Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

Исследование процессов обработки резанием и режущего инструмента в 2-х частях. Ч.1

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.222

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.***

Подготовка и защита реферата.

Экзамен.

Оценка **текущей** учебной работы

1) В **конце каждой лекции** – мини-контрольная работа на 5 мин. по оценке освоения материалов лекции. Можно пользоваться только **своим** конспектом лекций.
Оценивается: 6-5 баллов – «отлично» ; 4 балла – «хорошо»;
3 балла – «удовлетворительно»; 1 балл – «неудовлетворительно».

Всего за **мини контрольные** можно получить **максимум 24** балла.

2) По каждой **пропущенной лекции** или **практическому занятию** по 2-3 дополнительных вопроса на экзамене.

3) По **защищённой лабораторной** работе выставляется **1 балл за 1 час лаб. работы** (**максимум 24** балла). Каждую **пропущенную лабораторную работу** необходимо **отработать** во время конференц-недель. Перед отработкой **подготовить бланк отчёта** по лаб. работе с **краткими пояснениями** действий, который необходимо **защитить перед выполнением** лабораторной работы.

4) По каждой теме (8 шт., в лекции 2 темы) выполняется **контрольная работа** по **4** баллов за каждую (**максимум 32** баллов).

5) При **недостаточном количестве баллов** для допуска к экзамену (**минимум 55 баллов**) необходимо написать реферат по пропущенным лекциям, плохим или пропущенным контрольным работам. Объём 10 стр. формата А4 с рисунками и графиками (**текст не менее 50%**), **максимум 3 балла** за реферат.

1. Современные направления совершенствования процессов резания и режущих инструментов

В процессе обработки из **заготовки** получается **деталь. Исходная заготовка** может быть получена литьем, ковкой, штамповкой, прокаткой. В мелкосерийном производстве часто выбирается круглый прокат (**пруток**) для тел вращения или **листовой прокат** для корпусных деталей.

Обработка материалов резанием является древнейшим и в настоящее время одним из наиболее распространенных способов изготовления деталей машин, при котором необходимые форму и размеры деталей получают путем снятия припуска в виде стружки с **исходной заготовки.**

Другими способами получения детали является электроэрозионная обработка, лазерная, гидроабразивная, плазменная резка и т.п.

В последнее время идёт разработка 3D печати, когда заготовка создаётся на специальном принтере. В настоящее время прочность и износостойкость используемых материалов, а также невысокая точность не позволяют говорить о надёжности работы изделий.

Достоинства обработки материалов **резанием :**

1) высокие точность размеров, формы и качества обработанных поверхностей деталей;
2) универсальность и технологическая гибкость производства;
3) минимальные затраты на оснастку;
4) благоприятные условия для автоматизации производства;
5) относительно невысокая энергоемкость, значительно меньшая, чем при других способах обработки .

Наибольшее применение получила **лезвийная обработка** точением, строганием, фрезерованием, протягиванием, обработка отверстий осевыми (мерными) инструментами (сверла, зенкеры, развертки), нарезание резьб и зубчатых колес.

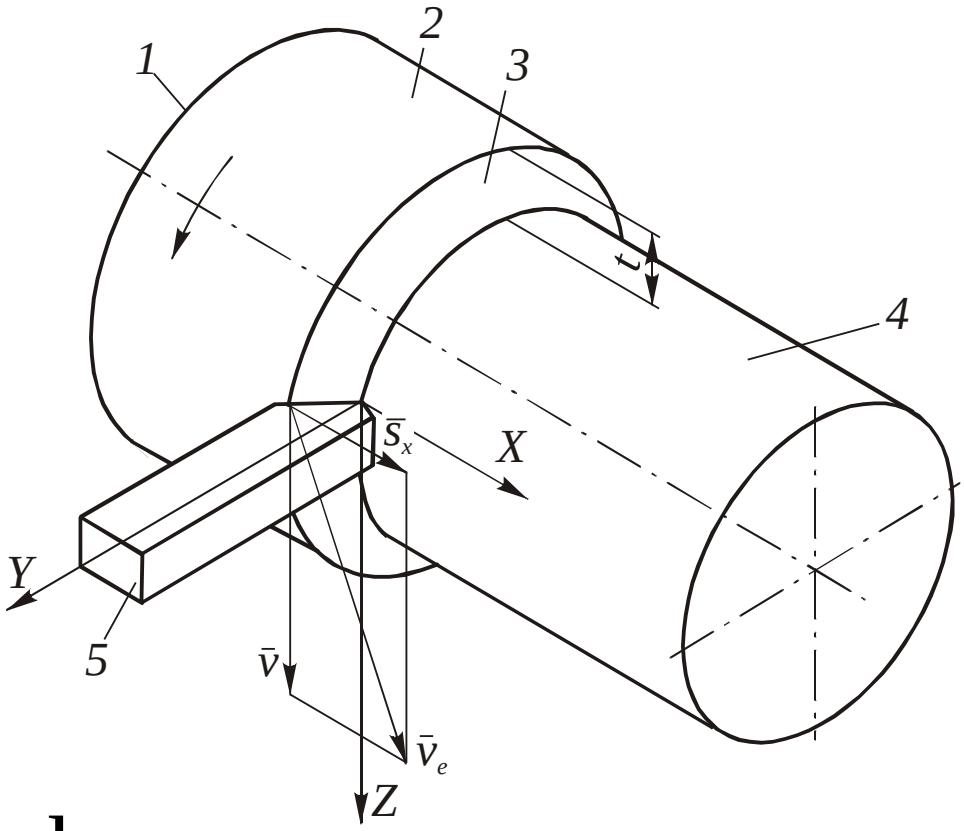
Кинематика продольного точения

За один проход резца с исходной поверхности заготовки ***2***, называемой **обрабатываемой поверхностью** ($Ød_{нач}$), снимается припуск толщиной ***t:***

$t = (d_{нач} – d_{конечн})/2$.

Поверхность *3*, получемая после прохода главной режущей кромки, называется **поверхностью резания** (**непрерывно обновляемая**), а поверхность *4* – **обработанной поверхностью** ($Ød_{конечн}$).

На инструмент действует сила резания ***R*** (***P***), которую для удобства измерения и влияния на технологическую систему и деталь (систему **СПИД – станок-приспособление-инструмент-дедаль**) обычно разлагают на **три составляющие:** P_z (главная составляющая, или тангенциальная), P_y (радиальная составляющая) , P_x (осевая, т.к. действует в направлении подачи, вдоль оси вращения заготовки или оси сверла). Только P_z существенно влияет на мощность резания (требуемую мощность станка):



$$N_{резания} = N_e = P_z\,(Н) \cdot v\,(м/с) \quad [Вт]$$

Технологические составляющие силы резания *(продолжение)*

Равнодействующая сила резания ***R*** (***P***) при точении заготовки проходным резцом может быть разложена на **технологические составляющие**: P_z - ***тангенциальная*** (главная) составляющая, действует **в направлении вектора окружной скорости** *v* и определяет мощность главного привода станка; P_x - ***осевая*** составляющая, действует вдоль оси заготовки **параллельно подаче** *s* и определяет нагрузку на механизм подачи станка; P_y - ***радиальная*** составляющая, направлена по оси *Y* **радиально к оси заготовки,** определяет силу **отжатия резца** от заготовки.

При малой жесткости заготовки эта составляющая влияет на **погрешности формы и размера детали**. Составляющие P_x и P_y складываясь, дают промежуточную равнодействующую $\boldsymbol{P_{xy}}$, лежащую в **основной плоскости**, т.е. $\overline{R}_{xy} = \overline{P}_x + \overline{P}_y \quad P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$

Вектор $\boldsymbol{P_{xy}}$ совпадает с **направлением схода стружки,** а соотношение величин её составляющих зависит от **углов схода стружки η** и **главного угла в плане φ**. При этом также меняется отношение глубины резания *t* и подачи *s* - P_x/P_y=tg(φ+η). О величинах силы резания ***R*** и ее составляющих можно судить на примере **точения углеродистой стали** средней твердости при φ =45°, λ=0, γ=15° и отношении *t*/*s*>1 (прямой рез) по следующим приближенным значениям

