.

Экспериментальные работы проводились на горизонтально-фрезерном станке 6М82Г Горьковского завода фрезерных станков и на торцекопиральном станке фирмы Макс-Мюллер.

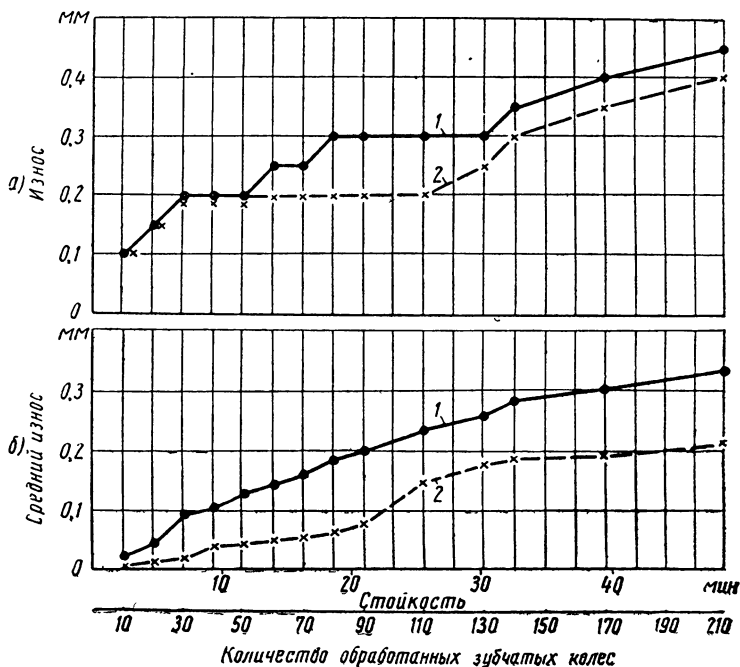


Фиг. 25. Микроструктура обработанных зубчатых колес из стали 40X.



Фиг. 26. Износ фрез.

Контрольная проверка стойкости фрез осуществлялась при врезании в торец зубчатого колеса на глубину профиля закругления $h = 2,2 \div 2,7$ мм. Обработка велась фрезами из сталей марок Р9 и Р18 диаметром 55 мм, имеющими 14 зубьев. Испытания проводились при подаче на зуб $s_z = 0,15$ мм, скоростях резания $v = 35; 50$



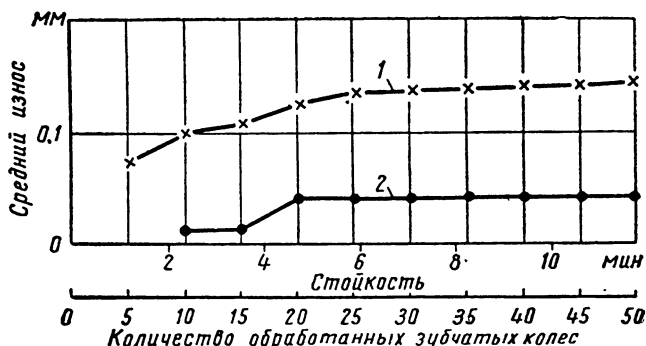
Фиг. 27. График износа зубьев фрез. Фреза из стали Р18 диаметром 55 мм, $z = 14$, $h_{пр} = 2,7$ мм. Режим обработки: $v = 35$ м/мин, $s_{мин} = 424$ мм/мин, $s_z = 0,15$ мм/зуб. Обработывалось зубчатое колесо из стали 40Х, $m = 3$, $z = 45$:
 а — наибольший износ зубьев фрез по задней поверхности при угле профиля. 1—20°; 2—45°; б — средний износ зубьев фрез по задней поверхности при угле профиля 1—20°; 2 — 45°.

и 70 м/мин при охлаждении сульфозфрезолом, подводимым со стороны передней и задней поверхностей. Через каждые 10 обработанных зубчатых колес зарисовывался и измерялся износ по задней поверхности всех зубьев фрезы. Характер износа фрез показан на фиг. 26.

Как видно из фигуры, наибольший износ происходит на задней поверхности по уголкам профиля. По остальной части профиля износ после начальной приработки за все время испытания почти не изменялся и к моменту прекращения испытаний был не более 0,05 мм.

Результаты испытания представлены на графиках (фиг. 27—30). На этих графиках на оси ординат отложен износ фрез по задней поверхности, а по оси абсцисс — количество обработанных зубчатых колес и соответствующее машинное время их обработки. Цифровые индексы на графиках показывают количество зубьев фрезы, которые имели износ, указанный на графиках.

На фиг. 27 приведены графики износа фрез из стали марки Р18. Испытываемая фреза имела боковые режущие кромки под углом 45° , а участки касательных к радиусной части основного рабочего профиля под углом 20° . На графиках проведены две линии:



Фиг. 28. График среднего износа зубьев фрезы. Фреза из стали Р9, диаметром 55 мм, $z = 14$, $h_{пр} = 2,2$ мм.

Режим обработки:

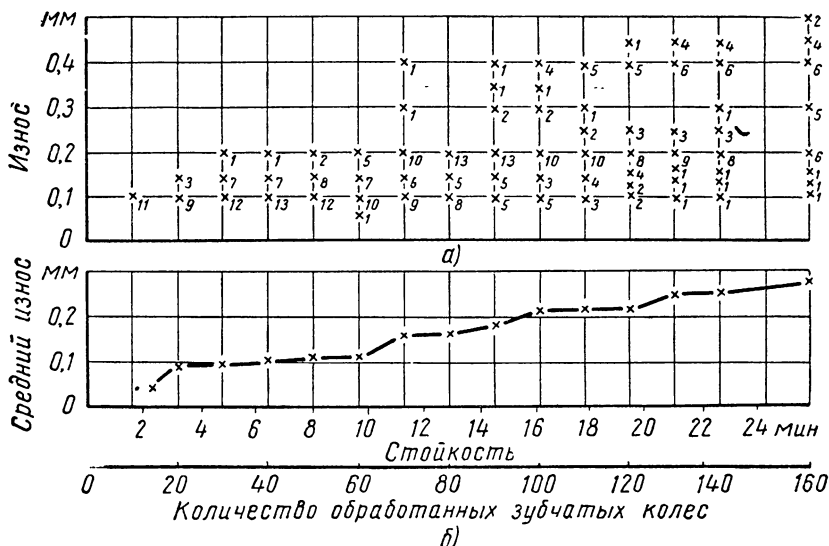
$v = 35$ м/мм, $s_{мин} = 424$ мм/мин, $s_z = 0,15$ мм/зуб. Обработывалось зубчатое колесо из стали 40Х, $m = 3$, $z = 45$ при угле профиля: 1 — 15° ; 2 — 45° .

верхняя показывает износ по уголку основного рабочего профиля, имевшего меньший задний угол $\alpha_1 = 4^\circ 5'$, а нижняя показывает износ по уголку выходных режущих кромок, имевших задний угол $\alpha_2 = 8^\circ 27'$. Фрезой было обработано 210 зубчатых колес, после чего наибольший износ ее зубьев (фиг. 27, а) по задним поверхностям уголков боковых режущих кромок соответствовал 0,4 мм, а по задним поверхностям внутренних уголков основного рабочего профиля был 0,45 мм. Средний износ зубьев фрезы (фиг. 27, б) после обработки 210 зубчатых колес составил соответственно 0,33 и 0,21 мм. Фреза работала спокойно. Стружка в процессе резания легко удалялась из канавок, заусенцы на торце не появлялись до конца опыта.

Результаты испытания фрезы из стали марки Р9 при тех же режимах резания приведены на фиг. 28. Фреза имела глубину профиля $h_{пр} = 2,2$ мм и угол участков касательных к радиусу 45° . После обработки 50 зубчатых колес фреза имела средний износ по задней поверхности внутренних уголков основного рабочего про-

филя 0,04 мм, а по задним поверхностям уголков боковых режущих кромок 0,14 мм.

Если профиль фрезы в предыдущем опыте (фиг. 27) имел угол касательных к радиусу участков рабочего профиля 20° и угол боковых режущих кромок 45° , то здесь эти углы как бы поменялись местами. Первый был 45° , а второй 15° ; соответственно этому изменялись значения задних углов и соответственно их значению изменялись величины износа режущих кромок.



Фиг. 29. График износа фрезы. Фреза из стали Р9 диаметром 55 мм, $z = 14$, $h_{пр} = 2,2$ мм. Режим обработки:

$v = 50$ м/мин $s_z = 0,15$ мм/зуб, $s_{мич} = 600$ мм/мин. Обработывалось зубчатое колесо из стали 40Х, $m = 3$, $z = 45$; а — износ всех зубьев фрезы при угле профиля 45° ; б — средний износ зубьев при угле профиля 45° .

При одинаковых углах направления режущих кромок износ режущих кромок по задней поверхности в обоих опытах примерно одинаков.

На фиг. 29 показаны графики износа фрезы из стали марки Р9. Было обработано 160 зубчатых колес. При этом средний износ по задней поверхности (фиг. 29, б) на углах внутренних режущих кромок, направленных под углом 45° , составил 0,28 мм.

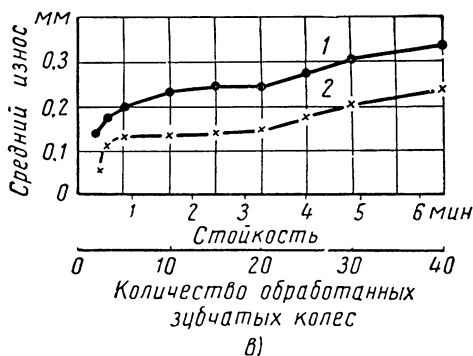
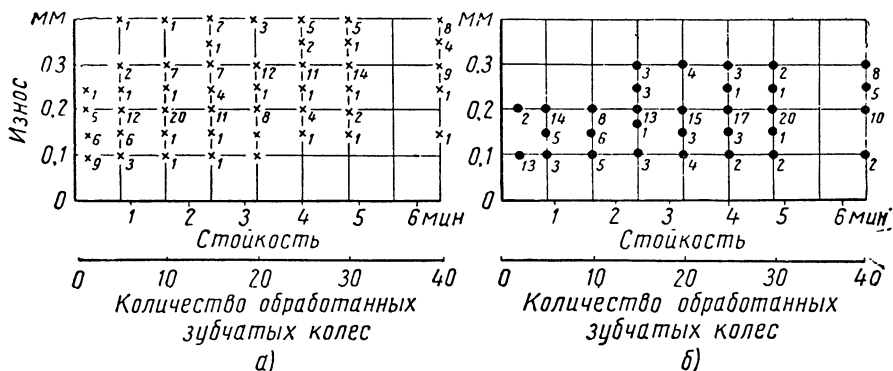
На фиг. 29, а показан износ всех зубьев фрезы. Из графика видно, что после обработки 160 зубчатых колес, наибольшая величина износа на отдельных зубьях достигла 0,4—0,5 мм.

На графиках, изображенных на фиг. 30, приведены результаты стойкостных испытаний фрезы из стали марки Р9. Фрезой обработано 40 зубчатых колес, средний износ зубьев фрезы достиг 0,24—0,32 мм.

Проведенные контрольные опыты показывают высокую стойкость нового инструмента, которая превышает стойкость пальцевого инструмента не менее чем в 10 раз.

За все время испытаний не было случаев поломок инструмента.

Стружка в процессе резания легко удалялась из канавок, несмотря на то, что угол канавок был только 18° . Удалению стружки весьма способствует заточка поверхностей канавки со стороны спинки зуба.



Фиг. 30. Графики износа зубьев фрезы. Фреза из стали Р9 диаметром 55 мм, $z = 14$, $h_{пр} = 2,2$ мм. Режим обработки: $v = 70$ м/мин, $s_{мин} = 600$ мм/мин, $s_z = 0,11$ мм/зуб. Обработывалось зубчатое колесо из стали 40Х, $m = 3$, $z = 45$. а — износ всех зубьев фрезы при угле профиля 15° ; б — износ всех зубьев фрезы при угле профиля 45° ; в — средний износ зубьев фрезы при угле профиля 1 — 15° ; 2 — 45° .

Дополнительная проверка, проведенная при обработке зубчатого колеса $m = 5/3$, 75, $z = 46$ из стали 18ХГТ, также подтвердила сказанное выше.

Исходя из изложенного и были приняты в дальнейшем подачи при врезании: основная подача $s_{звр.} = 0,15 \div 0,20$ мм/зуб и подача при зачистке в конце врезания $s_{зз} = 0,04 \div 0,05$ мм/зуб.

Зачистка осуществляется на глубине 0,2—0,3 мм.

При применении новых фрез резко сокращается стоимость инструмента, приходящаяся на одну обрабатываемую заготовку как

Угол β_1 определяется по формуле

$$\beta_1 = \gamma - \alpha.$$

где

$$\sin \alpha = \frac{c - M_x}{r_\sigma} = \frac{(h_c + h') - M_x}{r_\sigma}.$$

При $M_x = h' + h''$ выражение примет вид

$$\sin \alpha = \frac{h_c + h' - h' - h''}{r_\sigma} = \frac{h_c - h''}{r_\sigma};$$

$$\sin \gamma = \frac{c}{r_\sigma} = \frac{h_c + h'}{r_\sigma},$$

где h'' — высота ножки профиля зуба зубчатого колеса в мм;

h' — высота головки профиля зуба зубчатого колеса в мм;

r_σ — радиус вдоль высоты зуба в мм.

Из треугольника ABV и AEO

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{\Delta_1 \operatorname{tg} \gamma}{r_\sigma - \Delta_1},$$

где

$$\Delta_1 = r_{np} - 0,5 \sqrt{4r_{np}^2 - s_e^2} \text{ мм};$$

$$s_e = D_e \left(\frac{S}{d_\partial} + \operatorname{inv} \alpha_{o_s} - \operatorname{inv} \alpha_{xe} \right) \text{ мм};$$

$$\cos \alpha_{xe} = \frac{d_\partial}{D_e} \cos \alpha_{o_s},$$

где r_{np} — радиус рабочего профиля инструмента в мм;

s_e — толщина зуба по окружности выступов зубьев зубчатого колеса в мм;

D_e — диаметр окружности выступов зубчатого колеса в мм;

d_∂ — диаметр делительной окружности зубчатого колеса в мм;

S — толщина зуба по делительной окружности зубчатого колеса в мм;

α_{o_s} — угол зацепления основной рейки в торцовом сечении.

Все остальные обозначения видны из схемы на фиг. 31, а.

Если производится закругление зубчатых колес с зубьями нормальной высоты, т. е. 2,25 m , то угол поворота β для всех модулей будет примерно одинаковым. Нами были проведены расчеты углов $\beta_1 + \beta_2$ для модулей 1,5; 3; 5 мм и получены следующие результаты:

m в мм	1,5	3	5
$\beta_1 + \beta_2$	30°14'	30°7'	30°29'

Запасной угол перебега инструмента β_3 был принят в пределах 3—6°. При приведенных данных угол β не более 36°. Во всех остальных случаях угол β будет иметь меньшее значение. Например,

для зубчатых колес двойного модуля этот угол уменьшается до 22—25°.

Обработка вдоль высоты зуба является процессом фрезерования тела вращения. При выборе величины допустимой окружной подачи на зуб при обработке по этому методу следует учитывать два основных фактора, а именно: величину микронеровностей обработанной поверхности изделия и толщину среза, снимаемого зубом фрезы.

Эти факторы изменяются, например, в зависимости от диаметра инструмента, окружной подачи на зуб, радиуса закругления вдоль высоты зуба.

Высота неровностей (фиг. 31, б) образующихся при перемещении центра фрезы из точки O_1' в точку O_2 вокруг центра закругления O_0 может быть подсчитана по формуле

$$H = A \cos \frac{\beta_x}{2} - \sqrt{r_{\phi}^2 - A^2 \sin^2 \frac{\beta_x}{2}} - r_{\phi} \text{ мм,}$$

где A — расстояние между центрами инструмента и обрабатываемого изделия в мм;

β_x — угол поворота изделия за время поворота инструмента на угол $\frac{360^\circ}{z}$;

r_{ϕ} — внутренний радиус рабочего профиля фрезы в мм.

$$\beta_x = \frac{2\pi n_{\text{заг}}}{n_{\text{инстр}} z} \text{ рад,}$$

здесь $n_{\text{заг}}$ — число оборотов изделия в мин;

$n_{\text{инстр}}$ — число оборотов инструмента в мин;

z — число зубьев фрезы;

2π — величина угла в радианах, который опишет точка за один оборот изделия.

В нашем случае мы можем выразить значение угла β через окружную подачу на зуб s_{z_0} и радиус вдоль высоты зуба: $\beta_x =$

$$= \frac{s_{z_0}}{r_{\phi}} \text{ рад или } \frac{\beta_x}{2} = \frac{s_{z_0}}{2r_{\phi}} \text{ рад.}$$

В градусах β_x выразится как

$$\beta_x = \frac{180 \cdot s_{z_0}}{\pi \cdot r_{\phi}} = \frac{s_{z_0}}{0,01745r_{\phi}},$$

или

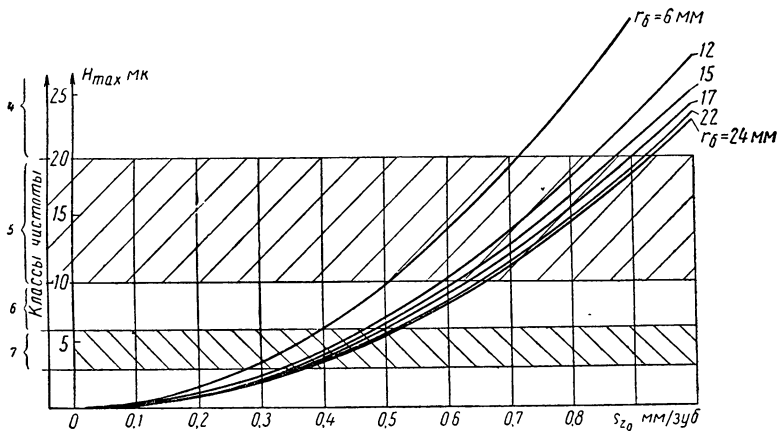
$$\frac{\beta_x}{2} = \frac{s_z}{0,03490r_{\phi}}.$$

Результаты расчетов по указанным выше формулам представлены на графиках (фиг. 32—36). На графике (фиг. 32) показано изменение расчетной высоты неровностей на поверхности закругления вдоль высоты зуба при обработке фрезой с внутренним

диаметром $d_{\phi} = 14$ мм в зависимости от окружной подачи на зуб s_{z_0} в пределах до 1,0 мм и радиусе закругления вдоль высоты зуба r_{δ} в пределах до 24 мм.

Слева по оси ординат отложены расчетные высоты неровностей, совмещенные со средней высотой неровностей R_z по ГОСТ 2789-59. Там уже указаны классы чистоты поверхности. Мы не будем учитывать радиус закругления $r_{\delta} = 6$ мм, поскольку такой малый радиус при закруглении рассматриваемой группы зубчатых колес не применяется.

Как видно из графика, при работе фрезой этого диаметра высота микронеровностей, соответствующая 7-му классу чистоты поверхности, для поверхностей, имеющих все остальные радиусы

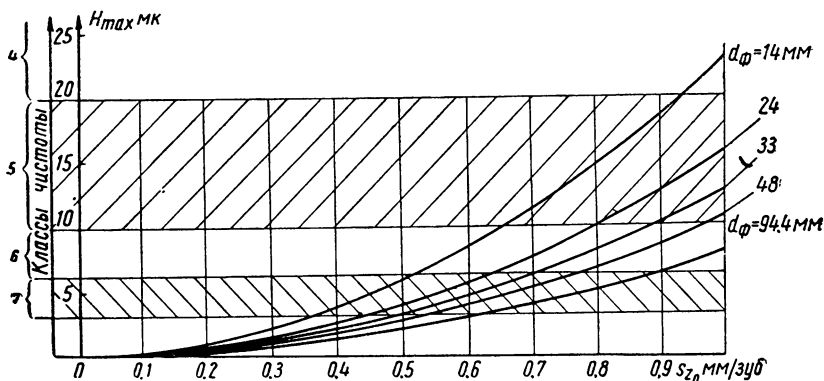


Фиг. 32. Зависимость наибольшей высоты микронеровностей от окружной подачи на зуб при обработке фрезой с диаметром внутреннего рабочего профиля $d_{\phi} = 14$ мм закруглений различного радиуса вдоль высоты зуба.

закругления, получается при работе с окружными подачами до 0,47—0,52 мм/зуб. Микронеровности, соответствующие 6-му классу чистоты поверхности, получаются при работе с окружными подачами до 0,6—0,68 мм/зуб, а микронеровности, соответствующие 5-му классу чистоты поверхности, получаются при работе с окружной подачей до 0,83—0,93 мм/зуб. Поскольку кривые для различных радиусов закругления с увеличением подачи расходятся незначительно, то и разница в значениях окружных подач для различных радиусов с увеличением подачи увеличивается также незначительно, доходя к концу 5-го класса чистоты поверхности примерно до 0,1 мм/зуб. Таким образом, из рассмотрения этого графика можно сделать еще одно заключение о том, что изменение радиуса закругления вдоль высоты зуба в 2 раза (от 12 до 24 мм) незначительно влияет на величину окружной подачи при одинаковой наибольшей высоте микронеровностей обработанной поверхности.

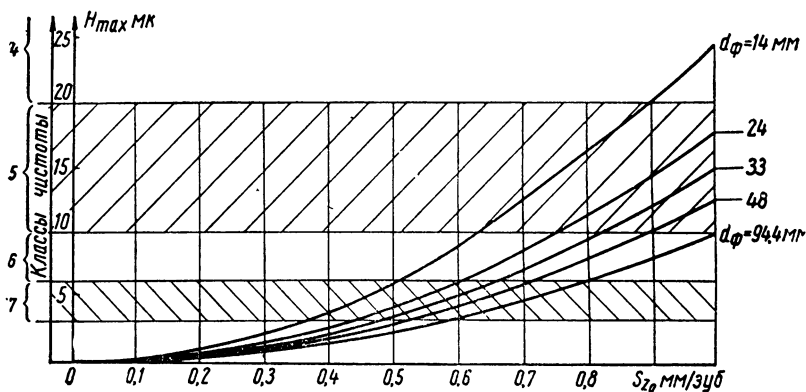
При окружной подаче на зуб 0,6 мм наибольшая высота микронеровностей для различных радиусов закругления будет:

r_{σ} в мм	24	22	17	12
H_{max} в мк	8,2	8,4	9,5	10,2



Фиг. 33. Зависимость наибольшей высоты микронеровностей от окружной подачи на зуб при обработке закругления по радиусу $r_{\sigma} = 24$ мм вдоль высоты зуба фрезами разных диаметров.

Из приведенных значений микронеровностей также видно, что с увеличением радиуса закругления вдоль высоты зуба, наибольшая высота микронеровностей уменьшается.

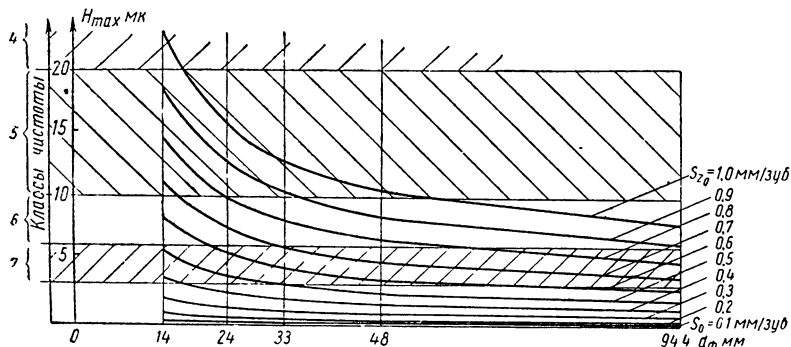


Фиг. 34. Зависимость наибольшей высоты микронеровностей от окружной подачи на зуб при обработке закругления по радиусу $r_{\sigma} = 17$ мм вдоль высоты зуба фрезами разных диаметров.

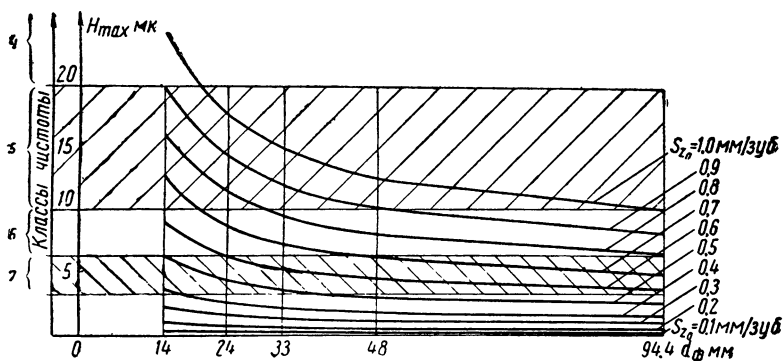
На графиках фиг. 33—36 приведено изменение наибольшей высоты микронеровностей на поверхности закругления вдоль высоты зуба по радиусу $r_{\sigma} = 24$ мм (фиг. 33 и 35) и $r_{\sigma} = 17$ мм (фиг. 34 и 36) при обработке фрезами с внутренними диаметрами 14; 24;

33; 48 и 94,4 мм, в зависимости от окружной подачи на зуб в пределах до 1,0 мм. Графики построены аналогично ранее описанному.

Как видно из графиков, с увеличением диаметра фрез высота микронеровностей уменьшается. Например, по графику на фиг. 33 на поверхности закругления с радиусом $r_{\sigma} = 24$ мм после обработ-



Фиг. 35. Зависимость наибольшей высоты микронеровностей от диаметра внутреннего рабочего профиля фрез при обработке закругления по радиусу $r_{\sigma} = 24$ мм вдоль высоты зуба с различными окружными подачами.



Фиг. 36. Зависимость наибольшей высоты микронеровностей от диаметра внутреннего рабочего профиля фрез при обработке закругления по радиусу $r_{\sigma} = 17$ мм вдоль высоты зуба с различными окружными подачами.

ки с окружной подачей $s_{z_0} = 0,6$ мм/зуб наибольшая высота микронеровностей для различных радиусов фрез будет следующей:

r_{σ} в мм	7	12	16,5	24	47,2
H_{max} в мк	8,2	5,7	4,5	3,7	2,9

Как видно из того же графика, при обработке поверхности, закругленной радиусом $r_{\sigma} = 24$ мм, фрезами различных диаметров наибольшая высота микронеровностей, соответствующая 7-му клас-

су чистоты поверхности, получается при обработке с окружными подачами от 0,52 мм/зуб для фрезы диаметром $d_{\phi} = 14$ мм до 0,9 мм/зуб для фрезы диаметром $d_{\phi} = 94,4$ мм.

Наибольшая высота микронеровностей, соответствующих 6-му классу чистоты поверхности, получается при окружной подаче от 0,78 мм/зуб и выше для фрезы диаметром $d_{\phi} = 48$ мм. Радиус закругления вдоль высоты зуба является величиной, заданной чертежом, поэтому его изменение с целью улучшения качества поверхности имеет весьма большие ограничения. Отсюда можно сделать вывод, что для получения лучшего качества поверхности всегда желательно работать фрезой большого диаметра. Что же дает большее изменение чистоты поверхности — изменение радиуса фрезы или изменение радиуса закругления вдоль высоты зуба? Определим для примера высоты микронеровностей для радиуса закругления вдоль высоты зуба $r_{\sigma} = 24$ мм и $d_{\phi} = 33$ мм ($r_{\phi} = 16,5$ мм $\approx \approx 17$ мм, см. фиг. 33 и 35) и для $r_{\sigma} = 17$ мм и $d_{\phi} = 48$ мм (фиг. 34 и 36).

По графикам высота микронеровностей для обоих случаев примерно одинакова и равна 4,5 мк. Более точное аналитическое определение высоты микронеровностей для указанных выше случаев показало, что они отличаются незначительно. В первом случае высота микронеровностей $H_{\max} = 4,65$ мк, а во втором $H_{\max} = 4,53$ мк. Из рассмотренного примера можно заключить что изменение радиуса закругления вдоль высоты зуба примерно в такой же степени влияет на высоту микронеровностей, как и изменение радиуса внутренней части профиля фрезы. Проведенное ознакомление с требованиями к качеству поверхности закругленных зубьев переключаемых зубчатых колес показывает, что у различных заводов оно разное и колеблется от 3-го до 5-го класса чистоты. Фактически это качество закругленной торцевой поверхности зуба нигде не проверяется. Процесс закругления с помощью пальцевой фрезы часто сопровождается вибрациями, особенно при работе даже незначительно затупленным инструментом, что резко ухудшает чистоту обработанной поверхности. По руководящим материалам ЭНИМСа закругленная торцевая поверхность зуба переключаемых зубчатых колес должна иметь чистоту поверхности, соответствующую 5-му классу ($\nabla 5$). Это соответствует средней наибольшей высоте неровностей R_z в 10—20 мк по ГОСТ 2789-59.

При установлении величины рекомендуемых окружных подач на зуб фрезы при обработке вдоль высоты зуба, исходя из условия надежного получения требуемого качества поверхности, был принят известный запас на возможное ухудшение чистоты обработанной поверхности в процессе обработки в зависимости от различных факторов.

Для этого подачи устанавливались по приведенным выше графикам из условия получения на обработанной поверхности 6-го класса чистоты поверхности.

В табл. 6 приведены рекомендуемые подачи, обеспечивающие получение требуемого качества поверхности.

Таблица 6

Рекомендуемые окружные подачи в мм/зуб

r_b в мм	d_{ϕ} в мм					
	14	24	33	48	50	94,4
7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7
9	0,5	0,5—0,6	0,6—0,7	0,7	0,7	0,8
11	0,5	0,5—0,6	0,7	0,7—0,8	0,7—0,8	0,8
14	0,5	0,6	0,7	0,7—0,8	0,7—0,8	0,8
17	0,5—0,6	0,6—0,7	0,7—0,8	0,8	0,8	0,8—0,9
18	0,6	0,6—0,7	0,7—0,8	0,8	0,8	0,8—0,9
23	0,6	0,7	0,8	0,8—0,9	0,8—0,9	0,9—1
27	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9—1
36	0,6—0,7	0,7	0,8—0,9	0,9—1	1	1

Проведенные эксперименты при обработке зубчатых колес $m = 5/3,75$ и $z = 46$ из стали 18ХГТ со скоростью резания 50 м/мин и окружной подачей до 0,7 мм/зуб показали, что чистота обработанной поверхности соответствовала 5—6-му классу.

Вторым основным фактором, влияющим на выбор величины окружной подачи на зуб при обработке радиусной поверхности вдоль высоты зуба, является толщина среза (a_{\max} и a_{cp}).

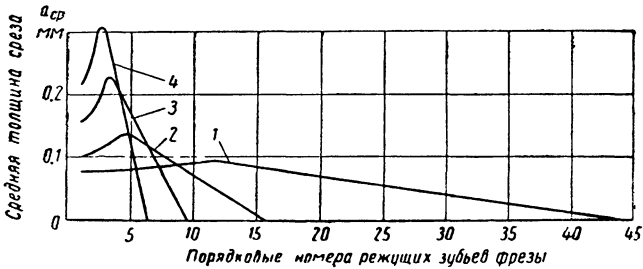
Толщина среза зависит:

- 1) от окружной подачи на зуб s_{z_0} в мм;
- 2) от диаметра внутренней части рабочего профиля фрезы d_{ϕ} в мм;
- 3) от радиуса закругления торца зуба зубчатого колеса вдоль его высоты r_b в мм;
- 4) от угла и длины фаски, выполненной на торце зуба перед зубозакруглением (τ и L_{ϕ});
- 5) от дополнительного припуска, определяемого точностью выполнения высоты венца зубчатого колеса;
- 6) от угла α между прямой, параллельной оси зубчатого колеса, проведенной через центр закругления, и линией, соединяющей центр закругления и центр фрезы в конце ее врезания в торец зуба зубчатого колеса.

Исследование указанных факторов было проведено на зубчатом колесе $m = 5/3,75$. Толщины среза определялись графически и затем составлялись таблицы и строились графики, в которых по оси абсцисс указывались порядковые номера зубьев, производящих обработку, а по оси ординат средние толщины среза в миллиметрах. Графически определялись наибольшие толщины среза a_{\max} , а средние толщины среза принимались равными половине наибольших толщин среза. При этом делалось некоторое допущение — весьма

небольшое и практически не имеющее существенного значения, поскольку сечение, срезаемое каждым зубом, весьма близко к треугольной форме. Если для треугольной формы сечения a_{\max} принять за высоту треугольника, то $a_{cp} = \frac{a_{\max}}{2}$.

Рассмотрим влияние окружной подачи на зуб на среднюю толщину среза (фиг. 37, табл. 7). На графике представлены четыре



Фиг. 37. Влияние окружной подачи на зуб при обработке закругления по радиусу $r_б = 24$ мм вдоль высоты зуба на толщину среза.

Условия обработки: зубчатое колесо $m = 5/3,75$ мм, $z = 46$; фреза $d_{ф} = 50$ мм; фаска — $\tau = 10^\circ$; $L_{ф} = 5$ мм; Окружные подачи на зуб: 1 — $s_{z_0} = 0,2$ мм, 2 — $s_{z_0} = 0,6$ мм; 3 — $s_{z_0} = 1,0$ мм; 4 — $s_{z_0} = 1,5$ мм.

кривые, соответствующие окружным подачам на зуб $s_{z_0} = 0,2; 0,6; 1,0$ и $1,5$ мм. В данном случае угол фаски был 10° , а длина фаски 5 мм. Как видно из графика и таблицы, средняя толщина среза

Таблица 7

Влияние окружной подачи на зуб на среднюю толщину среза в мм ($d_{ф} = 50$ мм; $r_б = 24$ мм; $m = 5/3,75$ мм; угол фаски $\tau = 10^\circ$, длина фаски $L_{ф} = 5$ мм)

№ зуба	Окружная подача s_{z_0} в мм/зуб			№ зуба	Окружная подача s_{z_0} в мм/зуб			№ зуба	Окружная подача s_{z_0} в мм/зуб		
	0,6	1	1,5		0,6	1	1,5		0,6	1	1,5
1	0,1	0,155	0,215	7	0,1125	0,0975	—	13	0,0375	—	—
2	0,1075	0,175	0,275	8	0,1025	0,0625	—	14	0,0225	—	—
3	0,12	0,225	0,3	9	0,09	0,0225	—	15	0,0075	—	—
4	0,1325	0,2125	0,205	10	0,075	—	—	16	—	—	—
5	0,1325	0,1725	0,125	11	0,0625	—	—	17	—	—	—
6	0,1225	0,13	0,045	12	0,05	—	—				

для каждого работающего зуба имеет разное значение. В начале обработки средняя толщина среза увеличивается по кривой до определенной наибольшей величины — наибольшей средней толщи-

ны среза, а затем уменьшается по закону прямой линии. Такой же характер имеют кривые на всех графиках, показывающих влияние различных факторов на толщину среза. Как видно из графика фиг. 37 и табл. 7, подача значительно влияет на толщину среза. Помимо представления о степени влияния, которое можно получить из рассмотрения указанной фигуры и табл. 7, в табл. 8 приведены дополнительные наибольшие средние толщины среза и среднеарифметические толщины среза.

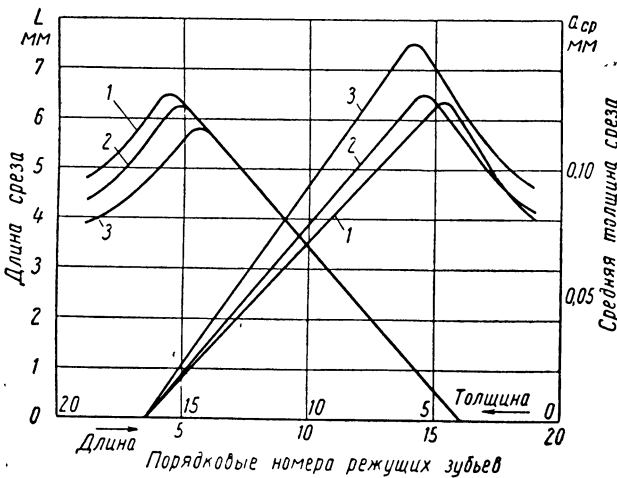
Таблица 8

Влияние окружной подачи на зуб на наибольшую и среднеарифметическую среднюю толщину среза

Окружная подача на зуб в мм	Наибольшая средняя толщина среза в мм	Среднеарифметическое средних толщин среза в мм
0,2	0,1	—
0,6	0,1325	0,085
1,0	0,225	0,139
1,5	0,3	0,194

Среднеарифметическая средняя толщина среза по зубьям, участвующим в образовании одного закругления, весьма отличается от наибольшей средней толщины среза.

При окружной подаче на зуб 0,6 мм, несмотря на уменьшенную фаску и угол $\tau = 10^\circ$, толщина среза составляет вполне допу-



Фиг. 38. Влияние внутреннего диаметра рабочего профиля фрезы на среднюю толщину и длину среза. Условия обработки:

зубчатое колесо $m = 5/3,75$ мм, $z = 46$; радиус вдоль высоты зуба $r_\sigma = 24$ мм; окружная подача на зуб $s_{z\phi} = 0,582$ мм; фаска $\tau = 10^\circ$, $L_\phi = 5$ мм; фреза: 1 — $d_\phi = 59,6$ мм; 2 — $d_\phi = 50$ мм; 3 — $d_\phi = 35$ мм.

стимулирующую величину. Отсюда можно сделать вывод, что при этом методе обработки можно, с точки зрения нагрузки на зуб инстру-

мента, допускать довольно большие окружные подачи при обработке вдоль высоты зуба.

На фиг. 38 и в табл. 9 показано влияние внутреннего диаметра рабочего профиля фрезы на толщину и длину среза.

Как видно из графика и таблицы, с увеличением диаметра фрезы наибольшая средняя толщина среза уменьшается, а наибольшая длина среза увеличивается. Так, при изменении диаметра внутренней части рабочего профиля фрезы от 35 до 59,6 мм наибольшая средняя толщина среза уменьшается с 0,15 до 0,125 мм, а среднеарифметическое значение (по табл. 9) средних толщин среза по зубьям, участвующим в образовании одного закругления, также уменьшается от 0,089 до 0,074 мм.

На фиг. 39 приведена кривая, характеризующая изменение наибольшей средней толщины среза в зависимости от внутреннего диаметра рабочего профиля фрезы.

Таблица 9

Влияние диаметра внутреннего рабочего профиля фрезы на толщину и длину среза ($m = 5/3,75$ мм; $s_{z_0} = 0,582$ мм/зуб; $r_0 = 24$ мм; угол фаски $\tau = 10^\circ$; $L_\phi = 5$ мм)

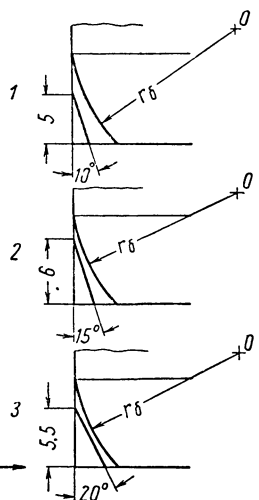
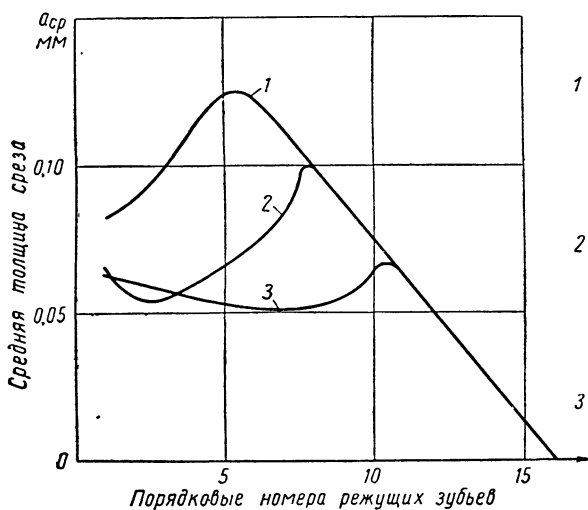
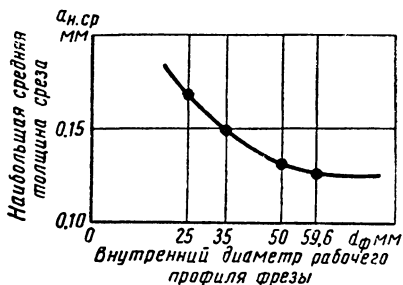
Размеры в мм

№ зубьев	$d_\phi = 35$			$d_\phi = 50$			$d_\phi = 59,6$		
	a_{\max}	a_{cp}	L_{cp}	a_{\max}	a_{cp}	L_{cp}	a_{\max}	a_{cp}	L_{cp}
1	0,195	0,0925	3,85	0,165	0,0825	4,3	0,16	0,08	4,75
2	0,2	0,1	4,1	0,18	0,09	4,5	0,18	0,09	5,1
3	0,22	0,11	4,5	0,2	0,1	5,1	0,21	0,105	5,55
4	0,25	0,125	5	0,23	0,115	5,85	0,24	0,12	6,4
5	0,28	0,14	5,6	0,255	0,1275	6,2	0,25	0,125	6,2
6	0,3	0,15	5,7	0,255	0,1275	5,7	0,25	0,115	5,7
7	0,275	0,1375	5,15	0,21	0,115	5,15	0,21	0,105	5,15
8	0,245	0,1225	4,6	0,205	0,1025	4,55	0,19	0,095	4,55
9	0,215	0,1075	4,1	0,18	0,09	4,0	0,165	0,0825	4,0
10	0,19	0,085	3,55	0,155	0,0775	3,5	0,14	0,07	3,5
11	0,16	0,08	3,0	0,13	0,065	2,9	0,12	0,06	2,9
12	0,13	0,065	2,45	0,11	0,055	2,4	0,1	0,05	2,4
13	0,1	0,05	1,9	0,08	0,04	1,8	0,075	0,0375	1,8
14	0,07	0,035	1,25	0,06	0,03	1,2	0,055	0,0275	1,2
15	0,04	0,02	0,6	0,035	0,0175	0,6	0,035	0,0175	0,6
16	0,01	0,005	0,01	0,01	0,005	0,1	0,01	0,005	0,01

Из фиг. 40 и табл. 10 видно, как влияют на среднюю толщину среза угол и высота фаски, выполненная при токарной обработке заготовки зубчатого колеса. Справа на фиг. 40 показано положение фаски относительно центра закругления O и закругления вдоль высоты зуба по радиусу r_0 .

