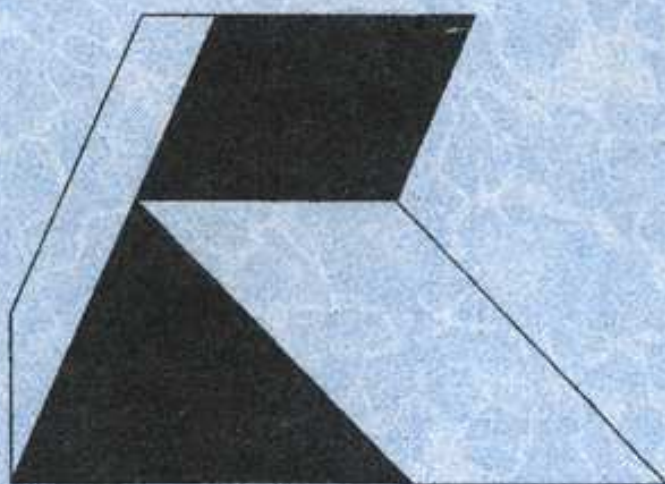


Б. И. КОГАН

**ОБРАБОТКА ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Учебное пособие



Кемерово 2003

Министерство образования Российской Федерации
Государственное учреждение
Кузбасский государственный технический университет

Б. И. КОГАН

ОБРАБОТКА ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Учебное пособие

Кемерово
Кузбассвузиздат
2003

УДК 621.833.002

ББК 34.68

К57

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра технологии металлов и ремонта машин Кемеровского сельскохозяйственного института; профессор, доктор технических наук **М. В. Чибряков**;
профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки
Российской Федерации **А. Н. Коршунов**

Печатается по решению редакционно-издательского совета КузГТУ

Коган Б. И.

К57 **Обработка зубьев цилиндрических крупномодульных зубчатых колес:**
Учеб. пособ. / ГУ Кузбасск. гос. техн. ун-т. – Кемерово: Кузбассвуиздат,
2003. – 56 с.

ISBN 5-202-00585-7.

Учебное пособие содержит рекомендации и указания по технологическому обеспечению качества обработки зубьев цилиндрических крупномодульных зубчатых колес на базе современных разработок отечественных ученых и производственного опыта.

Предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по специальности 120100 «Технология машиностроения», при выполнении курсовых и дипломных проектов, может быть полезно работникам машиностроительных и ремонтных заводов.

К 2704090000 Без объявл.
Т45(03)-2003

ББК 34.68
УДК 621.833.002

Борис Исаевич Коган

**ОБРАБОТКА ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Учебное пособие

Редактор В. И. Труханова

Подписано к печати 20.02.2003. Формат 60х84¹/₁₆. Бумага офсетная № 1.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,3. Тираж 500 экз. Заказ № 57.

Издательство «Кузбассвуиздат». 650043, Кемерово, ул. Ермака, 7. Тел. 58-34-48.

ISBN 5-202-00585-7

© Б. И. Коган, 2003

© Издательство

«Кузбассвуиздат», 2003

В машиностроении применяются крупномодульные зубчатые передачи: цилиндрические наружного зацепления с прямыми, косыми и шевронными зубьями, цилиндрические внутреннего зацепления с прямыми зубьями; конические с прямыми, косыми и криволинейными зубьями; обычные и глобоидные червячные передачи. По конструктивным признакам они делятся на шестеренные валы, литые и цельно-кованные колеса, колеса с насадками-бандажами, в том числе червячные и зубчатые венцы. Диаметры шестеренных валов превышают 250 мм, колес – 1000 мм, венцов – 1500 мм, конических колес – 300 мм. Модуль от 7 мм, степень точности – 7,8,9,10. В качестве материала используются легированные стали 40X, 40ГЛ, 40ХН, 38ХГС, 35ХМП, 30ХГТ, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А и др. Как правило, полуфабрикаты подвергаются термической обработке: улучшению, цементации, закалке, азотированию. Данное учебное пособие содержит указания по обработке зубьев цилиндрических зубчатых колес модулем ≥ 7 мм, технологически обеспечивающие их качество. Оно предназначено для студентов при курсовом и дипломном проектировании.

1. Параметры качества зубьев

Согласно ГОСТ 1643-81 качество изготовления зубчатых колес оценивается нормами кинематической точности, плавности работы передачи и нормами контакта зубьев, допуски и предельные отклонения по которым для различных степеней точности приведены в табл. 2-4. Кроме того стандарт регламентирует нормы бокового зазора, который служит для компенсации погрешностей изготовления зубчатых колес, обеспечения нормальных условий смазки, а также компенсации погрешностей сборки и температурных деформаций.

Виды сопряжений зубчатых колес в передаче в зависимости от степени точности по нормам плавности работы указаны в табл. 1.

Таблица 1

Вид сопряжений	А	Б	С	Д	Е	Н
Степень точности по нормам плавности	3-12	3-11	3-9	3-8	3-7	3-7

Установлены шесть классов отклонений межосевого расстояния, обозначаемых в порядке убывания точности римскими цифрами от I до VI. Гарантированный боковой зазор в каждом сопряжении обеспечивается при соблюдении предусмотренных классов отклонений межосевого расстояния (для сопряжений D, C, B и A – классов III, IV, V, и VI соответственно, а для H и E – II класса).

Нормы кинематической точности
(показатели F'_{ir} , F_{rr} , F_{vwr} , F_{cr} , F''_{ir}).

Степень точности	Обозначение	Модуль m , мм	Делительный диаметр d , мм						
			До 125	св. 125 до 400	св. 400 до 800	св. 800 до 1600	св. 1600 до 2500	св. 2500 до 4000	св. 4000 до 6300
			мкм						
7	F'_i	От 1 до 25	$F_p + f_f$						
	F_r	От 10 до 16	-	71	90	100	112	125	140
		От 16 до 25	-	80	100	112	125	140	160
	F_c	От 1 до 25	22	40	60	100	160	200	300
	F_{vw}	От 1 до 25	22	40	60	100	-	-	-
8	F''_i	От 10 до 16	-	100	125	140	-	-	-
	F'_i	От 1 до 25	$F_p + f_f$						
	F_r	От 10 до 16	-	90	112	125	140	160	180
		От 16 до 25	-	100	125	140	160	180	200
		От 25 до 40	-	-	140	160	190	224	250
	F''_i	От 10 до 16	-	125	160	180	-	-	-
9	F_{vw}	От 1 до 40	28	50	80	120	-	-	-
	F_c	От 1 до 40	28	50	80	120	200	250	400
	F_r	От 10 до 16	-	125	160	160	180	200	224
		От 16 до 25	-	160	200	200	224	224	250
		От 25 до 40	-	-	250	250	280	280	315
		От 40 до 55	-	-	315	315	355	355	400
10	F''_i	От 10 до 16	-	180	224	224	-	-	-
	F_r	От 10 до 16	-	180	200	200	224	250	280
		От 16 до 25	-	224	250	250	280	280	315
		От 25 до 40	-	-	315	315	355	355	400
		От 40 до 55	-	-	400	400	450	450	500

Таблица 3

Нормы плавности работы (показатели f'_{ir} , f_{pr} , f_{pbr} , f_{fr} , f''_{ir})

Степень точности	Обозначение	Модуль m , мм	Делительный диаметр, мм	
			Св. 125 до 400	Св. 400 до 800
			мкм	
7	f_{pb}	От 10 до 16	±24	±26
		От 16 до 25	±30	±34
	f_f	От 10 до 16	22	26
		От 16 до 25	30	36
	f''_i	От 10 до 16	36	40

Степень точности	Обозначение	Модуль m , мм	Делительный диаметр, мм	
			Св. 125 до 400	Св. 400 до 800
			мкм	
	f'_i	От 10 до 16	50	56
		От 16 до 25	63	71
	f_{pt}	От 10 до 16	± 25	± 28
		От 16 до 25	± 32	± 36
8	f'_i	$\gg 10 \gg 16$	71	80
		$\gg 16 \gg 25$	90	100
	f_{pt}	$\gg 10 \gg 16$	± 36	± 40
		$\gg 16 \gg 25$	± 45	± 50
	f_{pb}	$\gg 10 \gg 16$	± 34	± 38
		$\gg 16 \gg 25$	± 42	± 48
	f_f	$\gg 10 \gg 16$	32	40
		$\gg 16 \gg 25$	45	56
	f''_i	$\gg 10 \gg 16$	50	56

Таблица 4

Нормы плавности работы (показатель f_{zot})

Степень точности	Модуль m , мм	Частота R циклической погрешности ($R=Z$)	
		Св. 125 до 250	Св. 250 до 500
		мкм	
7	$\gg 10 \gg 16$	36	42
8	$\gg 10 \gg 16$	53	60

Принятые обозначения:

 F'_i - допуск на кинематическую погрешность зубчатого колеса; F_r - допуск на радиальное биение зубчатого венца; F_c - допуск на погрешность обката; F''_i - допуск на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса; F_{vw} - допуск на колебание длины общей нормали; f'_i - допуск на местную кинематическую погрешность зубчатого колеса; $\pm f_{pb}$ - предельные отклонения шага зацепления; $\pm f_{pt}$ - предельные отклонения шага; f_f - допуск на погрешность профиля зуба; f''_i - допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе; f_{zot} - допуск на циклическую погрешность зубцовой частоты передачи.

Нормы контакта зубьев в передаче (суммарное пятно контакта)

Степень точности	Относительные размеры суммарного пятна контакта в процентах	
	по высоте зубьев, не менее	по длине зубьев, не менее
7	45	60
8	40	50
9	30	40
10	25	30
11	20	25

2. Технология обработки зубьев

Крупномодульные зубчатые колеса, прямозубые и косозубые, имеют зубья с эвольвентным профилем и смешанным [3], которые обрабатывают червячными, модульными дисковыми и пальцевыми фрезами.

Кривизна эвольвенты зубьев при модуле более 25 мм и их числе более 130 настолько незначительна, что практически ее можно принять прямой и это, как показал анализ, укладывается в поле допусков на изготовление колес таких размеров с зубьями эвольвентного профиля. Исходя из этого, считаем экономически целесообразным колеса с числом зубьев больше 130 и модулем от 25 мм и выше изготавливать с прямобочным профилем зубьев. При этом сопряженный профиль зуба шестерни принимается из расчета взаимного огибания с прямобочным профилем зуба колеса, благодаря этому обеспечиваются точность и несущая способность передач, равные зубчатым парам с эвольвентным профилем зубьев. В зубчатых колесах с числом зубьев на колесе 250 и более сопряжение прямобочного профиля с эвольвентным профилем шестерни укладывается в допуски на зацепление. Например, зубчатую пару механизма поворота экскаватора ЭШ 10-60 ($z_1=192$; $z_2=13$ и $m=36$ мм) можно изготавливать с прямобочным зубом на колесе и с эвольвентным на шестерне.

Технологический процесс обработки цилиндрических зубчатых колес предусматривает следующий порядок нарезания червячными фрезами:

1. Зубчатые колеса модулем от 3 до 8 нарезаются за один черновой и один чистовой проход.

2. Зубчатые колеса модулем от 8 до 14 нарезаются за два черновых и один чистовой проход. Колеса более крупных модулей, если они нарезаются «начерно» и «начисто» червячными фрезами, также обрабатываются за три прохода.

3. Зубчатые колеса 7-й степени точности после чернового прохода дисковыми фрезами нарезаются червячной фрезой за два прохода — предварительный и чистовой.

4. Зубчатые колеса 8-й и более низких степеней точности после чернового прохода дисковыми фрезами нарезаются червячной фрезой за один проход.

5. Шестеренные валки, прорезанные дисковыми фрезами, червячной фрезой обрабатываются за два прохода.

Черновая обработка дисковыми фрезами применяется для зубчатых колес модулем от 12 и выполняется в следующем порядке.

1. Колеса модулем от 12 до 30 с числом зубьев менее 60 прорезаются двумя дисковыми фрезами за два прохода. Подачи при первом проходе берутся с коэффициентом 0,9, при втором проходе с коэффициентом 1,4 против табличных.

2. Колеса с числом зубьев более 60 прорезаются двумя дисковыми фрезами за один проход. Табличная подача принимается с коэффициентом 0,9.

3. Колеса модулем от 12 до 16 при числе зубьев более 130 могут обрабатываться тремя дисковыми фрезами за один проход. Табличная подача в этом случае принимается с коэффициентом 0,8.

Необходимость двух проходов при прорезании колес с числом зубьев менее 60 объясняется тем, что в этом случае профиль впадины зубьев значительно отличается от профиля рейки. Это не дает возможности получить за один проход при работе двумя фрезами с прямолинейным профилем необходимую величину и равномерное расположение припуска на нарезаемых зубьях. Такую возможность создает обработка в два прохода, при этом фрезы устанавливаются на оправке на расстоянии A (рис. 1, а) с таким расчетом, чтобы при прорезании на полную глубину, равную $2,22 m_n$, зуб n , находящийся между фрезами, имел минимальный и наиболее равномерно расположенный припуск. Деление ведется через зуб, в результате чего половина зубьев n имеет заданный припуск, а вторая половина зубьев m имеет увеличенный припуск.

После окончания первого прохода нарезаемое колесо поворачивается на один зуб (рис. 1, б) и производится второй проход также с делением через

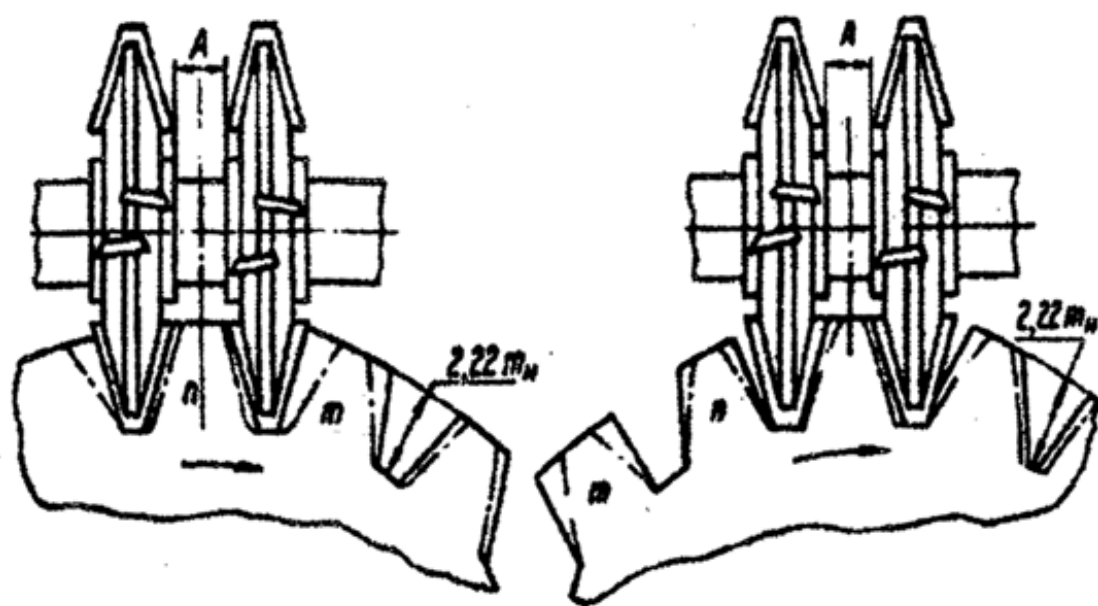


Рис. 1. Схема прорезания дисковыми фрезами зубчатых колес с числом зубьев менее 60:

а — первый проход; б — второй проход

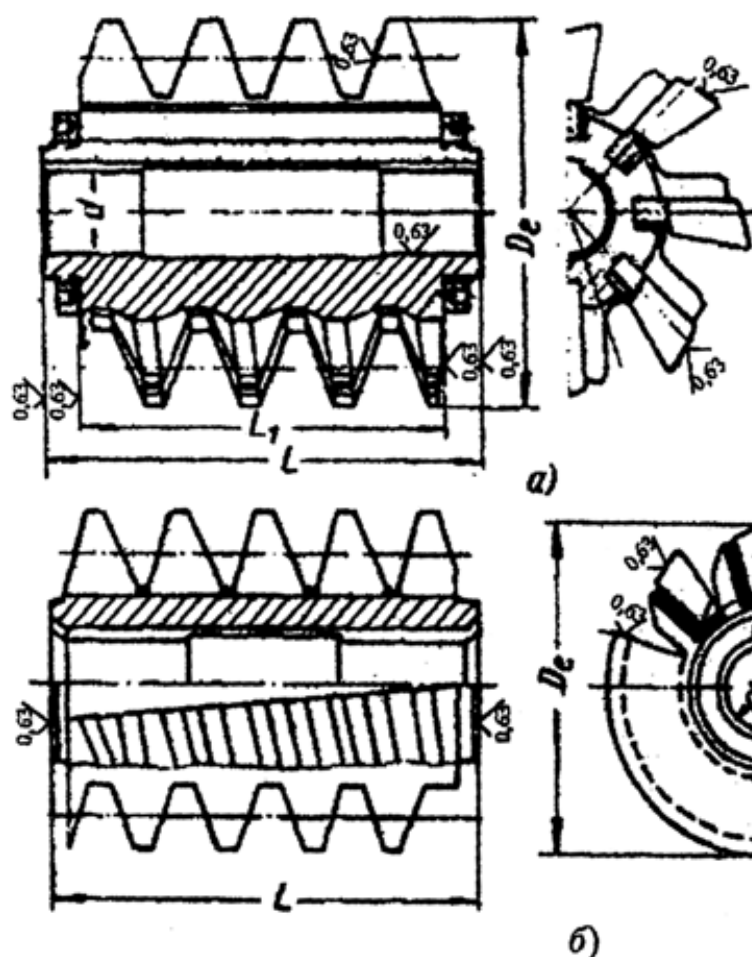
зуб. При втором проходе снимается излишний припуск только с зубьев m , и величины припуска становятся такими же, как и у зубьев n . Второй проход производится на полную глубину, равную $2,22 m_n$, с увеличенной в 1,4 раза подачей против табличной.

Пальцевыми фрезами нарезание зубьев обычно производится модулем до 45 за три прохода — черновой, предчистовой и чистовой. Для зубьев модулем свыше 45 применяются четыре прохода — два черновых, предчистовой и чистовой.

2.1. Обработка червячными фрезами

Червячные фрезы являются наиболее распространенным зуборезным инструментом и применяются для чернового и чистового зубонарезания.

До модуля 10 червячные фрезы обычно выполняются цельными с основными размерами, принятыми по ГОСТ 9324 — 80. Фрезы более крупных модулей изготавливаются сборными.



m_n	D_e , мм	L , мм	d , мм	z
12	230	230	70	11
14		260		
16	260	290	80	10

m_n	D_e , MM	L, MM	d, MM	z
18	250	300	80	10
20	270	340		
22				
24	290	370		100
26				
28	320	400		
30				

Рис.2. Червячные фрезы для нарезания зубчатых колес:
а — со вставными гребенками; б — сварной конструкции

Для модулей от 10 до 16 применяются сборные червячные фрезы со вставными гребенками (рис. 2, а). Гребенки изготавливаются из кованой или литой быстрорежущей стали Р18 и Р9. Червячные фрезы для модулей от 18 до 30 часто выполняются в сварном варианте (рис. 2, б). Для этого к корпусу из углеродистой стали приваривают предварительно обработанные отдельные зубья из быстрорежущей стали. Сварка ведется с подогревом корпуса до

температуры 400 — 500° С электродами типа К-5.

