

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

# ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ. РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальностей  
1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных  
процессов обработки материалов»  
и 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов  
и производств (по направлениям)»  
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2021

УДК 621.9.02  
ББК 34.59  
О-23

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»  
«12» января 2021 г., протокол № 7

Составители: ст. преподаватель А. Э. Липский;  
ст. преподаватель М. А. Рабыко

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации предназначены к практическим занятиям для студентов специальностей 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов» и 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)».

Учебно-методическое издание

## ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ. РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Ответственный за выпуск	С. Н. Хатетовский
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать 9.02.2021 . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2.55 . Уч.-изд. л. 2.75 . Тираж 38 экз. Заказ № 79.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

1 Практическое занятие «Расчет и проектирование призматических фасонных резцов».....	4
1.1 Общие сведения.....	4
1.2 Методика проектирования призматических фасонных резцов.....	4
1.3 Варианты заданий для проектирования.....	14
2 Практическое занятие «Расчет и проектирование круглых фасонных резцов».....	14
2.1 Общие сведения.....	14
2.2 Методика проектирования круглых фасонных резцов.....	15
2.3 Варианты заданий для проектирования.....	20
3 Практическое занятие «Расчет и проектирование фасонных фрез».....	20
3.1 Общие сведения.....	20
3.2 Методика проектирования фасонных фрез.....	21
3.3 Варианты заданий для проектирования.....	26
4 Практическое занятие «Проектирование и расчет протяжек для обработки отверстий».....	27
4.1 Общие сведения.....	27
4.2 Методика проектирования протяжек для обработки круглых отверстий .....	33
4.3 Варианты заданий для проектирования.....	43
Список литературы.....	44

# 1 Практическое занятие «Расчет и проектирование призматических фасонных резцов»

**Цель занятия:** ознакомить студентов с последовательностью расчета и проектирования призматических фасонных резцов с углом наклона режущей кромки  $\lambda$ , равным нулю (обычной заточки), работающих с радиальной подачей.

## 1.1 Общие сведения

Фасонные резцы применяются для обработки поверхностей сложного профиля на станках токарной группы и реже на строгальных или долбежных станках в условиях серийного и массового производства. Как правило, они являются специальными инструментами, предназначенными для обработки одной детали. Фасонные резцы обеспечивают строгую идентичность обработанных деталей, большое количество переточек, высокую общую и размерную стойкость, совмещение предварительной и окончательной обработки, простоту установки и наладки на станке, что делает их незаменимыми в автоматизированном производстве, особенно на токарных автоматах.

По форме фасонные резцы можно разделить на три основных вида – стержневые, призматические и круглые.

Основным преимуществом призматических фасонных резцов является то, что они позволяют делать большее число переточек, чем стержневые. Крепление и базирование резца в резцедержателе осуществляется с помощью хвостовика типа ласточкина хвоста. Недостаток призматических резцов – невозможность обработки внутренних фасонных поверхностей.

## 1.2 Методика проектирования призматических фасонных резцов

*1.2.1 Подготовка чертежа обрабатываемой детали.* Для облегчения получения размеров детали внутри своих допусков необходимо определить срединные размеры детали с учетом их допусков. Например, если задан участок профиля детали с диаметром  $50b12 \begin{pmatrix} -0,18 \\ -0,43 \end{pmatrix}$ , тогда срединный размер равен 49,695, а расчетное значение радиуса – 24,847 мм.

Если размер проставлен на чертеже без допуска, то он принимается по 10 и 11-му квалитетам точности, при этом для охватываемых размеров ставится знак «+», для охватываемых – «-», для прочих – «±». Как правило, допуски продольных размеров профиля и радиусов дуговых участков принимаются симметричными, поэтому за расчетные размеры могут быть приняты их номиналы.

Следует отметить, что точением фасонным резцом можно получить деталь с размерами не точнее 9-го квалитета точности. В случае, если на чертеже детали проставлены допуски более высоких квалитетов (8–6), к номинальному диаметру добавляются припуски, необходимые под последующую обработку (0,4...0,6 мм) с последующим назначением допуска по 10 и 11-му

квалитетам точности.

Дуговые участки профиля разбивают путем нанесения промежуточных точек (обычно суммарное количество точек равно пяти или девяти) с указанием их радиусов и продольных размеров (рисунок 1.1).

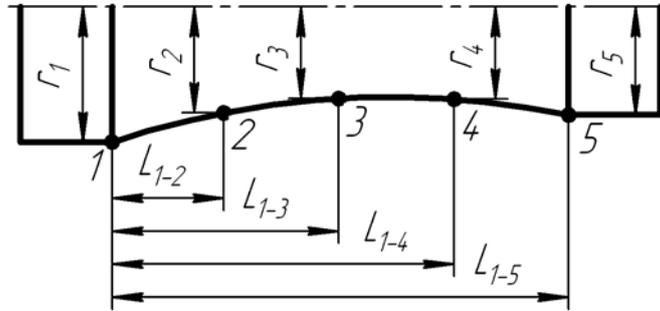


Рисунок 1.1 – Схема к определению радиусов промежуточных точек дугового участка детали

*1.2.2 Определение геометрических параметров режущей части.* Передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы фасонных резцов задаются для наиболее выступающей (базовой) точки, устанавливаемой на оси детали, в сечении плоскостью, перпендикулярной базе крепления резца.

Передние и задние углы резцов задаются исходя из физико-механических свойств обрабатываемого материала. Так, на основании рекомендаций, приведенных в [1, 2], принимаются следующие величины передних углов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Значение передних углов фасонных резцов в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала

Обрабатываемый материал	Механическое свойство				Передний угол, град
	Прочность $\sigma_B$ , МПа		Твердость НВ		
	свыше	до	свыше	до	
Медь, алюминий	–	–	–	–	20...25
Сталь		500		150	25
Сталь	500	800	150	235	20...25
Сталь	800	1000	235	290	12...20
Сталь	1000	1200	290	350	8...12
Бронза, свинцовистая латунь	–	–	–	–	0...5
Чугун	–	–	–	150	15
Чугун	–	–	150	200	12
Чугун	–	–	200	250	8

Задний угол призматических резцов назначается в пределах 10...15 град. Следует отметить, что задние углы переменны в различных точках режущей кромки резца. В сечении, нормальном к проекции режущей кромки на основную плоскость, задние углы могут быть на отдельных участках намного мень-

ше номинального значения. Поэтому необходимо производить проверку минимальной величины нормального заднего угла по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_{nx} = \operatorname{tg} \alpha_{ix} \cdot \sin \varphi_x, \quad (1.1)$$

где  $\alpha_{ix}$  – задний угол в данной точке в торцовом сечении, град;

$\varphi_x$  – угол между касательной к профилю резца в данной точке и торцовой плоскости детали.

Угол  $\alpha_{nx}$  не должен быть меньше  $3^\circ$ . В случае, если на отдельном участке нормальный задний угол меньше указанной величины, допускается увеличение заднего торцового угла резца до  $20^\circ$ .

На участках режущей кромки, перпендикулярных базе резца, задний угол обычно равен нулю, и, как следствие, на данном участке происходит затирание задней поверхности резца по обработанной поверхности детали. Затирание приводит к интенсивному изнашиванию контактного участка и к снижению периода стойкости резца. В таких случаях на указанных участках обычно делают поднутрение (рисунок 1.2).

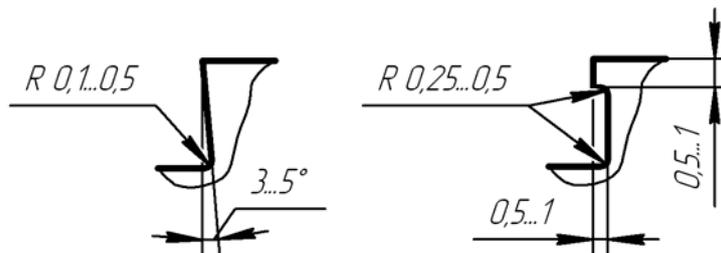


Рисунок 1.2 – Формирование режущих кромок, перпендикулярных базе резца

На задний угол резца оказывают влияние параметры процесса точения, такие как подача и скорость резания. Исходя из этого, необходимо определить для каждой точки профиля задние кинематические углы.

Кинематический задний угол  $\alpha_k$  измеряется между линией, на которой лежит вектор скорости результирующего движения  $V_e$ , и касательной к следу пересечения главной задней поверхности резца поверхностью траектории. Определяется по формуле [3, 4]

$$\alpha_k = \alpha - \eta_i, \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – задний угол, град;

$\eta$  – угол подъема винтовой траектории результирующего движения, град.

Результирующей траекторией одновременно действующих главного и вспомогательного движений является винтовая траектория режущего лезвия. Если сделать развертку диаметра  $D$  окружности детали в рассматриваемой точке, то угол подъема  $\eta$  винтовой поверхности будет связан со скоростью резания  $V_i$  и подачей  $S$  следующей зависимостью:

$$\operatorname{tg} \eta_i = \frac{S}{V_i} = \frac{1000 \cdot S}{\pi \cdot n \cdot D_i}. \quad (1.3)$$

Угол  $\alpha_{ki}$  не должен быть меньше  $3^\circ$ . В случае, если на отдельном участке угол меньше указанной величины, то допускается увеличение заднего торцового угла резца до  $20^\circ$ .

*1.2.3 Определение габаритных и присоединительных размеров резца.* Обычно габаритные и присоединительные размеры призматических резцов определяются из конструктивных соображений в зависимости от глубины фасонного профиля изделия  $t$  и длины профиля  $L$  в соответствии с таблицей 1.2 и рисунком 1.3.

Таблица 1.2 – Размеры призматических фасонных резцов

Глубина профиля изделия $t$ , мм	Размер резца, мм						Размер $M$ при разных диаметрах ролика $d$			
	$B$	$H$	$E_{-0,03}$	$A$	$F$	$R$	$d \pm 0,05$	$M \pm 0,05$	$D \pm 0,05$	$M \pm 0,05$
До 4	13	75	4	15	7	0,5	3	18,577	4	21,31
До 6	20	75	6	20	10	0,5	4	24,000	6	29,46
До 10	25	75	6	25	15	0,5	4	29,000	6	34,46
До 14	85	90	10	30	20	1	6	34,846	10	45,77
До 20	45	90	10	40	25	1	6	44,846	10	55,77
До 28	60	100	15	60	40	1	8	64,536	15	83,66

Глубина фасонного профиля определяется из выражения

$$t = \frac{D_{ДЕТ. \max} - D_{ДЕТ. \min}}{2}, \quad (1.4)$$

где  $D_{ДЕТ. \max}$  – максимальный диаметр детали, мм;

$D_{ДЕТ. \min}$  – минимальный диаметр детали, мм.

При наличии контрольных роликов других диаметров  $d$  (см. рисунок 1.3) размер  $M$  можно рассчитать по формуле

$$M = A + d(1 + \operatorname{ctg} 30^\circ) - 2F \cdot \operatorname{ctg} 60^\circ. \quad (1.5)$$

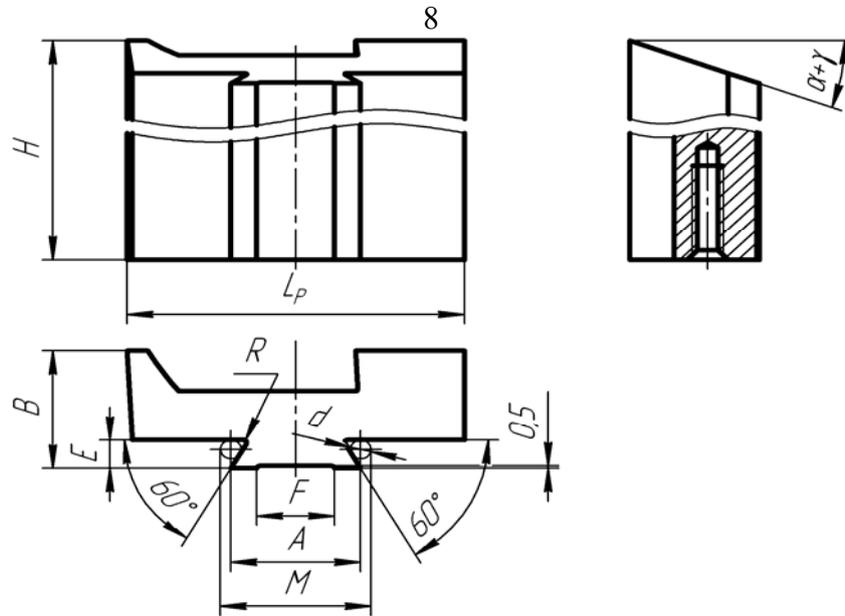


Рисунок 1.3 – Габаритные и присоединительные размеры призматических фасонных резцов

Следует отметить, что для обеспечения более жесткого крепления призматического фасонного резца в резцедержателе целесообразно при выборе габаритных и присоединительных размеров придерживаться условия  $L_p \leq 2,5A$ .

При проектировании фасонного резца иногда необходимо сформировать дополнительные режущие кромки, осуществляющие обработку фаски и кольцевой канавки под отрезной резец [5].

Размеры дополнительных кромок целесообразно выбирать исходя из рекомендаций, приведенных на рисунке 1.4.

