



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

Исследование процессов обработки резанием и режущего инструмента в 2-х частях. Ч.2

Презентация в 2-х частях. Часть 2.

Лектор - Козлов Виктор Николаевич,

доцент отделения материаловедения ИШНПТ

моб. тел. 8-952-809-38-60

**Лекции – 8 часов, лабораторные работы – 24 часа,
практические занятия – 16 часов, 168 часов сам. работы,
6 кредитов. Экзамен.**

Литература

• Основная литература:

1. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. –М.: Машиностроение, 2012. –304 с..
2. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: учебник для вузов / Под общ. ред. С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2014, 520 с.
3. Справочник конструктора-инструментальщика. / под ред. В.А. Гречишникова, С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2006, 542 с.
4. Проектирование режущих инструментов. Методические указания и задания к курсовой работе для студентов, обучающихся по специальности 151001 «Технология машиностроения» ИДО / сост. С.В. Кирсанов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.– 77 с.

Дополнительная литература:

5. Арляпов А.Ю., Галин Н.Е., Ким А.Б., Сбоев В.Н. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент»– Томск, 2012, - 35 с.
6. Кирсанов С.В. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент»– Томск, 2012, - 35 с.
7. Кирсанов С.В. Методические указания по выполнению практических занятий по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент»– Томск, 2012, - 35 с.
8. Козлов В.Н. Методические указания по выполнению практических занятий по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент»– Томск, 2012, - 35 с.
9. Kirsanov S.V. Material cutting and cutting tools: study aid / S.V. Kirsanov; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: TPU Publishing House, 2012, 196 p.

Названия разделов

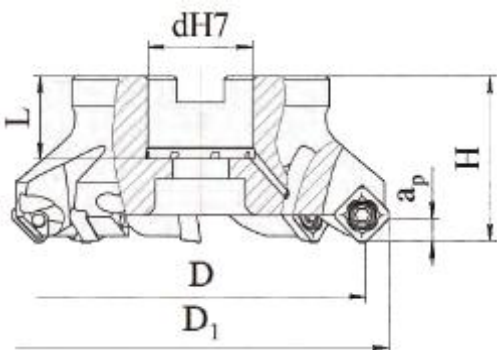
- 1. Современные направления совершенствования процессов резания и режущих инструментов;*
- 2. Исследование деформаций срезаемого слоя и составляющих сил резания;*
- 3. Исследование температуры резания;*
- 4. Испытания режущих инструментов на стойкость;*
- 5. Исследование обрабатываемости материалов резанием;*
- 6. Выбор СОЖ при обработке резанием;*
- 7. Исследование качества поверхностного слоя, обработанного резанием;*
- 8. Исследование качества износостойких покрытий режущих инструментов.*
- 9. Абразивная обработка.*

Экзамен

Серия SD



Обработка:
пазов,
плоскостей
уступов,
фасок



Насадные

45°



Примеры обозначения:

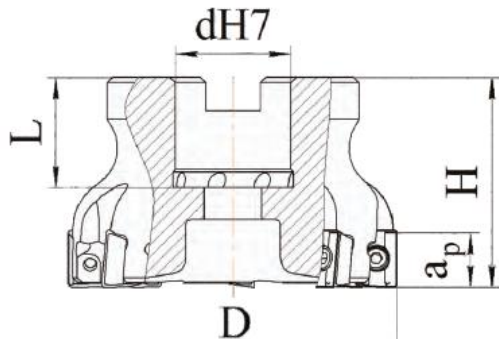
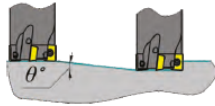
1-2-3-4 – 5-6-7 – 8-9-10-11-12

FUDS-50N22-R4SD13 – фреза
торцевая, универсальная, с
углом $\phi=45^\circ$, стандартная, $\varnothing D$
фрезы **50** мм, **насадная** (N),
Øприсоединения 22 мм, **правая**,
4 зуба, с пластиной **SD..13...**, /
суммарная длина режущей кромки
----- мм.

Обозначение	D	D ₁	H	d	L	a _p	Z	Пластины
FUDS-50N22-R4SD13	50	64,5	40	22	20	6,8	4	SDHT 1305AD SDHW 1305AD
FUDS-63N22-R5SD13	63	77,5	40	22	20	6,8	5	
FUDS-80N27-R6SD13	80	94,5	50	27	22	6,8	6	
FUDS-100N32-R8SD13	100	114,5	50	32	25	6,8	8	
FUDS-125N40-R10SD13	125	139,5	60	40	29	6,8	10	

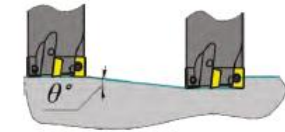
90°

Насадные

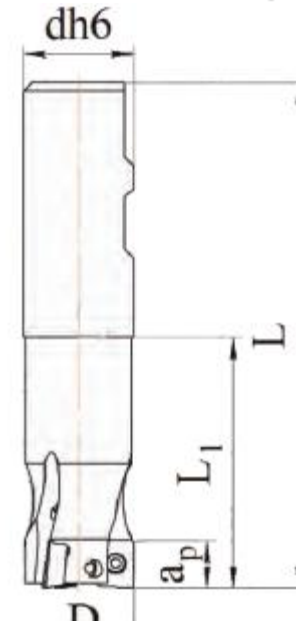
Обработка:
пазов,
уступов,
плоскостей.

Обозначение	D	d	H	L*	a _p	Z	θ°	Пластины
FRAS-50N22-R7ZA11	50	22	40	20	10,4	7	1,4	ZAHT 1104.. R
FRAS-63N22-R8ZA11	63	22	40	20	10,4	8	1,2	
FRAS-80N27-R10ZA11	80	27	50	22	10,4	10	1	
FRAS-100N32-R12ZA11	100	32	50	25	10,4	12	0,7	

Серия ZA



W – хвостовик «Weldon»

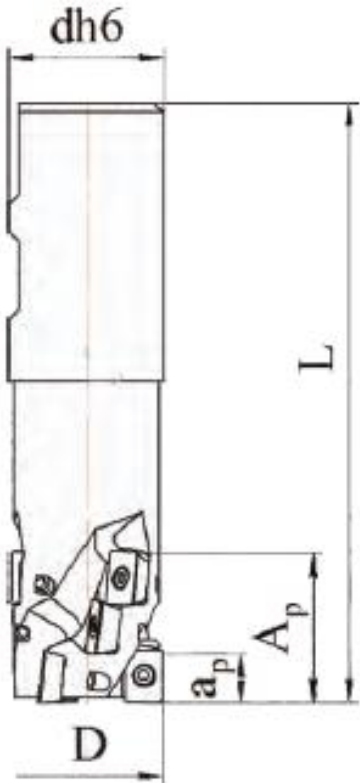


Обозначение	D	d	L*	L ₁	a _p	Z	θ°	Пластины
FUGA-25W25-R3ZA11	25	25	115	59	10,4	3	3,1	ZAHT 1104.. R
FUGA-32W32-R4ZA11	32	32	125	65	10,4	4	1,8	
FUGA-40W32-R5ZA11	40	32	125	65	10,4	5	1,2	

Обработка:
пазов, уступов

Концевые
длиннокромочные

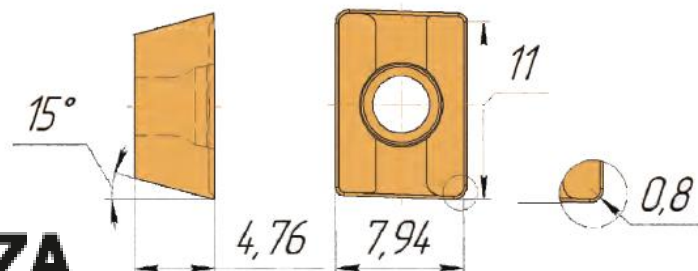
90°



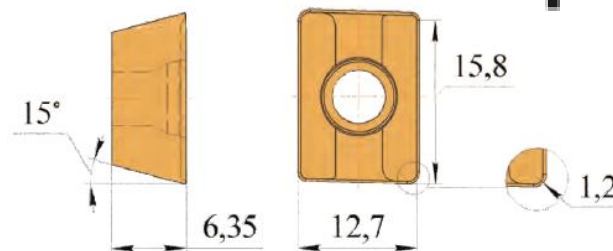
Обозначение	D	d	L	а _р	A _р	Z	Σ Z	Пластины
FUAL-25W25-R2ZA11/20	25	25	105	10,4	20	2	4	ZAHT 1104.. R
FUAL-32W32-R3ZA11/30	32	32	110	10,4	30	3	9	
FUAL-40W40-R4ZP11/40	40	40	120	10,4	40	4	16	

Группа	Материал
P	Углеродистая, конструкционная, легированная сталь
M	Нержавеющая сталь
K	Чугун
N	Алюминий и другие цветные металлы
S	Жаропрочные сплавы
S	Титан и титановые сплавы
H	Закалённые стали

Серия ZA



Обработка	Обозначение	Сплавы										Режимы	
		TP20AM	TP25AM	TP40AM	AP10TT	TP20TT	AP30TT	AP10XM	BP35XM	A10	A30	Подача f_z (мм/зуб)	Глубина a_p (мм)
		Скорость резания V , (м/мин)											
чистовая	ZAHT 1104.. R FP	200... 250										0,1... 0,14	1...2
	ZAHT 1104.. R FM				180... 220			30... 80		30... 70			
	ZAHT 1104.. R FK				210... 260			90... 125					
п/чистовая	ZAHT 1104.. R FP	180... 220										0,12... 0,16	1,5... 2,5
	ZAHT 1104.. R EP		170... 210									0,14... 0,18	2...4
	ZAHT 1104.. R FM				160... 200			25... 60		30... 60		0,12... 0,16	1,5... 2,5
	ZAHT 1104.. R EM					150... 190	130... 170					0,14... 0,18	2...4
	ZAHT 1104.. R FK							200... 240				0,12... 0,16	1,5... 2,5
	ZAHT 1104.. R EK				190... 230			70... 110				0,14... 0,18	2...4
черновая	ZAHT 1104.. R SP		150... 200	130... 160								0,2... 0,28	3...6
	ZAHT 1104.. R SM						120... 160		20... 50		25... 50	0,18... 0,22	3...6
	ZAHT 1104.. R SK								150... 190			0,2... 0,28	3...6



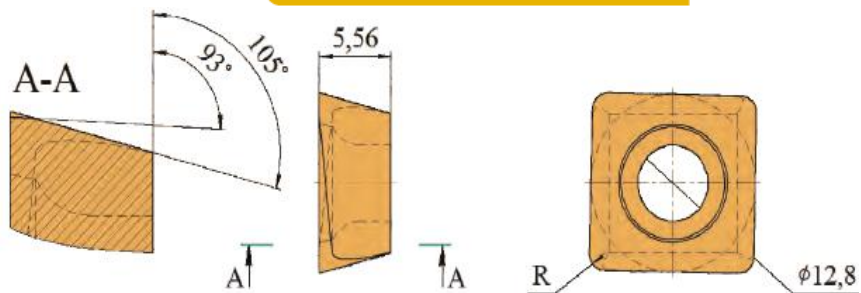
Группа	Материал
P	Углеродистая, конструкционная, легированная сталь
M	Нержавеющая сталь
K	Чугун
N	Алюминий и другие цветные металлы
S	Жаропрочные сплавы
S	Титан и титановые сплавы
H	Закалённые стали

Обработка	Обозначение	Сплавы										Режимы	
		TP20AM	TP25AM	TP40AM	AP10TT	TP20TT	AP30TT	AP10XM	BP35XM	A10	A30	Подача f_z (мм/зуб)	Глубина a_p (мм)
		Скорость резания V , (м/мин)											
чистовая	ZPHT 1506.. R FP	200... 250										0,1... 0,14	1...2
	ZPHT 1506.. R FM				180... 220			30... 80		30... 70			
	ZPHT 1506.. R FK				210... 260			90... 125					
п/чистовая	ZPHT 1506.. R FP	180... 220										0,12... 0,16	1,5... 2,5
	ZPHT 1506.. R EP		170... 210									0,14... 0,18	2...4
	ZPHT 1506.. R FM				160... 200			25... 60		30... 60		0,12... 0,16	1,5... 2,5
	ZPHT 1506.. R EM					150... 190	130... 170					0,14... 0,18	2...4
	ZPHT 1506.. R FK							200... 240				0,12... 0,16	1,5... 2,5
	ZPHT 1506.. R EK				190... 230			70... 110				0,14... 0,18	2...4
черновая	ZPHT 1506.. R SP		150... 200	130... 160								0,2... 0,28	3...6
	ZPHT 1506.. R SM						120... 160		20... 50		25... 50	0,18... 0,22	3...6
	ZPHT 1506.. R SK								150... 190			0,2... 0,28	3...6

Серия SO

90°

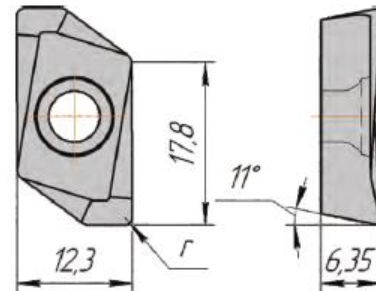
Насадные



Серия AP

Концевые
(для алюминия)

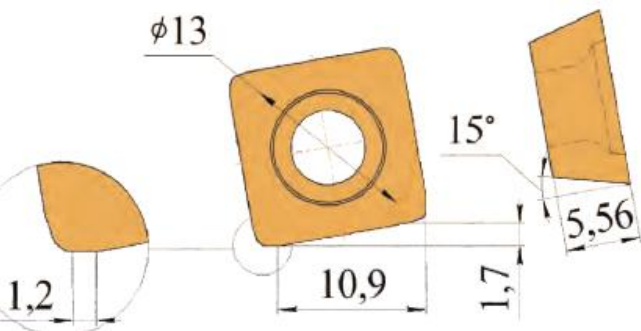
90°



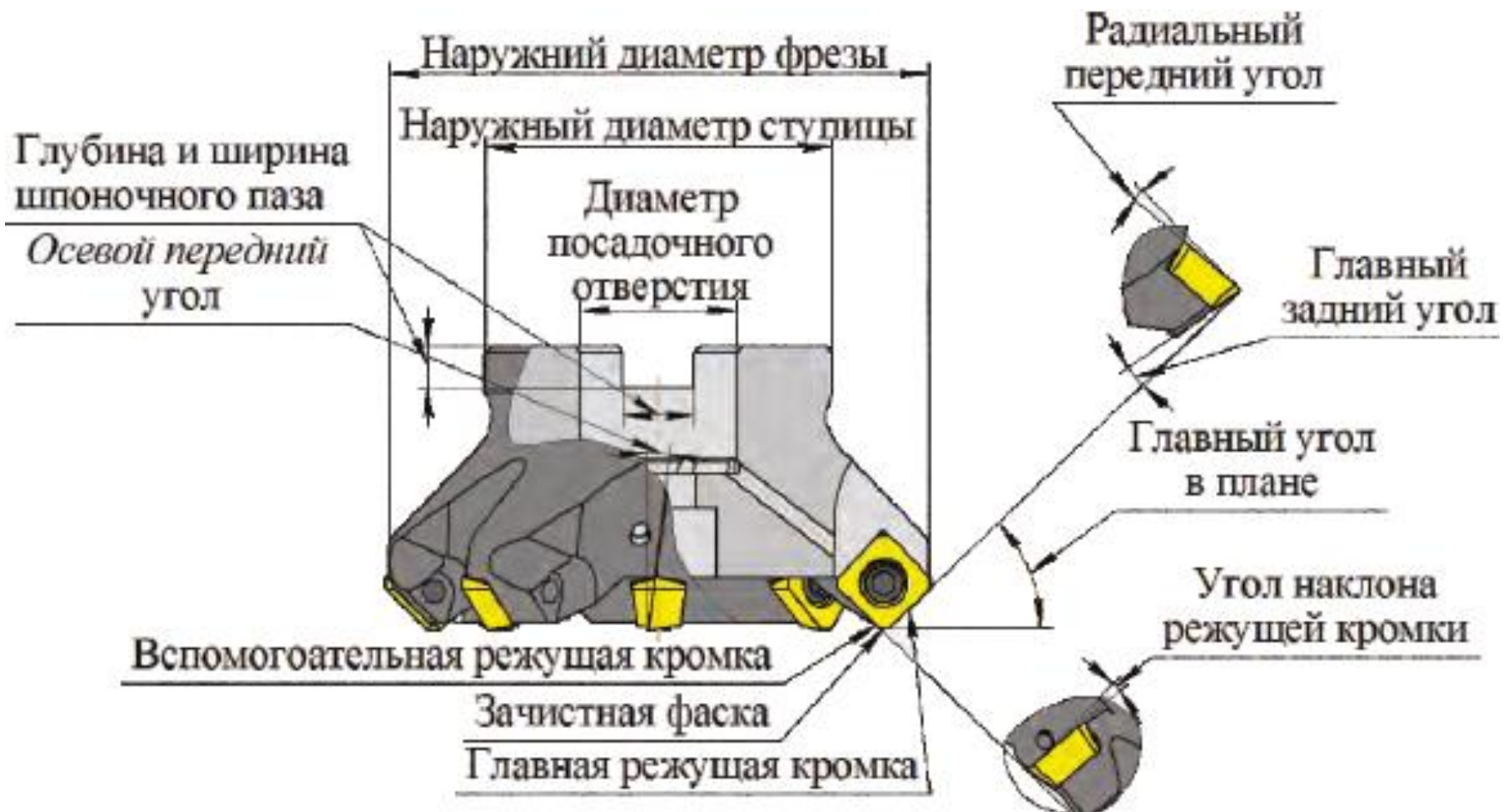
Серия XD

10°

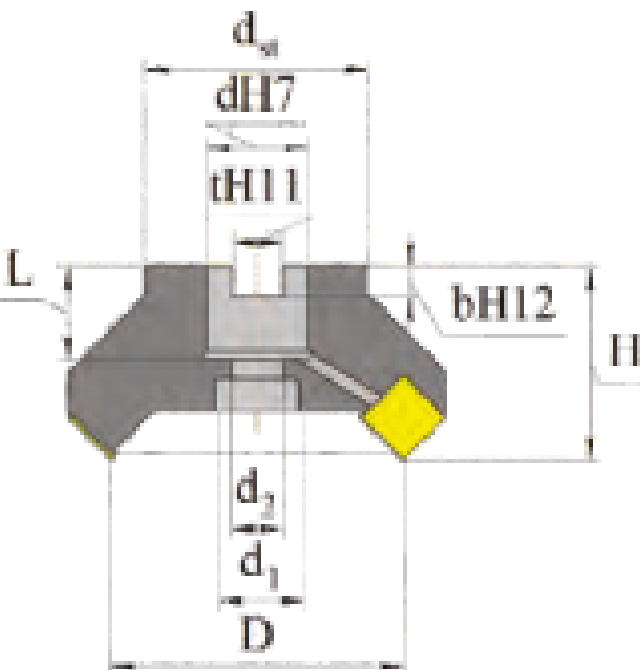
Концевые



Обработка	Обозначение	Сплавы		Режимы	
		A10	A30	Подача (мм/зуб)	Глубина (мм)
Чистовая	APKT 180608R FN	500... 800		0,08...0,12	1...3
	APKT 180612R FN				
	APKT 180616R FN			0,12...0,16	1,5...4
	APKT 180624R FN				
	APKT 180631R FN			0,15...0,18	2...6
	APKT 180640R FN				
Получистовая	APKT 180608R EN	400... 700		0,12...0,16	2...5
	APKT 180612R EN				
	APKT 180616R EN			0,16...0,2	3...8
	APKT 180624R EN				
	APKT 180631R EN			0,18...0,24	4...12
	APKT 180640R EN				

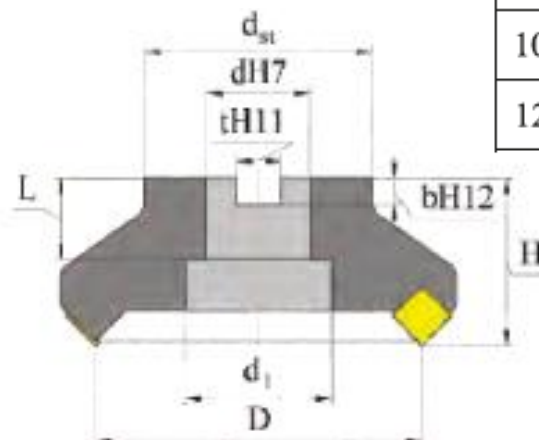


Исполнение 1



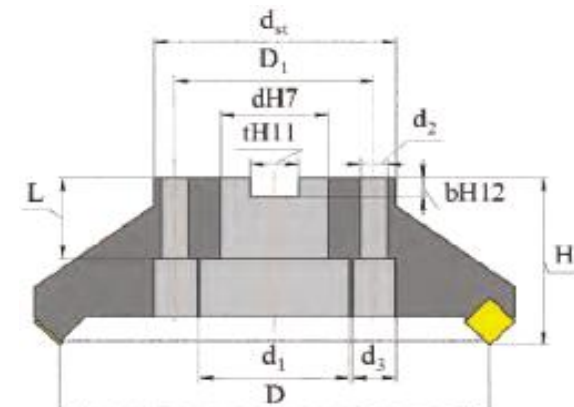
D	d	H	t	b	L	d ₁	d ₂	d _{st}
32	16	40	8,4	5,6	19	13,5	8,4	32
40								
50	22	40	10,4	6,3	20	18	11	48
63								
80	27	50	12,4	7	22	20	13	60
100	32	50	14,4	8	25	27	17	78
125	40	63	16,4	9	29	32	21	89

Исполнение 2



D	d	H	t	b	L	d ₁	d _{st}
80	27	50	12,4	7	22	20	60
100	32	50	14,4	8	25	27	78
125	40	63	16,4	9	29	32	89

Исполнение 3



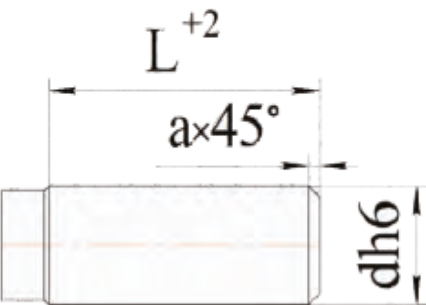
D	D ₁	d	H	t	b	L	d ₁	d ₂	d ₃	d _{st}
160	66,7	40	63	16,4	9	31	56	14	20	90
200	101,6	60	63	25,7	14	32	70	18	26	140
250										170

Исполнение 4

D	D ₁	D ₂	d	H	t
315	101,6	177,8	60	63	25,7
400					
500					

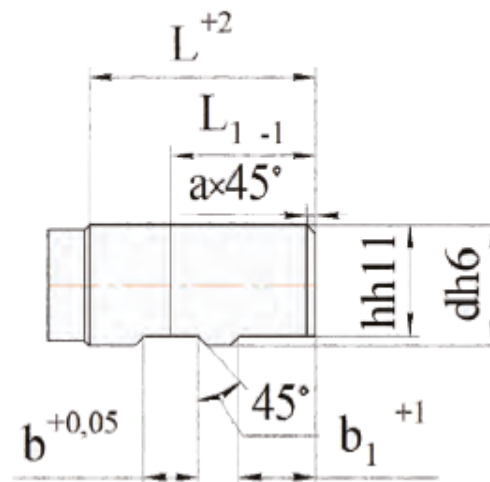
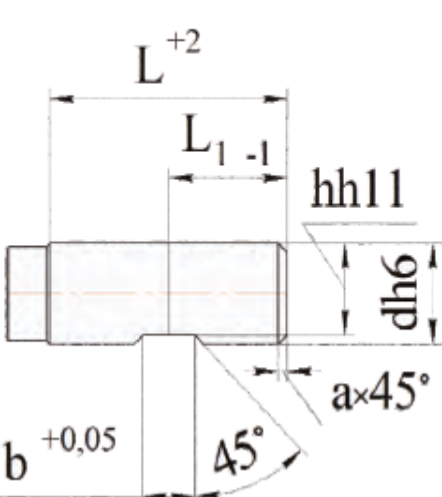
Концевые фрезы

А – цилиндрический хвостовик



d	L	a
12	45	1,2
16	48	1,6
20	50	2,0
25	56	2,0
32	60	2,0
40	70	2,0
50	80	2,0

W – хвостовик «Weldon»



d	h	b	b ₁	L	L ₁	a
12	10,4	8		45	22,5	1,2
16	14,2	10		48	24	1,6
20	16,2	11		50	25	2,0
25	23	12	17	56	32	2,0
32	30	14	19	60	36	2,0
40	28	14	19	70	40	2,0
50	47,8	18	23	80	45	2,0

Износостойкие покрытия для режущих пластин

Сегодня практически всегда используются инструменты с износостойкими покрытиями.

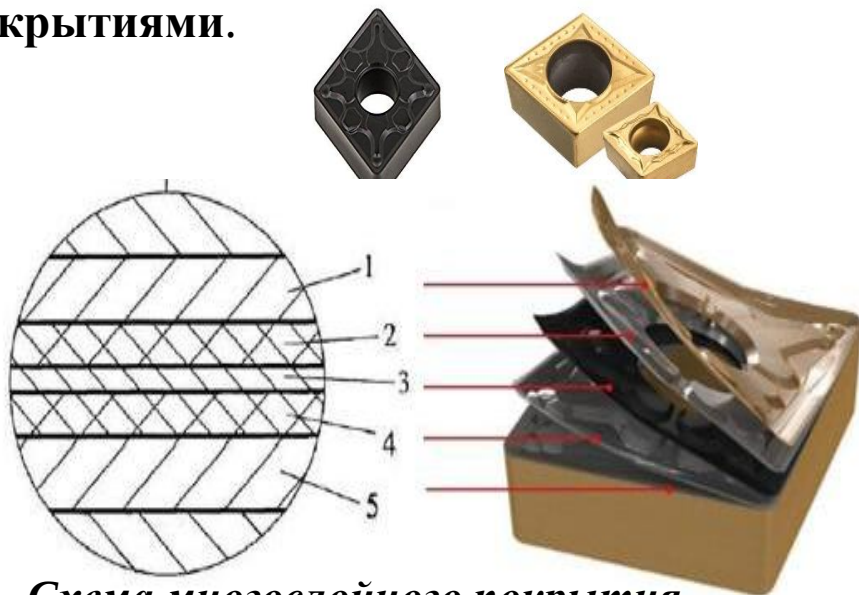


Схема многослойного покрытия

Наиболее часто в качестве износостойких покрытий или их слоев используются:

- 1) Карбиды, нитриды, карбонитриды и другие соединения тугоплавких металлов (керамические покрытия):
 TiN , TiCN , $(\text{Ti,Cr})\text{N}$, $(\text{Ti,Zr})\text{N}$, $(\text{Ti,Al})\text{N}$, $(\text{Ti,Al})\text{CN}$, Al_2O_3 и др.;
- 2) Алмазоподобные соединения (углеродные покрытия).