При нарезании цилиндрических зубчатых колес червячной фрезой режущие кромки инструмента имеют неравномерную загрузку. Наиболее нагруженными элементами являются вершинные кромки зубьев. Рассматривая процесс зубофрезерования, можно установить, что в работе обычно участвует около $\frac{1}{25}$ общего режущего периметра фрезы. При затуплении сравнительно малого участка возникает необходимость стачивания зубьев червячной фрезы по всей ее длине, хотя часть зубьев совсем или почти совсем не участвовала в работе. Таким образом, режимы резания и производительность связаны с характером загрузки режущих кромок червячной фрезой.

Одним из способов улучшения условий резания является применение высотной коррекции зубьев фрезы. К такому виду инструментов относится червячная фреза «Прогресс» конструкции НПО «НИИПТМАШ», г.Краматорск.

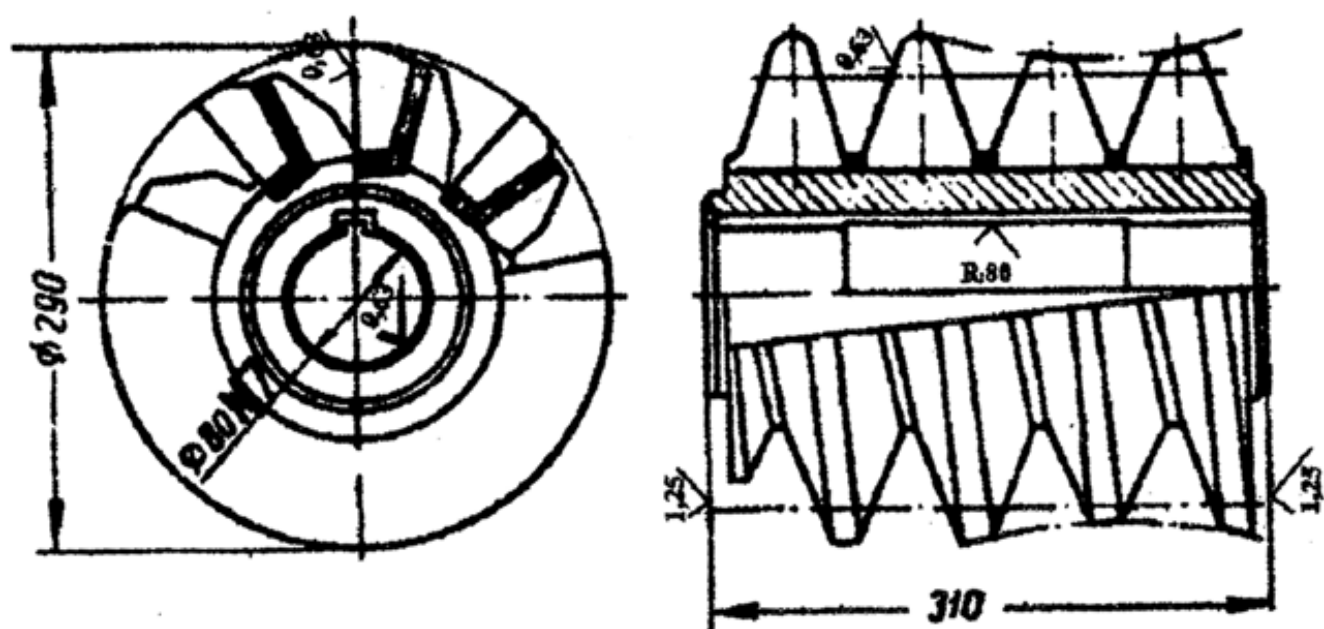


Рис. 3. Фреза «Прогресс» сварной конструкции

Основной принцип, заложенный в конструкцию фрезы «Прогресс», сводится к следующему: при фрезеровании зубьев обычными червячными фрезами границы контактного поля между режущими зубьями фрезы и заготовкой проходят по некоторой пространственной кривой. Характером граничной кривой в основном и объясняется неравномерная загрузка зубьев фрезы. Путем корригирования высоты зубьев фрезы, участвующих в резании в заходной части, выпрямляют кривую контакта, в результате чего наружная образующая цилиндра фрезы становится криволинейной (рис. 3).

Форма кривой зависит от числа зубьев нарезаемого колеса, угла наклона их, величины и направления подачи. Такая форма фрезы приводит к более равномерной загрузке ее зубьев, участвующих в работе, и позволяет

значительно увеличивать подачи. Данные о величине подач, применяемых при работе фрезами «Прогресс», приведены по материалам Ново-Краматорского машиностроительного завода (НКМЗ) в табл. 6.

Хотя фрезы и рассчитываются для определенного диапазона числа зубьев нарезаемой заготовки, ими можно нарезать колеса с другими числами зубьев. Однако в этом случае приходится изменять величину подачи против расчетной.

Особенность работы фрезы «Прогресс» заключается также и в том, что ее необходимо точно устанавливать относительно оси нарезаемого колеса. Для этой цели на червячной фрезе наносят риску по вершине зуба на определенном расстоянии от корригированной части. Эта риска при настройке фрезы должна совпадать с осью колеса.

Таблица 6

Подачи при черновом нарезании стальных заготовок фрезами «Прогресс» при встречном фрезеровании и глубине резания 2,2 модуля. Стойкость инструмента 10 ч.

Твердость материала НВ	Подачи в мм на оборот детали		
	при модуле в мм		
	6-8	10-12	14-16
200	6-11	12-14	6-8
200-220	6-11	5-7	3-5
250	6-7	5-6	3,5-4

Несмотря на очевидные возможности увеличения подач при работе фрезами «Прогресс», они пока не нашли широкого распространения. Это объясняется следующими причинами: а) повышение производительности достигается в диапазоне определенного числа зубьев нарезаемого колеса, для которого рассчитана данная фреза; б) при затуплении режущих кромок исключается возможность осевой перестановки фрезы, так как это приведет к смещению корригированного участка инструмента; в) некоторым усложнением изготовления фрезы «Прогресс» по сравнению с обычными червячными фрезами; г) и, наконец, тем, что если при нарезании крупномодульных колес черновой проход производить двумя дисковыми фрезами, то по сравнению с применением для этих условий фрез «Прогресс» не получается ощутимого увеличения производительности.

Другой путь повышения стойкости и производительности червячных фрез – применение метода осевых смещений инструмента. Для этого фреза одновременно с вертикальной подачей получает соответствующую подачу вдоль оси суппорта, а нарезаемая заготовка получает некоторое дополнительное перемещение за каждый свой оборот. Такой способ нарезания называется методом двух подач [2].

При непрерывной осевой подаче фрезы каждый участок режущей кромки последовательно проходит все стадии нагружения и поэтому износ режущих кромок происходит более равномерно. Применение метода двух подач

увеличивает стойкость фрез от полутора до трех раз, что, в свою очередь, позволяет повышать режимы резания и обеспечивать рост производительности зубофрезерования червячными фрезами.

Зарубежные фирмы также применяют такого рода устройства на вновь выпускаемых станках, например, фирма «Дэвид Браун». Некоторое отличие этих устройств заключается в том, что в них используется так называемый метод диагональной подачи, при которой движение фрезы направлено не вдоль оси изделия, а под углом, соответствующим углу наклона нарезаемых косозубых колес. На станках, работающих с диагональной подачей, направляющие суппорта могут устанавливаться под необходимым углом. Исследование показывает, что плавность работы колес, нарезаемых диагональной подачей, выше, чем нарезаемых обычным способом. Это объясняется более выгодным расположением профильной огранки, т. е. расположением ее не вдоль зуба, а под некоторым углом к нему.

Многозаходные червячные фрезы для чернового нарезания колес крупных модулей не находят применения в условиях тяжелого машиностроения. Исследования, проведенные на Ново-Краматорском машиностроительном заводе для двухзаходных фрез модулем 12, дали увеличение производительности в 1,3 раза по сравнению с однозаходными фрезами. Для более крупных модулей (18 — 26) существенного повышения производительности от применения многозаходных фрез не получено.

Существенным фактором, благоприятно влияющим на точность нарезаемых зубчатых колес и производительность процесса, является увеличение диаметра червячной фрезы. Увеличение диаметра червячной фрезы повышает точность профиля нарезаемых зубчатых колес, так как, во-первых, в этом случае возрастает число режущих кромок, профилирующих эвольвентную поверхность зубьев, и, во-вторых, уменьшается угол подъема винтовой линии, что, в свою очередь, снижает погрешности профиля самой фрезы. С другой стороны, увеличение диаметра фрезы позволяет повышать подачи на оборот нарезаемой заготовки благодаря наличию большего количества режущих канавок и большей жесткости установки инструмента за счет увеличения диаметра фрезерной оправки. Поэтому стремление к применению червячных фрез с увеличенным диаметром является вполне закономерным.

Погрешности профиля и основного шага нарезаемых зубчатых колес зависят не только от точности исполнения червячной фрезы, но и от точности установки ее на станке и качества заточки.

Погрешности заточки червячной фрезы, являющейся затылованным инструментом, приводят к отклонениям профиля и основного шага нарезаемого колеса. Характер этих отклонений показан на рис. 4. Радиальное расположение передней поверхности зубьев червячной фрезы (рис. 4, а), естественно, не вызывает появления отклонений в профиле фрезы и зубьев изделия. Поднутрение передней поверхности зубьев червячной фрезы (рис. 4, б) приводит к искажению профиля инструмента и зубьев

колеса, показанному на рис. 4 сплошными линиями. В этом случае имеет место утолщение головки зубьев нарезаемого колеса и отклонение основного шага в плюс от номинала. Образование отрицательного переднего угла при заточке фрезы (рис. 4), также искажает профиль инструмента и нарезаемого колеса. Такое расположение передней поверхности приводит к утонению головки зубьев и отклонениям основного шага в минус от номинала у нарезаемого колеса.

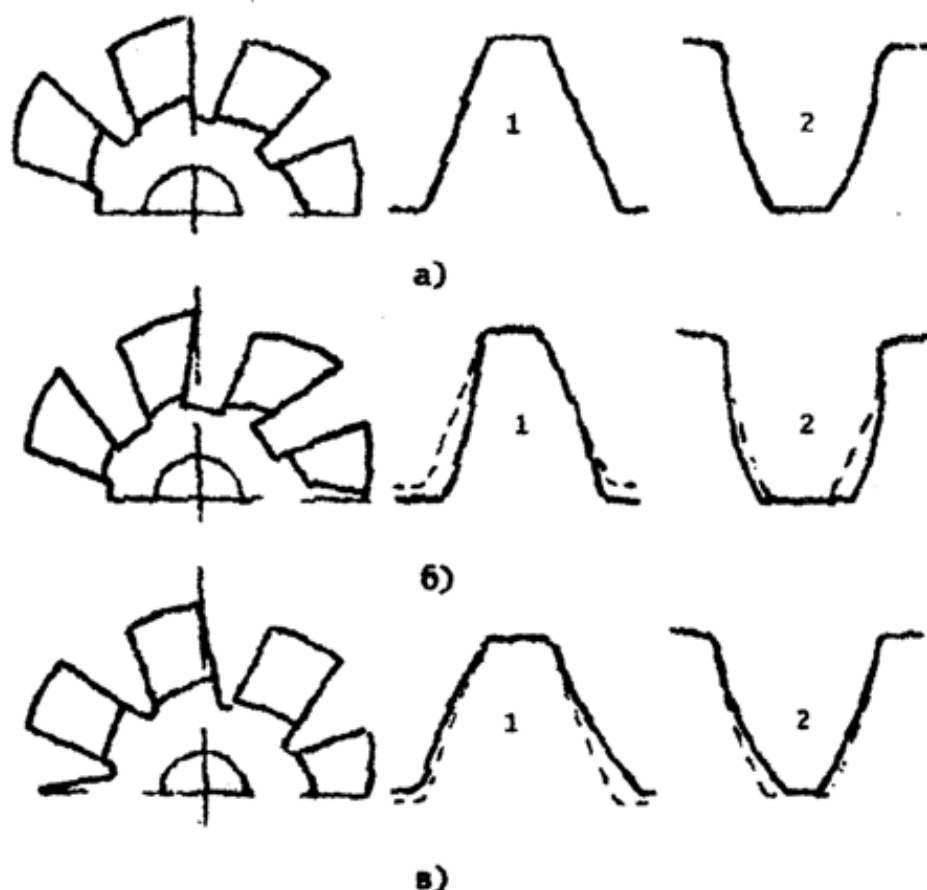


Рис. 4. Влияние погрешностей точки червячной фрезы на профиль зубьев нарезного колеса:
1 — профиль фрезы; 2 — профиль зуба колеса

К искажению профиля нарезаемого колеса могут привести другие погрешности заточки червячной фрезы, такие как отклонение шага винтовых канавок (угла подъема) и отклонение окружного шага расположения режущих канавок. Поэтому вопросы организации правильной заточки и контроля инструмента после заточки являются одним из основных условий обеспечения необходимого качества зубчатых колес в условиях тяжелого машиностроения.

Последующий контроль крупных зубчатых колес не только является довольно сложным процессом, но и результаты проверки после окончательного нарезания большого зубчатого колеса могут только фиксировать полученные отклонения, возможности же исправления их весьма ограничены.

2.2. Твердосплавные червячные фрезы типа «Победа»
(конструкции НПО «НИИПТМАШ» (г. Краматорск) для обработки
крупномодульных закаленных колес (А.С. 897428, А.С. 933318)

Особенностью работы крупномодульного зуборезного инструмента и, в частности, червячных фрез, является удаление из впадин зубьев обрабатываемых колес сравнительно больших по периметрам и толщинам слоев металла, что сопровождается высокой температурой в зоне резания и снижает стойкость инструмента. Стандартные конструкции червячных фрез, где размеры режущих кромок инструмента зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса, не позволяют увеличить количество режущих элементов и таким образом снизить нагрузки на режущие кромки. Конструктивные недостатки стандартных червячных фрез особенно проявляются при желании оснастить фрезу твердым сплавом. Из-за больших размеров режущих кромок усложняется процесс напайки зубьев твердым сплавом, заточка зубьев, обеспечение точности инструмента.

Между тем анализ схемы резания зубьев червячной фрезы при чистовом зубофрезеровании (рис. 5) показывает, что в этом случае нет необходимости выполнять режущие кромки инструмента соизмеримыми с размерами обрабатываемых зубьев колеса, т.к. кромки участвуют в резании не всей длиной.

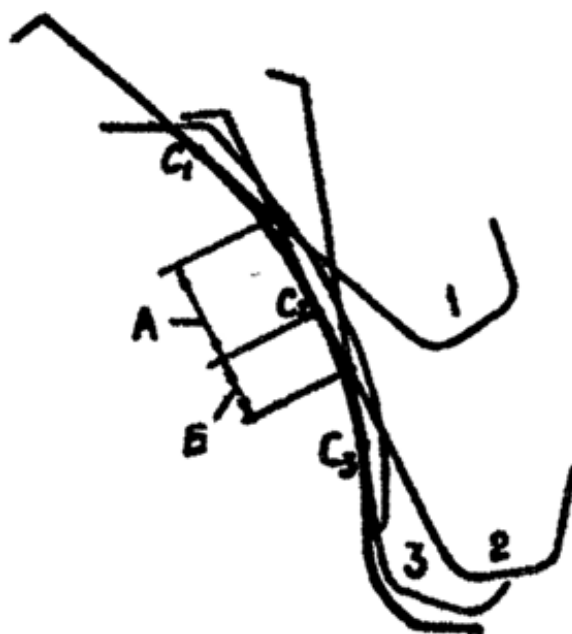


Рис. 5. Схема резания зубьев червячной фрезы при чистовом зубофрезеровании.

Рабочая длина режущей кромки определяется из условия обязательного обеспечения перекрытия резов в процессе огибания эвольвентной поверхности зубьями фрезы и включает два участка А и Б, расположенных, соответственно, ниже и выше точки профилирования С. Длина участка А и Б увеличивается с ростом модуля и уменьшением числа зубьев обрабатываемого колеса и инструмента.

У чистовых червячных фрез типа «Победа» длина режущих кромок зубьев не зависит от размеров обрабатываемых зубьев колеса и составляет с учетом возможных погрешностей изготовления инструмента по углу профиля и величины припуска — 20 мм. Уменьшение размеров режущих кромок в 2-5 раз по сравнению со стандартными фрезами позволило увеличить количество режущих элементов фрезы в 1,5-2 раза, упростить процесс армирования инструмента твердым сплавом и его заточку. Разработано несколько модификаций универсальных крупномодульных ($m=12-65$ мм) фрез типа «Победа».

Обработка зубьев двухкорпусной фрезой.

Двухкорпусная конструкция фрез типа «Победа» предназначена для чистовой обработки зубьев колес за два прохода. Фреза (рис. 6) состоит из левого 1 и правого 1' корпусов с конической винтовой нарезкой одного направления, в пазах которой с помощью рифлений и штифтов 3 закреплены державки 4 и 4' с напаянными пластинками твердого сплава 5 и 5'. Зубья колеса 6 до закалки нарезаются с припуском червячной, дисковой или пальцевой черновой фрезой с «протуберанцем».

Каждый из корпусов фрезы устанавливается отдельно на зубофрезерной оправке со смещением относительно межосевого перпендикуляра $00'$ на расстояние l_y , определяемое точкой В (В') пересечения окружности нижней граничной точки эвольвенты зубьев и линии станочного зацепления ВЕ (В'Е'). Размеры установочного расстояния не зависят от числа зубьев обрабатываемого колеса. Величина l_y определяется профильным углом

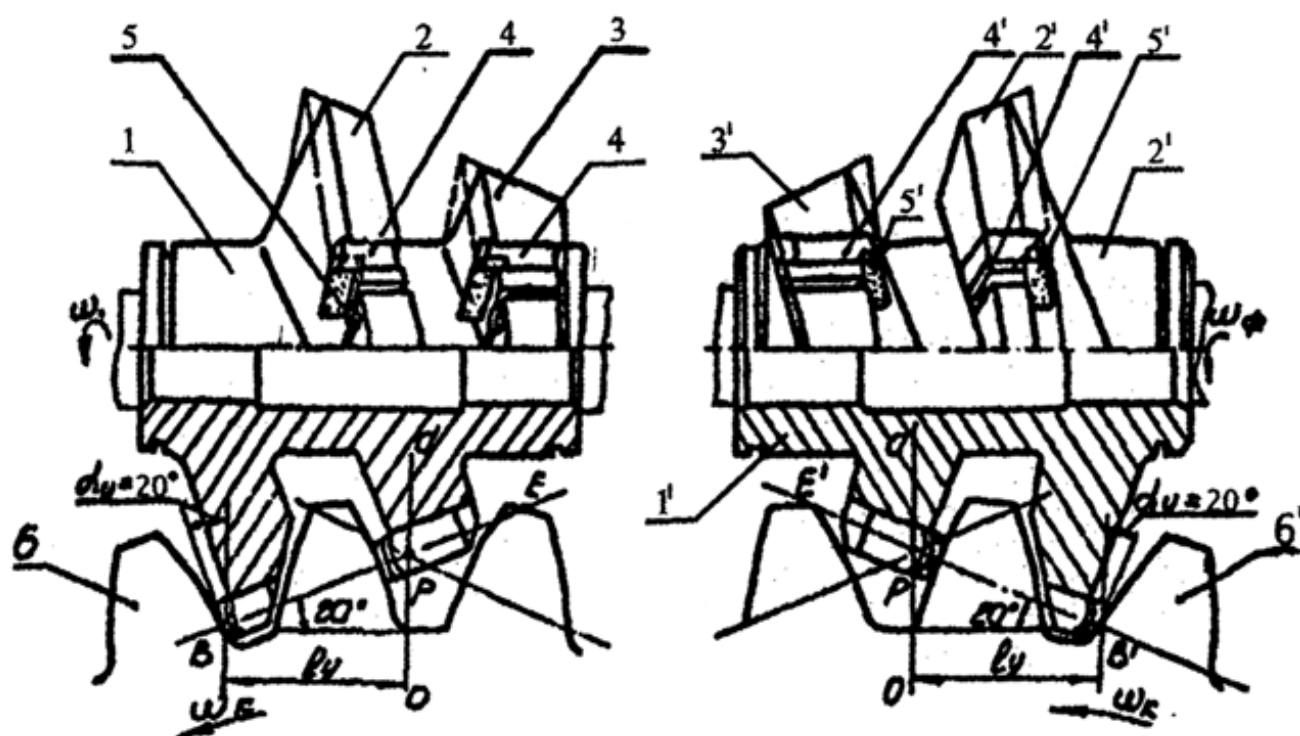


Рис. 6. Схема нарезки зубьев двухкорпусной фрезой «Победа».