Фаски трех размеров снимались под углом 20° на длине 5,5 мм, под углом 15° на длине 6 мм и под углом 10° на длине 5 мм.

Фиг. 39. Влияние внутреннего диаметра рабочего профиля фрезы на наибольшую среднюю толщину среза. Условия обработки: зубчатое колесо $t = 5/3,75$ мм, $z = 46$, радиус вдоль высоты зуба $r_{\sigma} = 24$ мм, окружная подача на зуб $s_{z_0} = 0,582$ мм; фаска $\tau = 10^\circ$; $L_{\phi} = 5$ мм.



Фиг. 40. Влияние угла и высоты фаски, на среднюю толщину среза. Условия обработки:

зубчатое колесо $t = 5/3,75$ мм; $z = 46$; радиус вдоль высоты зуба $r_{\sigma} = 24$ мм; окружная подача на зуб $s_{z_0} = 0,582$ мм, фреза $d_{\phi} = 50$ мм; фаска
 1 - $\tau = 10^\circ$; $L_{\phi} = 5$ мм; 2 - $\tau = 15^\circ$; $L_{\phi} = 6$ мм; 3 - $\tau = 20^\circ$; $L_{\phi} = 5,5$ мм.

Влияние размеров фаски и дополнительного припуска на среднюю толщину среза в мм

 $(d_{\phi} = 50 \text{ мм}; r_{\sigma} = 24 \text{ мм}; t = 5/3,75 \text{ мм}; s_{z_0} = 0,582 \text{ мм/зуб})$

№ зубьев	Угол фаски			Дополнительный припуск 0,3 мм при угле фаски $\tau = 20^\circ$ и длине фаски $L_{\phi} = 5,5 \text{ мм}$
	10° на $L_{\phi} = 5 \text{ мм}$	15° на $L_{\phi} = 6 \text{ мм}$	20° на $L_{\phi} = 5,5 \text{ мм}$	
1	0,0825	0,065	0,0625	0,09
2	0,09	0,055	0,06	0,09
3	0,1	0,055	0,0575	0,0875
4	0,115	0,06	0,055	0,0875
5	0,1275	0,065	0,0525	0,0875
6	0,1275	0,0725	0,0525	0,09
7	0,115	0,085	0,05125	0,0925
8	0,105	0,105	0,05125	0,095
9	0,09	0,09	0,055	0,085
10	0,0775	0,0775	0,065	0,0725
11	0,065	0,065	0,065	0,065
12	0,050	0,050	0,050	0,050
13	0,0375	0,0375	0,0375	0,0375
14	0,025	0,025	0,025	0,025
15	0,014	0,014	0,014	0,014
16	0,001	0,001	0,001	0,001

Как видно из графика и таблицы, размеры фаски значительно влияют на среднюю толщину среза. Наибольшая средняя толщина среза уменьшается почти в 2 раза с увеличением угла фаски от 10° до 20° .

Для более полного представления о влиянии размеров фасок на среднюю толщину среза можно привести сопоставление среднеарифметических значений средних толщин среза. Если среднеарифметическое значение средней толщины среза для фаски под углом 10° составит 0,076 мм, то для фаски под углом 15° оно будет 0,058 мм, а для фаски под углом 20° оно будет 0,047 мм.

При фаске под углом 20° имеет место более равномерная нагрузка зубьев фрезы.

Наивыгоднейшим углом фаски τ будет такой угол (фиг. 41), при котором фаска $B'D'$ расположена по касательной к окружности радиуса r_{σ} таким образом, что отрезки BB' и DD' равны между собой. Прямоугольные треугольники OCB' , OEB' и OED' равны. Отрезок прямой $B'D'$ можно рассматривать как сторону многоугольника, в который вписана окружность радиуса r_{σ} .

Найдем $\angle \beta$ из $\triangle ONM$.

$$\sin \beta = \frac{NM}{OM} = \frac{h}{r_{\sigma}}.$$

Разность углов $\beta - \frac{3}{2}\tau$ является по сравнению с углом τ незначительной. Исходя из этого, приближенно можно определить

величину угла τ — центрального угла, соответствующего одной стороне многоугольника, по формуле

$$\tau \approx \frac{2}{3} \beta.$$

Частное от деления $\frac{360^\circ \cdot 3}{2\beta}$, округленное до целого в большую сторону, даст точное число сторон многоугольника n' . Теперь легко определить точное значение угла τ :

$$\tau = \frac{360^\circ}{n'}.$$

Угол τ является искомым углом, т. е. наивыгоднейшим углом фаски, так как $\angle COE = \tau$, а $\angle COE = \angle AB'D'$, как углы с перпендикулярными сторонами: $B'A \perp OC$, $B'D' \perp OE$. Наивыгоднейший угол фаски определялся при $\Delta_{\min} = 0$ мм. Δ_{\min} практически принимаем равным 0,2 мм. При этом наивыгоднейший угол фаски будет несколько отличаться от расчетного, но, так как эта разница незначительна, можно ею пренебречь.

Снимаемая с торца венца зубчатого колеса фаска характеризуется не только углом фаски, но и ее длиной. Определим длину фаски, приняв $\Delta_{\min} = 0,2$ мм.

Обозначив длину фаски L_{ϕ} можем написать, что

$$L_{\phi \text{ расч}} = AB'' = KE' + E'P = X_1 + X_2.$$

Рассмотрим прямоугольный $\triangle B''KE'$. Катет $B''K = OC - OF = r_{\phi} - (r_{\phi} + 0,2) \cos \tau$; катет $KE' = X_1 = KB'' \operatorname{tg}(90^\circ - \tau)$, так как $\angle AB''D'' = \angle COE'$ (как углы с перпендикулярными сторонами).

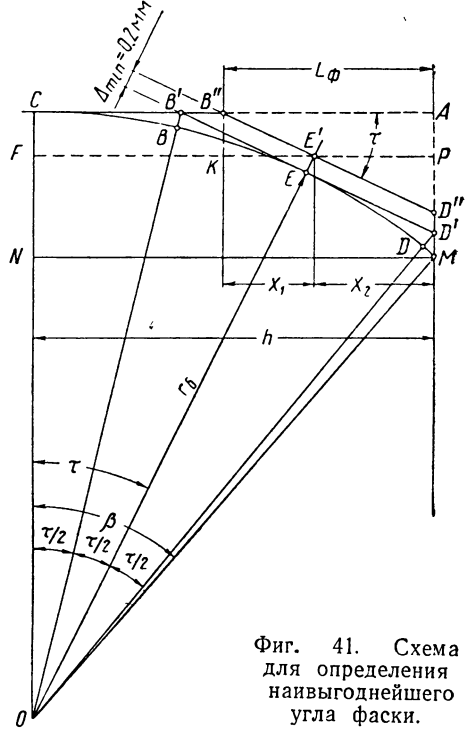
Из $\triangle OFE'$ найдем величину катета FE' .

$$FE' = OE' \sin \tau = (r_{\phi} + 0,2) \sin \tau,$$

тогда

$$X_2 = E'P = FP - FE' = h - (r_{\phi} + 0,2) \sin \tau,$$

$$L_{\phi \text{ расч}} = X_1 + X_2 = [r_{\phi} - (r_{\phi} + 0,2) \cdot \cos \tau] \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \tau) + h - (r_{\phi} + 0,2) \sin \tau.$$



Фиг. 41. Схема для определения наивыгоднейшего угла фаски.

Изложенные рассуждения касаются только случая, когда $\angle \alpha = 0^\circ$. В большинстве случаев центр закругления вдоль высоты зуба, как было указано выше, смещается примерно на 3° в сторону центра зубчатого колеса. Рассчитывая для этого случая угол и длину фаски по приведенной выше методике, мы допускаем ошибку, которая несколько уменьшает припуск на закругление. Например, при закруглении зубьев зубчатого колеса $m = 8$ мм припуск уменьшается на 0,05 мм, а при закруглении зубьев зубчатого колеса $m = 2$ мм припуск уменьшается на 0,01 мм. Величина этой ошибки подсчитывалась по формуле

$$\Delta_\alpha = (r_\phi - r_\phi \cdot \cos \alpha) \cdot \cos \tau,$$

где Δ_α — составляющая припуска, зависящая от угла α .

Эта составляющая при расчете минимального припуска на закругление вводится со знаком минус. Значительно больше влияет на величину припуска допуск на ширину венца зубчатого колеса. Так, при допуске $+0,3$ мм минимальный припуск увеличивается на величину $\delta'_\alpha = 0,3 \cos \tau$.

При $\tau_1 = 20^\circ$, $\delta'_\alpha = +0,28$ мм. Расчетный минимальный припуск значительно изменяет также и ширину фаски. Длину фаски можно примерно выразить через модуль колеса $L_\phi \approx 1,5 m$.

Принятая длина фаски несколько отличается от расчетной, поэтому изменится и наименьший припуск на обработку на величину

$$\Delta_l = \pm (L_{\phi \text{ расч}} \mp L_{\phi \text{ прин}}) \cdot \sin \tau,$$

где Δ_l — дополнительный припуск от разности расчетной и принятой длины фаски.

Если расчетная длина фаски больше принятой, то подсчет ведется по верхним знакам и при расчете наименьшего припуска вводится составляющая со знаком плюс, и наоборот.

Длина фаски задается с допуском 0,5 мм. Таким образом, припуск на обработку имеет допуск, зависящий от величин допусков на высоту венца колеса и на длину фаски $\delta_\phi = 0,5 \sin \tau$.

$$\delta = \delta'_\alpha + \delta_\phi = \delta_\alpha \cos \tau + 0,5 \sin \tau,$$

где δ_ϕ — допуск на припуск, зависящий от допуска на ширину фаски в мм;

δ'_α — допуск на припуск, зависящий от допуска на ширину венца в мм;

δ_α — допуск на ширину венца зубчатого колеса в мм;

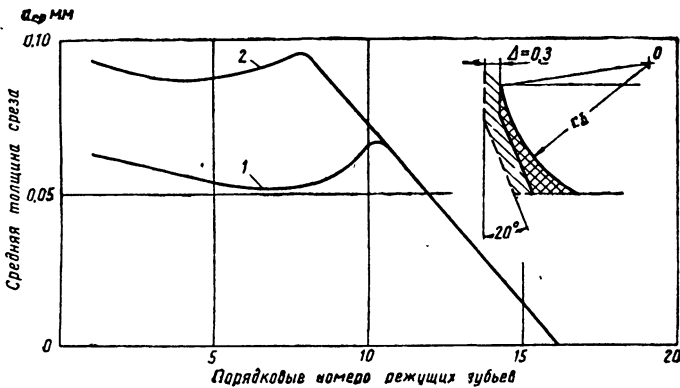
δ — суммарный допуск на припуск в мм.

При верхнем отклонении допуска на ширину венца зубчатого колеса $+0,3$ мм и нижнем отклонении длины фаски, верхнее отклонение припуска на закругление торца зуба при $\tau = 20^\circ$ составит

$$\delta = 0,3 \cos 20^\circ + 0,5 \sin 20^\circ = 0,28 + 0,17 = 0,45 \text{ мм.}$$

Расчетные и принятые размеры фасок и припуска на зубозакругления

Модуль m	Радиус вдоль высоты зуба r_b в мм	Расстояние от делительной окружности центра закругления r_c в мм	Угол фаски в град		Длина фаски в мм		Припуск на обработку в мм	
			расчетный $\tau_{расч}$	принятый $\tau_{прин}$	расчетная $L_{ф расч}$	принятая $L_{ф прин}$	номинальный Δ_{min}	верхнее отклонение δ
1	7	3,8	21,2	20	2	2,3	0,1	+0,45
2	9	5	22,5	20	2,82	3	0,12	+0,45
2,5	11	6,3	22,5	20	3,83	3,8	0,2	+0,45
3	14	7,5	21,2	20	4,45	4,5	0,2	+0,45
4	18	10	22,5	20	6,25	6,0	0,25	+0,45
5	23	12,5	21,2	20	7,85	7,5	0,3	+0,45
6	27	15	22,5	20	9,55	9	0,35	+0,45
8	36	20	22,5	20	13,1	12	0,35	+0,45



Фиг. 42. Влияние дополнительного припуска, определяемого точностью выполнения ширины венца зубчатого колеса. Условия обработки:

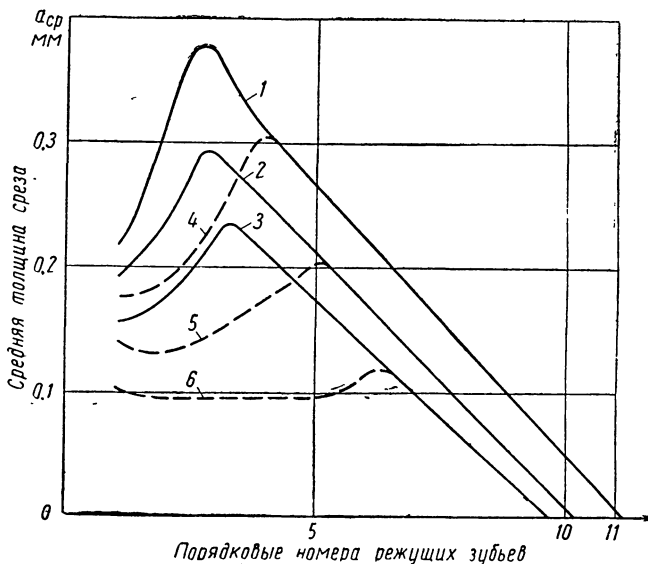
зубчатое колесо $m = 5/3,75$ мм; $z = 46$; радиус вдоль высоты зуба $r_b = 24$ мм; окружная подача на зуб $s_{z_0} = 0,582$ мм; фреза $d_{ф} = 50$ мм; фаска: $\tau = 20^\circ$; $L_{ф} = 5,5$ мм. Длина венца: 1 — номинальная при $\Delta_{min} = 0,2$ мм; 2 — увеличенная высота венца на 0,3 мм.

Таким образом, припуск на обработку можно выразить следующим образом:

$$\Delta = 0,2 - \Delta_{\alpha} + \Delta_r$$

Результаты расчетов по формулам угла и длины фаски и припуска на обработку торца зуба колеса при принятых значениях угла и длины фаски приведены в табл. 11.

Из фиг. 42 и табл. 10 видно, как влияет на толщину среза дополнительный припуск $\delta_s = 0,3$ мм, определяемый точностью выполнения ширины венца. Влияние дополнительного припуска приведено для фаски под углом 20° . Справа (фиг. 42) дана схема расположения дополнительного припуска относительно центра закругления O и радиуса закругления вдоль высоты зуба r_δ . Наибольшая средняя толщина среза в этом случае (табл. 12) увеличи-



Фиг. 43. Влияние радиуса вдоль высоты зуба на среднюю толщину среза. Условия обработки:

зубчатое колесо $m = 5/3,75$ мм, $z = 46$; окружная подача на зуб $s_{z_0} = 1$ мм; фреза $d_\phi = 50$ мм; радиусы вдоль высоты зуба $1 - r_\delta = 12$ мм; $2 - r_\delta = 17$ мм; $3 - r_\delta = 24$ мм; 4-5-6 — пунктирные линии, показывающие уменьшение толщины среза при фаске под углом $\tau = 20^\circ$ и $L_\phi = 5,5$ мм по сравнению с фаской под углом $\tau = 10^\circ$ и $L_\phi = 5$ мм (сплошные линии).

вается с $0,065$ до $0,095$ мм, т. е. на $0,03$ мм; следует отметить, что некоторые зубья снимают большую среднюю толщину среза на $0,04$ мм.

На фиг. 43 и в табл. 12 показано влияние радиуса закругления торца зуба зубчатого колеса вдоль его высоты на среднюю толщину среза для двух размеров фасок под углами 10 и 20° .

С уменьшением радиуса закругления средняя толщина среза увеличивается, а также несколько сокращается общее число зубьев фрезы, обрабатывающих закругление на одном зубе зубчатого колеса.

График (фиг. 43) построен для повышенной окружной подачи $s_{z_0} = 1$ мм. Из графика можно сделать вывод, что чем меньше ра-

Влияние радиуса вдоль высоты зуба при двух размерах фаски
на среднюю толщину среза

($D_0 = 50$ мм; $m = 5/3,75$ мм; $s_{z_0} = 1$ мм/зуб)

№ зуба	Угол фаски 10°, длина фаски 5 мм			Угол фаски 20°, длина фаски 5,5 мм		
	Радиус вдоль высоты зуба в мм					
	$r_{\phi} = 12$	$r_{\phi} = 17$	$r_{\phi} = 24$	$r_{\phi} = 12$	$r_{\phi} = 17$	$r_{\phi} = 24$
1	0,215	0,19	0,155	0,175	0,14	0,1
2	0,32	0,237	0,175	0,19	0,13	0,095
3	0,37	0,29	0,225	0,24	0,145	0,095
4	0,31	0,25	0,2125	0,305	0,175	0,095
5	0,27	0,205	0,1725	0,27	0,205	0,095
6	0,22	0,157	0,13	0,22	0,157	0,115
7	0,177	0,117	0,0975	0,177	0,117	0,0975
8	0,12	0,08	0,0625	0,12	0,08	0,0625
9	0,087	0,04	0,0225	0,087	0,04	0,0225
10	0,05			0,05		
11	0,01			0,01		

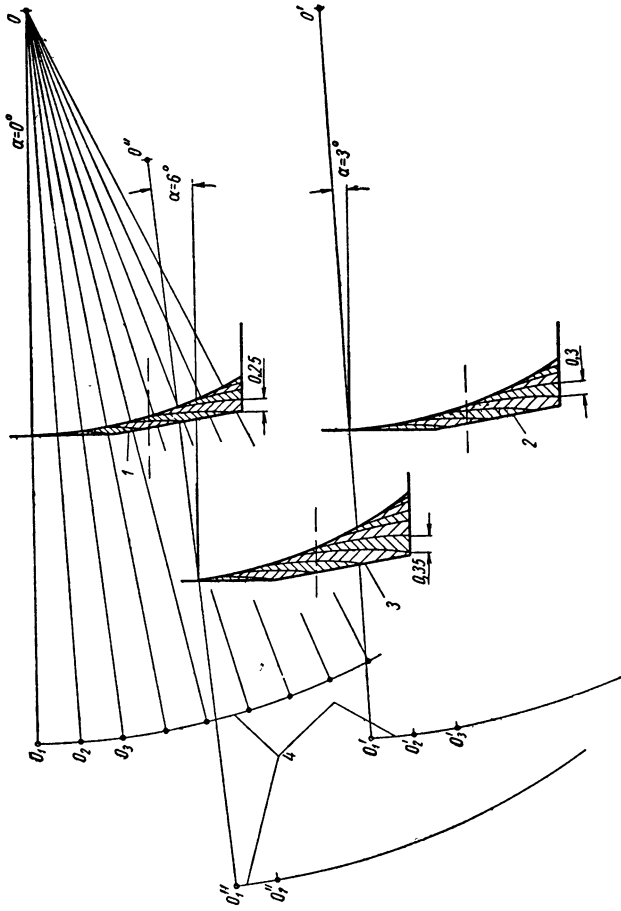
диус закругления вдоль высоты зуба, тем, при прочих равных условиях, должна быть меньше окружная подача на зуб для обеспечения одинаковой толщины среза. На этом графике также можно видеть значительное влияние на среднюю толщину среза размеров фаски.

Кроме указанных факторов, на толщину срезаемого одним зубом слоя металла оказывает влияние также положение центра закругления. Оно характеризуется величиной угла α , образованного линией, соединяющей центры закругления и фрезы в исходном положении и плоскостью, параллельной оси.

На фиг. 44 показано влияние угла α на среднюю толщину среза. Так как графически трудно сделать построение в соответствующем увеличении для фрезы большого диаметра, то оно было сделано для фрезы $d_{\phi} = 25$ мм.

Обработка вдоль высоты зуба при различных исходных положениях фрезы под углами $\alpha = 0$; 3 и 6° по радиусу вдоль высоты зуба производится соответственно вокруг центров O , O' и O'' . Этими же индексами обозначены перемещающиеся по траекториям 4 центры инструментов. Окружная подача на зуб $s_{z_0} = 1$ мм. Как видно из графика, с увеличением угла α от 0 до 6° толщина среза увеличивается.

В табл. 13 приведены наибольшие средние толщины среза для двух положений центра закругления $\alpha = 3^\circ$ (по нормали Н 22-1) и $\alpha = 6^\circ$ при работе с рекомендованными в табл. 6 окружными подачами на зуб при следующих условиях: фреза диаметром $d_{\phi} = 50$ мм, радиусы вдоль высоты зуба по нормали Н 22-1.



Фиг. 44. Влияние угла α на толщину среза. Условия обработки:
 зубчатое колесо $m = 5/3,75$ мм; $z = 46$; радиус вдоль высоты зуба $r_{\phi} = 17$ мм; окружная
 подача на зуб $s_z = 1$ мм, фаска $\tau = 10^\circ$, $L_{\phi} = 5$ мм; фреза $d_{\phi} = 25$ мм; угол α ;
 $1 - \alpha = 0$; $2 - \alpha = 3^\circ$; $3 - \alpha = 6^\circ$.

Влияние угла α на наибольшую среднюю толщину среза

t в мм	1,5	2,0	2,5	3	3,75	4	5	6	
r_6 в мм	7	9	11	14	17	18	23	27	
s_z в мм	0,6	0,6	0,7	0,75	0,8	0,8	0,85	0,9	
$\alpha = 6^\circ$	$a_{н.ср}$ в мм	0,1	0,12	0,15	0,16	0,18	0,18	0,2	0,25
$\alpha = 3^\circ$	$a_{н.ср}$ в мм	0,07	0,075	0,10	0,12	0,13	0,13	0,14	0,16

На фиг. 45 слева при увеличении в 4,2 раза приведено расчерчивание слоев, срезаемых каждым зубом фрезы при фасках под углами 10° , 20° и 20° при увеличенной на 0,3 мм ширине венца зубчатого колеса. Из фигуры видно, как уменьшается толщина среза с увеличением угла фаски. В правой части фигуры показаны сечения по делительной окружности $A-A$ и по вершине зуба $B-B$. Наибольшая толщина среза при обработке вдоль высоты зуба имеет место на вершине зуба. Толщина среза по делительной окружности во всех случаях меньше.

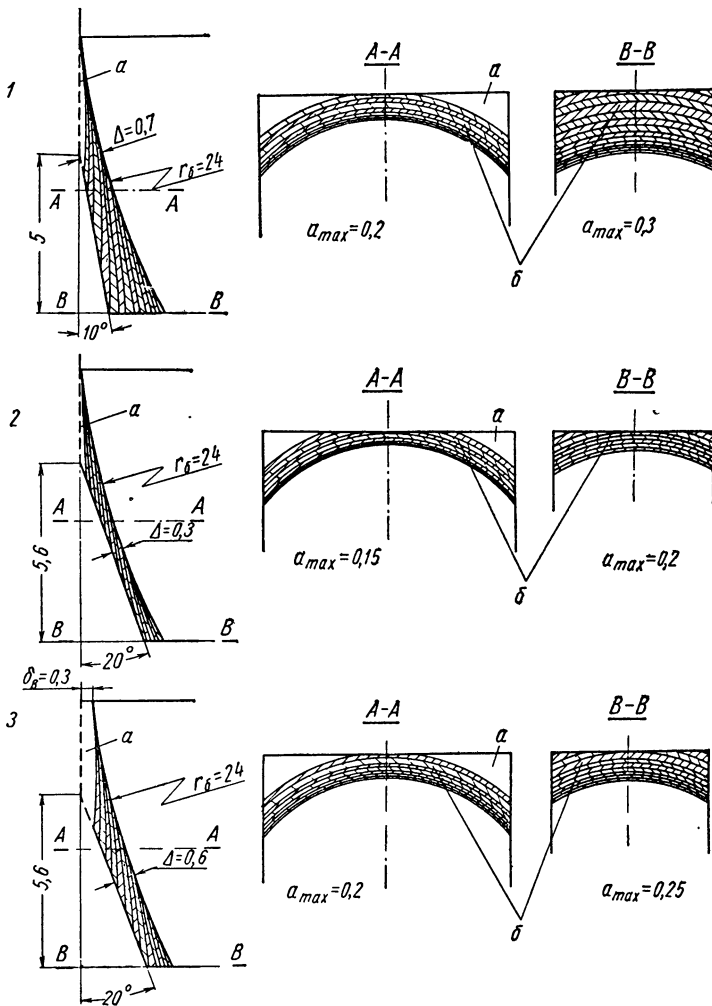
В результате проведенного анализа процесса закругления торцов зубчатого колеса $t = 5/3,75$ мм можно сделать выводы.

1. При рекомендованных в табл. 6 окружных подачах на зуб наибольшие средние толщины среза при обработке вдоль высоты зуба по радиусу $r_6 = 23$ мм будут следующие:

d_ϕ в мм	24	33	48	50	59,6
s_{z_0} в мм/зуб	0,7	0,8	0,85	0,85	0,85
$a_{н.ср}$ в мм	0,12	0,125	0,12	0,12	0,12

Допускаемая же наибольшая средняя толщина среза, найденная экспериментально, принята равной 0,15 мм. Таким образом, наибольшие средние толщины среза, срезаемые при подачах, рекомендуемых в табл. 6, не превышают допускаемой величины.

2. При закруглении зубьев зубчатых колес $t = 5/3,75$ мм по радиусу вдоль высоты зуба $r_6 = 24$ мм фрезами диаметром $d_\phi = 59,6; 50; 35$ мм окружные подачи на зуб, при которых (при фаске под углом 20° длиной 5,5 мм) наибольшая средняя толщина среза будет 0,15 мм, равны соответственно: $s_{z_0} = 1,38; 1,37; 1,32$ мм/зуб, а рекомендуемые подачи для получения обработанной поверхности 5—6-го класса чистоты соответственно равны 0,85; 0,85; 0,8 мм/зуб.



Фиг. 45. Срезаемые каждым зубом фрезы слои металла при фазах различных размеров:

1 — под углом $\tau = 10^\circ$; $L_{\phi} = 5$ мм и $\Delta = 0,7$ мм; 2 — под углом $\tau = 20^\circ$; $L_{\phi} = 5,6$ мм и $\Delta = 0,3$ мм; 3 — под углом $\tau = 20^\circ$; $L_{\phi} = 5,6$ мм и $\Delta = 0,6$ мм.

α — металл, срезаемый при врезании; β — металл, срезаемый при обработке вдоль высоты зуба.

Следовательно, в данном случае лимитирующим фактором является не толщина среза, приходящаяся на зуб фрезы, а качество обработанной поверхности.

3. Наибольшая средняя толщина среза с изменением размеров фаски при обработке вдоль высоты зуба по радиусу $r_{\phi} = 24$ мм с окружной подачей на зуб $s_{z_0} = 0,582$ мм/зуб фрезой $d_{\phi} = 50$ мм изменяется так, как показано в табл. 14.

Таблица 14

Влияние размеров фаски на наибольшую среднюю толщину среза в мм

Фаска		$a_{н. ср}$ в мм
Длиной в мм	под углом в град	
5	10	0,125
6	15	0,1
5,5	20	0,065

Влияние размеров фаски и радиуса вдоль высоты зуба на толщину среза

Толщина среза в мм	Фаска длиной $L_{\phi} = 5$ мм под углом 10° при r_{ϕ} в мм			Фаска длиной $L_{\phi} = 5,5$ мм под углом 20° при r_{ϕ} в мм		
	12	17	24	12	17	24
$a_{са. ср}$ средне- арифметиче- ская средняя	0,195	0,158	0,139	0,168	0,119	0,0863
$a_{н. ср}$ наибольшая средняя	0,37	0,29	0,225	0,305	0,205	0,115
$a_{н. ср}$	1,9	1,89	1,62	1,81	1,72	1,34
$a_{са. ср}$						

Для этого случая обработки наименьшая толщина среза получается при фаске длиной 5,5 мм, снятой под углом 20° к плоскости торца зубчатого колеса.

4. В процессе зубозакругления все зубья фрезы работают в различных условиях, так как переменными являются глубина и ширина резания, толщина и длина среза, а следовательно, и сечение среза. В связи с этим и нагрузки на различные зубья фрезы будут различны. Это наглядно показано на схеме (см. фиг. 45).

5. Сравним наибольшие средние толщины среза со среднеарифметической величиной среза (табл. 15).

Как видно из таблицы, наибольшая средняя толщина среза примерно в 2 раза больше среднеарифметической средней толщины среза, снимаемой зубьями фрезы при обработке одного зуба зубчатого колеса.

6. С точки зрения стойкости инструмента, желательно работать фрезой с наибольшим диаметром. Инструмент большого диаметра лучше охлаждается, чем инструмент малого диаметра, при этом на долю каждого зуба фрезы реже попадают толстые стружки и, наконец, каждый зуб фрезы меньше число раз участвует в обработке каждого зуба зубчатого колеса.

На основании результатов проведенного анализа приведены наибольшие средние толщины среза при закруглении вдоль высоты

зуба нормального ряда радиусов по нормали Н 22-1 при положении центра закругления, определяемого углом $\alpha \approx 3^\circ$, фрезой с внутренним диаметром рабочего профиля $d_\phi = 35$ мм.

t в мм	1,5	2,0	2,5	3,0	(3,75)	4	5	6
r_ϕ в мм	7	9	11	14	17	18	23	27
s_{z_0} в мм	0,6	0,6	0,65	0,7	0,75	0,75	0,8	0,8
$a_{н.ср}$ в мм	0,08	0,08	0,1	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15

Как видно $a_{н.ср}$ не более 0,15 мм.

С увеличением диаметра фрезы при прочих равных условиях наибольшие толщины среза несколько уменьшатся. Таким образом, можно рекомендовать обработку вдоль высоты зуба с окружными подачами на зуб, приведенными в табл. 16.

Таблица 16

Рекомендуемые окружные подачи на зуб при обработке вдоль высоты зуба в мм

r_ϕ	d_ϕ				r_ϕ	d_ϕ			
	24	33	50	95		24	33	50	95
7	0,5	0,6	0,6	0,7	17	0,6—0,7	0,7—0,8	0,8	0,8—0,9
9	0,5—0,6	0,6—0,7	0,7	0,8	18	0,6—0,7	0,7—0,8	0,8	0,8—0,9
11	0,5—0,6	0,7	0,7—0,8	0,8	23	0,7	0,8	0,8—0,9	0,9—1
14	0,6	0,7	0,7—0,8	0,8	27	0,7	0,8	0,9	0,9—1

Эксперименты показали, что процесс обработки вдоль высоты зуба с окружными подачами на зуб до 0,9 мм и скоростью резания до 50 м/мин протекает нормально, чистота обрабатываемой поверхности соответствует 5—6-му классу для фрезерованных поверхностей, стружка хорошо размещается и отводится из канавок фрез.

За все время испытаний не было ни одного случая поломки зубьев фрез.

Кроме рассмотренного выше графического определения толщин среза, далее приводится аналитический метод определения наибольших толщин среза.

При определении толщины среза графическим методом было установлено, что наибольшая толщина среза соответствует таким положениям центра фрезы, при которых одна из линий среза проходит через точку X или близко от нее (фиг. 46).

Точка O — центр закругления, A — радиус дуги — траектории движения центра фрезы в мм.

В $\triangle OXO_\phi$ известны стороны $OO_\phi = A$ и $O_\phi X = r_\phi$.

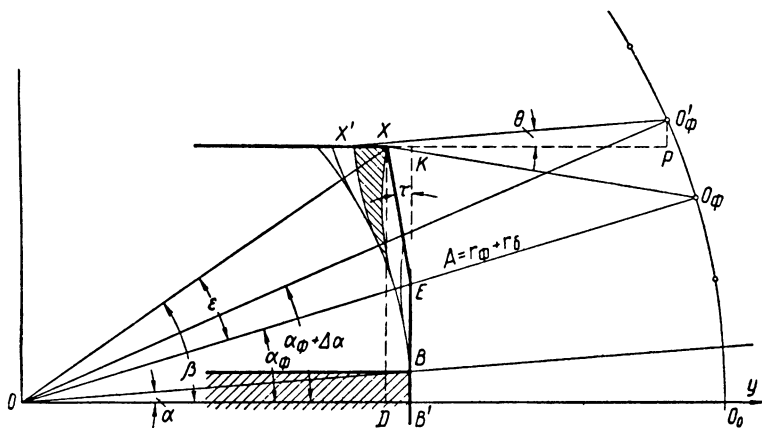
Определим длину третьей стороны. Из $\triangle XKE$

$$KX = KE \cdot \operatorname{tg} \tau,$$

где τ — известный угол фаски.

$$KE = L_{\phi}; \quad KX = L_{\phi} \operatorname{tg} \tau, \text{ но } KX = DB'.$$

$$\begin{aligned} \text{Из } \triangle OBB' \quad OB' &= OB \cdot \cos \alpha = r_{\sigma} \cdot \cos \alpha \text{ мм}; \quad OD = OB' - DB' = \\ &= r_{\sigma} \cos \alpha - L_{\phi} \operatorname{tg} \tau \text{ мм}; \end{aligned}$$



Фиг. 46. Схема аналитического расчета толщины среза.

тогда

$$OX = \sqrt{OD^2 + DX^2} \text{ мм},$$

где OD — координата центра закругления;

DX — постоянная величина, равная $h_c + h'$;

$$\sin \beta = \frac{XD}{OX}.$$

Из $\triangle OXO_{\phi}$

$$XO_{\phi}^2 = OO_{\phi}^2 + OX^2 - 2OX \cdot OO_{\phi} \cdot \cos \epsilon \text{ мм};$$

$$\cos \epsilon = \frac{OO_{\phi}^2 + OX^2 - XO_{\phi}^2}{2OX \cdot OO_{\phi}};$$

$$\alpha_{\phi} = \beta - \epsilon.$$

Таким образом, положение центра фрезы определится углом α_{ϕ} и величиной радиуса-вектора.

Считаем, что обработанный зуб зубчатого колеса неподвижен, а фреза перемещается. Центр ее движется относительно точки O по дуге радиуса OO_0 , равного $A = r_{\sigma} + r_{\phi}$.

Окружную подачу на зуб выражаем в угловых величинах

$$\Delta_{\alpha} = \frac{180^{\circ} \cdot s_{z_0}}{\pi \cdot r_{\phi}}.$$

Следующее положение центра фрезы (точка O'_{ϕ}) определится углом $\alpha_{\phi} + \Delta_{\alpha}$ и радиусом-вектором A .

Таким образом, исходное положение центра фрезы и его последующие положения при перемещении будут выражены уравнениями:

$$\begin{aligned} x_1 &= A \cos \alpha_{\phi} \text{ мм}; & x_2 &= A \cdot \cos(\alpha_{\phi} + \Delta_{\alpha}) \text{ мм}, \\ y_1 &= A \sin \alpha_{\phi} \text{ мм}; & y_2 &= A \cdot \sin(\alpha_{\phi} + \Delta_{\alpha}) \text{ мм}. \end{aligned}$$

Задача определения толщины срезаемого слоя сводится к определению искомым абсцисс точек прямых, проходящих через две точки, расстояние r_{ϕ} между которыми известно.

В уравнение прямой, проходящей через две точки, подставляем известные величины и решаем его относительно X :

$$(x - X)^2 + (y - Y)^2 = r_{\phi}^2 \text{ мм};$$

$$X = A \cos \alpha_x - \sqrt{r_{\phi}^2 - (A \sin \alpha_x - a)^2} \text{ мм};$$

или

$$X_{\phi} = A \cos \alpha_{\phi} - \sqrt{r_{\phi}^2 - (A \sin \alpha_{\phi} - a)^2} \text{ мм}.$$

$$X'_{\phi} = A \cos(\alpha_{\phi} + \Delta_{\alpha}) - \sqrt{r_{\phi}^2 - [A \sin(\alpha_{\phi} + \Delta_{\alpha}) - a]^2} \text{ мм},$$

где

$$a = Dx = BB' + h = h + r_{\phi} \sin \alpha.$$

Так как наибольшая толщина срезаемого слоя определяется по нормали, то разность абсцисс необходимо умножить на $\cos \theta$, т. е.

$$\alpha_{\max} = (X - X') \cdot \cos \theta \text{ мм}.$$

Угол θ образован прямой $O'_{\phi} X'$ и ее проекцией на ось абсцисс; он определяется из $\triangle O'_{\phi} X' P$ по формуле

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{A \cdot \sin(\alpha_{\phi} + \Delta_{\alpha}) - a}{\sqrt{r_{\phi}^2 - [A \cdot \sin(\alpha_{\phi} + \Delta_{\alpha}) - a]^2}}.$$

Определим максимальную толщину среза на конкретном примере.

Дано:

$$\alpha = 6^{\circ}, \tau = 10^{\circ}, L_{\phi} = 5 \text{ мм}; r_{\phi} = 24 \text{ мм}, r_{\phi} = 25 \text{ мм}, h = 8,44 \text{ мм}$$

$$s_{z_0} = 0,582 \text{ мм/зуб}.$$

$$a = h + r_{\phi} \sin \alpha = 8,44 + 24 \cdot \sin 6^{\circ} = 10,95 \text{ мм}.$$

Определим толщину фаски на вершине зуба

$$KX = L_{\phi} \operatorname{tg} \tau = 5 \cdot \operatorname{tg} 10^{\circ} = 0,88 \text{ мм} \approx 0,9 \text{ мм};$$

$$OB' = r_{\sigma} \cdot \cos 6^{\circ} = 24 \cdot \cos 6^{\circ} \approx 23,9 \text{ мм}; \quad OD = 23,9 - 0,9 = 23 \text{ мм};$$

$$OX = \sqrt{OD^2 + DX^2} = \sqrt{23^2 + 10,95^2} = 25,47 \text{ мм};$$

$$\sin \beta = \frac{XD}{OX} = \frac{10,95}{25,47} = 0,43; \quad \beta = 25,47^{\circ};$$

$$\cos \varepsilon = \frac{49^2 + 25,47^2 - 25^2}{25,47 \cdot 49 \cdot 2} = \frac{2424,72}{2496,06} = 0,9716;$$

$$\varepsilon = 13,69^{\circ};$$

$$\alpha_{\phi} = \beta - \varepsilon = 11,78^{\circ};$$

$$\Delta_{\alpha} = \frac{180 \cdot 0,582}{\pi \cdot r_{\sigma}} = 1,39^{\circ}$$

$$x_1 = 49 \cdot 0,9791 = 47,97884;$$

$$x_2 = 49 \cdot 0,97398 = 47,72502;$$

$$y_1 = 49 \cdot 0,20307 = 9,95043;$$

$$y_2 = 49 \cdot 0,22665 = 11,10585;$$

$$\begin{aligned} X_{\phi} &= 47,97884 - \sqrt{625 - 1,18044^2} = \\ &= 47,97884 - 24,98 \approx 22,9988 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$X'_{\phi} = 47,72502 - \sqrt{625 - 0,15585^2} = 47,72502 - 25 = 22,72502 \text{ мм}.$$

$$X_{\phi} - X'_{\phi} = 0,27378 \text{ мм}.$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{49 \sin 13^{\circ} 10' - 10,95}{\sqrt{625 - (49 \sin 13^{\circ} 10' - 10,95)^2}} = \frac{0,1583}{25} = 0,0063;$$

$$\theta = 22';$$

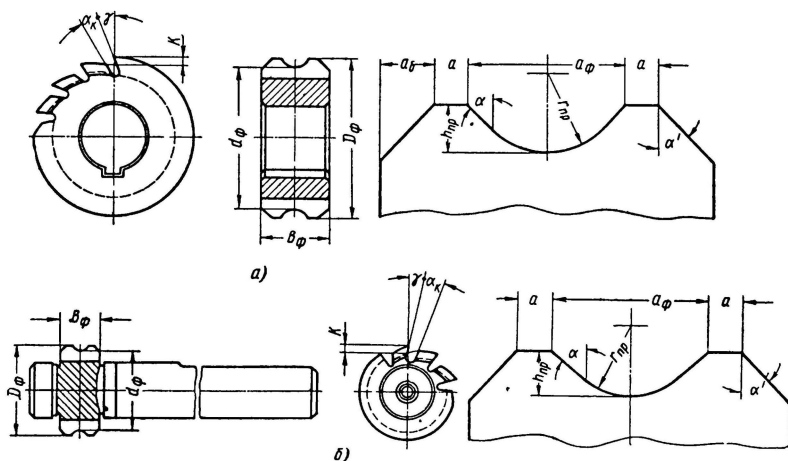
$$a_{\text{наиб}} = 0,27378 \cdot \cos 22' \approx 0,27378 \cdot 1,0 \approx 0,27 \text{ мм}.$$

Следовательно, $a_{н.ср} = 0,135 \text{ мм}$. Графически же определенная наибольшая средняя толщина среза $a_{н.ср} = 0,13 \text{ мм}$, т. е. расхождение составляет $0,005 \text{ мм}$.