$$P_z : P_y : P_x = 1 : (0{,}4 \ldots 0{,}5) : (0{,}25 \ldots 0{,}3)$$

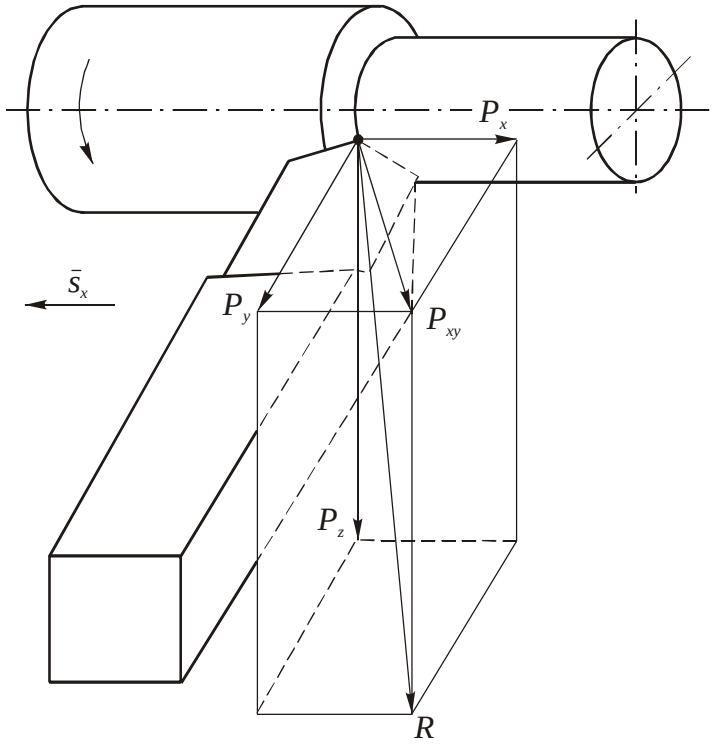
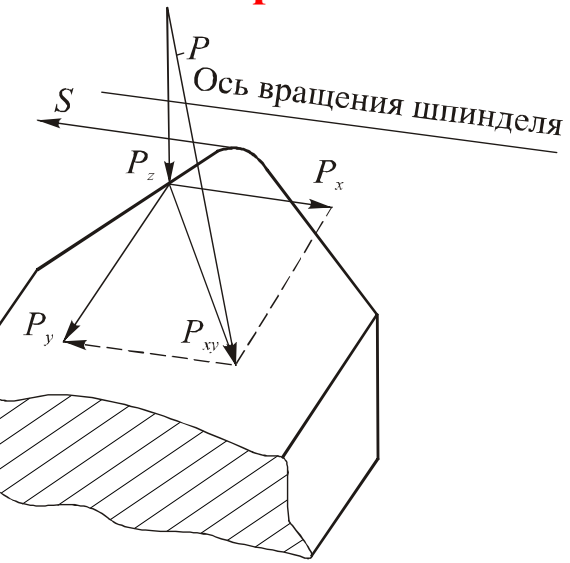


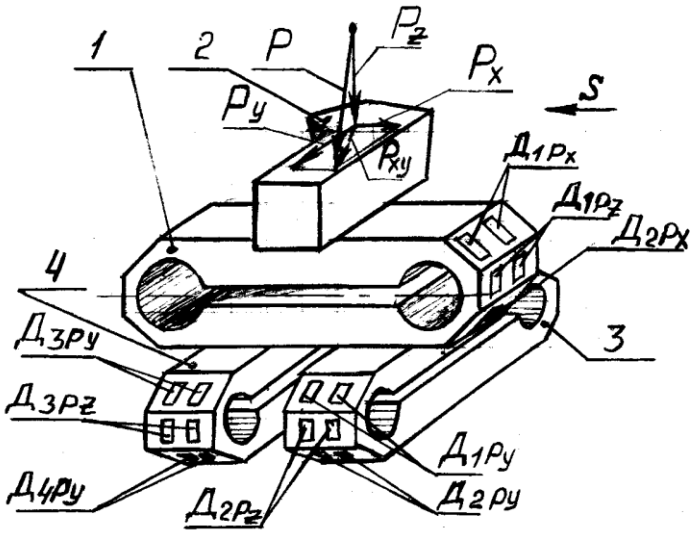
Схема разложения равнодействующей силы резания *R* на технологические составляющие P_z, P_x и P_y

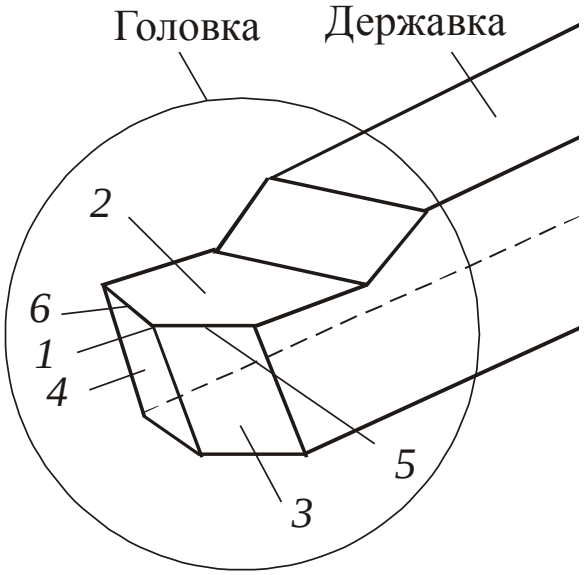
Токарный проходной резец

Резец – это призматическое тело с рабочим концом (головкой), оформленным в виде трехгранника с **вершиной** *1* и державкой. Поверхность *2*, по которой сходит стружка, называется **передней поверхностью**, а две другие поверхности, обращенные к поверхности резания и к обработанной поверхности, называются соответственно **главная задняя поверхность** *3* и **вспомогательная задняя поверхность** *4*. При пересечении передней поверхности с главной и вспомогательной задними поверхностями образуются соответственно **главная режущая кромка** *5* и **вспомогательная режущая кромка** *6*.

Для отсчета углов заточки токарного проходного резца используют две координатные плоскости: **плоскость резания** и **основную плоскость.**







Поверхности и грани (режущие кромки) резца

Составляющие силы резания *P* и измерение её составляющих с помощью трёх компонентного динамометра

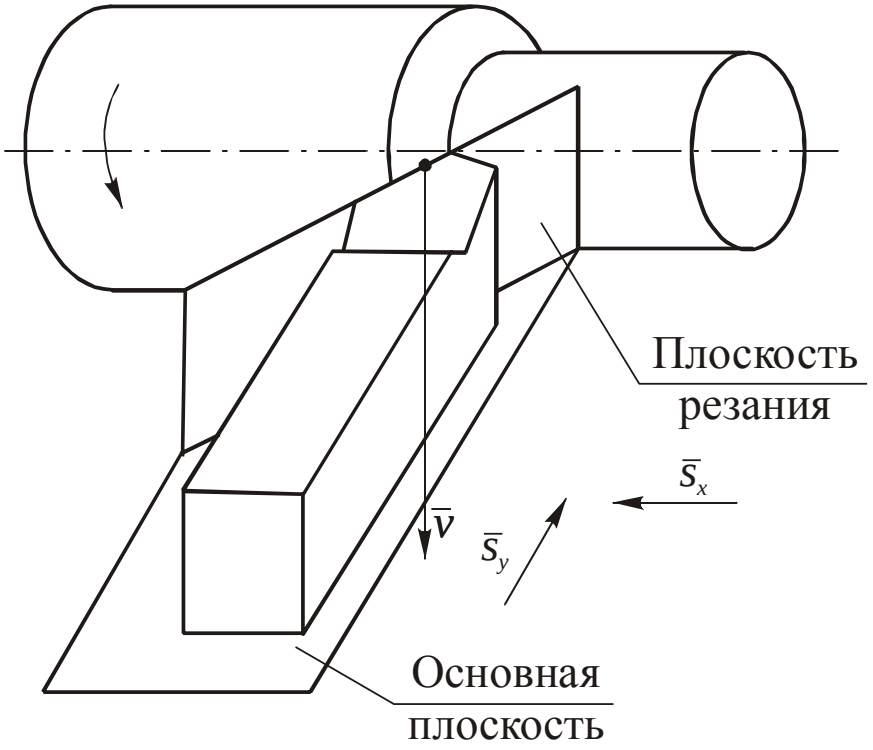
Токарный проходной резец

Плоскость резания проходит через главную режущую кромку касательно к поверхности резания и вектор скорости резания. **Основная плоскость** – это плоскость, в которой лежат **векторы продольной** и **поперечной подач.** Для токарного резца эта плоскость совпадает с опорной поверхностью державки резца (чаще всего она **горизонтальна**), а плоскость резания перпендикулярна к ней. **Скорость резания** (***v***) при точении – это вектор **окружной** скорости. Вектор **подачи** (***s*** или ***f***) **по величине** чаще всего на два порядка меньше вектора скорости резания. Если величина подачи соизмерима со скоростью резания, то это влияние необходимо учитывать при определении **кинематических параметров** геометрии инструмента.

Окружная скорость главного движения при точении определяется по формуле (м/мин)

$$v = \frac{\pi d n}{1000}$$

где d - диаметр заготовки, **мм**; n - частота вращения заготовки, **об/мин**.