1 и 1' - соответственно левый и правый корпуса; 2 и 2', 3 и 3' - зубчатые рейки; 4 и 4' - державки; 5 и 5' - твердосплавные 4-х-гранные пластины; 6 - зубья колеса.

исходного контура зубчатой рейки α , высотой ножки зуба h_i и радиусом закругления головки зуба чернового инструмента r_{ϕ} . Эти параметры зависят только от модуля и коэффициента смещения исходного контура зубчатой рейки.

Установочное расстояние l_y определяется по формуле

$$l_y = \frac{h_i - x \cdot m - r_{\phi}(1 - \sin \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (1)$$

где x — коэффициент смещения исходного контура зубчатой рейки; m — модуль зубьев колеса; h — высота ножки зуба; r_{ϕ} — радиус закругления головки зуба чернового инструмента; α — профильный угол исходного контура зубчатой рейки.

Для колес с исходным контуром зубчатой рейки согласно ГОСТ 13755-81, где $\alpha = 20^\circ$, $h_f = 1,25m$ и при $r_{\phi} = 0,3m$ формула (1) упрощается и имеет вид:

$$l_y = \frac{m(1,052 - x)}{0,36397}. \quad (2)$$

Таким образом, поочередно устанавливая со смещением на зуборезной оправке в каждый из корпусов, одной фрезой можно обрабатывать за два прохода зубчатые колеса с любым числом зубьев.

Обработку обеих боковых поверхностей зубьев колеса можно вести только одним, например, правым корпусом фрезы, поочередно смещая его влево и вправо на оправке. В этом случае (рис. 7) при обработке правых боковых поверхностей необходим реверс направления вращения инструмента и колеса, обработка ведется попутным фрезерованием.

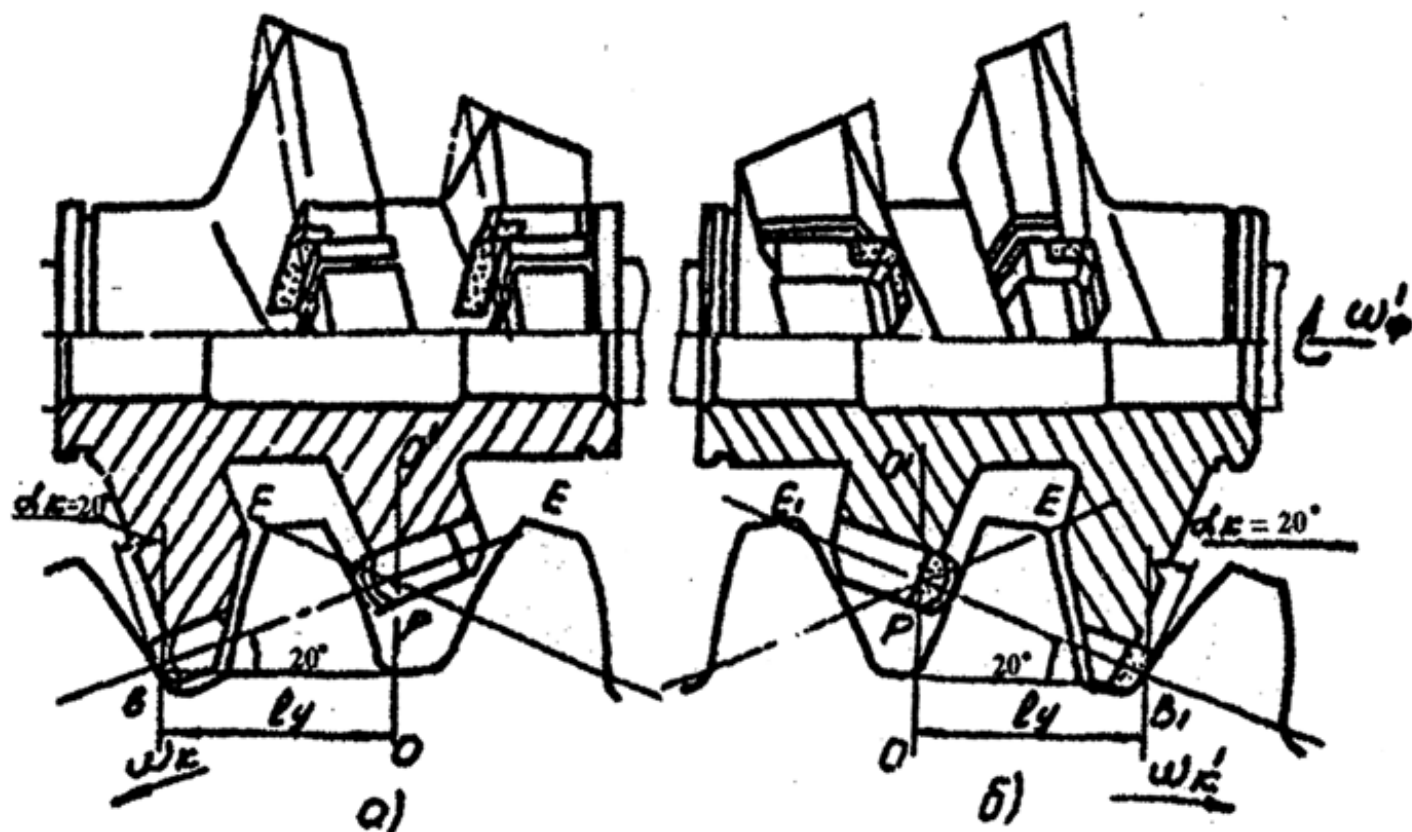


Рис. 7. Схема зубофрезерования одним корпусом фрезы «Победа».

Фрезы с чередующимися коническими выступами.

Рассмотренные конструкции реечных фрез имеют недостаток, заключающийся в необходимости фрезерования достаточно глубоких (60-100 мм) и узких (16-25 мм) пазов. При этом трудно обеспечить хорошее прилегание тыльных частей реек к корпусу без применения операции шлифования. Кроме того, изготовление зубчатых реек является также трудоемким процессом.

Отмеченные недостатки можно устранить, если фрезу выполнить цельной с коническими винтовыми выступами. В корпусе 1 (рис. 8) выполнены винтовые выступы 2 и 3, лежащие на разнонаправленных образующих конических поверхностей. На вершинах выступов, в квадратных гнездах, расположены твердосплавные пластинки 4 и подкладки 5. Крепление пластинок 4 осуществляется с помощью эксцентриковых винтов 6.

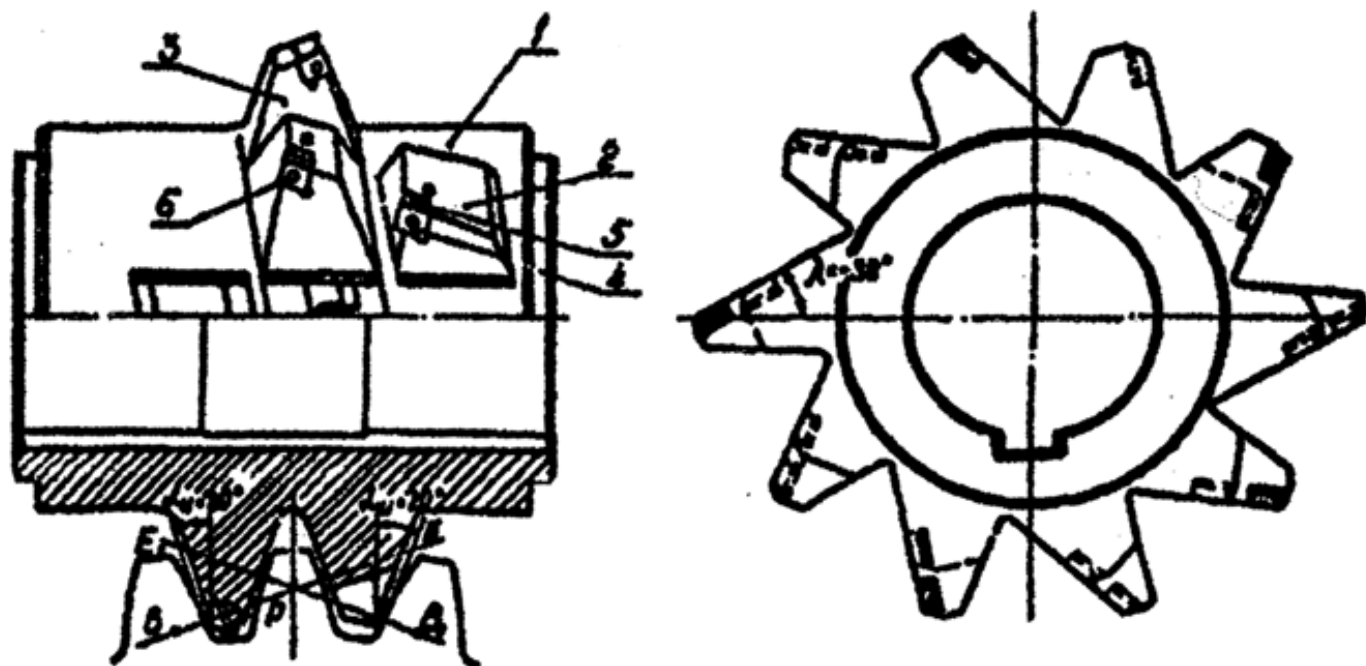


Рис. 8. Червячная фреза с коническими зубчатыми выступами.
1-корпус; 2 и 3-винтовые выступы; 4-пластинки твердосплавные;
5-подкладки; 6-винты.

Твердосплавные режущие пластинки расположены с отрицательным углом наклона $\lambda = -30^\circ$, что обеспечивает инструменту условия косоугольного резания — уменьшаются силы резания, повышается плавность работы фрезы, особенно в момент врезания в заготовку.

Возможность 4-х кратного поворота пластинок по мере износа, а также отсутствие в них внутренних напряжений по сравнению с пайкой обеспечивают инструменту более высокую суммарную стойкость.

В связи с тем, что режущие кромки инструмента расположены под отрицательным углом наклона $\lambda = -30^\circ$, профильный угол зубьев фрезы будет отличаться от стандартного $\alpha_n = 20^\circ$.

Методика расчета и проектирования фрез.

Порядок расчета и проектирования универсальных двухкорпусных фрез

(см. рис. 6) следующий. По известным формулам определяются параметры обрабатываемого зубчатого колеса ($\Gamma_a, \Gamma_f, \Gamma_w, R_r, S_m, h_m$, и др.) и производится графическое построение 3-4 зубьев.

Далее под углом 20° через полюс станочного зацепления фрезы и колеса проводится линия зацепления до пересечения с окружностью Γ_B нижних граничных точек эвольвент зубьев (B, B_1). Положение точки пересечения контролируется путем определения по формуле (2) установочного расстояния l_y .

Габаритные размеры фрезы определяются графически прочерчиванием. Наружный диаметр определяется исходя из возможности размещения инструмента в суппорте станка и обычно при модуле фрезы $m=18\div36$ мм и диаметре посадочного отверстия $\varnothing 80$ мм находится в пределах $D_{af}=290\div340$ мм.

Длина рабочей части фрезы L_ϕ в осевом сечении рассчитывается исходя из обеспечения полной обработки зубьев колеса от точек B (B_1) до точек E (E_1)

$$L_{a\phi} = \frac{r_B (\operatorname{tg} \alpha_a - \operatorname{tg} \alpha_b) \cos 20^\circ}{\cos \tau_H}, \quad (3)$$

где r_B - радиус основной окружности зубьев колеса;

α_a — угол профиля эвольвенты в верхней граничной точке;

α_b — угол профиля в нижней граничной точке эвольвенты;

τ_H — угол подъема витков фрезы на начальном цилиндре.

$$\tau_H = \arcsin \frac{m}{2 \cdot r_H}, \quad (4)$$

где m — модуль фрезы; r_H — радиус начального цилиндра фрезы; он выбирается конструктивно и представляет собой расстояние от полюса станочного зацепления до оси фрезы.

При нарезании витков корпусов и заточки фрезы используются следующие шаги.

Нормальный шаг витков:

$$t_H = \Pi \cdot m. \quad (5)$$

Осевой шаг витков:

$$t_{oc} = \frac{t_H}{\cos \tau_H} = \frac{\Pi \cdot m}{\cos \tau_H}. \quad (6)$$

Шаг витков фрезы для обеспечения заточки на специальных станках-полуавтоматах мод. ВЗ-142 и мод. ВЗ-253 Ф2.

$$t_3 = \frac{t_{oc}}{\cos 20^\circ} = \frac{\Pi \cdot m}{\cos \tau_H}. \quad (7)$$

Толщина витков корпусов фрезы при модуле $m=18\div36$ мм назначается в пределах 30-35 мм. Проектирование однокорпусных твердосплавных фрез

типа «Победа» (см. рис. 8) производится аналогично двухкорпусным с использованием зависимостей (4), (5), (6), (7).

Минимально необходимая рабочая длина режущей части фрезы 2ф рассчитывается с использованием зависимости (1).

$$L_{\phi} = \frac{2[h_f - xm - r_{\phi}(1 - \sin \alpha)]}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (8)$$

При обработке колес с исходным контуром зубчатой рейки по ГОСТ 1643-81

$$L_{\phi} = \frac{2 \cdot m \cdot (1,052 - x)}{0,363970} \approx 5,5 \cdot m(1,052 - x). \quad (9)$$

Таблица 7

Глубина резания за один проход

Вид обработки	Твердость зубьев колеса	
	HRC _σ 35-50	HRC _σ >50
	Глубина резания, мм	
Предварительная	0,8-1,0	0,6-0,8
Окончательная	0,4-0,6	0,3-0,5

Подачу при работе фрезами назначают исходя из требуемой шероховатости рабочих поверхностей зубьев колес и твердости зубьев по табл. 8.

Таблица 8

Подачи при зубонарезании

Шероховатость поверхности Ra, мкм	Твердость зубьев колеса	
	HRC _σ 35-50	HRC _σ >50
	подача колеса, мм/об	
3,2	2-2,5	1,5-2,5
1,6	1,5-2,0	1,5-2,0

- Примечания:
1. Указанная в табл.8 шероховатость поверхности обеспечивается при жестком креплении заготовки, отсутствии вибраций системы СПИД, при качественной заточке инструмента.
 2. Подача менее 1,5 мм/об не рекомендуется, т.к. при этом происходит неустойчивый процесс резания и резко снижается стойкость инструмента.

Скорости резания назначают исходя из типа применяемого зубофрезерного станка, диаметра обрабатываемых колес, при критерии износа зубьев фрезы по задним граням в пределах 0,4-0,6 мм и стойкости инструмента не менее 10 часов по табл. 9.

Тип станка	Скорости резания	
	Диаметр обрабатываемого колеса, мм	
	350-1000	1000-2000
	скорость резания, м/мин.	
Горизонтально-зубофрезерный.	15-20	—
Вертикально-зубофрезерный	15-18	12-15

Поправочные коэффициенты на скорость резания в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала и режущей части инструмента выбирают по табл. 10.

Таблица 10

Поправочные коэффициенты			
Твердость зубьев колеса, HRC	K_T	Материал режущей части фрезы	K_M
35-50	1,2	ВК 10-ОМ	1,0
>50	1,0	ВК 12-ХОМ	1,2

2.3. Обработка зубьев дисковыми фрезами

Зубофрезерные станки, выпускаемые промышленностью для нарезания колес методом обкатки, позволяют изготавливать колеса диаметром до 5,5 м, зубья на колесах больших размеров нарезают методом деления. Зубья прямобочного профиля можно нарезать дисковыми профильными и пальцевыми фрезами методом копирования, а также методом трепанации дисковыми прорезными фрезами. Метод копирования требует трех-четырех проходов и сложной конструкции дисковых профильных фрез. Колеса с модулем зубьев 36 мм и более экономичнее фрезеровать дисковыми фрезами методом трепанации. По этому методу вырезается только часть металла впадины путем прорезания узких пазов касательно профилю зубьев. Это обеспечивается одновременным фрезерованием двумя дисковыми фрезами, закрепленными на двухшпиндельном специальном суппорте. С целью уменьшения расстояния между фрезами шпиндели суппорта наклонены под углом 12°. Такой суппорт изготовлен Коломенским заводом тяжелого станкостроения применительно к станку модели 5355С НКМЗ. При работе специальным суппортом применяют дисковые фрезы «чистовые по доньшку», которые позволяют при прорезке пазов получать чистовую поверхность дна впадины; эти фрезы отличаются высокой производительностью, сравнительно меньшей стоимостью и, главное, для изготовления колес модулем 25-60 мм необходимо только четыре типоразмера фрез, в то время как для этого диапазона модулей требуется

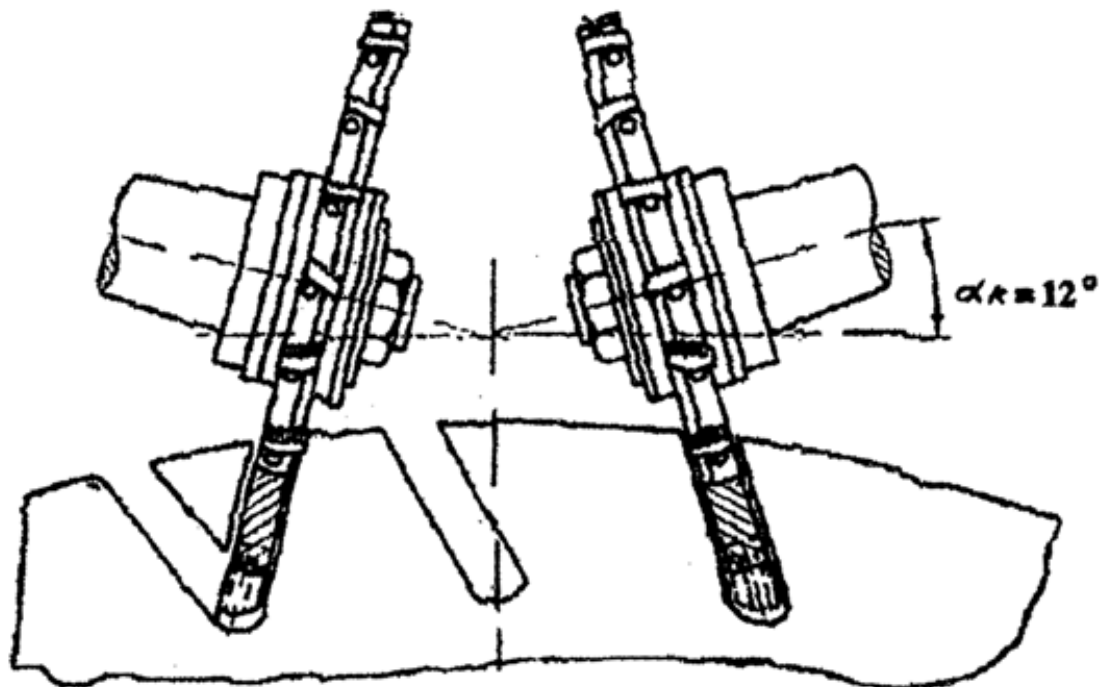


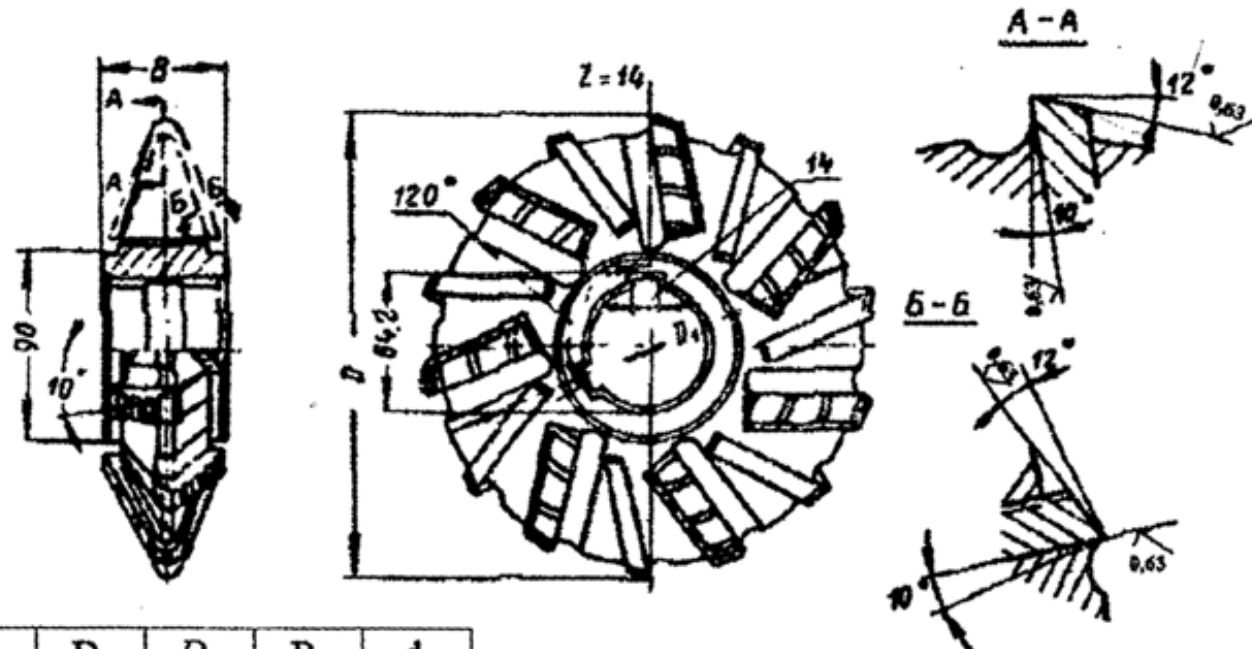
Рис. 9. Схема нарезания зубьев дисковыми фрезами «чистовые по доньшку».