Таким образом, приближенный аналитический метод определения толщины среза может быть практически использован при расчете режимов резания.

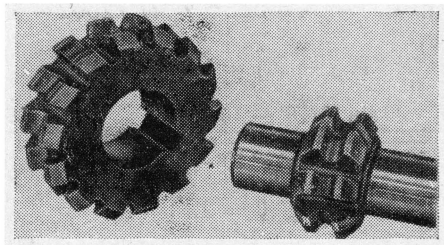
4. КОНСТРУКЦИЯ РЕЖУЩЕГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Инструментом для нового метода зубозакругления служат дисковые насадные (фиг. 47, а) или хвостовые (фиг. 47, б) фасонные фрезы (фиг. 48), имеющие внутренний рабочий профиль, соответствующий поперечному профилю закругляемой торцевой поверхности



Фиг. 47. Обозначение элементов дисковых насадных и хвостовых фасонных фрез для зубозакругления.

сти зуба, две горизонтальные режущие кромки a , расположенные параллельно оси фрезы, и боковые наружные кромки, направленные под углом α' к оси фрезы. Форму закругления обеспечивает



Фиг. 48. Дисковые насадные и хвостовые фасонные фрезы для зубозакругления.

внутренний рабочий профиль фрезы, горизонтальные и боковые режущие кромки работают только при врезании фрезы в торец зубчатого колеса, т. е. во время первого этапа формообразования, и

обеспечивают соответствующее прорезание торца венца зубчатого колеса.

Ширина внутреннего рабочего профиля фрезы определяется толщиной зуба у его основания с превышением на 0,1—0,2 мм, т. е. $a_{\phi} = S_e + (0,1 + 0,2) \text{ мм}$.

Превышение нужно для перекрытия возможных колебаний в толщине зуба и некоторых смещений относительно центральной линии профиля. Длина горизонтальных режущих кромок определяется по формуле

$$a = \left(\frac{\pi D_u}{2z} - \frac{a_{\phi}}{2} \right) + (0,3 \div 0,5) \text{ мм},$$

где D_u — диаметр впадин зубьев зубчатых колес в мм;

z — число зубьев зубчатых колес;

S_e — толщина зуба у его основания в мм.

Длина боковых режущих кромок в плоскости, параллельной оси фрезы, определяется их углом, глубиной рабочего профиля h_{np} фрезы (так как при врезании на полную глубину рабочего профиля боковые режущие кромки врезаются в торец зубчатого колеса на такую же величину) и допуском на высоту венца

$$a_{\sigma} = (h_{np} + \delta_{\sigma} + 0,5) \operatorname{tg} \alpha' \text{ мм},$$

где h_{np} — глубина рабочего профиля фрезы в мм;

δ_{σ} — верхнее отклонение ширины венца в мм;

α' — угол боковых режущих кромок.

Таким образом, ширина фрезы может быть определена по формуле

$$B_{\phi} = a_{\phi} + 2(a + a_{\sigma}) \text{ мм}.$$

Как указывалось выше, всегда выгодно производить обработку фрезами наибольшего диаметра, но конфигурация детали иногда не позволяет делать это. В связи с изложенным предлагается ряд диаметров фрез, который может быть использован в зависимости от конфигурации обрабатываемого зубчатого колеса с учетом возможности обработки фрезами большего диаметра.

Ряд диаметров устанавливается по внутреннему диаметру рабочего профиля фрезы d_{ϕ} , так как почти во все расчеты по новому методу зубозакругления входит радиус внутреннего рабочего профиля фрезы.

$$d_{\phi} = 20; 25; 35; 50; 62, 5 \text{ мм},$$

тогда наружный диаметр фрезы

$$D_{\phi} = d_{\phi} + 2h_{np} \text{ мм}.$$

Из конструктивных соображений и на основании проведенных испытаний было установлено, что возможные пределы колебаний величины окружного шага $t_0 = 7,85 \div 11 \text{ мм}$. При этом окружной

шаг также принимается по окружности внутреннего рабочего профиля фрезы.

Таким образом, число зубьев фрезы

$$z_{\phi} = \frac{\pi d_{\phi}}{t_0}$$

В табл. 17 приведено число зубьев фрез в зависимости от их диаметров. В некоторых конкретных случаях в зависимости от конфигурации детали могут быть соответствующие отступления от табличных данных. Например, для обработки вала-шестерни ЗИЛ 120-1701048 были сделаны фрезы с диаметром внутреннего рабочего профиля $d_{\phi} = 14$ мм.

Таблица 17

Рекомендуемые пределы
окружного шага между зубьями
и число зубьев фрез

Внутренний диаметр рабочего профиля фрезы d_{ϕ} в мм	Длина окружности по внутреннему диаметру рабочего профиля фрезы в мм	Число зубьев при окружном шаге t_0 в мм	
		8,75	11
20	62,8	8	6
25	78,5	10	7
35	109,9	14	10
50	157	20	14
62,5	196,25	25	18

Испытания показали, что угол канавки α_k для основных размеров фрез может быть принят 18° , а глубина канавки

$$l_k = (h_{np} + k) + (0,5 \div 1,0) \text{ мм},$$

где k — падение кривой кулака для затылования задней поверхности зуба фрезы в мм.

Передний угол фрез γ принимается $5-10^\circ$, при этом желательно первоначальную заточку производить не только по передней поверхности зуба фрезы, но и по спинке зуба, так как это улучшает отвод стружки из канавки. Радиус дна канавки принимается $1-1,5$ мм. С уменьшением числа зубьев и диаметра фрезы угол профиля канавки увеличивается. Так, например, при внутреннем диаметре рабочего профиля $d_{\phi} = 25$ мм и числе зубьев $z_{\phi} = 6$ угол канавки равен 30° .

Диаметр посадочного отверстия фрез принимается равным 16 мм для фрез диаметром до 35 мм и 22, 27 и 32 мм для фрез больших диаметров.

У хвостовых фрез диаметр хвостовика принят 18 мм.

Внутренняя часть рабочего профиля инструмента должна соответствовать поперечному сечению закругленной части зуба зубчатого колеса.

Ограничивающими факторами при выборе профиля закругления является глубина закругленной части зуба зубчатого колеса, которая в большинстве случаев задается минимальной величины, например $2,5-3$ мм для зубчатых колес тракторов $m = 5/3,75$ мм. Таким образом, в большинстве случаев выполняется неполное закругление.

Для опытного инструмента, выполняемого для определенных зубчатых колес, один из вариантов профиля выбирался из следующих соображений.

При испытаниях и из производственных наблюдений была установлена значительно ббльшая долговечность зубчатых колес с бочкообразным профилем торцовой части зуба по сравнению с зубчатыми колесами с заостренным угловым профилем торцовой части зуба, не имеющем радиусов в поперечном сечении и вдоль высоты зуба. При этом отмечалась хорошая включаемость зубчатых колес, имеющих заостренный профиль с углом заострения $90\text{--}120^\circ$, но их значительно меньшая долговечность ввиду кромочного контакта и сбивания заостряющего ребра. На основании изложенного одним из вариантов профиля закругления был запроектирован профиль, имеющий радиус при вершине r_{np} (фиг. 47). по нормали Н22-1 и крайние участки, направленные по касательной к окружности (проведенной указанным радиусом) под углом α . За счет кинематики зубозакругляющего оборудования этот профиль выполняется по радиусу вдоль высоты зуба, т. е. обеспечивается бочкообразное закругление. Величина радиуса и угол крайних участков профиля так же, как и общая высота профиля закругления, может изменяться в зависимости от конструктивных требований и это не вносит никаких изменений в новый метод закругления. Ширина радиусной части профиля по хорде $A_1 = 2r_{np} \cdot \cos \alpha$ мм.

Связь высоты профиля закругления h_{np} , ширины a_{ϕ} внутреннего рабочего профиля фрезы, радиуса r_{np} при вершине профиля и половины угла профиля α выражается следующим уравнением:

$$h_{np} = \frac{a_{\phi}}{2 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{r_{np}}{\sin \alpha} + r_{np} \text{ мм.}$$

В опытных инструментах угол α принят $30\text{--}60^\circ$. Угол боковых режущих кромок принят в пределах $30\text{--}45^\circ$.

Кроме этого варианта профиля был запроектирован целиком радиусный профиль. Запроектированные профили для зубчатых колес $m = 3$ и $2,5$ мм станка 1К62 завода «Красный пролетарий» приведены на фиг. 49 и 50, а для зубчатых колес ГАЗ 52-170110 $m = 3,75/3$ мм — на фиг. 51.

Поскольку профиль инструмента выполняется в его радиальном сечении, то в плоскости, параллельной оси зубчатого колеса, профиль закругления будет иметь отклонения по отношению к внутреннему профилю рабочей части фрезы.

Зная профиль режущего инструмента, необходимо найти профиль закругленной части зуба в сечении, параллельном оси зубчатого колеса, и расположенном от центра закругления на расстоянии M (фиг. 52, *a* и *b*).

Инструмент с профилем, состоящим из окружности радиуса r_{np} и прямой, сопряженной с этой окружностью под углом, образует в искомом сечении профиль, состоящий из кривых (части эллипса

и гиперболы), причем эллипс образуется от радиусной поверхности, а гипербола от прямой поверхности.

Вращая профиль инструмента вокруг центра закругления, получим тело вращения, состоящее из поверхности, образованной радиусной частью, и конусной поверхности, образованной прямыми участками профиля и их продолжением до оси вращения.

На схеме (фиг. 52) тело вращения изображено в трех проекциях. Там же проведена секущая плоскость PP на расстоянии M от оси вращения (фиг. 52, б и в). Для того чтобы найти уравнение гиперболы через любую точку A на гиперболе проведем перпендикулярно высоте конуса плоскость MN . Тогда эта точка будет являться одновременно точкой гиперболы и точкой окружности сечения конуса. Расстояние от вершины конуса O до плоскости круга (или от начала координат гиперболы до точки гиперболы) по оси xx будет x_2 (фиг. 52, а).

Половина хорды окружности (по линии пересечения двух секущих плоскостей) будет являться расстоянием точки гиперболы по оси yy , т. е. y_2 (фиг. 52, а и б).

Известно, что хорда окружности

$$c = 2\sqrt{h_{ce2}(2r_{ок} - h_{ce2})} \text{ мм},$$

где $r_{ок}$ — радиус окружности;

h_{ce2} — высота сегмента.

Половина хорды

$$y_2 = \frac{c}{2} = \sqrt{h_{ce2}(2r_{ок} - h_{ce2})}.$$

Радиус окружности $r_{ок}$ из $\triangle OKK_1$ (фиг. 52, в)

$$r_{ок} = x_2 \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) \text{ мм}.$$

Высота сегмента

$$h_{ce2} = x_2 \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) - M \text{ мм}.$$

Подставляя значения $r_{ок}$ и h_{ce2} , получим

$$y_2 = \sqrt{[x_2 \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) - M][2x_2 \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) - x_2 \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) + M]} \text{ мм}.$$

или после преобразования

$$y_2 = \sqrt{x_2^2 \operatorname{tg}^2(90^\circ - \alpha) - M^2} \text{ мм}.$$

Решив уравнение относительно x , получим

$$x_2 = \frac{\sqrt{y_2^2 + M^2}}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)} \text{ мм}.$$

Данное уравнение позволяет определять координаты гиперболы в любом сечении конуса параллельном его оси, если известен угол при вершине конуса и расстояние этого сечения от высоты конуса.

Из $\triangle OEA$ (фиг. 52, б) найдем ординату $y_{2\max}$ точки A — верхней точки рассматриваемого участка гиперболы, которая будет являться одновременно и первой точкой эллипса

$$y_{2\max} = \sqrt{(r_{\sigma} - h_0)^2 - M^2} \text{ мм},$$

где h_0 — высота радиусной части профиля инструмента (фиг. 52, б)

$$h_0 = r_{np} - r_{np} \sin \alpha \text{ мм},$$

или

$$h_0 = r_{np} (1 - \sin \alpha) \text{ мм}.$$

Нижняя точка рассматриваемого участка гиперболы может быть найдена из треугольника OEA_1 (фиг. 52, д)

$$EA_1 = \sqrt{OA_1^2 - OE^2},$$

где

$$EA_1 = y_{2\min}; \quad OA_1 = r_{\sigma} - h_{np}; \quad OE = M$$

$$y_{2\min} = \sqrt{(r_{\sigma} - h_{np})^2 - M^2} \text{ мм}.$$

Для построения гиперболы в масштабе $100:1$, достаточно $y_{2\max}$ уменьшить до $y_{2\min}$ через каждые $0,2$ мм.

Для определения координат кривой эллипса сделаем следующие построения. На радиусе OC (фиг. 52, б) от точки C отложим отрезок, равный $2r_{np}$. На данном отрезке как на диаметре окружности построим конус (показан на фиг. 52, б пунктиром и на фиг. 52, г в увеличенном масштабе), причем образующая конуса из точки C должна пройти через точку B . Пересекаясь с плоскостью PP данный конус образует эллипс.

Из уравнения эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2};$$

где b — большая полуось эллипса;

a — малая полуось эллипса.

Из треугольников $ИДА$ и $АВС$ (фиг. 52, б и г) большая ось эллипса

$$2b = b' + h_s.$$

Из треугольника $ИДА$

$$b' = \frac{(2r_{np} - h_0) \sin \frac{180 + \sigma'}{2}}{\sin \frac{180 + \sigma'}{2} + \sigma + \sigma'} \text{ мм}.$$

Из треугольников OEA и OEB (фиг. 52, б)

$$h_s = EB - EA = y_{\max} - y_{2\max} = \sqrt{r_{\sigma}^2 - M^2} - y_{2\max}.$$

В треугольнике BBP' (фиг. 52, z) сторона BP' равна малой полуоси эллипса, так как сторона B является радиусом круга, пересекающимся с плоскостью эллипса по линии малой полуоси.

Из $\triangle BBP'$

$$BB = \frac{BP' \cdot \sin \frac{180^\circ - \sigma'}{2}}{\sin \left(\frac{180^\circ - \sigma}{2} + \sigma + \sigma' \right)},$$

откуда

$$BP' = \frac{BB \cdot \sin \frac{180^\circ + 2\sigma + \sigma'}{2}}{\sin \frac{180^\circ - \sigma'}{2}},$$

или

$$a = \frac{b \cdot \sin \frac{180^\circ + 2\sigma + \sigma'}{2}}{\sin \frac{180^\circ - \sigma'}{2}},$$

Углы σ и σ' находим из треугольников EOB и OAB (фиг. 52, b)

$$\begin{aligned} \sin \sigma &= \frac{OE}{OB} = \frac{M}{r_\sigma}; \\ \sin \sigma' &= \frac{AB \cdot \sin \sigma}{OA} = \frac{h_2 \cdot \sin \sigma}{r_\sigma - h_0}. \end{aligned}$$

Общая точка гиперболы и эллипса или первая точка эллипса в координатах эллипса

$$x_{1_2} = r_{np} \cdot \cos \alpha.$$

В том случае, если уравнение будет решено относительно x и первую точку эллипса будет необходимо найти по y , то $y_{1_2} = b - h_2$.

При расчетах эллипса для его построения в масштабе 100:1 достаточно x_{1_2} изменять через каждые 0,2 мм до нуля.

Кривая эллипса в координатах гиперболы находится из соотношений

$$x = x_{2\max} + x_{1_2} - x_2,$$

где

$x_{2\max} + x_{1_2} - x_2$ — расстояние от оси yy гиперболы до оси y_2y_2 эллипса;

x_2 — точка эллипса в координатах эллипса;

$$y = y_{2\max} - b + y_2,$$

где

$y_{\max} - b$ — расстояние от оси xx гиперболы до оси x_3x_3 эллипса;

y_3 — точки эллипса.

Схема расчета

Дано:

r_{np} — радиус внутреннего рабочего профиля инструмента в мм;

α — угол внутреннего рабочего профиля инструмента в мм;

h_{np} — высота внутреннего профиля инструмента в мм;

r_6 — радиус вдоль высоты зуба в мм.

1. Задаемся рядом положений секущей плоскости PP по высоте зуба, проводя расчет для каждого из них.

2. Определяем общую точку гиперболы и эллипса по ординате y :

$$y_{2\max} = \sqrt{(r_6 - h_0)^2 - M^2} \text{ мм},$$

где

$$h_0 = r_{np} (1 - \sin \alpha) \text{ мм}.$$

3. Определяем нижнюю точку гиперболы по ординате y :

$$y_{2\min} = \sqrt{(r_6 - h_{np})^2 - M^2} \text{ мм}.$$

4. Делим $y_{2\max} - y_{2\min}$ на отрезки длиной 0,2 мм.

5. Находим значение x_2 .

$$x_2 = \frac{\sqrt{y^2 + M^2}}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)} \text{ мм}.$$

6. Решаем уравнение эллипса относительно x или y :

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \text{ мм};$$

$$x = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - y^2} \text{ мм}.$$

7. Определяем наивысшую точку полученного профиля по y :

$$y_{\max} = \sqrt{r_6^2 - M^2} \text{ мм}.$$

8. Определяем полуоси эллипса b и a :

$$2b = b' + h_3 \text{ мм};$$

$$b' = \frac{2(r_{np} - h_3) \sin \frac{180^\circ + \sigma'}{2}}{\sin \frac{180^\circ + \sigma'}{2} + \sigma + \sigma'} \text{ мм};$$

$$h_3 = y_{\max} - y_{2\max} \text{ мм},$$

или

$$a = \frac{b \cdot \sin \frac{180^\circ + 2\sigma + \sigma'}{2}}{\sin \frac{180^\circ - \sigma'}{2}} \text{ мм,}$$

где

$$\sin \sigma = \frac{M}{r_6};$$
$$\sin \sigma' = \frac{h_3 \sin \sigma}{r_6 - h_0}.$$

9. Если уравнение эллипса решено относительно y , то

$$x_{1_3} = r_{np} \cdot \cos \alpha \text{ мм.}$$

Если уравнение решено относительно x , то

$$y_{1_3} = b - h_3 \text{ мм.}$$

10. Делим x_{1_3} или y_{1_3} на отрезки длиной 0,2 мм.

11. Находим точки эллипса в координатах гиперболы:

$$x = x_{2 \max} + x_{1_3} - x_3 \text{ мм;}$$

$$y = y_{\max} - b + y_3 \text{ мм.}$$

Примерный расчет

Дано: $r_{np} = 2,8 \text{ мм}$; $\alpha = 35^\circ$; $h_{np} = 2,55 \text{ мм}$, $r_6 = 14 \text{ мм}$.

1. Задаемся $M = 4,5 \text{ мм}$.

2. Определяем общую точку гиперболы и эллипса.

$$y_{2 \max} = \sqrt{(r_6 - h_0)^2 - M^2}; \quad h_0 = r_{np} (1 - \sin \alpha);$$

$$y_{2 \max} = \sqrt{12,806^2 - 4,5^2}; \quad h_0 = 2,8 (1 - 0,57358);$$

$$y_{2 \max} = \sqrt{143,7436}; \quad h_0 = 1,19398;$$

$$y_{2 \max} = 11,989 \text{ мм.}$$

3. Определяем нижнюю точку гиперболы:

$$y_{2 \min} = \sqrt{(r_6 - h_{np})^2 - M^2};$$

$$y_{2 \min} = \sqrt{11,45^2 - 4,5^2} = \sqrt{110,8525};$$

$$y_{2 \min} = 10,5287 \text{ мм.}$$

4. Делим $y_{2 \max} - y_{2 \min}$ на отрезки примерно равные 0,2 мм:

$$y_{2 \max} = 11,989 \text{ мм}; \quad y_2 = 11,8 \text{ мм}; \quad y_3 = 11,6 \text{ мм};$$

$$y_4 = 11,4 \text{ мм}; \quad y_5 = 11,2 \text{ мм}; \quad y_6 = 11,0 \text{ мм};$$

$$y_7 = 10,8 \text{ мм}; \quad y_8 = 10,6 \text{ мм}; \quad y_9 = 10,5287 \text{ мм.}$$

Расчетная таблица определения значений x

y^2	A	\sqrt{A}	x	y^2	A	\sqrt{A}	x
143,7436	163,99	12,806	8,967	121,00	141,25	11,885	8,3225
139,24	159,49	12,629	8,843	116,64	136,89	11,7	8,1929
134,56	154,81	12,443	8,7132	112,36	132,61	11,52	8,0667
129,96	150,21	12,255	8,5816	110,8525	131,1025	11,45	8,0176
125,44	145,69	12,07	8,452				

5. Находим x (см. табл. 18)

$$x = \frac{\sqrt{y^2 + M^2}}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sqrt{y^2 + 20,25}}{\operatorname{tg} 55^\circ} = \frac{\sqrt{y^2 + 20,25}}{1,4281} \text{ мм.}$$

6. Определяем наивысшую точку профиля по y :

$$y_{\max} = \sqrt{r_6^2 - M^2} = \sqrt{196 - 20,25} = \sqrt{175,75} = 13,257 \text{ мм.}$$

7. Определяем полуоси эллипса:

$$2b = b' + h_3 \text{ мм;}$$

$$b' = \frac{(2r_{np} - h_0) \sin \frac{180^\circ + \sigma'}{2}}{\sin \frac{180^\circ + \sigma'}{2} + \sigma + \sigma'}; \quad h_3 = y_{\max} - y_{2 \max};$$

$$h_3 = 13,257 - 11,989 = 1,268;$$

$$\sin \sigma = \frac{M}{r_6} = \frac{4,5}{14} = 0,32143, \quad \sigma = 18^\circ 45',$$

$$\sin \sigma' = \frac{h_3 \cdot \sin \sigma}{r_6 - h_0} = \frac{1,268 \cdot 0,32143}{14 - 1,194} = \frac{0,40757}{12,806} = 0,03183;$$

$$\sigma' = 1^\circ 49' 30'';$$

$$b' = \frac{(5,6 - 1,194) \sin 90^\circ 54' 45''}{\sin 110^\circ 59' 15''} = \frac{4,4060 \cdot 0,99987}{0,93366} = \frac{4,4054}{0,9336};$$

$$b' = 4,7184; \quad 2b = 4,7184 + 1,268 = 5,9864; \quad b = 2,9932 \text{ мм.}$$

$$a = \frac{b \cdot \sin \frac{180^\circ + 2\sigma + \sigma'}{2}}{\sin \frac{180^\circ - \sigma'}{2}} = \frac{2,9932 \sin 109^\circ 39' 45''}{\sin 89^\circ 5' 15''} =$$

$$= \frac{2,9932 \cdot 0,9417}{0,99987} = \frac{2,8187}{0,99987} = 2,819 \text{ мм.}$$

8. Определяем первую точку эллипса:

$$x_{13} = r_{np} \cdot \cos \alpha = 2,8 \cdot 0,81915 = 2,2936 \text{ мм.}$$

9. Точки эллипса в координатах гиперболы:

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} = \frac{2,9932}{2,819} \sqrt{2,819^2 - x^2} =$$

$$= 1,0618 \sqrt{7,9468 - x^2} \text{ мм (см. табл. 19).}$$

Таблица 19

Расчетная таблица точек эллипса в координатах гиперболы

$x_э$	$x_э^2$	A	$\sqrt{-A}$	y	Координаты гиперболы	
					x	y
2,2936	5,2607	2,6861	1,639	1,74	8,967	12,004
2,0	4,0	3,9468	1,968	2,11	9,2606	12,374
1,8	3,24	4,7068	2,169	2,303	9,4606	12,567
1,6	2,56	5,3868	2,32	2,46	9,6606	12,724
1,4	1,96	5,9868	2,446	2,597	9,8606	12,854
1,2	1,44	6,5068	2,55	2,71	10,0606	12,974
1,0	1,0	6,9468	2,635	2,798	10,2606	13,062
0,8	0,64	7,3068	2,702	2,87	10,4606	13,134
0,6	0,36	7,5868	2,754	2,92	10,6606	13,184
0,4	0,16	7,7868	2,79	2,96	10,8606	13,224
0,2	0,04	7,9068	2,811	2,98	11,0606	13,244
0	0	7,9468	2,818	2,99	11,2606	13,254

На фиг. 53: 1 — профиль инструмента; 2 — найденный профиль обработанного изделия в сечении по делительной окружности ($M = 4,5$ мм).

Таким образом, если принять профиль инструмента состоящим из радиуса при вершине и крайних участков, направленных по касательной к окружности под углом α , то на изделии в искомом сечении получается профиль закругления, имеющий небольшие отклонения от профиля инструмента. Профиль на обработанном изделии несколько более вытянутый и плавный, чем профиль, принятый для инструмента. Это даже несколько улучшает закругленную часть торца зуба зубчатого колеса; при этом профиль рабочей части инструмента имеет простейшие формы. Задний угол в сечении, нормальном к режущей кромке, определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_x = \frac{R_\phi}{r_x} \operatorname{tg} \alpha' \cdot \sin \varphi,$$

где R_ϕ — наружный радиус фрезы в мм;

r_x — радиус точки профиля режущей кромки, для которой определяется значение заднего угла, в мм;

φ — угол между горизонталью и перпендикуляром, проведенным через точку профиля режущей кромки, для которой определяется значение заднего угла, в град.;

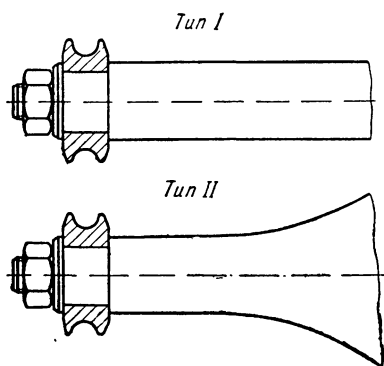
α' — задний угол в плоскости, перпендикулярной оси фрезы, в град.;

α_x — задний угол в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке, в град.

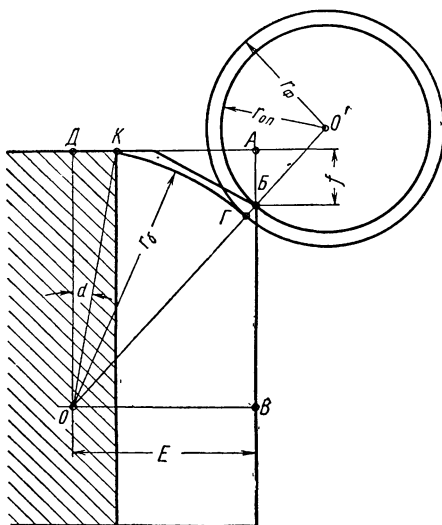
тых колес, в то время как инструмент, имевший задний угол 4° , обработал 93 зубчатых колеса. На основании указанных выше положений были разработаны чертежи и по ним изготовлены и испытаны фрезы типа, приведенных на фиг. 47 и 48.

Дополнительные вопросы проектирования фрез, обеспечивающих врезание в торец венца зубчатого колеса путем подъема зубьев на соответствующем участке фрезы, рассмотрены в разделе оборудования для осуществления нового метода зубозакругления.

В соответствии с приведенными двумя типами фрез — хвостовыми и насадными, раз-



Фиг. 54. Принципиальные типы оправок.



Фиг. 55. Схема к расчету наибольшего диаметра цилиндрической оправки типа I с учетом ее проходимости над торцом зубчатого колеса.

работаны три типа оправок: один — для крепления насадных фрез и два для крепления хвостовых фрез.

Диаметр и форма оправок, на которые будет насаживаться инструмент, зависят от диаметра инструмента, диаметра обрабатываемого зубчатого колеса и параметров закругленной части торца зуба.

Формы оправок могут быть двух типов (фиг. 54):

I — цилиндрическая по всей длине;

II — упрочненная, у которой диаметр возрастает по мере удаления от инструмента.

Если по прочности допускается применение оправки первого типа, то наибольший ее радиус с учетом проходимости над торцом зубчатого колеса определяется следующим расчетом (фиг. 55):

$$r_{on} = O'Г - O'Б = r_\phi - \GammaБ; \quad (1)$$

$$\GammaБ = OB - OГ = OB - r_\phi; \quad (2)$$

$$OB = \sqrt{OV^2 + BV^2} \quad OB = E; \quad BV = DO - AB;$$

НО

$$DO = OK \cdot \cos \alpha = r_6 \cdot \cos \alpha \text{ (из треугольника } ODK)$$

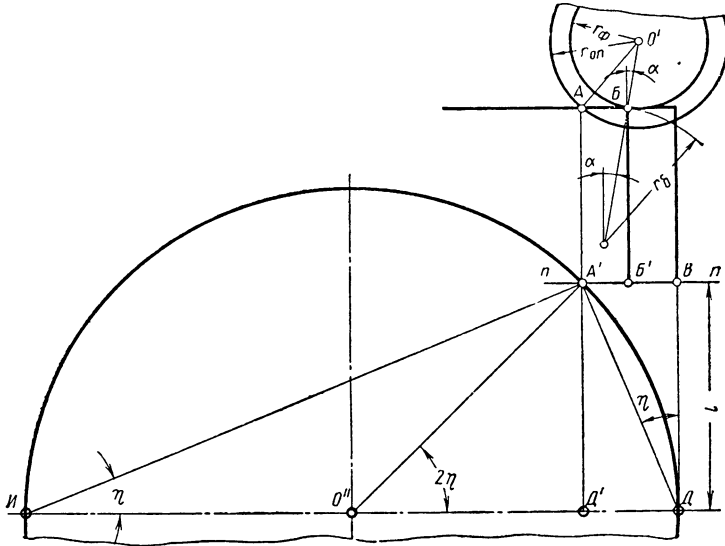
$$AB = f, \text{ т. е. } BB = r_6 \cdot \cos \alpha - f.$$

Значит

$$OB = \sqrt{E^2 + (r_6 \cdot \cos \alpha - f)^2}.$$

Подставляя в формулу (2) значение OB , получим

$$GB = \sqrt{E^2 + (r_6 \cos \alpha - f)^2} - r_6,$$



Фиг. 56. Схема к расчету размеров оправок по типу II.

а в формулу (1) значение GB получим окончательную формулу максимального радиуса оправки, проходящего над обрабатываемым зубчатым колесом:

$$r_{он} = r_φ + r_6 - \sqrt{E^2 + r_6 \cos \alpha - f^2}, \quad (3)$$

где $r_φ$ — наименьший радиус фрезы по внутреннему рабочему профилю инструмента в мм;

r_6 — радиус закругления вдоль высоты зуба зубчатого колеса в мм;

E — расстояние от центра закругления до окружности выступов зубчатого колеса в мм; $E = h_c + h'$;

f — глубина фаски, снимаемая предварительно на токарном станке и измеренная в направлении от торца зубчатого колеса вдоль длины зуба в мм.

Если требуется определить размеры оправки по типу II, то поступают следующим образом. Допустимый диаметр оправки около торца фрезы определяют по формуле (3). Радиус оправки может возрасти по мере удаления от торца фрезы в зависимости от кривизны зубчатого колеса (фиг. 56). Для того чтобы определить r_{on} в любом сечении рассмотрим фиг. 56:

$$AO' = \sqrt{AB^2 + BO'^2 - 2AB \cdot BO' \cdot \cos \angle ABO'}; \quad (4)$$

$$AB = A'B - B'B. \quad (5)$$

где AO' — радиус оправки;

$A'B$ — расстояние от вершины зуба до точки A' в сечении nn , зависящее от расстояния $ВД$.

Расстояние $ВД$ обозначим буквой l .

$$A'B = ВД \operatorname{tg} \eta = l \operatorname{tg} \eta.$$

Расстояние $B'B$ есть величина, равная расстоянию от окружности выступов до начала закругления. Обычно это расстояние берется равным полной высоте h зуба зубчатого колеса. Подставляя полученные значения в формулу (5), получим

$$AB = l \operatorname{tg} \eta - h;$$

$$BO' = r_{\phi}; \quad \angle ABO' = 90^\circ + \alpha; \quad \cos(90^\circ + \alpha) = -\sin \alpha.$$

Подставляя полученные значения в формулу (4), получим

$$AO' = r_{on} = \sqrt{(l \operatorname{tg} \eta - h)^2 + r_{\phi}^2 + 2r_{\phi} \sin \alpha \cdot (l \operatorname{tg} \eta - h)},$$

где

l — расстояние от оси профиля фрезы до сечения nn , в котором определяется радиус оправки;

h — расстояние от окружности выступов до начала закругления (обычно равное полной высоте зуба);

η — определяется из соотношения

$$\sin 2\eta = \frac{l}{R_e},$$

где R_e — радиус зубчатого колеса по окружности выступов.

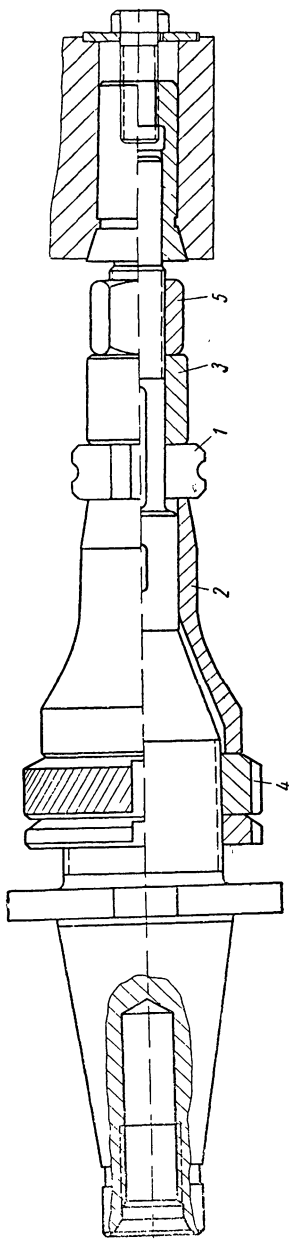
Проектирование упрочненной оправки производится по следующей методике:

1. Рассчитывается радиус оправки по формуле

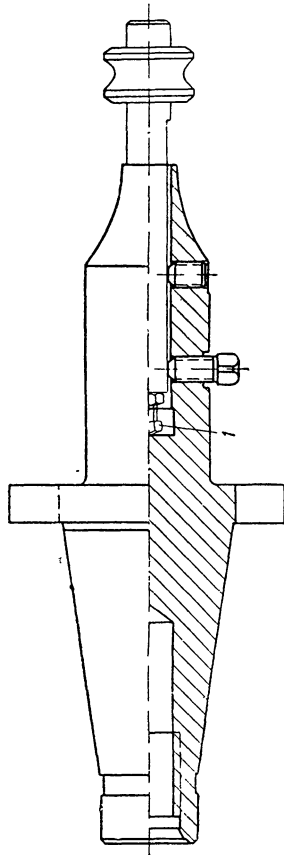
$$r_{on} = r_{\phi} + r_{\delta} - \sqrt{E^2 + (r_{\delta} \cos \alpha - f)^2}.$$

2. Рассчитывается радиус фасонной оправки на каждые 5—10 мм длины.

3. Графически от оси оправки проводится образующая цилиндрической оправки и в соответственных сечениях согласно расчетам наносятся точки фасонной оправки. Полученный контур оправки

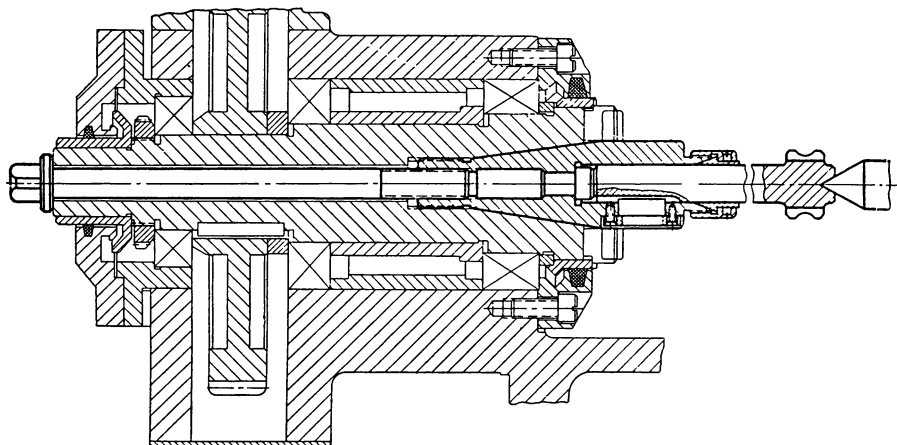


Фиг. 58. Оправка для крепления насадных фрез.



Фиг. 59. Оправка для крепления хвостовых фрез.

Конструкции оправок предусматривают возможность регулировки осевого положения фрезы 1 относительно зубчатого колеса. На оправках для насадных фрез это выполняется за счет перемещения втулок 2 и 3 с помощью гаек 4 и 5 (фиг. 58), на оправках



Фиг. 60. Второй вариант крепления хвостовых фрез.

для крепления хвостовых фрез с помощью винта 1, ввинченного в торец хвостовой фрезы (фиг. 59).

На фиг. 60 показано крепление фрез, применённое в СКБ-8 на станке СМ5. В этом случае крепление хвостовых фрез производится с помощью шпонки и зажима в цанговом патроне. На станке ЛП-538 хвостовые фрезы крепятся двумя винтами, упирающимися в имеющиеся на хвостовой части фрез лыски.

КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Для выявления допустимости внесения изменений в форму торцов, вызываемых новым методом зубозакругления были проведены контрольные испытания зубчатых колес.

Во время врезания фрезы в торец зубчатого колеса (первый этап формообразования) прорезается торцовая часть венца зубчатого колеса. При этом торцовая часть венца от конца закругленной части сохраняется, но она имеет прерывистый характер в виде чередующихся треугольников (фиг. 22). Рабочая длина зуба не уменьшается, а даже несколько увеличивается, так как при закруглении пальцевой фрезой имеет место довольно значительное занижение закругленной части торца зуба относительно торца венца.

Целью контрольных испытаний являлось выявление допустимости прорезания торца венца зубчатого колеса.

Испытания проводились при нескольких переменных факторах, изменяющих форму и размеры прорезания торца венца зубчатого колеса и характер контакта пары включаемых зубчатых колес. Переменными факторами являлись форма и размеры рабочего профиля фрезы, диаметр зубозакругляющей фрезы, радиус закругления вдоль высоты зуба и положение центра закругления.

На первом этапе контрольных испытаний были закруглены парно работающие зубчатые колеса станка мод. 1К62 № 1К62-02-113 и 1К62-02-115. Зубчатые колеса были закруглены в две партии по 35 комплектов, т. е. по 70 шт. Первая партия была обработана в июне 1960 г., а вторая в январе 1961 г. Зубчатые колеса были изготовлены из стали 40Х и имели $m = 3$ мм и $z = 45$. Закругление торца зубьев производилось фрезами с диаметром внутренней рабочей части профиля $d_{\phi} = 25$ и 50 мм.

Профиль внутренней рабочей части фрез имел радиус при вершине $r_{np} = 2,4 \div 2,8$ мм и крайние участки по касательной к радиусу под углом 45 и 20°, что обеспечило глубину рабочего профиля $h_{np} = 2,2$ и 4 мм.

Дополнительно углубленный профиль с глубиной $h_{np} = 4$ мм был сделан по следующим соображениям. При предварительном осмотре зубчатых колес, закругленных новым методом, было высказано опасение, не будут ли быстро изнашиваться переключающие вилки, если они контактируют с прорезанным торцом венца

зубчатого колеса. Поэтому было намечено провести контрольное наблюдение с двумя глубинами прорезанной части торца венца. В большинстве случаев вилка контактирует не с торцом зубчатого колеса, а со специальными выточками, предназначенными для этого.

После закругления зубьев каждая партия зубчатых колес отправлялась на завод «Красный пролетарий» и там проходила дальнейшую обработку по принятому на заводе технологическому процессу, включая термическую обработку и проверку на выключаемость. При этом проверялось, не вызывает ли новый метод зубозакругления каких-либо затруднений в производстве зубчатых колес и в частности термической обработки. По мнению работников металлургической лаборатории ЭНИМС и термистов заводов «Красный пролетарий» и ЗИЛ, зубчатые колеса, закругленные с помощью пальцевой фрезы, имеют большой недостаток, заключающийся в наличии перехода от закругленной части зуба к венцу под углом около 90° , что вызывает в этом месте концентрацию напряжений. В то же время зубчатые колеса, закругленные новым методом, имеют плавный переход от закругленной поверхности зуба к венцу, что должно улучшить условия термической обработки.