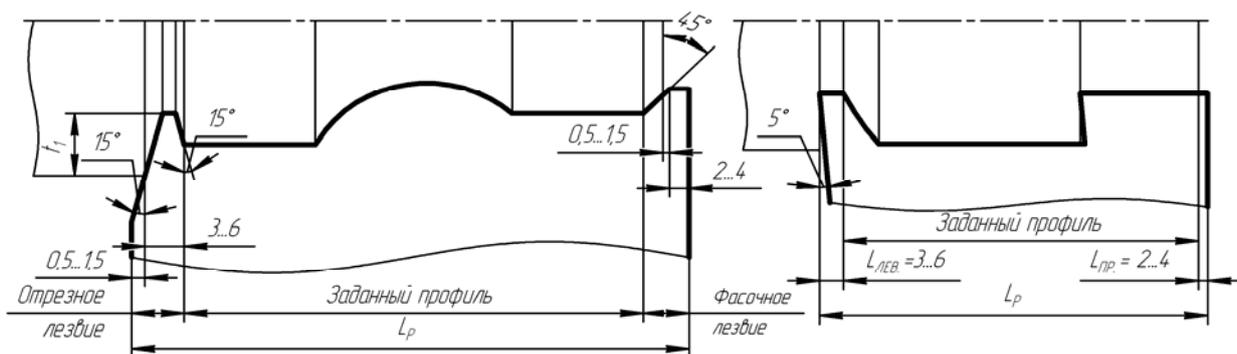


Рисунок 1.4 – Оформление дополнительных режущих кромок резцов

**1.2.4 Расчет параметров профиля резца.** Из-за наличия заднего и переднего углов профиль резца в нормальном к задней поверхности сечении не совпадает с профилем детали, поэтому подлежат коррекции высотные размеры профиля фасонного резца.

К профилю фасонных резцов предъявляются высокие требования в отношении точности размеров. Коррекционные расчеты необходимо производить с точностью до 0,001 мм для линейных и до 1" для угловых размеров.

Расчетная схема для определения искомых параметров представлена на рисунке 1.5.

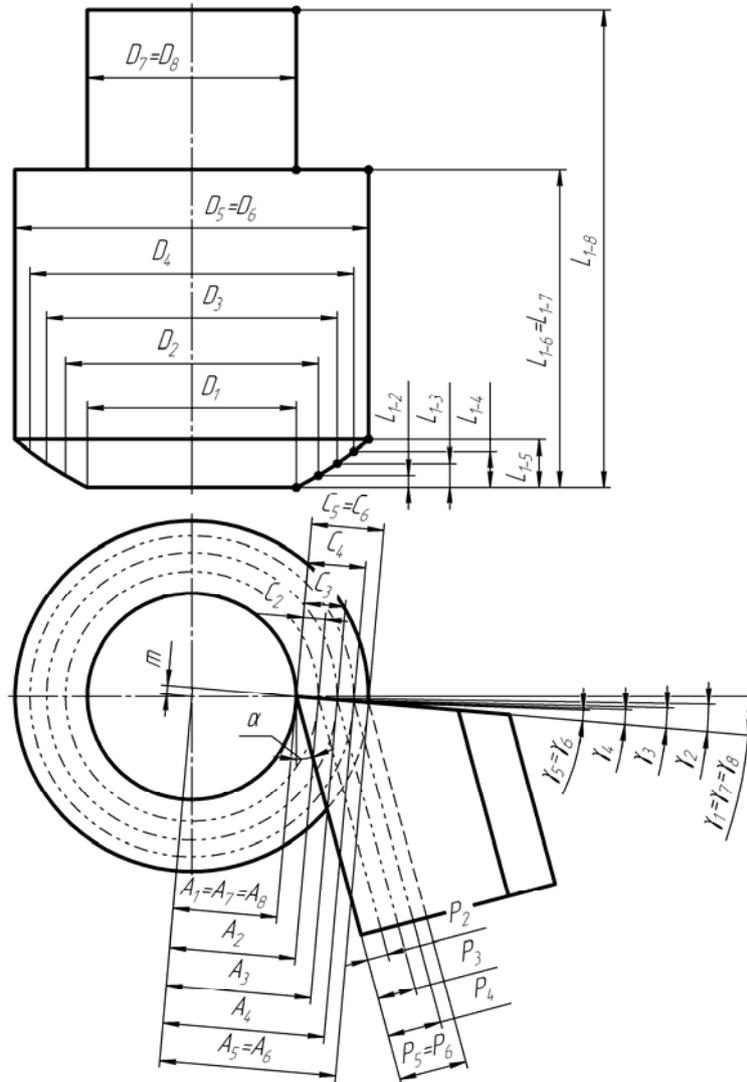


Рисунок 1.5 – Схема к расчету параметров профиля призматического резца

Вспомогательная величина

$$m = r_B \cdot \sin \gamma, \quad (1.6)$$

где  $r_B$  – радиус на детали базовой точки резца.

Передний угол в  $i$ -й узловой точке

$$\gamma_i = \arcsin \left( \frac{m}{r_i} \right). \quad (1.7)$$

Вспомогательная величина определяется по формуле

$$A_i = r_i \cdot \cos \gamma_i. \quad (1.8)$$

Расстояние ключевых точек от первой точки в передней плоскости

$$C_i = A_i - A_B. \quad (1.9)$$

Угол режущего клина в ключевых точках

$$\varepsilon_i = \gamma_i + \alpha_i. \quad (1.10)$$

Расстояние от ключевых точек в плоскости нормальной задней поверхности

$$P_i = C_i \cdot \cos \varepsilon_i. \quad (1.11)$$

*1.2.5 Расчет допусков на размеры профиля.* Погрешность каждого  $i$ -го радиуса детали, кроме базового  $R_B$ , будет складываться из погрешности базового радиуса  $\delta R_B$  и погрешности высотного размера  $\delta h_i$ , переносимого с резца на деталь,

$$\delta R_i = \delta R_B + \delta h_i. \quad (1.12)$$

Из выражения (1.12) известно, какая погрешность может быть допущена при переносе каждого высотного размера с резца на деталь  $\delta h_i$ . Эта погрешность возникает как сумма погрешностей, вызванных неточностями высоты профиля резца  $\delta P_i$ , а также неточностями заточки и установки резца на станке.

Принято при расчете допусков на высотные размеры резца из всех допустимых погрешностей  $\delta h_i$  выбирать наименьшую  $\delta_{\min}$  и половину ее отводить на погрешности соответствующего размера  $h_i$ , возникающие от неточности заточки и установки резца. Погрешности от заточки и установки для других точек  $\delta h_{з.у.i}$  пропорциональны соответствующим высотным размерам  $P'_i$ :

$$\delta h_{з.у.i} = 0,5 \delta_{\min} \frac{P'_i}{P'_{\delta_{\min}}}. \quad (1.13)$$

Найдя их, определяют допустимые погрешности высот  $h_i$  от неточного выполнения высотных размеров профиля:

$$\delta h_{P_i} = \delta h_i - \delta h_{з.у.i}. \quad (1.14)$$

Ввиду того, что погрешности высотных размеров  $\delta P'_i$  переносятся на деталь с некоторым искажением, как и сами размеры  $P'_i$ , допустимая погрешность высоты профиля  $\delta P'_i$  находится из пропорции

$$\frac{\delta P_i'}{\delta h_{P_i'}} = \frac{P_i'}{h_i}. \quad (1.15)$$

Отсюда

$$\delta P_i' = \delta h_{P_i'} \frac{P_i'}{h_i}. \quad (1.16)$$

Эта величина является допуском на соответствующую высоту профиля резца  $P_i'$ . Обычно верхнее и нижнее отклонения проставляются симметрично, т. е. равны  $0,5\delta P_i'$ .

В большинстве случаев допуски на продольные размеры детали значительно шире, чем на ее диаметры. Поэтому допустимо приближенное назначение допусков на продольные размеры профиля резца. При этом допуски размеров резца берутся в 2–3 раза уже, чем допуски соответствующих размеров детали.

*1.2.6 Расчет режимов резания.* Режимы резания при обработке фасонными резцами назначают исходя из рекомендаций, приведенных в [6]. Глубину резания назначают аналогично, как и при обработке канавок, т. е. равной ширине резания.

Подачу принимают исходя из вида обработки и необходимого качества обрабатываемой поверхности в соответствии с рекомендациями, приведенными в [6, с. 269, таблица 16].

Допускаемую скорость резания при фасонном точении рассчитывают по формуле [6, с. 265]

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot S^y} K_v. \quad (1.17)$$

В рамках учебного процесса период стойкости фасонного резца  $T$  можно принять равным 240 мин.

Поправочный коэффициент  $K_v$  представляет собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания [6, с. 261–263]:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{uv} \cdot K_{\phi v} \cdot K_{\phi}, \quad (1.18)$$

где  $K_{mv}$  – коэффициент, учитывающий влияние свойства обрабатываемого материала на скорость резания;

$K_{uv}$  – коэффициент, учитывающий влияние состояния поверхности заготовки на скорость резания;

$K_{\phi v}$  – коэффициент, учитывающий влияние инструментального материала на скорость резания;

$K_{\phi}$  – поправочный коэффициент, учитывающий фасонное точение.

После расчета скорости резания определяют число оборотов шпинделя  $n$ , мин<sup>-1</sup>, обеспечивающее скорость резания по наибольшему диаметру детали:

$$n = \frac{12 \cdot 1000 \cdot V}{\pi \cdot D_{ДЕТ, \max}}. \quad (1.19)$$

По паспорту станка вместо расчетного значения числа оборотов принимается ближайшее значение, обеспечиваемое коробкой скоростей станка, но не превышающее 5 % расчетного. После чего производится пересчет скорости резания по наибольшему диаметру детали.

Рассчитывают тангенциальную  $P_z$  составляющую силы резания по формуле [6, с. 271]

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot v^n \cdot K_p. \quad (1.20)$$

Поправочный коэффициент  $K_p$  представляет собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания [6, с. 271]:

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{rp},$$

где  $K_{mp}$  – коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала.

Остальные коэффициенты выбираем, как для самых неблагоприятных условий:

$K_{\varphi p}$  – коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане  $\varphi$ ;

$K_{\gamma p}$  – коэффициент, учитывающий влияние переднего угла  $\gamma$ ;

$K_{\lambda p}$  – коэффициент, учитывающий влияние угла наклона главного режущего лезвия;

$K_{rp}$  – коэффициент, учитывающий влияние радиуса при вершине.

Мощность, затрачиваемую на резание, рассчитывают по формуле [6]

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}. \quad (1.21)$$

*1.2.7 Выбор инструментального материала.* Производительность механической обработки в значительной степени зависит от качества применяемого режущего инструмента, и особенно его режущей части. Свойства материала, из которого выполнена режущая часть инструмента, определяют допустимый предел механической и тепловой нагрузок на режущую кромку, а следовательно, на диапазон скоростей резания и сечений срезаемого слоя. Следовательно, выбор материала для изготовления рабочей части фасонных резцов зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, принятой скорости резания и силовых нагрузок.

Фасонные резцы изготавливают из быстрорежущих сталей марок Р6М5 (при точении со скоростью резания до 20 м/мин), Р18, Р9К10 (при точении со скоростью резания 22...45 м/мин), Р10К5Ф5 (при точении со скоростью резания 45...60 м/мин) и твёрдых сплавов (при отсутствии вибраций и ударных

нагрузок и точении со скоростью резания более 60 м/мин) марок ВК10М, ТТ7К12, Т5К12В [7].

*1.2.8 Выбор державки для крепления фасонного резца.* Для крепления фасонного резца в резцедержателе или револьверной головке станка необходимо применять специальные державки. Конструктивные особенности державок в большей степени зависят от особенностей присоединительных поверхностей применяемого станочного оборудования.

Державки фасонных резцов должны удовлетворять следующим требованиям:

- конструкция державки должна быть простой и обеспечивать надежность и жесткость закрепления резца;
- необходима быстрая предварительная установка и точная регулировка высоты базовой точки лезвия резца по высоте оси детали;
- для державок, используемых на автоматах, необходима быстрая точная установка базовой точки лезвия резца на высоте оси детали;
- для державок всех типов необходимо согласование размеров державки с размерами рабочего пространства и суппорта применяемого станка.

Конструкции державок фасонных резцов приводятся в [1, 2].

Пример державки для крепления фасонного резца в резцедержателе токарного станка представлен на рисунке 1.6.

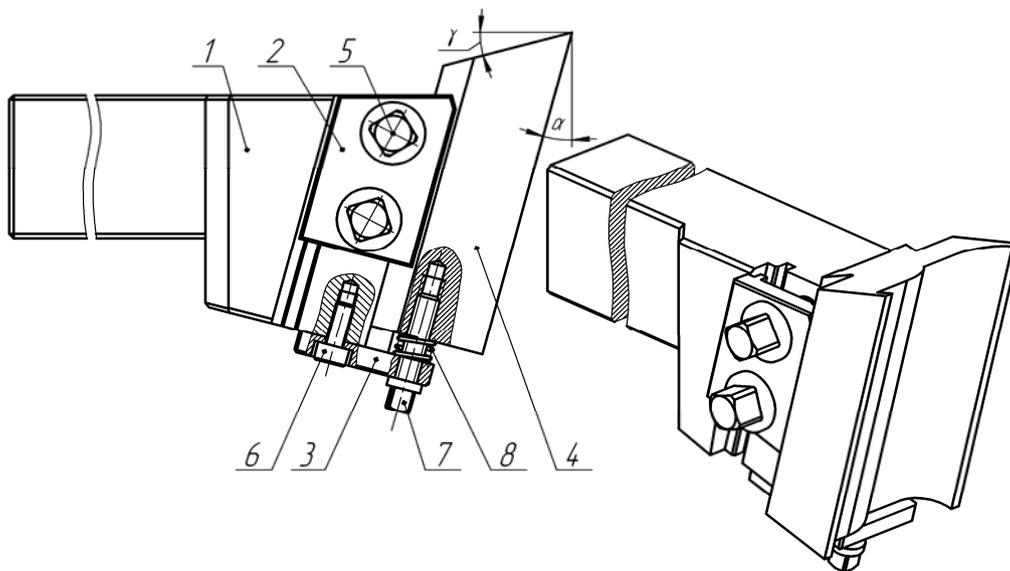


Рисунок 1.6 – Пример державки для фасонных призматических резцов

Резец 4 закрепляется на державке 1 прижимной планкой 2 при помощи двух винтов 5. Установка вершины резца относительно центра детали осуществляется при помощи механизма, состоящего из регулировочного винта 7, пружины 8 и планки 3, которая при помощи двух винтов 6 крепится к державке 1.

### 1.3 Варианты заданий для проектирования

Спроектировать фасонный призматический резец в соответствии с заданием таблицы 1.3 и рисунком 1.7.