десять типоразмеров профильных дисковых фрез.

Установив на шпиндели того же суппорта торцовые фрезы специальной конструкции, оснащенные резцами из твердого сплава, производят окончательную обработку боковых поверхностей зубьев с большими подачами. Чистота поверхности зуба, достигаемая этим методом обработки, выше, чем модульными фрезами. Для чистовой обработки зубьев прямобочного профиля модулем от 25 до 60 мм, как и прорезных «чистовых по доньшку», необходимо всего четыре типоразмера торцовых фрез, различающихся только диаметром корпуса.

Высокопроизводительные дисковые фрезы. Они изготавливаются из быстрорежущей стали и применяются для чернового нарезания впадин колес с модулем от 12 до 30, так как эта операция связана с удалением большого объема металла. Такими фрезами (рис. 10) нарезаются цилиндрические колеса с прямыми и косыми, а также шевронными зубьями при наличии проточки необходимой ширины посередине обода заготовки. Колеса обрабатываются по принципу одиночного деления одной, двумя и даже тремя фрезами, установленными на жесткую оправку с соответствующими промежуточными кольцами.

Для улучшения стружкообразования и устранения вибраций на зубьях фрезы выполняются стружкоразделительные канавки. Боковые стороны зубьев фрезы в шахматном порядке через зуб занижаются. Таким образом, резание происходит не по всему периметру профиля фрезы. В связи со значительными усилиями, возникающими в процессе резания, и особенно большой неравномерностью и толчками при врезании, ножи фрезы должны иметь жесткое и надежное крепление. Для этой цели применяется сочетание клинового крепления с рифлением поверхностей сопряжения.



m_n	D , мм	D_1 , мм	B , мм	d , мм
12-14	175	168	37.7	60
16-18	205	191	48	
20-22	220	204	57	
24-26	240	220	67	
28-30	270	248	75	

Рис. 10. Дисковые фрезы для чернового нарезания зубчатых колес.

Кроме фрез с ножами из быстрорежущей стали, для предварительной прорезки зубчатых колес модулем до 12 начинают применяться фрезы, оснащенные твердосплавными пластинками. Применение таких фрез дает повышение производительности на операциях чернового зубонарезания в 2 — 2,5 раза. Обязательным условием использования твердосплавного инструмента является высокая жесткость и достаточная мощность зубофрезерных станков. В связи с этим во многих случаях возникает необходимость модернизации зуборезных станков, так как без этого использование твердосплавных фрез является неэффективным.

Специальные прорезные трехсторонние дисковые фрезы с равнонаправленными зубьями (рис.11) применяются вместо пальцевых и дисковых черновых модульных фрез для уменьшения затрат времени на черновое зубонарезание.



Рис. 11. Прорезная трехсторонняя дисковая фреза с равнонаправленными зубьями

Работа ведется двумя дисковыми фрезами, установленными на оправке на расстоянии, равном длине общей нормали нарезаемого колеса (рис. 12). Ширина фрез подбирается таким образом, чтобы в результате прорезки часть металла удалялась из впадины в виде целого куска, как показано на рис. 12, б.

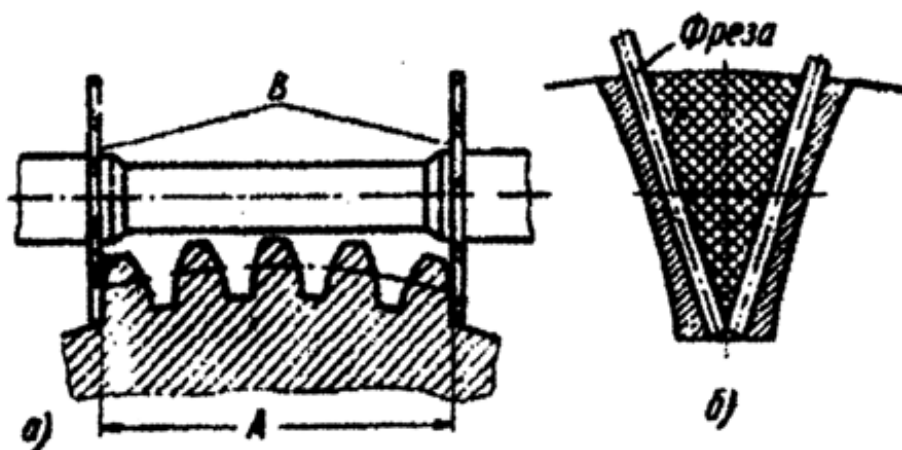


Рис. 12. Прорезка впадин крупномодульных зубчатых колес двумя трехсторонними дисковыми фрезами:
а – схема установки дисковых фрез; А – длина общей нормали;
В – дисковые фрезы; б – схема удаления металла из впадины зубчатого колеса при прорезке двумя дисковыми фрезами.

По данным Ново-Краматорского завода и зарубежных источников такой способ существенно сокращает время на черновой операции. Производительность процесса прорезки впадин в значительной степени зависит от конструкции и геометрии применяемых фрез.

При применении прорезных дисковых фрез необходимо иметь в виду, что у больших зубчатых колес длина общей нормали А имеет значительный размер и для возможности работы таким способом необходима переделка суппорта зубофрезерного станка.

На рис. 13 показана дисковая фреза конструкции НПО НИИПТМАШ, г. Краматорск.



Рис. 13. Фреза дисковая зуборезная.

Предназначена для чистовой лезвийной обработки крупномодульных $m=14-36$ мм закаленных HRC 45-58 зубчатых колес тяжело нагруженных редукторов.

Основное отличие фрезы – оснащение ее четырехгранными поворотными пластинами из керамики марки ВОК-71.

Обработка фрезой обеспечивает высокую точность и низкую шероховатость обработанных рабочих поверхностей зубьев.

Режимы резания:

– глубина резания, мм	0,3-0,5
– скорость резания, м/с	4-6
– частота вращения фрезы, c^{-1}	4-5
– число двойных ходов инструмента за цикл обработки	80-120

2.4. Обработка зубьев пальцевыми фрезами.

Пальцевые фрезы применяются в основном для нарезания крупномодульных зубчатых колес 9-й степени точности с шевронными, косыми и прямыми зубьями, а также для нарезания реек, венцов с внутренним зацеплением и червяков. По своему назначению они делятся на черновые и чистовые.

Чистовые пальцевые фрезы представляют собой фасонный затылованный инструмент. Для каждого модуля применяют набор из 12 номеров фрез; номер фрезы соответствует определенному интервалу числа зубьев нарезаемого колеса. Черновые пальцевые фрезы до недавнего времени повторяли конструкцию чистовых фрез, отличаясь от них меньшими диаметральными размерами, менее точным выполнением профиля и наличием на режущих кромках стружкоразделительных канавок. Однако при удалении большого объема металла эти фрезы малопродуктивны и подвержены частым поломкам вершин зубьев из-за неудовлетворительного отвода стружки. Такое положение, естественно, вызывает необходимость в дальнейшем совершенствовании конструкции и геометрии черновых пальцевых фрез.

Созданы и эксплуатируются специальные прорезные, так называемые «кукурузные», пальцевые фрезы с прямолинейным затылованным профилем и винтовым расположением режущих кромок (рис. 14). Наличие значительного количества стружкоразделительных канавок, расположенных в шахматном порядке на режущих кромках, и винтовое расположение самих режущих канавок благоприятно сказываются на дроблении и отводе стружки. Производительность таких фрез по сравнению с обычными черновыми фрезами повышается до 25 — 30%. Кукурузные фрезы используются для прорезки колес от модуля 40 и выше.

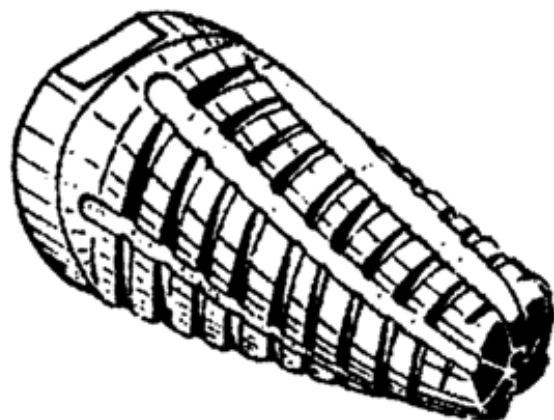


Рис. 14. Кукурузная пальцевая фреза

Более распространенным типом следует считать черновые пальцевые фрезы с незатылованными зубьями. На рис. 15 приведена конструкция этого вида фрез для интервала модулей 16 — 28, для числа зубьев 55 и более.

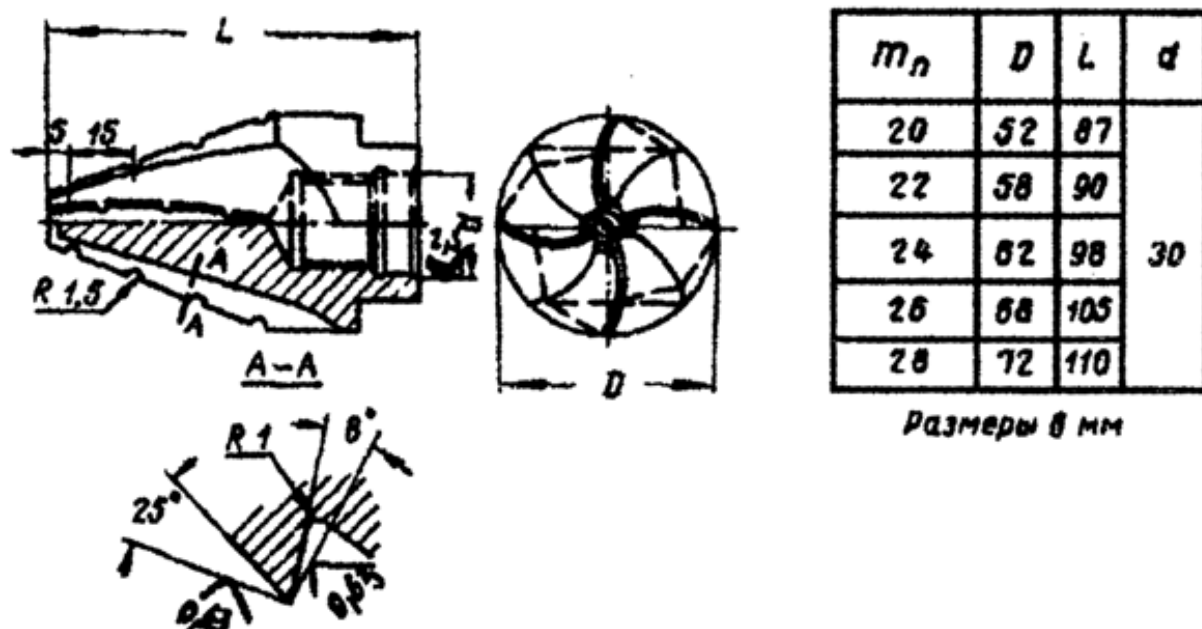


Рис. 15. Черновые незатылованные пальцевые фрезы

Отсутствие затылования обеспечивает получение необходимых значений задних и передних углов, а возможность заточки фрезы по задней грани увеличивает количество переточек инструмента. Таким образом, наряду с упрощением изготовления фрез эти особенности улучшают условия резания и увеличивают срок эксплуатации инструмента.

Крупные пальцевые фрезы целесообразно выполнять из углеродистой стали, производя наплавку быстрорежущей сталью только режущих кромок. Существенное влияние на производительность зубонарезания, особенно крупномодульных колес, оказывает схема резания. Обычно черновые нарезания выполняются за два прохода одной и той же фрезой с делением припуска по глубине впадины (рис. 16, а). Замена одной фрезы комплектом

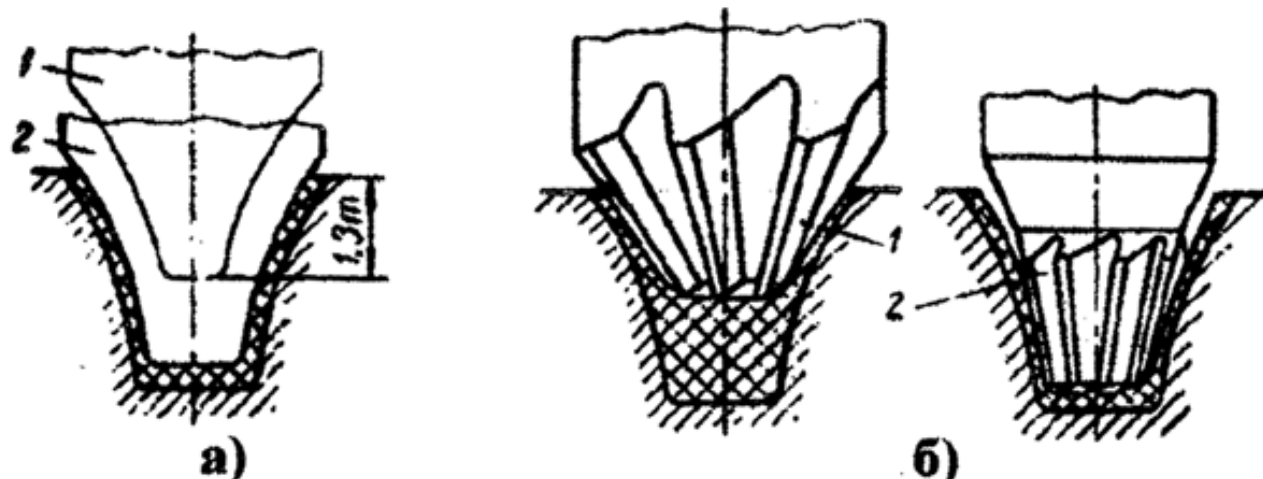


Рис. 16. Схема чернового нарезания крупномодульных колес
пальцевыми фрезами:

а — прорезка одной фрезой; б — двумя;
1-первый проход; 2-второй проход

из двух фрез с прямолинейным профилем (рис. 16, б) позволила применить иную схему резания. В этом случае первая и вторая фрезы удаляют металл каждая на соответствующей глубине впадины, оставляя на боковых поверхностях зубьев только припуск на последующую обработку. Такой способ позволил создать более рациональную конструкцию фрез за счет увеличения числа зубьев на первой фрезе и уменьшения разницы между максимальными рабочими диаметрами обеих фрез. Сравнительные режимы резания приведены в табл. 11.

Для первого прохода режимы повышены в результате увеличения подачи на оборот фрезы, для второго — вследствие увеличения числа оборотов, которое стало возможным вследствие уменьшения максимального рабочего диаметра фрезы.

Комплект из двух фрез применяется для чернового нарезания зубчатых колес с числом зубьев до $z = 41$, модулем от 45 до 75. Работы в области разработки производительной конструкции пальцевых фрез, поломки которых бы сводились к минимуму, ведутся также в направлении уменьшения числа зубьев и увеличения объема карманов для размещения стружки незатылованных черновых фрез (рис. 17, а).

Таблица 11

Сравнительные режимы резания по старой и новой схемам
чернового нарезания валов-шестерен из углеродистой стали модуля 45мм

Проходы	Подачи при старой схеме		Подачи при новой схеме	
	s в мм/об	s в мм/мин	s в мм/об	s в мм/мин
Первый	0,17	4,93	0,35	11,9
Второй	0,17	4,93	0,22	12,1

Увеличение карманов создает благоприятные условия для размещения

стружки у головки фрезы, сокращает случаи поломок и позволяет идти на увеличение подачи на оборот фрезы.

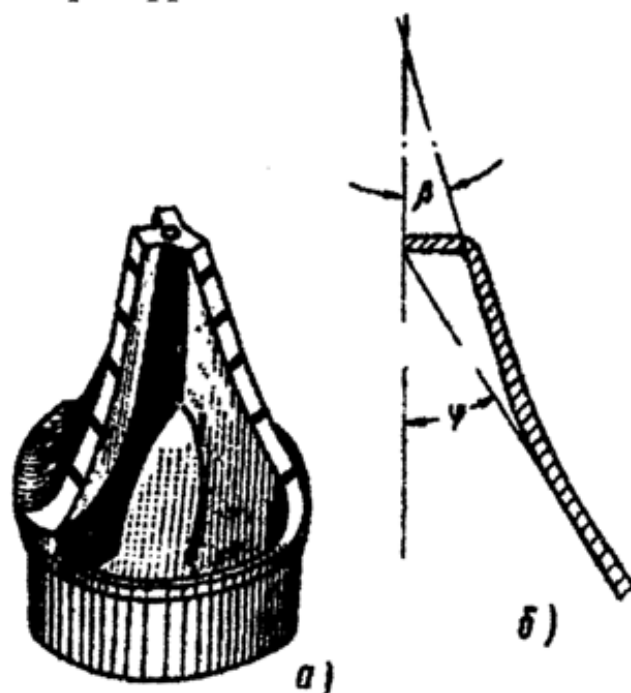


Рис. 17. Черновая пальцевая фреза с уменьшенным числом зубьев:
а — фреза; б — профиль фрезы

Второй особенностью указанной фрезы является замена кривой профиля ломаной линией из двух прямых (рис. 17, б). Такое профилирование, хотя несколько увеличивает припуск под чистовую обработку, зато позволяет затачивать зубья по задней грани на универсальном заточном станке. Угол наклона винтовых канавок выбирается в пределах $5 — 20^\circ$.