Геометрия проходного резца в плане (на виде сверху)

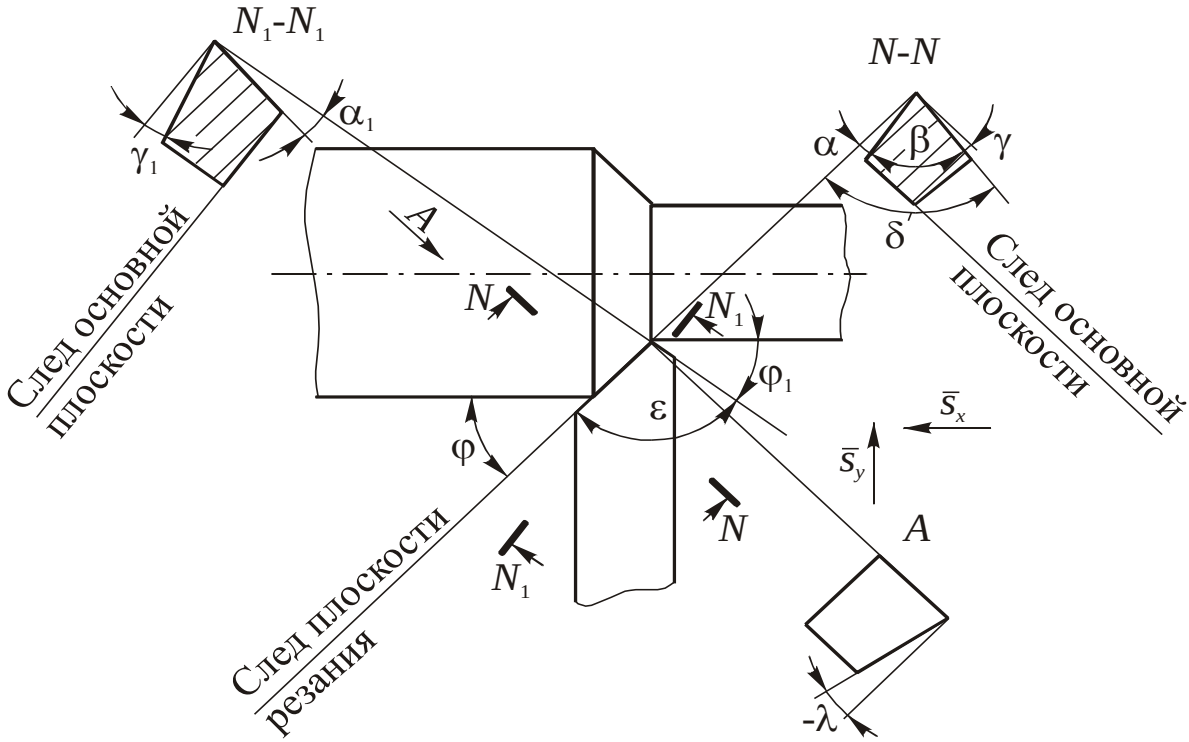
Главный угол в плане φ - угол между направлением подачи и проекцией главной режущей кромки на основную плоскость.

Вспомогательный угол в плане φ_1 - угол между направлением подачи и проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

Угол при вершине ε - угол между проекциями главной и вспомогательной режущими кромками на основную плоскость. $\varepsilon=180°-(\varphi+\varphi_1)$.

Радиус при вершине *R* (*r*) играет решающую роль на шероховатость обработанной поверхности, особенно при малой подаче (***s*** менее 0,2 мм/об).

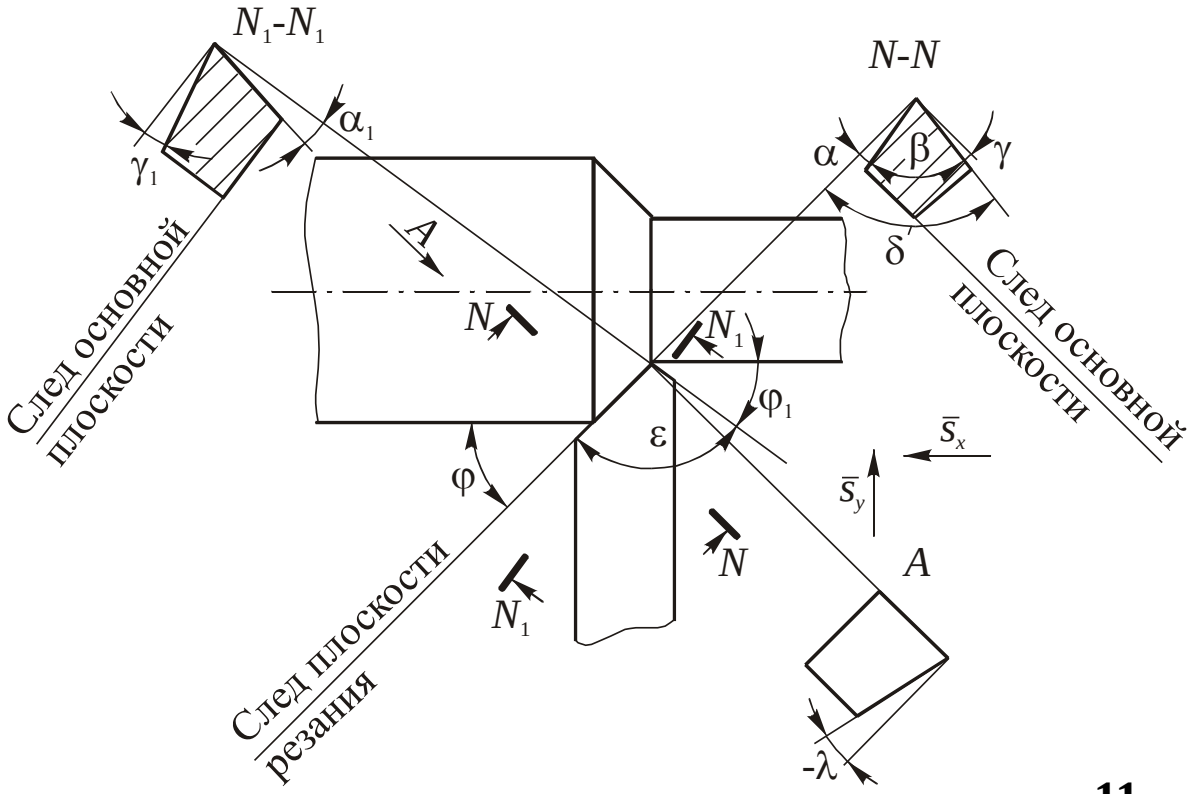
Плоскость ***N-N*** называется **главной секущей плоскостью.** Она проходит **перпендикулярно основной плоскости** и **проекции главной режущей кромки** на основную плоскость.



Углы токарного проходного резца в главной секущей плоскости

Плоскость *N-N* называется **главной секущей плоскостью,** так как именно в ней и параллельных ей плоскостях, проходящих через любые точки главной режущей кромки, происходит **процесс деформирования обрабатываемого материала** при его переходе в стружку. В главной секущей плоскости измеряются: **главный передний угол** **γ** - угол между **передней поверхностью** резца (или касательной к ней) и плоскостью, перпендикулярной **к плоскости резания** в рассматриваемой точке главной режущей кромки; **главный задний угол** **α** - угол между главной задней поверхностью резца (или касательной к ней) и плоскостью резания;

угол резания **δ** - угол между плоскостью резания и передней поверхностью резца (или касательной к ней); **угол заострения** **β** - угол между главной задней и передней поверхностями резца (или касательными к ним): β=90°- (**α**+**γ**). Аналогично и в сечении вспомогательной режущей кромки резца **вспомогательной секущей плоскостью** N1-N1 .

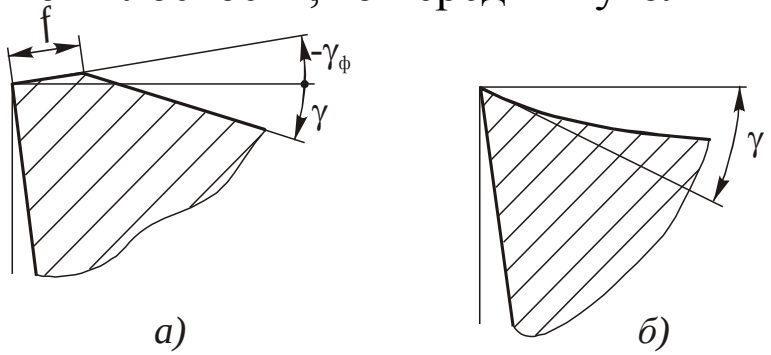


Углы в главной секущей плоскости (*продолжение*)

При измерении переднего угла следует учитывать, что в зависимости от положения передней поверхности относительно основной плоскости **передний угол γ** может иметь **положительное** или **отрицательное** значения. В первом случае передняя поверхность резца направлена вниз от режущей кромки, а во втором случае – вверх от нее. Если передняя поверхность параллельна основной плоскости, то передний угол равен нулю.

У твердосплавных резцов с целью упрочнения режущего клина переднюю поверхность часто затачивают с двумя передними углами. При этом передний угол по фаске затачивают отрицательным $\gamma_ф$=(-5°…-15°), длина фаски $f \approx (0{,}2…0{,}8)\cdot a$, где ***a* – толщина срезаемого слоя**, которая зависит от рабочей подачи *s* и главного угла в плане *φ*: $a = s\cdot\sin\varphi$, мм.

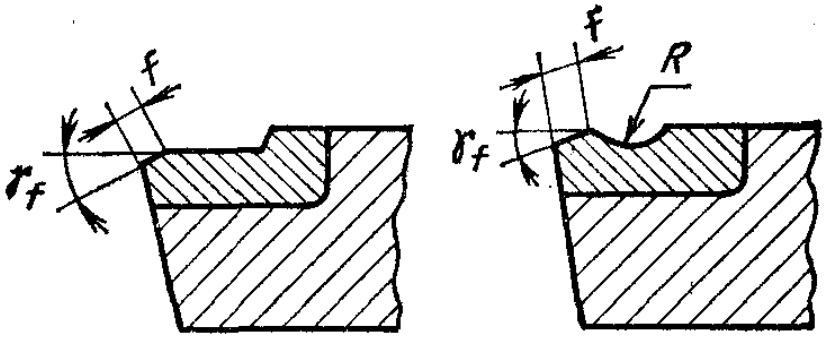
Передний угол за фаской чаще всего выполняют положительным. Если передняя поверхность криволинейная, то передний угол измеряют между основной плоскостью и плоскостью, касательной к криволинейной передней поверхности резца .