Наиболее важную задачу выполняет **верхний слой (1)** покрытия. Нижележащие слои не только осуществляют связь между верхним слоем и **материалом режущей пластины**, но и **снижают передачу тепла в инструмент**, уменьшают диффузию между верхним слоем и материалом инструмента. Чем больше слоёв, тем меньше передача тепла в инструментальный материал режущей пластины, т.к. тепловой поток наиболее **эффективно уменьшается на границе слоёв**. С другой стороны, чрезмерное увеличение количества слоёв приводит к **удорожанию** режущего инструмента. При большой контактной нагрузке во время резания для предупреждения растрескивания верхнего слоя покрытия стараются использовать **нижележащий слой с более высокой величиной модуля упругости**.

Методы нанесения износостойких покрытия

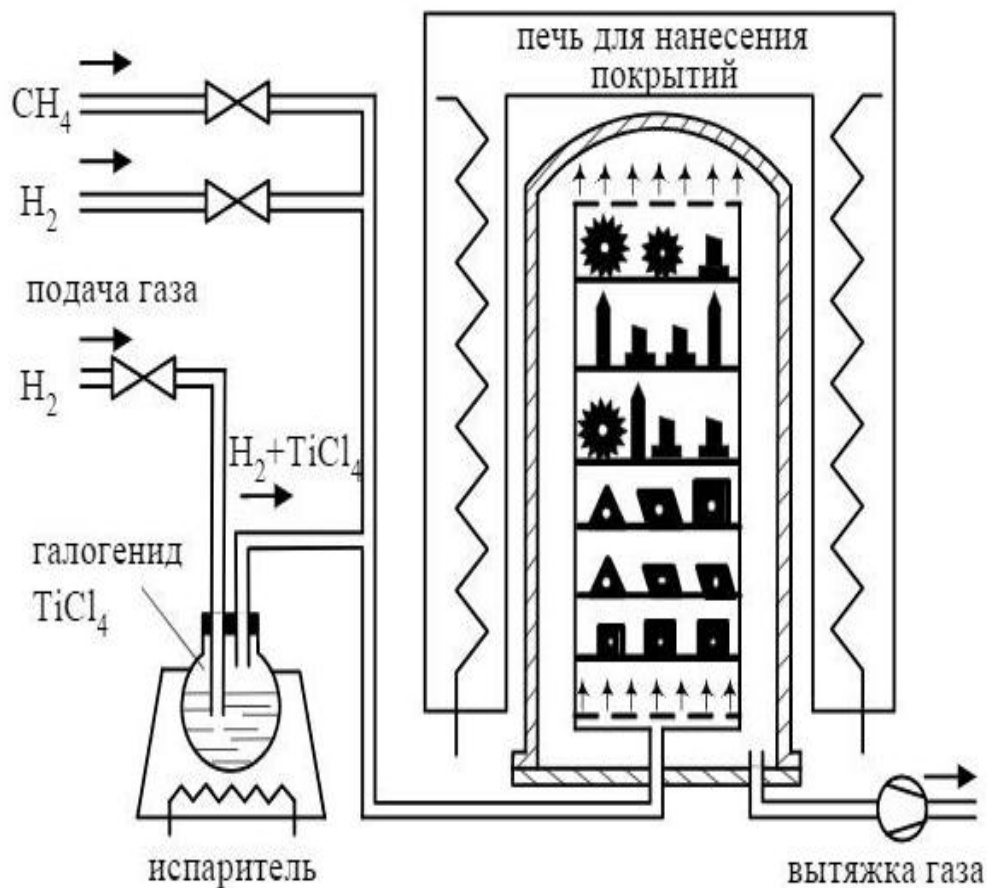
Методом **химического осаждения покрытий** (ХОП), или **CVD** (Chemical Vapour Deposition), из газовой фазы получают соединения на основе нитридов, карбидов, карбонитридов и боридов тугоплавких металлов – Al_2O_3 , TiN , TiC , ZrN , TiCN и др.

Покрытия HT-CVD (**High-Temperature** CVD) и MT-CVD (Medium-Temperature CVD) методами формируются при температуре более **750°C** . PA-CVD (**Plasma Assisted** CVD) метод позволяет использовать более низкие температуры – **$550...650^\circ \text{C}$** . При этом обеспечивается **высокая скорость ($5...8 \text{ мкм/ч}$) нанесения покрытий**, общая толщина слоёв которых может достигать **$6...15 \text{ мкм}$** .

Метод **физического осаждения покрытий в вакууме** (ФОП), или **PVD** (**Physical Vapour Deposition**) – испарение осаждаемого вещества в **вакуумной камере** (более **качественное** покрытие) с последующей ионизацией частиц, **ускорение в электрическом поле** в направлении к покрываемой поверхности и их конденсацией на этой поверхности в **присутствии реакционного газа**. Перевод твердого вещества в металлический пар осуществляется при температуре **$500...600^\circ \text{C}$** :

- а) катодным пятном вакуумной дуги (вакуумно-дуговое испарение);
- б) ионным пучком (магнетронное распыление);
- в) электронным пучком (электронно-лучевое испарение).

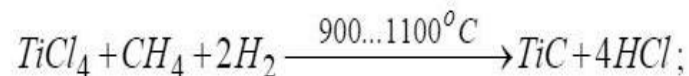
Метод **химического** осаждения износостойких покрытий



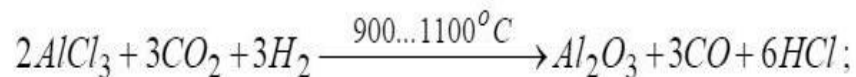
Нанесение покрытия методом
высокотемпературного химического
осаждения (HT-CVD)

Уравнения химических реакций при формировании покрытий высокотемпературным методом химического осаждения (**HT-CVD**) имеют следующий вид:

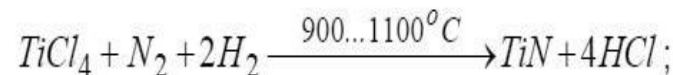
при осаждении карбида титана TiC:



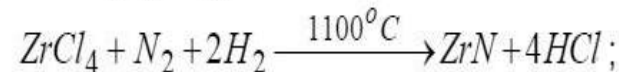
при осаждении оксида алюминия Al₂O₃:



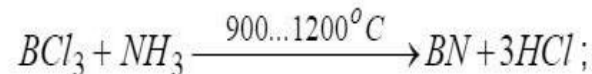
при осаждении нитрида титана TiN:



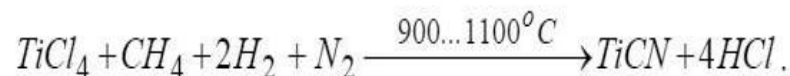
при осаждении нитрида циркония ZrN:



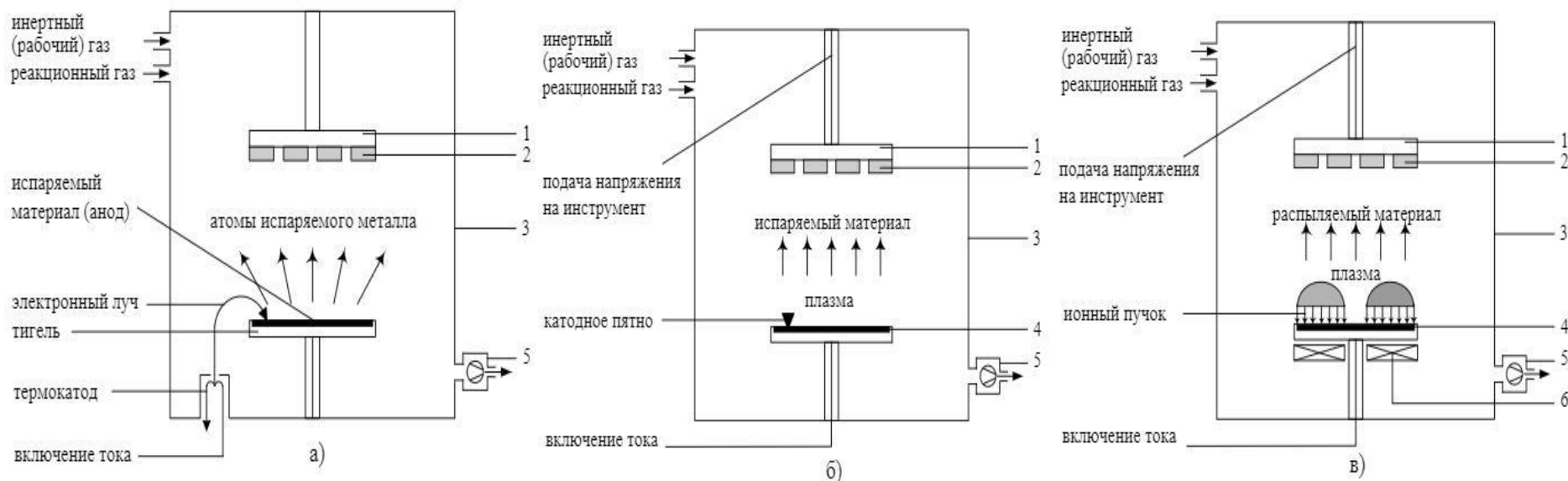
при осаждении нитрида бора BN:



при осаждении карбонитрида титана TiCN:



Методы физического осаждения износостойких покрытий



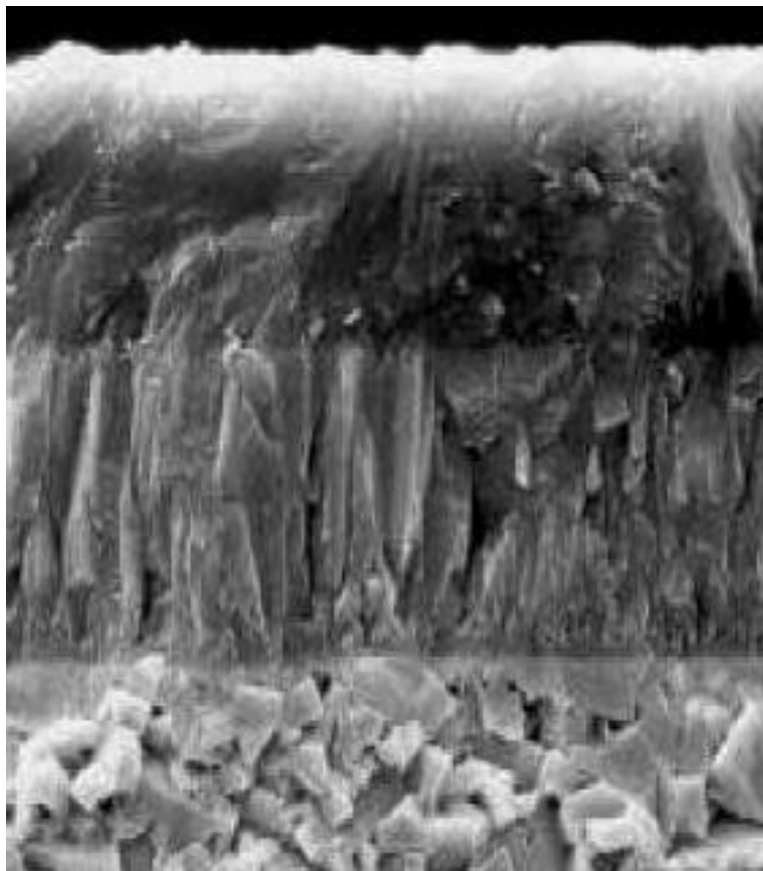
Виды способов нанесения покрытий **PVD**

(а) электронно-лучевое испарение, являющееся представителем ионно-термических методов;

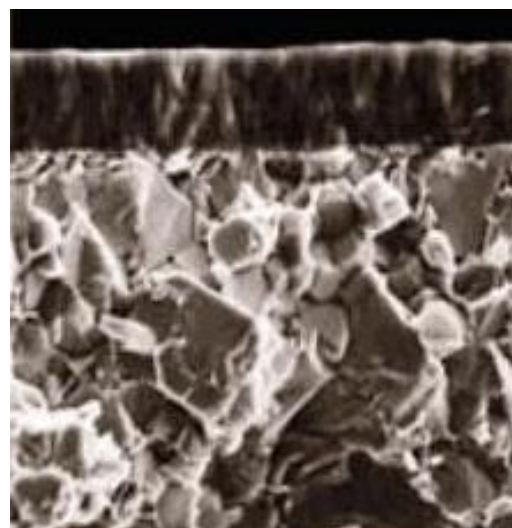
(б) электродуговое испарение;

(в) магнетронное распыление, являющееся разновидностью распылительных методов.

Сравнение микроструктуры при различных методах осаждения износостойких покрытий



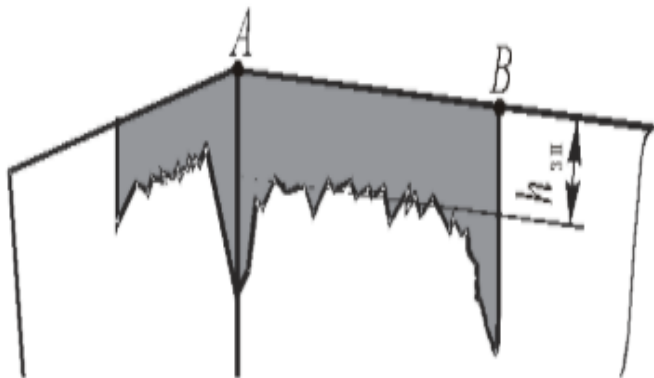
а)



б)

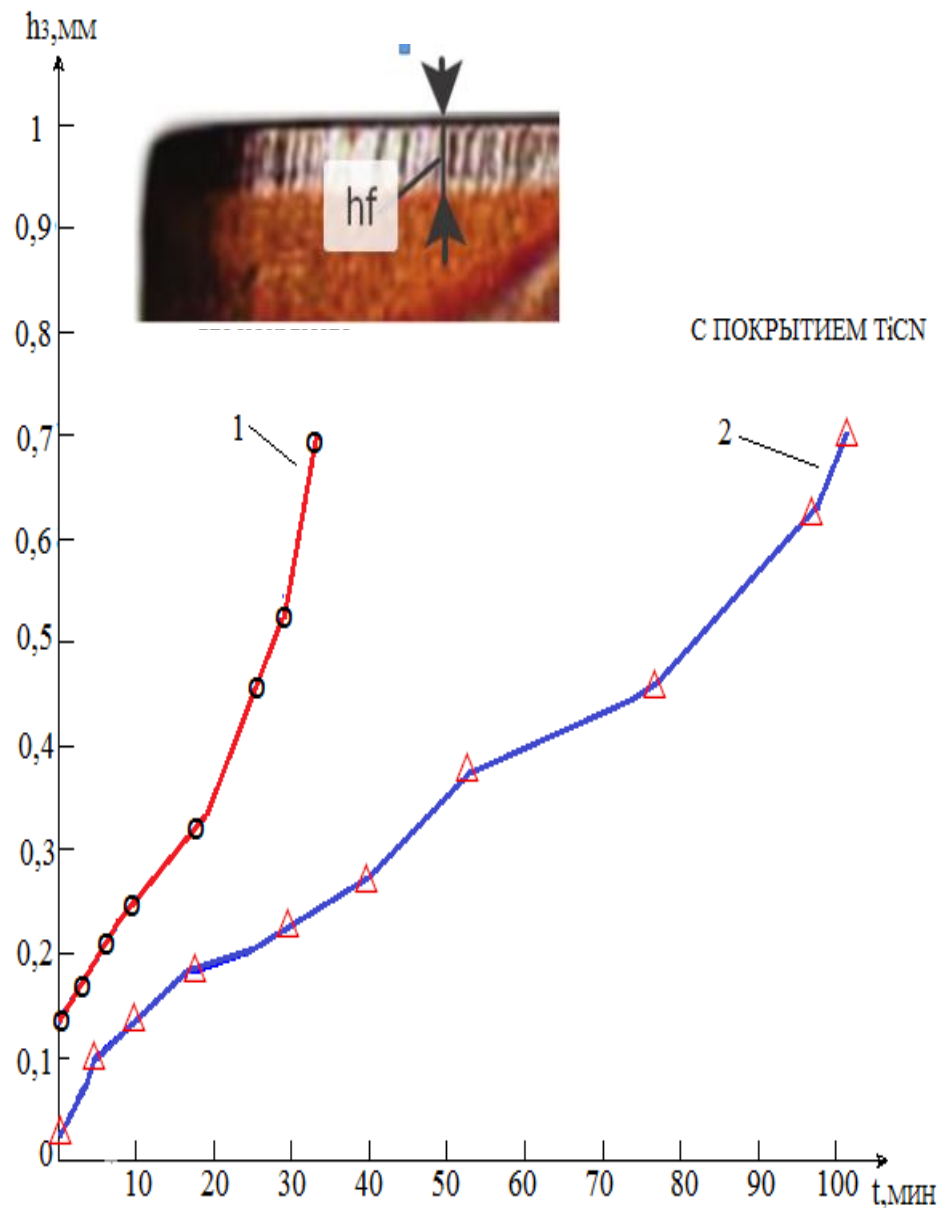
Микроструктура поверхностного слоя инструмента с различными покрытиями:
а – с **CVD-покрытиями** (твердый сплав + $\text{TiN-Al}_2\text{O}_3$); б – с **PVD-покрытиями**
(твердый сплав + $\text{TiN-Al}_2\text{O}_3$). Увеличение 8000х

Зависимость износа задней поверхности h_3 твердосплавных пластин

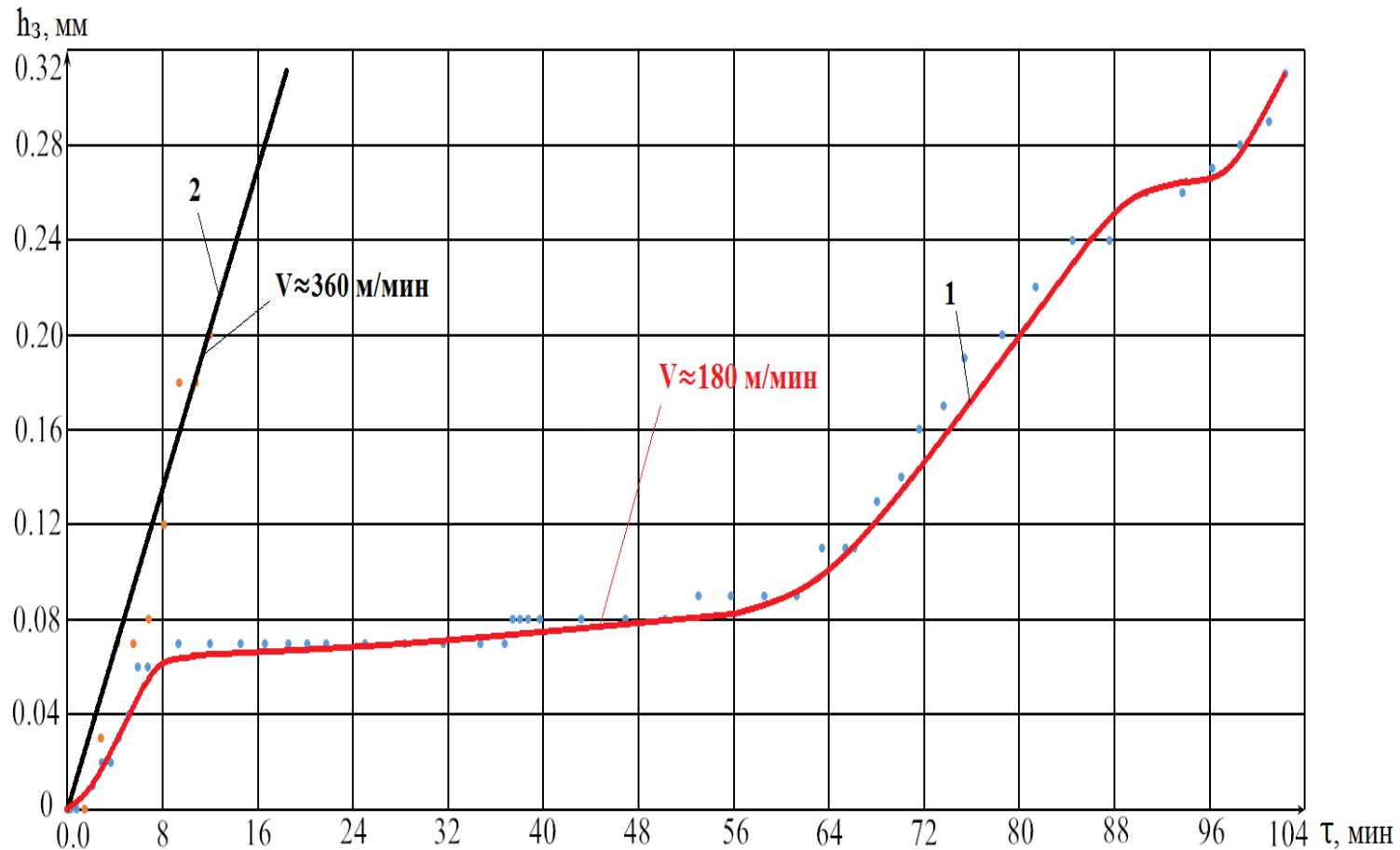


Изменение длины фаски износа задней поверхности h_3 (h_f) [мм] твердосплавных пластин в зависимости от времени t [мин] точения стали 40Х. $v = 300$ м/мин; $s = 0,13$ мм/об; $t = 1$ мм.

1 – **T15K6** без покрытия;
2 – T15K6 с **покрытием TiCN**



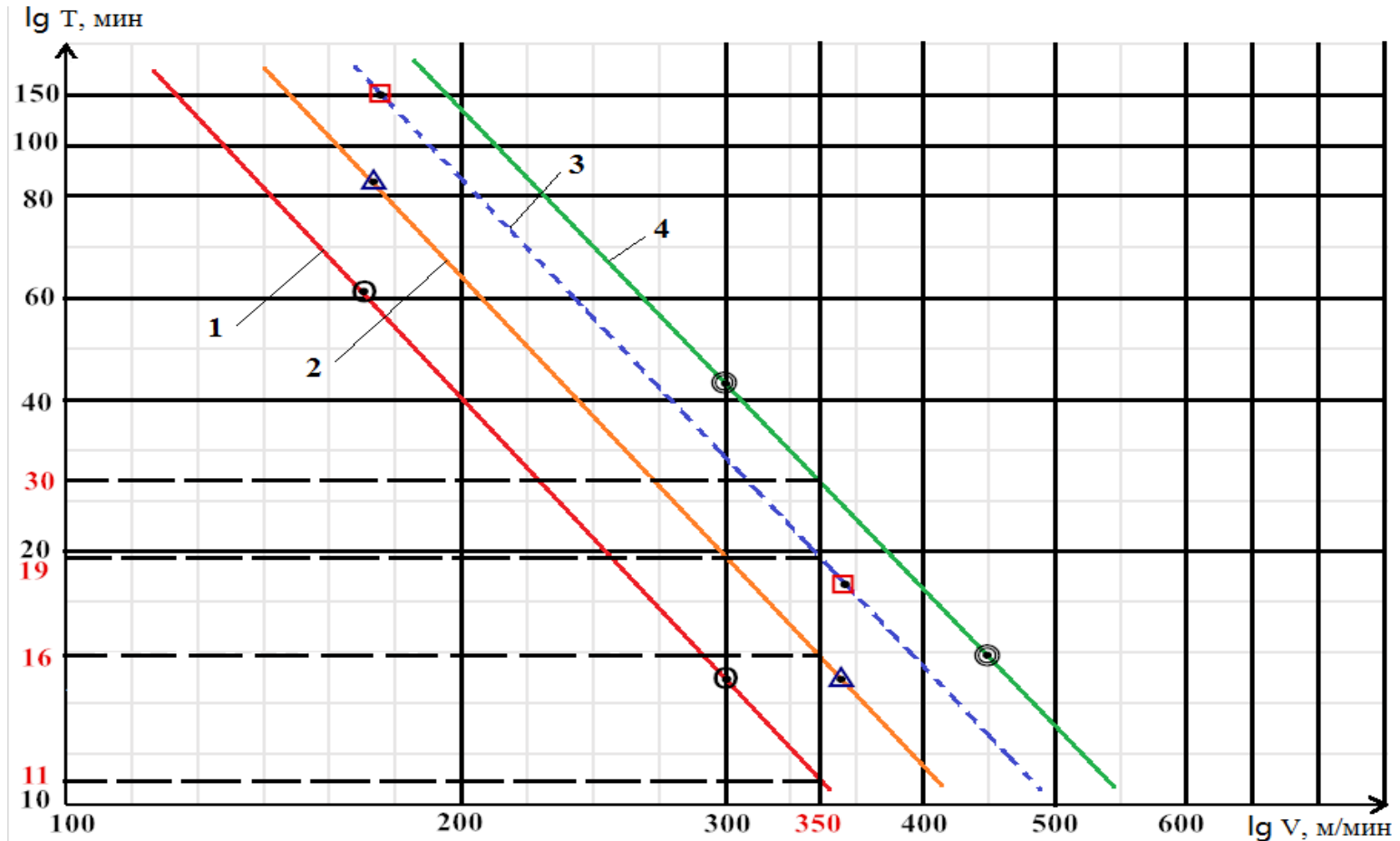
Результаты стойкостных экспериментов



Зависимость длины фаски износа по задней поверхности от времени резания при обработке стали 40Х резцом с СМП WNMG080404-ТМ с покрытием TiN, $s = 0,13$ мм/об; $t = 1$ мм (Чжан Цзяюй, Лю Шеньян).