Таблица 1.3 – Варианты задания на проектирование фасонного призматического резца

Исходные данные	Вариант		
	1	2	3
Обрабатываемый материал	Сталь Ст 3	Чугун СЧ15	Латунь
Эскиз детали (см. рисунок 1.7)	1	2	3

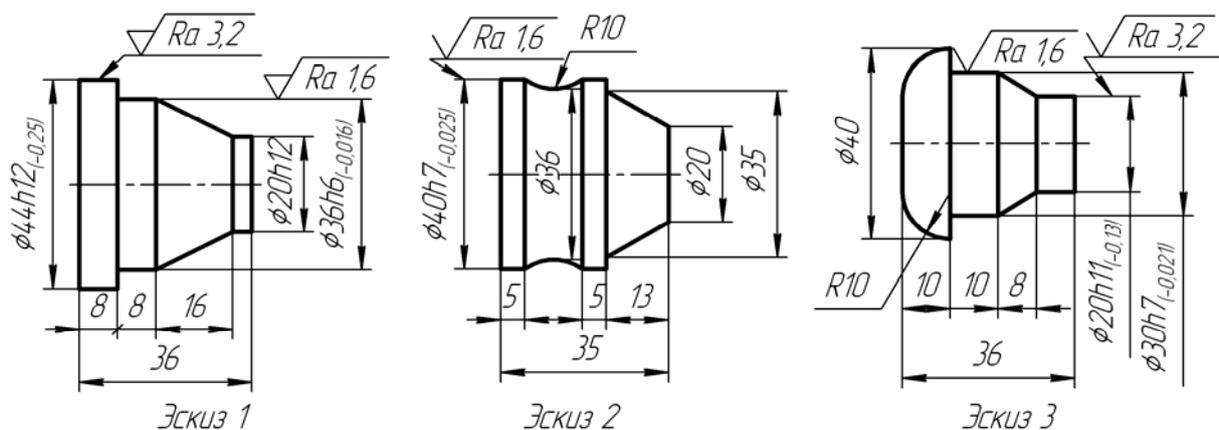


Рисунок 1.7 – Эскизы деталей для расчета фасонных резцов

#### Контрольные вопросы

- 1 Назначение фасонных резцов.
- 2 Преимущества фасонных резцов.
- 3 Основные виды фасонных резцов.
- 4 Крепление фасонных резцов.
- 5 Недостатки призматических фасонных резцов.

## 2 Практическое занятие «Расчет и проектирование круглых фасонных резцов»

**Цель занятия:** ознакомить студентов с последовательностью расчета и проектирования круглых фасонных резцов с углом наклона режущей кромки  $\lambda$ , равным нулю (обычной заточки), работающих с радиальной подачей.

### 2.1 Общие сведения

Круглые фасонные резцы применяются для обработки как наружных, так и внутренних поверхностей, они более технологичны при изготовлении, но слож-

нее в установке. По сравнению с призматическими круглые фасонные резцы имеют большее количество переточек и, как следствие, больший срок службы.

## 2.2 Методика проектирования круглых фасонных резцов

2.2.1 *Подготовка чертежа обрабатываемой детали.* При проектировании круглого фасонного резца подготовка чертежа осуществляется, как и для призматического, согласно методике, описанной в п. 1.2.1.

2.2.2 *Определение геометрических параметров режущей части.* Передние и задние углы круглых фасонных резцов назначаются, как и для призматических, с той лишь разницей, что задний угол принимается в пределах 8...12 град.

Учитывая конструкцию круглого резца, его задний угол обеспечивается путем подъема оси резца относительно оси детали на величину

$$h_p = R_{II} \cdot \sin \alpha, \quad (2.1)$$

где  $R_{II}$  – радиус резца, мм.

Минимальную величину нормального заднего угла можно рассчитать по формуле [5, с. 108]

$$\operatorname{tg} \alpha_{nx} = \frac{D}{D_i} \operatorname{tg} \alpha_{ix} \cdot \sin \varphi_x, \quad (2.2)$$

где  $\alpha_{ix}$  – задний угол в данной точке в торцовом сечении, град;

$\varphi_x$  – угол между касательной к профилю резца в данной точке и торцовой плоскостью детали;

$D$  – диаметр резца, мм;

$D_i$  – диаметр резца в  $i$ -й точке, мм.

В случае, если на отдельном участке нормальный задний угол меньше  $3^\circ$ , допускается увеличение заднего торцового угла резца до  $15^\circ$ .

2.2.3 *Определение габаритных и присоединительных размеров резца.* Габаритные и присоединительные размеры круглых резцов определяются из конструктивных соображений в зависимости от глубины фасонного профиля изделия  $t$  и длины профиля  $L$ .

Габаритный радиус круглых фасонных резцов рассчитывается по формуле

$$R_U = \frac{t_{\max} + e + K + \frac{d_0}{2}}{\cos \alpha}, \quad (2.3)$$

где  $t_{\max}$  – максимальная глубина фасонного профиля изделия, мм;

$e$  – глубина заточки по передней поверхности [5, с. 109], мм;

$K$  – толщина тела резца [5, с. 109],  $K = 8...10$  мм;

$d_0$  – диаметр посадочного отверстия [5, с. 109], мм.

Величины  $e$  и  $d_0$  выбираются в зависимости от глубины профиля детали  $t$  по таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения  $e$  и  $d_0$  для круглых фасонных резцов

Глубина фасонного профиля изделия $t$	$e$	$d_0$
До 6	3	13
До 8	3	16
До 15	4	22
До 25	5	27

Наибольший диаметр резца округляется в большую сторону до величин из нормального ряда линейных размеров по ГОСТ 6636–69.

Конструктивные размеры резца можно выбрать в зависимости от глубины профиля изделия. Диаметр резца  $D_H$  обычно в 6–8 раз больше глубины профиля. Такие данные приведены в таблице 2.2 и на рисунке 2.1.

С одной из боковых сторон резца выполняют буртик с рифлениями ( $z = 32...34$ ) для восприятия силы резания и для поворота резца  $1/z$  после его переточек.

Размеры дополнительных кромок целесообразно выбирать исходя из рекомендаций, приведенных на рисунке 1.4.

Таблица 2.2 – Размеры круглых фасонных резцов

Глубина профиля изделия до	Размер резца			Размер рифлений		
	$D_H(h8)$	$d_0(h7)$	$d_1$	$r$	$d_1$	$l$
4	30	10	16	1	16	3
6	40...50	16	20	1	20	3
8	50...70	16	25	1	26	3
10	60...80	22	34	2	32	3
12	70...90	22	34	2	35	4
15	80...100	22	34	2	40	4
18	90...110	27	40	2	45	5
21	100...120	27	40	2	50	5

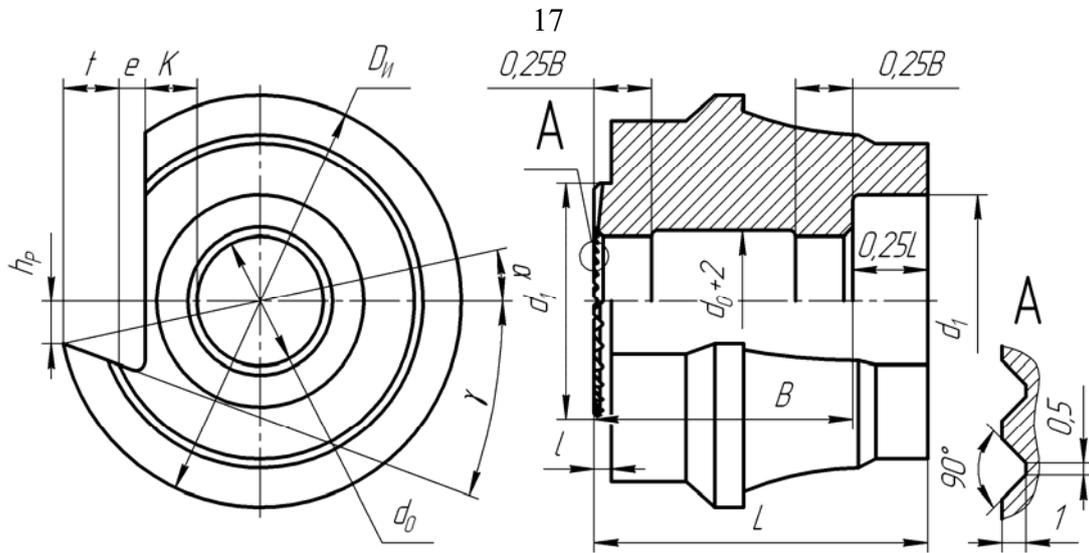


Рисунок 2.1 – Габаритные и присоединительные размеры фасонных резцов

2.2.4 *Расчет параметров профиля резца.* Расчетная схема для определения искомых параметров представлена на рисунке 2.2.

Вспомогательная величина

$$m = r_B \cdot \sin \gamma, \quad (2.4)$$

где  $r_B$  – радиус на детали базовой точки резца.

Вспомогательная величина  $H$ , мм, образующаяся величиной угла резания (высота заточки резца),

$$H = R_{И} \cdot \sin (\alpha + \gamma). \quad (2.5)$$

Расстояние от центра резца до базовой точки в плоскости передней поверхности

$$B_B = R_{И} \cdot \cos (\alpha + \gamma). \quad (2.6)$$

Вспомогательная величина

$$A_i = r_i \cdot \cos \gamma_i. \quad (2.7)$$

Расстояние ключевых точек от базовой точки в передней плоскости

$$C_i = A_i - A_B. \quad (2.8)$$

Расстояние от центра резца до ключевых точек в плоскости передней поверхности

$$B_i = B_B - C_i. \quad (2.9)$$

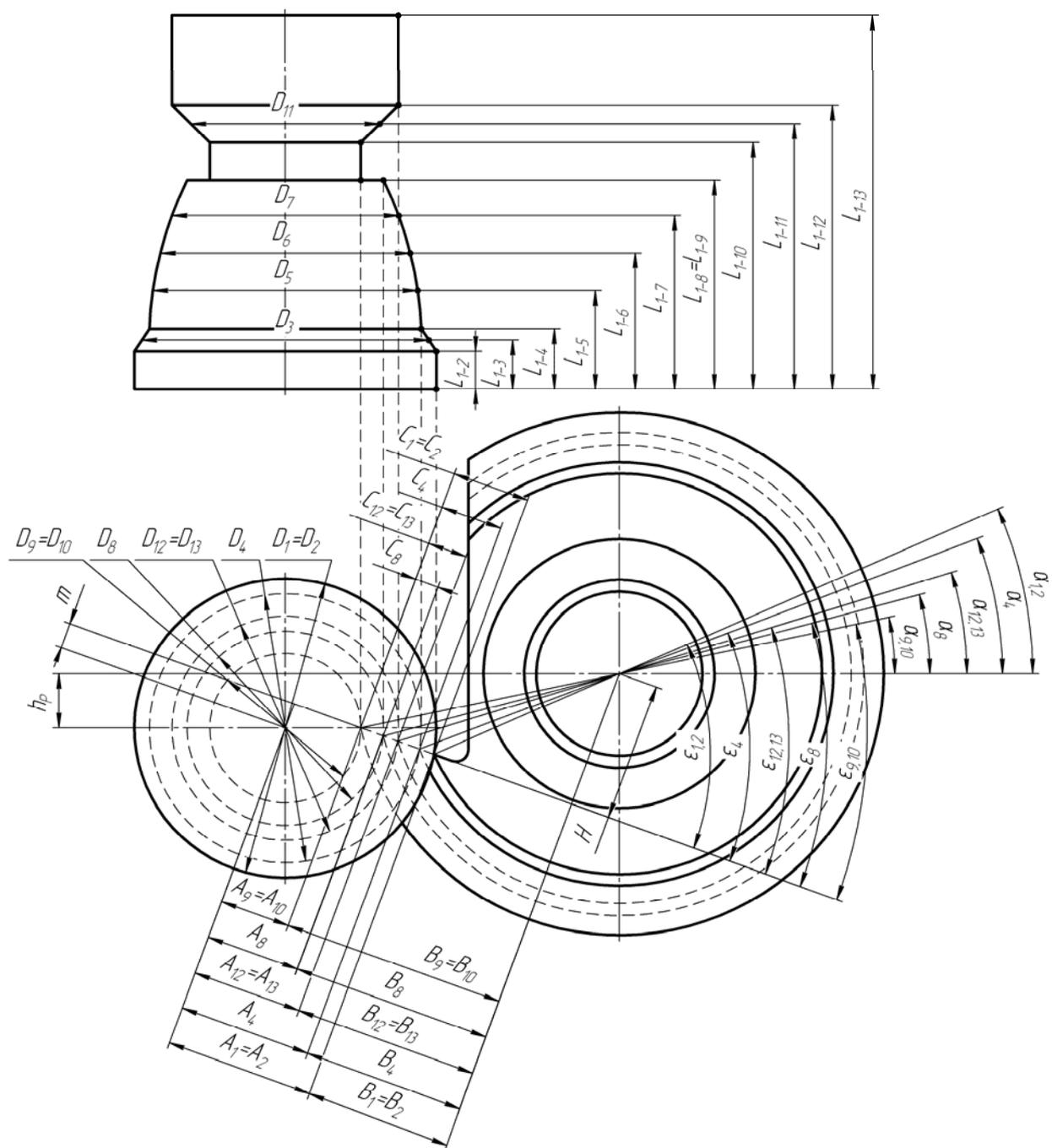


Рисунок 2.2 – Схема к расчету параметров профиля призматического резца

Угол между линией, проведенной от центра резца до ключевой точки и передней поверхностью режущего клина,

$$\varepsilon_i = \text{atctg} \frac{H}{B_i}. \quad (2.10)$$

Радиус окружности резца, на которой лежит ключевая точка,

$$R_i = \frac{H}{\sin \varepsilon_i}. \quad (2.11)$$

Расстояние от ключевых точек в плоскости нормальной задней поверхности

$$P_i = R_{II} - R_i. \quad (2.12)$$

2.2.5 *Расчет допусков на размеры профиля.* Аналогично п. 1.2.5.

2.2.6 *Расчет режимов резания.* Аналогично п. 1.2.6.