Обработанные две партии зубчатых колес были установлены на станках, выпущенных заводом «Красный пролетарий».

При обработке зубчатых колес и сборке станков не выявлено никаких дефектов или затруднений, отмечена хорошая выключаемость зубчатых колес, закругление которых производилось новым методом. Были замерены размеры зева переключающих вилок, контактирующих с зубчатым колесом 1К62-02-113. После двух с половиной лет эксплуатации станки мод. 1К62 были вскрыты и обследовано состояние зубчатых колес 1К62-02-113 и 1К62-02-115, закругленных новым методом. На зубчатых колесах почти не имелось износа, а была лишь блестящая заполированная поверхность контакта.

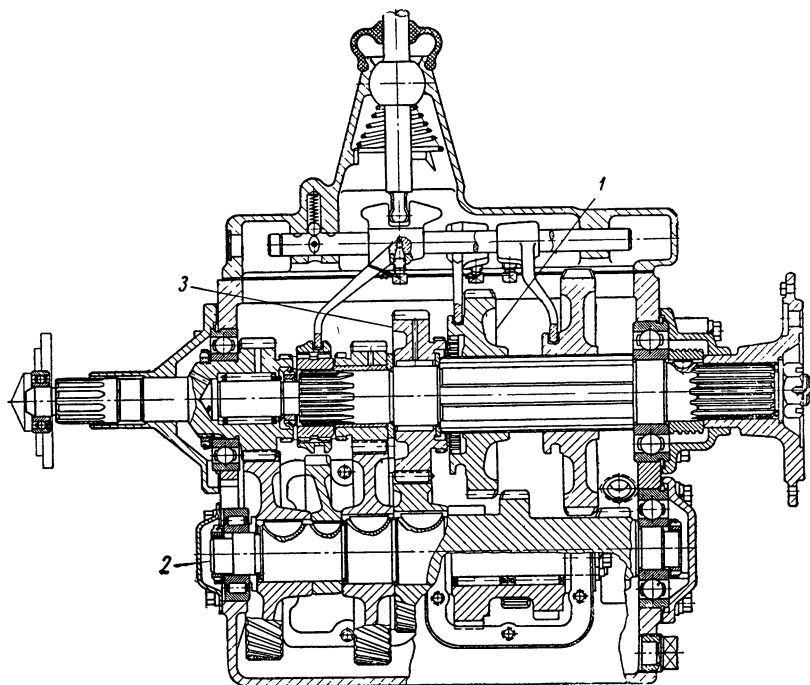
Замер зева вилки, контактирующей с торцами зубчатого колеса, показал, что она практически не имеет износа. При этом необходимо отметить, что вилки контактировали как с торцом колеса, имевшим глубокие увеличенной длины прорези, так и с прорезями меньшей глубины и длины.

Обследование также показало, что зубчатые колеса после двух с половиной лет двухсменной работы имеют выключаемость лучшую чем зубчатые колеса с закруглением, выполненным заводом «Красный пролетарий» с помощью пальцевой фрезы.

Вторым этапом контрольных испытаний зубчатых колес, закругленных новым методом, были стендовые испытания зубчатых колес коробки передач грузового автомобиля ЗИЛ-150. Испытанию подвергались зубчатые колеса второй и третьей передачи ЗИЛ 120-1701127, ЗИЛ 120-1701048 и ЗИЛ 120-1701131 (фиг. 61).

Испытание проводилось на изготовленном в ЭНИМСе стенде, конструкция которого заимствована с небольшими изменениями у автозавода имени Лихачева.

Стенд (фиг. 62 и фиг. 63) смонтирован на общем основании 1 и состоит из двух основных узлов — узла испытуемой коробки передач 2 грузового автомобиля ЗИЛ-150 с приводом, имеющим электродвигатель мощностью 7 квт, редуктор 3, маховик 4, карданный вал 5, и узла механизма переключения с приводом, имеющим электродвигатель (фиг. 63) мощностью 1.7 квт и червячный редуктор 6 (фиг. 62 и 63).



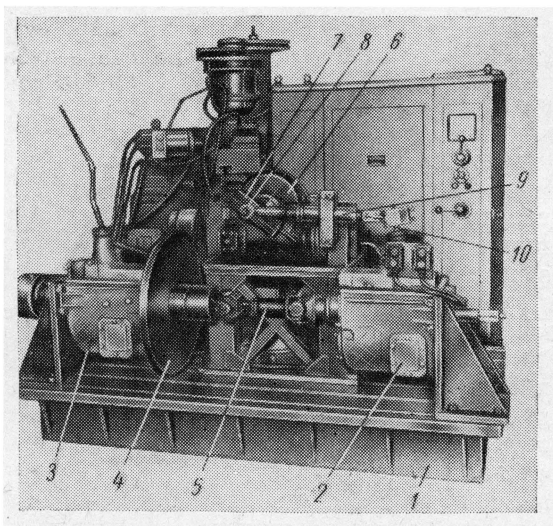
Фиг. 61. Коробка передач ЗИЛ-120:

1 — зубчатое колесо ЗИЛ 120-1701127; 2 — вал-шестерня ЗИЛ 120-1701048; 3 — зубчатое колесо ЗИЛ 120-1701131.

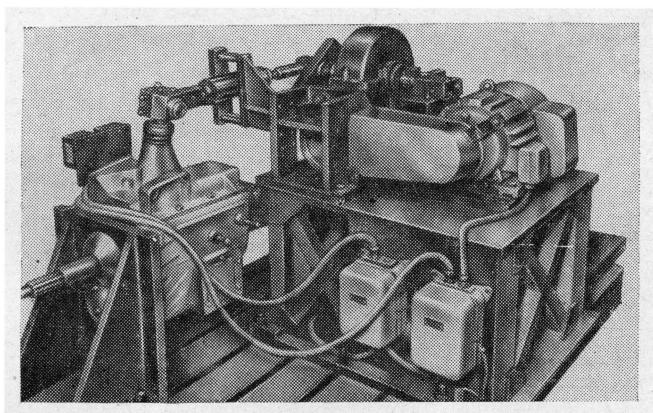
Редуктором 3 служит такая же, как и испытуемая, коробка передач автомашины ЗИЛ-150. Первичный вал редуктора 3 приводится во вращение электродвигателем через клиноременную передачу.

Вращение первичного вала через промежуточный вал передается вторичному валу, который через карданный вал 5 передает вращение испытуемой коробке передач 2. На конце вторичного вала редуктора 3 установлен маховик 4 с целью создания большого инерционного момента.

Механизм переключения представляет собой кулисный механизм. На валу червячного колеса крепится кривошипная планка 7 с пальцем 8. Рычаг 9 кулисы одним концом свободно сидит на



Фиг. 62. Стенд для испытания зубчатых колес на переключение (вид спереди).



Фиг. 63. Стенд для испытания зубчатых колес на переключение (вид со стороны привода механизма переключения).

пальце 8, другим шарнирно крепится к рычагу 10 переключения передачи. С помощью механизма переключения вращательное движение редуктора преобразуется в возвратно-поступательное движение для включения и выключения испытуемых зубчатых колес. Величина плеча кривошипа регулируется. Регулируется также и длина рычага кулисы. Внутри рычага кулисы установлены две цилиндрические пружины, поочередно работающие на сжатие: первая при включении второй передачи, вторая при включении третьей передачи.

В момент включения второй передачи, в случае попадания зуба зубчатого колеса на зуб вала, пружина сжимается и давит на рычаг переключения с определенным усилием. В момент совпадения зуба зубчатого колеса со впадиной зуба вала-шестерни под действием пружины зубчатое колесо заскакивает во впадину и происходит включение второй передачи. Аналогично происходит включение третьей передачи. Муфта зубчатого колеса второй передачи входит в зацепление с муфточным венцом зубчатого колеса третьей передачи, свободно посаженной на вторичный вал и находящейся в постоянном зацеплении с зубчатым колесом третьей передачи промежуточного вала.

Таким образом, при переключении в одну сторону включаются испытуемые зубчатые колеса наружного зацепления, а в другую — испытуемые зубчатые колеса внутреннего зацепления.

Вал червячного колеса соединен со счетчиком чисел оборотов. Каждый оборот червячного колеса соответствует одному циклу переключений. Число оборотов червячного колеса $n_k = 30$ об/мин.

При переключении зубчатые колеса, входящие в зацепление, имеют разные окружные скорости. Окружная скорость зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 при переключении с третьей передачи на вторую $v_1 = 153$ м/мин, а вала-шестерни — второй передачи ЗИЛ 120-1701048 — $v_2 = 87,5$ м/мин. Разность скоростей $\Delta v = v_1 - v_2 = 153 - 87,5 = 65,5$ м/мин. В момент контакта их зубьев происходит удар и мгновенное уравнивание скоростей. Сила удара зависит от величины кинетической энергии вращающихся масс и от жесткости упругих звеньев кинематической цепи.

В движущемся автомобиле при переходе с одной передачи на другую шофер приближенно уравнивает окружные скорости включаемых колес (перегазовка, разгон и т. д.). Такое приближенное уравнивание окружных скоростей включаемых зубчатых колес значительно уменьшает силу удара.

В автомобиле вращающиеся звенья кинематической цепи имеют значительную длину (карданный вал, полуоси и т. д.) и, следовательно, пропорциональную длине приведенную крутильную податливость, которая также смягчает силу удара включаемых колес.

Во время испытания зубчатых колес на стенде окружные скорости их не уравниваются при переключении. Введение маховика на вторичном валу редуктора 3 (фиг. 62) увеличивает момент инерции вращающихся деталей.

Наибольшим моментом инерции и, следовательно, наибольшей кинетической энергией по сравнению с другими вращающимися деталями кинематической цепи обладает маховик. Если приведенный момент инерции промежуточного и первичного валов вместе с зубчатыми колесами, находящимися на промежуточном валу, приближенно равен $I_n = 0,065 \text{ кгм/сек}^2$, то момент инерции одного маховика равен $I_m = 3,3 \text{ кгм/сек}^2$.

Кинематическая цепь стенда, справа от маховика (фиг. 62) состоит из короткого карданного вала, валов и зубчатых колес испытуемой коробки передач. Такая короткая кинематическая цепь обладает значительно большей жесткостью, чем кинематическая цепь автомобиля.

Масса маховика может изменяться при добавлении дополнительных дисков.

Кроме того, сила пружины в момент наибольшего ее сжатия при включении передачи $P = 85 \div 100 \text{ кг}$. Поскольку отношение плеч рычага переключения равно $\frac{100}{125} = 0,8$, то $P' = 70 \div 80 \text{ кг}$.

Таким образом, наибольшая величина силы, с которой контактируют переключаемые зубчатые колеса $P'' = 70 \div 80 \text{ кг}$.

Скорость переключения на стенде 5 см/сек .

Для того чтобы переключить с такой силой зубчатые колеса, шофер должен приложить усилие к верхнему длинному рычагу переключений $P'' = 20 \text{ кг}$. Практически шофер при переключении прилагает меньшую силу и производит включение значительно быстрее, что облегчает условия переключения.

Перечисленные факторы значительно ужесточают условия работы переключаемых зубчатых колес на стенде по сравнению с работой в движущемся автомобиле, поэтому износ переключаемых зубчатых колес на стенде происходит значительно быстрее.

На стенде проводилось испытание одного внешнего зацепления $m = 4,23 \text{ мм}$ и одного муфточного зацепления.

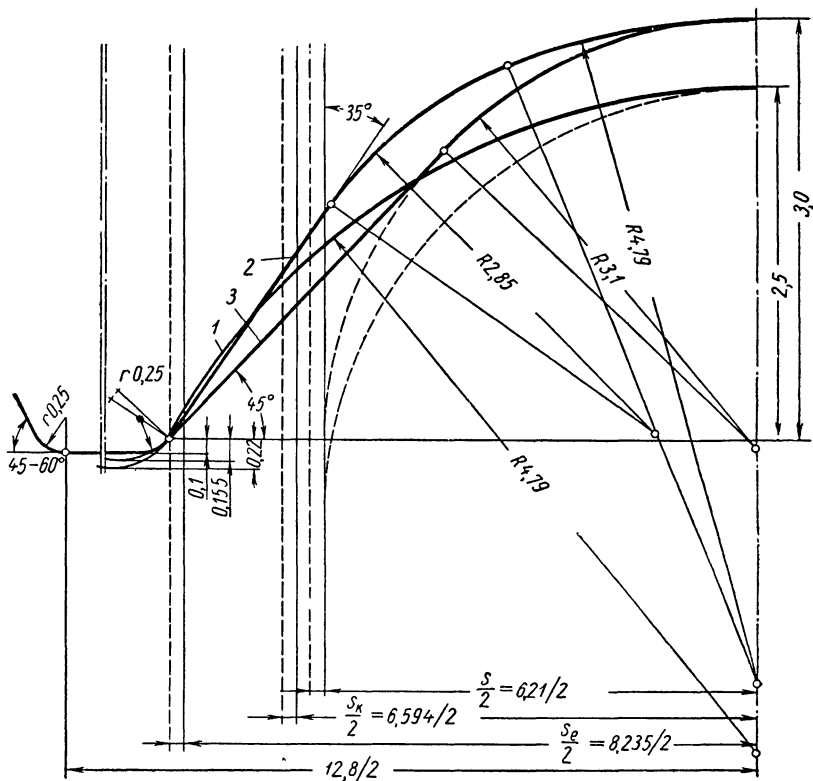
Испытания проводились при переменных факторах: различных рабочих профилях фрез, диаметрах фрез и радиусах закругления.

На фиг. 64 показаны три профиля закругления торца зуба зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127: 1 — полностью радиусный профиль с радиусом $r_{np} = 4,79 \text{ мм}$, 2 — профиль с радиусом при вершине $r_{np} = 4,79 \text{ мм}$, крайними участками профиля под углом 35° и промежуточным радиусом $2,85 \text{ мм}$, соединяющим по касательной крайние прямолинейные участки профиля закругления с его радиусной вершиной с $r_{np} = 4,79 \text{ мм}$; 3 — профиль с радиусом при вершине $3,1 \text{ мм}$ и крайними участками профиля под углом 45° , касательными к радиусной поверхности.

На фиг. 64 также указаны рекомендуемые радиусы закругления углов фрезы для уменьшения их износа. При таком закруглении углов глубина внутреннего рабочего профиля фрезы увеличивается на $0,1—0,22 \text{ мм}$. На фигуре также приведены толщины зуба зубчатого колеса: S — по делительной окружности; S_k — по

начальному контакту торцов сцепляемых зубчатых колес; S_e — по впадинам зубьев.

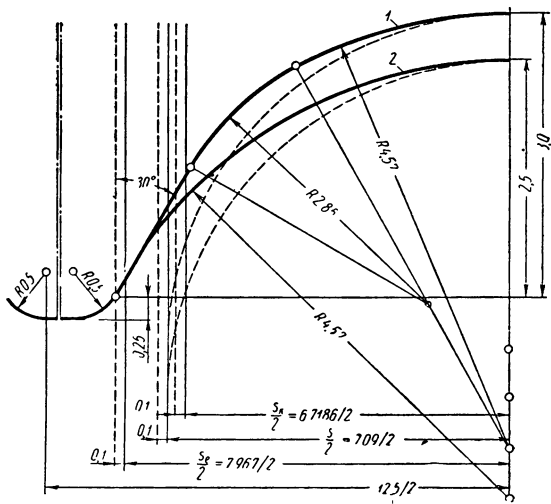
На фиг. 65 показаны два профиля закругления торца зуба вала-шестерни ЗИЛ 120-1701048, парно работающие с приведенными



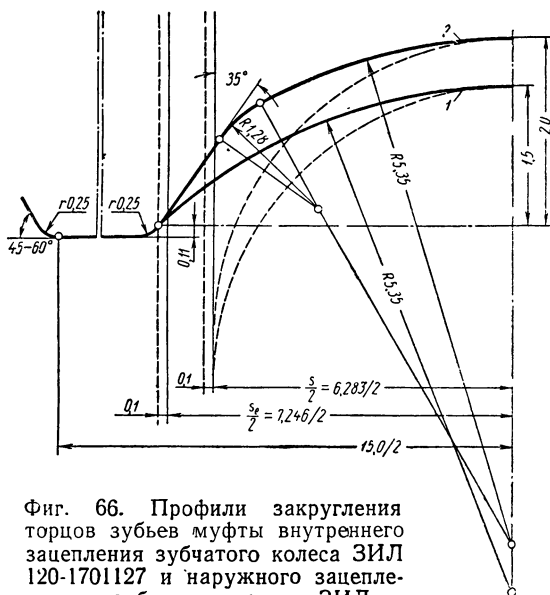
Фиг. 64. Профили закругления торца зуба зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127.

выше профилями закругления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127: 1 — полностью радиусный профиль с радиусом 4,57 мм; 2 — профиль с радиусом при вершине 4,57 мм, крайними участками профиля под углом 30° и промежуточным радиусом 2,85 мм, соединяющим по касательной крайние прямолинейные участки профиля закругления с его радиусной вершиной с $r_{np} = 4,57$ мм. Третий профиль (не показанный на фиг. 65) был аналогичен приведенному на фиг. 64, т. е. $r_{np} = 3,1$ мм и угол крайних участков профиля равен 45°.

Профили закругления торцов зубьев муфты внутреннего зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 и наружного зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701131 приведены на фиг. 66.



Фиг. 65. Профили закругления торца зуба вала-шестерни ЗИЛ 120-1701048.



Фиг. 66. Профили закругления торцов зубьев муфты внутреннего зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 и наружного зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701131.

На фигуре представлены два профиля закругления: 1 — полностью радиусный профиль с $r_{np} = 5,35$ мм; 2 — профиль с радиусом при вершине 5,35 мм, крайними участками профиля под углом 35° и промежуточным радиусом 1,28 мм, соединяющим по касательной крайние прямолинейные участки профиля закругления с его радиусной вершиной с $r_{np} = 5,35$ мм.

Для испытаний был принят только второй профиль.

Контакты двух закругленных зубьев зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 и вала-шестерни ЗИЛ 120-1701048 показаны на фиг. 67 и 68.

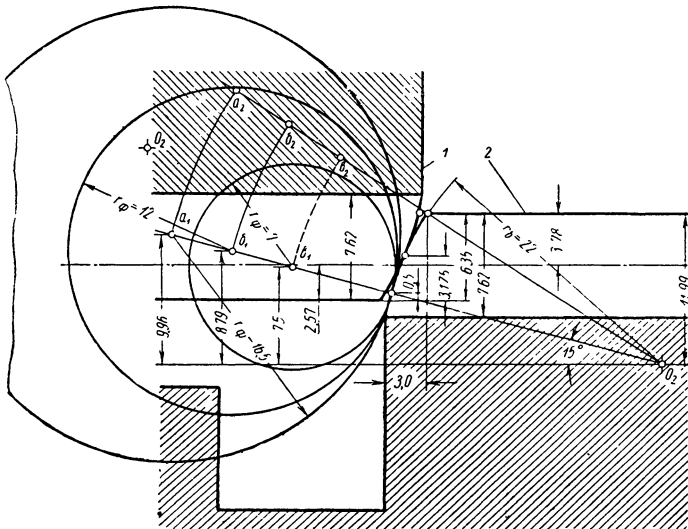
Расположение центра закругления, т. е. выбор величины $\alpha = 15^\circ$, было определено с учетом того, что по данным конструкторского отдела автозавода имени Лихачева для собираемости коробки передач необходимо, чтобы закругление вдоль высоты зуба не выступало за линию, проведенную под углом 15° к торцу венца. Это обстоятельство, а также величина радиуса закругления вдоль высоты зуба определили координаты центра закругления. При этом соблюдается условие, что при контактировании зубьев по средней линии, проведенной вдоль высоты зуба, контакт происходит посередине его высоты. На фигурах нанесены окружности фрез радиусом $r_\phi = 16,5; 12$ и 7 мм и указаны траектории движения ($a_1a_2; b_1b_2; v_1v_2$) и координаты центров фрез в положении конца врезания. Испытанию подвергались зубья, имеющие закругления вдоль высоты зуба по двум радиусам $r_\phi = 22$ мм (фиг. 67) и $r_\phi = 15$ мм (фиг. 68).

На фиг. 69 показан контакт двух закругленных зубьев муфты внутреннего зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 и наружного зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701131. На чертеже приведены все параметры аналогично ранее описанным чертежам фиг. 67 и 68.

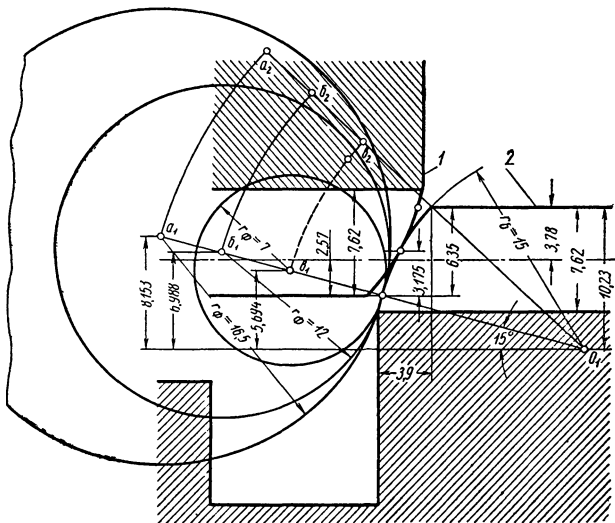
Обработка зубьев зубчатых колес $m = 4,23/3,175$ мм производилась фрезами двух диаметров, т. е. $d_\phi = 14$ и 33 мм. Зубчатые колеса ЗИЛ 120-1701127 имеют венец толщиной 5,5 мм. Диаметры фрез для зубозакругления были приняты из такого расчета, чтобы при работе фрезой меньшего диаметра торец венца полностью не прорезался, а при работе фрезой большего диаметра он прорезался полностью. Закругление зубьев муфт производилось фрезами диаметром $d_\phi = 27$ мм.

После закругления зубьев 55 зубчатых колес грузового автомобиля ЗИЛ-150 были отправлены на ЗИЛ для дальнейшей обработки по принятому на заводе технологическому процессу, включая термическую обработку. При обработке не было обнаружено никаких дефектов.

В табл. 20 приведены характеристики испытанных на стенде зубчатых колес, закругленных дисковой фасонной фрезой, а также пальцевой фрезой на автозаводе им. Лихачева. Все зубчатые колеса прошли одинаковую термическую обработку.



Фиг. 67. Контакт двух закругленных зубьев:
 1 — зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127; 2 — вала-шестерни
 ЗИЛ 120-1701048 ($r_{\sigma} = 22$ мм).



Фиг. 68. Контакт двух закругленных зубьев:
 1 — зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127; 2 — вала-шестерни
 ЗИЛ 120-1701048 ($r_{\sigma} = 15$).

Характеристика испытанных на стенде зубчатых колес

Валь-шестерни ЗИЛ 120-1701048						Зубчатое колесо ЗИЛ 120-1701127							
Индекс	Твердость HRC	Радиус впады высоты зуба в мм	Сдвиг угла ника копира в мм	Высота закругления в мм	Длина закругления в мм	Профиль	Индекс	Твердость HRC	Радиус впады высоты зуба в мм	Сдвиг угла ника копира в мм	Высота закругления в мм	Длина закругления в мм	Профиль
21	59—60	—	—	—	—	—	3-2В	59—60	—	—	—	—	—
11	60—61	—	—	—	—	—	5	59—60	—	—	—	—	—
3-2В	57—58	22	2,0	3,6	5,7—5,9	$r_{np}=4,57 \text{ мм}$ $\alpha = 30^\circ$	3-2В	59—60	22	2,0	3,7	6,8	$r_{np}=4,79 \text{ мм}$ $\alpha = 35^\circ$
В6	57—60	15	0,5	3,6	5,5—5,8	$r_{np}=4,57 \text{ мм}$ $\alpha = 30^\circ$	6В	56—57	15	0,5	4,0	5,9	$r_{np}=4,79 \text{ мм}$ $\alpha = 35^\circ$
В2	59—57	22	0,7	3,6	5,6—5,8	$r_{np}=3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$	2В	57—58	22	0,7	3,4	6,4—6,8	$r_{np}=3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$
22	58—60	—	—	—	—	—	15	59—60	—	—	—	—	—
В3	59—59	22	0,7	3,1	6,1—6,3	$r_{np}=4,57 \text{ мм}$ $\alpha = 30^\circ$	3В	56—57	22	0,7	3,5	6,5	$r_{np}=4,79 \text{ мм}$ $\alpha = 35^\circ$
В5	58—57	15	0,5	3,6	5,6	$r_{np}=3,1 \text{ мм}$ $\mu = 45^\circ$	5В	56—58	15	0,5	3,7	6,3	$r_{np}=3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$

Примечание. Обозначение В — диаметр фрезы 33 мм; В — диаметр фрезы 14 мм. Сдвиг А угольника копира при сохранении раз-
мера х (фиг. 70).

При сдвиге угольника копира на величину A (фиг. 70) (при сохранении расстояния x между центром фрезы и осью изделия) центр фрезы переместится из точки O_1 в точку O' на величину k , а центр закругления переместится из точки O в точку O'_1 . При этом углы β и α изменят свою величину и соответственно станут β' и α' . Сдвиг угольника, как показано на чертеже, приводит к большему спаду кривой закругления вдоль высоты зуба, а вследствие этого и к увеличению размера l до l' .

На опытных зубчатых колесах этот сдвиг делался для того, чтобы ужесточить условия испытания зубчатых колес, закругленных новым методом.

Основной целью испытаний была проверка допустимости по прочности зубчатого колеса, прорезания торца его венца, производимого при закруглении торцов зубьев с помощью нового метода. Поэтому для лучшей проверки были ужесточены условия испытаний на стенде по сравнению с переключением зубчатых колес в движущемся автомобиле. Кроме того, это уменьшало время испытания.

Предварительные испытания на стенде и наблюдения, проведенные в автобусном парке, показали, что при работе с указанными выше режимами и маховиком износ зубчатых колес происходит на стенде значительно быстрее, чем в автомобиле. Число переключений на один километр пути в движущемся автобусе (в условиях Москвы было по данным автобусного парка принято равным пяти).

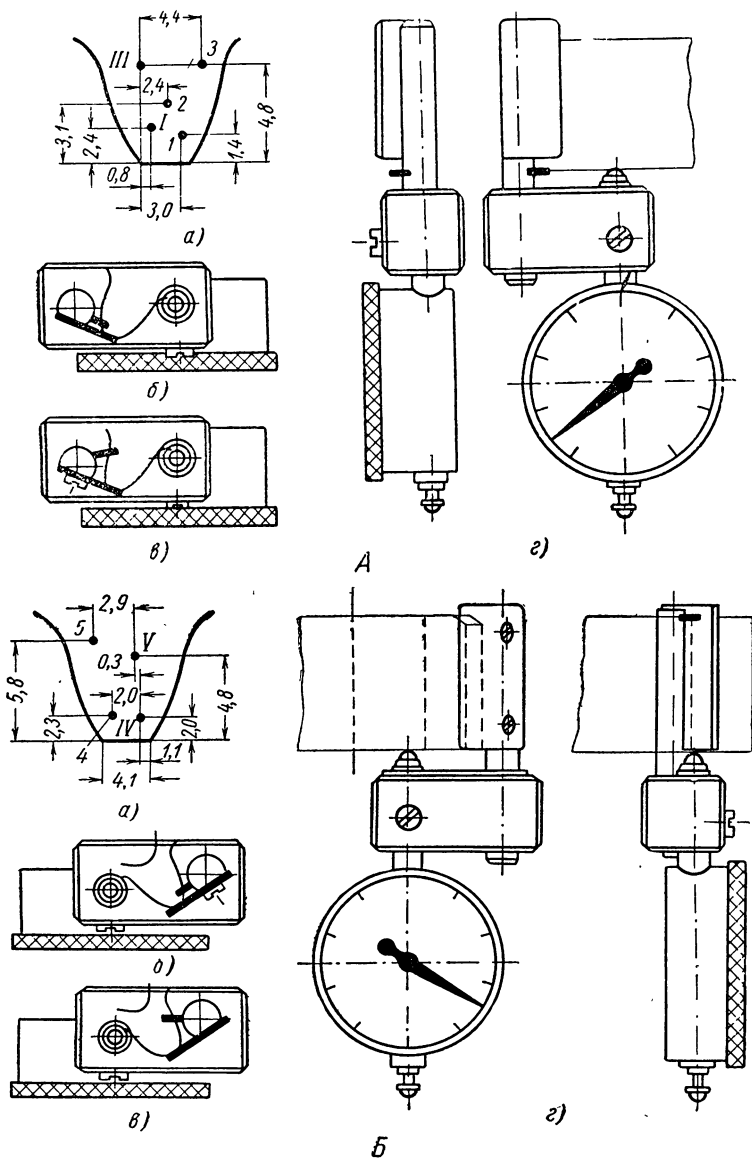
При проведении испытаний попутно с решением основной задачи была сделана попытка создать представление о сравнительном характере износа торцов зубьев во времени. После предварительных испытаний были выявлены целесообразные точки измерения износа на зубчатом колесе и на валу-шестерне и разработаны простые маленькие приборы.

На фиг. 71 показаны намеченные точки измерения износа для вала-шестерни и зубчатого колеса, а также схемы приборов, которыми производились измерения. На зубьях зубчатых колес делались пять замеров, а на зубьях валов-шестерен четыре замера. На каждом зубчатом колесе замерялся износ трех зубьев, расположенных примерно под углом 120° . Измеряемые зубья были занумерованы и их размеры замерены до испытания.

В процессе испытания измерялся также износ вершины зуба по толщине и длине. Осмотр зубчатых колес и их измерения производились в начале испытаний через каждые 10 000 циклов переключений, а в дальнейшем через 20 000 циклов переключений.

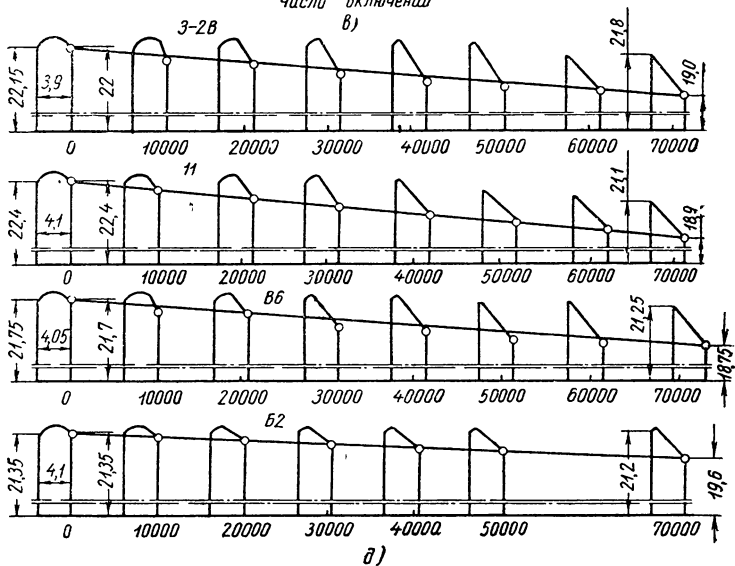
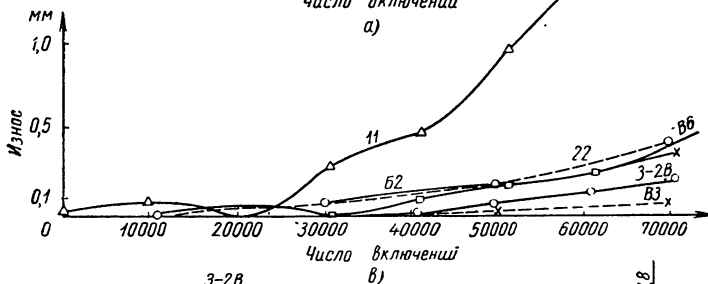
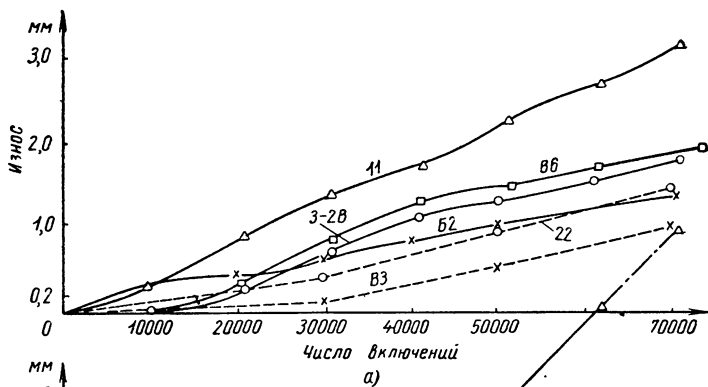
Каждая коробка передач испытывалась до 70 000 циклов включений.

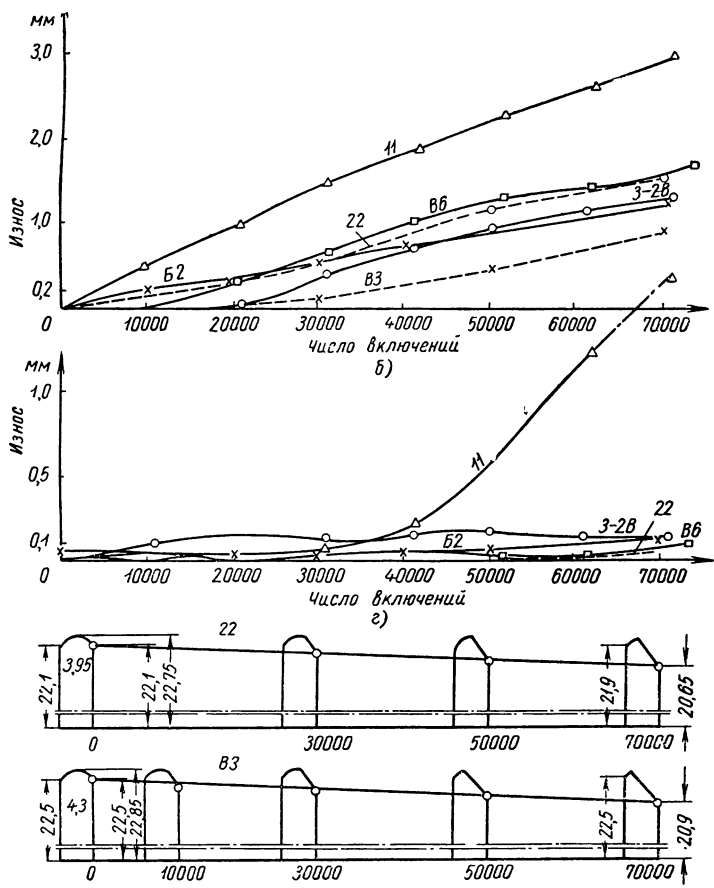
Результаты измерений износа испытываемых валов-шестерен ЗИЛ 120-1701048 и зубчатых колес ЗИЛ 120-1701127 приведены на фиг. 72 и 73 соответственно.



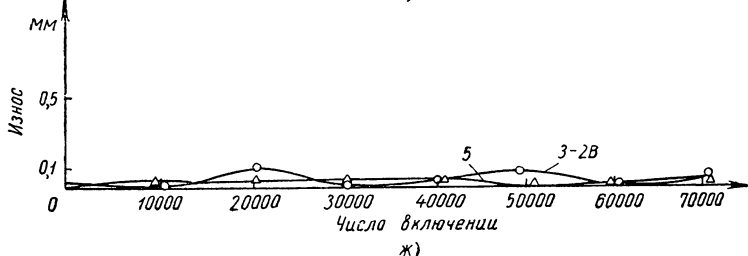
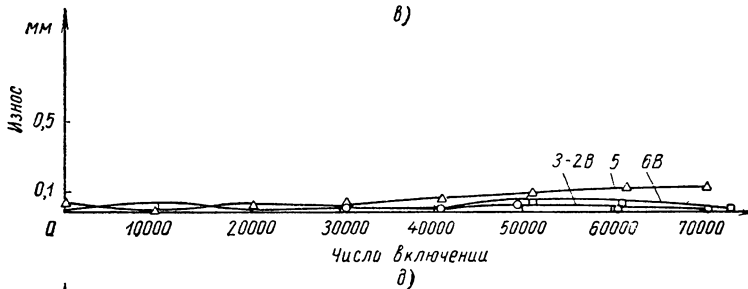
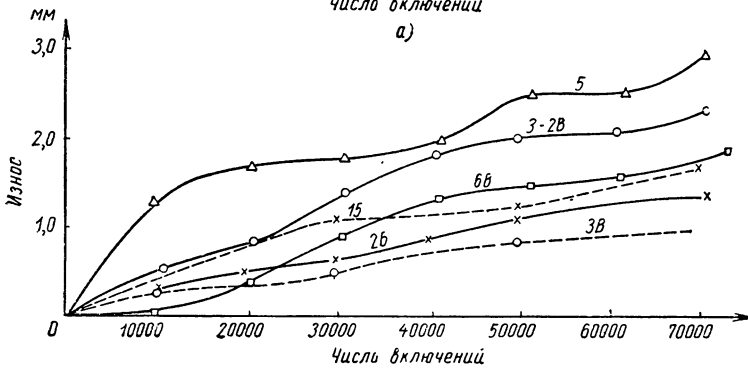
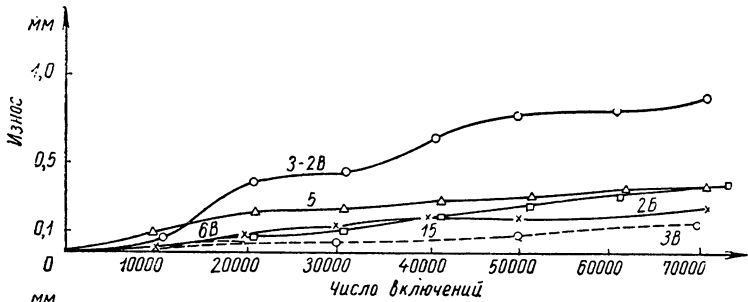
Фиг. 71. Схема и точки измерения износа торцов зубьев зубчатых колес:

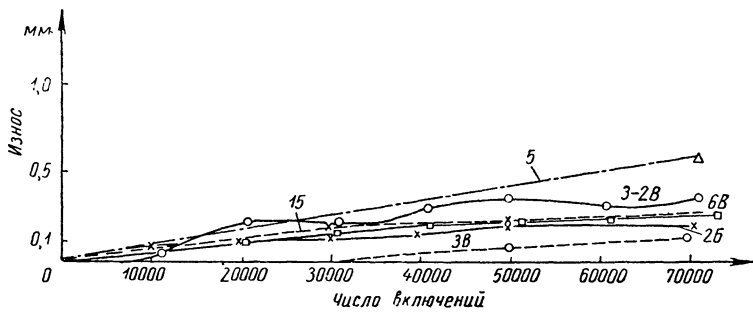
A — измерение износа торцевой поверхности зуба зубчатого колеса *a* — схема расположения точек замеров; *б* — схема замера износа в точке *I*; *в* — схема замера износа в точке *III*; *г* — прибор для измерения износа; *Б* — измерение износа торцевой поверхности зуба вала-шестерни; *а* — схема расположения точек замеров; *б* — схема замера износа в точке *IV*; *в* — схема замера износа в точке *V*; *г* — прибор для измерения износа.



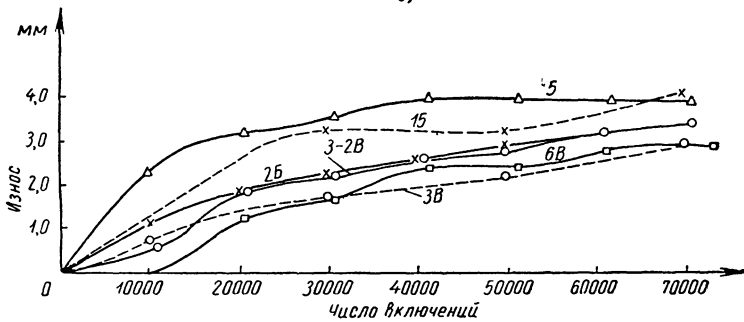


Фиг. 72. Результаты стендовых испытаний на включение торцов зубьев валов-шестерен ЗИЛ 120-1701048. Измерение износа:
 — через 10 000 включений; — — — через 20 000 включений. а — точка замера 1V; б — точка замера V; в — точка замера 4; г — точка замера 5; д — износ вершины зуба по длине и толщине.

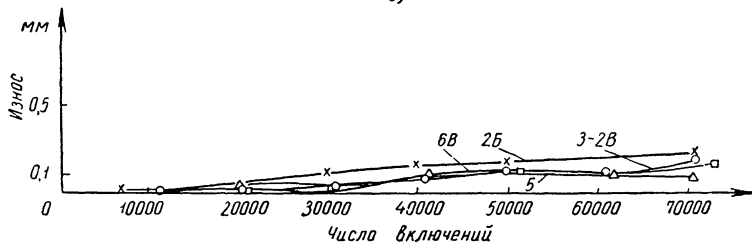




б)



в)



г)

Фиг. 73. Результаты стендовых испытаний на включение торцов зубьев зубчатых колес ЗИЛ 120-1701127. Измерение износа:
 — через 10 000 включений, — — — через 20 000 включений: а — точка замера I; б — точка замера III; в — износ вершины зуба по длине; г — износ вершины зуба по толщине; д — точка замера I; е — точка замера 2; ж — точка замера 3.