Оптимальным главным передним углом считается γ=+15° при обработке чистой поверхности **незакалённой стальной заготовки средней и малой твёрдости** резцом из **быстрорежущей стали**, и **γ=+10° – резцом с твёрдосплавной пластиной**. Если выполняется черновая обработка или с ударами, то оптимальный угол +5° и 0° соответственно. При обработке **закалённой** заготовки или с **твёрдой коркой** γ=-5…-10°, при обработке **труднообрабатываемых** материалов, например, титановых или жаропрочных сплавов – до -25°. При обработке **алюминиевых сплавов** для предотвращения налипа сходящей стружки на переднюю поверхность инструмента используются большие положительные передние углы γ – до +30°.

Углы в главной секущей плоскости (*продолжение*)

Для завивания стружки и уменьшения силы резания на передней поверхности инструмента часто шлифуется **канавка радиусом *R***, параллельно или под небольшим углом к главной режущей кромке. Величина радиуса и глубина канавки h зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов резания, и обычно подбирается опытным путём ($R \approx 2…10$ мм, $h \approx 0{,}3…3$ мм).

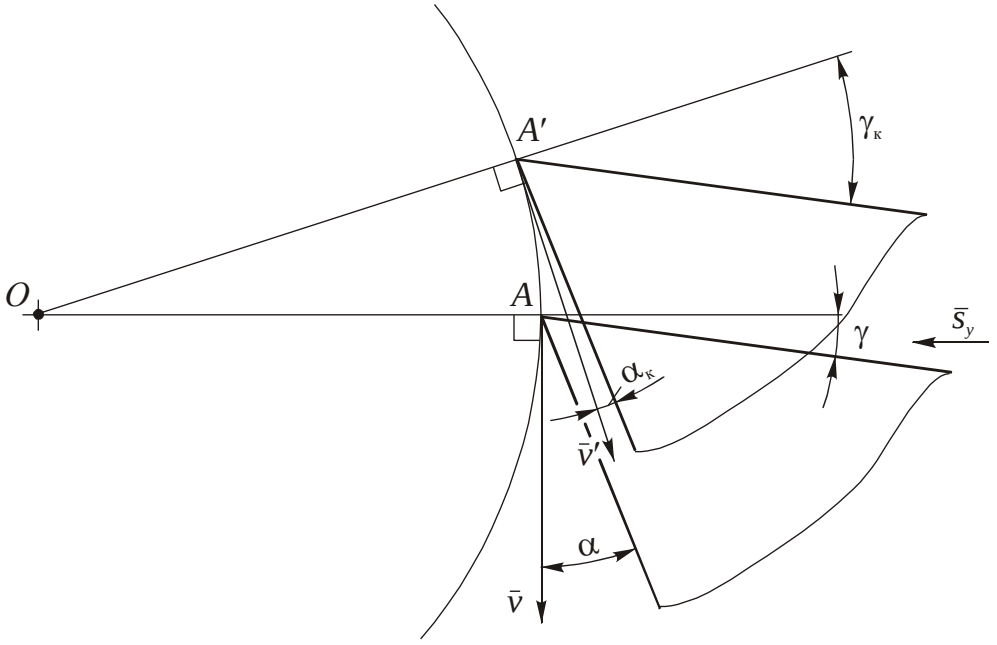


При получистовой и чистовой обработке **незакалённой стали** и других нетвёрдых материалов, **канавка используется отдельно без заточки фаски** и **выходит к главной режущей кромке**. Наличие канавки позволяет **увеличить главный передний угол *γ*** на участке контакта передней поверхности со стружкой без её существенной заточки с требуемым передним углом, что позволяет сохранить достаточную прочность режущего клина, **уменьшить трудоёмкость заточки** и расход инструментального материала.

Влияние положения режущей кромки относительно **оси центров станка**

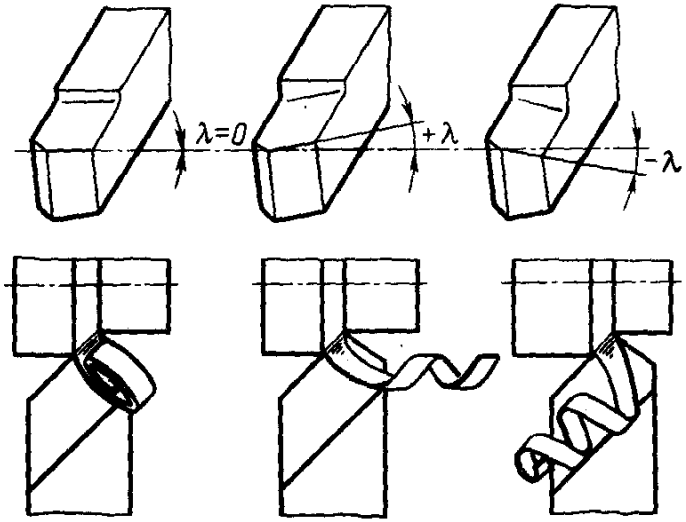
При поперечной подаче резца на величины **кинематических переднего и заднего углов** оказывает влияние положение вектора скорости резания, через который проходит плоскость резания. Если вершина резца из точки смещена вверх в точку относительно оси центров токарного станка, то кинематический передний угол увеличивается, а кинематический задний угол уменьшается на эту же величину . При смещении вершины резца вниз относительно оси центров наблюдается обратная картина. **Положительный передний угол γ** затачивается для **облегчения образования стружки** и уменьшения силы резания.

Положительный задний угол α создают для уменьшения трения между поверхностью резания и задней поверхностью резца. С увеличением заднего угла прочность режущего клина снижается. Поэтому в зависимости от нагрузки на режущий клин, а также от прочности инструментального материала и условий резания чаще всего задний угол α=6…10°



В плоскости резания (вид на главную режущую кромку) измеряют **угол наклона главной режущей кромки** λ - угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью.

Угол наклона главной режущей кромки λ также, как и передний угол, оказывает влияние на процесс деформирования материала заготовки через **изменение направления схода стружки** по передней поверхности инструмента. Угол λ принято считать **положительным**, когда наиболее уязвимая для разрушения вершина резца занимает наинизшее положение по сравнению с другими точками главной режущей кромки. Благодаря этому вершина резца предохраняется от повреждений, особенно **при прерывистом резании и работе с ударными нагрузками**. При положительных углах стружка сходит в направлении **к** обработанной поверхности и, царапая ее, увеличивает шероховатость последней.



На **чистовых операциях** применяют **отрицательные** значения угла λ , так как в этом случае нагрузка на режущий клин относительно невелика, а стружка отводится в направлении **от обработанной** поверхности. В этом случае вершина резца по сравнению с другими точками главной режущей кромки занимает наивысшее положение. Если главная режущая кромка параллельна основной плоскости, то угол **λ=0° - это наиболее часто**.

Наличие **отрицательного λ ослабляет вершину резца**, поэтому рекомендуется уменьшать подачу и глубину резания в 1,5…2 раза против обработки с нулевым λ.

На практике при измерении угла часто исходят из другого, более общего, определения: угол λ - это угол между **вектором скорости резания** и **перпендикуляром к главной режущей кромке**

Формы поперечного сечения срезаемого слоя

Срезаемый слой при точении проходными резцами определяется толщиной и шириной, которые связаны с технологическими параметрами: подачей и глубиной резания. **Толщина среза *a*** и ширина среза ***b***: $a = s\sin\varphi;$

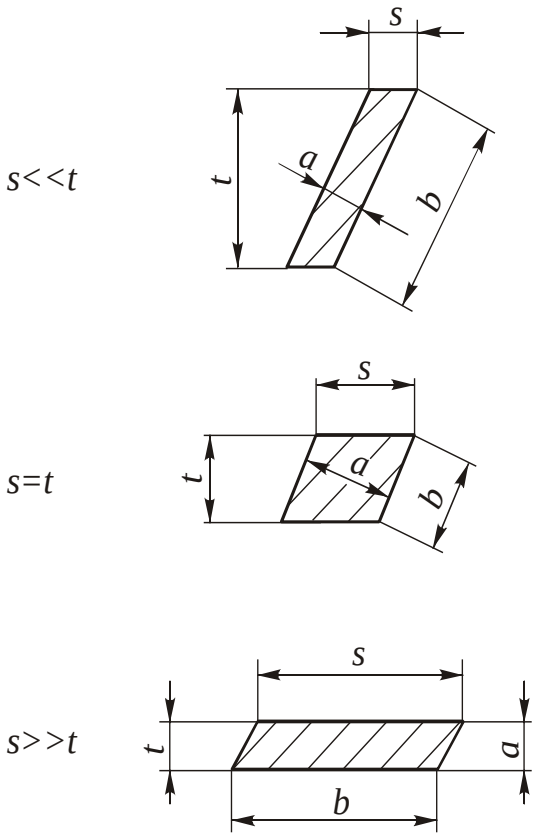
$$b = t/\sin\varphi.$$

При этом номинальная площадь сечения срезаемого слоя $F_н = ab = st$

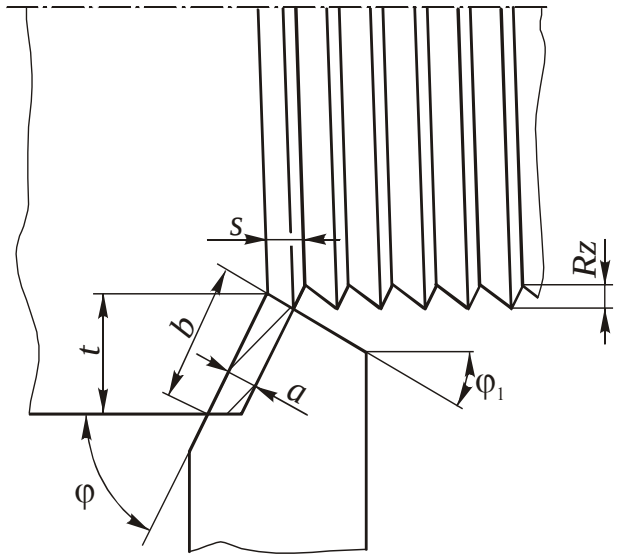
Фактическая площадь сечения среза меньше площади параллелограмма на величину площади гребешков (микронеровностей), остающихся на обработанной поверхности

$$F_ф = F_н - F_{гр} = st - sRz/2$$

где Rz - высота гребешков.