1 – $v = 180$ м/мин; 2 – $v = 360$ м/мин

Рекомендации по выбору износостойкого покрытия



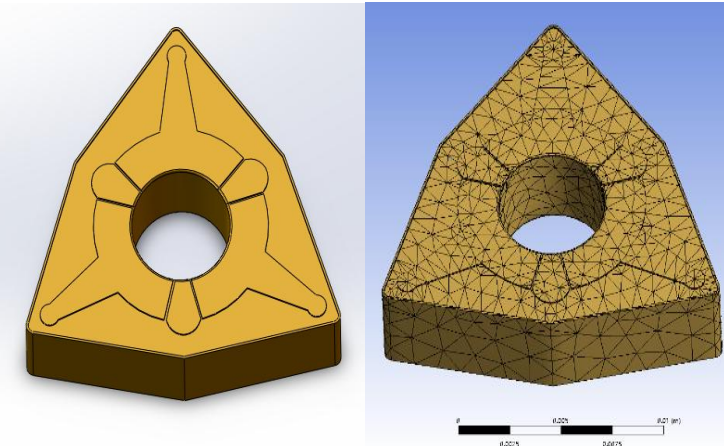
Зависимость стойкости (Т) СМП с износостойкими покрытиями (1, 2, 3, 4) от скорости резания (V) при обработке стали 40Х и $h_z=0,2$ мм: 1- без покрытия, 2- с покрытием TiN, 3- с покрытием AlTiN, 4- с покрытием TiCN (Чжан Цзяюй, Лю Шеньян)

Рекомендации по выбору износостойкого покрытия

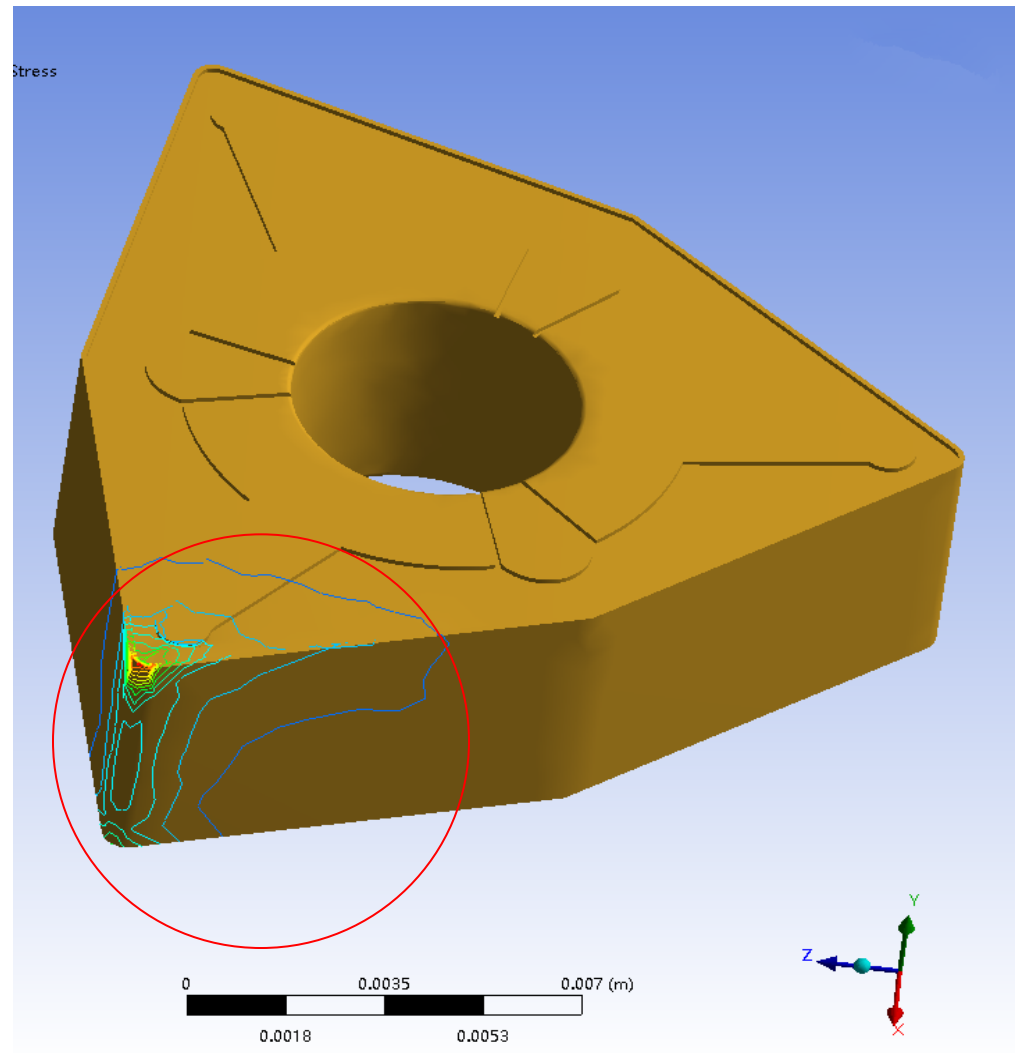
При $v = 350$ м/мин

Табл. 1 Сравнение эффективности применения покрытий

Тип пластин	Цена (С), руб/шт	Стойкость Т, мин	$L_{обр}$, м	$S_{обр}$, м ²	Цена обработки 1 м ($C_{уд}$), руб/м
1. СМП без покрытия	100	11	3850	0,50	0,026
2. СМП с покрытием TiN	120	16	5600	0,73	0,021
3. СМП с покрытием AlTiN	150	19	6650	0,86	0,023
4. СМП с покрытием TiCN	200	30	10500	1,37	0,019

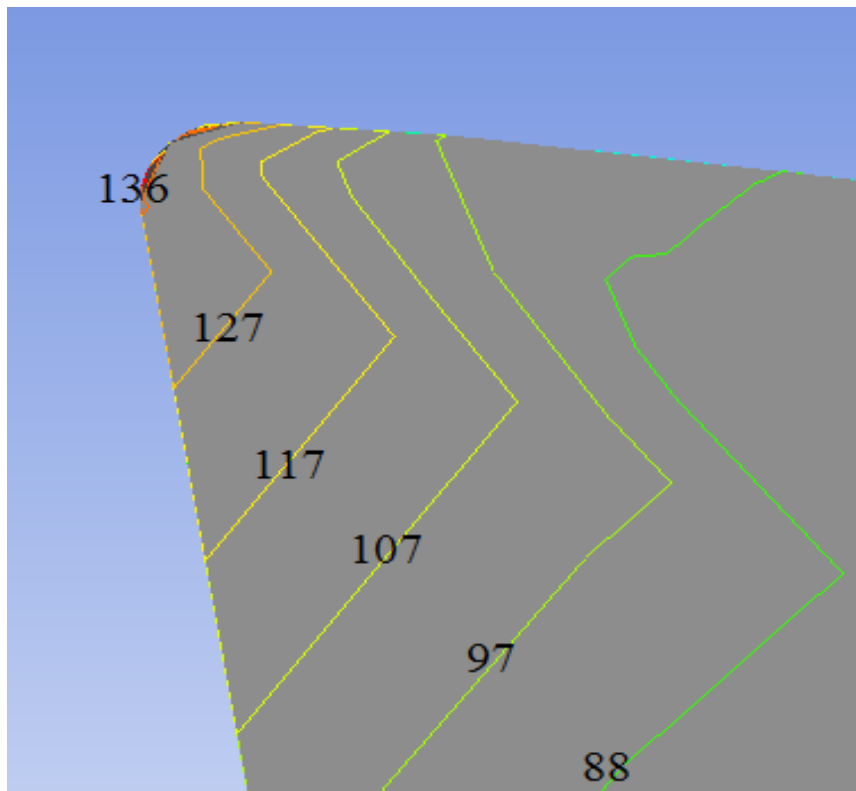


*Пример 3D модели
режущей пластины*

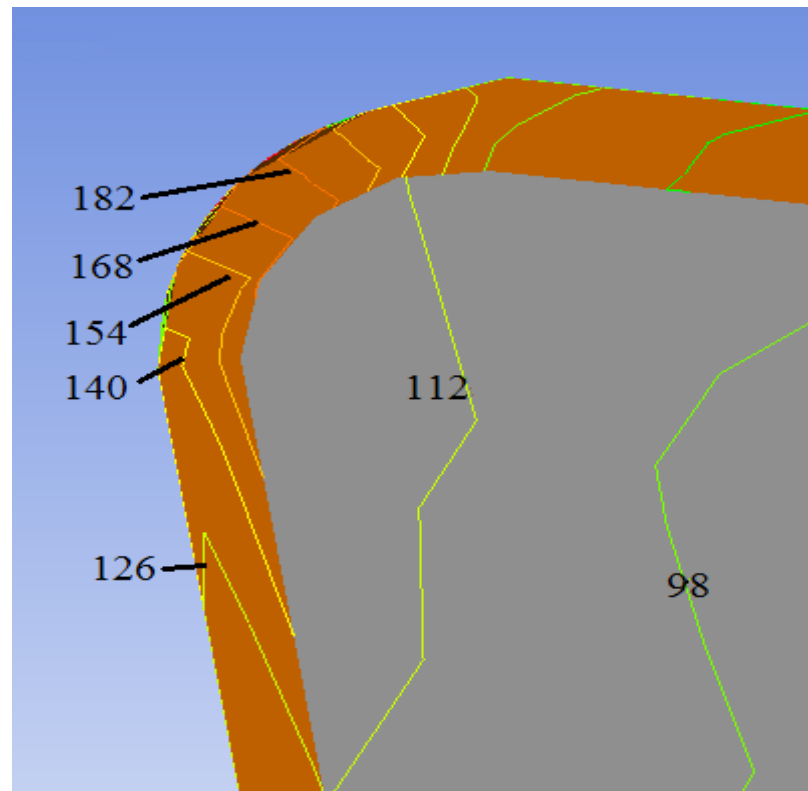


*Распределение эквивалентного напряжения в
СМП (Чжан Цзяюй, Лю Шеньян)*

Напряжённо-деформированное состояние (НДС) в режущем клине



а)

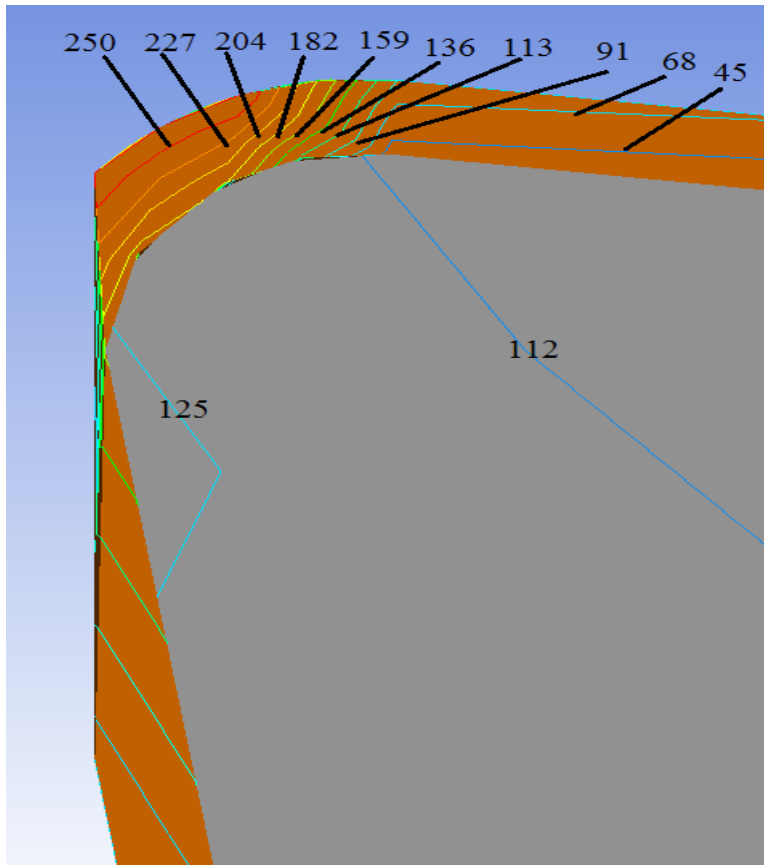


б)

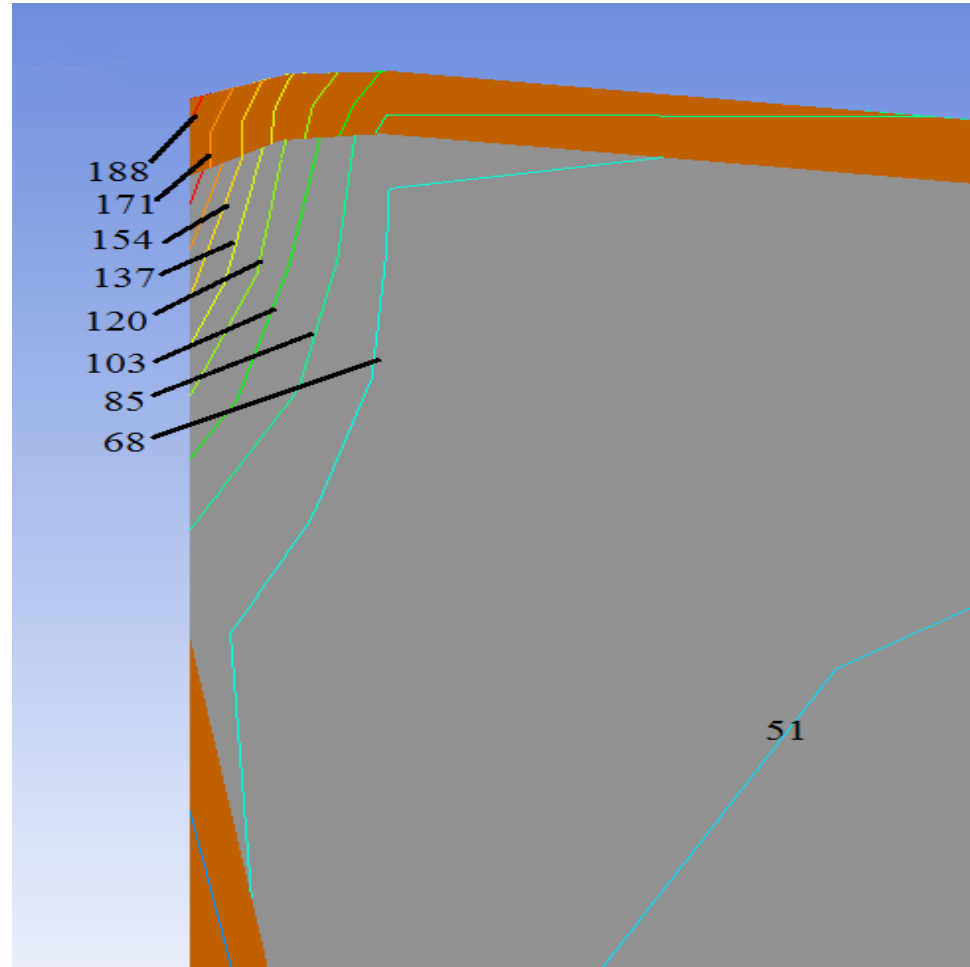
Распределение эквивалентного напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ [МПа] в режущем клине резца при точении стали 40Х. $v = 180$ м/мин; $s = 0,13$ мм/об; $t = 1$ мм, $h_z = 0$ мм

а – СМП из T15K6 без покрытия TiN $h_z = 0$ мм; б – СМП из T15K6 с покрытием TiN (Чжан Цзяюй, Лю Шеньян)

Напряжённо-деформированное состояние (НДС) в режущем клине



а)



б)

Распределение эквивалентного напряжений $\sigma_{экв}$ [МПа] в режущем клине резца при точении стали 40Х. $v = 180$ м/мин; $s = 0,13$ мм/об; $t = 1$ мм (Чжан Цзяюй, Лю Шеньян)

а – СМП из T15K6 с покрытием TiN $h_3 = 0,11$ мм;

б – СМП из T15K6 с покрытием TiN $h_3 = 0,2$ мм.

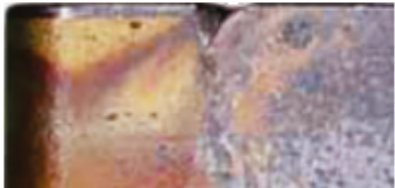
Сравнительная таблица твёрдых сплавов с покрытием CVD

ISO		K3TC	Korloy	Dormer Pramet	ZCC-CT	Iscar	Sandvik	MKTC	Mitsubishi	Seco	Walter	Kyocera	Sumitomo	Taegutec Ingersoll	Tungaloy	Ceratizit	Widia	Kennameta
P	P01	-	-	T9310	YBC151 YBC152	IC428 IC8150 IC9150	GC4005	CT15M	UE6105	TP0501	WPP01	CA5505	AC810P AC700G	-	T9105	-	-	KCP05
	P10	TC20PT TC20PT-P	NC3010	T9315	YBC251 YBC252	IC8150	GC4205		UE6110 MY5015	TP1501	WPP05	CA5515	AC2000 AC820P	TT8115	T9115	CTCP115	WP15CT	KCP10
	P20					IC8250	GC4315											
	P30	TC30PT	NC3120 NC3220	T9325	YBC351 YBC352	IC8350	GC4325	CT35M CU45	UE6035 UH6400	TP3500 TP40	WPP20	CA5535	AC830P AC630M	TT8135 TT7100 TT8020	T9135	CTCP135	WP35CT	KCP30 KCP40
	P40	TC40PT	NC500H NC5330			IC9250												
	M	M10	TC20PT-P	-	-	YBM151	6015	GC2015	4225 1025	MC7015 US7020	-	WAM10	CA6515	AC610M	TT9215	T9115	-	WM15CT
M20		NC9020 NC9025		6630 6640	YBM153 YBM251 YBM253	IC8250 IC9250	GC2025					CT25M CT35M			MC7025	TM2000		
M30			TC40PT-P		T7335	YBM351		IC8350 IC9350	GC2025	CT25M CT35M	MC7025		TM4000 TP40	WAM30			-	AC630M
M40		-		-		IC635	-	CU45				US735		TM4000 TP40	WAM30	-	TT7100	
K	K01	-	NC6205	T5305	YBD052	IC5005 IC9007	GC3205	K10M	MC5005 UC5105	TK1001	WAK10	CA4505 CA4010	AC405K AC410K	TT1300	T5105	CTC3110	WK05CT	KCK05
	K10	BC20HT	NC6210 NC315K	T5315	YBD102 YBD152	IC5010 IC428	GC3210	CK15M	MC5015 UC5115 MY5015	TK2001	WAK20	CA4515 CA4115	AC415K AC420K	TT7310	T5115 T9125	CTCK120	WK20CT	KCK15
	K20		NC5330	-	YBD252	IC9015 IC418	GC3215	K20M	-		WAK30	CA4120	AC820P	-	T5125		-	-
	K30	BC35HT			-	-	-	-		-		-	-	-	-	-		

Формулы	Термины и обозначения	Единицы измерения
Скорость резания $V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$	a_p – глубина резания a_e – ширина обработки V – скорость резания n – обороты шпинделя d – диаметр фрезы z – количество зубьев f_z – подача на зуб f_n – подача на оборот V_f – скорость подачи Q – скорость съема припуска k_c – удельная сила резания φ – главный угол в плане k_{cl} – удельная сила резания (для $h_{ex}=1$ мм)	
Обороты шпинделя $n = \frac{V \cdot 1000}{\pi \cdot d}$		мм
Подача на оборот $f_n = f_z \cdot z$		мм
Скорость подачи $V_f = f_z \cdot z \cdot n = f_n \cdot n$		м/мин
Скорость съема припуска $Q = \frac{a_p \cdot b \cdot f}{1000}$		мин ⁻¹
Средняя толщина стружки $h_m = \frac{\sin \varphi \cdot 180 \cdot a_p \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arcsin(\frac{a_p}{D})}$		мм
Удельная сила резания $k_c = k_{cl} \cdot h_m^{-mc}$		шт
Мощность привода $P = \frac{a_p \cdot a_s \cdot V_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta}$		мм/зуб
		мм/об
		мм/мин
		см ³ /мин
		Н/мм ²
		град.
		Н/мм ²

$$h_m = \frac{\sin \varphi \cdot 180 \cdot a_p \cdot f_z}{\pi \cdot D \cdot \arcsin(\frac{a_p}{D})}$$

Износ по задней поверхности 	Причины 1. Большая скорость резания; 2. Сплав с низкой износостойкостью; 3. Малая подача; 4. Несоответствие геометрии пластины.	Решение 1. Снизить скорость резания; 2. Использовать более износостойкий сплав; 3. Увеличить подачу на зуб; 4. Использовать пластины с другой геометрией.
Лункообразование 	Причины 1. Недостаточный передний угол; 2. Большая подача; 3. Сплав с низкой износостойкостью.	Решение 1. Выбрать другую геометрию; 2. Уменьшить подачу; 3. Использовать более износостойкий сплав.
Выкрашивание режущей кромки 	Причины 1. Недостаточная прочность; 2. Несоответствие геометрии; 3. Большая подача.	Решение 1. Использовать более прочный сплав; 2. Использовать пластины с упрочненной геометрией; 3. Уменьшить подачу на зуб.
Термические трещины 	Причины 1. Неправильное охлаждение; 2. Неправильный выбор сплава; 3. Высокая скорость резания.	Решение 1. Прекратить подвод СОЖ, или применить фрезы с внутренним подводом; 2. Использовать сплав устойчивый к термоударам; 3. Снизить скорость резания.

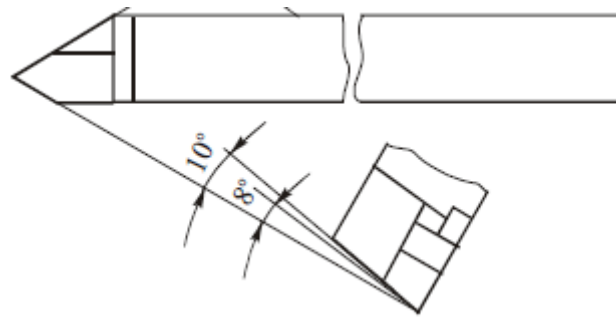
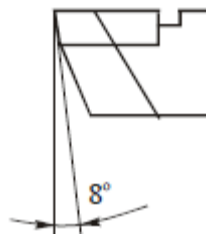
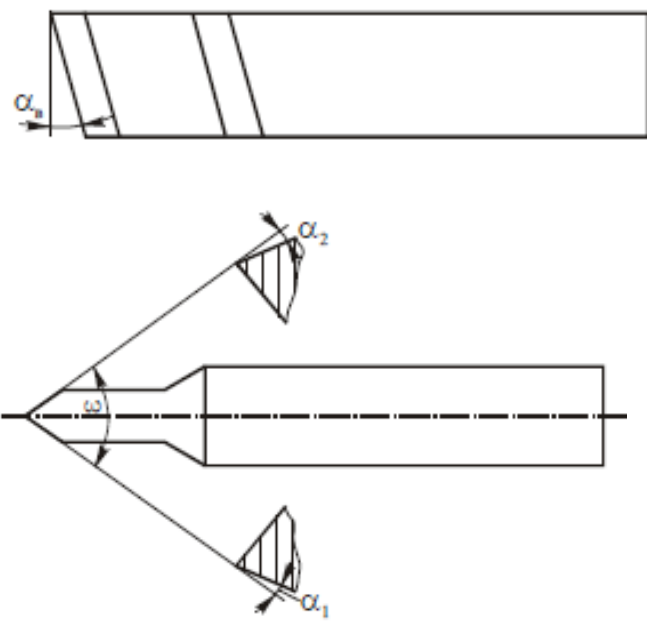
Зазубривание 	Причины 1. Обработка по корке.	Решение 1. Использовать пластины с упрочненной геометрией; 2. Использовать фрезу с другим углом в плане.
Скол 	Причины 1. Сплав недостаточной прочности; 2. Большая нагрузка; 3. Недостаточный радиус при вершине; 4. Критический износ.	Решение 1. Использовать более прочный сплав; 2. Уменьшить подачу на зуб; 3. Выбрать пластины с большим радиусом; 3. Уменьшить срок эксплуатации инструмента.
Деформация 	Причины 1. Высокая температура в зоне резания.	Решение 1. Снизить скорость резания; 2. Увеличить подачу; 3. Обеспечить подачу СОЖ; 4. Использовать покрытие с меньшим коэффициентом трения; 5. Использовать более износостойкий сплав; 6. Выбрать пластины с большим передним углом.
Наростообразование 	Причины 1. Малая скорость резания; 2. Малый передний угол; 3. Недостаточная шероховатость на передней поверхности; 4. Недостаточная подача СОЖ.	Решение 1. Увеличить скорость резания; 2. Выбрать пластины с большим передним углом; 3. Выбрать пластины с полированной передней поверхностью; 4. Увеличить подачу СОЖ.

Инструменты для **образования резьбы**

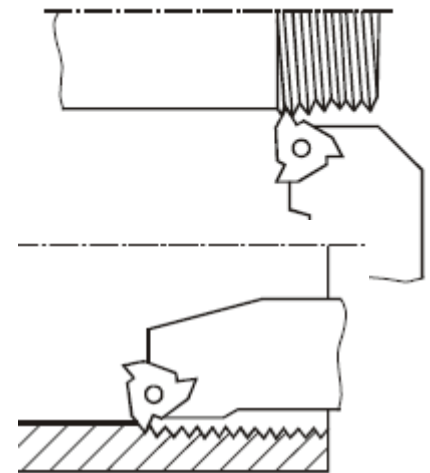
Инструменты для **образования резьбы** можно разделить на три группы: 1) лезвийные инструменты, формирующие резьбу путем снятия припуска режущими кромками; 2) бесстружечные инструменты, формирующие резьбу методом холодного пластического деформирования; 3) абразивные инструменты, работающие методом вышлифовывания профиля резьбы. Наиболее часто используются резцы, гребенки, фрезы, метчики, плашки, резьбонарезные головки.