Как видно из фигур, в большинстве случаев более интенсивный износ происходит с той стороны зубьев, на которой точки замера износа обозначены римскими цифрами. Эту сторону зуба мы в дальнейшем будем называть рабочей.

Аналогичные точки замера износа на нерабочей части зуба и по делительной окружности обозначаются арабскими цифрами.

На верхних четырех графиках (фиг. 72 и 73) сплошными линиями нанесены результаты испытания, в которых износ измерялся через 10 000 циклов переключений, а штриховыми линиями нанесены результаты испытаний, в которых износ измерялся через 20 000 циклов переключений.

На графиках фиг. 72 и 73 представлены результаты испытания двух пар зубчатых колес, закругленных на автозаводе имени Лихачева с помощью пальцевой фрезы, и четырех пар зубчатых колес, закругленных новым методом.

При рассмотрении результатов испытания зубчатых колес следует иметь в виду, что износ зубьев вала шестерни ЗИЛ 120-1701048 в автомобилях происходит значительно интенсивнее, чем износ зубьев сопряженного зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127. Поэтому при анализе результатов испытания на это обстоятельство следует обратить внимание.

Износ нерабочей стороны зубьев всех валов-шестерен небольшой за исключением зубьев вала-шестерни 11, износ зубьев которого после 20 000 включений стал интенсивно увеличиваться и по нерабочей стороне. Зубья этого вала-шестерни были закруглены с помощью пальцевой фрезы и имели наибольший износ по всем точкам замера износа (фиг. 74).

Зубья второго вала-шестерни 22, которые были закруглены с помощью пальцевой фрезы имели меньший износ, но следует иметь в виду, что износ зубьев этого вала-шестерни измерялся через 20 000 циклов.

Можно предполагать, что каждая дополнительная разборка и сборка в начальный момент требует некоторой приработки за счет работы в условиях более густой смазки.

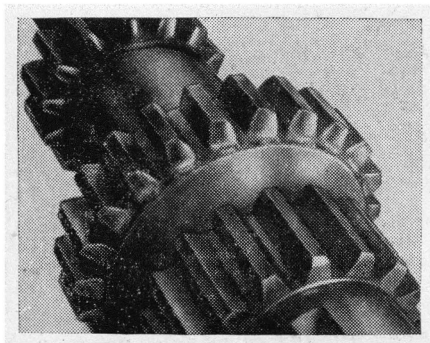
В таких же условиях, т. е. при измерении износа через 20 000 циклов переключений испытывался вал-шестерня В3, который имел значительно меньший износ (фиг. 75).

Из графика фиг. 72 видно, что как по наибольшей точке износа так и по общей его характеристике зубья, закругленные на автозаводе имени Лихачева с помощью пальцевой фрезы, имеют больший износ (несмотря на большую твердость), чем зубья, закругленные новым методом, в особенности зубья, закругленные по профилю деталей В3 и Б2.

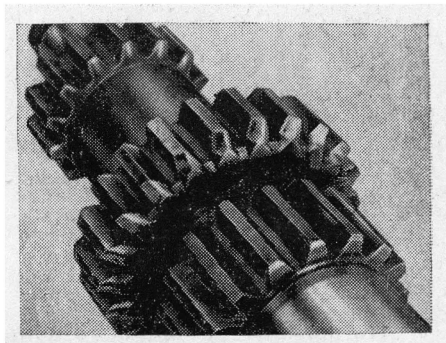
Износ зубьев в точке 4, закругленных новым методом (по профилю деталей В3, 3-2В и др.) меньше износа зубьев, закругленных с помощью пальцевой фрезы (11, 22).

В нижней части графика показан постепенно увеличивающийся во времени износ вершины зуба по толщине и длине.

Представляет интерес сопоставление различных профилей закругления. Валы-шестерни, зубья которых одинакового профиля, но разных радиусов закругления вдоль высоты зуба, замаркированные номерами ВЗ и В6, имели разный износ. Меньший износ оказался у зубьев вала-шестерни ВЗ, закругленных по радиусу вдоль высоты зуба 22 мм, в то время как зубья вала-шестерни В6 были закруглены по радиусу вдоль высоты зуба 15 мм. При этом следует отметить, что сравниваемые валы-шестерни по всем пока-



Фиг. 74. Износ торцов зубьев вала-шестерни ЗИЛ 120-1701048, закругленного с помощью пальцевой фрезы (деталь 11).



Фиг. 75. Износ торцов зубьев вала-шестерни ЗИЛ 120-1701048, закругленного новым методом (профилем деталей ВЗ).

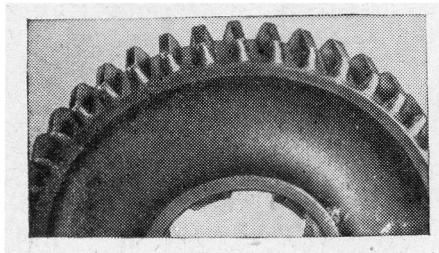
зателям идентичны. Износ зубьев парно работающих зубчатых колес протекал примерно аналогично, хотя был меньшей величины.

Два графика сверху и три графика снизу на фиг. 73 показывают изменение износа во времени по пяти точкам замера. Износ по нерабочей стороне (точки 1 и 3) и по делительной окружности (точка 2) весьма невелик и может не приниматься во внимание.

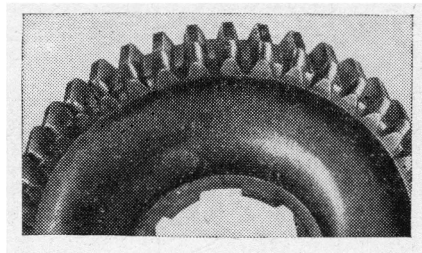
Если сопоставить износ по наибольшей точке износа и по общей характеристике износа (точки I и III), то зубья, закругленные с помощью пальцевой фрезы, имеют больший износ, чем зубья, закругленные новым методом, в особенности зубья, закругленные профилем 3В и 2Б, что совпадает с выводом, сделанным при рассмотрении износа зубьев валов-шестерен. Зубья зубчатых колес и валов-шестерен за все время испытания не имели никаких выкрашиваний и следов разрушений. Это относится как к зубчатым колесам, имевшим неполовностью прорезанные венцы (профили 3В, 6В, 3-2В), так и полностью прорезанные венцы (профиль 2Б). Наблюдения показали, что включаемость зубчатых колес, закруглен-

ных пальцевой фрезой, несколько худшая и по мере износа быстрее ухудшается.

На фиг. 72 также показан в виде двух графиков износ вершины зубьев по толщине и по длине зуба. Графики также подтверждают вывод о меньшем износе зубьев зубчатых колес, закругленных новым методом и о том, что наименьший износ имеют зубья зубчатых колес, закругленных профилями В3 и В2.



Фиг. 76. Износ торцов зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127, закругленного с помощью пальцевой фрезы профиля 5.



Фиг. 77. Износ торцов зубьев зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 профиля В3, закругленного по новому методу.

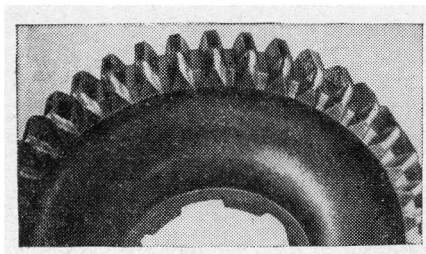
На фиг. 76—78 показан износ зубьев зубчатых колес после их испытания.

Наблюдения за износом зубьев муфт внутреннего зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 и наружного зацепления зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701131 показали, что этот износ значительно

меньше, чем износ рассмотренного выше зацепления и не имеют решающего значения; вместе с тем следует отметить, что зубья, имевшие закругления с помощью нового метода, изнашивались меньше и не имели ни одного выкрашивания или разрушения.

Таким образом, на основании проведенных стендовых испытаний, можно сделать следующие выводы:

1. За все время испытаний не имело место ни одного случая выкрашивания или разрушения испытываемых зубчатых колес, закруг-



Фиг. 78. Износ торцов зубьев зубчатого колеса ЗИЛ 120-1701127 профиля В2, закругленного по новому методу.

ленных различными профилями с помощью нового метода как с полностью, так и с неполностью прорезанными торцами венца; при этом толщина венца зубчатых колес была около 5,5 мм, что говорит о допустимости врезания в торец зубчатого колеса, т. е.

о допустимости изменения формы торца венца, вызываемого применением нового метода зубозакругления.

2. Проведенные измерения износа зубчатых колес показали, что износ зубьев зубчатых колес, закругленных новым методом, меньше износа зубьев, закругленных пальцевой фрезой и он протекает у первых равномернее.

3. При закруглении новым методом профили закругления В3 и Б2 обеспечивают меньший износ, чем другие. Профиль В3 имеет радиус при вершине $r_{np} = 4,79$ и $4,57$ мм, крайние прямолинейные участки под углом $35-30^\circ$ и дополнительный радиус, соединяющий по касательной прямолинейные участки с радиусом при вершине $r'_{np} = 2,85$ мм. Профиль Б2 имеет радиус при вершине $r_{np} = 3,1$ мм и крайние участки профиля по касательной к этому радиусу под углом 45° .

4. Для испытуемых колес радиус закругления вдоль высоты зуба $r_6 = 22$ мм по сравнению с радиусом закругления вдоль высоты зуба $r_6 = 15$ мм обеспечивает меньший износ зубьев зубчатых колес.

5. Следует продолжить работы по исследованию торца зуба зубчатых колес и уточнению профилей закругления. В частности в направлении уменьшения расстояния от центра закругления до середины зуба, что может дать дальнейшее уменьшение износа.

На третьем этапе контрольных испытаний проводились ходовые испытания зубчатых колес тех же профилей закругления на автобусах (см. табл. 21), имеющих в условиях эксплуатации в Москве наибольшее число переключений зубчатых колес на единицу пути (в среднем на 1 км пути пять циклов включений).

Испытанию подвергались 12 коробок передач, в которых были установлены зубчатые колеса, закругленные с помощью нового метода, и зубчатые колеса, закругленные на автозаводе им. Лихачева с помощью пальцевой фрезы. Из 12 коробок передач 8 имели зубчатые колеса, закругленные новым методом, а 4 коробки, закругленные пальцевой фрезой.

При прохождении каждого технического осмотра производилось обследование коробок передач и фиксация состояния испытуемых зубчатых колес. Каждый из автобусов, с установленными коробками передач, с зубчатыми колесами, закругленными новым методом, прошел около 80 000—100 000 км, что по приближенным данным соответствует 500 тыс. переключений испытуемых зубчатых колес. Коробки с зубчатыми колесами, закругленными пальцевыми фрезами, были сняты с автобусов после 40 000—50 000 км ввиду их износа.

В результате проведенных испытаний установлено, что за прошедшее время не имело места ни одного случая выкрашивания или разрушения зубчатых колес, закругленных новым методом, как с полностью, так и с неполностью прорезанным торцом венца. При этом толщина венца зубчатых колес была около 5,5 мм.

Характеристика зубчатых колес, подвергнутых ходовым испытаниям

Вал-шестерня ЗИЛ 120-1701048						Зубчатое колесо ЗИЛ 120-1701127							
Индекс	Твердость НРС	Радиус впады высоты зуба в мм	Высота за- круглениия в мм	Длина за- круглениия в мм	Свистг уголъ- ника в мм	Профиль	Индекс	Твердость НРС	Радиус впады высоты зуба в мм	Высота за- круглениия в мм	Длина за- круглениия в мм	Свистг уголъ- ника в мм	Профиль
16	58—61	—	—	—	—	—	16	59—58	—	—	—	—	—
1В	57—59	22	3,4	5,9—6,0	—	$r_{np} = 4,57 \text{ мм}$	1В	56—58	22	3,7	6,3	—	$r_{np} = 4,79 \text{ мм}$
18	57—58	—	—	—	—	—	11	56—57	—	—	—	—	—
3-2В	57—59	22	3,6—3,7	5,7—5,9	2,0	$r_{np} = 4,57 \text{ мм}$ $\alpha = 30^\circ$	3-2В	57—58	22	3,1	6,2	2,0	$r_{np} = 4,79 \text{ мм}$ $\alpha = 35^\circ$
2В	55—60	22	3,2	5,5—5,7	0,7	$r_{np} = 3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$	2В	57—58	22	3,3	6,7	0,7	$r_{np} = 3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$
4В	58—59	15	3,5	6,1	—	$r_{np} = 4,57 \text{ мм}$	4В	57—58	15	3,8	6,3	—	$r_{np} = 4,79 \text{ мм}$
3-3-В	58—60	22	3,9	5,5—5,7	3,0	$r_{np} = 4,57 \text{ мм}$ $\alpha = 30^\circ$	3-3-В	58—59	22	3,9	6,8	3,0	$r_{np} = 4,79 \text{ мм}$ $\alpha = 35^\circ$
5В	59—60	15	3,6	5,9	0,5	$r_{np} = 3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$	5В	57—58	15	4,2	6,4—6,7	0,5	$r_{np} = 3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$
13	58—60	—	—	—	—	—	13	56—57	—	—	—	—	—
14	58—60	—	—	—	—	—	5В-В	58—57	15	4,0	6,5	0,5	$r_{np} = 3,1 \text{ мм}$ $\alpha = 45^\circ$
6В	57—58	15	3,6	5,5—5,6	0,5	$r_{np} = 4,57 \text{ мм}$ $\alpha = 30^\circ$	6В	57—58	15	3,5	6,4	0,5	$r_{np} = 4,79 \text{ мм}$ $\alpha = 35^\circ$
3В	57—58	22	3,4—3,5	6,1—6,2	0,7	$r_{np} = 4,57 \text{ мм}$ $\alpha = 30^\circ$	3В	57—58	22	3,2	6,3	0,7	$r_{np} = 4,79 \text{ мм}$ $\alpha = 35^\circ$

Зубчатые колеса, закругленные новым методом, имели более равномерный и меньший по величине износ, чем зубчатые колеса, закругленные с помощью пальцевой фрезы.

Отмечено, что зубчатые колеса, закругленные новым методом, имеют лучшую включаемость, чем зубчатые колеса, закругленные на автозаводе имени Лихачева с помощью пальцевой фрезы.

Таким образом ходовые испытания подтвердили стендовые испытания.

Все три этапа контрольных испытаний подтверждают полную допустимость внесения изменений в форму торца зуба зубчатых колес, вызываемых применением нового метода закругления.

Положительные результаты были получены также при испытаниях на ГАЗе зубчатых колес, закругленных новым методом.

ПРИСПОСОБЛЕНИЯ И СТАНКИ ДЛЯ НОВОГО МЕТОДА ЗУБОЗАКРУГЛЕНИЯ

Для осуществления нового метода зубозакругления в ЭНИМСе и при участии ЭНИМСа в СКБ8 были разработаны новые зубозакругляющие приспособления и станки.

Кинематика разработанного зубозакругляющего оборудования разделяется на две основные группы (см. фиг. 20), обеспечивающие обработку вдоль высоты зуба: 1 — путем перемещения обрабатываемой поверхности вокруг центра закругления; 2 — путем перемещения центра инструмента вокруг центра закругления.

В каждой группе эти движения могут осуществляться путем качания или двух движений, из которых одно направлено вдоль высоты зуба, а другое в поперечном к нему направлении. Каждое из этих кинематических движений вдоль высоты зуба должно осуществляться в сочетании с предварительным врезанием в торец венца зубчатого колеса (при обработке в направлении от корня зуба) или без такового (при обработке в направлении от вершины зуба). Врезание в торец венца зубчатого колеса может происходить при использовании инструмента с зубьями, расположенными на одной окружности, за счет относительного перемещения изделия или инструмента в направлении, перпендикулярном (или близком к нему) к торцу венца зубчатого колеса (фиг. 20, стрелка К), или за счет инструмента, имеющего участок, на котором каждый последующий зуб имеет большую высоту (подъем на зуб).

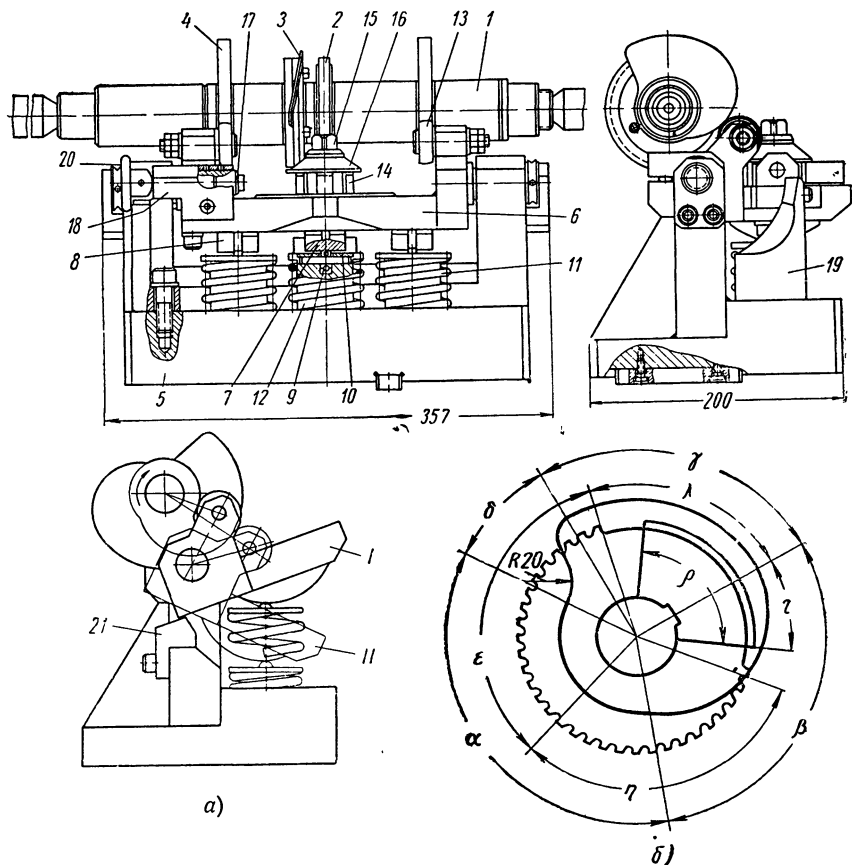
1. ЗУБОЗАКРУГЛЯЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ ОБРАБОТКУ ВДОЛЬ ВЫСОТЫ ЗУБА БЛАГОДАРЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОКРУГ ЦЕНТРА ЗАКРУГЛЕНИЯ¹

Зубозакругляющее приспособление мод. ЛП-475 к горизонтально-фрезерному или токарному полуавтомату

На фиг. 79 приведена конструкция опытного зубозакругляющего приспособления ЛП-475 к горизонтально-фрезерному станку, изготовленного для закругления зубьев зубчатых колес станка 1К62 ($m = 3$ мм; $z = 45$) [6].

¹ Разработано автором при участии А. Ф. Духовского, Ю. И. Шкода, Б. И. Дороднова, О. К. Гвоздева, Ю. Н. Короткова и др.

На шпиндельной оправке 1 приспособления установлены инструмент 2, поворотный диск 3, два сменных кулака 4 и промежуточные кольца. Все перечисленные детали, а также инструмент, бази-



Фиг. 79. зубозакругляющее приспособление ЛП-475 к горизонтальному фрезерному станку (а) и схема расположения на оправке режущего инструмента и поворотного сегмента, относительно кулачка (б):

$\alpha = 126^\circ$ соответствует малой окружности на кулачке (работает режущий инструмент с подъемом зуба); $\beta = 110^\circ$ — подъему на кулачке по спирали Архимеда (работает режущий инструмент без подъема зуба); $\gamma = 90^\circ$ — большой окружности на кулачке (работает сегмент поворотный); $\delta = 74^\circ$ — кривой спада на кулачке (происходит возврат стола приспособления в исходное положение); $\epsilon = 80^\circ$ — режущему инструменту с подъемом зуба; $\zeta = 112^\circ$ — режущему инструменту без подъема зуба; $\lambda = 78^\circ$ — от режущей кромки первого зуба до оси шпонки; $\rho = 82^\circ$ — винтовой части сегмента поворотного; $\tau = 34^\circ$ — от начала сегмента поворотного до оси шпонки.

руются на шпонке и зажимаются гайкой. Такая шпиндельная оправка может устанавливаться в центрах или при наличии конуса в конусное шпиндельное отверстие станка.

На суппорте токарного станка или на столе фрезерного станка крепится корпус 5 приспособления. В корпусе 5 на центрах установлен поворотный столик 6. В центральной отверстии столика 6 закреплен фасонный валик 7 с радиусной головкой. На торцевой поверхности головки имеется радиусный паз. Две головки 8 с радиусными пазами прикреплены к столику по краям. Дном трех пазов столик опирается через подшпипники 9 оси 10 и стаканы 11 на три пружины 12, вставленные вторым концом в отверстие корпуса. С двух сторон столик имеет боковые вертикальные стенки, в отверстия которых вставлены и закреплены эксцентричные оси, на которых установлены ролики 13. Ролики прижимаются под действием трех пружин к кулакам 4 и, таким образом, кулаки, установленные на шпиндельной оправке 1, управляют движениями столика 6. В выточку столика 6 вставлен упорный шарикоподшипник, на верхнее кольцо которого опирается обрабатываемая заготовка зубчатого колеса.

Внутренним шлицевым отверстием заготовка зубчатого колеса насаживается на шлицевую втулку 14. Зажим обрабатываемой заготовки производится с помощью винта 15 через упорный подшпипник и шайбу 16. В таком положении заготовка зубчатого колеса, зажата между двумя упорными подшпипниками, может вращаться вокруг своей оси.

Фиксация положения заготовки во время обработки производится с помощью фиксатора 17, перемещающегося в корпусе 18 и входящего во впадину между зубьями зубчатого колеса. Корпус 18 закреплен на столике 6. Таким образом, обрабатываемая заготовка остается в зафиксированном положении во время вращения столика. В конце вращения столика фиксатор с помощью установленного на корпусе 5 упора 19 за укрепленную на конце фиксатора кнопку 20 выводится из впадины между зубьями заготовки. При вращении столика в обратную сторону кнопка 20 сходит с упора 19 и фиксатор вводится во впадину между зубьями под действием пружины.

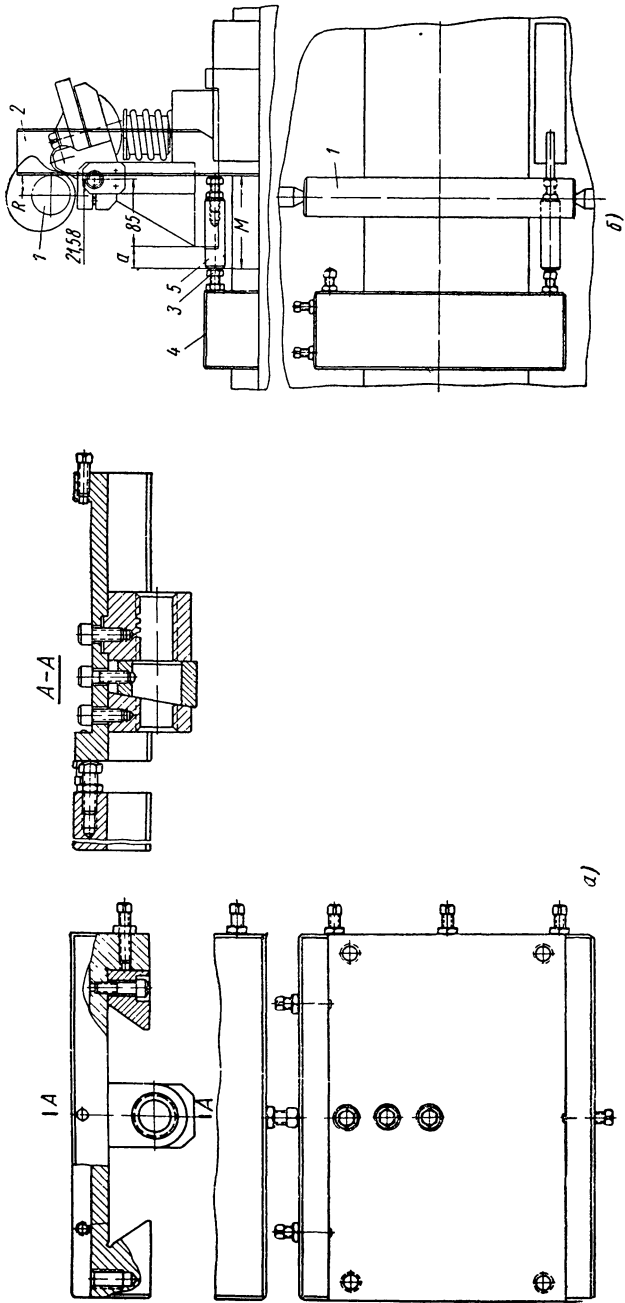
Упоры 21, установленные на задней стенке приспособления, ограничивают вращение столика 6 вверх.

При использовании приспособления на токарном станке оно крепится к переходной плите (фиг. 80, а), устанавливаемой на направляющие поперечного суппорта станка. Регулировка положения приспособления производится следующим образом: к центральной оправке 1 с радиусом R (фиг. 80, б), касательно подводится угольник 2. Расстояние от вертикальной плоскости угольника до упорной головки 3 упора 4.

$$M = a + 85 - 21,58 + R = 63,42 + a + R,$$

где R — радиус оправки;

a — расстояние от торцевой плоскости переходной плиты до опорных концов винтов, в которые упирается торец корпуса приспособления.



Фиг. 80. Схемы:
 а — расположения приспособления на токарном станке; б — определения установочных размеров приспособления до углов.

После закрепления упора в правильном положении угольник и регулируемый штихмасс *5* убираются, а корпус приспособления своей боковой стороной упирается в головку упора. В таком положении обеспечивается требуемое расстояние между центрами вращения инструментального вала и поворотного столика. На приспособлении можно осуществить ряд вариантов обработки. Первый вариант предусматривает врезание на полную глубину профиля закругления торцовой части зуба, фрезерование вдоль высоты зуба и поворот зубчатого колеса на следующий зуб (см. фиг. 79, б). Для выполнения этого варианта используются два кулака и фреза, форма которых соответствует указанной выше схеме обработки.

При прохождении кулаков, имеющих цилиндрические поверхности малого радиуса, по роликам *13* (фиг. 79, а) столик *6* стоит на месте, а инструмент врезается в торец зубчатого колеса. По мере вращения кулаков поверхности кулаков, имеющие постепенный подъем от малого к большому радиусу, вступают в контакт с роликами *13*. При прохождении по роликам этих частей кулаков столик *6* сообщается вращение относительно его центров, а инструмент осуществляет фрезерование по радиусу r_6 вдоль высоты зуба зубчатого колеса. В конце вращения столика, когда обработка вдоль высоты зуба почти закончена, кнопка фиксатора *20* находит на упор *19* и фиксатор *17* выводится из впадины между зубьями.

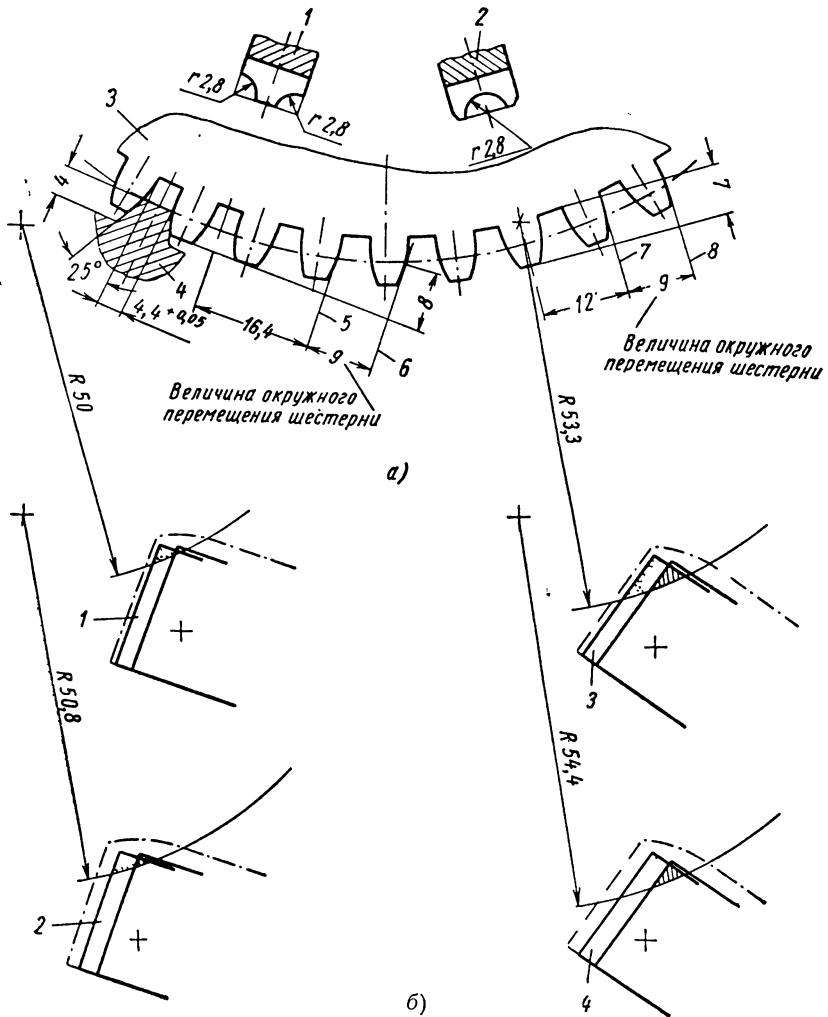
При прохождении по роликам цилиндрических поверхностей кулаков больших радиусов, столик *6* стоит на месте и с помощью винтового сегмента происходит поворот зубчатого колеса на один шаг.

При прохождении по роликам поверхностей кулаков, соединяющих цилиндрические поверхности больших и малых радиусов, столик *6* сообщается вращение в обратном направлении, при этом фиксатор *17* вводится во впадину между зубьями и столик *6* возвращается в исходное положение.

На фиг. 81 показаны схемы контактов винтового сегмента с боковой поверхностью зуба и размеры винтового сегмента для случаев обработки закругления по зубу, т. е. когда инструмент имеет профиль, полностью охватывающий зуб и закругления по впадине, т. е. когда профиль инструмента охватывает две половины соседних зубьев.

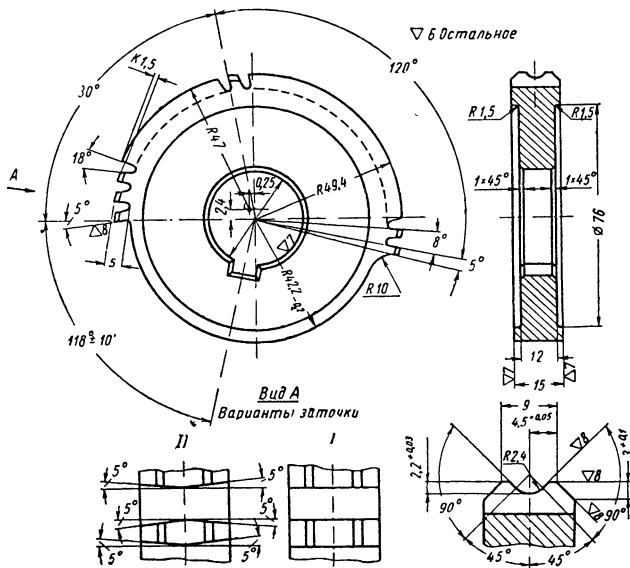
Для обоих случаев приведены установочные размеры поворачиваемой поверхности винтовых сегментов от середины инструмента, их диаметры, размеры фиксатора.

Инструмент (фиг. 82) для осуществления этого варианта обработки имеет, соответственно схеме, приведенной на фиг. 79, б, участок, осуществляющий врезание, на котором каждый последующий зуб имеет подъем за счет расположения зубьев на радиусе из центра, смещенного относительно центра вращения, и участок, осуществляющий фрезерование торцовой поверхности зуба вдоль его

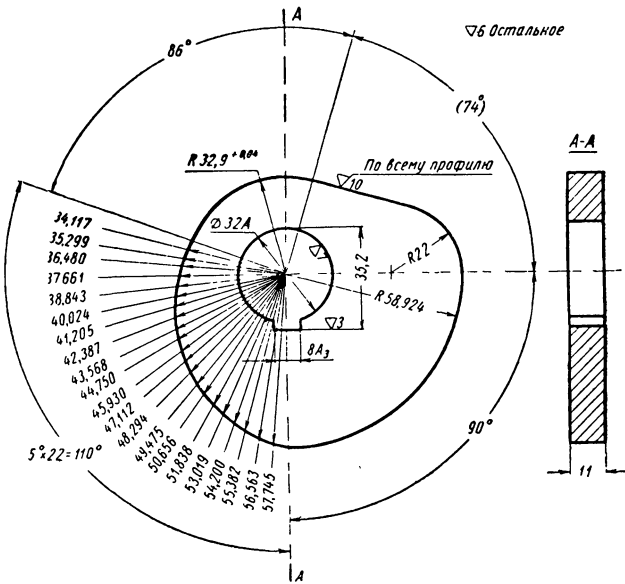


Фиг. 81. Схемы контактов винтового сегмента с боковой поверхностью зубчатого колеса $m=3$ мм, $z=45$ в начале и конце поворота:

a — рабочий профиль инструмента при обработке по впадине и зубу и линии контакта винтового сегмента с боковой стороной зуба; 1 — рабочий профиль инструмента при обработке по впадине; 2 — рабочий профиль инструмента при обработке по зубу; 3 — часть зубьев зубчатого колеса; 4 — головка фиксатора; 5 — линия касания сегмента в конце поворота зубчатого колеса, обрабатываемого инструментом с рабочим профилем 1; 6 — линия касания сегмента в начале поворота зубчатого колеса, обрабатываемого инструментом с рабочим профилем 1; 7 — линия касания сегмента в конце поворота зубчатого колеса, обрабатываемого инструментом с рабочим профилем 2; 8 — линия касания сегмента в начале поворота зубчатого колеса, обрабатываемого инструментом с рабочим профилем 2; 9 — радиусы поворотных сегментов при обработке по направлению от впадины и вершины зуба; 1 — при обработке по направлению от впадины зуба (вариант первый) инструментом с рабочим профилем 2; 2 — при обработке по направлению от впадины зуба (вариант первый) инструментом с рабочим профилем 1; 3 — при обработке по направлению от вершины зуба (второй вариант) инструментом с рабочим профилем 2; 4 — при обработке по направлению от вершины зуба (второй вариант) инструментом с рабочим профилем 1.



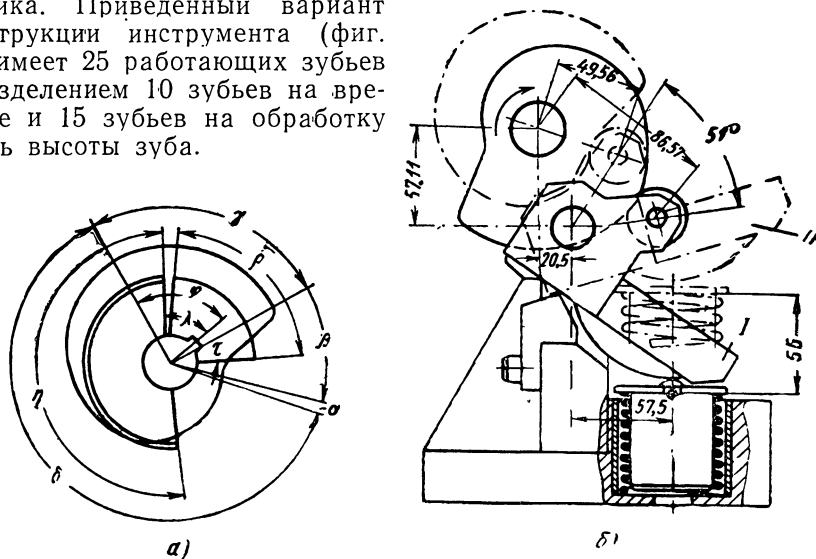
Фиг. 82. Комбинированный инструмент для зубозакругления зубчатых колес $t = 3$ мм по направлению от впадины зуба (вариант первый).



Фиг. 83. Кулак для обработки по направлению от впадины зуба (вариант первый).

высоты, на котором зубья расположены на радиусе из центра вращения.

Зубья инструмента, осуществляющие врезание, расположены на центральном угле 80° , а осуществляющие фрезерование вдоль высоты зуба расположены на центральном угле 112° . Соответственно этому спроектированы кулаки (фиг. 83), управляющие движением столика. Приведенный вариант конструкции инструмента (фиг. 82) имеет 25 работающих зубьев с разделением 10 зубьев на врезание и 15 зубьев на обработку вдоль высоты зуба.



Фиг. 84. Схема обработки (вариант второй) на приспособлении, показанном на фиг. 79.

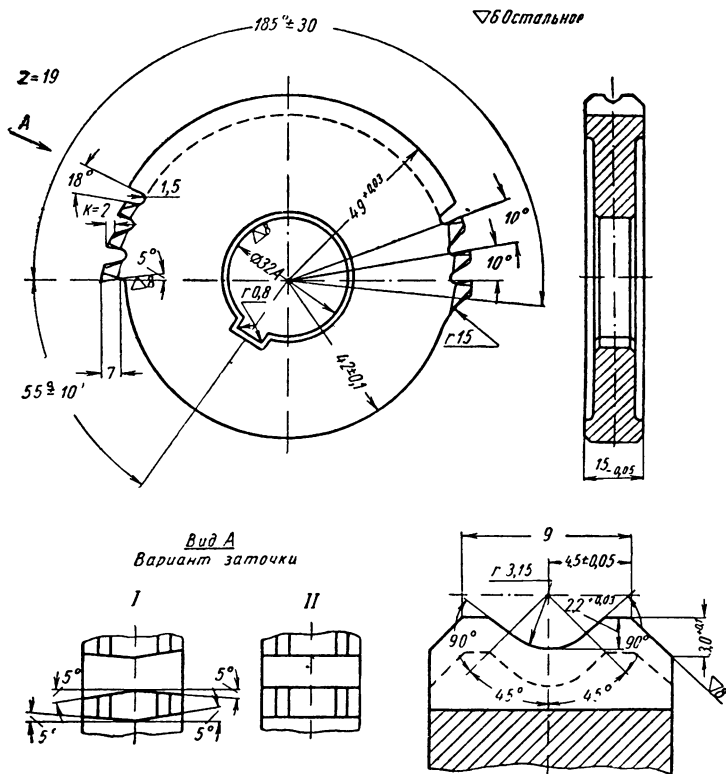
a — схема относительного расположения на оправке инструмента, поворотного сегмента и кулаков: $\alpha = 3^\circ$ — запасный угол на кулаке (режущий инструмент вышел из зацепления с обрабатываемым изделием); $\beta = 43^\circ$ — подъем кривой кулака, обеспечивающий возврат столика приспособления в исходное положение; $\gamma = 90^\circ$ — угол кулака, при повороте на который происходит поворот зубчатого колеса на следующий зуб; $\delta = 224^\circ$ — угол на кулаке, при повороте на который работает режущий инструмент; $\eta = 184^\circ$ — угол инструмента, на котором расположены режущие зубья (от режущей кромки первого зуба до режущей кромки последнего зуба); $\rho = 82^\circ$ — центральный угол винтового сегмента; $\lambda = 55^\circ$ — угол от режущей кромки первого зуба инструмента до оси шпонки; τ — угол от начала сегмента до оси шпонки; $\varphi = 81^\circ$ — от начала спада кривой на кулаке до оси шпонки; *b* — схема поворота стола приспособления: *I* — положение столика с обрабатываемым изделием в начале обработки вдоль высоты зуба; *II* — положение столика с обрабатываемым изделием в конце обработки вдоль высоты зуба.