а)



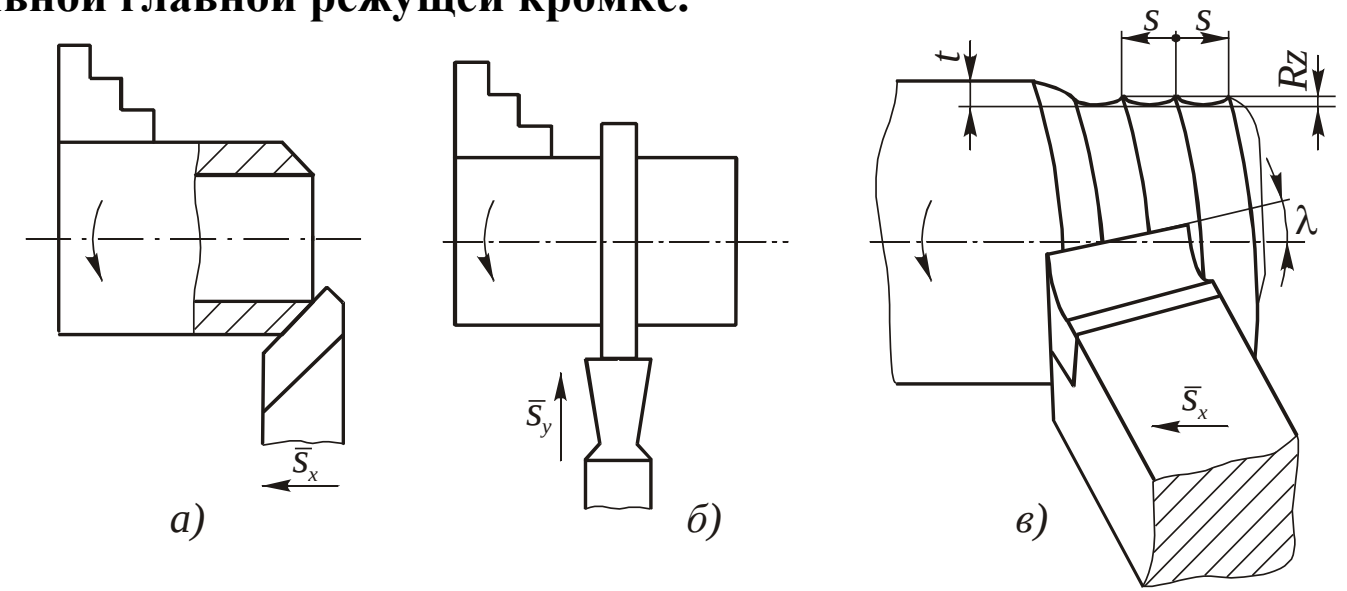
б)

Виды резания

Главный угол в плане φ оказывает большое влияние на соотношение *a/b*. С уменьшением угла φ срезаемый слой становится тоньше и шире, что увеличивает степень его деформации, увеличивает составляющие P_z, P_y силы резания, но уменьшает составляющую P_x, улучшает отвод тепла, а значит увеличивает стойкость инструмента. В связи с тем, что при φ <45° резко возрастает радиальная нагрузка P_y на заготовку и инструмент, на практике главный угол в плане обычно берут в пределах **φ=45…90°**.

При **схеме свободного резания** (***а***, ***б***) обработанная поверхность получается после прохода только **одной режущей кромки**. **При несвободном резании в нём участвует две и более режущих кромки** (главная, вспомогательная и др.) (*в*)**.**

При **прямоугольном** (**ортогональном**) резании **подача *s*** направлена **перпендикулярно главной режущей кромке** (***б***) , стружка сходит в направлении, перпендикулярном к режущей кромке. При **косоугольном** резании (при наличии угла **λ**) она отклоняется от нормали примерно на этот же угол. При движении подачи с **φ≠90°** также считается косоугольное резание. При **прямоугольном** свободном резании деформация металла при переходе в стружку происходит в плоскости, **перпендикулярной к режущей кромке**. При **косоугольном** резании деформация идет одновременно и в плоскости, **параллельной главной режущей кромке.**



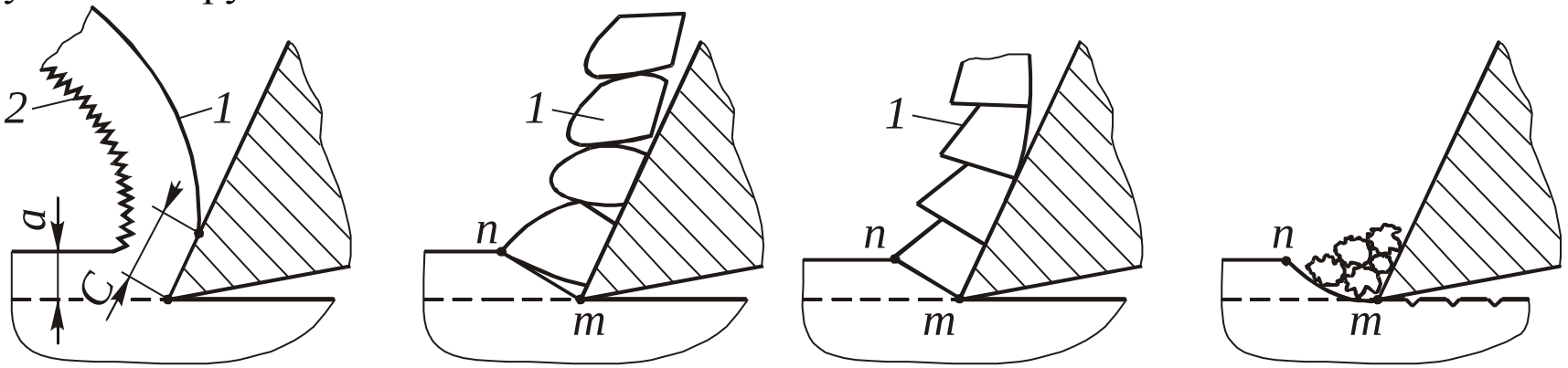
а) *б)* *в)*

2. Исследование деформаций срезаемого слоя и составляющих сил резания

Деформации срезаемого слоя при свободном прямоугольном резании

Виды стружки. Одно из первых исследований процесса стружкообразования выполнил русский ученый И.А. Тиме (1870 г.). Он предложил классификацию стружек, которая оказалась настолько удачной, что сохранилась в основном и до настоящего времени. Согласно этой классификации по внешнему виду и внутреннему строению при резании конструкционных сталей стружка бывает следующих типов: **сливная** (*а*), **элементная** (*б*), **суставчатая** (*в*) **и надлома** (*г*).

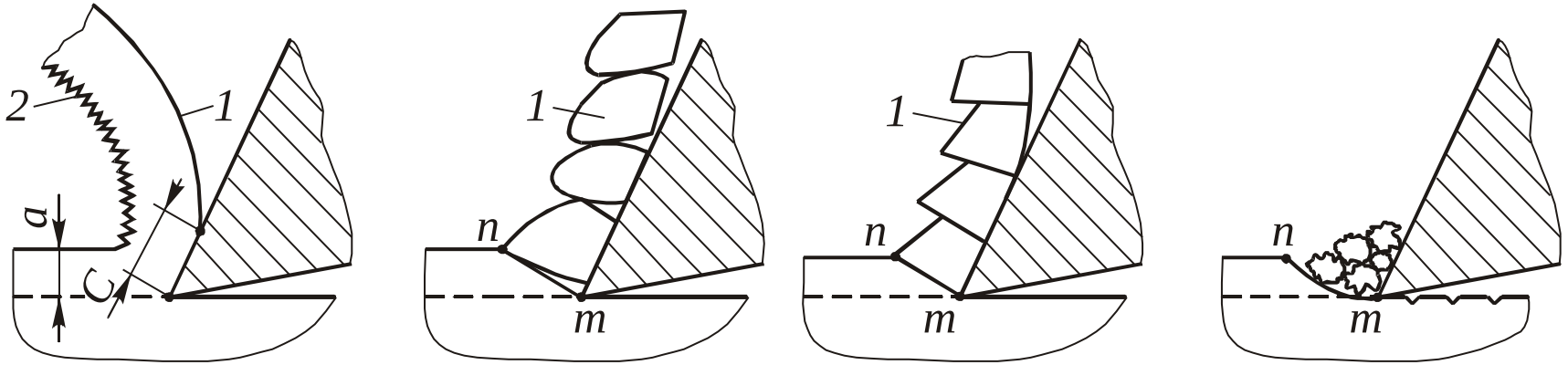
Сливная стружка (рис. ***а***) представляет собой непрерывную ленту, которая в зависимости от условий схода по передней поверхности инструмента может быть прямой, спиральной или в виде хаотических завитков. **Прирезцовая** сторона стружки ***1***, прилегающая к передней поверхности инструмента, гладкая, блестящая, а **внешняя сторона *2*** – в виде мелких, постоянно чередующихся **зубчиков**. Цвет стружки в зависимости от температуры резания изменяется от белого и желтого до матово серого и синего. Форма и размеры поперечного сечения стружки по всей длине постоянны, что свидетельствует о стабильности деформации, происходящей при образовании такой стружки. **Сливная стружка** встречается при резании **пластичных металлов** в основном на больших скоростях, малых и средних подачах, а также при положительных передних углах инструмента.