Незатылованные фрезы с уменьшенным числом зубьев повышают производительность процесса черновой обработки по сравнению с затылованными фрезами до 1,5 раза. Внедрение черновых пальцевых фрез, оснащенных твердым сплавом, открывает новые возможности дальнейшей интенсификации зуборезных операций, выполняемых этим инструментом.

2.5. Отделочная обработка зубьев

Постоянный рост скоростей и нагрузок, передаваемых крупными зубчатыми приводами прокатного, рудоразмольного и др. оборудования, вызывает необходимость повышения качественных характеристик зубчатого зацепления.

Если параметры кинематической точности, плавности и норм контакта обеспечиваются в основном за счет соответствующих показателей зубообрабатывающего оборудования и инструмента по схеме, аналогичной для колес обычных размеров, то показатели качества поверхностного слоя зубьев колеса могут существенно отличаться.

Это связано с тем, что как отечественная, так и зарубежная станкостроительная промышленность не выпускает крупных зубошлифовальных и зубоотделочных станков. Отсутствует также термическое оборудование для упрочнения, например, цементацией и закалкой крупных зубчатых колес.

Следовательно, качество поверхности зубьев всецело определяется на операциях зубофрезерования. Необходимо также иметь в виду, что стойкость зубофрезерного инструмента ограничена и при обработке колес с большой общей длиной зубьев шероховатость их будет невысокой. Предлагается решить указанную проблему путем применения чистовой обработки и поверхностного упрочнения зубьев пластическим деформированием.

2.5.1. Чистовая обработка впадин зубчатых колес

Технология изготовления зубчатых колес содержит операции формирования профилей зубьев и их чистовую обработку. Впадина между зубьями остается необработанной, хотя параметры ее поверхности определяют точность и надежность работы зубчатого зацепления. На рис.18 представлена схема устройства для чистовой обработки впадин зубчатых колес.

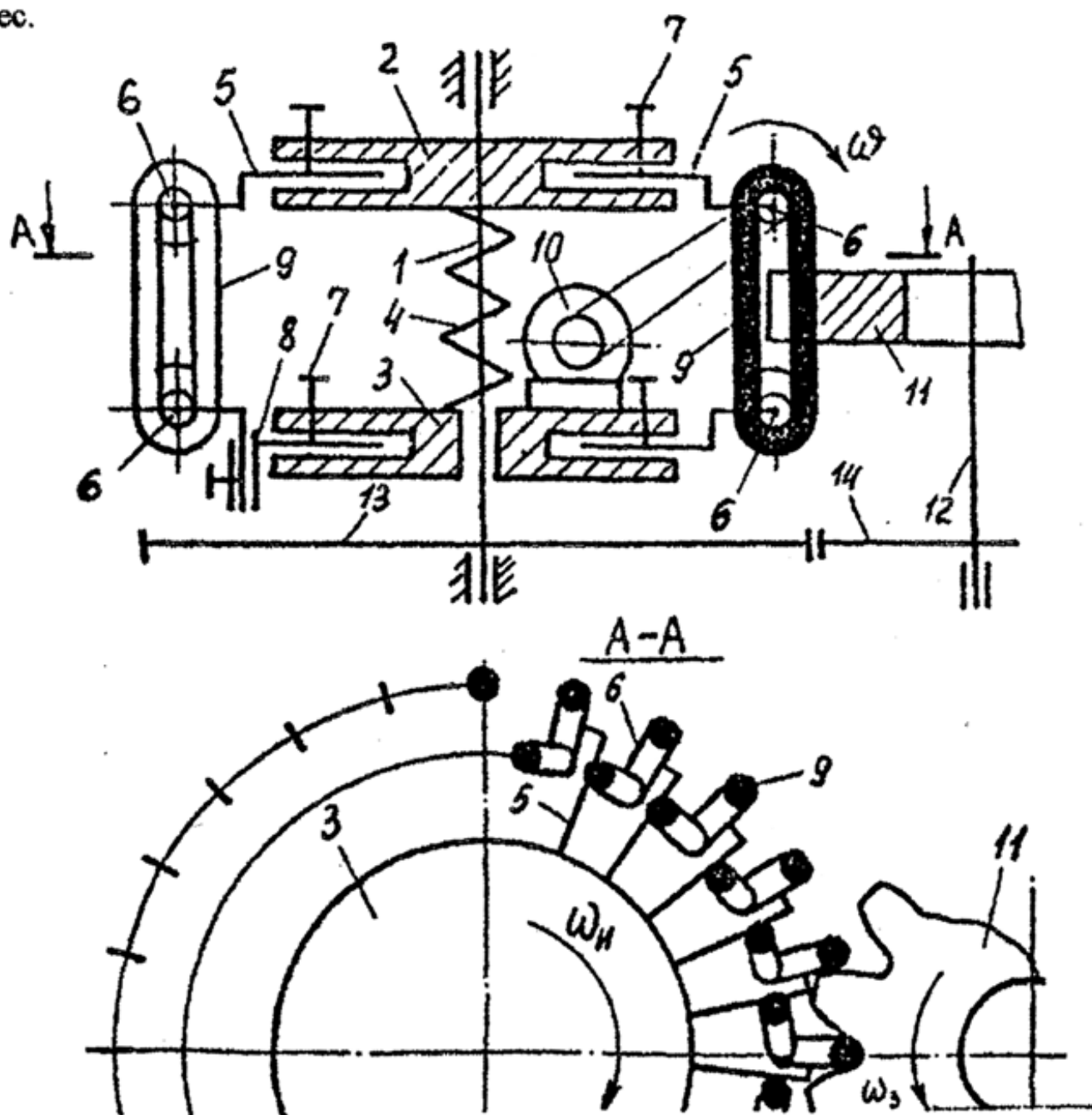


Рис. 18. Схема устройства для чистовой обработки впадин зубчатых колес.

1-ось; 2 и 3-диски; 4-пружина; 5-держатель; 6-ролики направляющие несущие; 7- винты; 8-шарнир; 9-гибкий абразивный инструмент; 10-электродвигатель; 11-зубчатое колесо; 12-вал; 13 и 14-зубчатые колеса.

Устройство содержит ось 1, на которой установлены на некотором расстоянии один от другого два диска 2 и 3. Диск 2 неподвижно закреплен на оси 1. Диск 3 установлен подвижно в осевом направлении, например, используя шпоночное или шлицевое соединение с осью 1. Кроме того, диск 3 выполняется подвижным (регулируемым) в касательном (угловом) направлении, что необходимо при переходе на обработку косозубых колес. Возможно исполнение, когда один из дисков подвижен в осевом, а другой в угловом направлении (т.е. возможность поворота относительно другого диска). Между дисками 2 и 3 установлена пружина 4. Ее может заменить пневмо- или гидроцилиндр (не показаны). Диски 2 и 3 имеют радиальные отверстия, в которые входят держатели 5, располагающиеся по периферии и несущие направляющие ролики 6. Держатели выполнены подвижными (регулируемыми) в радиальном по отношению к дискам 2 и 3 направлении, а также регулируемы в касательном направлении по отношению к своей оси, т.е. имеют возможность поворота вокруг своей продольной оси. Для упрощения этого регулирования диски 2 и 3 и держатели 5 образуют между собой резьбовое соединение. Держатели 5 фиксируются в заданном положении винтами 7. Кроме того, отдельные направляющие ролики 6 снабжены шарниром 8, перпендикулярным оси держателя 5. Шарниры 8 обеспечивают дополнительное регулирование положения направляющих роликов 6. Регулирование в радиальном направлении необходимо при изменении модуля обрабатываемого зубчатого колеса, а в касательном направлении — при обработке косозубых колес.

Между направляющими роликами 6 дисков 2 и 3 натянут гибкий абразивный инструмент 9, представляющий собой, например, кордовый шнур с закрепленным на рабочей поверхности абразивным материалом или шаржированный им. Гибкий абразивный инструмент может быть автономно натянут между каждой парой направляющих роликов 6 разных дисков или двумя парами таких роликов, расположенными радиально противоположно. Тогда количество гибких инструментов зависит от числа держателей 5. Для уменьшения числа приводных устройств (электродвигателей) может быть использован один гибкий абразивный инструмент 9. Тогда он размещается между направляющими роликами разных дисков 2 и 3 по специальной замкнутой траектории, переходя последовательно от первого ролика верхнего диска к первому ролику нижнего, а от него ко второму ролику верхнего диска, затем ко второму ролику нижнего, далее к третьему ролику верхнего диска и таким образом по всем роликам вдоль окружности (периферии) дисков. Гибкий абразивный инструмент замыкается в конечном итоге так, что с последнего ролика нижнего диска переходит на первый ролик верхнего.

Привод направляющих роликов 6, вращающихся со скоростью w , осуществляется несколькими (или одним) электродвигателями 10, установленными на дисках 2 и 3. Последние, установленные на оси 1, совместно с держателями 5, направляющими роликами 6, гибким

абразивным инструментом 9 и его приводом образуют инструментальную головку.

Гибкий абразивный инструмент 9 контактирует с дном впадины между зубьями зубчатого колеса 11, которое установлено на валу 12 и кинематически связано с осью 1 и всей инструментальной головкой зубчатыми колесами 13 и 14. Зубчатое колесо 13 установлено на оси 1, зубчатое колесо 14 на валу 12.

Устройство работает следующим образом. Электродвигатели 10 приводят во вращение направляющие ролики 6, на которых натянут гибкий абразивный инструмент 9, движущийся со скоростью резания. Натяжение гибкого абразивного инструмента 9 осуществляется собственным весом диска 3, пружиной 4, пневмо- или гидроцилиндром, используя подвижность диска 3 в осевом направлении. Возможно использование и натяжных роликов.

Каждая наружная ветвь гибкого абразивного инструмента, проходящая между двумя направляющими роликами 6 дисков 2 и 3, имитирует собой режущий выступ инструмента. Его профиль соответствует требуемому профилю дна впадины между зубьями. Такой участок гибкого абразивного инструмента, входя в зацепление с обрабатываемым зубчатым колесом 11 и взаимодействуя с дном впадины между зубьями, удаляет неровности с ее поверхности посредством абразивных зерен, закрепленных на режущей рабочей поверхности инструмента. Для обработки косозубых колес диск 3 регулируется в касательном направлении относительно диска 2. Это обеспечивает требуемое положение наружной ветви гибкого абразивного инструмента, при котором его направление совпадает с направлением впадины между зубьями. Одновременно требуется регулирование держателей 5 относительно своей продольной оси (в касательном направлении), что обеспечивает благоприятное положение направляющих роликов 6.

Обработка производится с непрерывным делением при взаимном обкате инструментальной головки и обрабатываемого зубчатого колеса, которые вращаются вокруг своих осей (валов) с угловыми скоростями ω_4 и ω_3 и находятся в зацеплении между собой (привод этого движения не показан). Строгая кинематическая связь между инструментальной головкой и обрабатываемым зубчатым колесом обеспечивается зубчатыми колесами 13 и 14. Соседние впадины между зубьями зубчатого колеса обрабатываются не последовательно, а, например, через одну (или несколько). Это соответствует случаю, когда держателями 5 оснащены не все радиальные отверстия дисков 2 и 3, а, например, через одно или через несколько. При обработке зубчатых колес с нечетным числом зубьев возможен вариант оснащения дисков 2 и 3 держателями 5 через одно отверстие. Возможна обработка заготовок с четным числом зубьев так, что одна половина (часть) инструментальной головки выполняет обработку четных впадин, а другая-нечетных, а также, когда радиальные отверстия дисков 2 и 3 оснащены держателями 5,

например, в произвольном порядке. Такой подход позволяет не только уменьшить число держателей, но и производить обработку мелко модульных колес, когда все держатели конструктивно расположить затруднительно.

Если требуется невысокая точность обработки зубьев и каждая впадина обрабатывается последовательно, возможно отсутствие зубчатых колес 13 и 14, т.е. без строгой кинематической связи между инструментальной головкой и заготовкой. Кинематическая связь в этом случае обеспечивается только за счет взаимного зацепления инструментальной головки и заготовки зубчатого колеса.

При планетарной схеме обработки (рис. 19) инструментальная головка неподвижна. Обрабатываемое зубчатое колесо, установленное на водиле 15,

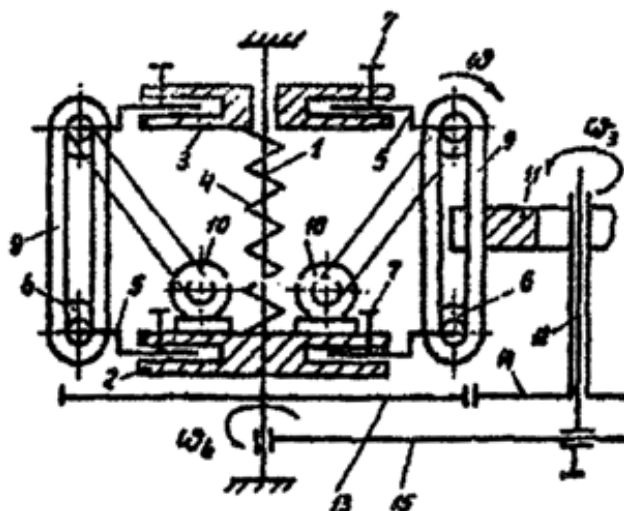


Рис. 19. Планетарная схема устройства для обработки впадин зубчатых колес (15-водило).

совершает вращательное движение относительно своего вала 12 с угловой скоростью ω_3 и одновременно вращается вместе с водилом вокруг неподвижной инструментальной головки с угловой скоростью ω_8 .

Обработка может выполняться за несколько оборотов колеса. Кроме того, варьируя режимными параметрами в определенном цикле, можно значительно повысить качество обработки. Устройство может быть использовано и для обработки зубчатых колес внутреннего зацепления.

2.5.2. Поэлементная обработка зубьев крупномодульных зубчатых колес поверхностно-пластическим деформированием (ППД)

Наиболее эффективным методом повышения ресурса зубчатых передач является совмещение ППД всех сопрягаемых элементов зубьев: активных боковых поверхностей, галтелей, наружного цилиндра, фланка и др., предварительно обработанных зубофрезерованием. Группой авторов предложена технологическая схема (рис. 20), разработан специальный станок для ее реализации. Станок изготовлен и внедрен на Даугавпилсском локомотиворемонтном заводе (Латвия). В основу процесса положено взаимодействие различных технологических пар "инструмент - изделие" с

параллельным, скрещивающимся и пересекающимся в пространстве расположением осей, когда зубья колеса огибаются деформирующими элементами инструмента методом свободного обкатывания. Особенность технологической схемы (рис.20) состоит в том, что для отдельной (поэлементной) обработки ППД зубьев заготовки 7 суппорты оснащаются инструментами зубчатого типа 1, 3, 5. Они установлены с параллельным и скрещивающимся расположением осей и обрабатывают рабочие боковые поверхности, а инструмент 6—сопрягаемые с ними переходные поверхности

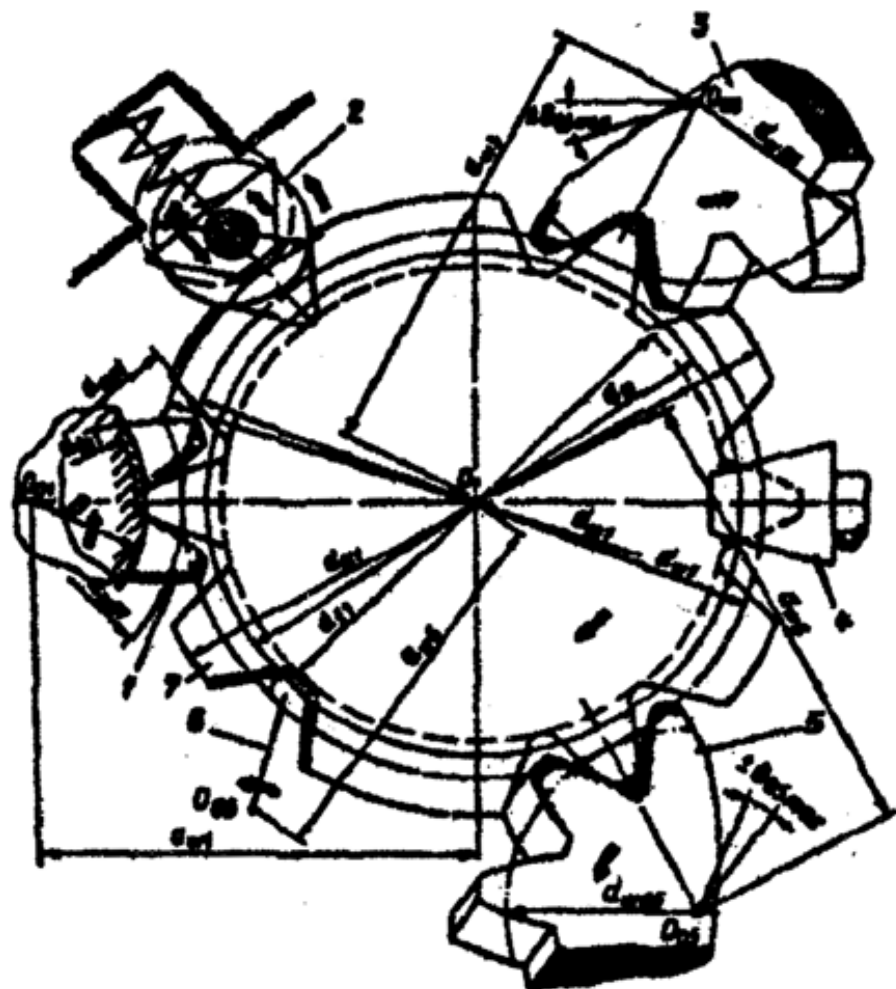


Рис. 20. Технологическая схема ППД элементов зубьев зубчатых колес.

1,3,5-инструменты зубчатого типа; 2 и 3-ролики; 6-галтели зубьев; 7-зубья колеса

(галтели) зубьев. Ролики 2 и 4, установленные с параллельным и пересекающимся расположением осей, обрабатывают наружный цилиндр d_{a1} заготовки, выполняя фланкирование и округление на вершинах зубьев и обработку торцов. Во время обработки боковых поверхностей зубьев инструментом 2 деформируемый металл перемещается вдоль их высоты, в результате чего на выходящей из станочного зацепления боковой поверхности зубьев образуются гребешки, которые выступают за пределы наружного цилиндра d_{a1} заготовки и обрабатываются роликами диаметром D инструмента 1.

Образовавшиеся гребешки дополнительно обкатываются инструментом 2, представляющим собой гладкий цилиндрический ролик со специально рассчитанным наружным диаметром, устанавливаемым относительно оси

заготовки как параллельно, так и под углом скрещивания в пространстве, в зависимости от обработки прямозубого или косозубого колеса. Чтобы обеспечить требуемое скольжение ролика вдоль образующей заготовки, а также контактирование со всеми без исключения точками обрабатываемой поверхности наружного цилиндра заготовки, ось ролика устанавливают относительно оси заготовки под определенным углом скрещивания с таким условием, чтобы исключить контактирование с боковыми поверхностями впадин. Такое техническое решение исключает дополнительную механическую обработку по наружному цилиндру заготовки.