Как видно из чертежа, участок врезания расположен эксцентрично относительно оси вращения. Смещение относительно центра составляет 0,25 мм по горизонтали и 2,4 мм по вертикали, что обеспечивает следующие подъемы на зуб:

№ зуба	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Подъем на зуб в мм . .	0,32	0,32	0,31	0,30	0,25	0,22	0,19	0,14	0,10	0,05	0,00

На приспособлении предусмотрена также возможность обработки закругления по направлению от вершины зуба к его основанию (второй вариант). При этом производится фрезерование за-

кругления бочкообразной формы по направлению от вершины зуба с поворотом зубчатого колеса на следующий зуб (фиг. 84). Фрезирование начинается тогда, когда начало поверхности кулака, имеющей постепенное снижение от большого радиуса к меньшему, подходит к ролику. При этом столик (положение I) с установленной



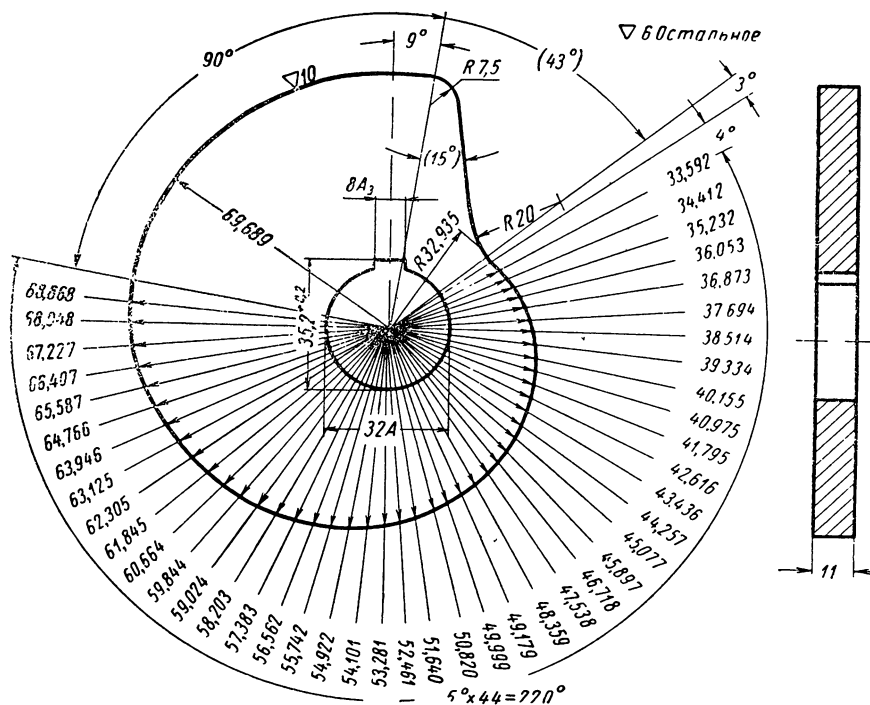
Фиг. 85. Инструмент для зубозакругления по направлению от вершины зуба (второй вариант).

на нем заготовкой зубчатого колеса начинает вращаться. Вращение продолжается до конца обработки (положение II), после чего ролик контактирует с поверхностью кулака, соединяющей конец поверхности, имеющей спуск, с цилиндрической поверхностью большого радиуса. Столик *б* (см. фиг. 79) быстро вращается в обратную сторону, возвращаясь в исходное положение. В этом положении фиксатор выведен из впадины. С помощью винтового сегмента происходит поворот зубчатого колеса на один зуб.

В отличие от первого варианта (см. фиг. 79, б) инструмент по второму варианту имеет зубья, вершины которых расположены на одной окружности, проведенной из центра вращения. Часть фрезы

не имеет зубьев. При прохождении этого участка инструмента с помощью винтового сегмента происходит поворот обрабатываемого зубчатого колеса на один зуб.

В соответствии со схемой второго варианта обработки (фиг. 84) и диаметром инструмента, положенного в основу созданного приспособления, инструмент (фиг. 85) имеет зубья, расположенные на центральном угле 180° с центральным углом между зубьями 10° .



Фиг. 86. Кулак для обработки по направлению от вершины зуба (второй вариант).

На фиг. 86 показан кулак для этого варианта обработки.

Определим геометрические параметры приспособления, обеспечивающие осуществление требуемой кинематики. Угол поворота стола при обработке по первому варианту (фиг. 87, а).

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \angle AOD &= \frac{D+r}{OD-iA}; \quad OD = \sqrt{OC^2 - CD^2} = \sqrt{r_6^2 - (0,3m)^2} = \\ &= \sqrt{13,5^2 - 0,9^2} = \sqrt{182,25 - 0,81} = \sqrt{181,44} = 13,47 \text{ мм;} \end{aligned}$$

здесь

$$r_6 = 4,5m = 4,5 \cdot 3 = 13,5 \text{ мм;}$$

$$E = r_6 - \frac{1}{2} \sqrt{4r_6^2 - (2MN)^2} = r_6 - \frac{1}{2} \sqrt{4r_6^2 - (2 \cdot 2,5m)^2} =$$

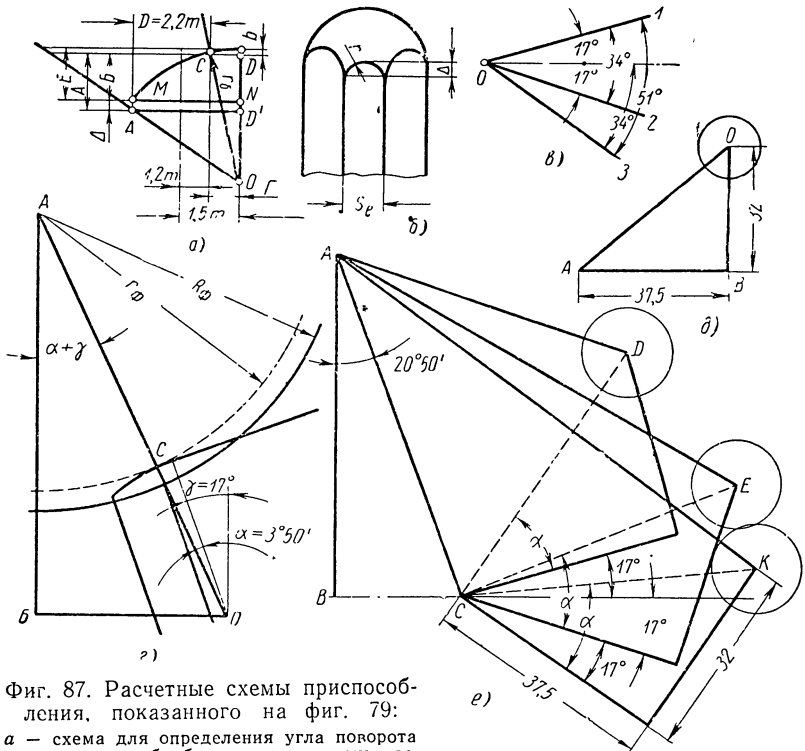
$$= 13,5 - \frac{1}{2} \sqrt{4 \cdot 13,5^2 - (5m)^2} = 2,275 \text{ мм.}$$

$$B = E - b.$$

где

$$b = r_6 - OD = 13,5 - 13,47 = 0,03 \text{ мм; } B = 2,275 - 0,03 = 2,245 \text{ мм.}$$

Определяем толщины зубьев для зубчатого колеса указанных ниже размеров. Наружный диаметр зубчатого колеса $D_e = 141 \text{ мм}$,



Фиг. 87. Расчетные схемы приспособления, показанного на фиг. 79:

a — схема для определения угла поворота стола при обработке по первому варианту; *b* — зуб со стороны вершины; *в* — расположение угла поворота столлика при обработке по первому и второму варианту; *г* — схема для определения расстояния между центрами инструмента и закругления вдоль высоты зуба; *д* — положение опорного ролика, через который кулак сосбщает столу различные положения; *е* — расчет большого и малого радиуса кулачков.

следовательно радиус $r_e = 70,5 \text{ мм}$, $t = 3 \text{ мм}$, $z = 45$, высота зуба $h = D = 2,2 \text{ m} = 2,2 \cdot 3 = 6,6 \text{ мм}$; $h'' = 1,2 \text{ m} = 1,2 \cdot 3 = 3,6 \text{ мм}$.

Толщина зуба по делительной окружности

$$S = \frac{t}{2} = \frac{\pi m}{2} = \frac{3,14 \cdot 3}{2} = 4,71 \text{ мм.}$$

Толщина зуба по окружности выступов, т. е. у вершины зуба

$$S_e = 2R_e \left(\frac{S}{2r_\partial} + \text{inv}\alpha_{o_s} - \text{inv}\alpha_{x_e} \right),$$

где

$$\alpha_{o_s} = 20^\circ; \quad \text{inv}\alpha_{o_s} = 0,014907; \quad 2r_\partial = d_\partial = m \cdot z = 3 \cdot 45 = 135 \text{ мм};$$

$$\cos\alpha_{x_e} = \frac{r_\partial}{R_e} \cos\alpha_{o_s} = \frac{67,5}{70,5} \cdot 0,93969 = 0,999668;$$

$$\alpha_{x_e} = 25^\circ 53';$$

$$\text{inv} 25^\circ 53' = 0,0334652.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} S_e &= 2 \cdot 70,5 \left(\frac{4,71}{2 \cdot 67,5} + 0,014907 - 0,033465 \right) = \\ &= 141 (0,0348889 + 0,014904 - 0,033465) = \\ &= 141 \cdot 0,016279 = 2,3022339 = 2,3 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Толщина зуба по окружности впадин

$$S_i = 2R_i \left(\frac{S}{2r_\partial} + \text{inv}\alpha_{o_s} - \text{inv}\alpha_{x_i} \right),$$

где

$$2R_i = D_i = D_e - 2h = 141 - 2 \cdot 6,6 = 127,8 \text{ мм}.$$

$$R_i = \frac{127,8}{2} = 63,9 \text{ мм}, \quad \alpha_{o_s} = 20^\circ; \quad \text{inv} 20^\circ = 0,014904;$$

$$\cos\alpha_{x_i} = \frac{r_\partial}{R_i} \cos\alpha_{o_s} = \frac{67,5}{63,9} \cos 20^\circ = 1,05634 \cdot 0,93969 = 0,9926321;$$

$$\alpha_i = 6^\circ 57' 36''; \quad \text{inv} 6^\circ 57' 36'' = 0,00060108;$$

$$\begin{aligned} S_i &= 127,8 \left(\frac{4,71}{2 \cdot 67,5} + 0,014904 - 0,00060108 \right) = \\ &= 127,8 \cdot 0,0491982 = 6,2867376 \approx 6,30 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Определяем величину Δ (фиг. 87, б)

$$\Delta = r_{np} - \frac{1}{2} \sqrt{4r_{np}^2 - S_e^2}.$$

Решаем это уравнение для двух значений радиуса $r_{np} = 2,4$ и $3,15$ мм:

$$\Delta_1 = 2,4 - \frac{1}{2} \sqrt{23,04 - 5,29} = 2,4 - 2,1065 = 0,2935 \text{ мм};$$

$$\Delta_2 = 3,15 - \frac{1}{2} \sqrt{36,69 - 5,29} = 3,15 - 2,9325 = 0,2175 \text{ мм}.$$

Тогда (фиг. 87, а)

$$A_1 = B + \Delta_1 = 2,245 + 0,2935 = 2,5385 \approx 2,6 \text{ мм};$$

$$A_2 = B + \Delta_2 = 2,245 + 0,2175 = 2,4625 \approx 2,5 \text{ мм}.$$

Определим величину углов:

$$\text{tg}' \sphericalangle AOD = \frac{D + \Gamma}{OD - A_1} = \frac{2,2m + 0,3m}{13,47 - 2,6} = \frac{7,5}{10,87} = 0,68997;$$

$$\text{tg}'' \sphericalangle AOD = \frac{D + \Gamma}{OD - A_2} = \frac{2,2m + 0,3m}{13,47 - 2,5} = \frac{7,5}{10,97} = 0,68368.$$

$$\sphericalangle AOD = 34^\circ 36' \div 34^\circ 22'.$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{CD}{OD} = \frac{0,9}{13,47} = 0,06681; \quad \alpha = 3^\circ 49' 5'' \approx 3^\circ 50'.$$

Таким образом, необходимый угол поворота столика при обработке вдоль высоты зуба

$$\beta = \sphericalangle AOD - \alpha = 34^\circ 36' - 3^\circ 51' = 30^\circ 46'.$$

При разработке чертежей приспособления угол поворота столика был принят 34° .

При обработке по второму варианту, когда столик вращается против часовой стрелки, необходимый угол поворота столика вокруг центра 51° вместо 34° по первому варианту (фиг. 87, в). Верхнее положение 1 столика относительно горизонтали остается таким же, что и при ранее описанном варианте, а нижнее положение 2 опускается на 17° (положение 3). Эти величины были определены графически.

Расстояние между осью инструментальной оправки и осью, проходящей через центр, вокруг которого поворачивается заготовка зубчатого колеса (фиг. 87, г)

$$AO = OC + AC = r_\sigma + r_\phi = 13,5 + 47,2 = 60,7 \text{ мм},$$

где r_ϕ принят $47,2 \text{ мм}$.

$$\sphericalangle AOB = \alpha + \gamma = 3^\circ 50' + 17^\circ = 20^\circ 50';$$

$$BO = AO \cos \sphericalangle AOB = 60,7 \cos 20^\circ 50' = 60,7 \cdot 0,93462 = 56,7314 \text{ мм};$$

$$AB = AO \sin 20^\circ 50' = 60,7 \cdot 0,35565 = 21,588 \text{ мм}.$$

Положение опорного ролика, через который кулак сообщает столу различные положения, показано на фиг. 87, д.

$$AO = \sqrt{32^2 + 37,5^2} = 49,275 \cong 49,3 \text{ мм};$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{OB}{AB} = \frac{32}{37,5} = 0,85333; \quad \alpha = 40^\circ 28' 30''.$$

Произведем расчет большого и малого радиусов кулаков (фиг. 87, е):

$$\Rightarrow ACB = 90^\circ - 20^\circ 50' = 69^\circ 10';$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow ACD &= 180^\circ - \Rightarrow ACB - 17^\circ - \alpha = 180^\circ - 69^\circ 10' - \\ &- 17^\circ - 40^\circ 28' 30'' = 180^\circ - 126^\circ 38' 30'' = 53^\circ 21' 30''; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow ACE &= 180^\circ - \Rightarrow ACB + 17^\circ - \alpha = 180^\circ - 69^\circ 10' + \\ &+ 17^\circ - 40^\circ 28' 30'' = 197^\circ - 109^\circ 38' 30'' = 87^\circ 21' 30''; \end{aligned}$$

$$\Rightarrow ACK = 180^\circ - \Rightarrow ACB - \alpha + 34^\circ = 214^\circ - 109^\circ 38' 30'' = 104^\circ 21' 30''.$$

Из треугольника ACD сторона

$$\begin{aligned} AD &= \sqrt{AC^2 + CD^2 - 2AC \cdot CD \cos \Rightarrow ACD} = \\ &= \sqrt{60,7^2 + 49,3^2 - 2 \cdot 60,7 \cdot 49,3 \cdot 0,39681} = 50,4287637 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Из треугольника ACE сторона

$$\begin{aligned} AE &= \sqrt{AC^2 + CE^2 - 2AC \cdot CE \cos 87^\circ 21' 30''} = \\ &= \sqrt{60,7^2 + 49,3^2 - 2 \cdot 60,7 \cdot 49,3 \cdot 0,04609} = 76,414203 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Из треугольника ACK сторона

$$\begin{aligned} AK &= \sqrt{AC^2 + CK^2 - 2AC \cdot CK \cos 104^\circ 21' 30''} = \\ &= \sqrt{60,7^2 + 49,3^2 + 2 \cdot 60,7 \cdot 49,3 \cdot 0,24799} = 87,1734 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Таким образом, наименьший радиус цилиндрической части кулаков для всех вариантов обработки будет

$$r_k = AD - r_{\text{пол}} = 50,4288 - 17,5 = 32,9283 \text{ мм.}$$

Наибольший радиус цилиндрической части кулаков для первого варианта обработки определяется по формуле

$$R_k = AE - r_{\text{пол}} = 76,4142 - 17,5 = 58,9142 \text{ мм.}$$

Наибольший радиус цилиндрической части кулаков для второго варианта обработки

$$R'_k = AK - r_{\text{пол}} = 87,1734 - 17,5 = 69,6734 \text{ мм.}$$

Разность между наибольшим и наименьшим радиусами кулаков составит:

для первого варианта обработки

$$58,9142 - 32,9288 = 25,9914 \text{ мм} \approx 25,990 \text{ мм};$$

для второго варианта обработки

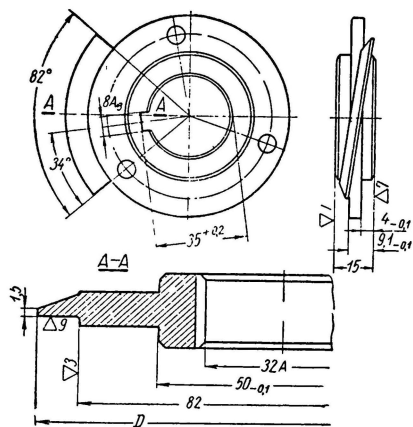
$$69,6734 - 32,9288 = 36,7446 = 36,745 \text{ мм.}$$

Как было указано выше, диаметры винтовых сегментов определялись графически (см. фиг. 81). Шаг винтовых сегментов рассчитывается с учетом того, что заготовку зубчатого колеса надо по-

вернуть на 9,1 мм; при этом винтовой сегмент расположен на центральном угле 82°.

$$S = \frac{360 \cdot 9,1}{82} = \frac{3276}{82} = 39,95 \approx 40 \text{ мм.}$$

Винтовые сегменты для разных вариантов обработки отличаются друг от друга диаметрами (фиг. 88 и 81).



Фиг. 88. Поворотный сегмент.

Для первого варианта употребляются два винтовых сегмента диаметрами 100 и 101,6 мм.

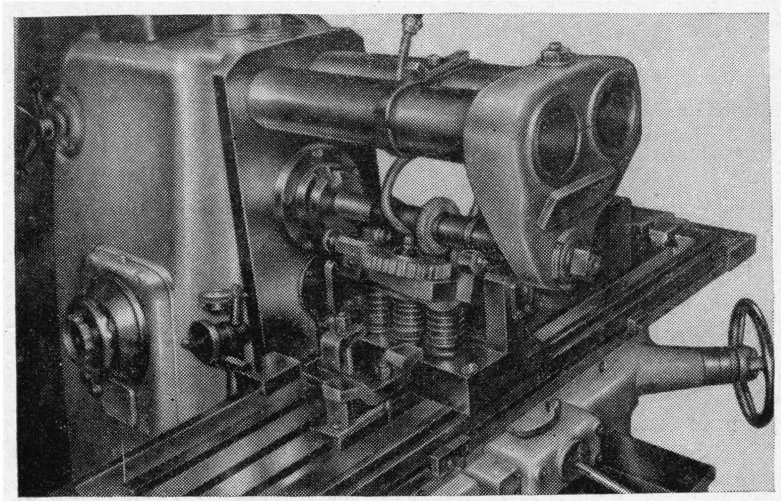
Для второго варианта винтовые сегменты имеют диаметры 106,6 и 108,8 мм.

В каждой группе один винтовой сегмент предназначен для обработки по впадине, а другой для обработки по зубу (см. фиг. 81).

Для обработки по первому варианту приняты три пружины 7×65×140 Д81-1. Величина сжатия каждой пружины под нагрузкой $P_1 = 46$ кг составляет $H_1 = 140 - 114 = 26$ мм, а под нагрузкой $P_2 = 117$ кг — $H_2 = 140 - 75 = 65$ мм.

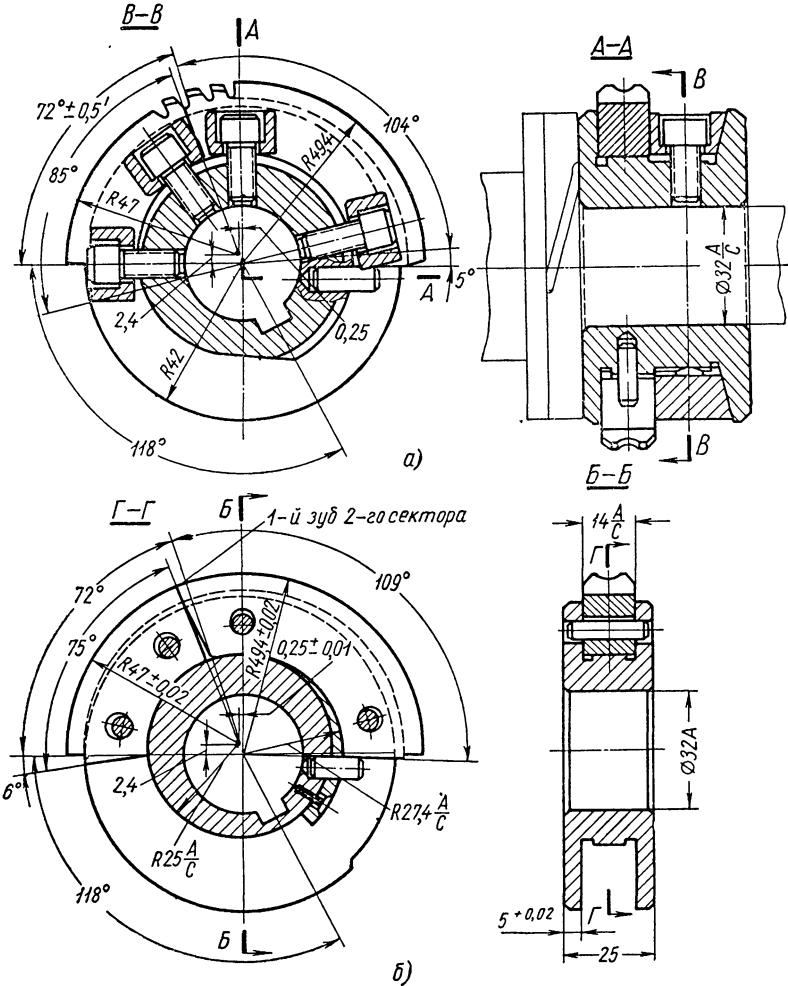
Таким образом, рабочий ход пружины $H_2 - H_1 = 65 - 26 = 39$ мм. Три пружины под нагрузкой P_1 обеспечивают прижатие

Зубозакругляющее приспособление, показанное на фиг. 79, установлено на горизонтально-фрезерном станке.



Фиг. 89. Зубозакругляющее приспособление, показанное на фиг. 79, установленное на горизонтально-фрезерном станке.

роликов к кулакам с общей силой $46 \times 3 = 138 \text{ кг}$, а под нагрузкой P_2 с силой $117 \times 3 = 351 \text{ кг}$. Для обработки по второму варианту принята пружина $5 \times 60 \times 160 \text{ Д81-1}$. Величина сжатия пружины под нагрузкой $P_1 = 21 \text{ кг}$ составляет $H_1 = 160 - 114 = 46 \text{ мм}$, а под



Фиг. 90. Сборный инструмент, обеспечивающий врезание в торец венца зубчатого колеса и последующую обработку вдоль высоты зуба.

нагрузкой $P_2 = 45 \text{ кг}$ $H_2 = 160 - 62 = 98 \text{ мм}$. Таким образом, рабочий ход пружины $H_2 - H_1 = 98 - 46 = 52 \text{ мм}$. Три пружины под нагрузкой P_2 обеспечат прижатие роликов к кулакам с силой

$45 \times 3 = 135$ кг. Весь цикл обработки одного зуба на приспособлении (фиг. 89) при 120 об/мин составляет 0,5 сек. Это соответствует скорости резания инструмента $v = 35$ м/мин.

На фиг. 90 приведены два варианта конструкции сборного инструмента, обеспечивающего врезание в торец венца зубчатого колеса путем подъема зубьев и последующую обработку вдоль высоты зуба участком инструмента, зубья которого расположены на окружности, проведенной из центра вращения инструмента. Эти инструменты имеют постоянный корпус. Сменными являются только инструментальные сегменты, изготовление которых значительно легче, чем фрез, показанных на фиг. 82.

На фиг. 90, а приведен вариант сборного инструмента с креплением сегментов с помощью клиньев и опорной поверхностью для сегментов, обработанной с соответствующим смещением.

На фиг. 90, б приведен другой вариант сборного инструмента, в котором крепление сегментов производится с помощью шпилек, а опорная база для сегментов получается путем установки эксцентричного вкладыша. Вкладыш может быть установлен и в первом варианте конструкции.

Зубозакругляющий полуавтомат на базе горизонтально-фрезерного станка мод. 6М-82Г

Кинематическая схема зубозакругляющего устройства полуавтомата мод. ЛП-538 показана на фиг. 91, а общий вид на фиг. 92.

Как видно из схемы необходимые формообразующие движения по требуемой траектории осуществляет обрабатываемая поверхность зубчатого колеса.

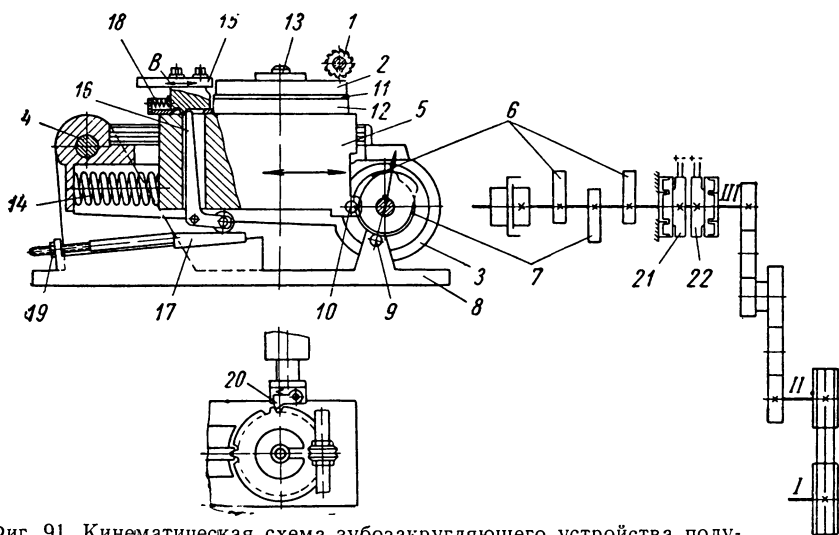
Процесс округления состоит из двух этапов: 1) врезания инструмента 1 (фиг. 91) в торец зубчатого колеса 2, осуществляемого путем поворота качалки 3 с установленным на ней изделием вокруг оси вала 4; 2) обработки округления вдоль высоты зуба при относительном перемещении изделия и инструмента по заданной траектории за счет двух движений, т. е. продолжающегося вращения качалки 3 и перемещения по качалке ползушки 5.

Перемещение качалки и ползушки осуществляется с помощью кулаков 6 и 7, установленных на одной оси.

На стол горизонтально-фрезерного станка (фиг. 91 и 92), устанавливается зубозакругляющее устройство.

В шпиндель станка помещается оправка с фрезой. Винт продольного хода стола со станка снят. Перемещение стола осуществляется с помощью пневматического цилиндра с ходом 150 мм, укрепленного на правом торце стола. На левом торце стола укреплен упор продольного хода стола. Этот же узел включает приспособление для перемещения зубозакругляющего устройства, необходимое при переналадке станка на обработку зубчатого колеса другого диаметра.

С задней стороны стола на плите закреплены воздухораспределитель, управляющий цилиндром подвода и отвода стола и цилиндром зажима и разжима обрабатываемого зубчатого колеса. Для осуществления приведенной выше схемы вращательное движение, кроме установленной в шпинделе фрезерного станка фрезы, должно быть сообщено кулачковому валу. Это движение осуществляется от винта *I* поперечной подачи станка (фиг. 91) через клиноремен-

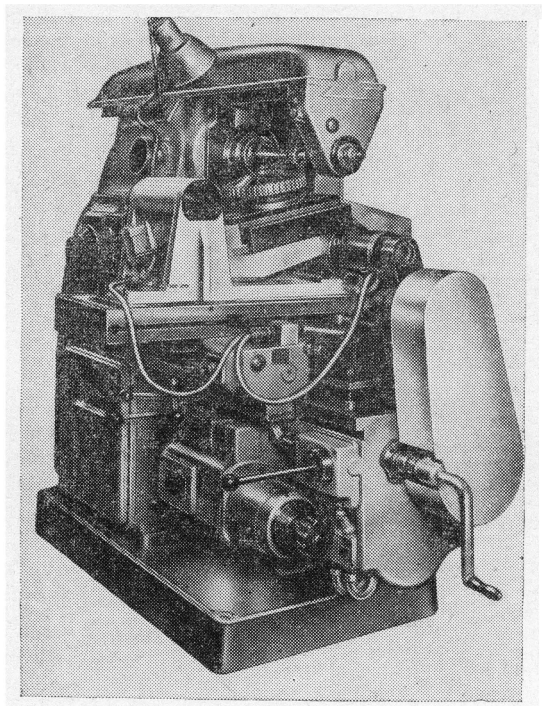


Фиг. 91. Кинематическая схема зубзакругляющего устройства полуавтомата мод. ЛП-538.

ную передачу и систему зубчатых колес, передающих вращение от вала *II* на кулачковый вал *III*, с установленными на нем кулаками 6 и 7. Кулаки, вращаясь, своей рабочей поверхностью контактируют с установленными на основании 8 роликами 9 для качания качалки и с роликом 10 для перемещения ползушки. Обрабатываемое зубчатое колесо установлено на планшайбе 11, прикрепленной к столику 12, установленному в отверстии ползушки. Планшайба со столиком может свободно поворачиваться, опираясь при этом на упорный шарикоподшипник. Крепление обрабатываемого изделия производится с помощью штока 13 пневматического цилиндра. Возврат ползушки в исходное положение производится с помощью пружины 14. Во время обработки зубчатое колесо стопорится фиксатором 15. Фиксатор выводится из впадины между зубьями зубчатого колеса с помощью рычага 16, упирающегося одним концом в ползун фиксатора, а другим, через установленный на нем ролик, в плоскость упора 17. Фиксатор вводится в пространство между зубьями зубчатого колеса с помощью пружины 18, при подъеме качалки (и вследствие этого, отсутствия контакта рычага

с упором). Упор может перемещаться с помощью гайки 19. Тем самым может быть отрегулировано положение фиксатора относительно обрабатываемого зубчатого колеса.

Обработка торцевой поверхности зуба производится за один проход. После обработки каждого зуба должен осуществляться по-



Фиг. 92. Полуавтомат мод. ЛП-538.

ворот колеса на один шаг. Это совершается следующим образом. По завершении обработки каждого зуба качалка опускается в нижнее положение. Рычаг фиксатора, упираясь в упор, выводит фиксатор из впадины между зубьями.

Ползушка с обрабатываемым изделием под действием пружины возвращается в исходное положение. Зуб зубчатого колеса упирается в собачку 20, а зубчатое колесо поворачивается на шаг. При рабочем ходе ползушки изделие зафиксировано фиксатором и зуб, упираясь в собачку, отжимает ее за счет сжатия упирающейся в собачку пружины. При подводе стола до упора он нажимает на конечный выключатель и начинается процесс обработки. Качалка в это время должна стоять в определенном положении, обеспечивающем свободный проход торца обрабатываемого колеса под ин-

струментом. С этой целью во время деления на последний зуб зубчатого колеса прикрепленный к столику 12 торцовый кулачок через специальный рычаг нажимает на конечный выключатель, установленный внутри зубозакругляющего устройства, который подготавливает схему к отключению. Затем производится обработка последнего зуба. При опускании качалки после обработки последнего зуба замыкается низковольтный контакт, установленный в задней части зубозакругляющего устройства, который при помощи электромагнитных муфт 21 и 22 производит отключение вращения кулачкового вала и быстрое торможение для останова качалки в нужном положении. Одновременно с помощью воздухораспределителя дается команда на отвод стола горизонтально-фрезерного станка в положение загрузки и на освобождение крепления обрабатываемого зубчатого колеса.

Таким образом, станок имеет следующий цикл работы:

1. Вручную или автоматически (в зависимости от назначения станка) устанавливается и снимается изделие и нажимается электрическая кнопка.

2. Автоматически;

а) зажимается изделие и стол с изделием подводится в зону обработки до упора;

б) включается вращение кулачкового вала, который обеспечивает осуществление полной обработки изделия, включая деление и фиксацию;

в) кулачковый вал останавливается в требуемом положении;

г) стол с изделием отводится из зоны обработки, изделие освобождается от крепления и шпиндель инструмента останавливается.

Зубозакругляющий полуавтомат мод. ЛП-538 имеет следующую характеристику: 1) наибольший диаметр обрабатываемого зубчатого колеса 250 мм; 2) наименьший диаметр обрабатываемого зубчатого колеса 100 мм; 3) наибольший модуль обрабатываемого колеса — 10 мм; 4) числа оборотов кулачкового вала приведены в табл. 22; 5) числа оборотов фрезерного шпинделя: 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600.

Полуавтомат мод. ЛП-538 работает при следующих условиях: обработка — фрезой диаметром 50 мм, скорость резания — до $v = 50$ м/мин, подача при врезании — 0,15 мм/зуб, окружная подача при обработке вдоль высоты зуба — до 0,9 мм/зуб. Обработке подвергаются зубчатые колеса тракторов $m = 5/3,75$; $z = 46$ из стали 18ХГТ. В качестве охлаждающей жидкости применяется эмульсия. Полуавтомат показал в работе хорошие результаты. Машинное время обработки зуба включая деление и фиксацию, составляет около 1 сек.

В приспособлении, приведенном на фиг. 79, кулаки устанавливаются на одной оправке вместе с инструментом. Это не позволяет

Таблица 22

Число оборотов кулачкового вала в минуту

Поперечная подача в мм/мин	80	100	125	160	200	250	315
Число оборотов винта в минуту	13,333	16,667	20,833	26,667	33,333	41,667	52,5
Число оборотов кулачко- вого вала в минуту . .	9,6	12,6	15,5	20	24,4	31	38,5

Продолжение табл.

Поперечная подача в мм/мин	400	500	630	800	1000	1250
Число оборотов винта в ми- нуту	66,667	83,333	105	133,333	166,667	208,333
Число оборотов кулачкового вала в минуту	49,5	61,4	77,6	98,4	123,5	158,8

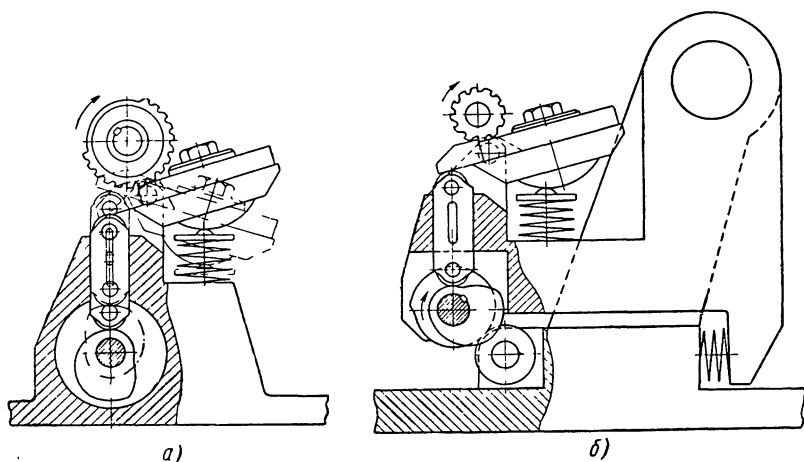
изменять диаметр инструмента, не изменяя размеров кулаков, что уменьшает универсальность этого приспособления.

На фиг. 93, а приведен второй вариант схемы приспособления, в котором кулаки вынесены на отдельный от инструментальной оправки валик. При этом варианте конструкции приспособления диаметр инструмента не связан с размерами кулака. В данном случае также применяется комбинированный инструмент аналогичный, приведенному на фиг. 82 и 90.

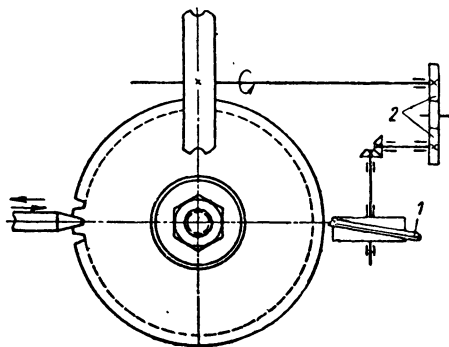
Вариант приспособления на фиг. 93, б позволяет производить обработку дисковой фасонной фрезой, аналогично схеме фиг. 91 с той лишь разницей, что по этой схеме обработка вдоль высоты зуба производится за счет качания изделия. Врезание в торец венца зубчатого колеса производится за счет поворота с помощью кулака кронштейна приспособления с установленным на нем столом с изделием.

Как показано на фиг. 79, на инструментальной оправке устанавливается винтовой сегмент с центральным углом 30° — 90° , который осуществляет поворот зубчатого колеса с тем, чтобы фиксатор мог войти в следующую впадину и, повернув зубчатое колесо, зафиксировать его в нужном для обработки следующего зуба положении. Винтовой сегмент может также быть вынесен на отдельную от инструментальной оправки ось.

На фиг. 94 приведен один из возможных вариантов установки винтового сегмента. Винтовой сегмент установлен на оси, направленной под углом к оси инструмента. При этом в схему может быть введен настроечный механизм, позволяющий менять число оборотов винтового сегмента относительно числа оборотов инструмента.



Фиг. 93. Варианты зубозакругляющих приспособлений:
а — с выносом кулаков на отдельную ось; *б* — обеспечивающее обработку вдоль высоты зуба за счет качания изделия, а врезание в торец венца зубчатого колеса за счет поворота кронштейна с установленным на нем столом с изделием.

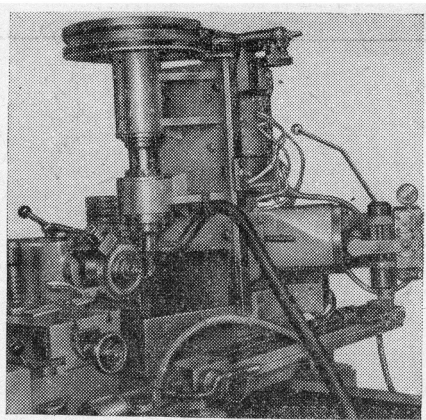


Фиг. 94. Установка делительного винтового сегмента под углом на отдельной оси:
1 — винтовой сегмент; *2* — сменные зубчатые колеса.

2. ЗУБОЗАКРУГЛЯЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ ОБРАБОТКУ ВДОЛЬ ВЫСОТЫ ЗУБА БЛАГОДАРЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ЦЕНТРА ИНСТРУМЕНТА ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЗАКРУГЛЕНИЯ

Приспособление для зубозакругления к торцекопировальному станку¹

Для осуществления этой схемы зубозакругления была спроектирована и изготовлена специальная фрезерная головка к торцекопировальному станку (фиг. 95 и 96). Головка крепится на копирувальном суппорте станка. В направляющие резцедержателя устанавливается деталь 1 (фиг. 96), к которой крепится плита 2. В плите 2 имеется прямоугольное окно, через которое проходит и по вертикальным стенкам направляется плита 3, соединяющая фрезерную головку с электродвигателем. Соединительная плита нижней скошенной плоскостью опирается на клин 4, который может перемещаться в горизонтальном направлении с помощью винта 5, тем самым поднимая или опуская фрезерную головку с электродвигателем. Для возможности перемещения нижней плиты корпуса 6 фрезерной головки относительно плиты 2 сделаны продолговатые пазы под крепежные болты. Корпус фрезерной головки сварной. Он состоит из плиты и двух стоек, в



Фиг. 95. Специальная фрезерная головка для зубозакругления к торцекопировальному станку.

которых монтируется шпиндель. От электродвигателя АД 42/6 мощностью 3,5 квт с 965 об/мин вращение передается с помощью сменных алюминиевых шкивов 7 и 8 шпинделю фрезерной головки 9. К головке запроектированы

Таблица 23

Число оборотов шпинделя в минуту

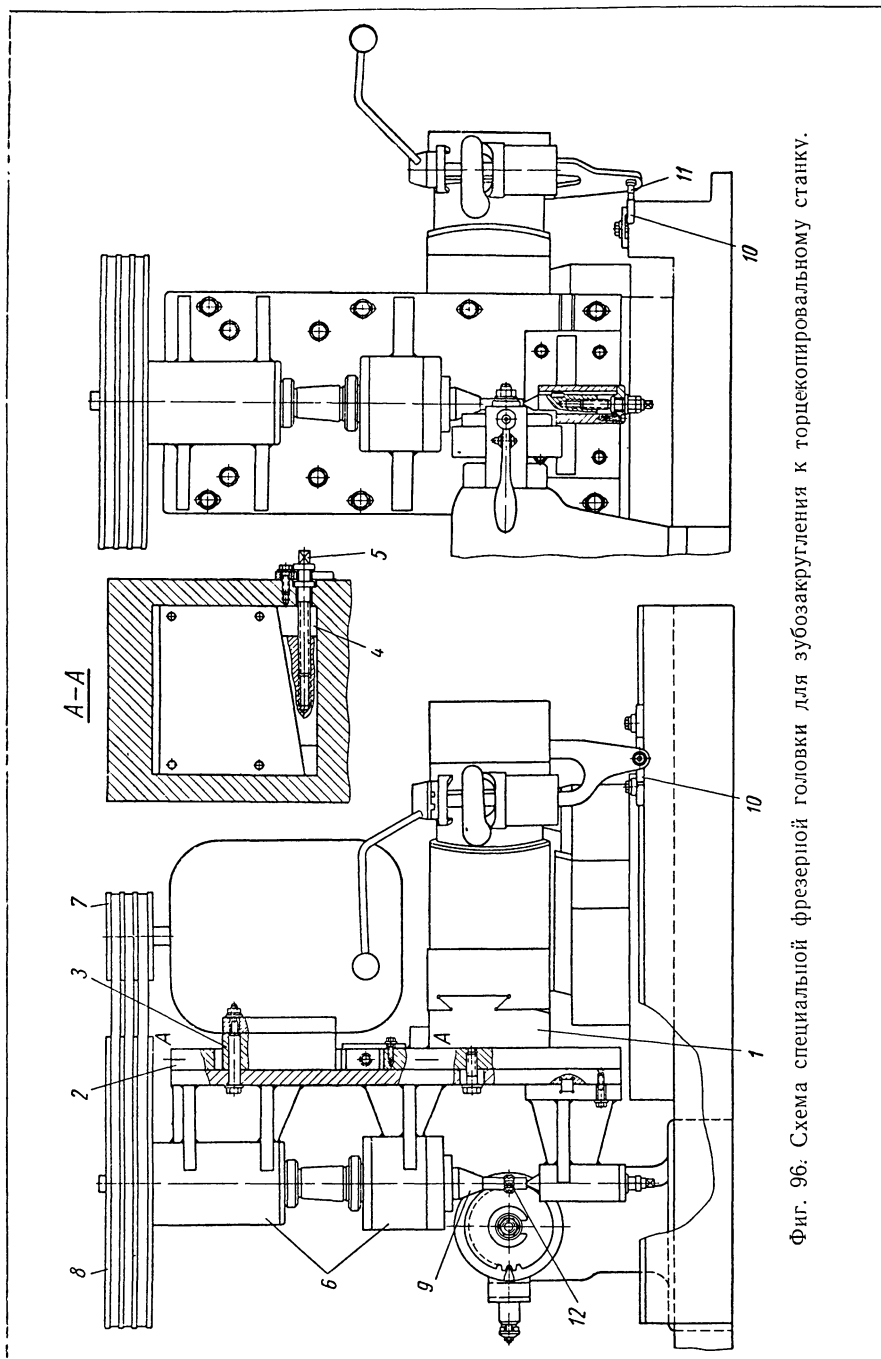
Диаметры шкивов шпинделя в мм	Диаметры шкивов электродвигателя в мм	
	140	125
257	257	469
369	366	327
474	235	254

три шкива на шпиндель и два шкива на электродвигатель. Диаметры шкивов и получаемые числа оборотов приведены в табл. 23.