Резьбовые резцы работают по методу копирования, поэтому профиль их режущих кромок должен соответствовать профилю впадины нарезаемой резьбы. С целью повышения производительности иногда используется также генераторная схема резания. Являясь **фасонным инструментом**, **резьбовые резцы** могут быть трех типов: стержневые, призматические и круглые

a – из быстрорежущей стали; ***б*** – с напайной твердосплавной пластиной;



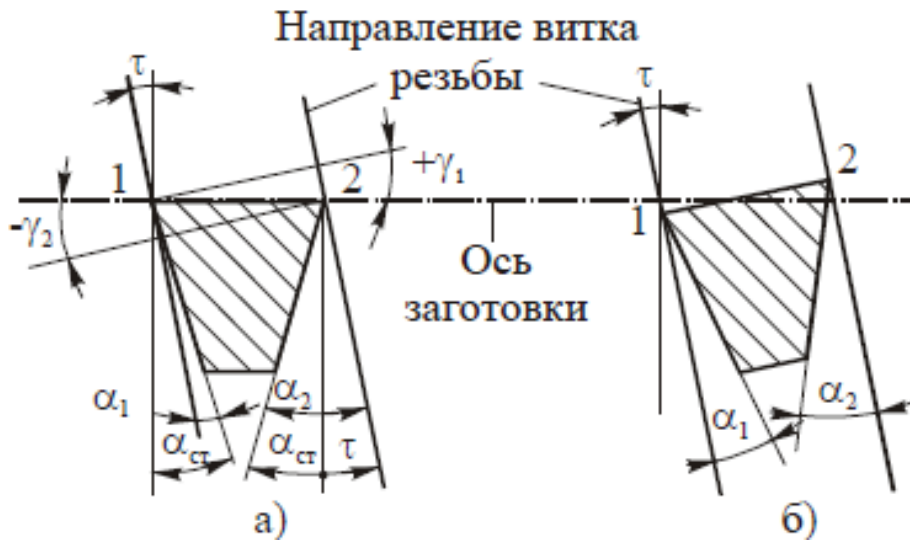
в – с механическим креплением



Передний угол для простоты переточки берется $\gamma = 0^\circ$. Задние углы на боковых режущих кромках в статике $\alpha_1 = \alpha_2$. При черновом резбонарезании задние углы равны $4...6^\circ$, а при чистовом – $8...10^\circ$. На вершине резца угол $\alpha_v = 15...20^\circ$. При нарезании резьб **малого диаметра с большой глубиной профиля** или многозаходных резьб с большим углом подъема резьбы ($\tau > 3...4^\circ$) необходимо учитывать влияние этого угла на величину фактических задних и передних углов, отличающихся от замеренных в статическом состоянии вне станка.

$$\gamma_1 = +\tau; \gamma_2 = -\tau; \alpha_1 = \alpha_{ст} - \tau; \alpha_2 = \alpha_{ст} + \tau; \tau = P/\pi d,$$

$\alpha_{ст}$ – задние углы на боковых режущих кромках в статике;



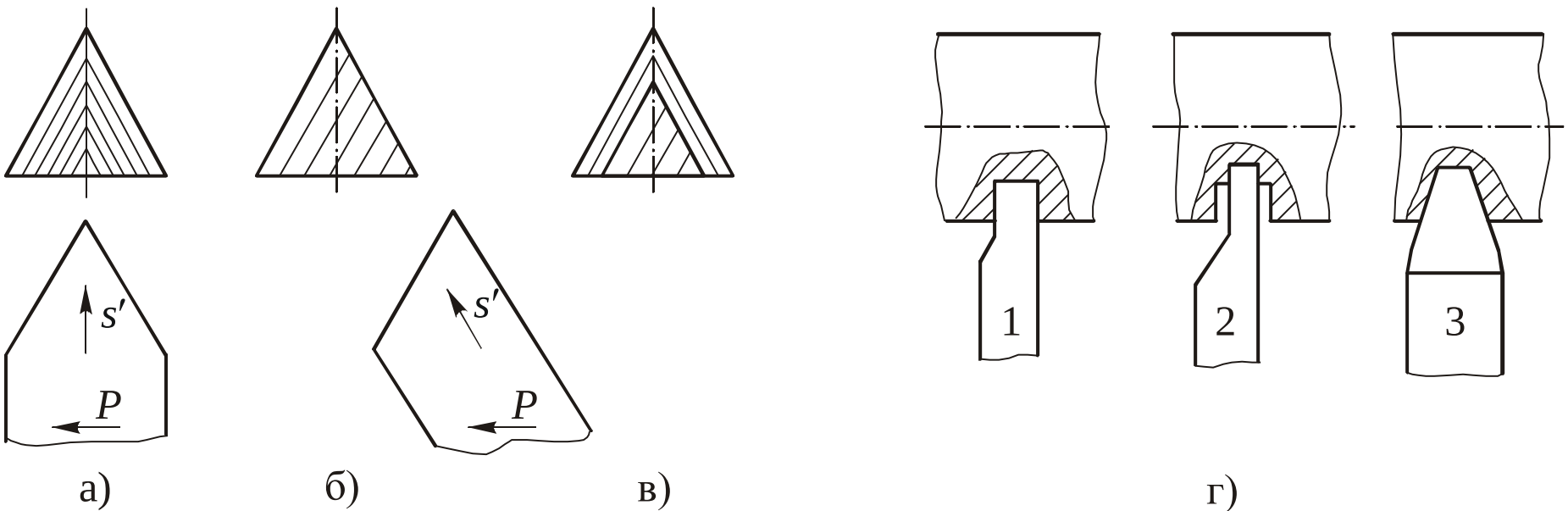
Схемы установки стержневых резцов при нарезании резьб с большим углом τ подъема витков: **а** – передняя грань расположена в осевой плоскости заготовки;

б – передняя грань расположена перпендикулярно к виткам резьбы

На правой режущей кромке из-за отрицательного переднего угла условия резания ухудшаются и ослабляется режущий клин. На левой кромке уменьшается задний угол, что приводит к снижению стойкости инструмента. Угол τ изменяется по длине боковых режущих кромок, т.е. он больше во впадине резьбы и меньше на наружном диаметре. Но это изменение угла τ заметно только на резьбах с большой глубиной профиля, например **трапецеидальных**, и несущественно для остроугольных крепежных резьб. В последнем случае в вышеуказанную формулу подставляют значение d_2 среднего диаметра резьбы.

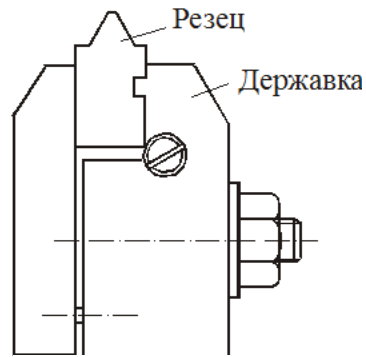
При многопроходном нарезании остроугольной резьбы резцами образование профиля резьбы может осуществляться по трем схемам: **а) профильной** – с радиальной подачей резца; **б) генераторной** – с подачей резца под углом к оси заготовки; **в) комбинированной**, состоящей из подачи под углом при черновой обработке и радиальной подачи – при чистовой (окончательной) обработке.

Достоинством **генераторной** схемы является **увеличение толщины срезаемого слоя** за один проход в 2 раза, что обеспечивает соответствующее сокращение проходов. Правая кромка в этом случае работает как вспомогательная кромка, оставляя ступеньки на обработанной поверхности. Этот недостаток позволяет исправить применение **комбинированной** схемы.

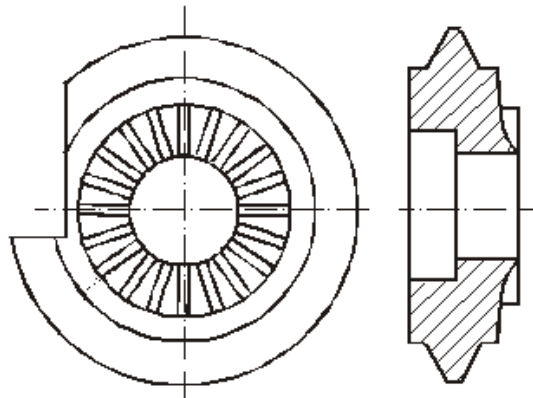


Схемы резания, применяемые при нарезании резьбы: **а** – **профильная**; **б** – генераторная; **в** – комбинированная; **г** – для нарезания трапецеидальной резьбы

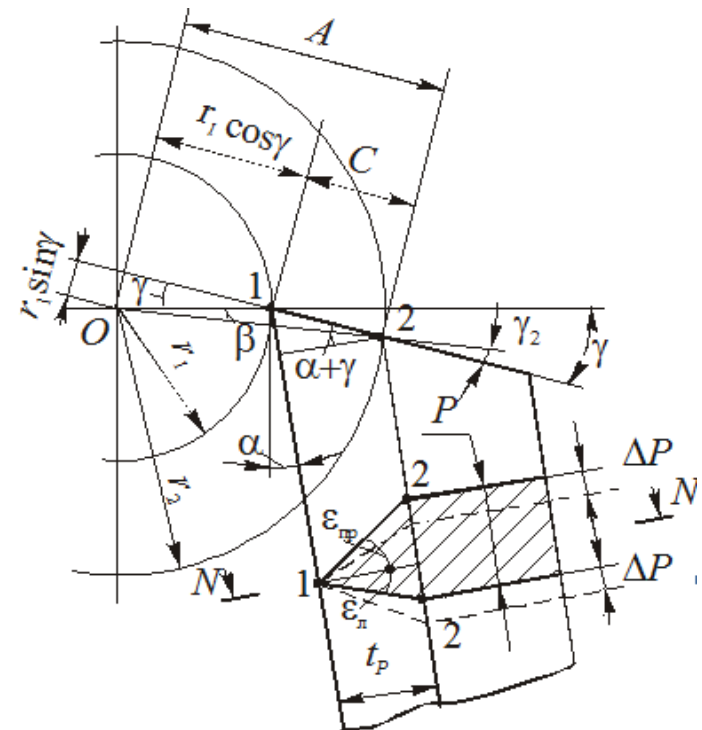
Стержневые резцы обычно имеют небольшой запас на переточку и их установка относительно заготовки связана с определенными трудностями, которые не возникают при использовании фасонных призматических и **круглых резьбонарезных** резцов. **Круглые резцы** (рис. в) более технологичны в изготовлении, чем призматические, но имеют **меньший запас на переточку** и **менее жесткое крепление**. Для создания задних углов центр резца устанавливается **выше центра заготовки**. Расчет профиля таких резцов подобен расчету круглых фасонных резцов с учетом коррекции, показанной на примере расчета призматического резца с $\gamma > 0$.



а)



в)



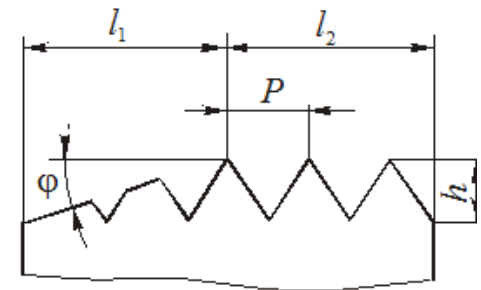
б)

Фасонные резьбовые резцы: **а** – **призматический**; **б** – расчетная схема коррекции профиля призматического резца с $\gamma > 0$; **в** – **круглый**

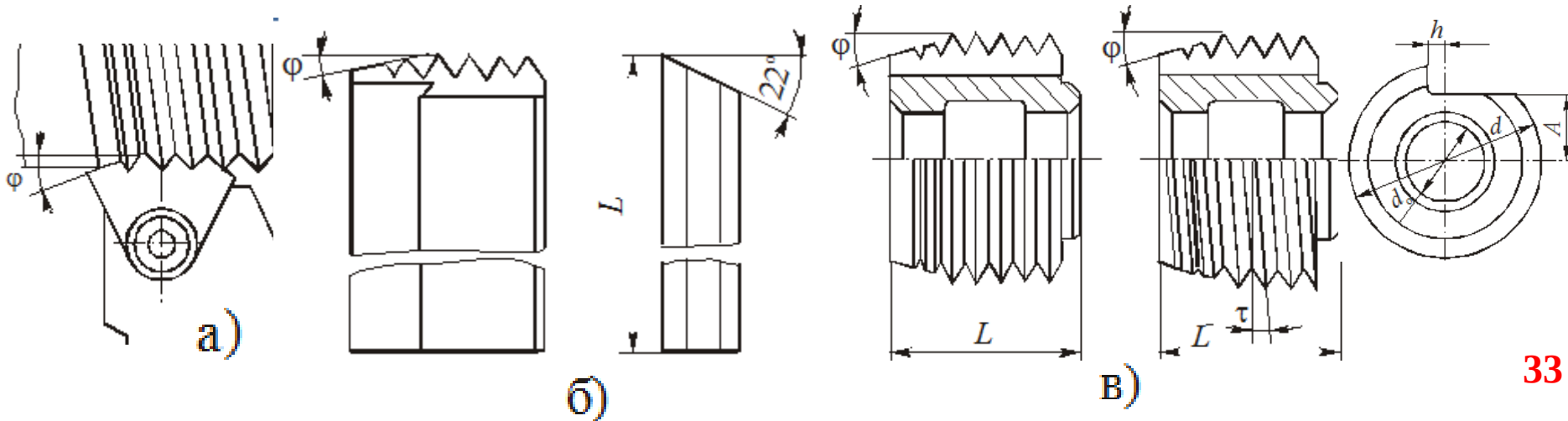
Гребенки – это многозубчатые фасонные резцы, которые могут быть стержневыми; призматическими; круглыми. Их используют главным образом для нарезания крепежных резьб с **мелким шагом**, т.е. резьб с небольшой высотой профиля. Режущая часть гребенок состоит из заборной части длиной ℓ_1 , заточенной под углом φ к оси и калибрующей части длиной ℓ_2 . Угол заборной части $\varphi = 25 \dots 30^\circ$, благодаря чему нагрузка распределяется между несколькими режущими кромками зубьев. Поэтому число рабочих ходов при нарезании резьбы уменьшается в $2 \dots 3$ раза сравнению с резьбовыми резцами. При нарезании резьбы за один проход длину заборной части увеличивают до $\ell_1 = (3 \dots 4)P$

$$\ell_1 = (1,5 \dots 2,0)P, \ell_2 = (3 \dots 6)P$$

P – шаг резьбы



рабочая часть гребенки

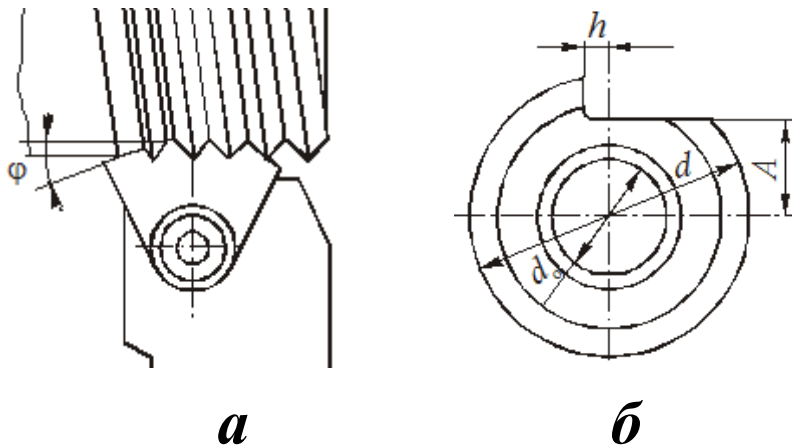


Резьбонарезные гребенки: а – стержневая с механическим креплением твердосплавной пластины; б – призматическая; в – круглая

В начале рабочего хода гребенка имеет **радиальную подачу на врезание** и затем перемещается вдоль оси вращающейся заготовки с подачей на **один оборот**, равной шагу.

Стержневые гребенки можно изготавливать цельными или с механически закрепляемыми специальными твердосплавными пластинами. У **призматических гребенок** задний угол создается за счет наклона гребенки в державке, аналогично призматическим резцам.

Круглые гребенки могут быть двух типов: 1) **с кольцевыми** витками; 2) с **винтовыми** витками. Используются как для нарезания **наружной**, так и **внутренней резьбы**. При этом если канавки кольцевые, то ось гребенки должна быть наклонена к оси заготовки под **углом подъема резьбы τ** . У гребенок с винтовыми канавками **направление резьбы должно быть обратное направлению витков** нарезаемой наружной резьбы. При нарезании **внутренней резьбы** направления витков гребенки и резьбы совпадают. Для уменьшения искажения профиля нарезаемой резьбы передний угол равен $\gamma = 0^\circ$, а задний угол создается за счет превышения центра гребенки над центром заготовки.

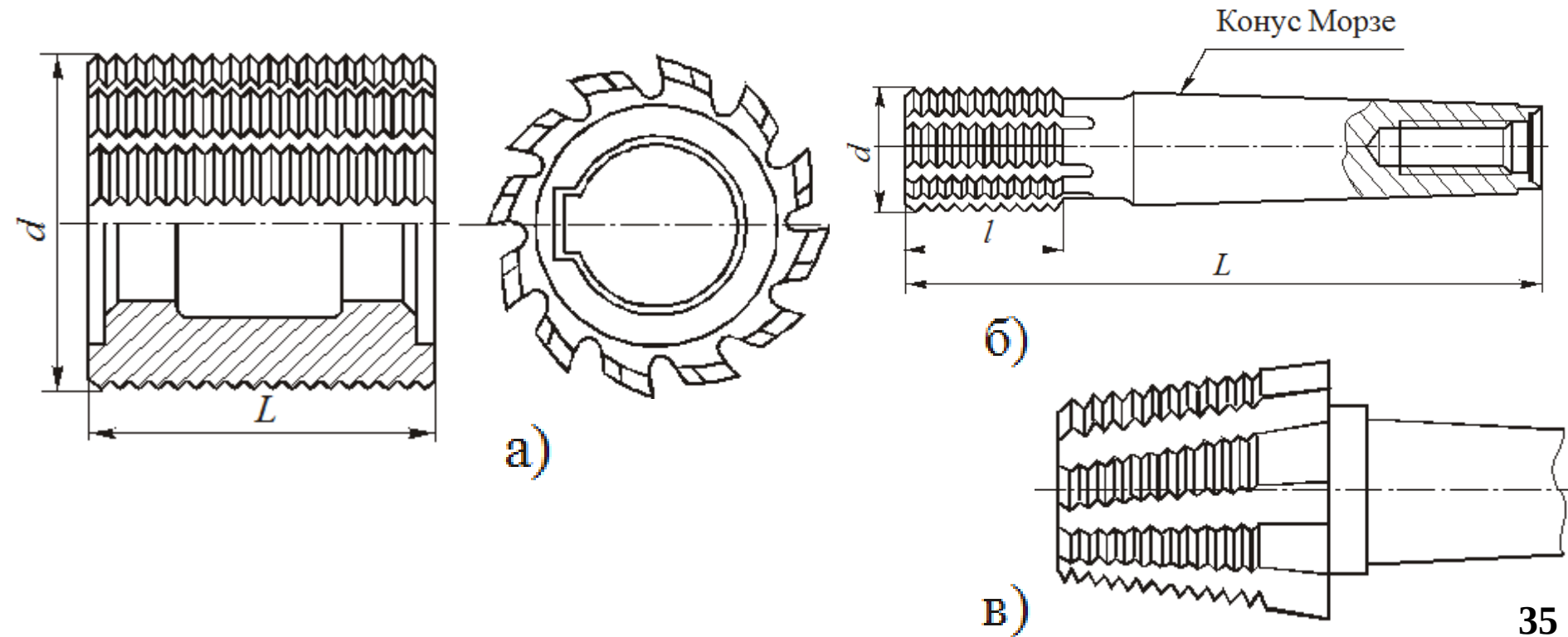


Резьбонарезные гребенки:

a – стержневая с механическим креплением твердосплавной пластины; *б* – круглая

Виды **резьбонарезных фрез**: гребенчатые, дисковые и головки для вихревого нарезания резьбы. Применение фрезерования вместо точения при нарезании наружной и внутренней резьб обеспечивает значительное **повышение производительности** за счет:

1) использования многозубого инструмента с большой суммарной активной длиной режущих кромок, одновременно снимающих стружку (гребенчатые фрезы); 2) увеличения толщины среза на один зуб (дисковые фрезы); 3) увеличения скорости резания за счет оснащения резцов твердым сплавом (головки для вихревого нарезания резьбы).



Гребенчатые резьбонарезные фрезы: *а* – цилиндрическая насадная; *б* – цилиндрическая концевая; *в* – для нарезания конических резьб

Гребенчатые фрезы применяются для нарезания остроугольных наружных и внутренних резьб с мелким шагом на цилиндрических и конических поверхностях заготовок. По сути, они представляют собой набор дисковых фрез, выполненных заодно целое на одном корпусе с профилем зубьев, соответствующим профилю резьбы. Поэтому канавки между фрезами кольцевые. Для образования зубьев вдоль оси фрезы прорезаны либо прямые, либо винтовые стружечные канавки. Для образования задних углов зубья затылуют по архимедовой спирали.

При резьбофрезеровании наружной резьбы цилиндрической гребенчатой фрезой ось фрезы устанавливается параллельно оси заготовки. Фреза вращается вокруг своей оси со скоростью v_{ϕ} , определяемой стойкостью инструмента, и в начальный момент врезается с радиальной подачей $s_r = s \cdot z \cdot n_{\phi}$. После чего она перемещается на величину одного шага резьбы P вдоль оси заготовки с подачей $1 \dots 1,25$ оборота. Перебег, равный $\frac{1}{4}$ оборота, совершается для компенсации пути врезания инструмента на заданную глубину профиля резьбы. Для фрез из быстрорежущей стали $v_{\phi} = 25 \dots 30$ м/мин, для твердосплавных фрез $v_{\phi} = 60 \dots 120$ м/мин. Подача на зуб выбирается в зависимости от твердости обрабатываемого материала и находится в пределах $s_z = 0,03 \dots 0,15$ мм/зуб.

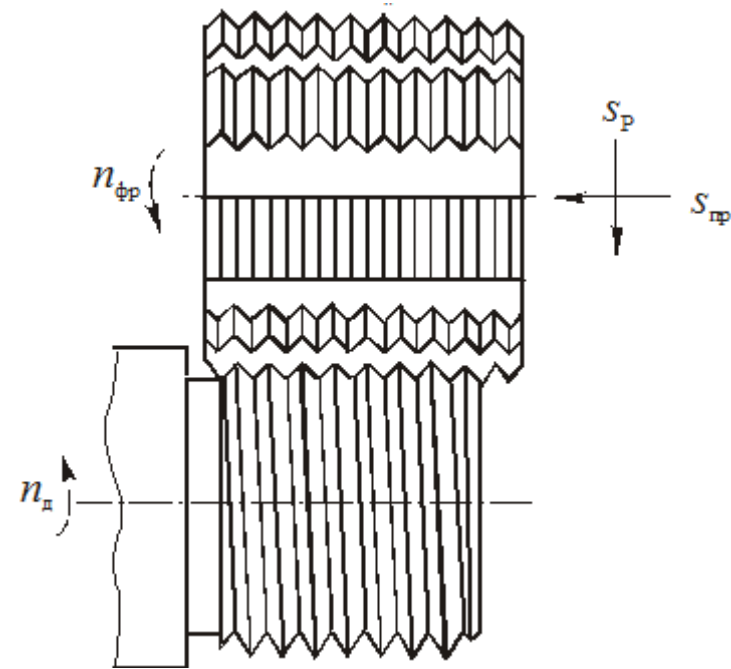


Схема нарезания резьбы гребенчатой фрезой

Недостатком гребенчатых фрез является искажение угла профиля нарезаемой резьбы из-за несовпадения траектории точек режущих кромок фрезы с кривой резьбы, получаемой в сечении, перпендикулярном к оси заготовки. У фрезы это окружность, а у нарезаемой резьбы – архимедова спираль. Однако величина этого искажения мала и достигает $3...4'$ – для наружной и $7...9'$ – для внутренней резьб. Обычно она укладывается в пределы допуска на угол профиля крепежной резьбы с мелким шагом.