а) *б)* *в)* *г)*

Виды стружки *(продолжение)*

Элементная стружка (рис. ***б***), или, как ее иногда называют, **стружка скалывания**, состоит из отдельных элементов (кусочков) металла *1*, не связанных или слабо связанных между собой прирезцовым слоем. Каждый элемент стружки при его формировании претерпевает значительную деформацию и **становится в 2…3 раза тверже** по сравнению **с исходной твердостью** обрабатываемого материала. Вследствие этого срезаемый слой, проходя через так называемую поверхность скалывания, теряет свою пластичность и разрушается с определенной периодичностью. Элементная стружка образуется **при резании хрупких металлов** (чугун, бронза и др.), а также при резании **на невысоких скоростях пластичных металлов, при больших толщинах срезаемого слоя, малых передних углах, высокой твердости** обрабатываемых металлов и других условиях, затрудняющих пластическую деформацию.



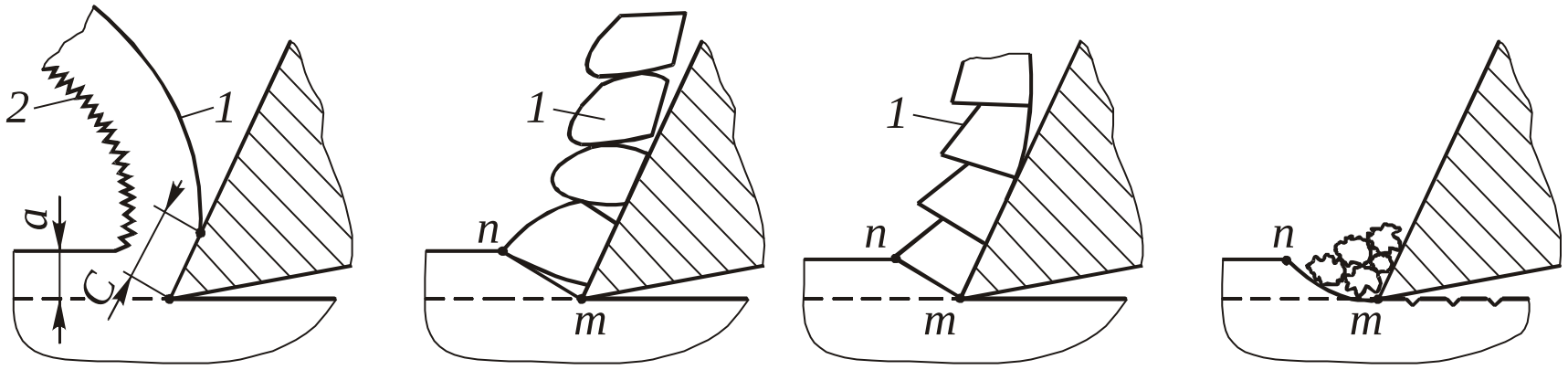
а) *б)* *в)* *г)*

Виды стружки *(продолжение)*

Суставчатая стружка (рис. ***в***) является **переходной от элементной стружки к сливной**. Она состоит из отдельных суставов (элементов) *1*, связанных между собой **прочно** (тогда она ближе к **сливной** стружке) или **слабо** (тогда она ближе к **элементной** стружке). Такой вид стружки часто встречается при резании высоколегированных сталей и титановых сплавов.

Стружка надлома (рис. ***г***) состоит из отдельных не связанных между собой кусочков, имеющих **различные размеры и форму**. Она встречается **при резании весьма хрупких материалов** или некоторых металлов, склонных к налипанию на передние поверхности инструментов. При этом скол отдельных кусочков металла происходит по поверхности, часто располагаемой **ниже линии среза.**

На практике при резании пластичных металлов (сталей и сплавов) и особенно на высоких скоростях **чаще всего встречается сливная и суставчатая стружка.**



а) *б)* *в)* *г)*

Схема стружкообразования

Впервые **схему стружкообразования** при резании предложил **И.А. Тиме** (1870 г.), а затем ее развил К.А. Зворыкин (1893 г.). За рубежом (США) эти схемы повторил *M.E. Merchant* (1945 г.).

Согласно схеме И.А. Тиме срезаемый слой толщиной превращается в стружку толщиной путем сдвига бесконечно тонких слоев материала в **плоскости *OA*,** расположенной **к плоскости резания** под **углом наклона условной плоскости сдвига *Ф***. В результате деформации обрабатываемого материала при его переходе в стружку её толщина a_1 становится **больше толщины срезаемого слоя *a***, а ее длина l_1 - короче пути l, пройденного резцом. Это явление И.А. Тиме назвал **усадкой стружки** *(коэффициент усадки стружки* ***по длине*** $K_l = l / l_1 > 1$**).** Часто для упрощения измерения используется ***коэффициент усадки по толщине*** $K_a = a_1 / a > 1$. Недостаток схемы И.А. Тиме – она предполагает существование **единственной плоскости**, в которой происходит **деформирование срезаемого слоя**. В этом случае в плоскости сдвига *OA* скорость перемещения частиц материала должна изменяться мгновенно от скорости резания v до скорости перемещения стружки v_1 ($v > v_1$).

Тогда в условной плоскости сдвига должны иметь место бесконечно большие градиенты напряжения и ускорения, что противоречит законам механики. В действительности имеется переходная зоны между срезаемым припуском и стружкой.

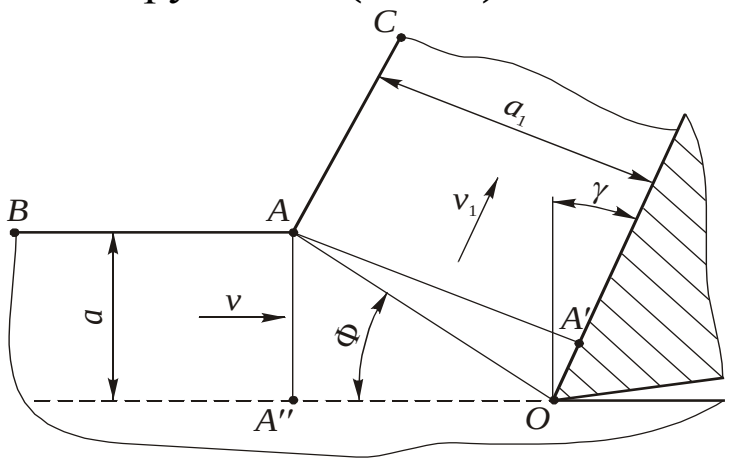
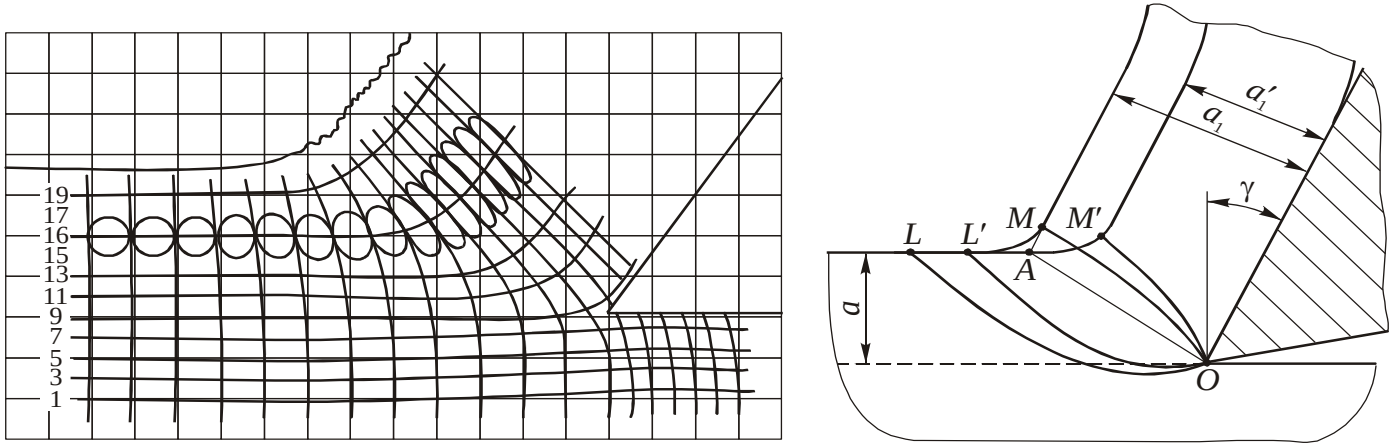


Схема стружкообразования (продолжение)

При резании на **микроскоростях** (несколько мм/мин) высокопластичных металлов (медь, латунь) по **искажению делительной сетки**, нанесенной на боковую поверхность среза в виде квадратов или окружностей (*а*), было доказано существование **зоны стружкообразования клинообразной формы** (*б*), имеющей начальную *OA* и конечную *OM* границы. Было установлено, что **процесс пластической деформации начинается впереди резца** на границе *OL*, имеющей криволинейную форму, которая в некоторых случаях располагается даже **ниже линии среза**. **Степень деформации ε**, рассчитанная по искажению делительной сетки, а также путем **измерения микротвердости** (Г.Д. Дель) в точках срезаемого слоя от линии *OL* к линии *OM* возрастает сначала медленно, а затем в зоне *AOM* с большей скоростью (здесь *OA* - **условная плоскость сдвига**, проведенная из вершины резца в точку пересечения наружных поверхностей заготовки и стружки).