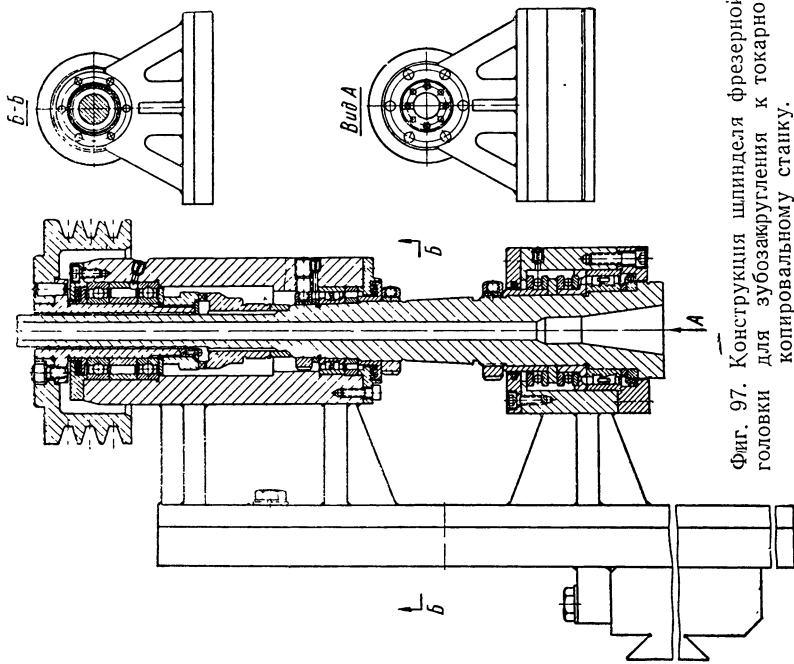
В конусное отверстие шпинделя вставляются оправки для насадных или хвостовых фрез.

В фрезерной головке используется шпиндель станка мод. 680Г (фиг. 97).

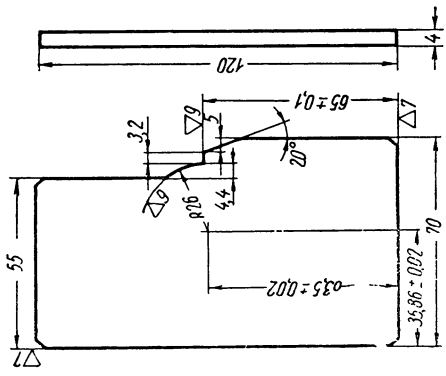
¹ Разработано автором при участии И. Н. Спасского.



Фиг. 96. Схема специальной фрезерной головки для зубоакругления к торцекопировальному станку.

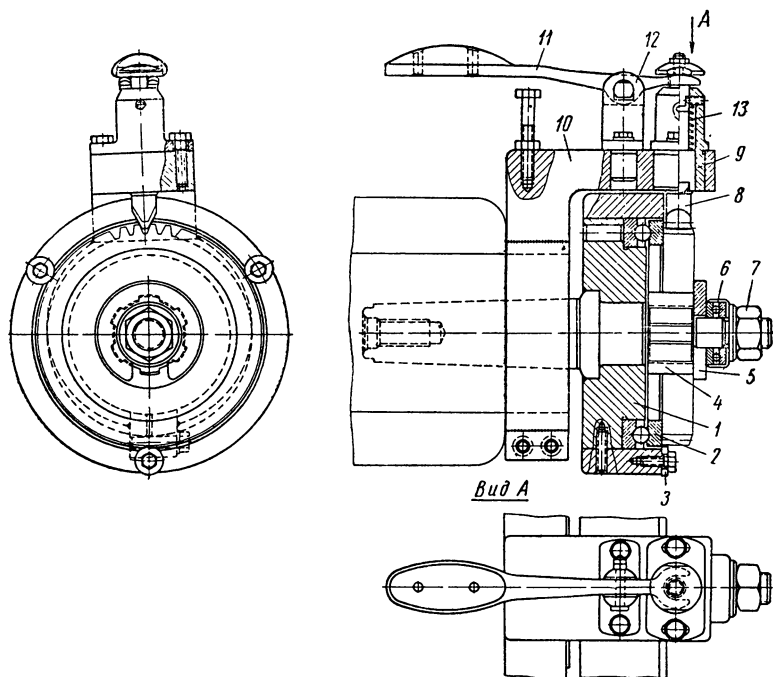


Фиг. 97. Конструкция шпинделя фрезерной головки для зубозакругления к токарно-копировальному станку.



Фиг. 98. Копир для зубозакругления.

По копиру 10 (фиг. 96) движется щуп 11, который передает фрезе 12 необходимые движения, соответствующие координатам закругления торцевой поверхности зубьев зубчатого колеса. Радиус



Фиг. 99. Приспособление для установки и фиксации по зубу зубчатых колес на торцекопировальном станке.

на копире определяется как сумма радиусов закругления фрезы, т. е. на копире делается радиус вращения центра фрезы относительно заданного центра закругления торцевой поверхности зуба вдоль его высоты.

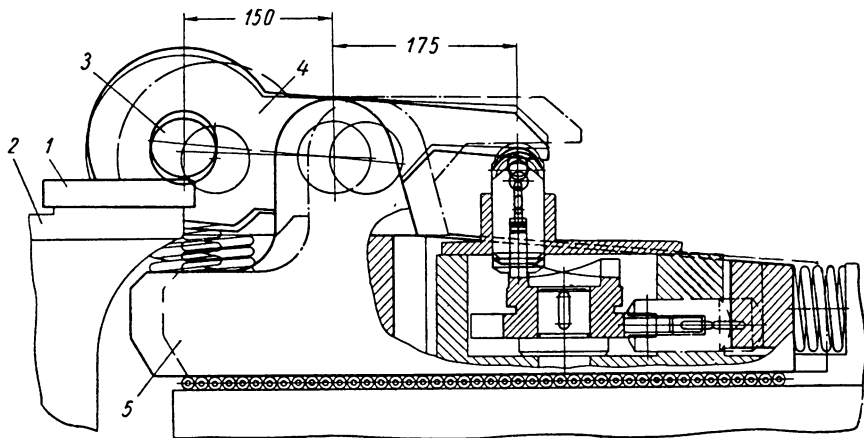
Из фиг. 98 видно, что копир имеет участок, параллельный осевой линии станка, обеспечивающий врезание фрезы в торец заготовки зубчатого колеса на полную глубину закругления. Радиусный участок копира обеспечивает фрезерование закругления вдоль высоты зуба. Радиус этого участка на копире равен сумме радиусов закругления вдоль высоты зуба и фрезы. Участок копира, перпендикулярный осевой линии станка, служит для отвода фрезы от обрабатываемой детали.

На фиг. 99 показан вариант ручного приспособления для закрепления заготовок зубчатых колес с фиксацией по зубу. Корпус 1 хвостовиком вставляется в пиноль задней бабки копировального станка, установленной между суппортом и шпинделем копироваль-

ного станка или на столе фрезерного станка. На уступ корпуса устанавливается упорный подшипник 2. От выпадания верхнее кольцо упорного подшипника предохраняется шайбами 3. На шейку корпуса 1 насаживается шлицевая втулка 4, на которую устанавливается обрабатываемая заготовка зубчатого колеса. Зубчатое колесо торцом опирается на упорный шарикоподшипник 2. Оно зажимается через имеющую прорезь шайбу 5, упорный подшипник 6 и гайку 7. В таком положении зубчатое колесо, зажатое между двумя упорными подшипниками, может вращаться вокруг своей оси. Положение зубчатого колеса фиксируется с помощью фиксатора 8, перемещающегося в корпусе 9. Поворотом хомута 10 с установленным на нем фиксатором производится регулировка положения зуба зубчатого колеса относительно фрезы. Вывод фиксатора из впадины зубчатого колеса производится с помощью рукоятки 11 через закрепленную на фиксаторе шайбу 12. Ввод фиксатора во впадину производится с помощью пружины 13.

Зубозакругляющий полуавтомат мод. СМ5

Осуществление обработки вдоль высоты зуба за счет двух движений центра инструмента было в начале намечено по схеме, приведенной на фиг. 100.



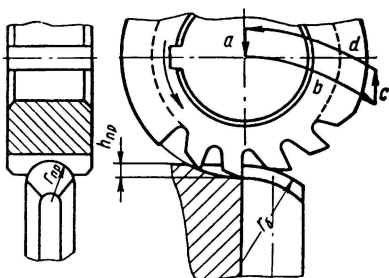
Фиг. 100. Схема обработки вдоль высоты зуба за счет двух движений центра инструмента.

Обрабатываемая заготовка 1 устанавливается на столе 2 станка и подводится в зону обработки. Центр вращающегося инструмента 3, установленного на качалке 4, при этом перемещается по дуге окружности, а инструмент подводится к обрабатываемой части торца венца зубчатого колеса и совершает врезание на полную глубину закругления. Далее при продолжающемся вращении ка-

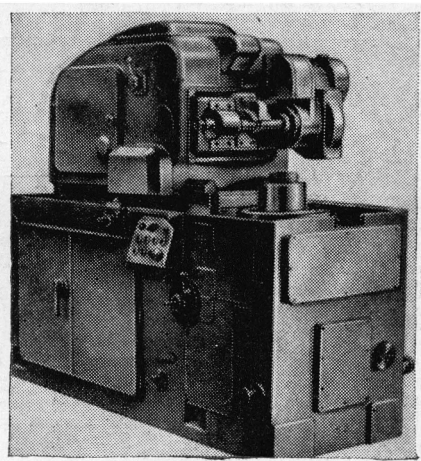
чалки 4 начинается движение ползуна 5. Сочетание этих движений обеспечивает обработку торца зуба по требуемой кривой вдоль его высоты. На фигуре показаны положения качалки и ползуна: жирными линиями — исходное положение; тонкими линиями — после врезания на полную глубину закругления; штриховыми — после окончания обработки вдоль высоты зуба. Для станка СМ5* была принята несколько измененная схема за счет замены прямолинейного движения ползуна вторым качательным движением.

На фиг. 101 показан один из вариантов траектории движения центра фрезы на полуавтомате мод. СМ5. Как видно из фигуры, на участке *a* производится врезание в торец зуба зубчатого колеса на полную глубину закругления h_{np} , на участке *b* — обработка поверхности торца вдоль высоты зуба колеса по радиусу r_6 , на участке *c* — быстрый отвод фрезы от обрабатываемого зубчатого колеса и на участке *d* — возврат фрезы в исходное положение с одновременным поворотом изделия для обработки следующего зуба.

Полуавтомат мод. СМ5 (фиг. 102 и 103) имеет верти-



Фиг. 101. Один из вариантов траектории движения оси фрезы на полуавтомате мод. СМ5.



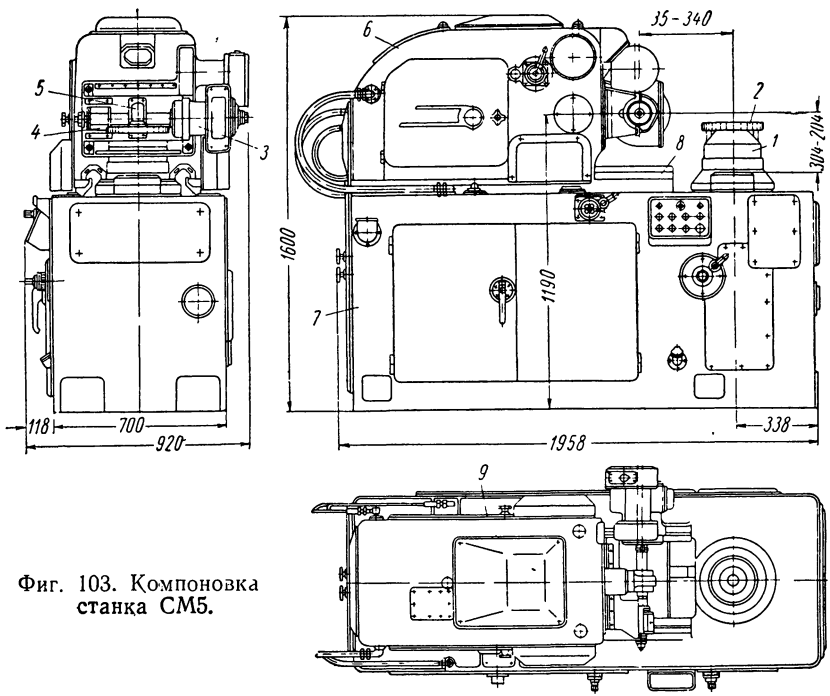
Фиг. 102 Общий вид полуавтомата мод. СМ5.

кальную компоновку, при которой ось шпинделя 1 (фиг. 103) изделия 2 расположена вертикально, а ось фрезерного шпинделя 3 горизонтально.

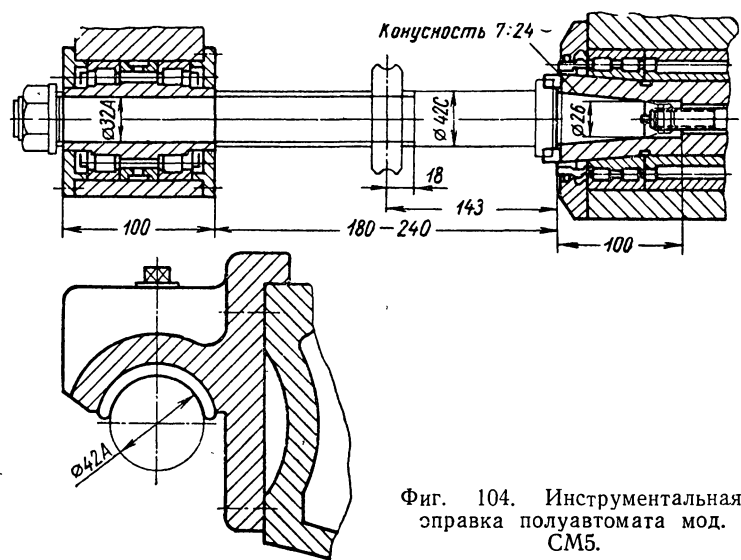
Инструментальная оправка (фиг. 104) устанавливается конусом в фрезерный шпиндель 3 (см. фиг. 103) станка и затягивается шомполом.

Второй конец оправки входит в специальную роликовую поддержку 4. Кроме того, оправка поддерживается односторонним люнетом 5.

* Рабочие чертежи разработаны СКБ8 и ЭНИМС — инж. Кабловым А. П., Людвигом В. Ю. Подошкиным Н. Ф. совместно с автором.



Фиг. 103. Компоновка станка СМ5.



Фиг. 104. Инструментальная эправка полуавтомата мод. СМ5.

Таблица 24

Число зубьев колес привода фрезы

Число оборотов шпинделя в минуту	Гитара	
	a	b
106	22	42
158	28	36
179	30	34
203	32	32
230	34	30
260	36	28
388	42	22

a — ведущее зубчатое колесо; b — ведомое зубчатое колесо

Таблица 25

Число зубьев колес привода кулаков (подача)

Время одного оборота вала кулаков в сек	Гитара	
	a	b
0,49	74	34
0,58	70	38
0,73	64	44
0,92	58	50
1,23	50	58
1,54	44	64
1,95	39	70
2,3	34	74

a — ведущее зубчатое колесо; b — ведомое зубчатое колесо

Таблица 26

Настройка гитары деления

Число зубьев обрабатываемого колеса	Гитара				Число зубьев обрабатываемого колеса	Гитара				Число зубьев обрабатываемого колеса	Гитара			
	a	b	c	d		a	b	c	d		a	b	c	d
20	60	—	—	30	47	40	—	—	47	74	40	—	—	74
21	50	45	60	35	48	50	—	—	60	75	40	—	—	75
22	60	—	—	33	49	25	70	80	35	76	30	—	—	57
23	40	46	60	30	50	40	—	—	50	77	25	70	80	55
24	40	—	—	24	51	25	85	80	30	78	25	65	80	60
25	40	—	—	25	52	25	65	60	30	79	40	—	—	79
26	40	—	—	26	53	40	—	—	53	80	30	—	—	60
27	50	30	40	45	54	25	45	80	60	81	25	90	80	45
28	50	—	—	35	55	40	—	—	55	82	40	—	—	82
29	60	30	40	58	56	50	—	—	70	83	40	—	—	83
30	40	—	—	30	57	40	—	—	57	84	50	60	40	70
31	60	30	40	62	58	40	—	—	58	85	40	—	—	85
32	50	—	—	40	59	40	—	—	59	86	25	43	60	75
33	40	—	—	33	60	40	—	—	60	87	25	75	80	58
34	40	—	—	34	61	40	—	—	61	88	25	—	—	55
35	40	—	—	35	62	40	—	—	62	89	40	—	—	89
36	50	—	—	45	63	25	70	80	45	90	40	—	—	90
37	40	—	—	37	64	50	—	—	80	91	50	35	40	65
38	60	—	—	57	65	40	—	—	65	92	25	75	60	46
39	25	65	80	30	66	25	60	80	55	93	40	—	—	93
40	40	—	—	40	67	40	—	—	67	94	40	47	30	60
41	40	—	—	41	68	35	34	40	70	95	40	—	—	95
42	25	70	80	30	69	40	46	40	60	96	25	—	—	60
43	40	—	—	43	70	40	—	—	70	97	40	—	—	97
44	25	55	60	30	71	40	—	—	71	98	40	—	—	98
45	40	—	—	45	72	25	—	—	45	99	25	90	80	55
46	40	—	—	46	73	40	—	—	73	100	24	—	—	60

a и c — ведущие зубчатые колеса; b и d — ведомые зубчатые колеса.

Фрезерная головка 6 располагается на верхней плоскости станины 7 и перемещается по горизонтальным призматическим направляющим 8. Во фрезерной головке смонтирован фрезерный шпиндель 3 с механизмом изменения скорости вращения фрезы, система рычагов и кулаки 9, обеспечивающие траекторию движения фрезы вдоль высоты зуба, механизм деления, производящий поворот изделия на следующий зуб после обработки предшествующего зуба, электродвигатель вращения фрезы, электродвигатель вращения вала кулаков и цепи деления, механизм поворота всех кулаков в исходное положение перед началом очередного цикла, гидравлические цилиндры крепления фрезерной головки к направляющим станины.

На станке можно обрабатывать зубчатые колеса до $m = 6$ мм диаметром от 80 мм до 320 мм.

Вращение дисковой фрезы осуществляется от электродвигателя мощностью 2,8 кВт. Числа оборотов фрезерного шпинделя и соответствующие сменные зубчатые колеса приведены в табл. 24.

Привод кулаков осуществляется от электродвигателя мощностью 1 кВт. Числа оборотов кулаков и соответствующие сменные зубчатые колеса приведены в табл. 25.

Настройка гитары деления производится в соответствии с табл. 26.

С помощью специальных гидравлических цилиндров на станке осуществляются:

- 1) перемещение фрезерной головки при подводе в зону обработки и отводе в зону загрузки;
 - 2) зажим фрезерной головки;
 - 3) подъем, зажим и разжим изделия;
 - 4) доворот кулаков до нужного положения для начала обработки нового зубчатого колеса.
-

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ КУЛАКОВ

1. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ, ЗОН И СЕКТОРОВ НА КУЛАКАХ

Так как в описанных выше схемах за один оборот кулачкового вала выполняются формообразующие и вспомогательные движения, то необходимо разделить поверхность кулака на две зоны: формообразующих движений и вспомогательных движений.

Чем больше отношение зоны формообразующих движений к зоне вспомогательных движений, тем при прочих равных условиях больше производительность; но, с другой стороны, работоспособность механизмов, осуществляющих вспомогательные движения, находится в прямой зависимости от размеров и формы поверхности кулаков.

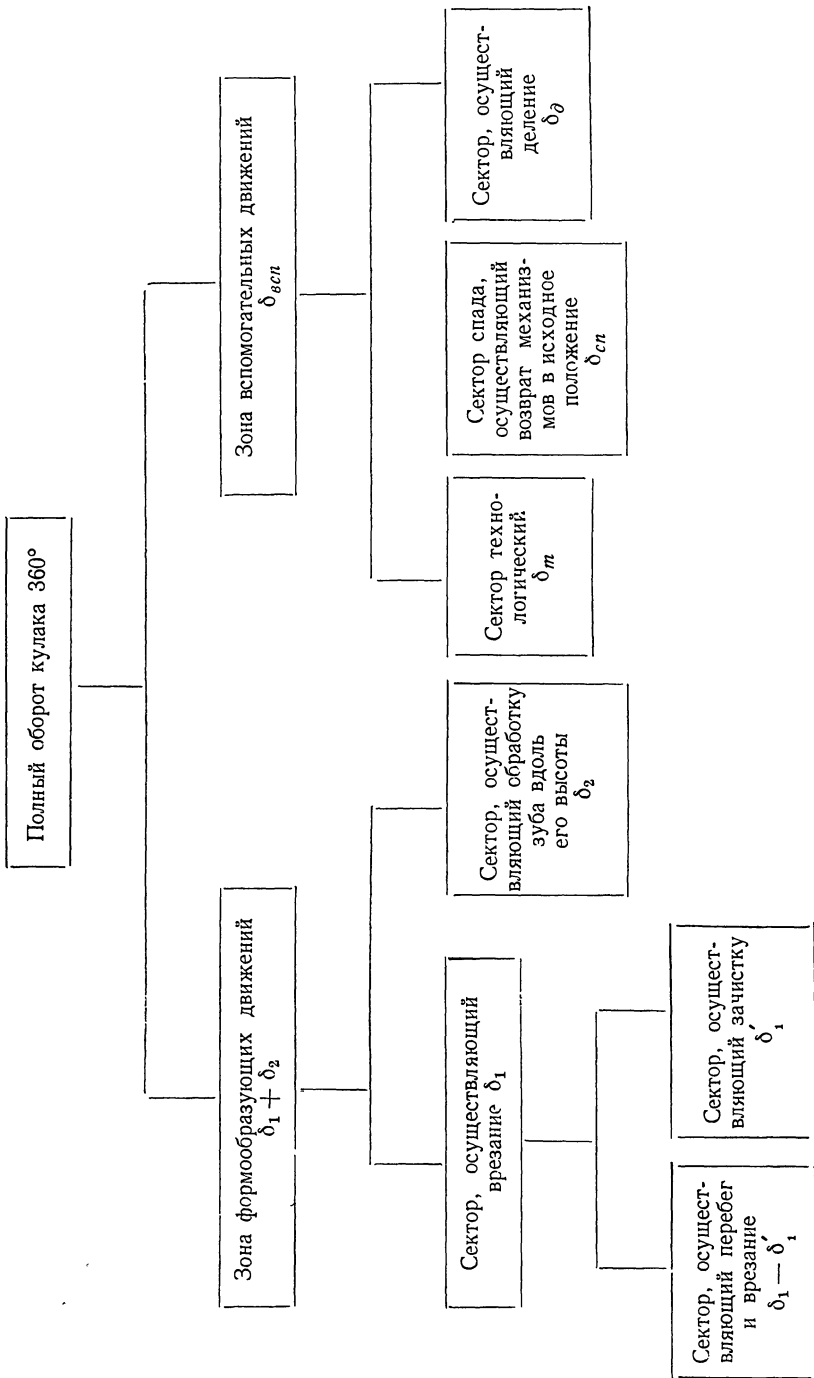
На каждом из зубозакругляющих полуавтоматов вспомогательные движения осуществляются разными механизмами и с разной кинематикой, а поэтому и размеры зон различны для разных станков. Так, для полуавтомата мод. ЛП-538 зона, обеспечивающая выполнение формообразующих движений, составляет $\delta_{\phi} = 200^{\circ}$, а зона кулака, обеспечивающая выполнение вспомогательных движений, составляет $\delta_{всп} = 160^{\circ}$. Для полуавтомата мод. СМ5 соответственно $\delta_{\phi} = 210^{\circ}$ и $\delta_{всп} = 150^{\circ}$. Распределение поверхности кулака на зоны и секторы представлено на схеме фиг. 105.

Зона для осуществления вспомогательных движений состоит из следующих секторов:

1) сектор, предназначенный для возврата механизмов в исходное положение, имеющий поверхность, очерченную убывающей спиралью Архимеда от $R_{\max \text{ экв}}$ до $R_{\min \text{ экв}}$;

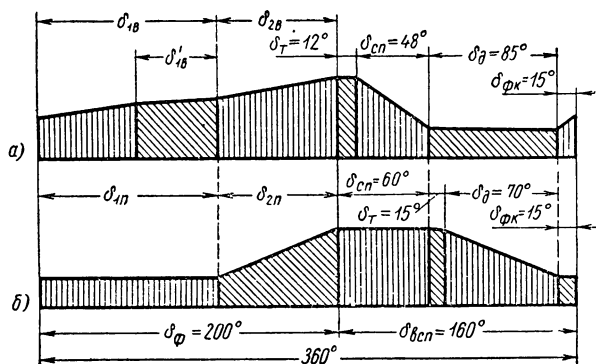
2) сектор, предназначенный для осуществления деления заготовки зубчатого колеса на следующий зуб.

Профиль сектора представляет собой на всех станках, кроме кулака полуавтомата мод. ЛП-538, дугу окружности с центром, точно совпадающим с осью вращения кулака. На кулаке ползушки полуавтомата мод. ЛП-538 профиль этого сектора представляет собой убывающую спираль Архимеда от $R_{\max \text{ экв}}$ до $R_{\min \text{ экв}}$, потому что деление заготовки на зуб производится во время возврата ползушки в исходное положение;



Фиг. 105. Схема распределения поверхности кулака на зоны и секторы

3) сектор технологического, предназначенный для улучшения работы кулака на стыках между кривыми профиля (за счет этого сектора на стыках кривых делается плавный радиус сопряжения) и для предотвращения подрезания профиля на стыках двух кривых при изготовлении кулаков;



Фиг. 106. Схема распределения одного оборота кулака полуавтомата мод. ЛПП-538 на зоны и секторы:

δ_{ϕ} — угол зоны кулака, обеспечивающей выполнение формообразующих движений; $\delta_{всп}$ — угол зоны кулака, обеспечивающей выполнение вспомогательных движений; а — кулак качалки: $\delta_{1в}$ — угол сектора врезания вместе с сектором зачистки; $\delta'_{1в}$ — угол сектора зачистки; $\delta_{2в}$ — угол сектора обработки вдоль высоты зуба; δ_T — угол технологического сектора кулака; $\delta_{сн}$ — угол сектора спада; δ_{δ} — угол сектора деления; δ_{ϕ_k} — угол сектора ввода фиксатора; б — кулак ползушки: $\delta_{1п}$ — угол сектора врезания вместе с сектором зачистки; $\delta_{2п}$ — угол сектора обработки вдоль высоты зуба; δ_c — угол сектора вывода фиксатора; δ_{δ} — угол сектора спада и деления.

4) на кулаках полуавтомата мод. ЛПП-538, кроме указанных выше, проектируется сектор, предназначенный для ввода фиксатора.

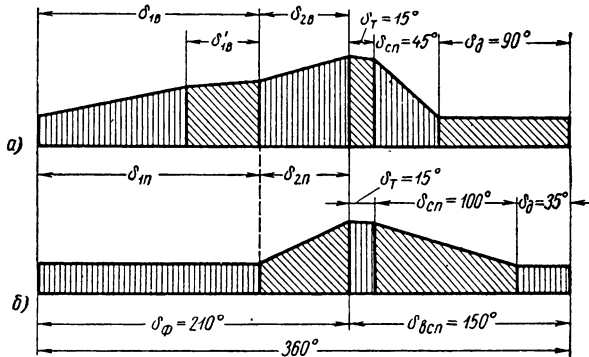
Количественное распределение между секторами в зоне вспомогательных движений произведено с учетом кинематических возможностей кулака и кинематики станка.

Все данные по величинам и расположению секторов на кулаках видны из схем (фиг. 106 и 107).

В расчет кулаков эти величины входят как исходные данные. Отношение углов секторов формообразующих движений равно отношению времен обработки, осуществляемой с помощью этих участков кулаков.

Ниже приводятся две схемы расчета параметров кулака, исходя из величины подачи и скорости резания. Вторая схема отличается от первой тем, что в ней учитывается необходимость проведения обработки вдоль высоты зуба не более чем за 1—1,2 оборота фрезы с целью исключения влияния биения зубьев фрезы на качество

поверхности зуба. Эта схема применяется тогда, когда обработка производится фрезами больших диаметров с большим числом зубьев (больше 10) и когда очень важно, с точки зрения качества поверхности, чтобы обработка вдоль высоты зуба производилась не более чем за 1—1,2 оборота фрезы.



Фиг. 107. Схема распределения одного оборота кулака полуавтомата мод. СМ5 на зоны и секторы:

δ_ϕ — угол зоны кулака, обеспечивающей выполнение формообразующих движений; δ_{scn} — угол зоны кулака, обеспечивающей выполнение вспомогательных движений; *a* — кулак вертикального хода; δ_{1a} — угол сектора врезания вместе с сектором зачистки; δ'_{1a} — угол сектора зачистки; δ_{2a} — угол сектора обработки вдоль высоты зуба; δ_T — угол технологического сектора кулака; δ_{cn} — угол сектора спада; δ_d — угол сектора деления; *b* — кулак продольного хода; δ_{1n} — угол сектора врезания вместе с сектором зачистки; δ_{2n} — угол сектора обработки вдоль высоты зуба.

Для расчетов режимов обработки по первой схеме необходимо иметь следующие исходные данные: d_ϕ — наружный диаметр фрезы в мм; z — число зубьев фрезы; l_s — глубина профиля фрезы в мм; l_n — величина перебега инструмента над торцом зубчатого колеса в мм; l_z — величина хода, обеспечивающая зачистку поверхности врезания в мм; $s_{z\phi}$ — подача на зуб при врезании в мм; $s_{z\phi}$ — подача на зуб при зачистке в мм; s_{z0} — подача на зуб при обработке вдоль высоты зуба зубчатого колеса в мм; v — скорость резания в м/мин; r_ϕ — радиус закругления вдоль высоты зуба в мм; δ_ϕ — угол зоны кулачка, обеспечивающей выполнение формообразующих движений; δ_{scn} — угол зоны кулачка, обеспечивающей выполнение вспомогательных движений.

Число оборотов фрезы в минуту в зависимости от скорости резания

$$n_\phi = \frac{1000v}{\pi D} \text{ об/мин.}$$

Время осуществления перебега и врезания без зачистки торца

$$T_s = \frac{(l_n + l_s - l_z) 60}{n_\phi \cdot z \cdot s_{z\phi}} \text{ сек.}$$

Время осуществления зачистки в конце врезания

$$T_3 = \frac{l_3 \cdot 60}{n_{\phi} \cdot z \cdot s_{z3}} \text{ сек.}$$

Общее время осуществления врезания и зачистки

$$T_{в.общ} = T_в + T_3 \text{ сек.}$$

Путь по дуге закругления вдоль высоты зуба

$$l_{дуги} = \frac{2\pi \cdot r_{\phi\beta}}{360^\circ} \text{ мм.}$$

Число зубьев фрезы, необходимое для обработки пути $l_{дуги}$

$$z_{\phi} = \frac{l_{дуги}}{s_{z\phi}}.$$

Время на работу одного зуба фрезы

$$T_z = \frac{60}{n_{\phi} \cdot z} \text{ сек.}$$

Время на обработку всей дуги закругления

$$T_{\phi} = s_{\phi} \cdot T_z \text{ сек.}$$

Время на формообразование

$$T_{\phi} = T_{в.общ} + T_{\phi} \text{ сек.}$$

Время вспомогательных движений

$$T_{всп} = \frac{T_{\phi} \cdot \delta_{всп}}{\delta_{\phi}}.$$

Общее время закругления торца одного зуба, или время одного оборота кулачкового вала,

$$T_{зуба} = T_{\phi} + T_{всп}.$$

Число оборотов кулачкового вала

$$n_{кул} = \frac{60}{T_{зуба}} \text{ об/мин.}$$

Так как на полуавтоматах имеется определенный ряд чисел оборотов кулачкового вала, то в случае необходимости в определенные выше величины вносится соответствующая коррекция. Количественное распределение зоны формообразования по секторам производится в зависимости от распределения общего времени формообразования на составляющие $T_{в.общ}$, T_{ϕ} и т. д.

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{T_{в.общ}}{T_{\phi}}, \quad \frac{\delta_1}{\delta_1 - \delta_1'} = \frac{T_3}{T_в},$$

где $\delta_1 - \delta'_1$ — угол сектора перебега и врезания кулака;
 δ'_1 — угол сектора зачистки в конце врезания;
 δ_2 — угол сектора обработки зуба вдоль его высоты.

На схемах (фиг. 106 и 107) наглядно представлено распределение одного оборота кулака на зоны и секторы. Здесь же дано качественное распределение зоны формообразования и количественное распределение зоны вспомогательных движений.

Для расчета по второй схеме исходные данные будут те же, что и для первой схемы, только вместо подачи на зуб при обработке вдоль высоты зуба необходимо задаться количеством оборотов фрезы для обработки одного зуба вдоль его высоты ($n_\sigma = 0,8 \div 1,2$). По первым четырем пунктам расчет по второй схеме аналогичен первой схеме. Если обработка вдоль высоты зуба производится за $n_\sigma = 1,2$ оборота фрезы, то время для этой обработки

$$T_\sigma = \frac{60 \cdot n_\sigma}{n_\phi} = \frac{60 \cdot 1,2}{n_\phi} \text{ сек.}$$

Отношение углов секторов зоны формообразования профиля

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{T_{в.обц}}{T_\sigma}; \quad \frac{\delta'_1}{\delta_1 - \delta'_1} = \frac{T_z}{T_\sigma}.$$

Время вспомогательных движений

$$T_{всп} = \frac{(T_{в.обц} + T_\sigma)_{всп}}{\delta_\phi} \text{ сек.}$$

Общее время на обработку зуба

$$T_{зуба} = T_{в.обц} + T_\sigma + T_{всп}.$$

Число оборотов кулачкового вала

$$n_{кул} = \frac{60}{T_{зуба}} \text{ об/мин.}$$

Фактическое время обработки зуба

$$T_{зуба \text{ факт}} = \frac{60}{n_{кул}} \text{ сек.}$$

Число зубьев фрезы, обрабатывающих радиус профиля, вдоль высоты зуба

$$z_\sigma = z \cdot n_\sigma.$$

Длина дуги радиуса закругления вдоль высоты зуба

$$l_{дуги} = \frac{2\pi \cdot R \cdot \beta}{360} \text{ мм.}$$

Примерный расчет по первой схеме. Полуавтомат мод. ЛП-538
Угол формообразования профиля $\delta_{\phi} = 200^{\circ}$. Угол вспомогательных
движений $\delta_{всп} = 160^{\circ}$

Исходные данные											
Наружный диаметр фрезы в мм	Число зубьев фрезы	Высота профиля фрезы в мм	Величина персбега в мм	Величина зачистки в мм	Подача на зуб при врезании в мм/зуб	Подача на зуб при зачистке в мм/зуб	Подача на зуб при обработке радиуса в мм/зуб	Радиус закругления в мм	Количество оборотов фрезы при обработке радиуса закругления	Обрабатываемый модуль закругления	Угол поворота фрезы в град
D_{ϕ}	z	h_{ϕ}	h_n	h_3	$s_{z\phi}$	s_{z3}	s_{z0}	r_{ϕ}	n_{ϕ}	t	β
56	14	3	0,7	0,2	0,15	0,05	0,6	24	—	5/3,75	25
Схема расчета при $n_{\phi} = 300$ об/мин; $v = 47,1$ м/мин											
Формулы						Расчет					
$T_{\phi} = \frac{(h_n + h_{\phi} - h_3) 60}{n_{\phi} \cdot z \cdot s_{z\phi}}$						$T_{\phi} = \frac{(0,7 + 3 - 0,2) 60}{300 \cdot 14 \cdot 0,15} = 0,33$ сек					
$T_3 = \frac{h_3 \cdot 60}{n_{\phi} \cdot z \cdot s_{z3}}$						$T_3 = \frac{0,2 \cdot 60}{300 \cdot 14 \cdot 0,05} = 0,057$ сек					
$T_{\phi \cdot общ} = T_{\phi} + T_3$						$T_{\phi \cdot общ} = 0,33 + 0,057 = 0,387$ сек					
$l_{\phi} = \frac{2\pi r_{\phi} \cdot \beta}{360^{\circ}}$						$l_{\phi} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 24 \cdot 25}{360} = 10,47$ мм					
$z_{\phi} = \frac{l_{\phi}}{s_{z0}}$						$z_{\phi} = \frac{10,47}{0,6} = 17,5$					
$T_z = \frac{60}{n_{\phi} \cdot z}$						$T_z = \frac{60}{300 \cdot 14} = 0,0143$ сек					
$T_{\phi} = z_{\phi} \cdot T_z$						$T_{\phi} = 17,5 \cdot 0,0143 = 0,25$ сек					
$T_{\phi} = T_{\phi \cdot общ} + T_{\phi}$						$T_{рез} = 0,387 + 0,25 = 0,637$ сек					
$T_{всп} = \frac{T_{\phi} \cdot \delta_{всп}}{\delta_{\phi}}$						$T_{всп} = \frac{0,637 \cdot 160}{200} = 0,509$ сек					
$T_{зуба} = T_{\phi} + T_{всп}$						$T_{зуба} = 0,637 + 0,569 = 1,146$ сек					
$n_{кул} = \frac{60}{T_{зуба}}$						$n_{кул} = \frac{60}{1,146} = 52,4$ об/мин					
$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{T_{\phi \cdot общ}}{T_{\phi}}$						$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{0,387}{0,25} = \frac{122^{\circ}}{78^{\circ}}$; $\delta_1 = 122^{\circ}$; $\delta_2 = 78^{\circ}$					
$\frac{\delta'_1}{\delta_1 - \delta'_1} = \frac{T_3}{T_{\phi}}$						$\frac{\delta'_1}{\delta_1 - \delta'_1} = \frac{0,057}{0,33} = \frac{18^{\circ}}{104^{\circ}}$; $\delta'_1 = 18^{\circ}$; $\delta_1 - \delta'_1 = 104^{\circ}$					

Таблица 28

Примерный расчет по второй схеме. Полуавтомат мод. ЛП-538. Угол формования профиля $\delta_{\phi} = 200^{\circ}$. Угол вспомогательных движений $\delta_{всп} = 160^{\circ}$

Исходные данные											
Наружный диаметр в мм	Число зубьев фрезы	Высота профиля фрезы в мм	Величина перебега в мм	Величина зачистки в мм	Подача на зуб при врезании в мм/зуб	Подача на зуб при зачистке в мм/зуб	Подача на зуб при обработке радиуса в мм/зуб	Радиус закругления	Количество оборотов фрезы на обработку радиуса закругления	Обрабатываемый модуль зуба	Угол поворота в град
D_{ϕ}	z	h_{ϕ}	h_n	h_z	$s_{z\phi}$	s_{z3}	$s_{z\phi}$	r_{ϕ}	n_{ϕ}	m	β
56	14	3	0,7	0,2	0,15	0,05	—	24	1,2	5/3,75	25
Схема расчета при $n_{\phi} = 300$ об/мин $v = 47,1$ м/мин											
Формулы						Расчет					
$T_{\phi} = \frac{(l_n + l_{\phi} - l_z) 60}{n_{\phi} \cdot z \cdot s_{z\phi}}$						$T_{\phi} = \frac{(0,7 + 0,3 - 0,2) 60}{300 \cdot 14 \cdot 0,15} = 0,33$ сек					
$T_z = \frac{l_z \cdot 60}{n_{\phi} \cdot z \cdot s_{z3}}$						$T_z = \frac{0,2 \cdot 60}{300 \cdot 14 \cdot 0,05} = 0,057$ сек					
$T_{\phi \text{ общ}} = T_{\phi} + T_z$						$T_{\phi \text{ общ}} = 0,33 + 0,057 = 0,387$ сек					
$T_{\phi} = \frac{60 \cdot n_{\phi}}{n_{\phi}}$						$T_{\phi} = \frac{60 \cdot 1,2}{300} = 0,24$ сек					
$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{T_{\phi \text{ общ}}}{T_{\phi}}$						$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{0,387}{0,24} = \frac{123^{\circ}}{77^{\circ}}$ $\delta_1 = 123^{\circ}$; $\delta_2 = 77^{\circ}$					
$\frac{\delta_1}{\delta_1 - \delta'_1} = \frac{T_z}{T_{\phi}}$						$\frac{\delta'_1}{\delta_1 - \delta'_1} = \frac{0,057}{0,33} = \frac{18^{\circ}}{105^{\circ}}$; $\delta'_1 = 18^{\circ}$; $\delta_1 - \delta'_1 = 105^{\circ}$					
$T_{всп} = \frac{(T_{\phi \text{ общ}} + T_{\phi}) \delta_{всп}}{\delta_{\phi}}$						$T_{всп} = \frac{(0,387 + 0,24) \cdot 160}{200} = 0,502$ сек					
$T_{зуба} = T_{\phi \text{ общ}} + T_{\phi} + T_{всп}$						$T_{зуба} = 0,387 + 0,24 + 0,502 = 1,129$ сек					
$n_{кул} = \frac{60}{T_{зуба}}$						$n_{кул} = \frac{60}{1,129} = 53,1$ об/мин; $n_{кул \text{ станка}} = 52,5$ об/мин					
$T_{зуба \text{ факт}} = \frac{60}{n_{кул \text{ станка}}}$						$T_{зуба \text{ факт}} = \frac{60}{52,5} = 1,14$ сек					
$z_{\phi} = z \cdot n_{\phi}$						$z_{\phi} = 14 \cdot 1,2 = 16,8$					
$l_{дуги} = \frac{2\pi r_{\phi} \beta}{360^{\circ}}$						$l_{дуги} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 24 \cdot 25}{360} = 10,47$ мм					
$s_{z0} = \frac{l_{дуги}}{z_{\phi}}$						$s_{z0} = \frac{10,47}{16,8} = 0,62$ мм/зуб					

Подача на зуб при обработке радиуса закругления вдоль высоты зуба

$$s_{z\delta} = \frac{l_{\text{дуги}}}{z_{\delta}} \text{ мм/зуб.}$$

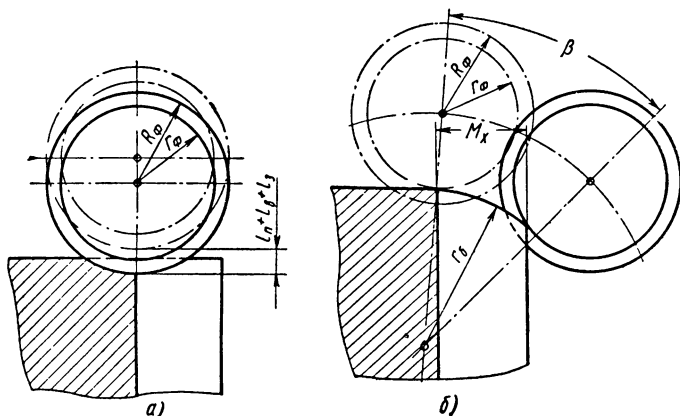
На картах (табл. 27, 28) приведены примеры расчета углов кулаков и времени обработки в зависимости от режимов резания.

2. РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ КУЛАКОВ

Процесс обработки торца одного зуба заготовки состоит из следующих этапов:

- 1) врезание в торец заготовки (фиг. 108, а);
- 2) обработка вдоль высоты зуба по радиусу (фиг. 108, б);
- 3) возврат в исходное положение механизмов, осуществляющих движения, необходимые для формообразования;
- 4) деление заготовки на один зуб и фиксация в нужном положении.

Все движения инструмента необходимые для процесса закругления зуба, осуществляются от кулачковых механизмов.



Фиг. 108. Схемы врезания в торец зуба и обработки вдоль его высоты.

На полуавтомате мод. ЛП-538 формообразование закругления зуба осуществляется движением заготовки относительно вращающейся фрезы (см. фиг. 91).

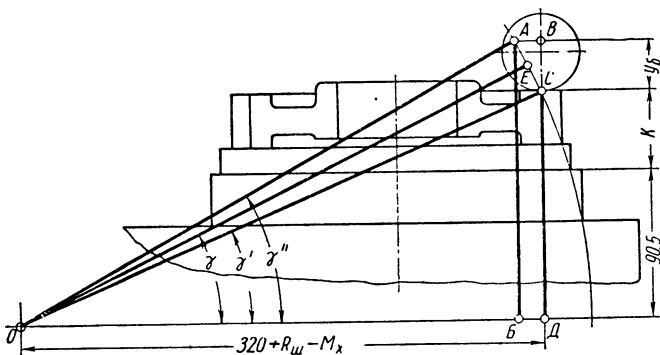
Для осуществления врезания кулак качалки, поворачиваясь на определенный угол, поднимает качалку вместе с ползушкой и обрабатываемым изделием вверх на фрезу.

В связи с тем, что расстояние от оси качания до зоны резания меньше, чем от оси качания до оси кулачкового вала, все размеры,

необходимые для вертикальных перемещений, переносятся на кулак качалки с увеличением на коэффициент L (фиг. 109):

$$L = \frac{500}{\sqrt{(90,5 + K)^2 + (320 + R_{ш} - M_x)^2}},$$

- где 500 — расстояние между осью качания и осью кулачкового вала в мм;
 90,5 — высота от оси качания до опорной поверхности планшайбы на шпинделе;
 $(320 + R_{ш} - M_x)$ — расстояние от оси качания до положения центра фрезы в конце врезания (по горизонтали);
 $R_{ш}$ — радиус зубчатого колеса по окружности выступов;
 M_x — расстояние от положения центра фрезы в конце врезания до окружности выступов;
 K — расстояние от обрабатываемого торца заготовки до опорного столика (вместе с высотой планшайбы).



Фиг. 109. Схема корректировки величин вертикальных и горизонтальных ходов в зависимости от высоты зубчатых колес.

Вертикальный ход $y_б$ получается за счет вращения заготовки вокруг оси качания O . При этом точка C (точка начала обработки вдоль высоты зуба) описывает дугу CA . Ввиду того, что эта дуга занимает небольшой участок окружности можно с достаточной практической точностью заменить ее отрезком прямой CA . Соединив ось качания O с серединой отрезка CA , получим $\sphericalangle EOB = \gamma$, который будет равен $\sphericalangle ACB$:

Чтобы определить $\sphericalangle \gamma'$ представим его в виде равенства

$$\sphericalangle \gamma = \frac{\sphericalangle \gamma'' - \sphericalangle \gamma'}{2} + \sphericalangle \gamma' \text{ (фиг. 109).}$$

Из треугольника $ОСД$

$$\operatorname{tg} \gamma' = \frac{СД}{ОД}.$$

Так как $СД = 90,5 + K$, а $ОД = 320 + R_{ш} - M_x$, то

$$\operatorname{tg} \gamma' = \frac{90,5 - K}{320 + R_{ш} - M_x}.$$

Из треугольника $ОСД$

$$ОС = \sqrt{(90,5 + K)^2 + (320 + R_{ш} - M_x)^2}.$$

Из треугольника $ОАВ$

$$\sin \gamma'' = \frac{АВ}{ОА} = \frac{АВ}{ОС}$$

или

$$\sin \gamma'' = \frac{90,5 + K + y_6}{\sqrt{(90,5 + K)^2 + (320 + R_{ш} - M_x)^2}},$$

где y_6 — вертикальный ход обрабатываемого зубчатого колеса;

$$y_6 = (r_6 + r_{\phi}) [\cos \alpha - \cos (\alpha + \beta)].$$

С увеличением высоты обрабатываемого зубчатого колеса (блочные зубчатые колеса и др.) угол γ увеличивается, а также увеличивается длина траектории относительного движения инструмента и обрабатываемого изделия. Соответственно увеличению траектории относительного движения увеличивается смещение точки C по горизонтали, т. е. отрезок $АВ$.

Следовательно, для того чтобы осуществить движение точки C по вертикали до точки B необходимо соответственно скорректировать координаты секторов кулаков вертикального и горизонтального ходов.

Длина вертикального хода с учетом сказанного определяется по формуле:

$$AC = \frac{BC}{\cos \gamma} = \frac{y_6}{\cos \gamma} \text{ (из треугольника } ACB).$$

Длина горизонтального хода в этом случае

$$AB = BC \cdot \operatorname{tg} \gamma = y_6 \cdot \operatorname{tg} \gamma \text{ (из треугольника } ACB).$$

Кривые сектора врезания на кулаке качалки представляют собой две спирали Архимеда соответственно для участка перебега — врезания и для участка зачистки.

Подъем спирали Архимеда на участке перебега — врезания с учетом изложенного выше

$$P = \frac{\cos \alpha (l_n + l_6) \cdot L}{\cos \gamma} \text{ мм,}$$

а на участке зачистки

$$P' = \frac{\cos \alpha \cdot l_3 \cdot L}{\cos \gamma} \text{ мм.}$$

Для осуществления обработки вдоль высоты зуба необходимо движение качалки так сочетать с движением ползушки, чтобы в результате центр закругления совершил путь по дуге окружности с радиусом $r_\sigma + r_\phi$ и центром, расположенным на оси фрезы.

Как видно из схемы на фиг. 110, координаты первой точки O_1 траектории выразятся уравнениями

$$x_1 = (r_\sigma + r_\phi) \sin \alpha;$$

$$y_1 = (r_\sigma + r_\phi) \cos \alpha.$$

Угол δ_2 сектора кулака, обеспечивающего обработку вдоль высоты зуба, известен из предыдущих расчетов. Если для определения координат кривой поверхности этого сектора кулака разделить его на n равных частей, то соответствующий углу сектора δ_2 угол β траектории движения центра закругления нужно разбить на одинаковое число частей, равное n . Тогда угол, на который будет разделен сектор кулака и соответствующий ему угол траектории $\varphi_\beta = \frac{\beta}{n}$. Если, например, решено определить координаты кривой сектора при повороте кулака на 1° , то число делений на секторе δ_2 будет $n = \frac{\delta_2}{1} = \delta_2$, а поскольку траектория должна быть разделена на такое же количество делений, то величина угла, на который она разделяется, $\varphi_\beta = \frac{\beta}{n} = \frac{\beta}{\delta_2}$. Соответственно при делении сектора кулака через $0,5^\circ$ число делений на секторе кулака $n = \frac{\delta_2}{0,5} = 2\delta_2$, а величина угла, на который разделяется траектория движения центра,

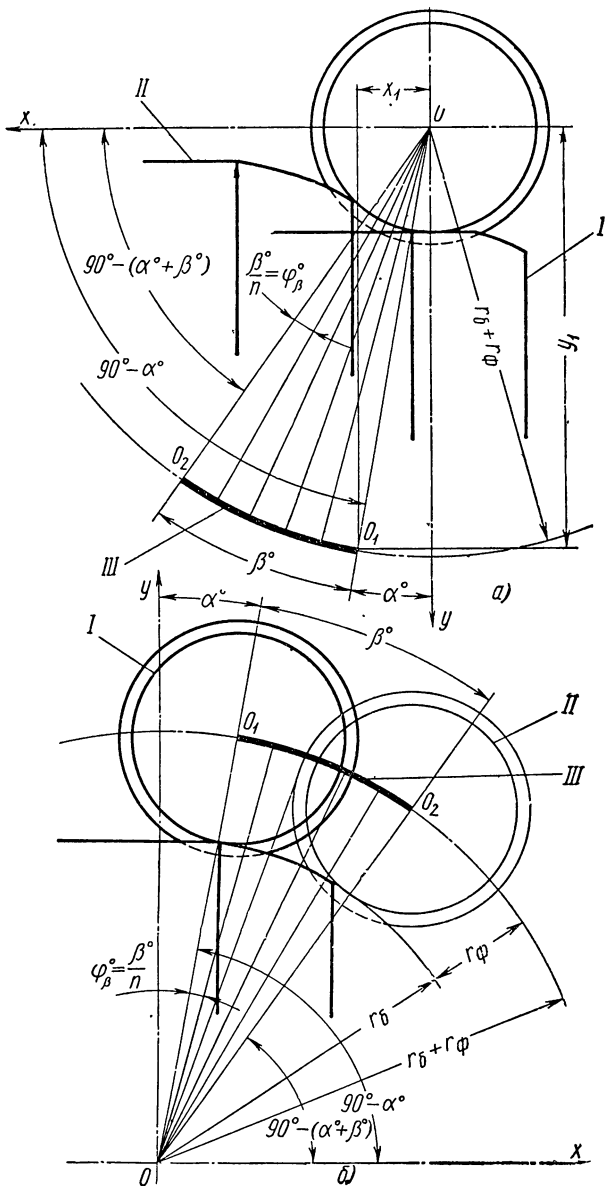
$$\varphi_\beta = \frac{\beta}{n} = \frac{\beta}{2\delta_2}.$$

Таким образом,

$$\varphi_\beta = \varphi_\delta \cdot \frac{\beta}{\delta_2},$$

где φ_β — величина угла, на который разделяется траектория центра закругления;

φ_δ — величина угла, на который разделяется сектор кулака;



Фиг. 110. Схема определения координат перемещения центра инструмента при обработке вдоль высоты зуба:

a — на полуавтомате мод. ЛП-538; *б* — на полуавтомате мод СМ5. *I* — относительное положение обрабатываемого зубчатого колеса и инструмента в начале обработки вдоль высоты зуба (после врезания); *II* — относительное положение обрабатываемого зубчатого колеса и инструмента после обработки вдоль высоты зуба; *III* — траектория относительного перемещения центра закругления O_1 относительно центра фрезы O .

β — угол траектории движения центра закругления, соответствующий повороту кулака на угол δ_2 ;

δ_2 — угол сектора кулака, обеспечивающего при обработке вдоль высоты зуба движение центра закругления по траектории, ограниченной углом β .

Приращения координат любой точки траектории

$$x'_n = (r_\sigma + r_\phi) \sin(\alpha + n_x \varphi_\beta) - (r_\sigma + r_\phi) \sin \alpha;$$

$$y'_n = (r_\sigma + r_\phi) \cos \alpha - (r_\sigma + r_\phi) \cos(\alpha - n_x \varphi_\beta),$$

где n_x — порядковый номер частей, на которые разделен угол β .

С учетом коррекции, о которой было изложено выше и после преобразования, приращения координат любой точки кривой поверхности секторов δ_2 на кулаках будут равны:

для кулака качалки

$$y_n = \frac{L(r_\sigma + r_\phi) [\cos \alpha - \cos(\alpha + n_x \varphi_\beta)]}{\cos \gamma};$$

для кулака ползушки

$$x_n = (r_\sigma + r_\phi) [\sin(\alpha + n_x \varphi_\beta) - \sin \alpha] - y_n \sin \gamma.$$

Так как обе указанные формулы позволяют определить только приращение координат любой точки кривой поверхности секторов, то для получения значений текущих радиусов этой кривой, найденные значения приращений следует добавить к соответствующим значениям радиусов кулаков.

Так как кулаки изготавливаются на координатно-расточных станках и при их обработке установка текущих координат каждого нового относительного положения фрезы и обрабатываемой поверхности кулака производится по координатам центра фрезы, то значения приращения добавляются к соответствующему постоянному значению радиуса траектории движения центра фрезы (экви-дистанты кривой кулака). При этом фрезерование ведется фрезой, имеющей диаметр, равный диаметру контактирующего с кулаком ролика. Подобный подход к определению значений координат кулаков облегчает их проектирование.

Таким образом, текущие радиусы эквидистанты кривой кулаков можно определить по формулам:

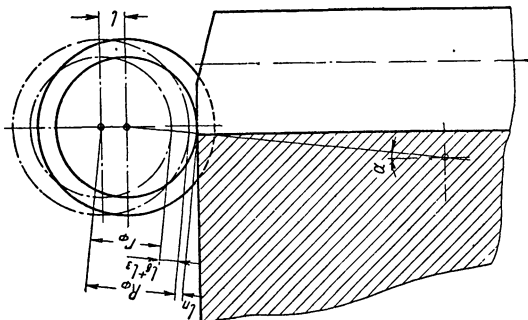
для кулака ползушки

$$R_{n \text{ экв}} = R_1 + x_n \text{ мм};$$

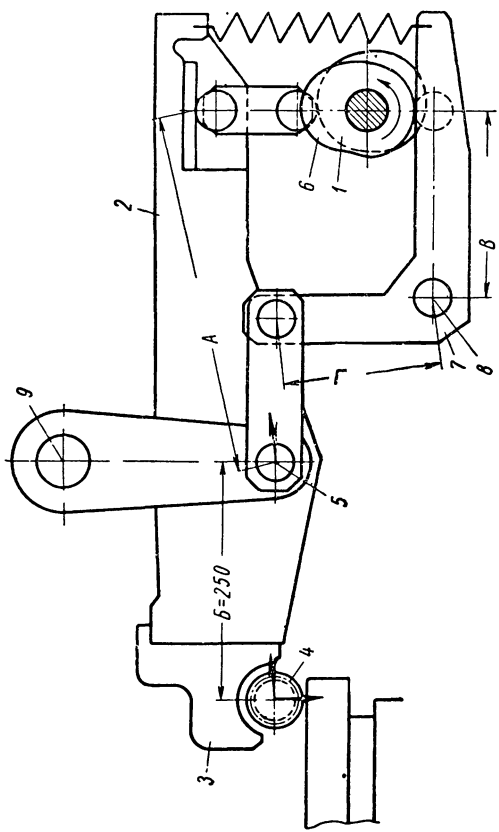
для кулака качалки

$$R'_{n \text{ экв}} = R_2 + y_n \text{ мм},$$

где R_1 — наибольший радиус эквидистанты кривой данного кулака;
 R_2 — наибольший текущий радиус эквидистанты кривой сектора врезания δ_1 .



Фиг. 112. Схема врезания фрезы в торец зубчатого колеса.



Фиг. 111. Схема осуществления формообразующих движений на полуавтомате мод. СМ5.

На зубозакругляющем полуавтомате мод. СМ5 перебег, врезание и зачистка осуществляются (фиг. 111) кулаком 1 вертикального хода через качалку 2, поворачивающим фрезерную головку 3 с установленным на ней инструментом 4 вокруг оси 5 на величину $(l_n + l_a + l_3) \cos \alpha$ (фиг. 112).

В связи с тем, что расстояние А больше Б (см. фиг. 111) в n_1 раза, величины подъема кривой секторов кулаков, обеспечивающих выполнение вертикальных перемещений, необходимых для обработки зуба, должны быть увеличены также в n_1 раза. Кривые профиля кулака на секторах перебег — врезание ($\delta_1 - \delta_1'$) и зачистки δ представляют собой спирали Архимеда.

Подъем на секторе перебег — врезание

$$l'_n + l'_a = (l_n + l_a) \cos \alpha \cdot n_1 \text{ мм}$$

На секторе зачистки

$$l'_3 = l_3 \cdot \cos \alpha \cdot n_1 \text{ мм.}$$

Движение фрезы по заданной траектории при обработке вдоль высоты зуба осуществляется сочетанием двух движений.

Движение в горизонтальном направлении обеспечивается за счет поворота с помощью кулака 6, рычага 7 вокруг оси 8 и вследствие этого поворота оси 5 вокруг оси 9. Так как плечо В больше плеча Г в n_2 раза, то подъем кривой на кулаке 6, осуществляющем горизонтальное движение, должен быть также больше в n_2 раза требуемого горизонтального пути фрезы.

Кроме того, вертикальный ход фрезы фактически осуществляется не по вертикали, а по дуге окружности, в результате чего происходит горизонтальное смещение центра фрезы (фиг. 113).

Величина этого смещения

$$k_1 = r - \sqrt{r^2 - l_6^2} \text{ мм.}$$

Таким образом, полная величина поправок на перемещение в горизонтальном направлении

$$k'_1 = n_2 \left(r - \sqrt{r^2 - l_6^2} \right),$$

где l_6 — величина вертикального хода центра фрезы для обработки зуба вдоль его высоты.

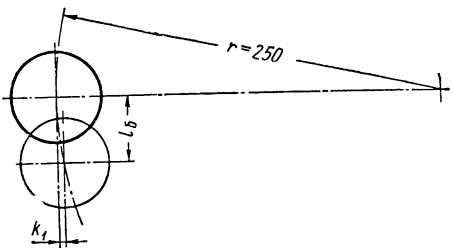
Величина поправки на каждый градус кривой кулака профиля в секторе δ_2 составит

$$k_x = \frac{k'_1}{\delta_2}.$$

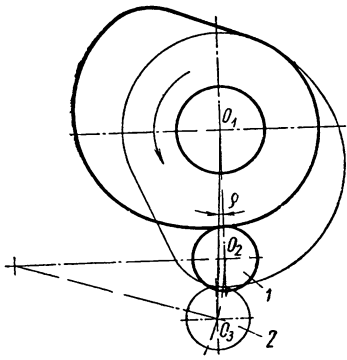
Можно было бы еще ввести поправку на угол δ_2 кулака горизонтального хода в связи со смещением места контакта ролика с поверхностью кривой кулака за время подъема по кривой из по-

ложения 1 в положение 2 (фиг. 114). Однако, как показали расчеты, эта величина весьма мала и ею можно пренебречь.

В результате горизонтального движения качалки 2 (см. фиг. 111) по ролику изменяется соотношение плеч, поэтому для обеспечения наибольшей точности радиуса закругления вдоль высоты зуба необходимо ввести поправку на вертикальный ход фрезы.



Фиг. 113. Схема корректировки величины вертикального хода.



Фиг. 114. Схема смещения места контакта ролика с поверхностью кривой кулака за время подъема по кривой.

Если в исходном положении фрезы соотношение плеч равно $\frac{A}{B}$, то в конечном положении, после прохождения качалки в горизонтальном направлении на x мм, это соотношение будет $\frac{A-x}{B}$. Общая величина пути после коррекции

$$x' = x \left(\frac{A}{B} - \frac{A-x}{B} \right) = x \left(n_1 - \frac{A-x}{B} \right).$$

На 1° сектора на кулаке вертикального хода поправка будет равна

$$k_2 = \frac{x \left(n_1 - \frac{A-x}{B} \right)}{\delta_2}.$$

Схема на фиг. 110, б отличается от схемы на фиг. 110, а тем что на первой начало координат совпадает с осью фрезы, а на второй с центром закругления.

Формулы для расчета профилей кулаков на секторах δ_2 на полуавтомате мод. СМ5 будут отличаться от формул для секторов δ_2 на полуавтомате мод. ЛП-538 только определенной выше величиной поправки, т. е. приращения координат любой точки кривой поверхности секторов δ_2 на кулаках будут равны:

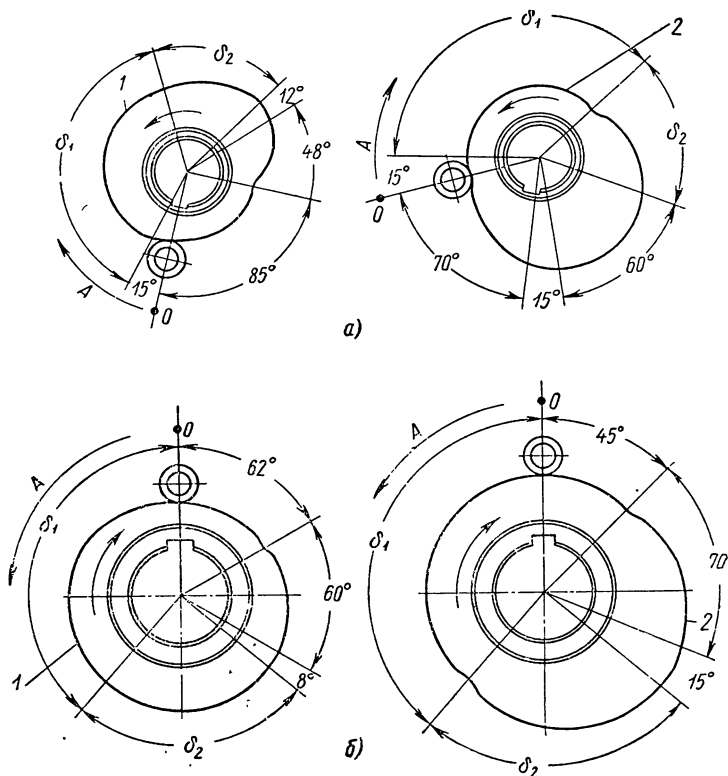
для кулака вертикального хода

$$y_n = n_1(r_6 + r_{\phi}) [\cos \alpha - \cos (\alpha + n\varphi)] + k_2;$$

для кулака горизонтального хода

$$x_n = n_2(r_6 + r_{\phi}) [\sin (\alpha + n\varphi) - \sin \alpha] - k'_1.$$

Так как обе формулы учитывают только приращение радиуса на секторах δ_2 при расчетах кулачков необходимо складывать вели-



Фиг. 115. Схемы относительного расположения кулачков:

α — кулачки к полуавтомату мод. ЛП-538;
 1 — кулак качалки; 2 — кулак ползушки; A — направление отсчета от O;
 б — кулачки к полуавтомату мод. СМ5: 1 — кулак вертикального хода; 2 — кулак горизонтального хода.

чины приращения по x с постоянной величиной $R_{\min \text{ экв}}$, а по y_n — с постоянной величиной наибольшего радиуса сектора врезания на угле δ_1 .

Схемы относительного расположения кулачков на полуавтоматах мод. ЛП-538 и СМ5 приведены на фиг. 115. На полуавтоматах мод. ЛП-538 и СМ5 кулачки вертикального и горизонталь-

ного ходов сидят на одном валу, направляются одной и той же шпонкой и имеют сдвиг соответствующих кривых парно действующих участков кулаков в соответствии с расположением контактирующих с кулаками роликов. На полуавтомате мод. ЛП-538, как видно из чертежа, этот сдвиг равен 63° , а на полуавтомате мод. СМ5 — 180° .

При применении полуавтоматов и устройств для осуществления нового метода зубозакругления в мелкосерийном и штучном производстве желательнее иметь наименьший комплект кулаков и наименьшее число их перестановок при обработке зубчатых колес различных модулей.

При изложении методики расчета кулаков было установлено, что на параметры кулаков влияют модуль зубчатого колеса, в зависимости от которого выбираются глубина закругления торца зуба зубчатого колеса, радиус закругления вдоль высоты зуба, положение центра закругления, определяемое углом α , и длина траектории относительного движения инструмента и изделия, определяемая углом β . Также на параметры кулаков влияет диаметр фрезы и в некоторых случаях (полуавтоматы мод. ЛП-538 и СМ5) высота обрабатываемого зубчатого колеса.

Угол α для зубчатых колес с нормальными размерами зубьев может быть принят одинаковым и примерно равным 3° для всех модулей зубчатых колес.

Угол β также примерно одинаков для зубчатых колес различных модулей, имеющих нормальные размеры зубьев. К величине угла β предъявляется только одно требование: при относительном формообразующем движении инструмента и изделия его величина должна обеспечить обработку полной высоты зуба. Увеличение угла β не нарушает кинематики формообразования, а только несколько увеличивает время обработки.

Если глубина профиля закругления, а значит и глубина профиля инструмента больше чем заложено в расчет кулаков, то при сохранении всех остальных условий, кулак не сможет обеспечить обработку всего профиля закругления по глубине. Если же глубина этого профиля меньше, чем заложено в расчет кулаков, то при сохранении принятой величины перебега, инструмент будет врезаться глубже (относительно торца зубчатого колеса). Для того чтобы избежать этого следует соответственно увеличить величину перебега. При уменьшении глубины профиля инструмента можно было бы при обработке с теми же режимами резания уменьшить угол сектора врезания на кулаке и соответственно сократить время врезания. Если же при уменьшении глубины профиля инструмента вести обработку с помощью того же кулака, то не будет использована указанная возможность сокращения времени врезания. Однако, учитывая, что все время врезания составляет только около 25% от времени обработки зуба, и группируя профили закругления по их глубинам, можно без больших потерь производить одним кулаком обработку группы глубин профилей закругления. При этом

за исходную глубину закругления для расчета кулака принимается наибольшая глубина из подлежащих с его помощью обработке профилей закругления.

Иногда для зубчатых колес смежных модулей принимают одинаковый радиус закругления r_{σ} вдоль высоты зуба. В этом случае при одинаковом угле α они могут обрабатываться фрезой одинакового радиуса r_{ϕ} (фиг. 116) с использованием одного и того же кулака. При этом кулаки должны быть спроектированы с учетом угла β для колес большего модуля, так как колеса меньшего модуля будут иметь меньший угол β . Зубчатые колеса с нормальными размерами зубьев имеют высоту зубьев и параметры закругления, пропорциональные модулю. Действительно, высота зуба $h = 2,25 m$, радиус закругления вдоль высоты зуба $r_{\sigma} = 4,5 m$ и расстояние от делительной окружности до центра закругления $h_c = 1,5 m$, что обеспечивает примерно одинаковый угол β для зубчатых колес различных модулей, но радиусы закругления вдоль высоты зуба для различных модулей разные (фиг. 117). Так как в расчет кулаков полуавтоматов мод. ЛП-538 и СМ5 входит расстояние между центрами фрезы и закругления ($r_{\sigma} + r_{\phi}$), и это для данного кулака есть величина постоянная, то при уменьшении радиусов фрезы ($r'_{\phi}, r''_{\phi}, \tilde{r}_{\phi}$) на ту же величину увеличится радиус закругления вдоль высоты зуба ($r'_{\sigma}, r''_{\sigma}, \tilde{r}_{\sigma}$).

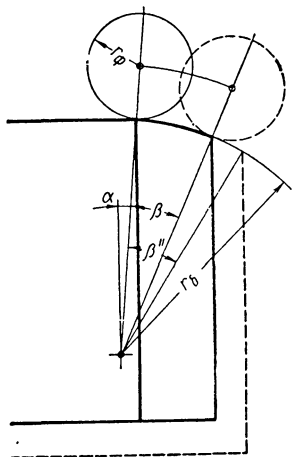
Это соотношение может быть использовано для того, чтобы без смены кулаков на полуавтоматах мод. ЛП-538 и СМ5 обрабатывать зубчатые колеса различных модулей.

С помощью одного кулака можно обработать приведенные ниже радиусы закругления вдоль высоты зуба фрезами следующих диаметров:

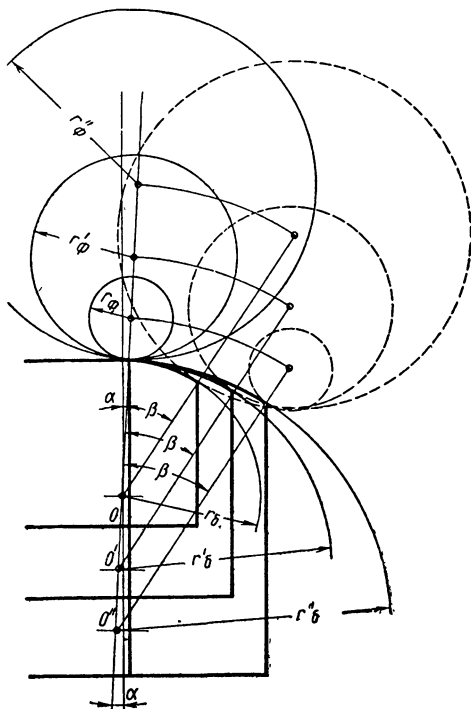
m в мм . . .	2,5	3,0	4,0
r_{σ} в мм . . .	11	14	18
d_{ϕ} в мм . . .	39	33	25
	44	38	30
	50	44	36
	60	54	46

Так как все равно фреза делается для обработки зубчатого колеса определенного модуля, то в данном случае она выполняется не любого, а определенного диаметра, что не требует никаких дополнительных затрат.

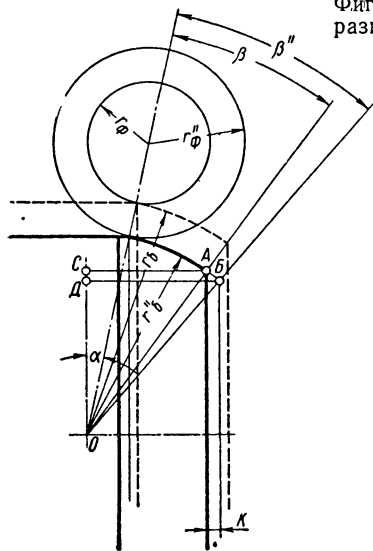
Если по каким-либо причинам необходимо производить обработку с помощью одного и того же кулака фрезой большего или меньшего диаметра по сравнению с указанными выше, то соответ-



Фиг. 116. Схема обработки зубчатых колес разного модуля фрезой одного диаметра.



Фиг. 117. Схема обработки зубчатых колес разных модулей фрезами разных диаметров.



Фиг. 118. Схема для определения величины изменения расстояния между осью зубчатого колеса и центром фрезы.

ственно закругление вдоль высоты зуба будет меньшего или большего радиуса, но при этом величина угла β будет отличаться от запроектированной при расчете кулака. При увеличении диаметра фрезы угол β будет увеличиваться.

Для того чтобы можно было в этом случае обработать полную высоту зуба, надо изменить расстояние между осью зубчатого колеса и центром фрезы.

Определим величину смещения K (фиг. 118).

Из треугольника $ОСА$

$$AC = r_{\delta} \sin (\alpha + \beta);$$

Из треугольника $ОДБ$

$$K = ДБ - AC = r_{\delta} [\sin (\alpha + \beta'') - \sin (\alpha + \beta)]$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый метод зубозакругления обеспечивает следующие преимущества:

1. Резкое увеличение стойкости инструмента, устранение частого выхода его из строя, упрощение заточки по сравнению с существующим методом зубозакругления.

2. Устранение травматизма рабочих на этой операции за счет изменения формы стружки.

3. Увеличение производительности в 3—6 раз.

4. Создается возможность надежного включения операции зубозакругления в состав автоматических линий, что было весьма затруднительно при существующих методах обработки.

5. Кинематика нового оборудования обеспечивает широкое внедрение бочкообразной формы закругления.

В работе дан анализ процесса зубозакругления дисковой фасонной фрезой, имеющей движение вдоль высоты зуба, и на его основе рекомендованы режимы обработки. Установлена возможность работы с большими подачами вдоль высоты зуба. Разработана методика расчета и проектирования кулаков для различных схем станков, обеспечивающих требуемый цикл обработки и заданные режимы резания.

Разработана методика проектирования дисковых фасонных фрез для зубозакругления. Проведена проверка и испытание нового вида зубозакругления по технологическому процессу, на специальном стенде и ходовые испытания на автомобилях и станках.

В результате испытаний установлено:

1. При обработке зубчатых колес, сборке станков и коробок передач автомобилей не выявлено никаких дефектов или затруднений.

При сборке отмечена лучшая включаемость зубчатых колес с новым закруглением.

2. Стендовые и ходовые испытания установили:

а) за все время испытаний не имело место ни одного случая выхода из строя зубчатых колес, закругленных различными профилями с помощью нового метода как с неполностью прорезанными торцами венца, так и с полностью прорезанным торцом венца;

при этом ширина венца зубчатых колес была около 5,5 мм, что говорит о допустимости изменения формы торца венца зубчатого колеса, вызываемого применением нового метода зубозакругления;

б) износ зубчатых колес, закругленных новым методом, меньше износа зубьев зубчатых колес, закругленных пальцевой фрезой;

в) включаемость зубчатых колес, закругленных новым методом, лучше, чем зубчатых колес, закругленных с помощью пальцевой фрезы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чапаев Н. П. Изготовление и отделка зубчатых колес. Машгиз, М. 1949.
 2. Фрайфельд И. А. Торцовые фасонные фрезы для образования скосов на зубьях шестерен. Сб. ЛОНИТОМАШ. Теория и расчет зубчатых колес, кн. 13, 1949.
 3. Архангельский А. Л. Червячные фрезы для высокопроизводительной обработки торцовых элементов зубьев шестерен и муфт включения. Исследование передаточных механизмов. Труды ЦНИИТМАШ, кн. 4, 1947.
 4. Гинзбург Е. Г., Методы и приспособление для закругления торцов у зубьев шестерен. Ленинградский дом научно-технической пропаганды. Информационный технический листок № 64 (637, 1954).
 5. Перепелица Я. И., Гидрокопировальный зубозакругловочный станок, Краматорский машиностроительный завод, 1957.
 6. Бурштейн И. Е. Закругление торца зуба переключаемых зубчатых колес. «Станки и инструмент», 1960, № 9.
 7. Бурштейн И. Е. Новый метод зубозакругления и снятия фасок по контуру зубьев зубчатых колес и система станков и приспособлений для его осуществления. В книге «Прогрессивная технология машиностроения», НТО Машпром, Рига, 1961.
 8. Способ закругления торцов зубьев переключаемых колес. «Бюллетень изобретений», 1960, № 14.
-

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение	3
Форма закругления торцевой поверхности зубьев и существующие методы выполнения закруглений	5
1. Форма закругления торцевой поверхности зубьев	5
2. Методы обработки торцевой поверхности зуба переключаемых зубчатых колес	7
Закругление торца зуба с помощью пальцевой фрезы, ось которой параллельна торцу зубчатого колеса	7
Заострение торцов зубьев с помощью трубчатой фрезы	14
Заострение зубьев с помощью торцевой головки и приспособления к зубофрезерному станку	17
Заострение зубьев с помощью червячной фрезы	18
Заострение пальцевой фрезой, ось которой лежит в плоскости, перпендикулярной торцу зубчатого колеса	24
Закругление торца зубьев дисковой фасонной фрезой, имеющей относительное движение вдоль высоты зуба	30
1. Сущность нового метода зубозакругления	30
2. Врезание в торец венца зубчатого колеса	31
3. Обработка вдоль высоты зуба	50
4. Конструкция режущего и вспомогательного инструмента	76
Контрольные испытания зубчатых колес	96
Приспособления и станки для нового метода зубозакругления	120
1. Зубозакругляющее оборудование, обеспечивающее обработку вдоль высоты зуба благодаря перемещению обрабатываемой поверхности вокруг центра закругления	120
Зубозакругляющее приспособление мод. ЛП-475 к горизонтально-фрезерному или токарному полуавтомату	120
Зубозакругляющий полуавтомат на базе горизонтально-фрезерного станка мод. 6М 82Г	136
2. Зубозакругляющее оборудование, обеспечивающее обработку вдоль высоты зуба благодаря перемещению центра инструмента относительно центра закругления	142
Приспособление для зубозакругления к торцекопировальному станку	142
Зубозакругляющий полуавтомат мод. СМ5	146
Расчет и проектирование кулаков	151
1. Расчет режимов обработки и распределение углов, зон и секторов на кулаках	151
2. Расчет профиля кулаков	159
Заключение	173
<i>Литература</i>	174

И. Е. Бурштейн
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ
ЗУБОЗАКРУГЛЕНИЯ

Редактор издательства *И. И. Лесниченко*
Переплет художника *Е. В. Бекетова*
Технический редактор *Н. Ф. Демкина*
Корректор *О. Е. Гинзбург*

Сдано в производство 12/XII 1962 г.
Подписано к печати 19/VI 1963 г.
Т-05687 Печ. л. 11 Бум. л. 5,5 Тираж 5000 экз.
Уч.-изд л. 11
Цена 65 коп. Формат 60 × 90¹/₁₆ Зак. 1060

Типография Металлургиздата
Москва, Цветной бульв., д. 30.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
53	6-я сверху	Там уже	Там же
84	2-я сверху	В	ВВ
145	16-я снизу	закругления фрезы,	закругления и фрезы,
155	17-я снизу	$T_{\sigma} = s_{\sigma}$	$T_{\sigma} = z_{\sigma}$
158	Табл. 28, 1-я графа, 13-я снизу (в числителе)	$(l_n + l_a + l_z) 60$	$(h_n + h_a + h_z) 60$
158	Там же, 12-я снизу (в числителе)	$l_z \cdot 60$	$h_z \cdot 60$

И. Е. Бурштейн, Высокопроизводительные методы зубозакругления, зак. 1060

65 коп.



МАШГИЗ

Москва, Б-66, 1-й Басманный пер., 3