Наряду с обработкой наружного цилиндра d_{a1} заготовки ролик 2 выполняет скругление кромок и фланкирование вдоль линии вершин обрабатываемых зубьев. В этом случае цилиндрический ролик 2 установлен параллельно образующей боковой поверхности впадины между двумя соседними зубьями по направлению к центру оси вращения заготовки 7, контактируя с боковой поверхностью обрабатываемого зуба, при упруго жесткой связи ролика 2 и заготовки 7 под воздействием силовых устройств. Ориентация оси инструмента под разным углом скрещивания к оси заготовки определяет выглаживающее движение вдоль образующей боковой поверхности зубьев как геометрическую сумму относительных движений обкатывания, которое превышает по величине движение осевой подачи заготовки, совпадающее или противоположно направленное (в зависимости от угла скрещивания). Для исправления погрешностей направления зубьев служит инструмент 3, установленный с минимальным углом скрещивания в пространстве, когда условия контактирования характеризуются повышенной длиной площадок контакта. Погрешность профиля зубьев исправляется инструментом 5, установленным с увеличенным углом скрещивания. При обработке с увеличенными углами скрещивания путь относительного выглаживающего движения инструмента увеличивается, улучшаются условия обработки ввиду уменьшения длины площадки контакта, что уменьшает погрешность профиля зубьев.

Формообразование эвольвентных боковых поверхностей зубьев заготовки зубчатыми инструментами 3 и 5, установленными со скрещивающимся расположением осей относительно оси заготовки, вызывает относительное скольжение их вдоль боковых поверхностей зубьев заготовки, что сопровождается перемещением (течением) металла заготовки за пределы торцевой поверхности. После перемещения металл на торцах деформируется двумя коническими роликами.

В станке отсутствуют внутренние кинематические связи между инструментом и заготовкой, однако имеются кинематические группы, обеспечивающие формообразующее движение только по длине зуба. Необходимые давления в зоне контакта инструмента и заготовки создаются технологическим натягом, обусловленным разностью шагов деформирующих элементов инструмента и заготовки, а также изменением

углов скрещивания осей инструмента с осью заготовки (линейный или точечный контакт), ограниченной площадью рабочей поверхности инструмента, что обеспечивает степень интенсивности пластической деформации поверхностей зубьев.

Использование станка и реализованной на нем технологической схемы позволило: сократить число перестановок детали, что особенно важно при обработке крупногабаритных колес; уменьшить вспомогательное время; улучшить обслуживание и управление станком. Станок обеспечивает: высокие стабильность кинематической точности (в пределах 7-8 степени по ГОСТ 1643-81) и шероховатость обработанной поверхности (0,38-0,61 мкм), качество зубьев; сокращение времени изготовления одного зубчатого колеса на 4-7 нормо-часов за счет ликвидации операций закалки с нагревом ТВЧ и зубошлифования; высвобождение дорогостоящего оборудования (зубошлифовальные станки, нагревательные печи, закалочные генераторы) с тенденцией обеспечения малолудной технологии.

2.5.3. Упрочнение зубьев накаткой

В качестве инструмента используется червячный накатник (рис. 21) – специальный инструмент с расчетным, отличным от стандартного, углом

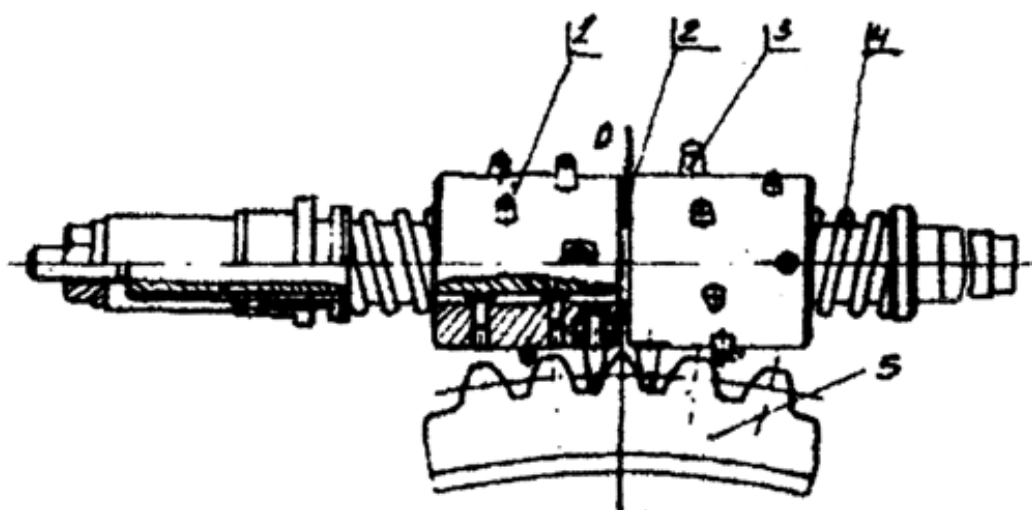


Рис. 21 Накатник для упрочнения зубьев.

1-накатник; 2-муфта; 3-ролики; 4-пружина; 5-обрабатываемое колесо

профиля. Он предназначен для обработки зубчатых колес конкретного модуля в определенном интервале чисел зубьев.

В процессе работы червячный накатник 1 и обрабатываемое колесо 5 совершают движения, аналогичные движениям при обработке зубчатых цилиндрических колес червячной фрезой на зубофрезерном станке.

При согласованном вращении червячного накатника и обрабатываемого колеса ролики 3 обкатываются по рабочим поверхностям зубьев колеса, прижимаясь к ним при помощи двух пружин 4, создающих усилие деформирования, и упрочняют определенный участок зуба колеса. Следы от роликов многократно перекрываются как по длине зубьев, так и по высоте. Осевая подача инструмента обеспечивает упрочнение рабочей поверхности зубьев по всей ширине колеса.

Ролики на корпусах накатника установлены таким образом, чтобы в рабочем контакте с обрабатываемым зубом находилось по одному ролику с каждой стороны. Такое устройство разгружает стол станка, снижает усилие предварительного сжатия пружин и повышает плавность работы накатника.

Настройка гитар деления и обкатки осуществляется аналогично тому, как это делается при нарезании зубьев зубчатых колес однозаходной червячной фрезой. Если обкатка зубьев выполняется непосредственно после операции чистового зубофрезерования однозаходной червячной фрезой того же направления, что и накатник, то настройка указанных гитар остается без изменений.

Наибольшие трудности возникают при совмещении центральных роликов накатника с центральной плоскостью станка О-О. Для выполнения этой операции рекомендуется подвести ролики накатника к обрабатываемым зубьям колеса и повернуть стол, рассоединив гитару обкатки, до совмещения оси зуба обрабатываемого колеса с центральной плоскостью станка. Место начального контакта роликов должно находиться вблизи нижних граничных точек активного профиля зуба колеса. При этом корпуса на оправке переместятся вдоль оси на некоторое расстояние, что свидетельствует о том, что ролики прижаты к зубьям расчетным усилием деформирования.

Практика промышленного внедрения инструмента показала, что процесс входа роликов с торца упрочняемого колеса, а также их взаимодействие с вершинами кромок зубьев влияет на качество упрочнения. Это связано с точечным характером зацепления инструмента и колеса, а следовательно, классические законы зацепления полностью соблюдаются только в отдельные моменты сопряжения, т.е. когда рабочий участок ролика попадает на станочную линию зацепления С-С (рис. 22, а).

Особенность конструкции накатника в том, что процесс контактирования ролика при прохождении через зону зацепления осуществляется как до линии зацепления (угол δ_n), так и после нее (δ_l). Именно для этого корпуса накатника в осевом направлении имеют свободу перемещения на оправке и ролики как бы отслеживают профиль зубьев на протяжении определенной дуги контактирования К-К (рис. 22, б).

При расчете конструктивных параметров накатника возможно управлять величиной осевого перемещения корпусов. Анализ показал, что при обработке особо крупных колес полностью использовать номинальную дугу контакта, при которой обеспечивается максимальный путь упрочнения, нецелесообразно, так как это приводит к резкому росту динамики процесса кромочным ударом ролика по торцу колеса в период входа инструмента в зацепление (рис. 22, в) и вибрациям при выходе.

Как видно из рис. 22, а, б, в, следуя друг за другом, ролики 2, расположенные на корпусе 1 по винтовой линии, оставляют на зубьях 3 дугообразные следы К-К. Очевидно, что величина осевого перемещения накатника зависит от длины дуги контакта, шага винтовой линии и кривизны

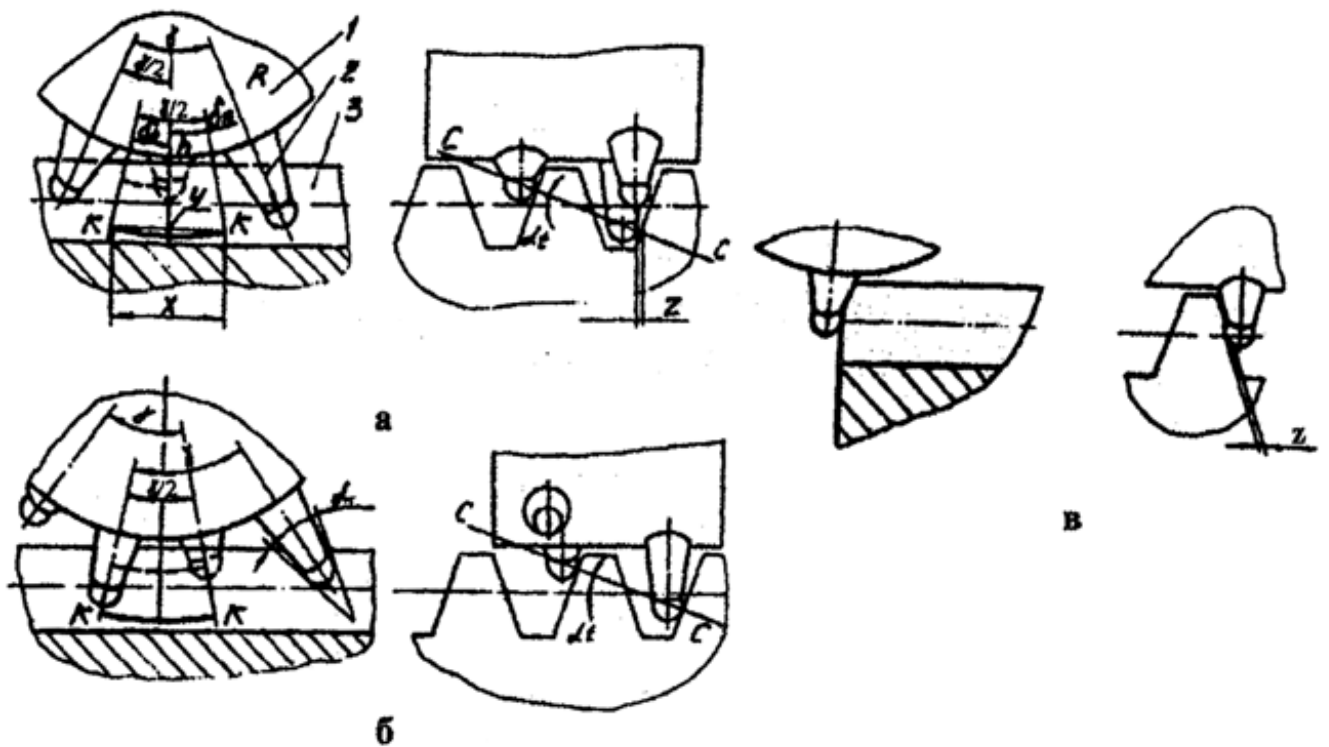


Рис. 22, а, б, в. Рабочие схемы взаимодействия элементов накатного инструмента с обрабатываемыми зубьями.

1 – держатие роликов; 2 – ролики; 3 – обрабатываемая поверхность зуба

эвольвентного участка зуба в зоне упрочнения. При обработке крупных колес с достаточной для практики точностью величину осевого перемещения Z можно определить следующей приближенной зависимостью:

$\chi = 2R \sin \frac{\gamma}{4}$ - длина рабочего хода ролика вдоль зуба;

$Y = R \left(1 - \cos \frac{\gamma}{4} \right)$ - длина рабочего хода ролика поперек зуба;

$Z = R \left(1 - \cos \frac{\gamma}{4} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_t$ - осевой ход корпусов накатника без

дистанционного кольца.

Практика внедрения накатников показала необходимость осевого перемещения корпусов за счет установки между ними дистанционного кольца 2 (рис. 21). Наибольший эффект проявится в процессе входа накатника в зацепление с обрабатываемым колесом (рис. 22), так как значительно уменьшается величина Z , а следовательно и сила удара ролика по торцу зуба.

Производственные испытания зубообкатного инструмента выполнялись на вертикальном зубофрезерном станке мод. 5355С Коломенского завода тяжелого станкостроения.

Испытания проводились при различных режимах, чтобы определить рациональное значение скорости, подачи и усилия из условий снижения шероховатости. Скорость обкатки изменялась от 17,7 до 34,2 м/мин, подача – от 2,54 до 12 мм на оборот стола и усилие – от 1000 до 1650 Н.

Визуальный анализ качества поверхностного слоя по шероховатости, наличие следов от предшествующей обработки, образование завалов на торцевых и вершинных участках зубьев показал: шероховатость обкатанной поверхности резко снижалась по сравнению с шероховатостью поверхности

зубьев, полученной в результате чистового зубофрезерования, наблюдалось незначительное образование наплывов на вершинных участках зубьев – в пределах 0,3-0,4 мм: были заметны блики от оставленными роликами следов на обработанной поверхности зубьев.

В настоящее время как отечественная, так и зарубежная промышленность не располагает приборами для комплексного контроля сверхкрупных зубчатых колес. Поэтому изменения размеров зубьев после обкатки определялись путем измерения штангензубомером толщины зубьев на различных высотах. Наибольшее отклонение в сторону уменьшения толщины не превышало 0,05 мм и не выходило за пределы допуска на толщину зуба.

Шероховатость зубьев определялась на двойном микроскопе Линника по методу слепков. В качестве материала для приготовления слепков использовалось самотвердеющая пластмасса «Протокрилл – М» по ТУ-84-2-278-78.

Исходная шероховатость зубьев после операции чистового зубофрезерования червячной фрезой доходила до $R_z=35$ мкм, а после обработки не превышала $R_z=6,3$ мкм.

Зубообкатной инструмент и метод снижения шероховатости зубьев поверхностным пластическим деформированием рекомендуется для обработки особо крупных диаметром более 3000 мм и модулем свыше 20 мм зубчатых венцов на вертикальных зубофрезерных станках.

2.5.4. Электромеханическая накатка зубьев

Известны способ (и устройство) для повышения качества поверхностей зубьев, заключающийся в том, что одновременно с пластическим деформированием через инструмент и зубчатое колесо пропускают электрический ток в момент контакта инструмента с зубьями (рис. 23).

Зубчатое колесо 1 устанавливают на подставку 2 с диэлектрической прослойкой 3 и поджимают к ней зубчатое колесо шайбой 4 с диэлектрической прослойкой 5. Инструмент состоящий из двух подпружиненных корпусов 6, несущих деформирующие ролики 7 и имеющих возможность вращения вокруг оси оправки 8 инструмента и обратно – поступательного перемещения под действием пружин 9, вводится в зацепление с обрабатываемым зубчатым колесом 1.

При вращении зубчатого колеса и инструмента осуществляется обкатка и пластическое деформирование рабочих поверхностей зубьев деформирующими роликами 7, периодически контактирующими с зубьями.

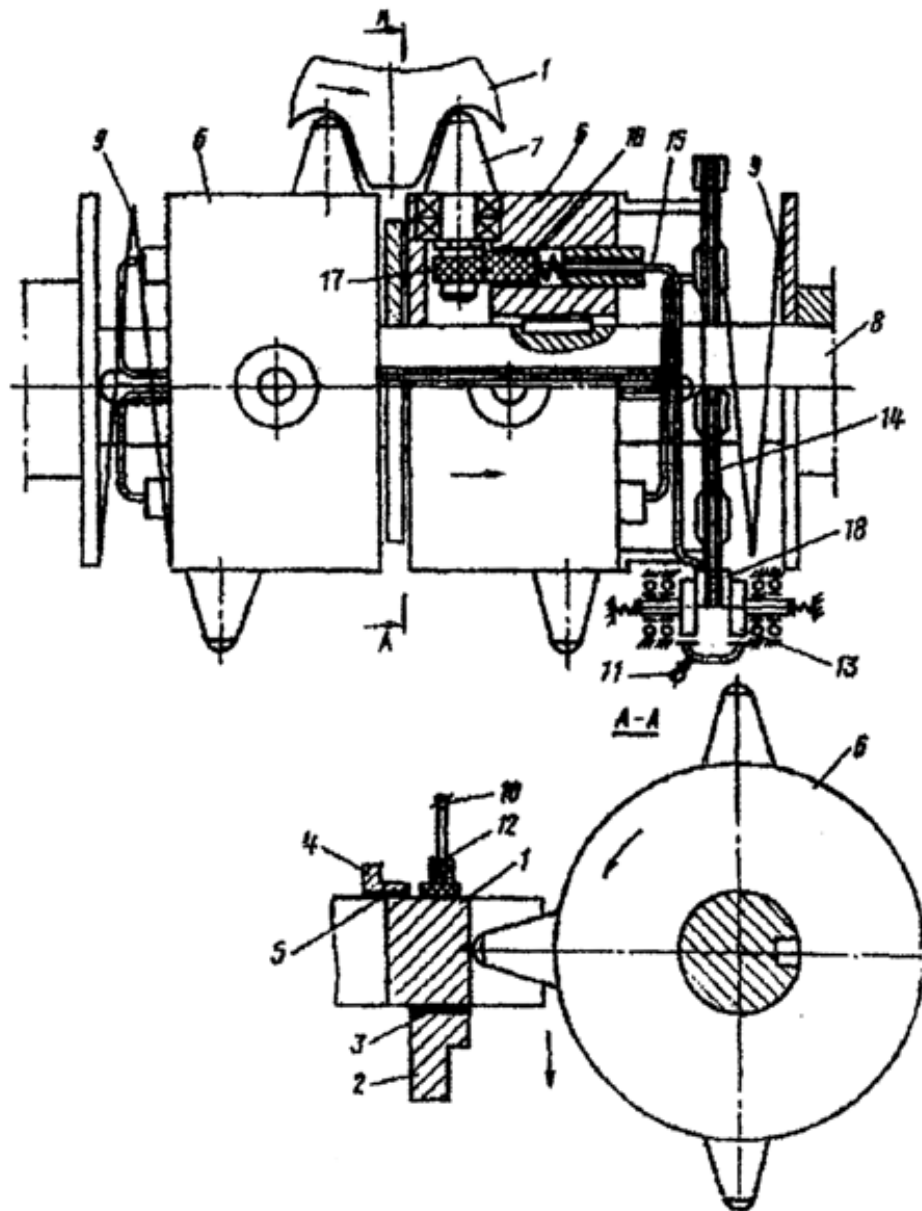


Рис. 23. Устройство для электромеханической накатки.

1 – обрабатываемое зубчатое колесо; 2 – подставка; 3 и 5 – диэлектрические прослойки; 4 – шайба; 6 – корпуса; 7 – деформирующие ролики; 8 – оправка; 9 – пружины; 10 и 11 – клеммы; 12 и 13 – щетки; 14 – коллектор; 15 – проводник; 16 – щетки; 17 – кольца токосъемные; 18 – пластины контактные

В процессе обкатки через инструмент и зубчатые колеса прерывисто пропускают электрический ток в момент контакта инструмента с зубьями зубчатого колеса. Ток подводится от понижающего трансформатора через клеммы 10 и 11, щетки 12 и 13, коллектор 14, проводники 15, щетки 16, токосъемные кольца 17.