К основным конструктивным параметрам гребенчатых фрез относятся: диаметры фрезы d и посадочного отверстия d_o , длина фрезы L , число зубьев (стружечных канавок), направление канавок, размеры профиля резьбы (угол профиля α , высота резьбы h , шаг P), высота зуба H , величина падения затылка k_z , толщина стенки корпуса E :

$$d = d_o + 2E + 2H$$

$$E = (0,3...0,4)d_o$$

$$H = h + k_z + r + e$$

Диаметры гребенчатых фрез для нарезания наружных резьб берут в пределах $d=40...90$ мм через 10 мм в зависимости от шага резьбы, а для внутренних резьб в зависимости от диаметра отверстия в заготовке в диапазоне $d=10...40$ мм через 5 мм. Длина фрезы должна быть больше длины нарезаемой резьбы на $2...3$ шага, поэтому $L=15...100$ мм. При этом с увеличением длины L возрастает величина искажения резьбы, полученная в результате термообработки

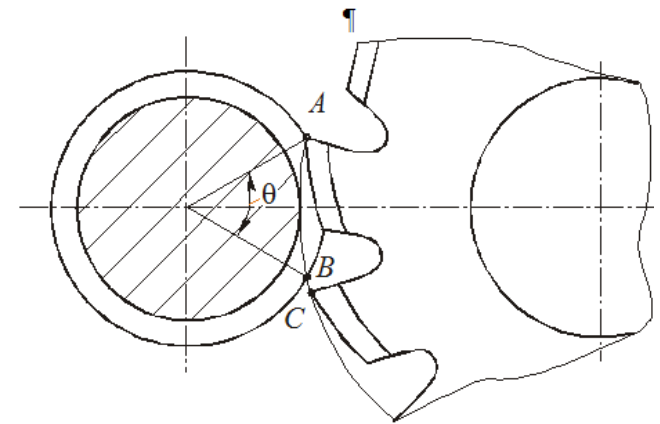
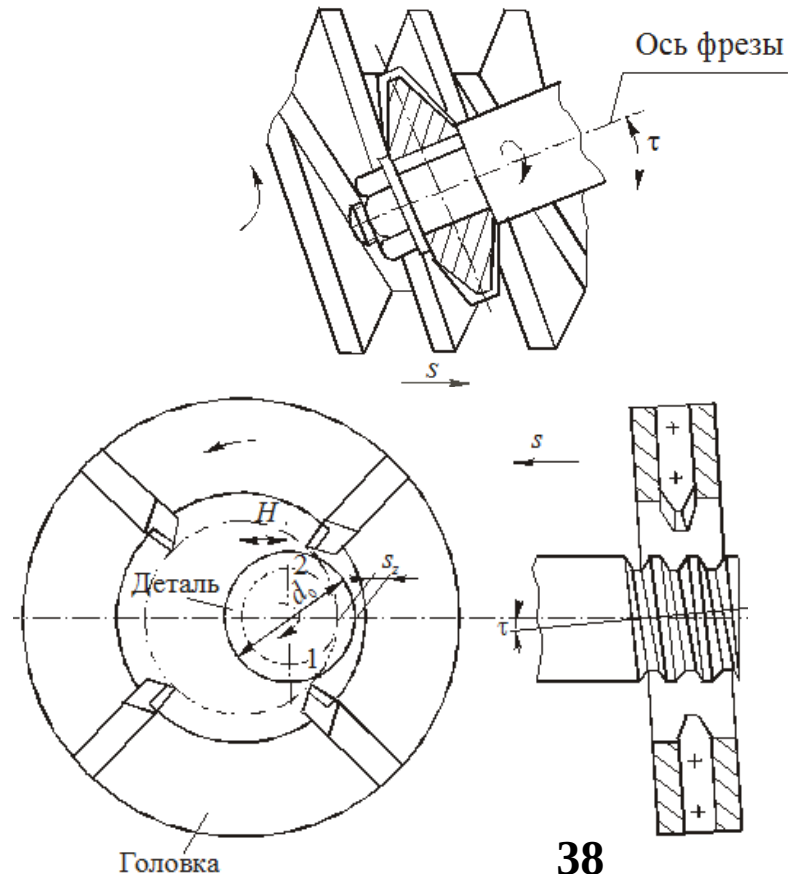


Схема контакта гребенчатой фрезы и заготовки

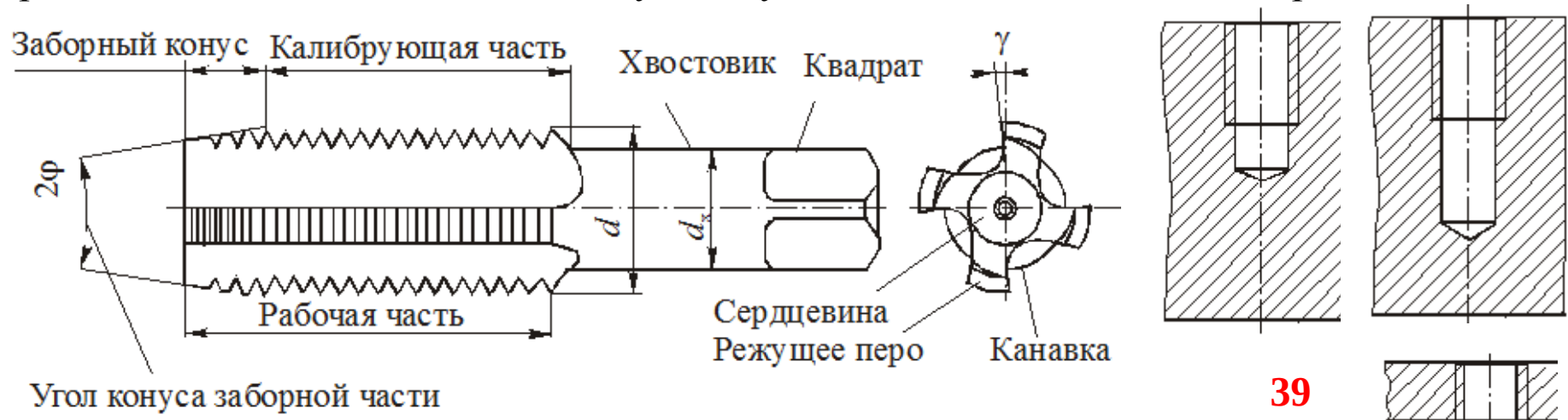
Дисковые фрезы используются при нарезании резьб больших глубин, диаметров и длины. (при нарезании резьб червяков, ходовых винтов). Они работают с большими подачами и нарезают резьбу **за один проход**, поэтому их производительность по сравнению с резцами значительно выше. При нарезании резьбы ось оправки дисковой фрезы устанавливается под углом к оси заготовки, равным углу подъема резьбы на ее среднем диаметре. Фреза совершает вращательное движение $n_{\text{фрезы}}$, а заготовка – вращательное $n_{\text{заг}}$ и поступательное движения вдоль своей оси с подачей на один оборот s (мм/об), равной шагу резьбы. Диаметр $d_{\text{фр}} = 60 \dots 180$ мм, число остроконечных зубьев $z = 34 \dots 40$.

Головки для охватывающего («вихревого») фрезерования резьбы применяются в тяжелом машиностроении для скоростного нарезания крупных резьб на ходовых винтах длиной до 10000 мм и диаметром до 1000 мм. Она имеет достаточно **сложную конструкцию** и устанавливается на суппорте токарного станка с наклоном к оси заготовки под углом подъема резьбы. Головка с установленными в ней твердосплавными резцами **охватывает заготовку** и приводится во вращение от индивидуального привода со скоростью 100...450 м/мин.

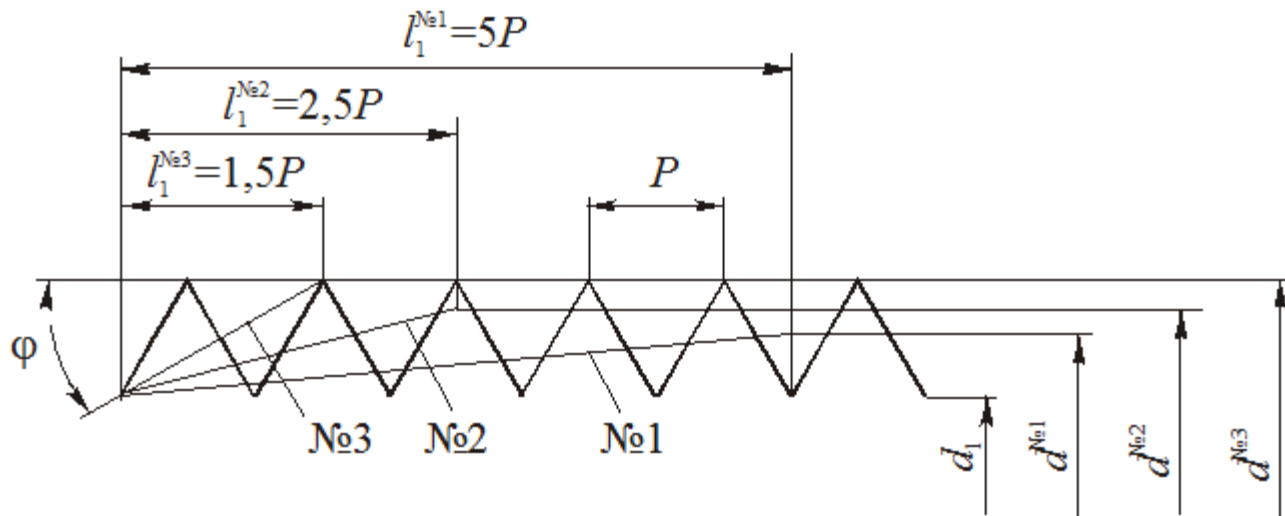


Метчик используется в машиностроении для нарезания **резьбы в отверстиях** заготовок. Это винт, превращенный в инструмент путем прорезания стружечных канавок и создания на режущих зубьях передних, задних и других углов. Для крепления на станке или в воротке он снабжен хвостовиком. Режущая часть метчика изготавливается чаще всего из **быстрорежущей стали**, реже из твердого сплава. Условия резания при снятии стружки метчиком **очень тяжелые** из-за несвободного резания, **больших сил резания и трения**, а также **затруднения удаления стружки**. Они имеют пониженную прочность из-за ослабленного поперечного сечения. **Особенно отрицательно** это сказывается при нарезании резьбы в **вязких материалах** метчиками **малых диаметров**, которые часто выходят из строя из-за поломок, вызванных **пакетированием стружки**.

Достоинствами метчиков являются: простота и технологичность конструкции, **простота использования** за счёт нарезания резьбы самоподачей, **высокая точность резьбы**, определяемая точностью изготовления метчиков. Для стандартных машинных метчиков рекомендуется $\varphi = 6^\circ 30'$, а для гаечных метчиков $\varphi = 3^\circ 30'$. Такое небольшое значение φ берется также с целью обеспечения лучших условий захода метчика в отверстие.



При нарезании резьбы в **глухих отверстиях за один проход**, как указывалось выше, длина $l_1=2 \cdot P$. В случае применения **комплекта из двух метчиков** принимают для чернового метчика $l_1=6 \cdot P$ и для чистового метчика $l_1=2 \cdot P$. С целью облегчения работы машинных метчиков там, где это допустимо с точки зрения конструкции детали, сверлят **отверстие под резьбу на большую глубину** по сравнению с требуемой. Такое отверстие можно **нарезать метчиком, предназначенным для сквозных отверстий**. При нарезании резьбы **вручную**, как правило, трудно удалить весь припуск за один проход. Поэтому приходится его распределять между **несколькими метчиками комплекта**, который может состоять из **двух или трех номеров**. Соответственно l_1 , ϕ , наружный d и средний d_2 диаметры резьбы будут у них переменными.

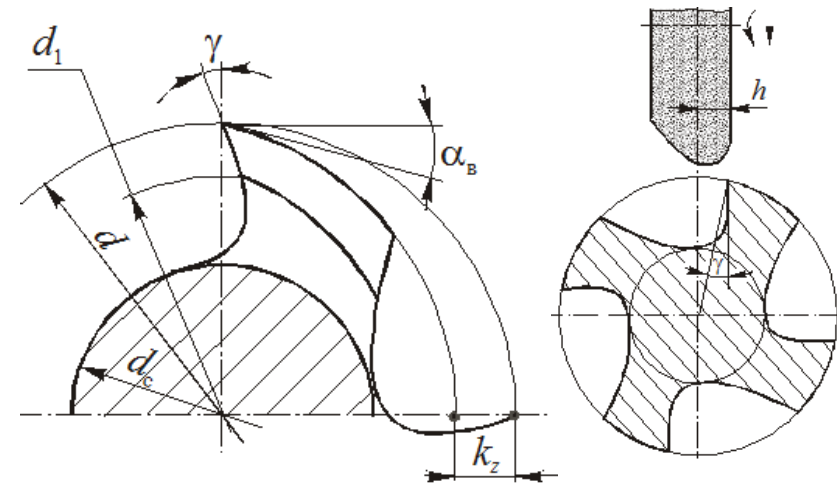


Распределение припуска между метчиками комплекта из трех номеров

Учитывая тяжелые условия работы метчика, **передний угол γ , как правило, берут положительным**. Для обработки сталей средней твердости рекомендуется брать угол $\gamma=12\dots15^\circ$, для хрупких материалов (чугун, бронза, латунь), а также для твердой стали $\gamma=0\dots5^\circ$, для цветных металлов и сплавов $\gamma=16\dots25^\circ$.

Задний угол α_v на главных вершинных кромках – это угол между вектором скорости резания, через который проходит плоскость резания, и касательной к задней поверхности. Он создается путем **затылования** вершинных режущих кромок зубьев по архимедовой спирали. Рекомендуется брать $\alpha_v=6\dots12^\circ$ (меньшее значение берется для ручных метчиков). **На боковых режущих кромках** при генераторной схеме резания **задние углы отсутствуют**, так как толщины срезаемых слоев небольшие. Переточка режущих зубьев может производиться как **по передней**, так и по **задней** поверхности. В случае **затылования** поворот метчика производится в пределах ширины пера с использованием приспособления.

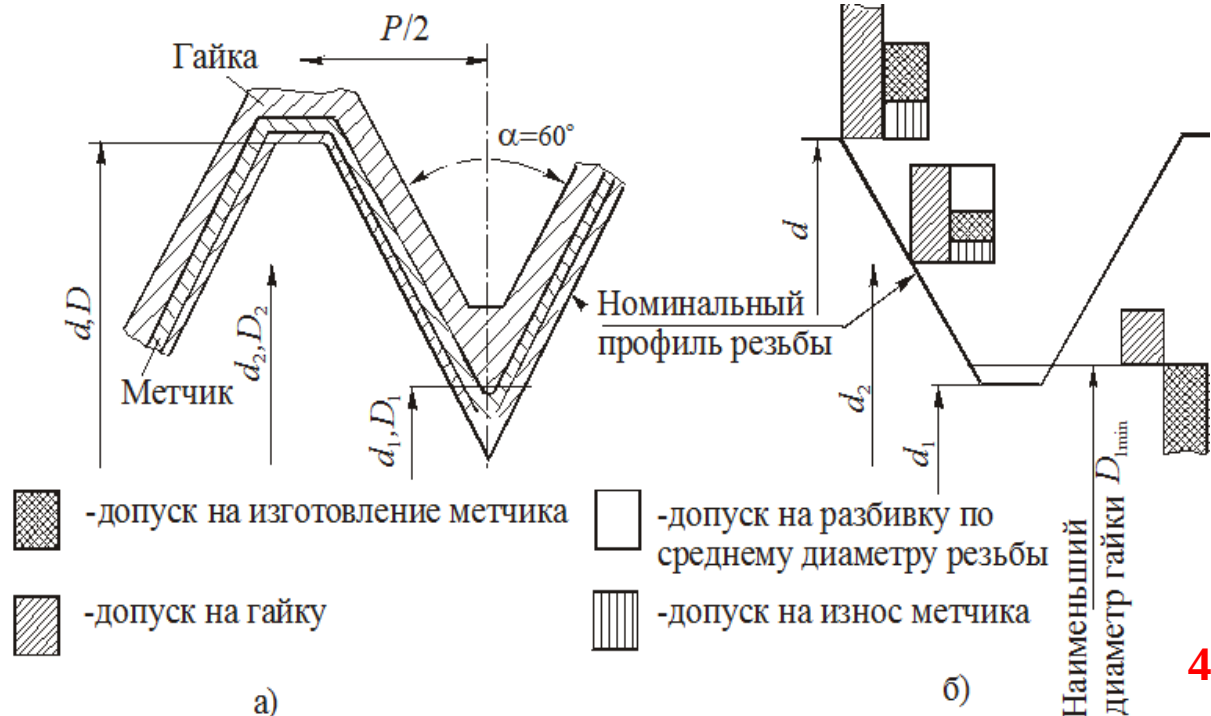
Калибрующая часть метчика, имеющая полный профиль резьбы, предназначена для окончательного формирования нарезаемой резьбы. Она также обеспечивает **направление метчика в отверстии**, его самоподачу по резьбе, нарезанной заборной частью, а также служит запасом на переточку метчика. Наибольший износ ее зубьев приходится на первый виток после заборной части.



Считается достаточным, если для средних и крупных и для мелких диаметров $l_2 = 0,5 \cdot d$. При нарезании резьб с мелким шагом длина l_2 может быть увеличена до $(20 \dots 40)P$.

Для уменьшения трения и во избежание защемления метчика в отверстии калибрующая часть снабжается обратным конусом по наружному диаметру с уменьшением его на $0,04 \dots 0,08$ мм на 100 мм длины. **Выбор диаметра отверстия** под резьбу зависит от вида материала, его способности к вспучиванию резьбы после прохода метчика. При обработке материалов повышенной вязкости, а также с большим упругим восстановлением (цветные металлы, титановые сплавы) наблюдается уменьшение внутреннего диаметра нарезанной резьбы, вызывающее увеличение момента трения и иногда поломку метчика.

Во избежание этого диаметр отверстия под метчик $d_{\text{св}}$ выбирают больше внутреннего и меньше наружного диаметра резьбы метчика, т.е. диаметр сверла $d_1 < d_{\text{св}} < d$. Ориентировочно при нарезании метрических резьб в стальных заготовках диаметр сверла можно определить по формуле $d_{\text{св}} = d - P$.



Схемы расположения полей допусков на диаметры резьбы метчика (d, d_1, d_2) и гайки

Конструкции некоторых типов метчиков:

а – слесарный (ручной);

б – с шахматным расположением зубьев;

в – бесканавочный;

г – с винтовыми канавками;

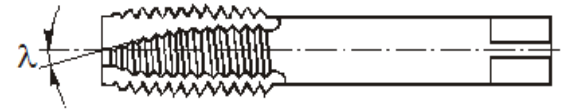
д – ступенчатый;

е – с режуще-выглаживающими зубьями;

ж – с направляющей частью;

з – с внутренним подводом СОЖ;

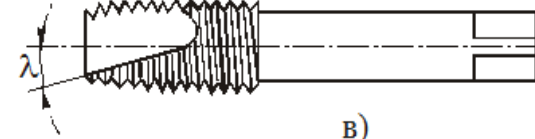
и – колокольного типа



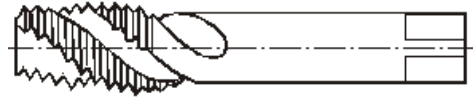
а)



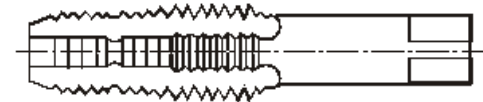
б)



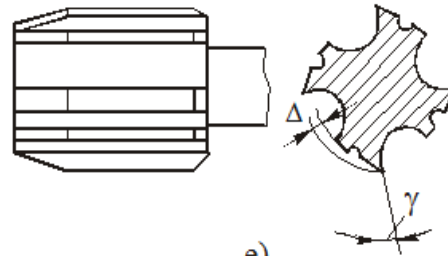
в)



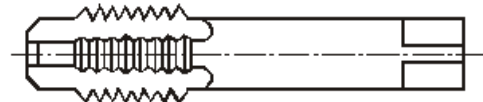
г)



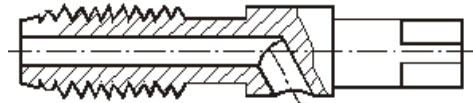
д)



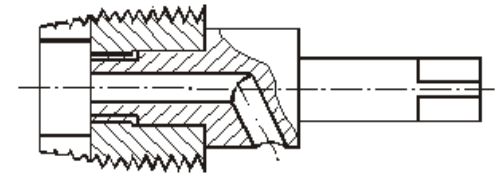
е)



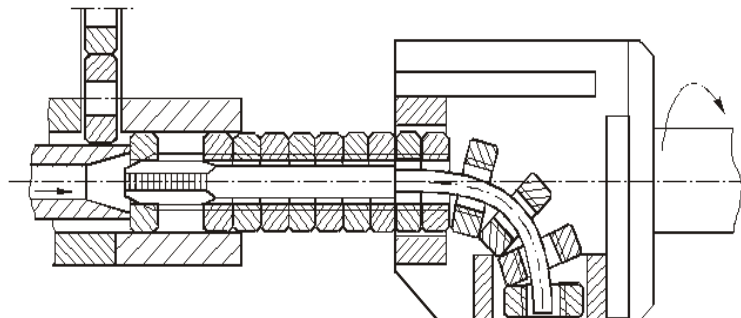
ж)



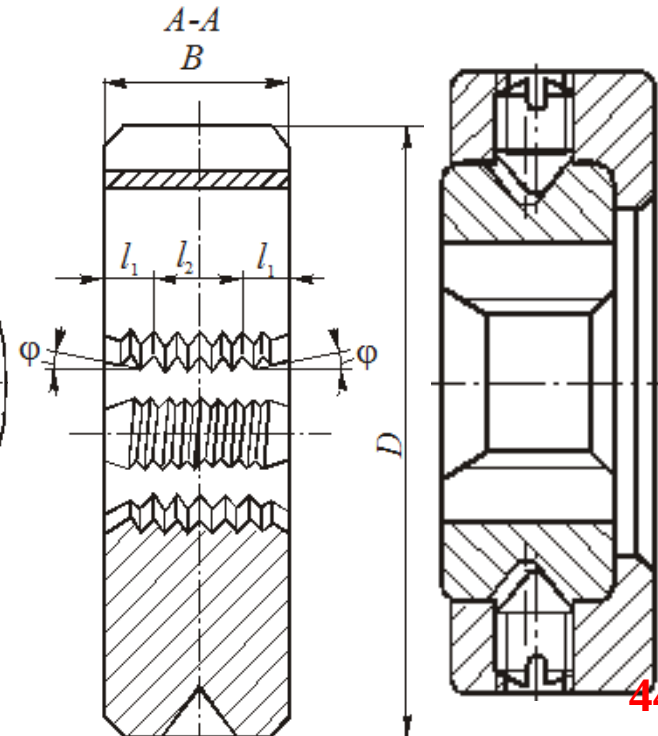
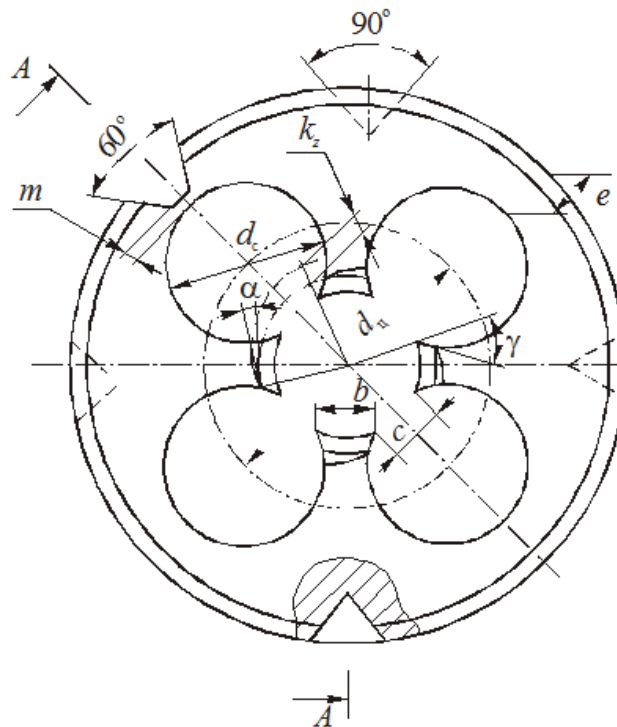
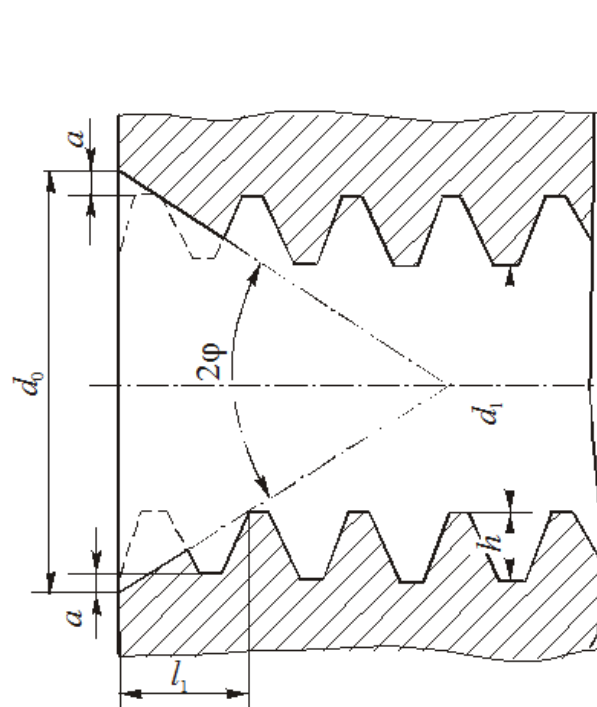
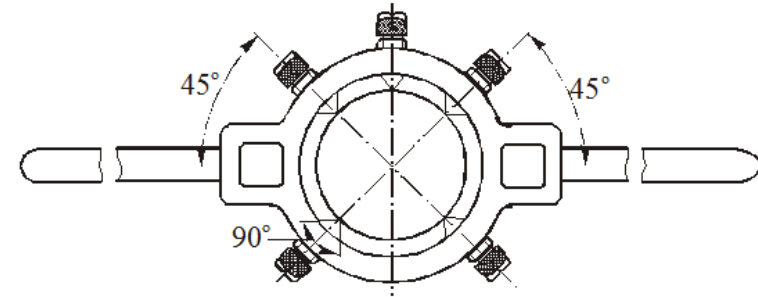
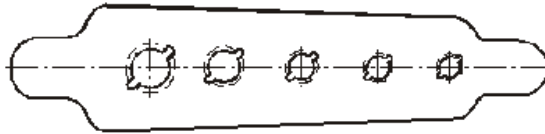
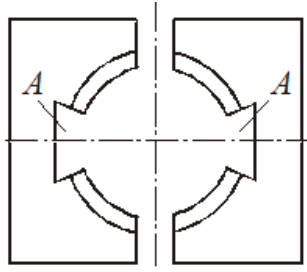
з)



и)

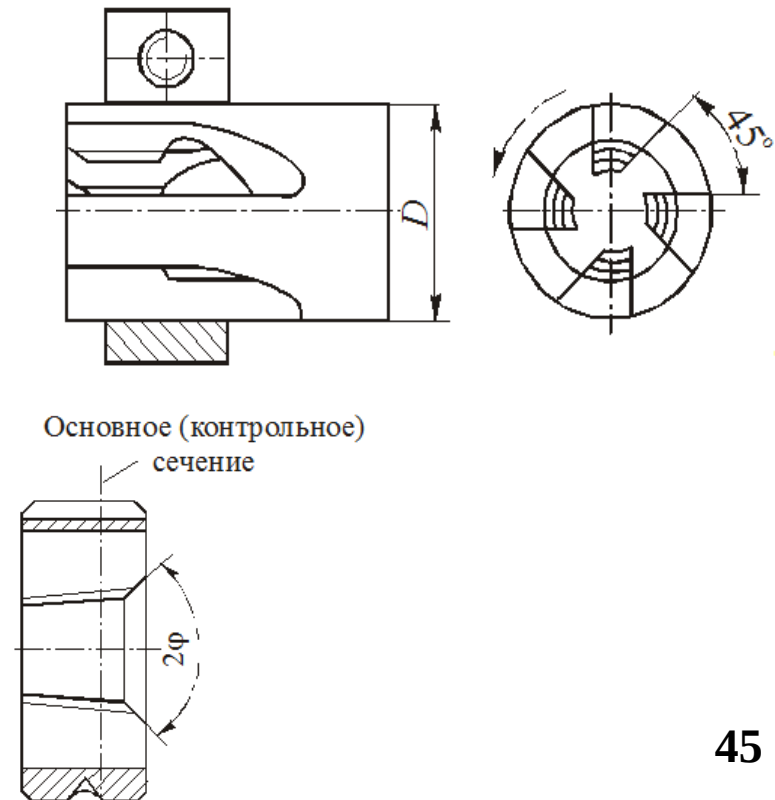


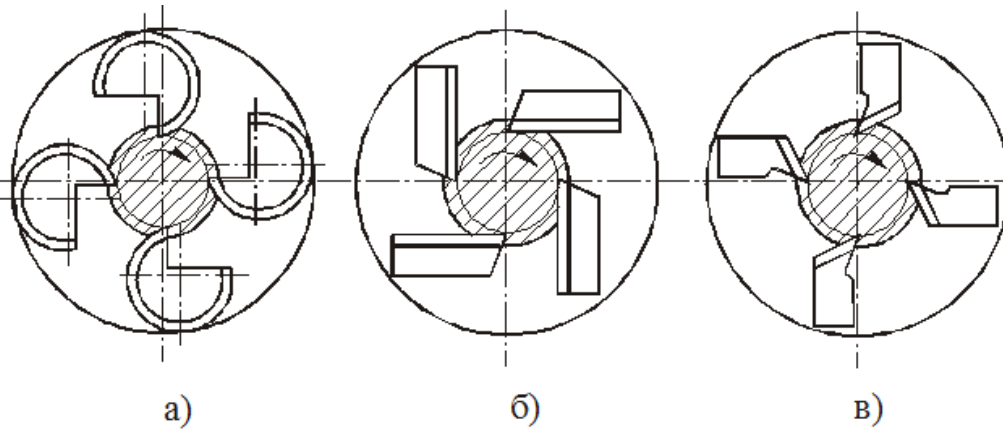
Резьбонарезная **плашка** – это гайка, превращенная в режущий инструмент путем сверления стружечных отверстий и формирования на зубьях режущих перьев передних и задних углов. Плашки применяют для **нарезания наружных резьб** на болтах, винтах, шпильках и других крепежных деталях. По **форме наружной поверхности** плашки бывают: **круглые**, квадратные, шестигранные, трубные. Для слесарных работ они делаются **разрезными** и зажимаются в воротках.