2.2.7 *Выбор инструментального материала.* Аналогично п. 1.2.7.

2.2.8 *Выбор державки для крепления фасонного резца.* Пример державки для крепления фасонного резца в резцедержателе токарного станка представлен на рисунке 2.3.

Резец *1* базируется в резцедержателе *2* по отверстию и торцу, на котором сделан буртик с рифлениями, а вершину в осевой плоскости изделия устанавливаем путем поворота резца вокруг оси при помощи рычага *4* и винта *6*. Торцовые зубья на резце сопрягаются с торцовыми зубьями рычага, устанавливаемого на одной оси *3* с резцом. Рычаг поворачиваем поворотом винта *6*.

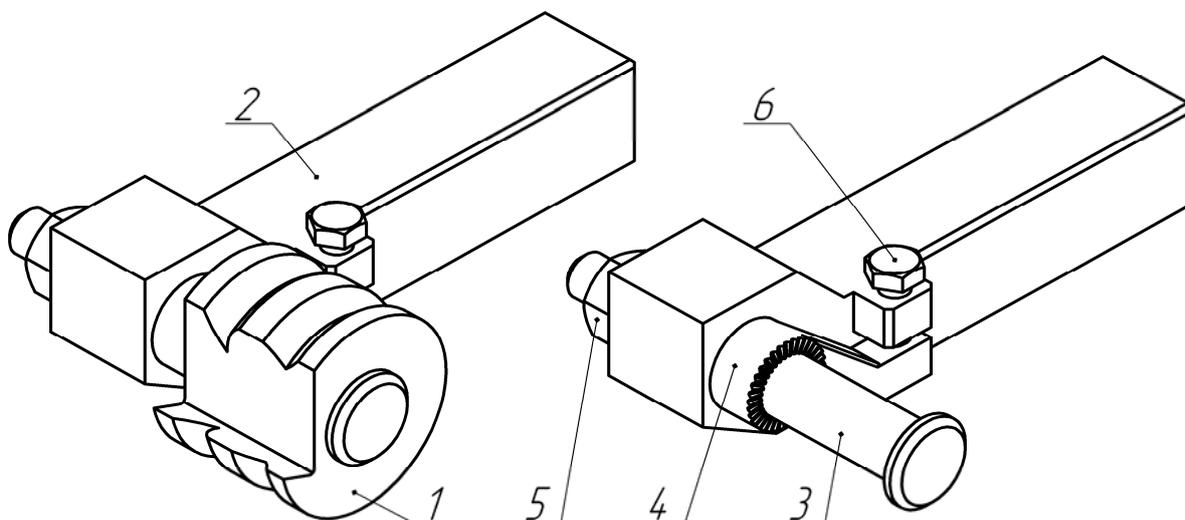


Рисунок 2.3 – Пример державки для фасонных круглых резцов

### 2.3 Варианты заданий для проектирования

Спроектировать круглый фасонный резец в соответствии с заданием таблицы 2.3 и рисунком 2.4.

Таблица 2.3 – Варианты задания на проектирование фасонного призматического резца

Исходные данные	Вариант		
	1	2	3
Обрабатываемый материал	Сталь Ст 3	Чугун СЧ15	Латунь
Эскиз детали (см. рисунок 2.4)	1	2	3

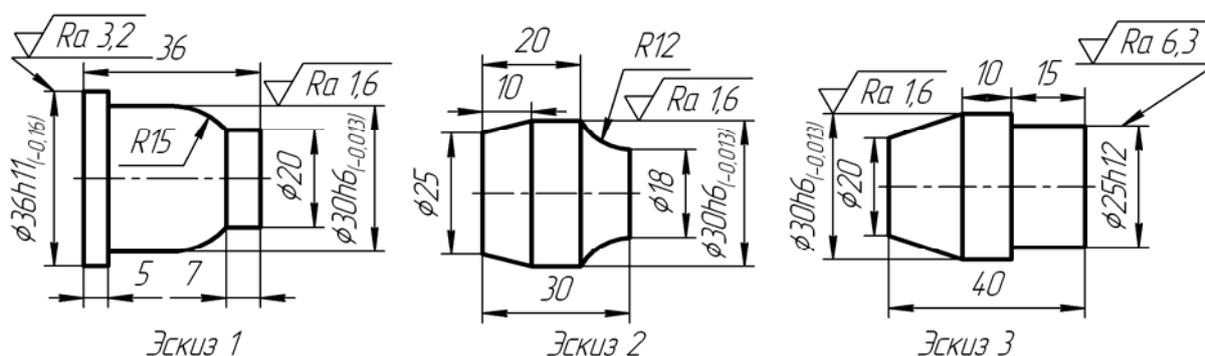


Рисунок 2.4 – Эскизы деталей для расчета фасонных резцов

#### Контрольные вопросы

- 1 Назначение круглых фасонных резцов.
- 2 Основные виды фасонных резцов.
- 3 Преимущества круглых фасонных резцов.
- 4 Определение габаритных и присоединительных размеров фасонных резцов.
- 5 Недостатки фасонных резцов.

## 3 Практическое занятие «Расчет и проектирование фасонных фрез»

**Цель занятия:** ознакомить студентов с последовательностью расчета и проектирования фасонных затылованных фрез.

### 3.1 Общие сведения

Фасонные фрезы широко используются в промышленности при наружной обработке прямых и винтовых канавок на призматических и цилиндрических деталях, а также на различных режущих инструментах (сверлах, зенкерах, развертках, метчиках, фрезах и др.). Фрезы с остроконечными зубьями для этого не применяют. У них после изнашивания за каждую переточку задняя поверх-

ность по всему контуру должна формироваться как бы заново, что осложняет эксплуатацию таких фрез. Их применяют для фрез с несложным фасонным контуром, переточка которых по профилю не создает больших трудностей.

Дисковые фасонные фрезы делают, как правило, с затылованными зубьями, чтобы получить необходимый положительный задний угол. Основное преимущество фрез с затылованными зубьями состоит в том, что их профиль после переточки по передней поверхности сохраняется постоянным.

### 3.2 Методика проектирования фасонных фрез

3.2.1 Подготовка чертежа обрабатываемой детали. Для облегчения получения размеров детали внутри своих допусков необходимо определить срединные размеры детали с учетом их допусков.

В случае, если размер проставлен на чертеже без допуска, то он принимается по 11 и 12-му квалитетам точности, при этом для охватываемых размеров ставится знак «+», для охватываемых – «-», для прочих – «±».

Дуговые и наклонные участки профиля разбивают путем нанесения промежуточных точек (обычно суммарное количество точек равно пяти или девяти для дуговых и трем для наклонных участков) с указанием их размеров (рисунок 3.1).

3.2.2 Определение геометрических параметров режущей части. Передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы фасонных фрез задаются исходя из физико-механических свойств обрабатываемого материала и конфигурации режущей кромки. Так, на основании рекомендаций, приведенных в [5, 7], принимаются следующие величины передних углов (таблица 3.1).

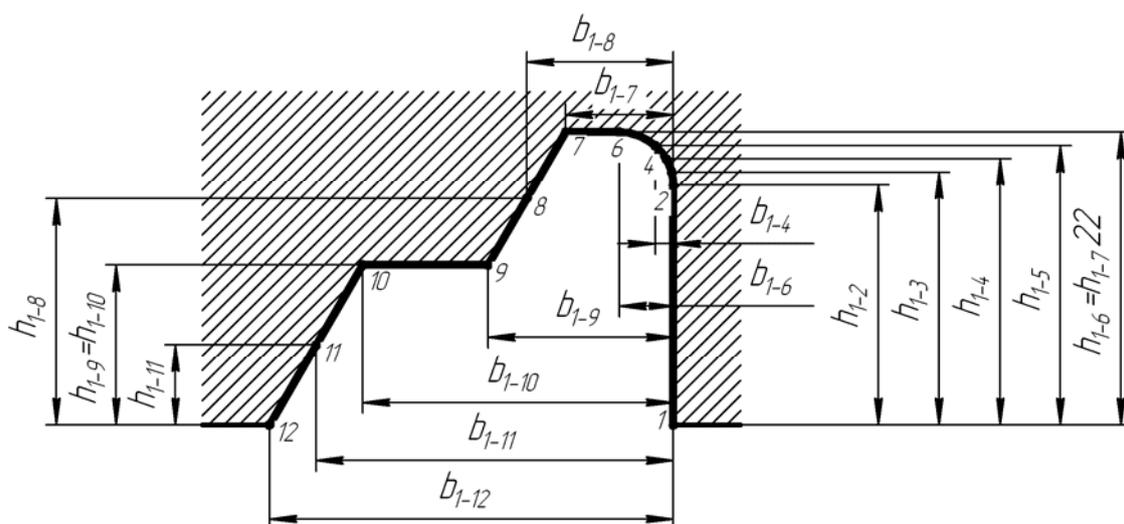


Рисунок 3.1 – Схема к определению размеров промежуточных точек дугового и наклонных участков детали

Таблица 3.1 – Значение передних углов фасонных фрез

Обрабатываемый материал	Механическое свойство				Передний угол, град
	Прочность $\sigma_B$ , МПа		Твердость НВ		
	свыше	до	свыше	до	
Медь, алюминий	–	–	–	–	20...25
Сталь		500		150	25
Сталь	500	800	150	235	20...25
Сталь	800	1000	235	290	12..20
Сталь	1000	1200	290	350	8...12
Бронза, свинцовистая латунь	–	–	–	–	0...5
Чугун	–	–	–	150	15
Чугун	–	–	150	200	12
Чугун	–	–	200	250	8

Задний угол фасонных фрез назначается в пределах 10...15 град. Следует отметить, что задние углы переменны в различных точках режущей кромки фрезы. В сечении, нормальном к режущей кромке, задние углы могут быть на отдельных участках намного меньше номинального значения, поэтому необходимо производить проверку минимальной величины нормального заднего угла.

Минимальную величину нормального заднего угла можно рассчитать по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_{nx} = \frac{D}{D_i} \operatorname{tg} \alpha_{ix} \cdot \sin \varphi_x, \quad (3.1)$$

где  $\alpha_{ix}$  – задний угол в данной точке в торцовом сечении, град;

$\varphi_x$  – угол между касательной к профилю фрезы в данной точке и торцовой плоскостью детали;

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$D_i$  – диаметр фрезы в  $i$ -й точке, мм.

На участках режущей кромки, перпендикулярных базе фрезы, задний угол обычно равен нулю и, как следствие, на данном участке происходит затирание задней поверхности резца по обработанной поверхности детали. Затирание приводит к интенсивному изнашиванию контактного участка и, как следствие, к снижению периода стойкости резца. В таких случаях на указанных участках обычно делают поднутрение (рисунок 3.2).

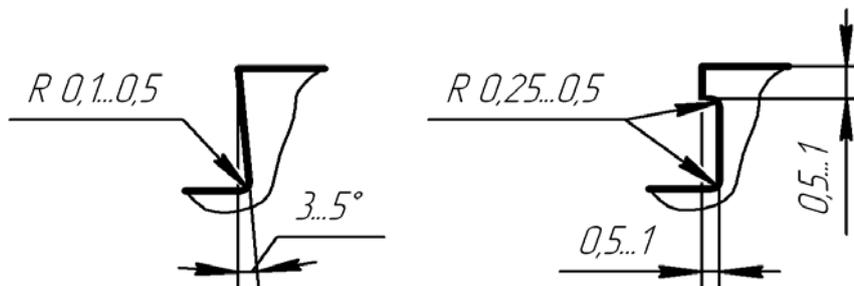


Рисунок 3.2 – Формирование режущих кромок, перпендикулярных базе резца

### 3.2.3 Определение габаритных размеров и параметров профиля фрезы.

Габаритные и присоединительные размеры фасонных фрез определяются из конструктивных соображений в зависимости от глубины фасонного профиля изделия  $h_{\text{ПР}}$  и ширины профиля  $B$ .

Расчетная схема для определения искомых параметров представлена на рисунке 3.3.

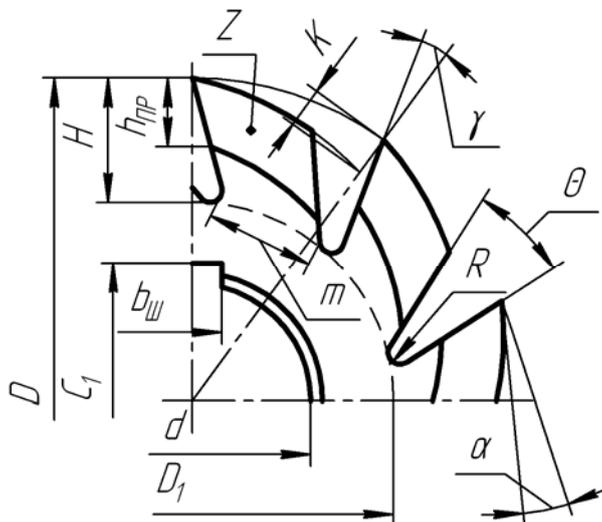


Рисунок 3.3 – Схема к расчету параметров фрезы

Диаметр посадочного отверстия фрезы

$$d = 14,2 \cdot h_{\text{ПР}}^{0,373}. \quad (3.2)$$

Полученная величина диаметра округляется до ближайшего большего из ряда, приведенного в ГОСТ 9472–90. Параметры шпоночного паза принимаются в соответствии с принятым диаметром посадочного отверстия.

В случае, когда ширина фасонного профиля значительно больше, чем его глубина, диаметр посадочного отверстия можно определить из выражения

$$d = 5,28 \cdot h_{\text{ПР}}^{0,48} \cdot b_{\text{ПР}}^{0,15}. \quad (3.3)$$

Величина затылования  $k$ , мм, обеспечивающая задний угол на вершине зуба:

$$k = \frac{\pi \cdot D}{z} \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.4)$$

где  $D$  – наружный диаметр фрезы, мм. Предварительно можно принять  $D = (2,5 \dots 3,0)d$ ;

$z$  – количество зубьев фрезы. Предварительно можно принять  $z = 8$ ;

$\alpha$  – задний угол.