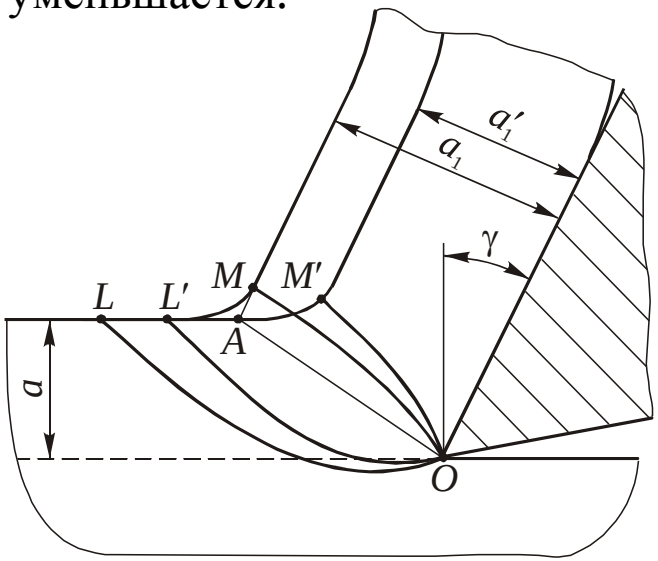
а) *б)*

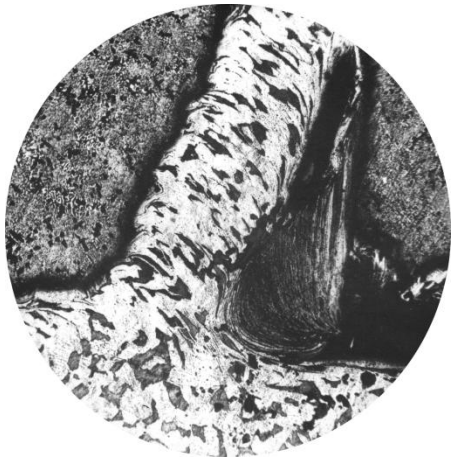
Искажения (*а*) координатной сетки, полученной методом вдавливания индентора (Г.Л. Куфарев) и схема стружкообразования (*б*), характерная для обработки на микроскоростях

Схема стружкообразования (продолжение)

При увеличении скорости резании **на обычных скоростях**, применяемых в практике, **усадка стружки уменьшается**, а границы зоны *OL* и *OM* **поворачиваются по ходу часовой стрелки** и **сближаются**, занимая, соответственно положения *OL'* и *OM'* . При этом толщина фактической зоны деформации в районе условной плоскости сдвига составляет **десятые доли миллиметра**. Поэтому после протравливания кислотой шлифов «корней» стружки **эта зона выглядит как плоскость**, разделяющая срезаемый слой и стружку. Особенно наглядно это видно по текстуре **«корней» стружек**, полученных при мгновенной остановке процесса резания сталей.

Сужение зоны деформации при резании объясняется тем, что с увеличением скорости резания **возрастает скорость деформации** **έ**, вследствие чего происходит **запаздывание** пластических деформаций. Это приводит **к приближению границы** *OL* **к условной плоскости сдвига** *OA*. При этом верхняя граница *OM* также приближается к условной плоскости сдвига *OA*, а толщина зоны деформации *AOM* резко уменьшается.

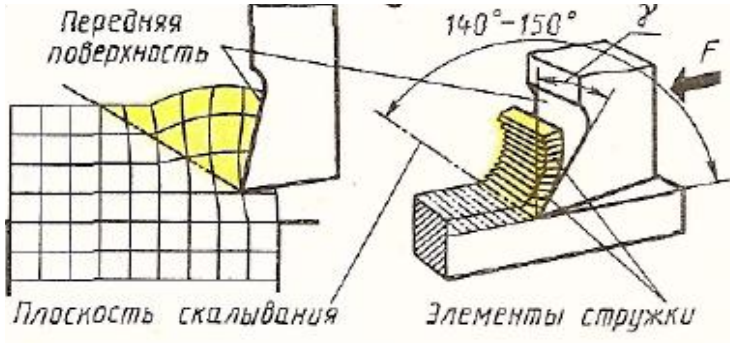




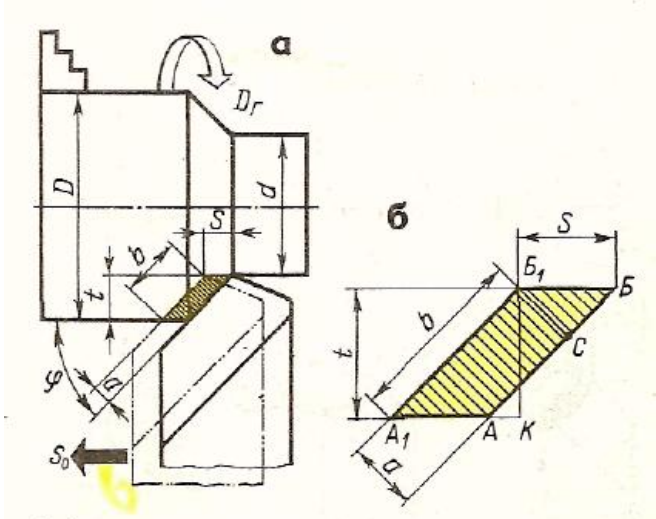
Микрофотография «корня» стружки (Б.М. Орлов)

Процессы в зоне стружкообразования

Образования стружки можно проследить на примере работы строгального резца. Резец, перемещаясь относительно обрабатываемой заготовки, с силой F (P_z) вдавливается в ее поверхностный слой, подлежащий удалению .



Под действием этой силы сначала происходит упругая деформация удаляемого слоя заготовки, а затем, по мере увеличения перемещения и силы, и пластическая деформация. Срезаемый слой деформируется, отдельные его частицы смещаются относительно друг друга. Чем больше главный ***передний угол γ*** резца, тем легче происходит переход срезаемого слоя в стружку и тем меньше составляющая F силы резания.



По мере продвижения инструмента деформация возрастает до тех пор, пока напряжение в деформируемом слое превысит предельно допустимое на срез, после чего происходит местное разрушение металла, т.е. скалывание кусочка деформированного металла – элемента стружки по поверхности среза (скалывания). Таким образом, постепенно весь слой металла, подлежащий удалению, превращается в стружку.

Процессы в зоне стружкообразования (продолжение)

Для удобства анализа процесса стружкообразования лучше начать рассмотрение со случая **прямоугольного свободного резания при строгании пластины** резцом, **ширина которого больше ширины строгаемой пластины**.

В этом случае все процессы будут одинаковы в любом сечении, перпендикулярном главной режущей кромке, независимо от расстояния до боковой поверхности резца.

При строгании резец движется со скоростью резания V. Толщина срезаемого слоя *a* при строгании равна глубине резания *t*. Линия среза P_1-P_2 теоретически касается вершины режущей кромки и параллельна направлению скорости резания.