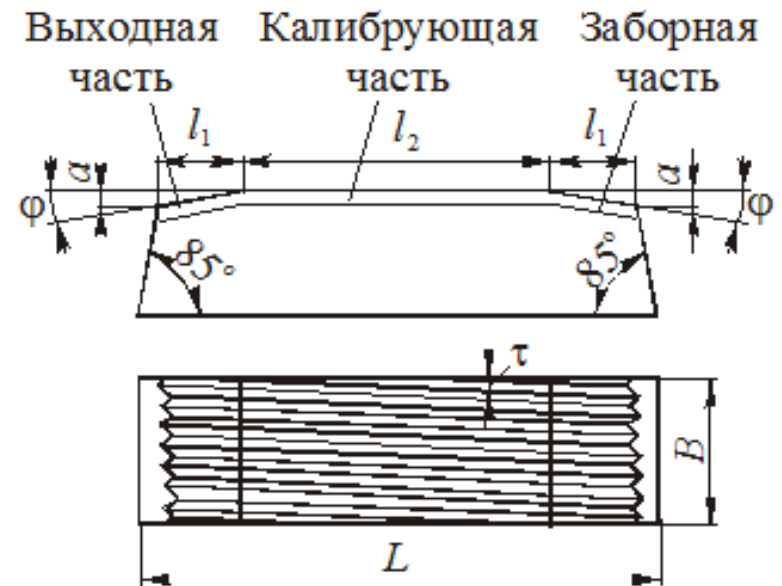
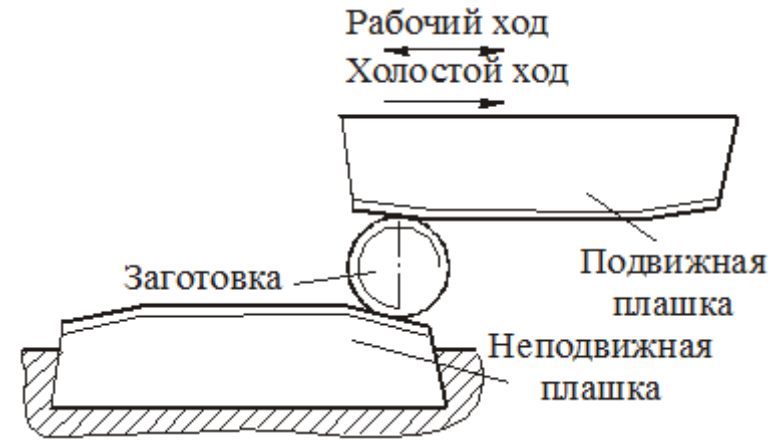
Плашки трубчатые (прогонки) представляют собой трубу из инструментальной стали с нарезанной резьбой. Для размещения сходящей стружки со стороны переднего торца в плашке прорезаны пазы, длина которых в 2 раза больше длины нарезаемой резьбы. Стружка снимается зубьями, расположенными на заборном конусе, с углом $2\varphi = 50 \dots 60^\circ$. Длина резьбы плашки $l = (7 \dots 8)P$ и на заборной части $l_1 = (2,0 \dots 2,5)P$. Применяют такие плашки на револьверных станках и станках-автоматах. По сравнению с круглыми плашками они имеют следующие **преимущества**: 1) лучшие условия отвода стружки; 2) меньшее коробление при термообработке; 3) высокая технологичность из-за простой переточки по передней грани; 4) возможность регулирования диаметра резьбы при износе.

Плашки для конических резьб применяются при нарезании наружных резьб в трубопроводах высокого давления. Особенности конструкций таких плашек: 1) плашки **работают** не напроход, а **только с одной стороны**, имеющей заборный конус с углом $2\varphi = 30 \dots 55^\circ$; 2) перья делают как можно меньшей ширины для снижения сил резания и трения; 3) число стружечных отверстий равно $z_c = 4 \dots 7$, для $d = 1/6 \dots 2''$; 4) углы режущих зубьев $\gamma = 20^\circ$, $\alpha = 6^\circ$.





Типы **резьбонарезных головок**: *а* – с круглыми гребенками; *б* – с тангенциальными плашками; *в* – с радиальными плашками



Резьбонакатная головка аксиальная

Инструменты для обработки **зубчатых колёс**

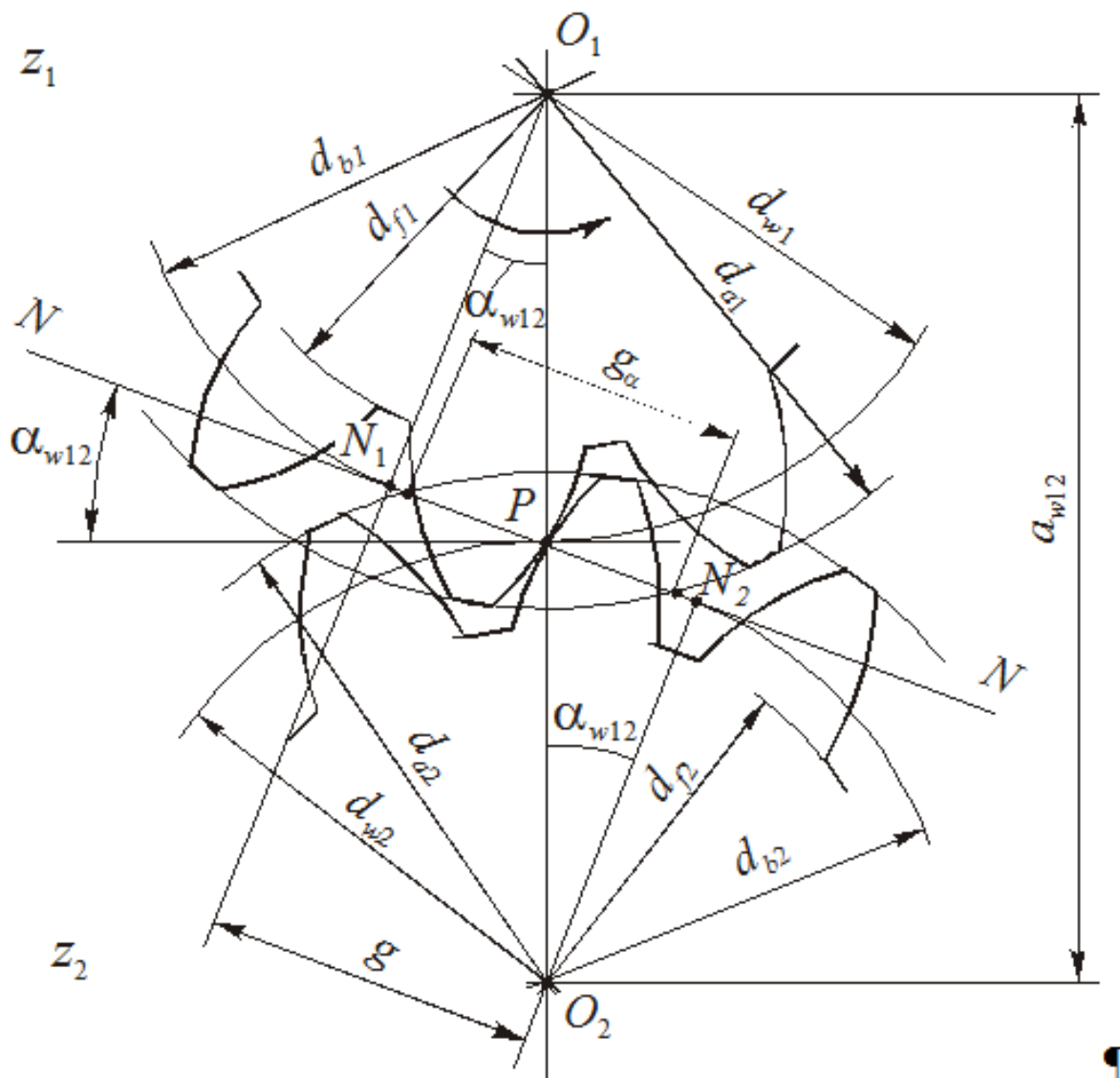
Для нарезания зубьев цилиндрических колес применяются **зуборезные инструменты**. Это наиболее сложные и дорогостоящие из всех видов лезвийных инструментов, так как содержат большое число высокоточных режущих фасонных кромок, изготавливаются из высококачественных инструментальных материалов и характеризуются высокой трудоемкостью изготовления и сложностью контроля многочисленных параметров. Нарезание зубьев цилиндрических колес может производиться либо методом **копирования**, либо методом **обкаточного огибания**.

При методе **копирования** профиль режущих кромок полностью **соответствует профилю впадин между зубьями колеса**. По такому методу работают **дисковые и пальцевые фасонные фрезы, зубодолбежные многорезцовые головки, протяжки**. Последние два вида инструментов обеспечивают наивысшую производительность, так как выбирают металл одновременно из всех впадин. Но в то же время они являются наиболее дорогостоящими, сложными в изготовлении и применяются только в массовом производстве.

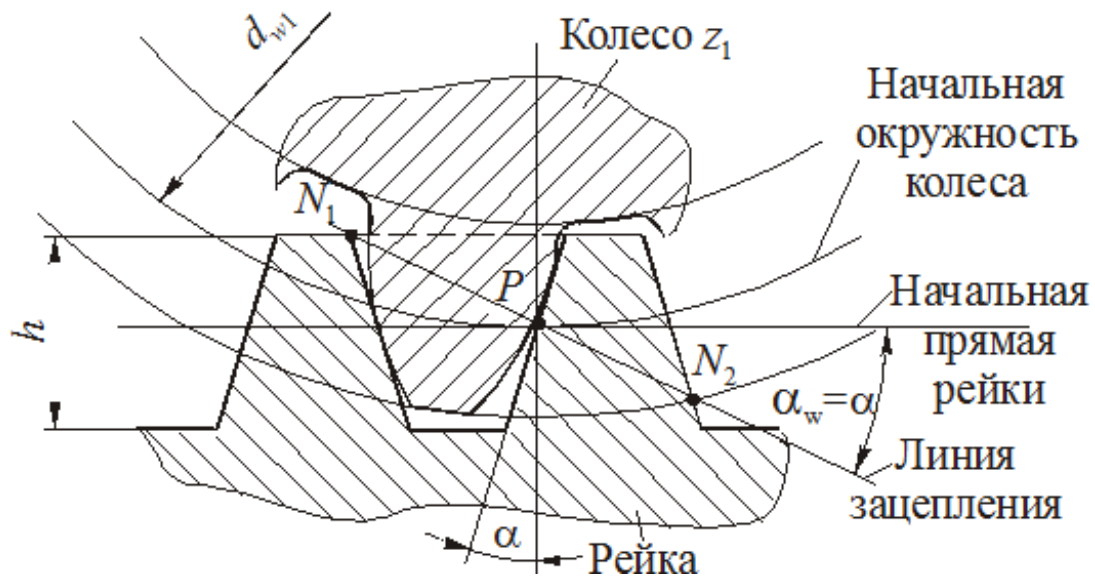
Достоинством метода **копирования** является **простая кинематика станка**. Однако **точность изготовления зубьев колес относительно низка** из-за неизбежных погрешностей изготовления фасонных зубьев инструментов и установки их относительно заготовки.

При **методе обкаточного огибания** centroиды инструмента и нарезаемого колеса катятся друг по другу без скольжения, а профиль нарезаемых зубьев колеса формируется как огибающая различных положений режущих кромок при зубонарезании. Форма режущих зубьев у этих инструментов не совпадает с профилем впадин между зубьями нарезаемых колес и определяется в результате достаточно сложных расчетов. По этому принципу работают зуборезные гребенки, червячные фрезы, долбяки, зубострогальные резцы, головки для нарезания конических колес и др. **Достоинство этих инструментов – универсальность.** Ими можно нарезать колеса данного модуля с различным числом зубьев. При этом **точность нарезаемых колес выше точности колес, обработанных по методу копирования.** **Недостатки: сложные кинематика зуборезных станков и конструкция самих инструментов.**

Проектирование зуборезных инструментов заключается в определении формы и размеров режущих зубьев и базируется на законах зацепления зубчатых передач. Определения и обозначения основных параметров зубчатых колес и передач стандартизированы (ГОСТ 16530–83, ГОСТ 16531–83, ГОСТ 16532–70).



Эвольвентное зацепление зубчатых колес⁴⁹



Зацепление зубчатой рейки с колесом

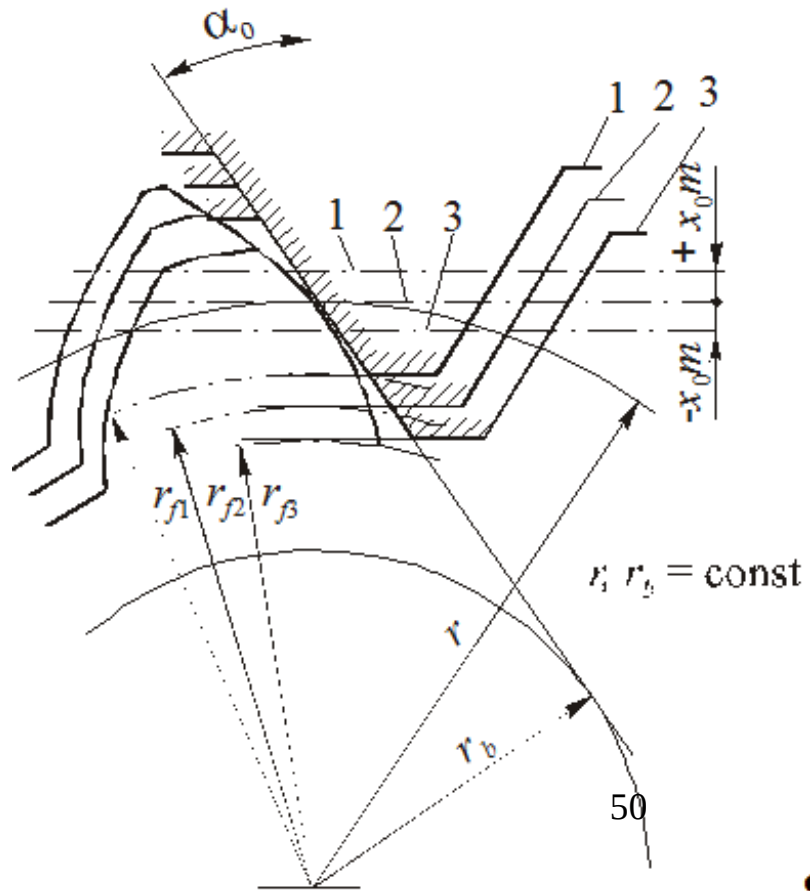
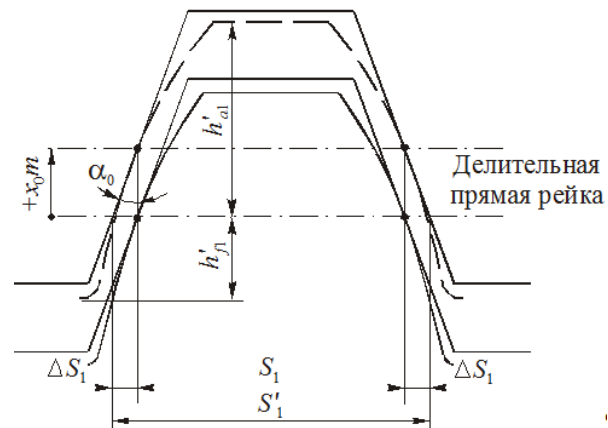


Схема высотного корригирования зубчатого колеса:

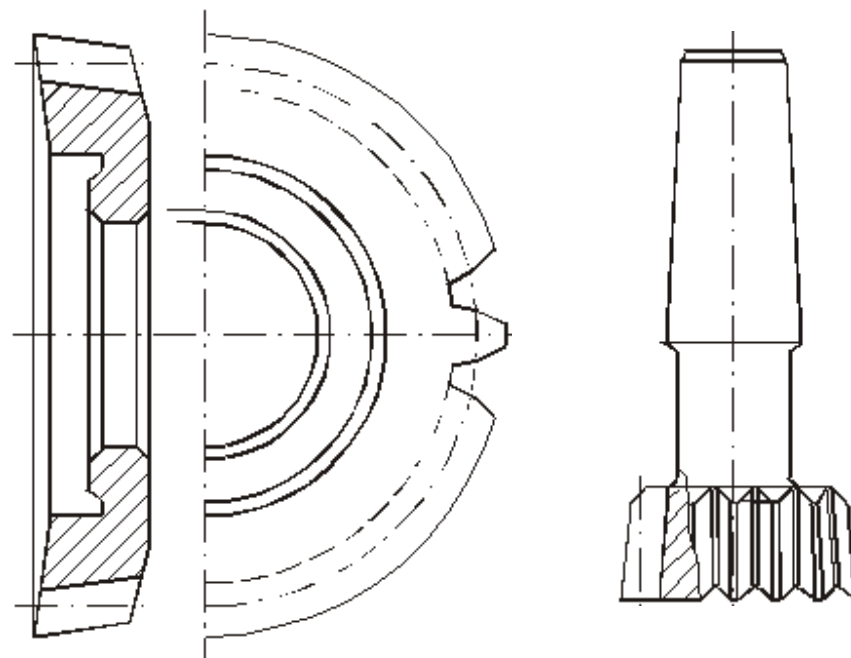
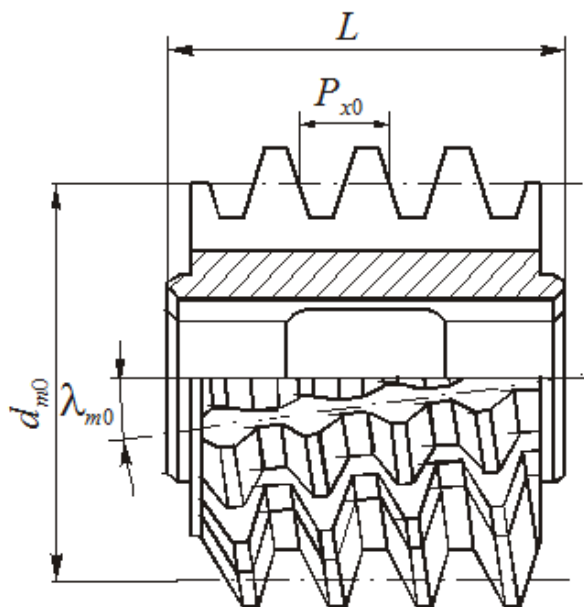
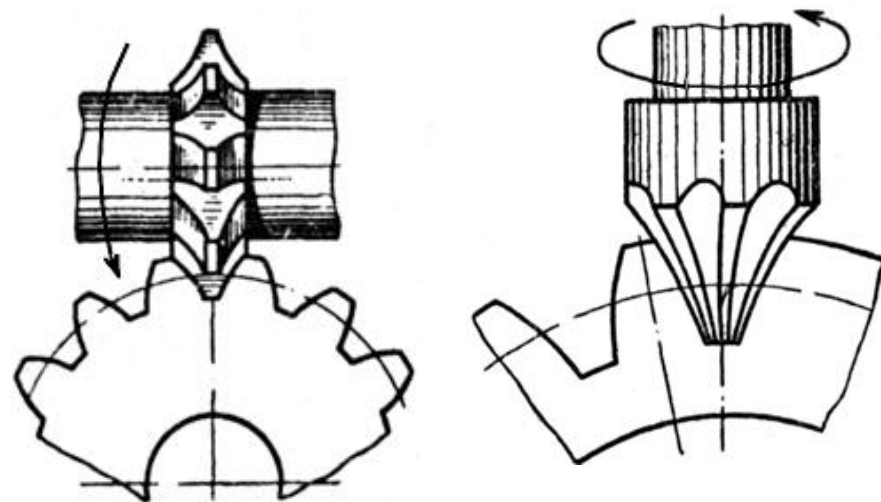
- 1 – положительное смещение;
2 – нулевое смещение;
3 – отрицательное смещение

Способы нарезания зубьев колес :

дисковой модульной фрезой методом копирования;

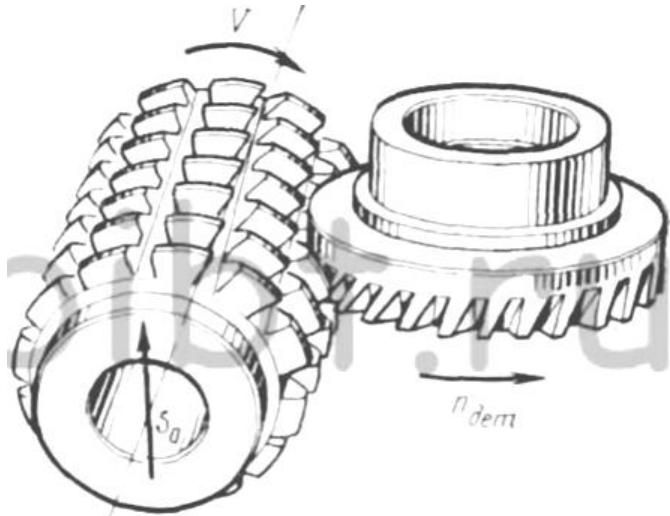
пальцевой модульной фрезой методом копирования;

Червячная фреза архимедова типа



Типы конструкций **долбяков**: 51
дисковый хвостовой

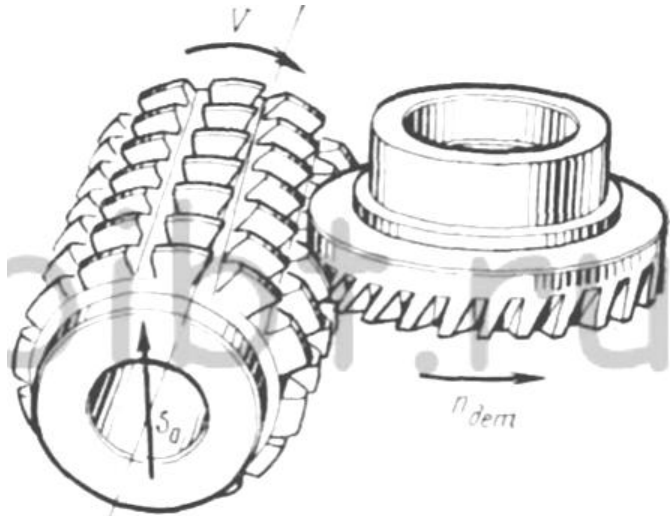
Назначение рациональных режимов обработки при зубофрезеровании заключается в выборе наиболее выгодного сочетания подачи S_0 и скорости резания v , обеспечивающих в данных условиях наибольшую производительность обработки и наименьшую стоимость операции. Чтобы уменьшить машинное время, следует работать с возможно большей и технологически допустимой подачей и соответствующей этой подаче скорости резания. При **черновом** нарезании требования к шероховатости обработанной поверхности профиля зубьев не предъявляются, глубина резания и число рабочих ходов устанавливаются в зависимости от размера нарезаемого зуба, характера обработки и мощности станка.



Обычно **черновое нарезание** зубчатых колес производят за **один рабочий ход**, но если мощность станка оказывается недостаточной, то нарезание следует производить за **два рабочих хода** с глубиной резания на первом ходу **1,4**, а на втором **0,7** от модуля.