Прерывистое пропускание тока и исключение появления электрической дуги в момент входа деформирующих роликов 7 в зацепление с зубьями зубчатого колеса 1 и выхода их из зацепления обеспечивается подбором длин контактных пластин 18 и коллектора 14. Для обработки зубьев по ширине зубчатого колеса инструменту сообщается перемещение вдоль оси зубчатого колеса под действием торцевого коллектора 15.

Применение данного способа для обработки зубчатых колес модулем 10–75 мм увеличивает срок службы зубчатой передачи.

2.5.5. Устройство для пневмодинамического упрочнения зубьев

Устройство (рис. 24) содержит несущий корпус 1, выполненный в виде рамы, включающий верхние и нижние кронштейны 2, в которых жестко установлены штанги 3, служащие направляющими для возвратно-поступательного перемещения каретки 4 от привода 5. В гнездах корпуса каретки 4 на цапфах 6 установлены рабочие пневмоэжекторы 7, жестко скрепленные с разгонными трубами 8. При этом сопла рабочих пневмоэжекторов 7 входят в зоны верхних раструбов 9.

Разгонные трубы 8 посредством радиусных участков 10 соединены с нижними раструбами 11 шарово-шарнирными муфтами 12, у которых подвижные патрубки 13 жестко соединены с транспортирующими пневмоэжекторами 14. Разгонные трубы 8 снаружи снабжены спиральными ребрами 15 (материал – медь М1), закрепленными пайкой, а сверху – трубами-рубашками 16, входящими в состав конструкции пневмоэжекторов-охладителей 17. Разгонные трубы 8 с трубами-рубашками 16 соединены кинематически посредством кривошипно-шатунного механизма, цапф 8 и шарово-шарнирных муфт 12 с механизмом качания 18.

Пневмоэжектор-охладитель 17 совместно с трубами-рубашками 16 представляет собой вихревой охладитель, который содержит муфту 19. В последней размещены стальная 20 и резиновая 21 прокладки, уплотняющая диафрагма 22, которая сопрягается с улиткой 23 и переходной втулкой 24. Корпус переходной втулки 24 посредством резьбы соединяется с трубой-рубашкой 16, оканчивающийся в зоне верхнего раструба 9 дросселем 25, конические отверстия 26 которого сопрягаются с торцом спиральных ребер 15. Гайка 27 (материал – тефлон) стягивает корпус 19 и корпус транспортирующего пневмоэжектора 14. Сопловой ввод улитки 23 переходит в резьбовой патрубок 28, служащий для соединения шланга для подвода сжатого воздуха из распределителя 29, для разводки сжатого воздуха из пневморесивера 30.

Устройство закрепляют на суппорте зубофрезерного станка, на столе которого установлено зубчатое колесо или зубчатый венец. В соответствии с модулем зубьев зубчатого колеса устанавливают и закрепляют сменные патрубки устройства, подсоединяют к клеммам токопроводов верхних 9 и нижних 11 раструбов источника тока высокой частоты. Подсоединяют шланги к рабочим 7, транспортирующим 11 и охлаждающим 17 эжекторам для подачи сжатого воздуха.

Подают сжатый воздух в пневмоэжектор 7, 14, 17. Включают трансформатор тока высокой частоты на заданный режим поверхностного нагрева упрочняемого зуба колеса, устанавливают рабочую подачу каретки 4 и поперечное качание разгонных труб 8 с рабочими 7, транспортирующими 14 и охлаждающими 17 эжекторами. При этом работа охлаждающего эжектора 17 заключается в том, что сжатый воздух поступает под давлением 0,45-0,5 МПа через патрубок 28 в тангенциальное сопло-улитку 23, в результате чего формируется интенсивный круговой поток-вихрь вокруг

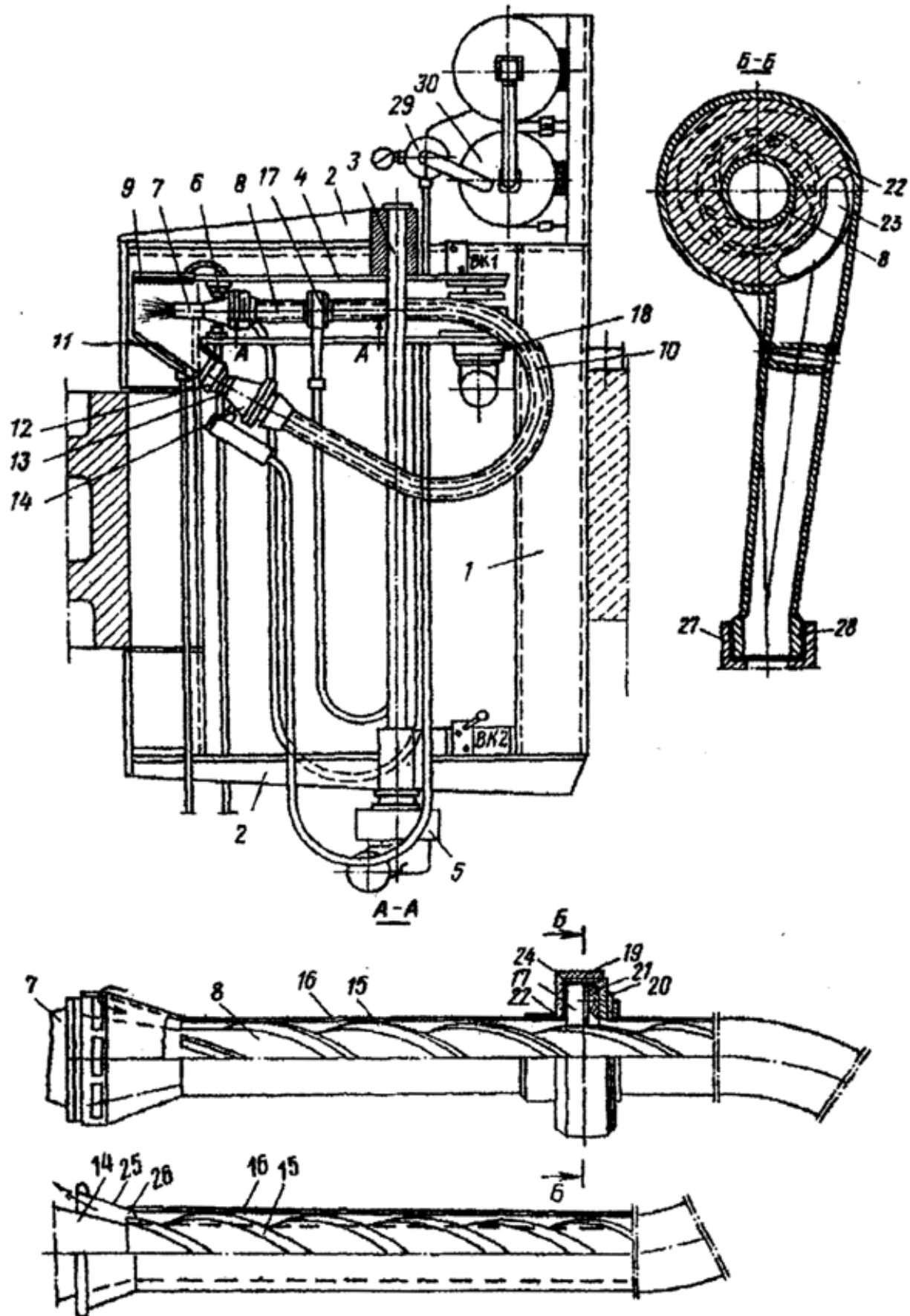


Рис. 24. Устройство для пневмодинамического упрочнения зубьев.

- 1 – корпус; 2 – кронштейн; 3 – штанга; 4 – каретка; 5 – провод; 6 – цапфа;
 7 – пневмоэжекторы; 8 – трубы разгонные; 9 – раструбы верхние; 10 – радиусный участок;
 11 – раструбы нижние; 12 – муфты; 13 – патрубки подвижные; 14 – пневмоэжекторы;
 15 – ребра спиральные; 16 – трубы-рубашки; 17 – охладитель; 18 – механизм качания;
 19 – муфта; 20 и 21 – прокладки; 22 – диафрагма; 23 – улитка; 24 – втулка; 25 – дроссель;
 26 – отверстия технические; 27 – гайка; 28 – патрубок; 29 – распределитель;
 30 – пневморесивер

разгонной трубы 8, охлаждающий ее и отводимый через дроссельное отверстие 25 в виде нагретого потока, тепло которого снято со спиральных ребер 15.

При движении каретки 4 вниз управление на включение тока высокой частоты нижнего раструба осуществляет верхний концевой переключатель. В результате высокоскоростной поток охлажденных деформирующих шариков обрабатывает прогретую до 450-500°C поверхность зуба по следу нагрева от нижнего магнитопровода, а при движении каретки 4 вверх (управляющая команда от нижнего переключателя) поток шариков обрабатывает поверхность зуба, прогретую по следу от верхнего магнитопровода.

Предлагаемое устройство позволяет получить высококачественный наклеп рабочей поверхности зубьев крупномодульных зубчатых колес за счет повышения степени деформации (до 75-85%), прочности (до НВ 340-355), пластичности (до $\delta = 7 \div 8\%$) и ударной вязкости (до $Q_u = 5 \div 5,5 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{см}^2$).

2.5.6. Электроэрозионная приработка зубьев пары колес [3]

Термины и определения основных понятий электроэрозионной приработки (ЭЭП) — по ГОСТ 25331 – 82.

В основу ЭЭП зубчатых колес положен метод электроимпульсной эрозионной приработки, при котором прирабатываются контактные поверхности взаимнообкатываемых зубьев зубчатого зацепления, помещенного в жидкую диэлектрическую среду.

Процесс ЭЭП является разновидностью электроэрозионного метода и основан на физическом явлении, при котором электроды под действием происходящего между ними электрического импульсного разряда разрушаются и на их поверхности образуются лунки.

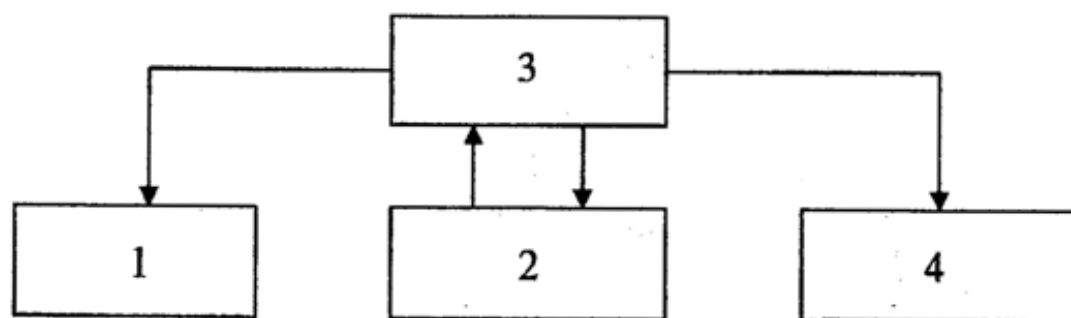


Рис. 25. Функциональная схема процесса ЭЭП зубчатых колес
1 — блок управления генератором; 2 — генератор импульсов тока;
3 — блок преобразования импульса; 4 — электроэрозионный станок

Функциональная схема процесса ЭЭП зубчатых колес, рис. 25, включает следующие блоки:

- блок управления генератором осуществляет автоматическое управление генератором импульсов тока, его включение и выключение по сигналу от датчика;
- генератор импульсов тока осуществляет питание электроэрозионного

станка импульсным током;

- блок преобразования выходного импульса осуществляет преобразование параметров выходного импульса генератора: формы, амплитуды и длительности;

- электроэрозионный станок предназначен для базирования, вращения и ЭЭП зубчатых колес.

При ЭЭП зубчатой пары одно из колес является электродом-заготовкой, другое электродом-инструментом.

Процесс ЭЭП зубчатых колес проводят при наличии в межэлектродном промежутке диэлектрической среды, в качестве которой применяют рабочую жидкость — масло индустриальное или трансформаторное.

Рабочая жидкость, применяемая при ЭЭП, служит для: локализации разряда между обрабатываемыми зубчатыми колесами; удаления продуктов эрозии; отвода тепла от обрабатываемых зубчатых колес.

Основными преимуществами ЭЭП зубчатых колес по сравнению с механической обработкой являются: стабильное получение пятна контакта зубчатого зацепления; снижение уровня шума и вибрации зубчатых передач; повышение контактной прочности зубчатого зацепления; отсутствие трещин и прижогов на рабочих поверхностях зубьев зубчатых колес; возможность обработки сложнопрофильных зубчатых колес и особенно таких, где после операции термической обработки имеются коробления зубчатого венца; простота автоматизации процесса.

Типовой технологический процесс ЭЭП зубчатых колес состоит из операций: подготовки оборудования и зубчатых колес, электроэрозионной обработки, контроля. Основными параметрами типового технологического процесса ЭЭП зубчатых колес являются: частота следования импульса, длительность импульса, амплитуда напряжения импульса, рабочий ток в импульсе, напряжение питания, частота вращения ведущего шпинделя, время приработки. Основными технологическими характеристиками ЭЭП зубчатых колес являются: точность, шероховатость рабочей поверхности зубьев и состояния поверхностного слоя, производительность.

Оборудование, технологическая оснастка и измерительные приборы приведены в табл. 12.

Таблица 12

Оборудование, технологическая оснастка
и измерительные приборы

Наименование	Обозначение
1	2
Электроэрозионный станок Контрольно-обкатной станок	Оборудование

1	2
Узел подачи и фильтрации рабочей жидкости	
Генератор импульсов тока	
Очки защитные типа	
ГР ГОСТ 12.4.013 – 85	
Комплект деталей и узлов для установки и крепления зубчатых колес	Технологическая оснастка
Образцы шероховатости поверхности	Измерительные приборы
Профилометр-профилограф	ГОСТ 9378 — 93
Штангенциркуль	ГОСТ 19300 — 86
ШЦ — 1 — 125 — 0,1	ГОСТ 166 — 89
Индикатор	
ИЧ10 кл. 0	ГОСТ 1577 — 93

Точность ЭЭП зубчатых колес

Точность ЭЭП зубчатых колес определяют следующие факторы: точность самого процесса ЭЭП; точность кинематических узлов электроэрозионного станка; точность установки зубчатых колес в шпиндельные узлы. Основной величиной, характеризующей точность процесса ЭЭП, является разброс величины межэлектродного зазора (МЭЗ), который определяется крутизной нарастания переднего фронта импульсов напряжения, амплитудой напряжения импульса, степенью загрязнения МЭЗ продуктами эрозии.

С увеличением крутизны нарастания переднего фронта импульса напряжения увеличивается стабильность пробивных напряжений, что приводит к уменьшению величины разброса МЭЗ, т. е. повышению точности обработки.

Увеличение амплитуды напряжения импульсов на электродах приводит к увеличению МЭЗ, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка (МЭП), что снижает точность обработки. Ухудшение условий эвакуации продуктов эрозии приводит к частым коротким замыканиям и появлению пробоев через токопроводящие частицы в МЭЗ, что приводит к снижению точности и шероховатости обработки. После ЭЭП зубчатых колес рабочая поверхность зубьев покрыта произвольно расположенными лунками. Шероховатость обработанной поверхности зубьев определяется энергией импульса. Снижение параметра шероховатости в два раза требует уменьшения энергии импульса в восемь раз. Основным параметром импульса тока, влияющим на характер и глубину измененного поверхностного слоя зубьев, является длительность импульса тока.

Производительность процесса ЭЭП зубчатых колес зависит от формы импульса напряжения, его длительности и частоты следования. Использование импульса напряжения с крутым передним фронтом в значительной степени снижает влияние большой нестабильности диэлектрических свойств межэлектродного промежутка и тем самым увеличивает производительность процесса ЭЭП зубчатых колес. Длительность импульса напряжения регулируют генератором импульса тока, обеспечивающим выбор оптимального режима обработки, при этом эрозия электродов максимальна. Частоту следования импульсов генератора выбирают из условия получения необходимого качества и шероховатости рабочей поверхности зубьев.

Требования к зубчатым колесам и рабочим поверхностям зубьев:

- зубчатые колеса должны быть изготовлены из электропроводящего материала;
- габаритные размеры обрабатываемых зубчатых колес не должны превышать максимальных, устанавливаемых инструкцией по эксплуатации электроэрозионного станка;
- зубчатые колеса перед ЭЭП должны пройти окончательную размерную и термическую обработку;
- зубчатые колеса, поступающие на ЭЭП, должны быть очищены от окалины и грязи;
- шероховатость рабочих поверхностей зубьев после ЭЭП должна соответствовать требованиям конструкторской документации на зубчатые колеса;
- зубчатые колеса после ЭЭП должны соответствовать по точностным параметрам требованиям конструкторской документации.

Рабочая жидкость, применяемая при ЭЭП зубчатых колес, должна удовлетворять следующим требованиям: обладать низкой электропроводностью; иметь кинематическую вязкость при 50°C не более 23Ст; иметь температуру вспышки не ниже 150°C; быть устойчивой к действиям разрядов; не оказывать химического воздействия на электроды.

В качестве рабочей жидкости при ЭЭП зубчатых колес должно применяться масло индустриальное "И-20А" по ГОСТ 20799-88 или масло трансформаторное "ТК" по ГОСТ 982 — 80.

Требования к электроэрозионному станку.

Электроэрозионный станок должен состоять из: шпиндельных узлов для установки зубчатых колес; рабочей камеры; привода вращения зубчатых колес; узла подачи и фильтрации рабочей жидкости; токоведущего узла. Он должен обеспечивать: монтаж и ориентацию зубчатых колес для получения рабочего зацепления; вращение зубчатой пары; подтормаживание ведомой шестерни зубчатой пары. Точность кинематических узлов электроэрозионного станка не должна быть ниже точности, предъявляемой к обрабатываемым зубчатым колесам. Шпиндельные узлы для установки зубчатых колес должны быть электрически изолированы от станины станка

и обеспечивать подвод к зубчатым колесам технологического тока в процессе обработки, а также должны обладать достаточной механической жесткостью, обеспечивающей отсутствие деформаций. Шпиндельные узлы должны быть укомплектованы электроизолированными оправками; токоподводами; токосъемниками.

Рабочая камера должна быть оборудована: подводом рабочей жидкости в межэлектродный промежуток зубчатого зацепления; отводом рабочей жидкости в емкость для фильтрации.

Узел подачи и фильтрации рабочей жидкости должен быть оборудован емкостью для очистки от продуктов эрозии, насосом, системой трубопроводов и обеспечивать непрерывную подачу рабочей жидкости в зону обработки зубчатых колес.

Установка ЭЭП зубчатых колес должна быть оборудована необходимыми измерительными приборами для контроля параметров технологического процесса, устройствами предупреждения об аварийных ситуациях и блокировками против ошибочных переключений цепей управления.

Генератор импульсов тока (далее генератор) должен обеспечивать питание электроэрозионного станка импульсами тока высокой частоты. Он должен быть выполнен в виде отдельного агрегата, содержащего силовой блок, блок управления и согласующий трансформатор. Функциональная схема генератора приведена на рис. 26.