В случае, когда заданы жесткие параметры профиля детали, возникает потребность в применении фрез со шлифованным профилем и, как следствие,

у таких фрез необходимо выполнить двойное затылование для выхода шлифовального круга:

$$K_1 = (1,5 \dots 1,75) K. \quad (3.5)$$

Высоту зуба фрезы при одинарном затыловании можно определить из выражения

$$H = h_{\text{ПР}} + K + R + (1 \dots 2); \quad (3.6)$$

при двойном затыловании

$$H = h_{\text{ПР}} + \frac{K + K_1}{2} + R + (1 \dots 2), \quad (3.7)$$

где  $R$  – радиус закругления впадины.

Диаметр окружности, проведенный через основание впадин,

$$D_1 = (1,6 \dots 2) d. \quad (3.8)$$

Наружный диаметр фрезы

$$D = D_1 + 2H. \quad (3.9)$$

Ширина посадочных участков

$$b = (0,2 \dots 0,3) B. \quad (3.10)$$

Величина посадочного участка не должна быть менее 8 мм.

Число зубьев фрезы

$$Z = \frac{(1,8 \dots 2,2) D}{H}. \quad (3.11)$$

Угол впадины  $Q$ , град, исходя из условия свободного выхода затыловочного резца, рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{90^\circ}{Z} + (15 \dots 18^\circ). \quad (3.12)$$

Полученная величина округляется до ближайшего большего значения из ряда 18, 22, 25, 30.

**3.2.4 Коррекционный расчет параметров профиля.** В случае, когда передний угол фрезы не равен 0 град, необходимо провести коррекционный расчет профиля зуба.

Размеры профиля фрезы в осевом направлении остаются равными размерам профиля детали, изменяются лишь размеры в радиальном направлении.

Вспомогательная величина

$$m = R \cdot \sin \gamma . \quad (3.13)$$

Радиусы, на которых лежат ключевые точки,

$$R_i = R - h_i . \quad (3.14)$$

Передний угол в узловых точках

$$\gamma_i = \arcsin \frac{m}{R_i} . \quad (3.15)$$

Вспомогательный угол

$$\psi_i = \gamma_i - \gamma . \quad (3.16)$$

Уменьшение профиля фрезы

$$\Delta h_i = \frac{K \cdot Z \cdot \psi_i}{360^\circ} . \quad (3.17)$$

Высота профиля зуба в ключевых точках

$$h_{\phi i} = h_i - \Delta h_i . \quad (3.18)$$

Радиусы фрезы, обеспечивающие ключевые точки,

$$R_{i\phi} = R - h_{\phi i} . \quad (3.19)$$

*3.2.5 Выбор инструментального материала.* Производительность механической обработки в значительной степени зависит от качества применяемого режущего инструмента и, особенно, его режущей части. Свойства материала, из которого выполнена режущая часть инструмента, определяют допустимый предел механической и тепловой нагрузок на режущую кромку, а следовательно, диапазон скоростей резания и сечений срезаемого слоя. Выбор материала для изготовления рабочей части фасонных резцов зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, принятой скорости резания и силовых нагрузок.

Выбор материала для режущей части фасонной фрезы можно осуществить в соответствии с таблицей 3.2.

Таблица 3.2 – Выбор марки инструментального материала

Обрабатываемый материал	Характер обработки	
	Черновая	Чистовая
Сталь конструкционная	T5K10, P6M5	T15K6, P6M5
Сталь коррозионно-стойкая	BK8, P6M5K5	BK6, P9K5
Чугун	BK8, P6M5	BK6, P6M5
Цветные сплавы	BK8, P6M5	P6M5

### 3.3 Варианты заданий для проектирования

Спроектировать фасонную фрезу в соответствии с заданием таблицы 3.3 и рисунком 3.4.

Таблица 3.3 – Варианты задания на проектирование фасонной фрезы

Исходные данные	Вариант		
	1	2	3
Обрабатываемый материал	Сталь Ст 3	Чугун СЧ15	Латунь
Эскиз детали (см. рисунок 3.4)	1	2	3

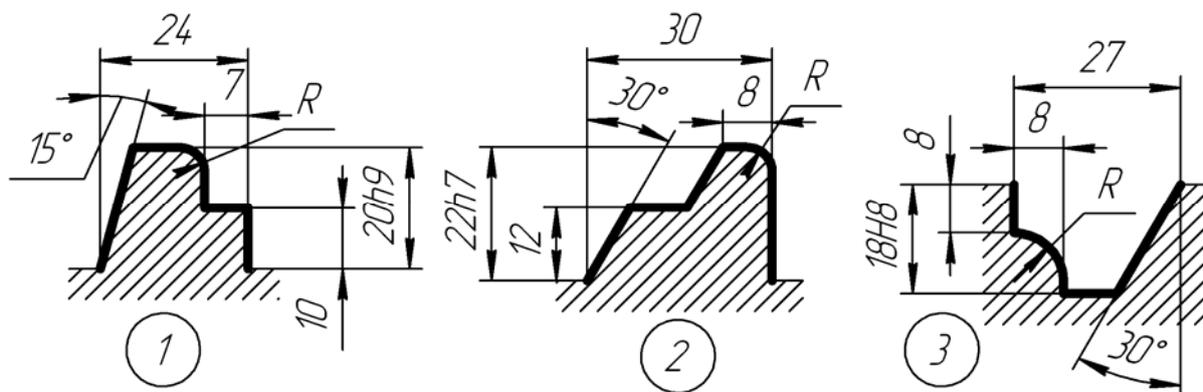


Рисунок 3.4 – Эскизы деталей для расчета фасонных фрез

#### Контрольные вопросы

- 1 Назначение фасонных затылованных фрез.
- 2 Определение геометрических параметров фрез.
- 3 Преимущества фасонных затылованных фрез.
- 4 Определение габаритных и присоединительных размеров фасонных фрез.
- 5 Выбор инструментального материала для фасонных фрез.

## 4 Практическое занятие «Проектирование и расчет протяжек для обработки отверстий»

**Цель занятия:** ознакомиться с последовательностью расчета и проектирования протяжек для обработки круглых отверстий.

### 4.1 Общие сведения

Протяжки являются сложнорежущими многолезвийными инструментами высокой производительности, они применяются при обработке сквозных отверстий различной формы и наружных поверхностей, к которым предъявляются высокие требования по шероховатости и точности обработки.

Важной особенностью процесса протягивания является отсутствие движения подачи за счет превышения ширины или высоты последующего зуба к ширине или высоте предыдущего.

В зависимости от способа приложения силы, которая необходима для осуществления процесса резания, многолезвийные инструменты делят на протяжки и прошивки. В первом случае тяговое усилие станка прикладывается к хвостовой части, во втором – к заднему торцу. Соответственно, тяговым усилием станка протяжка протаскивается в обрабатываемое отверстие, а прошивка продавливается через него.

В зависимости от вида отверстия протяжки для обработки могут быть для цилиндрических отверстий, для протягивания многогранных отверстий, шпоночные и шлицевые.

Каждая протяжка и прошивка для обработки отверстий состоит из следующих основных частей (рисунок 4.1):  $L_1$  – хвостовая часть;  $L_2$  – шейка;  $L_3$  – переходный конус;  $L_4$  – передняя направляющая;  $L_5$  – режущая часть;  $L_6$  – калибрующая часть;  $L_7$  – задняя направляющая;  $L_8$  – опорная цапфа.

Хвостовая часть, называемая также хвостовиком, необходима для закрепления протяжки в тяговом устройстве протяжного станка.

В зависимости от способа закрепления протяжки в тяговом устройстве протяжного станка имеются различные типы хвостовиков.

Наиболее широкое применение получил хвостовик с круговой выточкой, предназначенный для закрепления в быстросменном патроне. Основным достоинством такого типа хвостовика является простота его изготовления и высокая прочность. Размеры таких хвостовиков регламентированы ГОСТ 4044–70.

Из плоских (призматических) хвостовиков наибольшее распространение получил хвостовик, закрепление которого производится в двухкулачковом быстросменном патроне. Размеры таких хвостовиков регламентированы ГОСТ 4043–70.

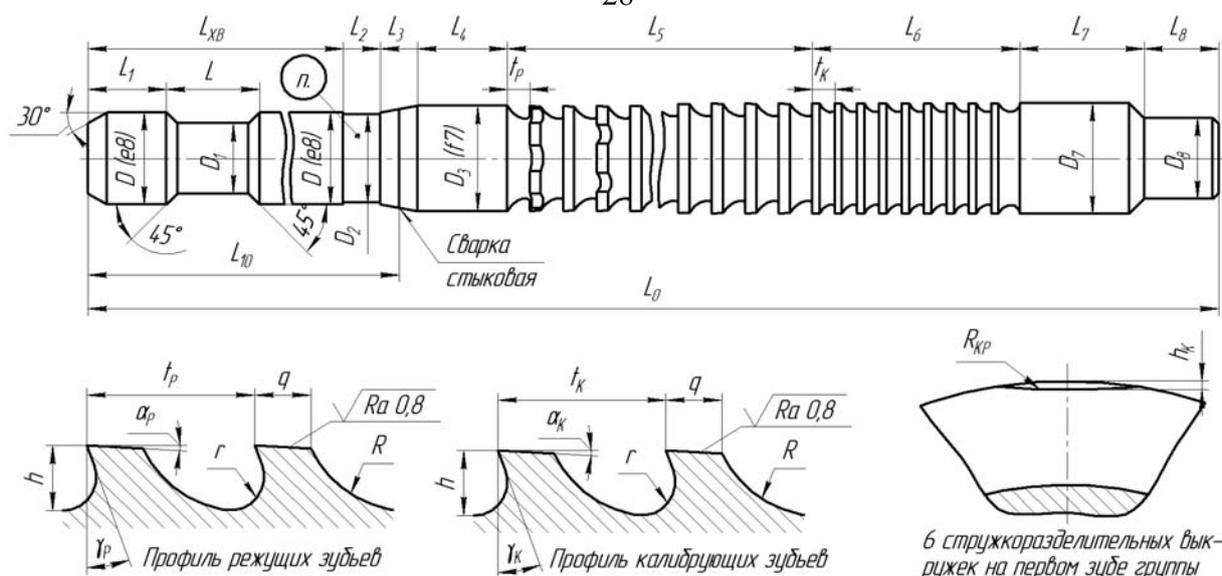


Рисунок 4.1 – Протяжка для обработки цилиндрического отверстия

Шейка  $L_2$  и переходный корпус  $L_3$  являются связующим звеном между хвостовиком и передней направляющей частью. Форма поперечного сечения шейки такая же, как и хвостовика. Диаметр шейки  $D_2$  обычно на  $0,3...1$  мм меньше диаметра хвостовой части. Допуск на диаметр  $D_2$  обычно задается по  $h9$ . Длина шейки  $L_2$  принимается конструктивно из расчета обеспечения необходимой длины протяжки до первого режущего зуба.

Переходный конус необходим для предварительного ориентирования детали относительно протяжки. Меньший диаметр переходного конуса обычно равен диаметру шейки, а больший диаметр – диаметру передней направляющей. Длина переднего конуса  $L_3$  принимается в пределах  $10...25$  мм в зависимости от размеров протяжки. Размеры шейки и переходного конуса по длине являются обычно свободными.

Передняя направляющая  $L_4$  предназначена для правильного центрирования детали на протяжке, а также для обеспечения плавного перехода на протяжку. Диаметр передней направляющей  $D_4$  принимается равным наименьшему диаметру предварительного отверстия с отклонениями посадки  $h6$  или  $h7$ . Под длиной  $L_4$  передней направляющей принимается расстояние от переходного конуса до первого режущего зуба режущей части  $L_5$ . Обычно она равна длине протягиваемого отверстия, а в случае протягивания отверстия большой длины может быть принята из соотношения

$$L_4 = (1...1,5) D_{отв}, \quad (4.1)$$

где  $D_{отв}$  – номинальный диаметр отверстия после протягивания.

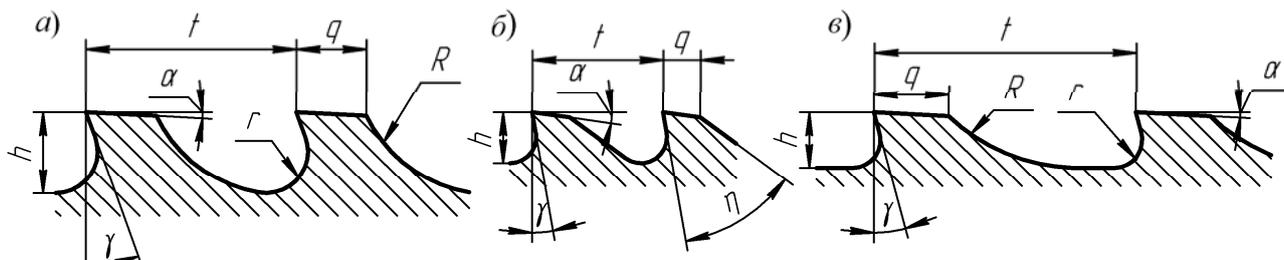
Допуск на длину передней направляющей составляет  $+1$  мм.

Режущая часть длиной  $L_5$  снабжена большим количеством поперечных зубцов и производит всю работу по срезанию припуска на протягивание. Первый зуб режущей части соответствует по форме и размерам передней направляющей, а последний – форме и размерам готового отверстия. Все промежу-

точные зубья последовательно увеличиваются на двойную величину подъема на зуб  $S_z$ , благодаря чему и осуществляется срезание ими стружки.

Величина подъема на зуб  $S_z$  принимается в зависимости от обрабатываемого материала и типа протяжки по соответствующим таблицам.

Важными параметрами протяжек является форма стружечной канавки и профиль зубьев, которые в конечном счете были призваны обеспечить максимальную стойкость протяжки, хорошее завивание стружки, ее свободное размещение и достаточную прочность режущих зубьев. Основные типы и размеры стружечных канавок показаны на рисунке 4.2.