Фрезерование зубчатого венца червячной фрезой. Подачу S_0 **условно** прикладывать к **заготовке** (показано **попутное** фрезерование)

Назначение рациональных режимов обработки при зубофрезеровании заключается в выборе наиболее выгодного сочетания подачи S_0 и скорости резания v , обеспечивающих в данных условиях наибольшую производительность обработки и наименьшую стоимость операции. Чтобы уменьшить машинное время, следует работать с возможно большей и технологически допустимой подачей и соответствующей этой подаче скорости резания. При **черновом** нарезании требования к шероховатости обработанной поверхности профиля зубьев не предъявляются, глубина резания и число рабочих ходов устанавливаются в зависимости от размера нарезаемого зуба, характера обработки и мощности станка.



Обычно **черновое нарезание** зубчатых колес производят за **один рабочий ход**, но если мощность станка оказывается недостаточной, то нарезание следует производить за **два рабочих хода** с глубиной резания на первом ходу **1,4**, а на втором **0,7** от модуля.

Фрезерование зубчатого венца червячной фрезой. Подачу S_0 **условно** прикладывать к **заготовке** (показано **попутное** фрезерование)

Требуемые исходные данные: нарезается цилиндрическое зубчатое колесо с параметрами: модуль $m=4$ мм, число зубьев $z=33$, угол наклона зубьев $\beta=30^\circ$, направление зубьев - правое, ширина венца $b=35$ мм, материал заготовки - сталь 45 и её твердость HB 156-207, **требуемая точность** после чистовой (окончательной) обработки (7-7-8-Vc).

Вид обработки - черновое (или чистовое) фрезерование зубьев, **количество ходов** (зависит от мощности станка и требуемой точности обработки, обычно **один** рабочий ход, **направление подачи** (обычно попутное, т.к. можно увеличить подачу S_o), **модель** станка (53A50).

Инструмент: червячная фреза правозаходная, **материал** P6M5, **число заходов** $K=2$, **делительный диаметр** $d_{a0}=80$ мм, **угол наклона** $\gamma_{m0}=5^\circ 54'$, **класс точности фрезы** B.

При расчёте режимов резания необходимо использовать справочники или **методическое указание** по выполнению лабораторной работы «Обработка зубчатых колёс».

1) Выбор подачи: $S_o = S_{o \text{ табл}} \cdot K_{\text{многзах}} \cdot K_1 \cdot K_2$ (мм/об)

где $S_{o \text{ табл}}$ — подача по таблице, мм/об; $K_{\text{многзах}}$ — коэффициент, определяемый числом заходов у фрезы; K_1 — коэффициент, определяемый обрабатываемым материалом; K_2 — коэффициент, определяемый углом наклона зуба.

При **черновом** фрезеровании зубьев: $S_o = S_{o \text{ табл}} \cdot K_{\text{многзах}} \cdot K_1 \cdot K_2 = 3,5 \times 0,8 \times 1 \times 0,8 = 2,24$ мм/об заготовки.

2) Скорость резания v , м/мин, определяется по формуле

$$v = v_{\text{табл}} \cdot K_{\text{покр}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \text{ (м/мин)},$$

где $v_{\text{табл}}$ — скорость резания по таблице, м/мин; $K_{\text{покр}}$ — коэффициент, увеличения при использования фрезы с покрытием; K_1 — коэффициент, определяемый обрабатываемым материалом; K_2 — коэффициент, определяемый количеством проходов; K_3 — коэффициент, определяемый материалом режущей части фрезы.

3) Расчёт частоты вращения фрезы:

$$n_{\text{ф}} = (1000 \cdot v) / (\pi d_{a0}) = (1000 \cdot 73,6) / (3,14 \cdot 80) = 292,9 \text{ об/мин.}$$

Для работы принимается ближайшая, имеющаяся на станке частота вращения фрезы $n_{\text{ф пр}} = 250$ об/мин.

4) Расчёт фактической скорости резания:

$$v = (\pi \cdot d_{a0} \cdot n_{\text{ф пр}}) / 1000 = (3,14 \cdot 80 \cdot 250) / 1000 = 62,8 \approx 63 \text{ м/мин.}$$

5) Расчёт основного времени нарезания зубьев червячной фрезой:

$$T_0 = L \times z / (n_{\text{ф}} \times S_0 \times K), \text{ мин,}$$

где L - длина рабочего хода, включающая в себя ширину зубчатого венца b , длину врезания $l_{\text{вр}}$ и длину перебега l_1 ; z - число нарезаемых зубьев; $n_{\text{ф пр}}$ - частота вращения фрезы; S_0 - продольная подача; K - число заходов червячной фрезы.

$$l_{\text{вр}} = \ell = \sqrt{h \cdot (d_{a0} - h)}, \text{ где } h - \text{высота обрабатываемого зуба. } h = 2,25 \times m \text{ (} 2,25 \times 4 = 9 \text{ мм).}$$

При нарезании **косозубых** колес в этой формуле d_{a0} заменяется на d_{a0}^1 ,

$$d_{a0}^1 = d_{a0} + (d_{a0} + d_a) \cdot \tan^2 \beta.$$

Диаметр венца d_a нарезаемого зубчатого венца: $d_a = d_{a0} + 2 \times m = m \times z + 2 \times m$ (мм).

$$(d_a = 4 \times 33 + 2 \times 4 = 140 \text{ мм}).$$

Длина перебега для прямозубых колес принимается $l_1 = 3 \dots 5$ мм,

а для **косозубых** $l_1 = 3 \times m \times \tan(\beta \pm \gamma_{m0}) + (3 \div 5)$ мм.

Общая длина рабочего хода фрезы: $L = b + l_{вр} + l_1$ (мм)

$$(L = 35 + 37,67 + 9,4 = 82,07 \approx 82 \text{ мм})$$

Основное время при **черновом** фрезеровании зубьев:

$$T_o = (L \times z) / (n_{\phi} \times S_0 \times K) = (82 \times 33) / (200 \times \mathbf{2,24} \times 2) = (82 \times 33) / (200 \times 2,0 \times 2) = 3,4 \text{ мин.}$$

Абразивная обработка

Абразивная обработка - это удаление **обычно** небольшой толщины слоя материала с поверхности заготовки с помощью абразивных зёрен, твёрдость которых должна быть больше, чем твёрдость поверхности заготовки. Абразивная обработка выполняется:

1) **свободным абразивом**, т.е. абразивные зёрна не связаны друг с другом или **первоначально** с другим материалом. При этом используются **порошки**, к которым добавляется масло, вода и т.п. для улучшения их нанесения на обрабатываемую поверхность, и **пасты**. Небольшое количество размазывается по поверхности **притира** (обычно это плита или пластина из чугуна), твёрдость которого должна быть меньше твёрдости поверхности детали. Затем **другим притиром** абразив равномерно растирается по поверхностям притиров 8-образными движениями. Зёрна врезаются (**внедряются**) в притиры (**шаржирование** притиров) и служат режущим материалом. Излишки абразива удаляются. После этого поверхность детали притирается 8-образными движениями одного из притиров. Для **последующей полировки** необходимо делать только прямые движения $\rightarrow \leftarrow$ вдоль поверхности притира **только в одном** направлении. Через несколько минут поверхность заготовки промывается керосином, осматривается, и если остались **необработанные участки**, то обработка повторяется. Если абразива будет слишком много или зёрна затупятся (износятся), то не будет характерного «шаркающего» звука, поэтому притиры промываются керосином и шаржирование повторяется. После обработки **всех участков** поверхности притиры промываются керосином и шаржируются зёрнами меньшего размера (меньшей **зернистостью**). Заготовка обрабатывается движениями, направленными **перпендикулярно к предыдущим** ($\uparrow \downarrow$) до исчезновения следов от предыдущей обработки. Затем всё повторяется с **ещё меньшей** зернистостью.

Для **полировки** абразивные зёрна наносятся на войлочный или из другого мягкого материала круг.

2) **связанным абразивом** – зёрна наносятся с помощью клея на ткань, бумагу (**шлифовальная шкурка**) или запекаются в **кругах** или **брусках** и **сегментах**. Обработка такими **абразивными инструментами** называется **шлифованием**.

Шлифование (иногда называют *шлифовка*) – заключительная операция изготовления деталей, которая проводится после черновой обработки и закалки деталей и представляет собой процесс резания. Резание происходит с помощью абразивного инструмента, который за счет своей пористой зернистой структуры снимает **тонкий слой** с поверхности детали (**обычно 0,02-0,8 мм**, но при обдирке толщина может быть 5-20 мм). Это обеспечивает высокую точность и чистоту покрытия обработанных шлифованием изделий. Шлифованием можно добиться точности размера до **1-2 мкм** при соблюдении термоконстантной среды в помещении, в **общем случае точность обработки составляет порядка 10 мкм (по 7-6 качеству)**. Шероховатость достигается в пределах **Ra** (среднее арифметическое отклонение профиля) **1 – 0,32 мкм**.

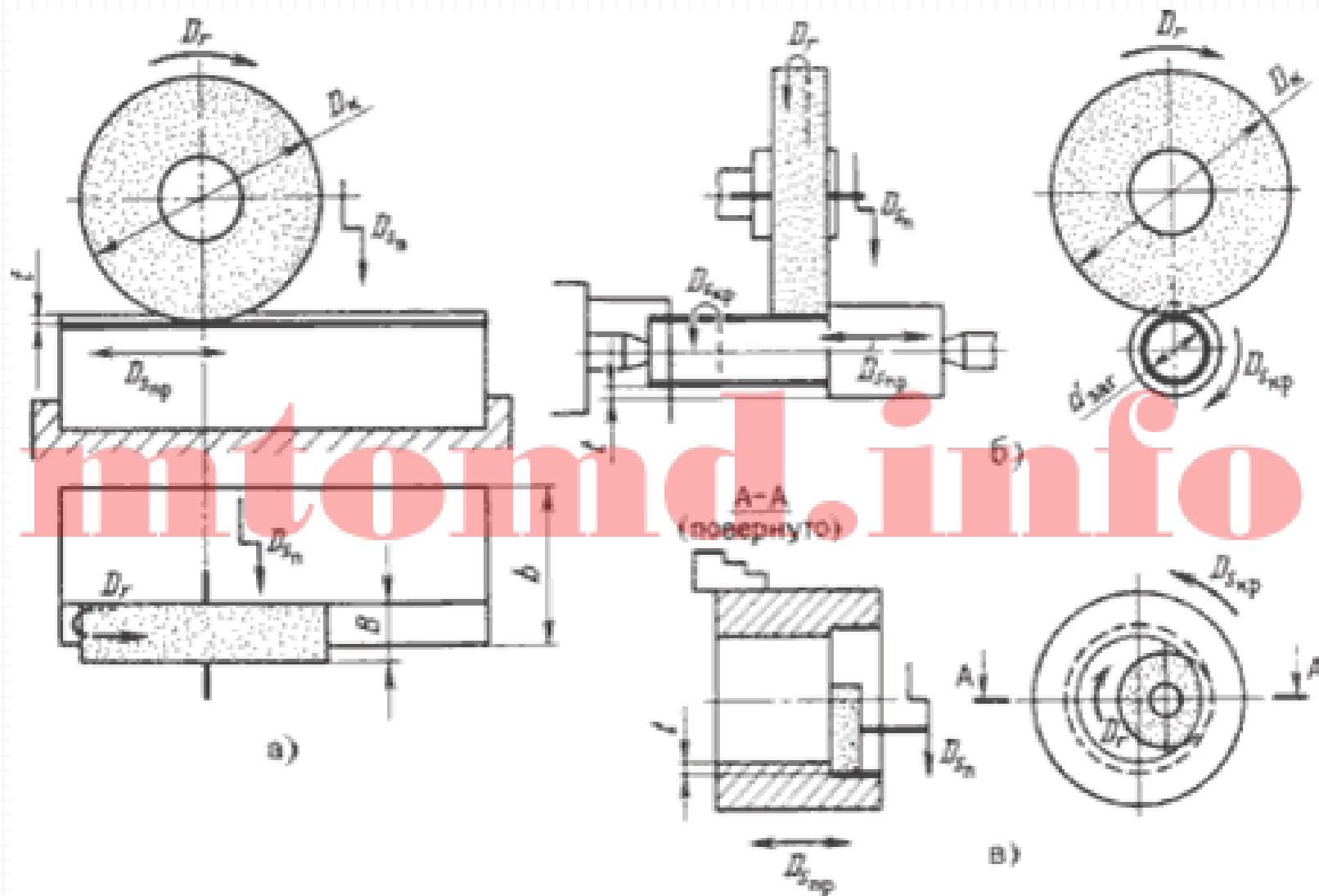
Абразивные зерна **расположены беспорядочно** в отличие от лезвийной обработки. При вращательном движении в зоне контакта с заготовкой часть зерен срезает материал в виде очень большого числа тонких стружек (до 100000000 в минуту). Процесс резания каждым зерном осуществляется мгновенно. Обработанная поверхность представляет собой совокупность микроследов абразивных зерен и имеет малую шероховатость.

Особенностями шлифования являются **высокая скорость обработки (35-80 м/с)**, **отрицательные средние передние углы** ($\gamma_{\text{ср}} = -70 \dots -50^\circ$), что вызывает сильное нагревание до **1000 °С** и деформацию верхнего слоя материала. Чтобы избежать этих явлений, необходимо **охлаждать** детали во время обработки – использовать смазочно-охлаждающую жидкость. **Универсальность** шлифования деталей - можно обрабатывать поверхности из разных материалов даже с высокой твёрдостью (до **70 HRC**), но твёрдость абразива всегда должна быть выше твёрдости обрабатываемой детали.

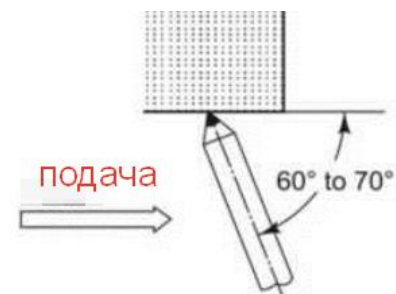
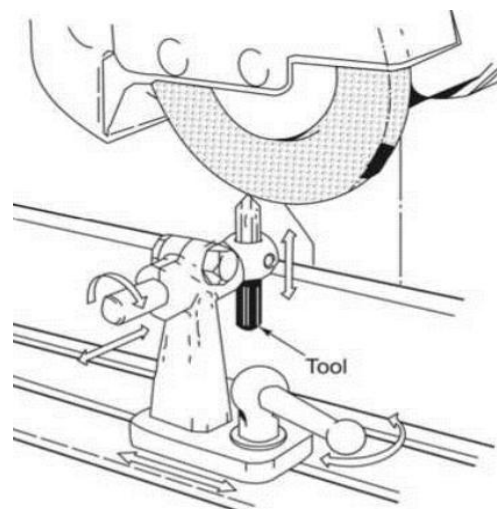
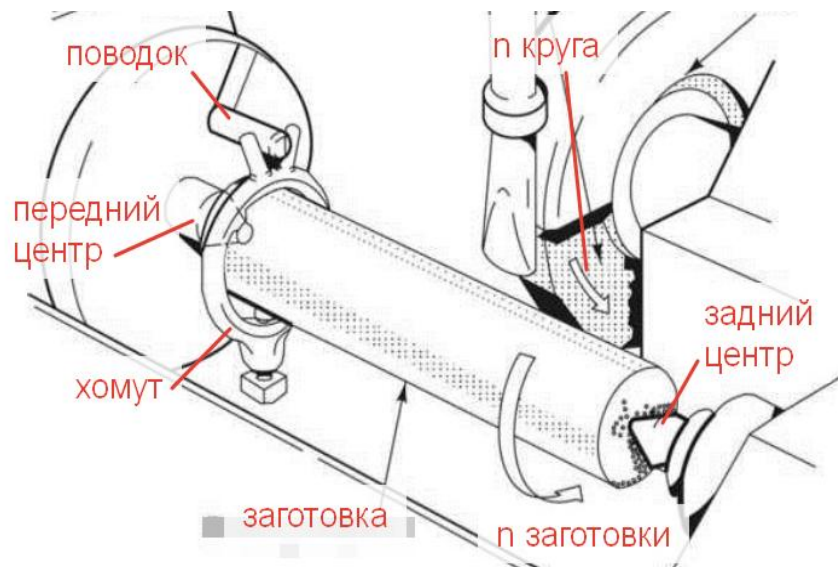
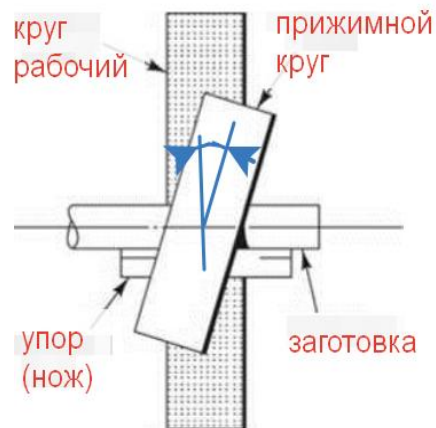
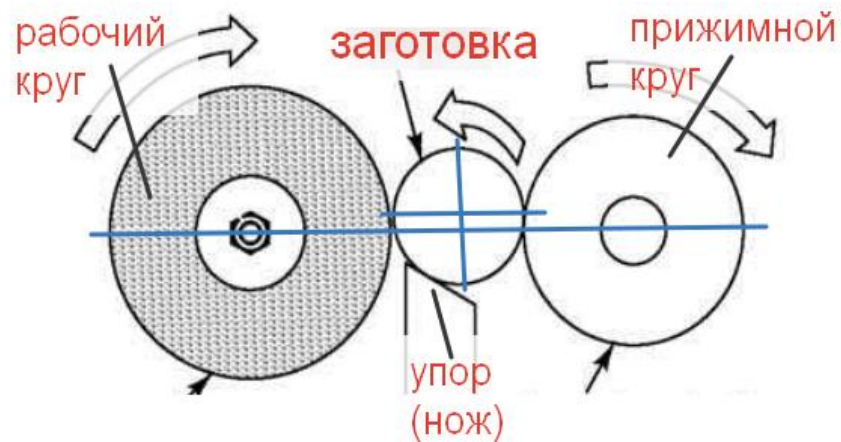
Виды шлифования. Выбор того или иного вида шлифования деталей в большой степени зависит от формы обрабатываемой поверхности. Существует три основных вида обработки – **плоское** шлифование **периферией** круга или его **торцом**, **круглое наружное** и круглое **внутреннее** шлифование деталей. Для шлифования на проход, например, прутков большой длины, используется **бесцентровое** шлифование, являющееся разновидностью круглого наружного.

Плоское шлифование – самый простой вид обработки такого типа. Он является наиболее надежным методом образования **плоскостей** высокой точности. Деталь устанавливается на **магнитный стол**. При возвратно-поступательном перемещении **стола вдоль его оси** выполняется снятие припуска; **перемещением** в поперечном направлении на каждый ход или **двойной ход (поперечная подача $S_{\text{поперечная}}$, мм/двойной ход)** выполняется переход к обработке остальных участков поверхности; **перемещением круга по вертикали** осуществляется настройка на размер.

а) **плоское** шлифование **периферией** круга; б) **круглое наружное**; в) круглое **внутреннее** шлифование деталей.



г) **бесцентровое** шлифование деталей.



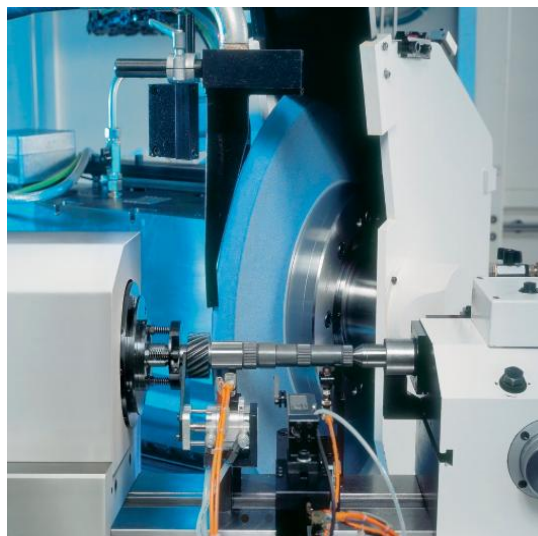
Правка круга на плоскошлифовальном станке

Круглое **наружное** шлифование

Наружное **круглое** шлифование деталей применяется для обработки наружных поверхностей при вращении заготовки в центрах или патроне. Существует два вида такого шлифования – с **продольной подачей** и **врезное**. Первый способ применяется, когда длина детали больше высоты (**ширины**) круга. Поступательное движение круга вдоль оси детали ($S_{об}$, мм/оборот заготовки) выполняется, чтобы пройти всю поверхность, при этом в движении находятся и круг, и деталь, вращающиеся в разные стороны. При **врезном** шлифовании длина детали меньше высоты круга или равна ей. Поступательной подачи не требуется, так как за один подход можно обработать всю деталь, но при большой ширине контакта с заготовкой **радиальная сила** большая, **дефекты** периферии поверхности круга **копируются** на обрабатываемой поверхности.



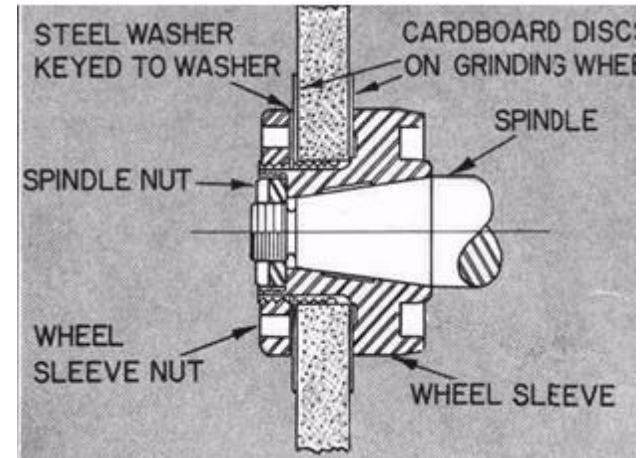
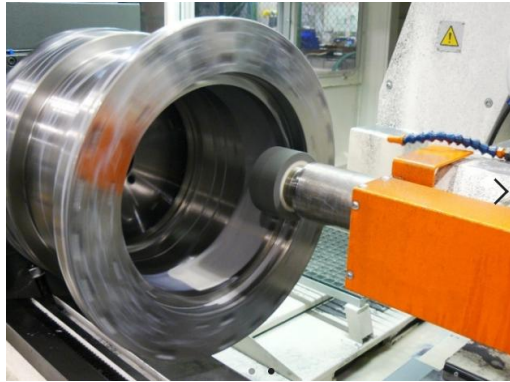
Круглое **врезное** шлифование



Круглое **продольное** шлифование с **подшлифовкой** торца уступа заготовки

Внутреннее шлифование используется для обработки внутренних поверхностей деталей, имеющих цилиндрическую, коническую или фасонную форму с прямой образующей. Метод имеет несколько разновидностей, но по принципу похож на внешнее **круглое шлифование**.

В качестве **абразивных материалов** используются алмаз, гранат, наждак, пемза, кварц, **корунд** и другие материалы, обладающие высокой твердостью. Между собой кристаллы скрепляются **связкой** (компаундами), образуя твердую шероховатую поверхность с определённой **пористостью**. Поры необходимы для образования места для размещения образующейся стружки. Чаще всего стружка имеет сферическую форму, т.к. частично выгорает. Одной из важнейших характеристик абразивных инструментов является **зернистость**. Чем меньше зерно, тем меньше шероховатость обработанной поверхности.



Крепление круга на оправке

Круглое внутреннее шлифование

Структура круга:
зёрна, связка, поры

Также важна **твёрдость** абразива (**зерна**). Необходимо отличать твёрдость **абразива (зерна)** от **твёрдости круга** (**твёрдость абразивного инструмента**), которая показывает **прочность сцепления** зёрен в круге. Твёрдость круга (**абразивного инструмента**) варьируется от весьма мягких (ВМ) до чрезвычайно твердых (ЧТ).

Табл.1. Твёрдость **зёрен**

Материалы	Шкала Муха (Moh scale)	Шкала Кнопа (Knoop scale)
Обычное стекло		300 - 500
Закалённая сталь, HRC (Rockwell C) 60.5		740
Кварц (Quartz)	7	820
Синтетическая синяя шпинель		1270
Топаз (Topaz)	8	1350
Гранат (Garnet)		1350
Твёрдые сплавы (Cemented carbides)		1400 - 1800
Карбид вольфрама (Tungsten carbide (not cemented))		1880
Окись алюминия и корунд (электрокорунд) (Aluminum oxide (Alundum) and corundum)	9	2000
Карбид кремния (Silicon carbide (Cristolon))		2500
Карбид бора (Boron carbide (Norbide))		2800
Алмаз натуральный и искусственный (Diamond (mined or manufactured))	10	Больше чем 7000

Измельченный, обогащенный и классифицированный **абразивный материал**, твердость которого превышает твердость обрабатываемого материала и который способен в **измельченном состоянии** осуществлять обработку резанием, называют **шлифовальным**. В зависимости от вида используемого шлифовального материала различают алмазные, эльборовые, электрокорундовые, карбидкремниевые и другие абразивные инструменты.

1) Шлифовальные материалы и области их применения

Сведения о выпускаемых шлифовальных материалах и области их применения приведены ниже (см. **Справочник технолога-машиностроителя. В 2 томах, Т.2. под ред. Косиловой А.Г., 1985, с. 242).**

Нормальный электрокорунд: 13А — для абразивного инструмента на органической связке; **14А** — для абразивного инструмента на керамической и органической связках, шлифовальной шкурки, для обработки свободным зерном; **15А** — для абразивного инструмента **на керамической** связке, в том числе прецизионного классов АА, А, шлифовальной шкурки.

Белый электрокорунд: 23А, 24А - для абразивного инструмента, шлифовальной шкурки, обработки свободным зерном; **25А** — для абразивного инструмента на **керамической** связке, в том числе прецизионного инструмента классов АА, А.

Хромистый электрокорунд: 33А — для абразивного инструмента на керамической связке, шлифовальной шкурки, обработки свободным зерном; 34А — для абразивного инструмента на керамической связке, шлифовальной шкурки, прецизионного инструмента классов АА, А).

Зеленый карбид кремния: 63С, 64С — для обработки **твёрдого сплава**, применяется в виде кругов, шлифовальной шкурки, для обработки свободным зерном.