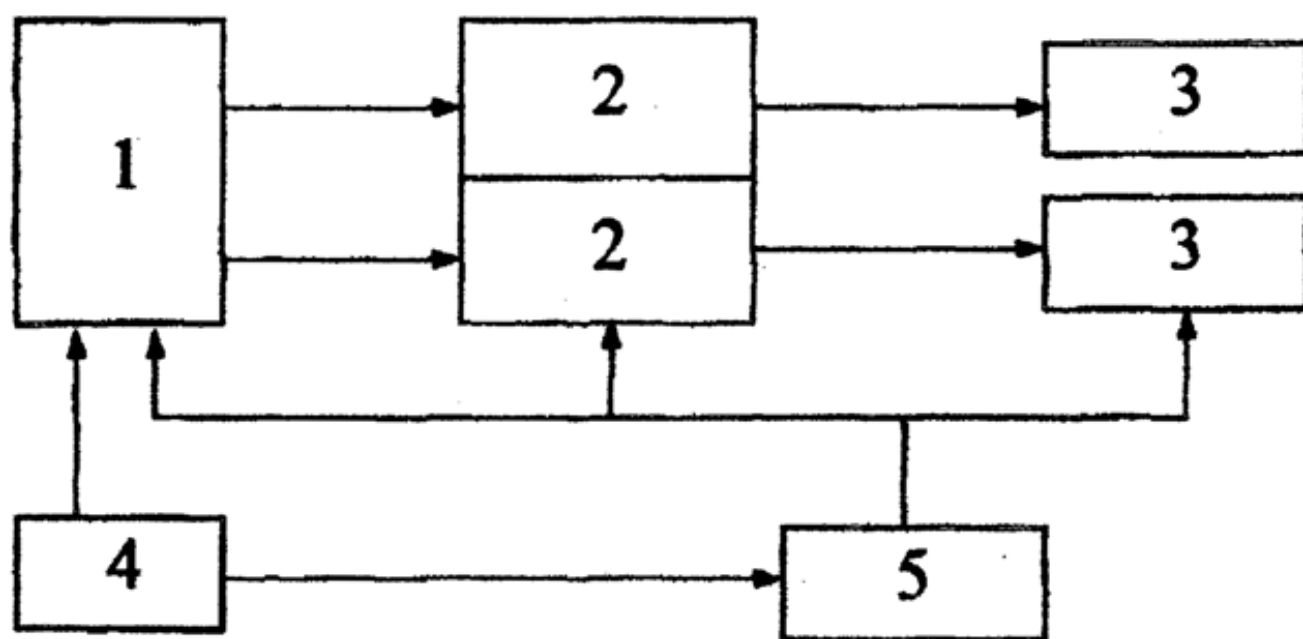


Рис.26. Функциональная схема генератора

1 — задающий генератор; 2 — формирователь импульсов; 3 — выходной каскад;
4 — схема управления генератором; 5 — блок питания.

Входной импульс напряжения генератора должен иметь прямоугольную форму с крутым передним и пологим задним фронтом. Генератор должен быть двухканальным и работать на общую нагрузку с согласующим импульсным трансформатором. В генераторе должно быть предусмотрено устройство для преобразования формы и длительности выходного импульса.

Генератор должен обеспечивать два режима обработки зубчатых колеса:

I режим – черновая обработка;

II режим – чистовая обработка.

Технические характеристики генератора приведены в табл. 13.

Таблица 13

Технические характеристики генератора

Наименование показателя	Значение для режима	
	I	II
1. Частота следования импульсов, Гц	22000	44000
2. Длительность импульса, мкс	4	2
3. Амплитуда напряжения импульса, В	180	90
4. Рабочий ток в импульсе, А	235	125
5. Напряжение питания, В	$380^{+10\%}_{-15\%}$ (50 Гц)	$380^{+10\%}_{-15\%}$ (50 Гц)
6. Потребляемая мощность, кВт	6,0	3,0

Генератор должен выдерживать режим работы при коротких замыканиях длительностью не менее 5 с или должен быть снабжен устройством защиты при коротком замыкании электродов.

Генератор должен быть снабжен устройствами, предотвращающими поступление в питающую сеть электрических помех, создаваемых при работе генератора.

Охлаждение генератора — автономное (воздушное).

Требования к ведению технологического процесса

При ЭЭП зубчатых колес предусмотрена непрерывная подача рабочей жидкости в зону зацепления зубчатой пары.

Величина технологического тока генератора:

для черновой обработки зубчатых колес от 1,2 до 1,5 А;

для чистовой обработки зубчатых колес от 0,4 до 0,8 А.

Переключение режима работы производится только при отключенном генераторе. Время ЭЭП зубчатых колес выбирается с учетом режимов обработки, получения требуемого пятна контакта и шероховатости рабочих поверхностей зубьев.

Требования безопасности

Для предупреждения поражения электрическим током предусмотрены:

- защита изоляции электропроводки к генератору и электроэрозионному станку от механических повреждений и от воздействия рабочей жидкости;
- надежное заземление корпуса генератора, электроэрозионного станка, узла подачи и фильтрации рабочей жидкости и других частей, которые могут оказаться под напряжением;
- изготовление генератора в металлическом корпусе, закрывающегося дверью с замком;
- блокировка генератора, отключающая его от электросети в случае открытия

двери;

- индивидуальные средства защиты — диэлектрические перчатки и резиновый коврик.

Для предупреждения пожароопасности необходимы: отдельное помещение, оборудованное общеобменной, приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении для хранения и разлива рабочей жидкости; емкость для хранения и транспортирования рабочей жидкости из небьющегося и не дающего искру материала с плотно закрывающейся крышкой, с четким названием содержимого и знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026 — 76; наличие запаса рабочей жидкости в помещении, где находится электроэрозионный станок, не превышающее сменной нормы, согласованной с пожарной охраной и установленной технологическим отделом; сборник с плотно закрывающейся крышкой для отходов рабочей жидкости с четким названием содержимого и знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026 — 76. Содержимое сборника необходимо удалять из помещения не реже одного раза в смену для регенерации или уничтожения; средства пожаротушения — углекислотные огнетушители; выполнение требований раздела 6 ГОСТ 20799 — 88.

Для предупреждения вредного воздействия и кожных заболеваний предусматривается: общеобменная приточно-вытяжная вентиляция в рабочих помещениях; местная вытяжная вентиляция от камеры с рабочей жидкостью электроэрозионного станка; скорость движения воздуха в рабочем сечении местной вытяжной вентиляции должна быть не менее 0,6 м/с; световая и звуковая сигнализация, сообщающая о прекращении работы вентиляции; индивидуальные средства защиты — очки защитные типа ГР по ГОСТ 12.4.013 — 85.

Для безопасного обслуживания электроэрозионного станка должны быть предусмотрены: надежное закрепление зубчатых колес в шпиндельных узлах; автоматические выключатели генератора и привода вращения зубчатых колес; блокировка генератора с переключателем "Режим работы".

Примечание. На Истьянском машиностроительном заводе (в Рязанской обл.) ЭЭП зубчатых колес производят непосредственно в редукторе.

Типовой технологический процесс ЭЭП зубчатых колес

Таблица 14

Номер операции	Номер мер перехода	Операция и переход	Оборудование, технологическая оснастка, измерительные приборы	Материал	Режим	Дополнительные указания
1	2	3	4	5	6	7
		Инструкции по технике безопасности и производственной санитарии для электроэрозийных станков. Подготовка ободов и зубчатых колес для электроэрозийной обработки.				
	1	Установить, закрепить одно зубчатое колесо на оправку ведущего шпинделя станка и снять после обработки.	Электроэрозионный станок. Комплект деталей и узлов для установки и крепления зубчатого колеса.	-	-	Инструкция по эксплуатации электроэрозионного станка.
	2	Установить, закрепить другое зубчатое колесо на оправку ведомого шпинделя станка и снять после обработки.	Электроэрозионный станок. Комплект деталей и узлов для установки и крепления зубчатого колеса.	-	-	Инструкция по эксплуатации электроэрозионного станка.

Продолжение табл. 14

1	2	3	4	5	6	7
	3	Установить бабки станка на монтажное расстояние и отвести после обработки.	Электроэрозионный станок.	-	-	Согласно технической инструкции по настройке станка на монтажное расстояние.
	4	Провернуть вручную ведомый шпиндель станка на один-два оборота.	Электроэрозионный станок.	-	-	Зубчатые колеса должны входить в зацепление без заклинивания.
	5	Установить защитный кожух на обрабатываемую зубчатую пару.	Электроэрозионный станок.	-	-	Инструкция по эксплуатации электроэрозионного станка.
	6	Обеспечить циркуляцию рабочей жидкости.	Узел подачи рабочей жидкости.	Масло индустриальное "И-20А" или трансформаторное "ТК".		Инструкция по эксплуатации электроэрозионного станка.

Продолжение табл. 14

1	2	3	4	5	6	7
10		Инструкции по технике безопасности и производственной санитарии для электроэрозионистов.				
	1	Установить режим электроэрозионной обработки.	Электроэрозионный станок.	-	Режим электроэрозионной обработки выбирается по инструкции	Согласно инструкции по эксплуатации устройства и режиму работы генератора
	2	Включить привод вращения зубчатой пары.	-	-	Скорость вращения ведущего зубчатого колеса 300-800 об/мин	-

Продолжение табл. 14

1	2	3	4	5	6	7
3	Обработать зубчатые колеса в одну сторону.	Электроэрозионный станок.	-	-	-	Согласно инструкции по эксплуатации станка.
4	Закончить процесс обработки.	То же	-	-	-	То же
5	Снять защитный кожух с обрабатываемой поверхности.	То же	-	-	-	То же
6	Контроль на рабочем месте.	Штангенциркуль, прибор с индикатором для замера бокового зазора, шумомер.	-	-	-	Согласно разделу 5
7	Установить защитный кожух на обрабатываемую зубчатую пару.	-	-	-	-	Согласно инструкции по эксплуатации станка.

Продолжение табл. 14

1	2	3	4	5	6	7
8	Повторить переход 1.	Электроэрозионный станок.	То же	-	-	Согласно инструкции по эксплуатации станка.
9	Повторить переход 2.					
10	Обработать зубчатые колеса в другую сторону.					
11	Повторить переход 4.					
12	Повторить переход 5.					
13	Повторить переход 6.					

Контроль шероховатости рабочих поверхностей зубьев производится путем сравнения с образцами шероховатости по ГОСТ 9378 — 93 визуально или при помощи профилометра — профилографа типа П по ГОСТ 19300 — 86.

Контроль пятна контакта — штангенциркулем по ГОСТ 166 — 89; боковой зазор — прибором для замера бокового зазора с индикатором ИЧ 10 кл. 0 по ГОСТ 577 — 68; шум зубчатой пары — шумомером по ГОСТ 17187 — 82.

Контроль технологического тока генератора — амперметром по ГОСТ 8711 — 93.

Контроль за подачей рабочей жидкости на обрабатываемые зубчатые колеса и ее загрязнением — визуально.

Материалы, применяемые при ЭЭП, приведены в табл. 15.

Таблица 15

Материалы, применяемые при ЭЭП

Наименование, обозначение	Обозначение НТД
Масло промышленное "И — 20А"	ГОСТ 20799 — 88
Масло трансформаторное "ТК"	ГОСТ 982 — 80

3. Смазочно-охлаждающие среды и методы их подвода в зону обработки

Назначение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) — отводить тепло из зоны обработки, способствовать уменьшению трения и длительному сохранению режущих свойств зерен и, в конечном счете, обеспечение необходимого качества обрабатываемой поверхности. Жидкость должна иметь хорошие моющие и смазочные свойства, склонность к адсорбции и обладать длительной стабильностью свойств.

При шлифовании зубчатых колес из конструкционных и легированных сталей в качестве СОЖ применяют водные растворы масел с присадками поверхностно-активных веществ и сульфинированные минеральные масла с присадками триэтаноламина. Применение в качестве охлаждающих жидкостей масел понижает температуру в зоне резания.

Способ подачи СОЖ в зону обработки и ее дозировка также существенно влияют на теплообмен. Эффективность охлаждения может быть повышена путем подачи СОЖ непосредственно в зону контакта инструмента с деталью, а также созданием на инструменте более прочных адсорбционных пленок (защитных).

В промышленности применяется подача СОЖ методом полива и под давлением 0,3-0,5 и 12-15 кг/см², а также подача СОЖ через поры шлифовального круга. Метод подачи СОЖ под большим давлением все больше вытесняет метод полива.

Применение в качестве СОЖ водных растворов и жидкого азота с

высокими теплопроводностью, теплоемкостью и низкой вязкостью вызывает появление на боковых поверхностях зубьев трещин ввиду чрезмерно высоких градиентов температур и, как следствие, больших растягивающих напряжений. Применение в качестве СОЖ масляных растворов, обладающих высокой смазочной способностью и вязкостью, значительно уменьшает вероятность появления трещин.

Известны технологические процессы шлифования зубчатых колес, при которых охлаждение не применяют. В таких случаях, как правило, используют мягкие круги, чтобы избежать чрезмерного нагрева детали, а также поддерживать режущую способность круга за счет самозатачивания. Сухое шлифование ведет к интенсивному изнашиванию рабочих частей круга, к ухудшению геометрии детали, а вслед за этим – к снижению точности и ухудшению шероховатости шлифуемой поверхности. Положительное воздействие здесь могут оказать пропитка кругов и применение твердых смазок. На машиностроительных заводах в качестве твердых смазок успешно используют коллоидный графит, серу, теллур, сульфированные жиры, дисульфид молибдена.

К числу лучших пропиточных композиций следует отнести: 1) стеарин 85%, сера 10% и стеарат алюминия 5%; 2) сернистый натрий 10%, сера 10% и вода 80%. Первую композицию следует применять при шлифовании всухую и с применением СОЖ, не растворяющих стеарин, вторая композиция ограничений по СОЖ не имеет.

4. Метрологическое обеспечение [4]

Измерение колебания длины общей нормали.

Определение тангенциальных составляющих кинематической точности колеса измерением колебаний длины общей нормали основано на том, что точки поверхностей зубчатого колеса, в которых осуществляется контакт измерительных губок прибора при обработке, получены при разных угловых положениях колеса. Измерение колебания длины общей нормали может осуществляться с помощью микрометров. Более удобны специальные рычажные скобы, а также нормалемеры БВ-5045, БВ-5046 и др.

Измерение погрешности обката.

Под погрешностью обката понимают составляющую кинематической погрешности зубчатого колеса. Ее определяют при вращении его на технологической оси и при исключении циклических погрешностей зубцовой частоты и кратных ей более высоких частот. Определяют погрешность обката измерением погрешности кинематической цепи зубообрабатывающего станка с помощью специальных приборов-кинематометров. Выпускаемые 43ИП кинематометры КН – 7 измеряют кинематическую погрешность в диапазоне 0-200" с частотой 0-7 Гц.. Прибором можно измерить кинематические цепи с передаточным отношением от 1:6 до 1:1920.

Измерение радиального биения зубчатого венца.

Под радиальным биением понимают колебание расстояний от рабочей оси колеса до делительной прямой элемента нормального исходного контура, условно наложенного на профили зубьев колеса. Приборы для измерения радиального биения, выпускаемые заводом «ИЗМЕРОН» и 43ИП, имеют конусные наконечники с углом 40° , а для колес внутреннего зацепления - шарики.

Измерение колебания измерительного межосевого расстояния при двухпрофильном зацеплении. Для колес больших размеров оно осуществляется прибором - межосемером БВ-5077, который снабжен набором сменных узлов для колес различных видов.

Измерение циклической погрешности.

Источники этой погрешности - неточности, повторяющиеся за каждый оборот червяка делительной передачи зубообрабатывающего станка, либо погрешности, повторяющиеся на каждом зубе зубчатого колеса. Для широких косозубых колес характерна циклическая погрешность f_{zk} , которую можно определить волномером. Волномеры изготавливаются 2-х видов. В одних используют отсчетную головку с ценой деления 0,001 мм, в других - индуктивное записывающее устройство.

Измерение отклонения шагов выполняют с помощью приборов-шагомеров, например, БВ-5070, 21802, 21704.

Измерение профиля.

Появление отклонения профиля связано в основном с погрешностями режущего инструмента (фрезы) или заправки шлифовального круга, а также вибрациями станка. Измерение профиля выполняют универсальным эвольвентомером БВ-5062 и др.

Измерение бокового зазора. Непосредственно измерение осуществляется в собранной передаче с помощью щупа, свинцовой пластины или стрелочного отсчетного устройства, упирающегося в боковые поверхности зуба.

Измерение исходного контура (смещения).

Наименьшее смещение исходного контура E_H должно обеспечить получение гарантированного бокового зазора в передаче и одновременно компенсировать погрешность изготовления колес и монтажа передачи. Измерение дополнительного смещения исходного контура осуществляется с помощью зубомеров смещения.

Измерение толщины зуба E_s и T_c . Для толщины зуба по постоянной хорде задается наименьшее ее отклонение E_{cs} и допуск T_c . Все приборы, предназначенные для этих измерений, которые называют кромочными зубомерами, имеют устройство, состоящее из 2-х губок для измерения толщины зуба по хорде, и координирующего устройства, с помощью которого обеспечивается требуемое расстояние от наружной поверхности до линии измерения, т.е. до постоянной хорды зуба. Наиболее распространенными приборами для измерения толщины зуба являются

штангензубомеры СИЗ-18 для модулей 1-18 мм и ШЗ-36 для модулей 5-36 мм; зубомер ЗИМ-16М для модулей 1-16 мм.

Заключение

Учебное пособие дополняет лекционный курс по технологии машиностроения и систематизирует прогрессивные решения по обработке зубьев крупномодульных зубчатых колес. В отдельном учебном пособии приведены методические указания по уменьшению и исключению коробления зубьев, технологическому обеспечению оптимального пятна контакта.

Литература

1. Адам Я.И., Овумян Г.Г. Предварительное прорезание впадин зубьев крупномодульных колес. Обработка металлов резанием, 17-65-2. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1965.
2. А.С. СССР 1260096, кл В21, Н5/00 Устройство для пневмодинамического упрочнения зубьев крупномодульных зубчатых колес/Алексеев А.Ф., Алексеев С.А./Бюл. 44, 12.03.85г.
3. Коган Б.И. Технологическое обеспечение качества изготовления редукторов горных машин. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1999.
4. Коган Б.И. Метрологическое обеспечение качества производства машин. Учебное пособие. – Кемерово: КузГТУ, 2000.
5. Коган Б.И. Прогрессивная технология горного машиностроения. Часть 2. Новые технологические процессы. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000.
6. Сидоренко Л.К. Особенности изготовления крупномодульных колес. – М.: Машиностроение, 1976.
7. Шаповалов В.Ф. и др. Лезвийная обработка крупномодульных закаленных колес/ Шаповалов В.Ф., Печеный В.Н., Коновалов А.В., Каплий Ю.А., Гибинский И.С. // Вестник машиностроения. 1986. №11. С. 42-44.
8. Шунаев Б.К. Зубофрезерование методом двух подач. – М.: Машгиз, 1961.

Содержание

Введение	3
1. Параметры качества зубьев	3
2. Технология обработки зубьев	6
2.1. Обработка червячными фрезами	8
2.2. Твердосплавные червячные фрезы типа «Победа».....	13
2.3. Обработка зубьев дисковыми фрезами	19
2.4. Обработка зубьев пальцевыми фрезами	23
2.5. Отделочная обработка зубьев	26
2.5.1. Чистовая обработка впадин зубчатых колес	27
2.5.2. Поэлементная обработка зубьев крупномодульных зубчатых колес поверхностно-пластическим деформированием (ППД).....	30
2.5.3. Упрочнение зубьев накаткой	33
2.5.4. Электромеханическая накатка зубьев	36
2.5.5. Устройства для пневмодинамического упрочнения зубьев	38
2.5.6. Электроэрозионная приработка зубьев пары колес	40
3. Смазочно-охлаждающие среды и методы их подвода в зону обработки	52
4. Метрологическое обеспечение.....	53
Литература	55