*a* – двухрадиусная форма канавки; *б* – канавка с плоской спинкой и радиусной передней поверхностью зуба; *в* – удлиненная канавка с закругленными спинкой и передней поверхностью зубьев и прямолинейным участком по дну канавки

Рисунок 4.2 – Формы стружечных канавок протяжек

Первый тип (см. рисунок 4.2, *a*) применяется при обработке пластических материалов, второй тип (см. рисунок 4.2, *б*) – при обработке хрупких материалов, третий тип (см. рисунок 4.2, *в*) – при обработке прерывистых отверстий большей длины.

Калибрующая часть длиной  $L_6$  расположена сразу за режущими зубцами и необходима для калибровки поверхности, образованной режущими зубцами. Она гарантирует получение размеров готового отверстия. Количество калибрующих зубцов принимается  $z = 4 \dots 8$  в зависимости от шероховатости протянутого отверстия. Диаметр калибрующих зубцов равен номинальному диаметру протянутого отверстия. Форма стружечной канавки и профиль зубцов калибрующей части в большинстве случаев соответствуют форме стружечной канавки, а профиль зубцов калибрующей части – форме стружечной канавки и профилю зубцов режущей части.

Задняя направляющая  $L_7$  необходима для устранения перекоса детали на протяжке и устранения вследствие этого повреждения обработанной поверхности в момент выхода последних зубцов калибрующей части из отверстия. Диаметр задней направляющей  $D_7$  равен нормальному диаметру протянутого отверстия с отклонениями посадки  $f_7$  и  $h_7$ . Длина задней направляющей  $L_7$  принимается в зависимости от длины протянутого отверстия. Плоские шпоночные протяжки не имеют задней направляющей. Вместо нее удлиняется на величину до двух шагов последний калибрующий зуб.

Опорная цапфа необходима для поддержания длинных и тяжелых протяжек в подвижном люнете протяжного станка с целью устранения повреждения протянутого отверстия от прогиба под действием собственного веса протяжки. Диаметр опорной цапфы  $D_8$  обычно принимается равным диаметру внутренней втулки люнета, длина опорной цапфы  $L_8$  – в пределах  $(0,5...0,7) D_{отв}$ , но не менее 20...25 мм.

В зависимости от конструкций режущей части протяжки различают различные схемы резания при протягивании: профильную, генераторную, прогрессивную (комбинированную) (рисунки 4.3–4.6).

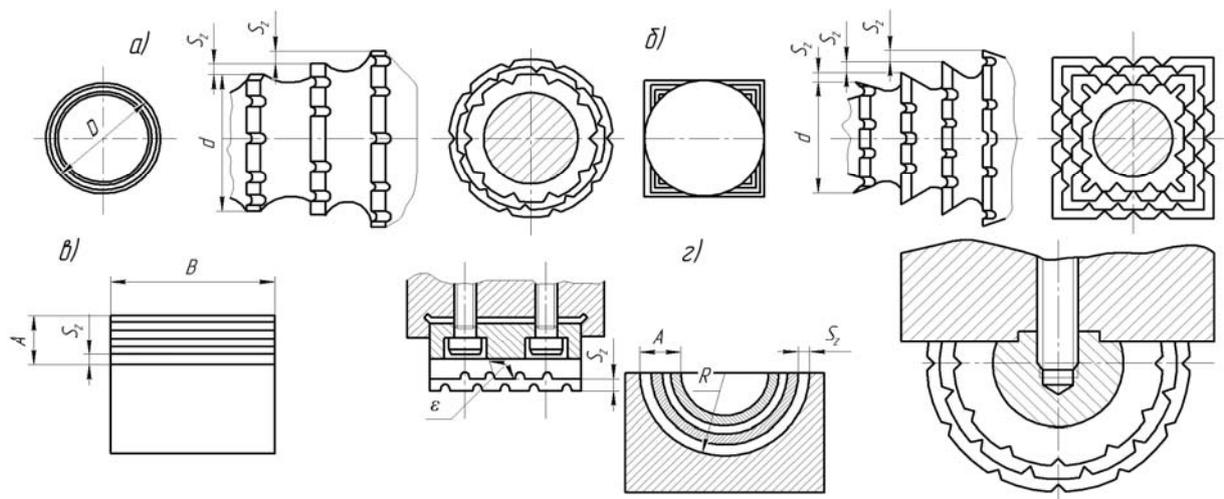


Рисунок 4.3 – Профильные схемы резания при обработке круглых (а), квадратных (б) отверстий и наружных поверхностей (в, г)

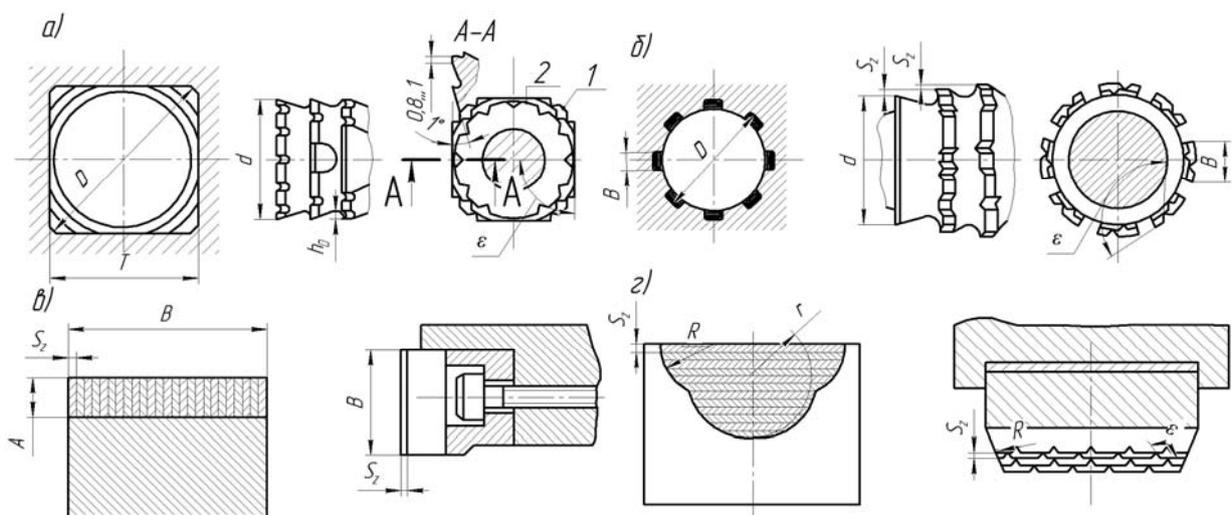


Рисунок 4.4 – Схемы работы генераторных протяжек при обработке круглого (а), шлицевого (б) отверстий и наружных поверхностей (в, г)

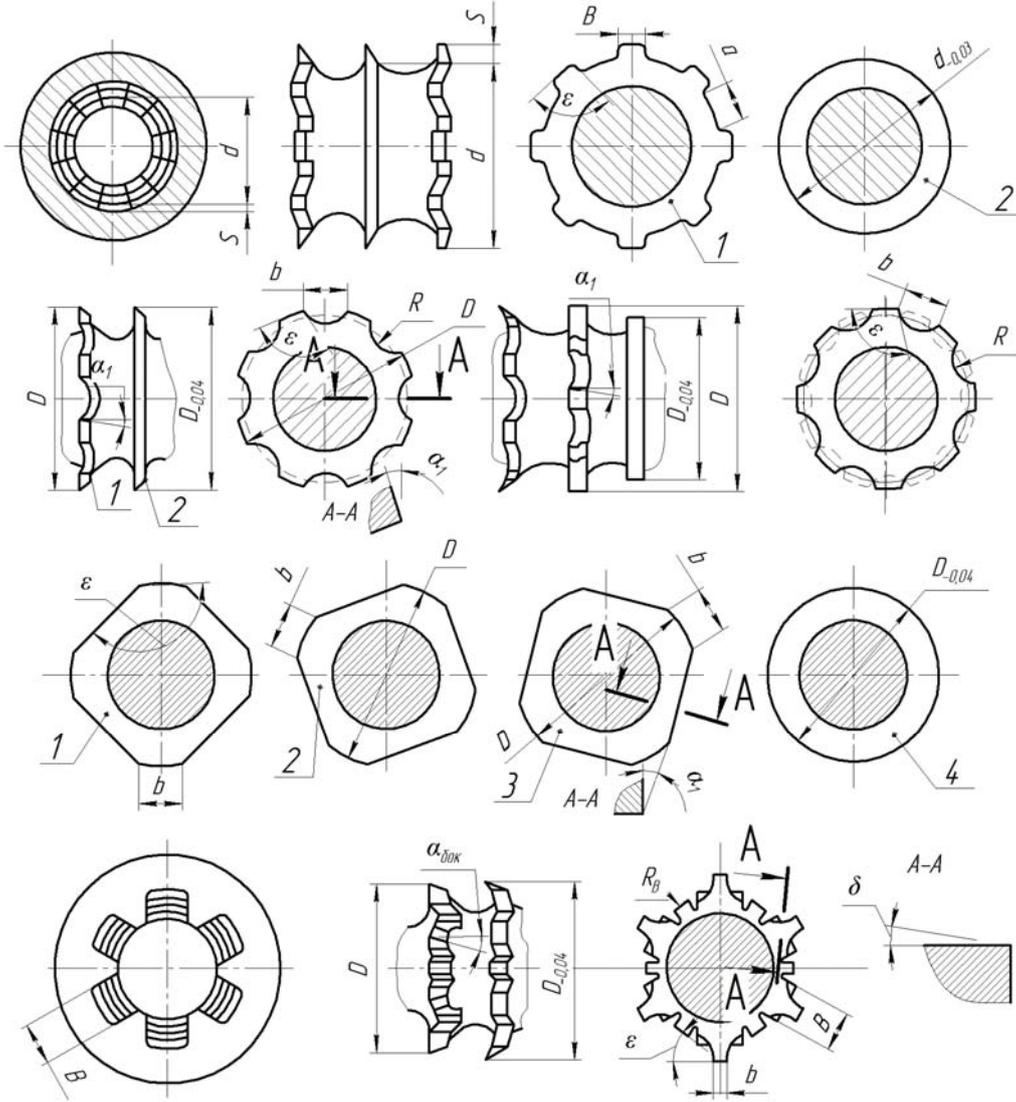


Рисунок 4.5 – Конструктивные варианты внутренних протяжек групповой схемы резания

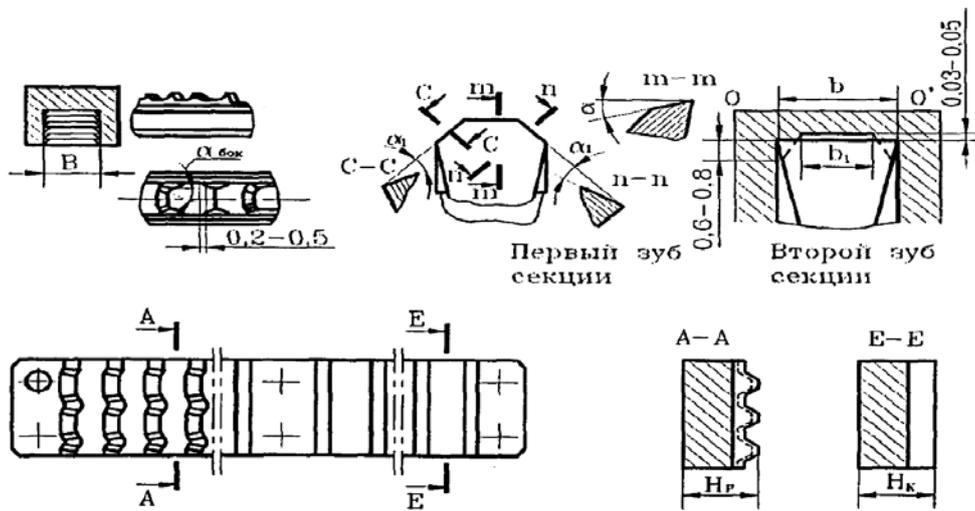


Рисунок 4.6 – Конструктивные варианты наружных протяжек групповой схемы резания

Передний угол  $\gamma$ , град, принимается в зависимости от обрабатываемого материала (по справочной литературе).

Задний угол  $\alpha$ , град, принимается в зависимости от типа протяжки, от величины  $\alpha$  зависит размерная стойкость протяжек.

Шпоночные протяжки имеют большее значение –  $\alpha = 3...7^\circ$ , т. к. их конструкция позволяет регулировать высоту протягиваемого шпоночного паза.

Угол  $\eta$  спинки принимается обычно равным  $45...50^\circ$ .

По мере износа протяжек переточка их в основном производится по передней поверхности конической поверхностью круга тарельчатой формы (рисунок 4.7). Так как передняя поверхность круглых протяжек является конической, то при положительном угле  $\gamma$  необходимо, чтобы в сечении плоскостью, перпендикулярной образующей конуса, радиус конической поверхности круга был меньше радиуса кривизны конической передней поверхности протяжки. Это условие обеспечивается подбором соответствующего диаметра круга и угла его установки относительно оси протяжки.

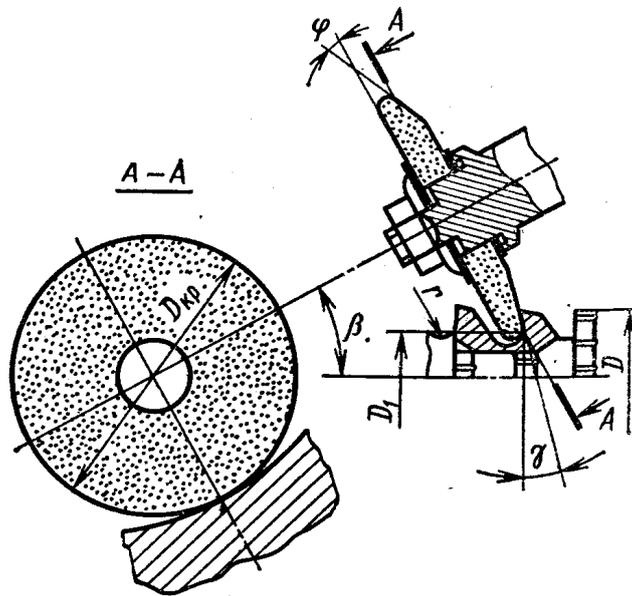


Рисунок 4.7 – Схема заточки зуба круглой протяжки по передней поверхности

Диаметр шлифовального круга определяется согласно формуле

$$D_{KP} = \frac{D_1 \cdot \sin(\beta - \gamma)}{\sin \gamma}, \quad (4.2)$$

где  $D_1$  – диаметр окружности, на которой расположена точка сопряжения прямой образующей передней поверхности с радиусной впадиной зуба, мм;  $D_1 = 0,85D_{np}$ ;

$\beta$  – угол установки шпинделя заточного станка.