Карбид бора — изготавливают порошки и пасты для доводочных операций.

Кубический нитрид бора (эльбор): ЛО, ЛП — для абразивного инструмента на органической, керамической и металлокерамической связках, шлифовальной шкурки, абразивных паст; ЛВМ, ЛПМ — для микрошлифпорошков с высоким и повышенным содержанием основной фракции для абразивных паст.

Синтетический алмаз: АС2 — для инструментов на органических связках, применяемых на чистовых и доводочных операциях при обработке твердого сплава и сталей; АС4 — для инструментов на органических и керамических связках, применяемых для шлифования **твердых сплавов**, керамических и других хрупких материалов; АС6 — для инструментов на металлических связках, применяемых для работы при повышенных нагрузках.

2) Зернистость и зерновой состав шлифовальных материалов

Шлифовальные материалы делят на группы в зависимости от размера зерен. ГОСТ 3647 — 80 устанавливает **четыре группы** шлифовальных материалов:

шлифзерно (2000 — **160** мкм); **шлифпорошки** (125 — 40 мкм); **микрошлифпорошки** (63 — 14 мкм) и тонкие микрошлифпорошки (10 — 3 мкм).

Совокупность абразивных зерен шлифовального материала в **установленном интервале** размера зёрен размеров называют **фракцией**. Фракцию, преобладающую по массе, объему или числу зерен, называют основной. Цифровое обозначение зернистости в зависимости от процентного содержания основной фракции дополняют буквенным индексом В (высокая), П, **Н** (нормальная — **не менее 45%**), Д .

Характеристику конкретной совокупности абразивных зерен, выраженную **размерами зёрен основной фракции**, называют **зернистостью**. В зависимости от группы материалов приняты следующие обозначения зернистости :

- а) **шлифзерна** и шлифпорошков — как **0,1 размера стороны ячейки сита** в свету в мкм, на котором **задерживаются зерна основной фракции**. Например: **40**, 25, 16 (соответственно **400**, 250, 160 мкм);
- б) микрошлифпорошков — по верхнему пределу размера зерен основной фракции с добавлением индекса М. Например, М40. М28, М10 (соответственно 40, 28, 10 мкм);
- в) алмазных шлифпорошков — дробью, числитель которой соответствует размеру стороны ячейки верхнего сита, а знаменатель — размеру стороны ячейки нижнего сита основной фракции. Например: 400/250; 400/315; 160/100; 160/125;

Табл. 166. Область применения абразивных инструментов различной зернистости

Зернистость	Область применения
M40-M5	Для доводки особо точных деталей. Окончательная доводка деталей с точностью 3 - 5 мкм и менее и параметром шероховатости $Ra=0,16-0,02$ мкм. Суперфиниширование, окончательное хонингование. Резьбошлифование с мелким шагом
8; 6	Чистовое и тонкое шлифование деталей из твердых сплавов , металлов, стекла и других неметаллических материалов. Доводка режущего инструмента. Резьбошлифование с мелким шагом резьбы. Чистовое хонингование
12; 10	Отделочное шлифование деталей с параметром шероховатости $Ra=0,63 - 0,16$ мкм. Чистовое алмазное шлифование, заточка режущих инструментов. Предварительное хонингование
25; 20; 16	Чистовое шлифование деталей, заточка режущих инструментов, предварительное алмазное шлифование, профильное шлифование с параметром шероховатости $Ra=1,25 - 0,16$ мкм. Шлифование хрупких материалов
40; 32	Предварительное и чистовое шлифование деталей с параметром шероховатости поверхности $Ra = 2,5-0,32$ мкм. Заточка режущих инструментов
50; 63	Предварительное круглое наружное, внутреннее, бесцентровое и плоское шлифование с параметром шероховатости поверхности $Ra = 2,5 - 0,63$ мкм. Отделка металлов и неметаллических материалов. Шлифование вязких материалов . Заточка крупных и средних резцов. Отрезка . Правка инструмента
125; 100; 80	Правка шлифовальных кругов. Ручное обдирочное шлифование заготовок после литья,ковки, штамповки, прокатки и сварки

3) Связка абразивных инструментов - вещество или совокупность веществ, применяемых для закрепления зерен шлифовального материала и наполнителя в абразивном *инструменте* для придания инструменту необходимых физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств. Связка влияет на геометрию рельефа рабочей поверхности инструмента, износ абразивного инструмента и параметры шероховатости обработанной поверхности, самозатачиваемость, водостойкость.

Керамические связки (К1, К2, К3, К4, К5, К6, К8, К10) — для всех основных видов шлифования, **кроме прорезки узких пазов, обдирочных работ на подвесных станках**; К2, К3 — для инструмента из карбида кремния; К2 — для мелкозернистого инструмента; К1, К5, К8 — для инструмента из электрокорунда.

Бакелитовые связки (Б, Б1, Б2, Б3, Б4, БУ, Б156, БП2) — круги с упрочненными элементами для шлифования **при скоростях круга 65, 80 и 100 м/с**; кругов для скоростного обдирочного шлифования, обдирочного шлифования на подвесных станках и вручную, плоского шлифования торцом круга; отрезки и прорезки пазов; заточки режущих инструментов, для шлифования **прерывистых** поверхностей; мелкозернистые круги для отделочного шлифования; алмазные и эльборовые круги; бруски хонинговальные, сегменты шлифовальные, в том числе для работы со скоростью резания 80 м/с.

Вулканитовые и прочие связки (В, В1, В2, В3, В5, Гф (глифталевые), Пф (поливинилформаль), Э5, Э6) — ведущие круги для бесцентрового шлифования; **гибкие** круги для полирования и отделочного шлифования на связке В5, круги для отрезки, прорезки и шлифования пазов; круги для некоторых чистовых операций профильного шлифования.

Металлические связки — алмазные круги повышенной износостойкости для обработки твердых сплавов, а также круги для электро-химической абразивной обработки.

Керамические связки являются многокомпонентными смесями огнеупорной глины, полевого шпата, борного стекла, талька и других минеральных материалов, составленными по определенной рецептуре с добавками клеящих веществ: растворимого стекла, декстрина и др. Спекующиеся керамические связки **K2, K3** используют для закрепления зерен из **карбида кремния**. В процессе термической обработки они расплавляются частично и по своему состоянию и составу **близки к фарфору**.

Плавящиеся керамические связки K1, K5, K8 используют для закрепления зерен из электрокорундовых материалов, с которыми они **вступают в химическое взаимодействие** и обеспечивают прочное закрепление зерен. По своему составу и состоянию плавящиеся связки являются **стеклами**.

Для **бакелитовой** связки используют порошкообразный или жидкий **бакелит** в качестве связующего компонента с соответствующими наполнителями и увлажнителями.

Основным компонентом **вулканитовой** связки является синтетический **каучук**. Введение в связку различных наполнителей и ускорителей вулканизации позволяет изменять технологические и эксплуатационные свойства абразивных инструментов.

Глифталевую смолу используют в качестве связки для инструментов из **зеленого карбида кремния** зернистостью 6-М 14 для **полирования**.

Вспененный **поливинилформаль** является основным связующим для порошковых кругов, применяемых для **полирования** (объем пор равен 80%).

4) Твердость абразивного инструмента

Твердостью абразивного инструмента называют величину, характеризующую свойство абразивного инструмента **сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой при сохранении характеристик инструментов в пределах установленных норм.**

Для **обеспечения самозатачивания** : чем **твёрже** обрабатываемый материал, т.е. быстрее изнашиваются зёрна, тем **мягче** должен быть **круг**, чтобы изношенные зёрна вырывались из инструмента и давали возможность резать новым, ещё не изношенным. Но если твёрдость круга будет недостаточной (слишком мала), то будет **осыпание** круга и не будет выдерживаться высокая точность размера поверхности и его форма.

Твердость круга оценивают определенными показателями в зависимости от метода измерения. Установлена следующая шкала степеней твердости абразивного инструмента: BM1 и BM2 — весьма мягкий; M1, M2 и M3 — мягкий; CM1 и **CM2 — среднемягкий**; C1 и C2 — средний; CT1, CT2 и CT3 — среднетвердый; T1 и T2 — твердый; VT — весьма твердый; CT — чрезвычайно твердый.

Цифры 1, 2 и 3 характеризуют **возрастание твердости** абразивного инструмента внутри степени.

Мягкие и **среднемягкие** круги M2 - **CM2** — для плоского шлифования торцом круга (на бакелитовой связке), **периферией** круга (на **керамической** связке), для шлифования заготовок и заточки инструментов из твердых сплавов, минералокерамики и **закаленных** углеродистых и легированных сталей, для шлифования **цветных металлов и сплавов**. Среднемягкие и средние круги CM2 - C2 — для **чистового (круглого, бесцентрового, внутреннего плоского периферией круга) шлифования заготовок из закаленных сталей**; для шлифования резьб с крупным шагом.

Средние и **среднетвердые** круги С2-СТ2 — для шлифования (круглого, бесцентрового, профильного, резьбошлифования) заготовок из **незакаленных углеродистых и легированных сталей и сплавов, чугуна и других вязких металлов** и материалов; для плоского шлифования сегментами, хонингования брусками.

Среднетвердые и **твердые** круги СТ2-Т2 — для **обдирочного и предварительного шлифования**, для шлифования профильных и **прерывистых** поверхностей, заготовок **малого диаметра**; для снятия заусенцев бесцентрового шлифования, хонингования закаленных сталей.

Весьма твердые и чрезвычайно твердые круги ВТ-ЧТ — для **правки шлифовальных кругов** методом обкатки и шлифования, шлифования деталей приборов с **малым съемом материала** (часовые механизмы), **шлифования шариков** для подшипников.

5) Структура абразивного инструмента и относительная концентрация шлифовального материала

Соотношение объемов шлифовального материала (**зёрен**), **связки** и **пор** в абразивном инструменте определяет структуру инструмента. Принято обозначать структуру **номера**ми. Изменение объемной концентрации Φ_a шлифовального материала на 2% в инструменте соответствует переходу от одного номера C_y структуры к другому номеру по формуле $C_y = 0,5(62 - \Phi_a)$. Для **обдирочного** шлифования при съеме значительного припуска (при предварительной обработке материалов с небольшим сопротивлением разрыву) рекомендуется использовать инструменты **высоких (больших) номеров структур**. Для **чистовой** обработки, для обработки твердых и хрупких материалов, при **повышенных удельных нагрузках** в зоне шлифования применяют круги с **меньшими номерами** структур.

Табл. 167. Области применения абразивных инструментов с разными номерами структур

Номер структу ры	Объемное содержание шлифовального материала, %	Область применения
1-3	60-56	Шлифование деталей с малым съемом материала кругами на бакелитовой и керамической связках
3, 4	56, 54	Отрезка. Шлифование с большими подачами и переменной нагрузкой. Профильное шлифование. Шлифование твердых и хрупких материалов
5, 6	52, 50 %	Круглое наружное , бесцентровое, плоское периферией круга шлифование металлов с высоким сопротивлением разрыву
7, 8	48, 46 %	Шлифование вязких металлов с низким сопротивлением разрыву. Внутреннее шлифование , заточка инструментов, плоское шлифование торцом круга
9-12	44-38	Скоростное шлифование. Профильное шлифование мелкозернистыми кругами. Шлифование резьбы. Шлифование с уменьшенным тепловыделением в зоне резания
14-16	34-30	Шлифование неметаллических материалов, металлов с низкой теплопроводностью (устранение ожогов и трещин)

Круги **высоких номеров структур** изготавливают **высокопористыми**: поры и капилляры в них сообщаются между собой за счет использования **выгорающих порообразователей** или газообразующих веществ.

В характеристике **высокопористых** кругов **дополнительно** указываются данные о марке порообразователя, его зернистости и объемном содержании, %.

Например, в маркировке круга **24А 16 М2 8К5/ПСС 40 15** указано, что порообразователем является полистирол общего назначения марки ПСС зернистостью 40, объемное содержание которого в абразивной массе при прес-совании составляет 15%;

Обозначение : 24А 16 М2 8 К5

круг **электрокорундовый марки 24А зернистостью 16, твердостью М2, номер структуры 8, связка керамическая К5.**

6) Классы точности абразивных инструментов

По предельным отклонениям размеров, формы и расположения, устанавливают **классы точности** абразивного инструмента.

Шлифовальные круги изготавливают **трех классов** точности: АА; А; Б.

Для кругов класса точности Б используют шлифовальные материалы со всеми индексами, характеризующими содержание основной фракции: В, П, Н и Д; для кругов **класса точности А — только с индексами В, П, Н**; для кругов класса точности АА — только с индексами В, П, т. е. с высоким и повышенным (до 55% при зернистости 200 — 4) содержанием основной фракции.

Величины предельных отклонений зависят от номинальных размеров инструментов по наружному диаметру *D*, высоте *H*, диаметру посадочного отверстия *d*.

7) Классы неуравновешенности шлифовальных кругов

Состояние шлифовального круга, характеризующееся таким распределением масс, которое во время вращения вызывает **переменные нагрузки** на опорах шпинделя станка и его изгиб, называют **неуравновешенностью** круга. Неуравновешенной точечной массой круга называют условную массу, радиус-вектор (эксцентриситет) которой относительно оси посадочного отверстия равен радиусу наружной поверхности (периферии). В зависимости от допустимых неуравновешенных масс для шлифовальных кругов на керамической, бакелитовой, вулканитовой и специальных органических связках установлено четыре класса неуравновешенности шлифовальных кругов, обозначаемых цифрами 1, 2, 3 и 4.

Допустимые неуравновешенные массы **контролируют на станках для статической балансировки**, основной частью которых являются два параллельно расположенных цилиндрических валика одинакового диаметра.

При контроле неуравновешенности **на периферии круга устанавливают грузы** с массой (с учетом массы зажимов), равной допустимой неуравновешенной массе. Если после установки круга с балансировочной оправкой на балансировочный станок контрольный груз будет подниматься и занимать верхнее положение, то такой круг не отвечает требованиям данного класса неуравновешенности по ГОСТ 3060-75.

8) При маркировке в условном обозначении кругов указывают **класс неуравновешенности**: 1, 2, 3, 4 после величины рабочей скорости круга, например: **35 м/с 1 кл. А** - маркировка для круга с **рабочей скоростью на периферии круга 35 м/с, 1-го класса неуравновешенности**, класса точности А.

Табл. 169. Типы шлифовальных кругов

Тип круга	Форма круга *	Тип круга	Форма круга *
ПП — прямого профиля		К — кольцевые	
2П — с двусторонним коническим профилем		ЧЦ — чашечные цилиндрические	
3П — с коническим профилем		ЧК — чашечные конические	
ПВ — с выточкой		1Т — тарельчатые	
ПВК — с конической выточкой		ПР — специальные	
ПВДК — с двусторонней конической выточкой		ПН — с запрессованными крепежными элементами	
ПВД — с двусторонней выточкой		ПВДС — с двусторонней выточкой и ступицей	

Тип круга	Форма круга *	Тип круга	Форма круга *
1ТП — тарельчатые		5ТП	
2ТП		6ТП	
4ТП		7ТП	

Табл. 170. Основные размеры (мм) шлифовальных кругов

Тип круга	Диаметр D	Высота H	Отверстие d	Зерно	Зернистость
<i>Круги на керамической связке</i>					
ПП	3-25	1-40	1-68	2A, 4A, 9A,	40-10
	32-150	2,5-100	6-51	2A, 4A, 9A, 5C, 6C	50-M28
	175-350	3,2-200	32-203	1A, 2A, 4A, 9A, 5C, 6C	50 — M28
	400-1060	6-250	127-305	1A, 2A, 4A, 9A, 5C, 6C	50-M28

Табл. 170. Основные размеры (мм) шлифовальных кругов

Тип круга	Диаметр D	Высота H	Отверстие d	Шлиф. материал	Зернистость
<i>Круги на керамической связке</i>					
ПП	3-25	1-40	1-68	2А, 4А, 9А, 2А, 4А, 9А, 5С, 6С	40-10
	32-150	2,5-100	6-51		50-M28
	175-350	3,2-200	32-203	1А, 2А, 4А, 9А, 5С, 6С	50 — M28
	400-1060	6-250	127-305	1А, 2А, 4 А, 9А, 5С, 6С	50-M28
2П	250-500	10-32	76-203	2А, 9А, 6С	40 — M28
3П	63-500	6-50	10-203	2А, 5А, 9А, 6С	40-16
ПВ	10-600	13-80	3-127	1А, 2А, 4А, 9А, 6С	50-6
ПВК	300-750	50-80	127-305	1 А, 2Л	50-16
ПВД	100-900	25-250	32-305	1 А, 2Л. 9А	50-16
ЧЦ	40-300	25-100	13-150	2А. 6С	50-16
ЧК	50-300	25-150	13-150	2А, 4Л	50-16
К	450-500	100, 125	305, 400	1А	50-16
Т, 1Т	80-350	8-40	13-127	2А, 4А. 6С	40-16
1ТП, 2ТП, 4ТП, 5ТП. 6ТП, 7ТП	40-260	11-32	6-32	2А	40-16
<i>Круги на бакелитовой связке</i>					
ПП	125-350	6-50	32-127	1 А, 5С, 6С	50-16
	400-900	40-200	127-305	1А, 5С, 6С	50-6
3П	100-300	6-13	20-127	1А	50-16

10) РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Разработку режима резания при шлифовании начинают с установления характеристики инструмента. Инструмент при шлифовании выбирают по данным, приведенным на с. 242-258, Т.2. Окончательная характеристика абразивного инструмента выявляется в процессе пробной эксплуатации с учетом конкретных технологических условий.

Основные параметры резания при шлифовании:

скорость вращательного (при круглом шлифовании) или поступательного (при плоском шлифовании) движения заготовки v_z (м/мин);

глубина резания (*шлифования* – **не путать с припуском** на шлифование) t (мм) – это толщина слоя металла, снимаемого периферией или торцом круга в результате поперечной подачи на каждый ход или **двойной ход при круглом или плоском шлифовании** и в результате радиальной подачи s_r при врезном шлифовании;

продольная подача s (мм/об) – это перемещение шлифовального круга вдоль его оси (при *цилиндрическом* шлифовании – вдоль *оси заготовки*) в миллиметрах на **один оборот заготовки при круглом** шлифовании или **s (мм/мин)** в миллиметрах на каждый ход стола при плоском шлифовании периферией круга (табл. 55).

поперечная подача $s_{\text{поп}}$ (мм/двойной ход стола) – это перемещение шлифовального круга в поперечном направлении (перпендикулярно продольной подачи) в миллиметрах на **каждый ход стола s (мм/ход стола)** или **двойной ход стола $s_{\text{поп}}$ (мм/двойной ход стола)** при плоском шлифовании периферией круга.

Эффективная мощность, кВт, при шлифовании периферией круга с продольной подачей

Эффективная мощность (мощность резания), кВт, при шлифовании периферией круга с продольной подачей

$$N = C_N \times v_3^r \times t^x \times s^y \times d^q \cdot (\text{кВт})$$

при врезном шлифовании периферией круга

$$N = C_N \times v_3^r \times s_p^y \times d^q \times b^z \cdot (\text{кВт})$$

при шлифовании торцом круга

$$N = C_N \times v_3^r \times t^x \times b^z \cdot (\text{кВт})$$

где ***d*** — диаметр шлифования (диаметр заготовки), мм; ***b*** - ширина шлифования, мм, равная длине шлифуемого участка заготовки при круглом врезном шлифовании и поперечному размеру поверхности заготовки при шлифовании торцом круга; ***s*** – **продольная** подача при круглом шлифовании (мм/об. заг.); ***s_p*** – **поперечная** подача при врезном шлифовании (мм/об. заг)

Значения **коэффициента *C_N*** и показателей степени в формулах приведены в табл. 56 (Т.2).

Табл. 55. Параметры резания при шлифовании, заточке и доводке

Обрабатываемый материал	Характеристика процесса	$v_{\text{круга}}$ м/с	Скорость заготовки v_z , м/мин	Глубина резания t мм	Продольная подача s , мм/об заг	Радиальная подача s_p , мм/об
	Круглое наружное шлифование					
Конструкционные металлы и инструментальные стали	продольная подача на каждый ход : предварительное окончательное продольная подача на двойной ход	30-35	12-25 15-55 20-30	0,01-0,025 0,005-0,015 0,015-0,05	$(0,3-0,7) \times B$ $(0,2-0,4) \times B$ $(0,3-0,7) \times B$	---
	Врезное: предварительное окончательное	30-35	30-50 20-40	---	---	0,0025- 0,075 0,001- 0,005
Твердые сплавы	продольн. подача: предварительное окончательное	20-30 30-35	10-20 20-30	0,0075-0,01	0,5-0,8 м/мин 0,3-0,5 м/мин	---
	Круглое внутреннее шлифование					
Конструкционные металлы и инструментальные стали	обычные станки: предварительное окончательное	30-35	20-40	0,005-0,02 0,0025-0,01	$(0,4-0,7) \times B$ $(0,25-0,4) \times B$	---
	полуавтоматически: предварительное окончательное		50-150	0,0025-0,005 0,0015-0,0025	$(0,4-0,75) \cdot B$ $(0,25-0,4) \cdot B$	----

Табл. 56. Значение коэффициента и показателей степеней в формулах мощности

Вид шлифования	Обрабатываемый материал	Шлифовальный круг		Коэффициент и показатели степени					
		Зернистость	Твердость	C_N	r	x	y	q	z
Круглое наружное подача на двойной ход; подача на каждый ход; врезное	СЗН	50-40	CM1-CM2	1,3	0,75	0,85	0,7		
		50	CM2	2,2	0,5	0,5	0,55		
		40	CM1-C1	2,65	0,5	0,5	0,55		
		50	C1	0,14	0,8	0,8	---	0,2	1,0
Круглое внутреннее	CH	40	C1	0,27	0,5	0,4	0,4	0,3	
	СЗ	50-40	CM1-C1	0,36	0,35				
		25	CM1	0,3	0,35				
	Ч	40	CM1	0,81	0,55	1,0	0,7	0,3	
Круглое бесцентровое: напроход врезное	CH	40-25	C1-CT1	0,1	0,85	0,6	0,7	0,5	-
		25	CM2	0,075					
	СЗ	40	CM1-C1	0,28					-
		25	CM1-C1	0,34	0,6	0,6	0,5	0,5	
	СЗН	40	CM1-C1	0,07	0,65	0,65	---	0,5	1,0
Плоское периферией круга на станках с: прямоугольным столом с круглым столом	CH	50	CM2	0,52	1,0	0,8	0,8		
			C1	0,59					
			CT2	0,68					
		50-40	M3-C1	0,53	0,8	0,65	0,7		
	CЗ	50-40	M3-CM1	0,7	0,7	0,5	0,5	-	-

Примечание к Табл. 56 (Значение коэффициента и показателей степеней в формулах мощности)

*¹ Круги на бакелитовой связке; во всех остальных случаях связка **керамическая**.

*² Круг кольцевой.

*³ Круг сегментный.

Примечания: 1. **СЗН** – сталь **закаленная** и **незакаленная**;

СЗ – сталь **закаленная**;

СН – сталь незакаленная;

Ч – чугун.

2. Абразивный материал: **электрокорунд** – при обработке **стали**,
карборунд —при обработке чугуна.

Порядок сдачи экзамена

Для допуска к экзамену

1. Должны быть выполнены и **правильно оформлены** все лабораторные работы;
2. Выполнены все практические работы (занятия);

На экзамене будет 2 вопроса:

1) По исследованию процессов резания при лезвийной обработке

1.1. геометрия токарного резца, с дополнительным определением геометрии свёрл, зенкеров, развёрток, фрез. Что такое **плоскость** и **поверхность** резания, основная плоскость, изменение углов в зависимости от установки резца относительно оси центров и направления подачи;

1.2. инструментальные материалы, их группы, условное обозначение с расшифровкой химического состава, область применения, наибольшая допустимая скорость резания;

1.3. процессы в зоне стружкообразования (рисунок, пояснения), определение глубины и степени наклёпа, усадка стружки, длина контакта стружки с передней поверхностью, длина пластического контакта, влияние скорости резания на величину зоны первичных пластических деформаций, температуру резания, силы резания, усадку стружки;

1.4. Определение глубины и степени пластических деформаций, остаточных напряжений;

1.5. Измерение составляющих силы резания, исследование распределения контактных напряжений на передней и задней поверхностях, вид графиков (эпюр) в зависимости от характера стружкообразования (сливная и элементная стружка);

1.6. Тепловые явления при резании, способы исследования температур;

1.7. Прочность режущих инструментов, прочность режущего клина, способы исследования НДС;

1.8. Виды (природа) износа, зоны износа (где износ), характер изменения длины фаски износа h_z по задней и передней поверхности ($C_{\text{лунки}}$), влияния скорости резания на график изменения h_z , критерии предельного износа (признаки предельного износа), стойкость инструмента, оптимальная стойкость, влияние нароста на стойкость;

1.9. Обрабатываемость;

1.10. Смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), их виды, области применения, способы подачи СОЖ;

2) Пояснения по слайдам после ответа на первый вопрос

3.1. зона стружкообразования;

3.2. конструкция 3-х компонентного токарного динамометра, 4-х компонентного динамометра для исследования распределения контактных напряжений;

3.3. исследование НДС режущего клина;

3.4. стойкостные зависимости;

3.5. виды резцов, порядок расчёта режима резания при токарной обработке, расчёт сил и мощности, виды СМП и способы их крепления, фасонные резцы, основы расчёта профиля;

3.6. протяжки, их виды, схемы резания, основы расчёта;

3.7. мерные режущие инструменты (свёрла и их виды, зенкеры, развёртки), особенность геометрии и применения, заточка свёрл, свёрла ружейные и БТА;

Порядок сдачи экзамена (продолжение)

3.8. фрезерование, виды фрез и их условное обозначение, особенность геометрии, порядок назначения режимов резания, составляющие силы резания при фрезеровании;

3.9. обработка резьбы и зубчатых колёс, основные способы и применяемые инструменты, расчёт режимов резания;

3.10. абразивная обработка, условное обозначение шлифовальных кругов и их выбор, режимы резания, расчёт мощности станка