На основании формулы (4.2) составлены таблицы, которые позволяют определить наибольшие диаметры шлифовальных кругов в зависимости от угла установки шпинделя заточного станка, диаметра затачиваемой протяжки и величины переднего угла.

После выбора  $D_{KP}$  необходимо произвести правку круга алмазно-металлическим карандашом.

Для заточек протяжек из быстрорежущих и инструментальных сталей применяются круги из электрокорунда белого 24А и 25А зернистостью 16...25, твердостью СМ1, СМ2 на керамической связке.

Окружная скорость круга применяется в пределах 18...25 м/с при окружной скорости протяжки 10...15 м/мин.

Разовая подача на глубину шлифования не должна превышать 0,03...0,05 мм.

## 4.2 Методика проектирования протяжек для обработки круглых отверстий

4.2.1 *Исходные данные.* В качестве исходных данных для проектирования протяжки необходим чертеж детали, следует знать марку материала заготовки, твердость  $HВ$ , предел прочности на растяжение  $\sigma_b$ , диаметр отверстия после протягивания  $D$ , длину протягиваемого отверстия  $L_0$  и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Для удобства расчета исходные данные целесообразно представить в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета протяжки

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра
Диаметр отверстия: под протягивание после протягивания	$D_0$ $D$	мм	
Предельное отклонение диаметра $D$ : верхнее нижнее	$ES$ $EI$		
Длина протягивания	$L_0$		
Обрабатываемый материал: марка предел прочности	$\sigma_b$	МПа	

4.2.2 *Определение геометрических параметров режущей части.* Как любой режущий инструмент, зубья протяжек имеют передние и задние углы. Величина переднего угла выбирается как и для всех инструментов, в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Исключение составляют шпоночные протяжки. Для них угол должен быть не более  $15^\circ$ , т. к. при больших его значениях может происходить самозатачивание протяжки в обрабатываемый материал из-за одностороннего расположения сил резания, что приводит, как правило, к разрыву протяжки. В таблице 4.2 приводятся значения передних углов, назначаемых в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Таблица 4.2 – Передние углы режущих зубьев протяжки

Обрабатываемый материал	$\sigma_s$ , МПа	$\gamma_{ro}$ , град
Алюминий, медь	–	12...15
Сталь	До 600	15...18
	Св. 600 до 800	12...15
	Св. 800	10...12
Чугун	До 250	8...10
	Св. 250	5...8
Бронза, латунь	–	0...5

На калибрующих зубьях угол  $\alpha$  обычно не превышает  $0^\circ 30' \dots 1^\circ 30'$ . Для сохранения размеров протяжки после переточек на калибрующих зубьях делают круглошлифованные ленточки с  $\alpha = 0^\circ$  и шириной до 0,2 мм на первом зубе с постепенным увеличением ее до 0,8 мм на последнем зубе.

Согласно рекомендациям, применение на калибрующих зубьях ленточек с  $\alpha = 0^\circ$  нецелесообразно, т. к. на их поверхности налипают частички металлов при разрушении нароста, которые увеличивают шероховатость протянутой поверхности. На протяжках переменного резания такой фаски нет, что улучшает качество обработанной поверхности. Сохранение размеров калибрующих зубьев достигается тем, что калибрующие зубья не затачивают, а лишь доводят, снимая при этом слой толщиной около 0,02...0,03 мм.

Задний угол  $\alpha$  на режущих зубьях протяжек для обработки внутренних поверхностей имеет небольшую величину в пределах  $2 \dots 3^\circ$ , что позволяет обеспечивать размеры протянутых поверхностей после нескольких переточек протяжек. Чем меньше толщина среза, тем больше должен быть угол  $\alpha$  и тем больше будет период стойкости зубьев протяжек, т. к. при малом значении  $\alpha$  и большем значении  $\alpha$  меньше пятно контакта и силы трения по задним поверхностям зубьев. Однако при большем значении  $\alpha$  уменьшается число переточек.

**4.2.3 Определение припуска под протягивание.** Припуск  $A$  на диаметр отверстия определяется в зависимости от диаметра и длины протягиваемого отверстия, а также требований к шероховатости обработанной поверхности.

$$A = (D_{\max} - D_0)/2, \quad (4.3)$$

где  $D_{\max}$  – наибольший предельный размер готового отверстия, мм;

$D_0$  – диаметр предварительного отверстия, мм.

В случае, когда не известен диаметр предварительно подготовленного отверстия, припуск можно назначить в соответствии с данными таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Припуски на диаметр отверстий

Длина протягиваемого отверстия $L_0$	Обработка протягиваемого отверстия $R_a = 2,5 \dots 1,25$					Обработка протягиваемого отверстия $R_a = 0,63 \dots 0,32$				
	Диаметр $D$ протягиваемого отверстия									
	от 10 до 18	от 18 до 30	от 30 до 50	от 50 до 80	от 80 до 100	от 10 до 18	от 18 до 30	от 30 до 50	от 50 до 80	от 80 до 100
От 6 до 10	0,4	0,5	–	–	–	0,2	0,3	–	–	–
Св. 10 до 18	0,5	0,5	0,6	–	–	0,3	0,3	0,4	–	–
Св. 18 до 30	0,6	0,6	0,8	1,0	–	0,4	0,4	0,5	0,5	–
Св. 30 до 50	0,8	0,8	0,8	1,0	1,2	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7
Св. 50 до 80	–	0,8	1,0	1,2	1,2	–	0,5	0,6	0,7	0,7
Св. 80 до 120	–	1,0	1,0	1,2	1,4	–	0,6	0,6	0,7	0,7
Св. 120 до 180	–	–	1,2	1,4	1,4	–	–	0,7	0,8	0,8
Св. 180	–	–	1,2	1,4	1,6	–	–	0,7	0,8	1,0

4.2.4 *Расчет режущей части протяжки.* Шаг режущих зубьев рассчитывается по эмпирической формуле

$$t = (1,25 \dots 1,5) \sqrt{L_0} . \quad (4.4)$$

Шаг  $t$ , соответствующий найденному диапазону, выбирается из таблицы 4.4.

Таблица 4.4 – Размеры стружечных канавок протяжек

$t$	$h$	$q$	$r$	$R$	$F_k, \text{мм}^2$	$t$	$h$	$q$	$r$	$R$	$F_k, \text{мм}^2$
4,5	2	1,5	1	2,5	3,14	14	4	4	2	10	12,57
6		2		4			2,5		3		19,63
8	2,5	3	1,25	5	4,91	16	5	4,5	2,5	12	19,63
	3		1,5	7			3		28,27		
10	4	4	2	8	7,07	18	7	6	3,5	12	38,48
12	3		1,5		7		2,5		19,63		
	4	2	8	12,57	7,07	6	6	3	28,27	38,48	
					12,57		7		3,5		

По величине  $t$  из таблицы 4.4 назначаются размеры стружечных канавок, геометрия которых показана на рисунке 4.1 и 4.2. При  $t \geq 6$  мм каждому шагу в таблице 4.4 соответствует не одна глубина канавки  $h$ . В качестве начального варианта выбирается наибольшее значение  $h$ , чтобы обеспечить максимальную с точки зрения размещения стружки в канавке толщину среза при протягивании. В дальнейшем значение  $h$  может быть скорректировано в сторону уменьшения после проверки режущей части протяжки на прочность.

Толщина среза, приходящегося на один зуб протяжки, определяется из условия помещаемости стружки в стружечной канавке:

$$a_z = \frac{F_\kappa}{K \cdot L_o}, \quad (4.5)$$

где  $F_\kappa$  – площадь сечения канавки (см. таблицу 4.4);

$K$  – коэффициент заполнения канавки. При обработке стальных, алюминиевых и медных заготовок  $K = 3,5 \dots 4$ , при обработке заготовок из чугуна, бронзы и латуни  $K = 2 \dots 2,5$ .

Полученная величина  $a_z$  округляется с точностью до 0,001 мм.

Число одновременно работающих режущих зубьев определяется по формуле

$$Z_{\max} = \frac{L_o}{t} + 1. \quad (4.6)$$

Рассчитывается сила, приходящаяся на 1 мм длины обрабатываемого контура, по формуле

$$P_{z \max} = C_p \cdot S_z^x \cdot D \cdot Z_{\max} \cdot K_\gamma \cdot K_u \cdot K_c, \quad (4.7)$$

где  $C_p$ ,  $x$  – коэффициент и показатель степени, зависящие от физико-механических свойств обрабатываемого материала (таблица 4.5);

$K_\gamma$ ,  $K_u$ ,  $K_c$  – поправочные коэффициенты, зависящие от значения переднего угла  $\gamma$ , износа протяжки, наличия и марки СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость) соответственно, определяются по таблице 4.6.

Рассчитывается усилие протягивания

$$P_T = \pi \cdot p_z \cdot D \cdot Z_{\max}, \quad (4.8)$$

а также напряжения в канавке перед первым зубом режущей части протяжки

$$\sigma_1 = \frac{4P_T}{\pi(D_o - 2h)^2}. \quad (4.9)$$

Должно выполняться условие  $\sigma_1 \leq [\sigma_u]$ , где допустимое напряжение на растяжение для протяжек из быстрорежущей стали  $[\sigma_u] = 400 \dots 450$  МПа.

Если условие не выполняется, по таблице 4.4 выбирается меньшее значение глубины стружечной канавки и расчет повторяется.

По усилию протягивания назначается модель протяжного станка в соответствии с таблицей 4.7 и его паспортными данными (рисунок 4.8).

Таблица 4.5 – Постоянная  $C_p$  и показатель степени  $x$ 

Обрабатываемый материал			Коэффициент $C_p$	Показатель степени $x$
Наименование	Твердость, $HV$	Предел прочности $\sigma_s$ , МПа		
Сталь углеродистая конструкционная	$\leq 200$	$< 700$	7000	0,85
	200...250	700...800	7620	
	$> 250$	$> 800$	8420	
Сталь легированная конструкционная	$\leq 200$	$< 700$	7620	0,85
	200...250	700...800	8420	
	$> 250$	$> 800$	10000	
Чугун	$\leq 200$	–	3000	0,73
	$> 200$	–	3540	
Цветные металлы и сплавы	–	–	1500	0,73

Таблица 4.6 – Поправочные коэффициенты  $K_\gamma$ ,  $K_u$ ,  $K_c$  на силу протягивания  $P_{zmax}$ 

Передний угол $\gamma$ , град				Степень затупления зуба		СОЖ			
5	10	15	20	острого	затупленного	СФ	ЭМ	РМ	БС
$K_\gamma$				$K_u$		$K_c$			
Сталь									
1,13	1,0	0,93	0,85	1,0	1,15	1,0	1,0	0,9	1,34
Чугун									
1,1	1,0	0,95	–	1,0	1,10	–	0,9	–	1,0
Примечание – СФ – сульфозреол; ЭМ – 10-процентная эмульсия; РМ – растительное масло; БС – без смазки									

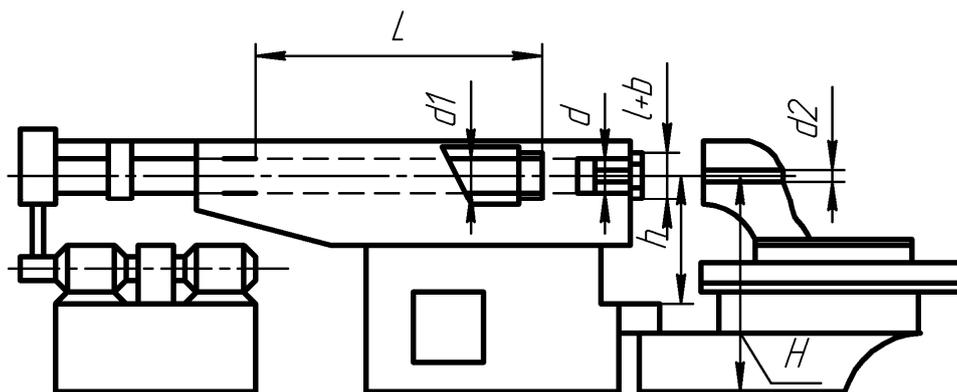


Рисунок 4.8 – Посадочные места горизонтально-протяжных станков

По таблице 4.8 и рисунку 4.9 выбирается наибольший диаметр хвостовика  $d_1$ , проходящий с зазором в отверстие диаметром  $D_0$ .

Таблица 4.7 – Посадочные места горизонтально-протяжных станков

Параметры	Модель станка		
	7505	7A510	7A520
Тяговое усилие $Q$ :			
наибольшее	$5 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$
наименьшее	$4 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^4$
Диаметр отверстия под планшайбу $d$	140	160	200
Диаметр отверстия под рабочий патрон $d_1$	40	65	65
Диаметр отверстия в кронштейне вспомогательных салазок $d_2$	40	50	50
Высота выступающей части станка $H_1$	30	30	40
Толщина опорной части станка $H_2$	60	70	80
Ход ползуна $L$ :			
наименьший	166	200	240
наибольший	1166	1450	1840

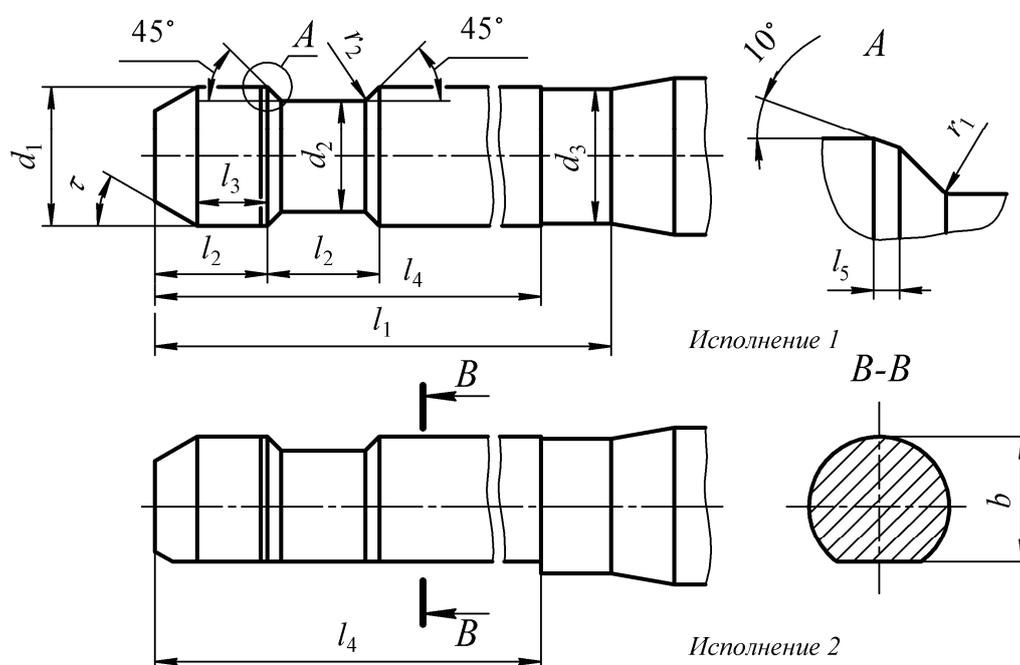


Рисунок 4.9 – Хвостовики круглых протяжек по ГОСТ 4044–70

Рассчитывается напряжение в опасном сечении хвостовика, возникающее под действием силы  $P_T$ ,

$$\sigma_x = \frac{P_T}{F_x}, \quad (4.10)$$

где  $F_x$  – площадь опасного сечения, приведенная в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Размеры хвостовиков для круглых протяжек

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$b$	$r_1$	$r_2$	$l_5$	$\tau$ , град	$F_x$ , мм <sup>2</sup>
12	8	12	120	20	12	100	10,5	0,2	0,6	0,5	10	50,3
14	9,5	14					12,5	0,3			20	70,9
16	11	16					14	95,0				
18	13	18					16	132,7				
20	15	20	140	25	16	120	17	1,0	1,0	30	176,7	
22	17	22					19				227,0	
25	19	25					21,5				283,5	
28	22	28	160	32	20	140	24	0,4	1,6	1,5	380,1	
32	25	32					27,5				490,9	
36	28	36	180	40	25	160	31	0,5	2,5	2,0	615,7	
40	32	40					34,5				804,2	
45	34	45					39				907,9	
50	38	50					43,5				1134,1	
56	42	56	210	40	25	190	48,5	0,6	4,0	2,0	1385,4	
63	48	63					55				1809,6	
70	53	70					61				2206,2	
80	60	80	240	50	32	220	69,5	0,8	6,0	2,0	2827,4	
90	70	90					78,5				3848,4	
100	75	100					87				4417,9	

Должно выполняться условие  $\sigma_x \leq [\sigma_x]$ , где допускаемое напряжение на растяжение для хвостовиков из углеродистой и легированной конструкционной стали  $[\sigma_x] = 250$  МПа. Если это условие не выполняется, толщина среза на черновых зубьях протяжки уменьшается до значения

$$a_z \leq \left( \frac{F_x}{\pi \cdot C_p \cdot K_\gamma \cdot D \cdot Z_{\max}} \cdot \frac{[\sigma_x]}{\sigma_\epsilon} \right)^{\frac{1}{0,85}} \quad (4.11)$$

Число черновых режущих зубьев протяжки определяется по формуле

$$z = \frac{A - a'_z z'}{a_z} + 1, \quad (4.12)$$

подбираются число чистовых режущих зубьев  $z' = 1 \dots 3$  и толщина среза на чистовом зубе  $a'_z < a_z$  таким образом, чтобы  $z$  без какого-либо округления оказался целым числом.

Номинальные диаметры черновых режущих зубьев

$$D_i = D_0 + 2a_z(i - 1), \quad (4.13)$$

диаметры чистовых режущих зубьев

$$D_{ij} = D_z + 2a'_z \cdot j; \quad (4.14)$$

$$i = \overline{1, z}; \quad j = \overline{1, z'},$$

где  $D_{ij}$  – номинальный диаметр последнего чернового зуба.

Длина режущей части протяжки

$$l_p = t(z + z'). \quad (4.15)$$

**4.2.5 Расчет калибрующей части протяжки.** Передний угол калибрующих зубьев назначается таким же, как у режущих, а задний выбирается в диапазоне  $\alpha_{rk} = 0,5 \dots 1^\circ$ .

Выбираем число калибрующих зубьев  $z_k$  по таблице 4.9 в зависимости от качества точности изготавливаемого отверстия.

Таблица 4.9 – Число калибрующих зубьев протяжки

Квалитет точности	6	7	8	9	10	Св. 10
$z_k$	8	7	6	5	4	2...3

Определяется шаг калибрующих зубьев  $t_k \approx (2/3)t$ , который согласуем с шагами, приведенными в таблице 4.4. По той же таблице выбираются размеры канавки между калибрующими зубьями.

Номинальный диаметр всех калибрующих зубьев одинаков  $D_k = D_{\max}$ . На зубьях предусматриваем ленточку шириной  $f = 0,2 \dots 0,3$  мм.

Длина калибрующей части протяжки

$$l_k = t_k \cdot z_k. \quad (4.16)$$

В большинстве случаев допуски на продольные размеры детали значительно шире, чем на ее диаметры. Поэтому допустимо приближенное назначение допусков на продольные размеры профиля резца. При этом допуски размеров резца берутся в 2–3 раза уже, чем допуски соответствующих размеров детали.

**4.2.6 Конструктивные элементы протяжки.** Геометрию и размеры хвостовика протяжки назначают в соответствии с рисунком 4.9 и таблицей 4.8.

Выбирается длина передней направляющей инструмента в диапазоне  $l_{nn} = (0,8 \dots 1,0)L_0$ , назначается длина задней направляющей  $l_{zn} = (0,6 \dots 0,8)L_0$  и рассчитывается расстояние до первого зуба  $L_1 = 280 + l_{nn}$ .

Определяется общая длина протяжки

$$L = L_1 + l_p + l_k + l_{zn}. \quad (4.17)$$

Чтобы протяжка имела достаточную жесткость, должно выполняться условие  $L \leq 40D$ . Если это условие не выполняется, следует перейти к проектированию протяжки с групповой схемой срезания припуска или комплекта из нескольких протяжек.

Для улучшения условий резания на режущих зубьях протяжки выполняют стружкоразделительные канавки, конфигурация которых показана на рисунке 4.10 ( $\varepsilon = 60 \dots 90^\circ$ ;  $m = 0,6 \dots 1$  мм;  $R_c = 0,3 \dots 0,5$  мм).

Количество канавок рассчитывают по эмпирической формуле

$$n_c = 1,85\sqrt{D}, \quad (4.18)$$

округляя  $n_c$  до ближайшего четного числа.

На следующих друг за другом зубьях канавки располагают в шахматном порядке со смещением на угол  $180^\circ/n_c$ .

Для изготовления, контроля и заточки круглых протяжек их выполняют с центровыми отверстиями формы  $B$  или  $R$  по ГОСТ 14034–74. Диаметр отверстий выбирают в зависимости от диаметра протяжки по таблице 4.10.

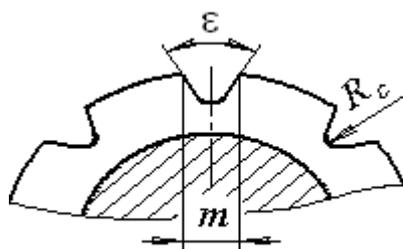


Рисунок 4.10 – Стружкоразделительные канавки

Таблица 4.10 – Диаметры центровых отверстий

$D$	До 6	6...10	10...14	14...20	20...30	30...40	40...60	60...80	80...100
$d$	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8,0	10,0

Протяжки изготавливают сварными, соединяя с помощью контактной стыковой электросварки соплавлением режущую часть из быстрорежущей стали (ГОСТ 19265–73) с хвостовой частью из углеродистой качественной стали (ГОСТ 1050–74) или легированной конструкционной стали (ГОСТ 4543–71), как показано на примере рабочего чертежа протяжки (см. рисунок 4.5).

После термообработки твердость режущей части  $HRC_3$  – 62...66, хвостовой части – 44...50.

Шероховатость поверхностей протяжки:

– профиля стружечной канавки, задней поверхности зуба, передней и задней направляющих –  $Ra = 0,63$ ;

- поверхностей хвостовика, контактирующих с замком патрона протяжного станка, –  $Ra = 1,25$ ;
- остальных поверхностей –  $Ra = 2,5$ .

4.2.7 *Точность конструктивных элементов протяжки.* Допуск на диаметр режущих зубьев назначают в пределах  $TD_i = 0,01 \dots 0,02$  мм, но не более  $0,4a_z$ , с расположением поля допуска по  $h$ .

Допуск на диаметр калибрующих зубьев  $TD_k = TD/3$  – с расположением поля допуска по  $h$ .

Допускаемое отклонение глубины стружечной канавки – не более  $+0,3$  мм при  $h_k \leq 4$  мм и не более  $+0,5$  мм при  $h_k > 4$  мм.

Чтобы исключить застревание заготовки на направляющих протяжки, поле допуска на диаметр передней направляющей располагают по  $e8$ , а на диаметр задней направляющей, которая соприкасается с уже обработанной поверхностью, по  $f7$ .

Допуски на размеры хвостовика (обозначения размеров по таблице 4.4) назначают следующими:

- на диаметр  $d_1$  – по  $e8$ ;
- на диаметр  $d_2$  – по  $c11$ ;
- на диаметр  $d_3$  – с верхним предельным отклонением –  $0,5$  мм и нижним предельным отклонением –  $1,0$  мм;
- на размер  $b$  – по  $e8$ .

Отклонение общей длины протяжки не должно превышать  $\pm 3$  мм при  $L \leq 1000$  мм и  $\pm 5$  мм при  $L > 1000$  мм.

Предельные отклонения других размеров инструмента назначают по  $\pm IT14/2$ .

4.2.8 *Выбор инструментального материала.* Производительность механической обработки в значительной степени зависит от качества применяемого режущего инструмента и особенно его режущей части. Свойства материала, из которого выполнена режущая часть инструмента, определяют допустимый предел механической и тепловой нагрузок на режущую кромку, а следовательно, и диапазон скоростей резания и сечений срезаемого слоя. Выбор материала для изготовления рабочей части фасонных резцов зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, принятой скорости резания и силовых нагрузок.

Протяжки изготовляют из быстрорежущих сталей марок Р6М5 (при протягивании со скоростью резания до 20 м/мин), Р18, Р9К10 (при протягивании со скоростью резания 22...30 м/мин), Р10К5Ф5 (при протягивании со скоростью резания более 30 м/мин).

При протягивании со скоростью менее 15 м/мин целесообразно применять в качестве инструментального материала сталь ХВГ или ХВСГ.

### 4.3 Варианты заданий для проектирования

Спроектировать протяжку круглую в соответствии с заданием (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Варианты задания на проектирование протяжки круглой

Обрабатываемый материал	Сталь 5	СЧ35	Сталь 20	Сталь 12ХН3	Сталь Р6М5
Диаметр отверстия	40Н7	42Н8	24Н6	36Н7	70Н7
$D_{предв}$ , мм	37	42	23,5	33	68
$L_{отв}$ , мм	40	50	150	40	55
$Ra$ , мкм	1,6	3,2	0,8	1,6	1,6

#### Контрольные вопросы

- 1 Назначение круглых протяжек.
- 2 Основные виды протяжек для обработки отверстий.
- 3 Конструкция протяжки для обработки отверстий.
- 4 Основные виды хвостовиков протяжек для обработки отверстий.
- 5 Схемы резания протяжек для обработки отверстий.

## Список литературы

- 1 **Грановский, Г. И.** Фасонные резцы / Г. И. Грановский, К. П. Паиченко. – Москва: Машиностроение, 1975. – 309 с.
- 2 **Малышев, В. И.** Технология изготовления режущего инструмента: учебное пособие / В. И. Малышев. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 440 с.
- 3 **Ящерицын, П. И.** Теория резания: учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корнеевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
- 4 **Грановский, Г. И.** Резание металлов: учебник для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.
- 5 Режущий инструмент. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие / Под ред. Е. Э. Фельдштейна. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 384 с.
- 6 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
- 7 Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / Под общ. ред. В. И. Баранчикова. – Москва: Машиностроение, 1990. – 400 с.
- 8 **Клименков, С. С.** Обрабатывающий инструмент в машиностроении: учебник / С. С. Клименков. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2013. – 459 с.
- 9 Режущий инструмент: учебник / Д. В. Кожевников [и др.]; под ред. С. В. Кирсанова. – 3-е изд. – Москва: Машиностроение, 2007. – 528 с.
- 10 **Фельдштейн, Е. Э.** Режущий инструмент: учебное пособие для вузов / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич, М. И. Михайлов. – Минск: Новое образование, 2007. – 400 с.
- 11 Протяжки для обработки отверстий / Д. К. Маргулис [и др.]; отв. ред. Д. К. Маргулис. – Москва: Машиностроение, 1986. – 230 с.
- 12 **Фельдштейн, Е. Э.** Режущий инструмент. Эксплуатация: учебное пособие для вузов / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2012. – 255 с.
- 13 **Клименков, С. С.** Формообразующий инструмент в машиностроении. Расчет и конструирование: учеб. пособие / С. С. Клименков. – Минск; Москва: Новое знание: ИНФРА-М, 2016. – 671 с.