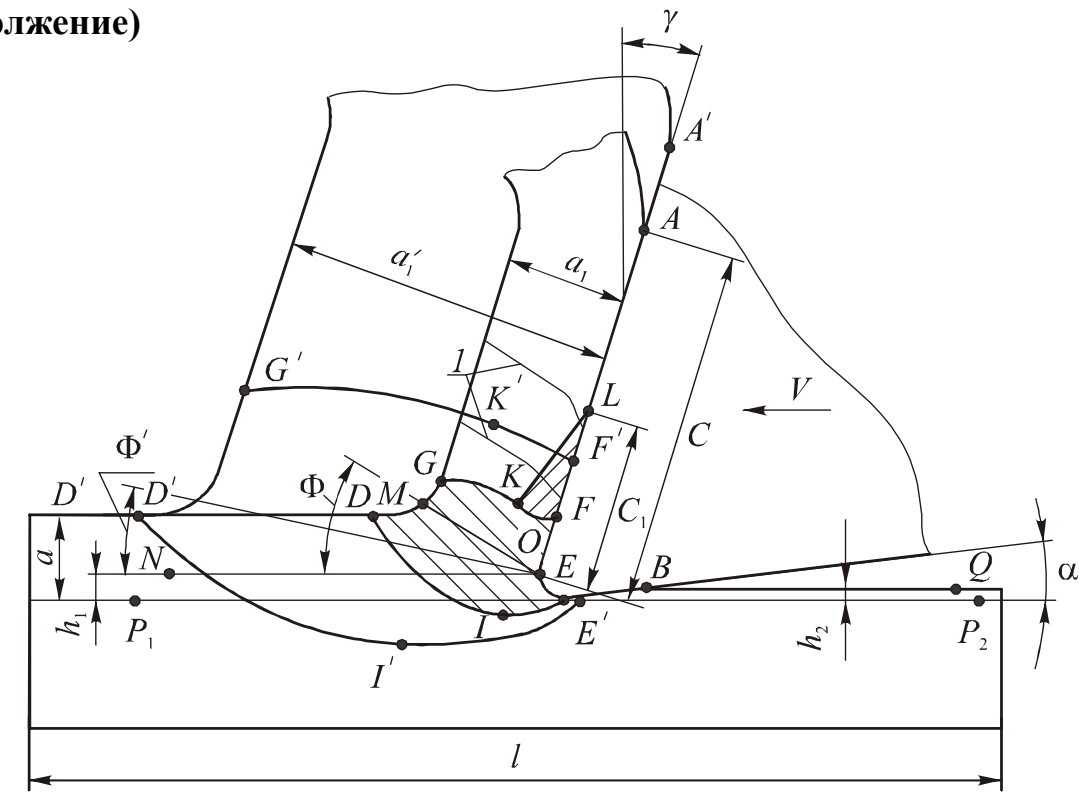
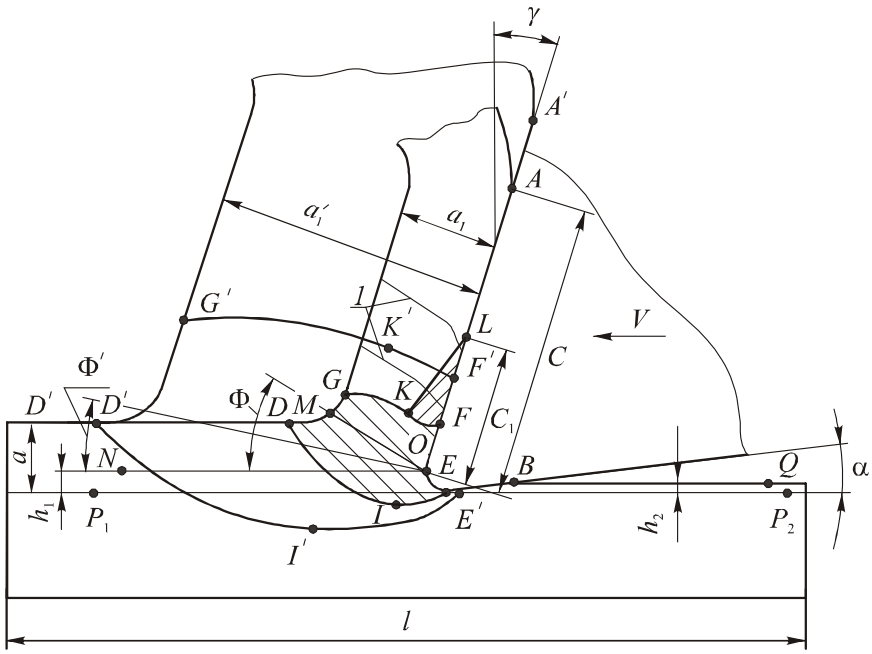


Схема упруго-пластической деформации в зоне стружкообразования при строгании пластины

Практически всегда **режущая кромка имеет округление радиусом *ρ*** вследствие износа или неизбежно образуется в процессе обычной заточки инструмента. При резании часть металла в точке *O* **вдавливается под радиусный участок** и проходит под задней поверхностью резца. Поэтому фактически линия среза определяется линией ***N-O-E-B-Q***.

Процессы в зоне стружкообразования (продолжение)

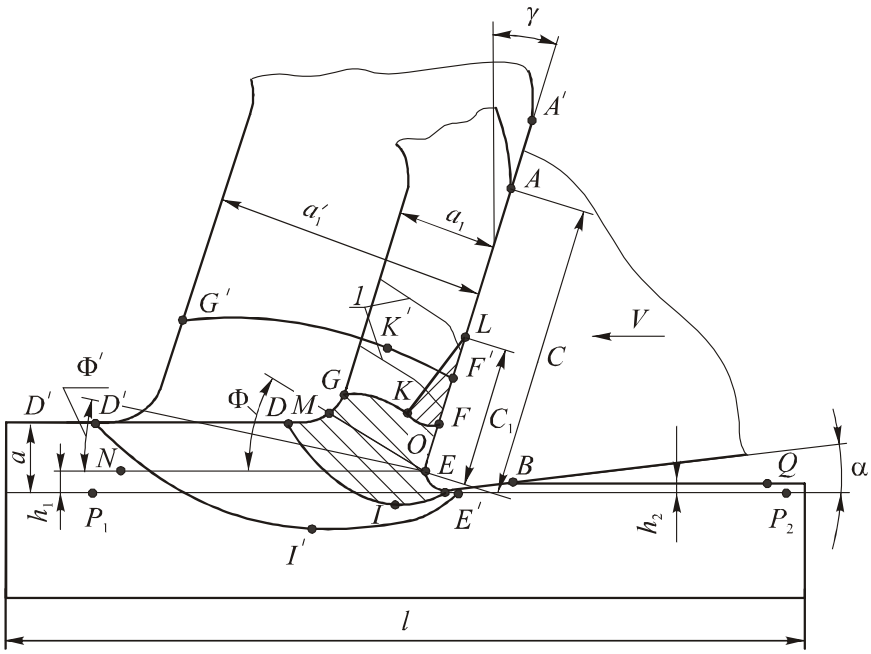
Толщина слоя **вдавливаемого под режущую кромку металла h_1** зависит от радиуса округления режущей кромки ρ, толщины срезаемого слоя a, механических свойств обрабатываемого материала и наличия нароста или застойной зоны обрабатываемого материала у режущей кромки. Обычно h_1 составляет от нескольких микрометров при чистовой обработки до десятых долей миллиметра при черновой обработке, но при анализе явлений на передней поверхности инструмента в первом приближении ею можно пренебречь.

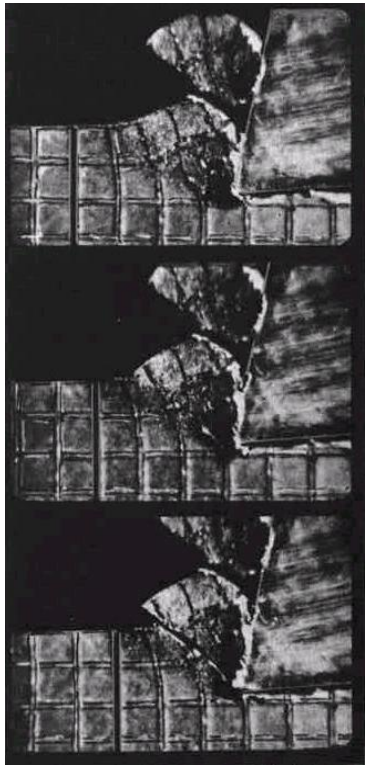


Величина **упругого восстановления обработанной поверхности h_2** немного меньше h_1 и зависит от тех же факторов плюс выдавливание на боковые поверхности пластины и пластическая деформация металла на обработанной поверхности. От величины h_2 в большой степени зависит **глубина и степень пластической деформации** обработанной поверхности, долговечность детали при её эксплуатации.

При движении резца перед ним образуется зона ***первичной пластической деформации***, в которой обрабатываемый металл деформируется уже не только упруго, но и пластически, и изменяет направление своего движения на параллельное относительно передней поверхности инструмента. **Начало этой зоны** определяется кривой ***D-I-E***, **окончание** – кривой ***G-K-F***.

Скорость деформаций έ = ε/Δt (ε=l-l_0) в этой зоне очень большая, на **несколько порядков больше**, чем при **обычных испытаниях образцов** на разрыв или сжатие. Большое влияние здесь оказывает скорость резания и температура, которая увеличивается вследствие пластической деформации. Большая часть деформаций и изменений происходит вблизи поверхности, определяемой линией *MO*. Чем меньше пластичность металла и больше скорость резания, тем меньше величина зоны первичной пластической деформации *D-I-E-O-F-K-G*, тем больше она сужается до плоскости *MO*, которую называют ***условной плоскостью сдвига***. Такое название эта область получила в связи с принятием упрощения: условно считается, что вся пластическая деформация происходит только в этой зоне и по этой плоскости происходит сдвиг обрабатываемого материала из слоя, подлежащего удалению, и преобразования его в стружку





Формирование **элементной** стружки со сдвигом элементов стружки по плоскости сдвига при строгании пластины (увеличено в 5 раз)

Наружная поверхность стружки, как правило, имеет пилообразный характер, что сказывается на точности измерения средней толщины стружки. При пластической деформации **объём срезаемого слоя** ($\omega = l \times a \times b$) и **объём стружки**, снятой с этой длины ($\omega' = l_1 \times a_1 \times b_1$), равны, т.е. $\omega = \omega'$. При вычислении объёмов используются следующие условные обозначения: l – длина пластины, с которой снята стружка; a – толщина среза (при строгании пластины это глубина резания t); b – ширина строгаемой пластины; l_1 – длина непрерывной стружки, срезанной с пластины длиной l; a_1 – толщина стружки; b_1 – ширина стружки. Это свойство равенства объёмов используется при измерении ***истинной усадки*** стружки по длине:

$l \times a \times b = l_1 \times a_1 \times b_1$; $l / l_1 = (a_1 \times b_1)/(a \times b)$; $k_l = l / l_1 = (a_1/a) \times (b_1/b) = k_a \times k_b$,

где **k_l – усадка стружки по длине**; $k_a = a_1/a$ – усадка стружки по толщине; $k_b = b_1/b$ – усадка стружки по ширине. «Усадка стружки» - длина стружки всегда меньше длины поверхности, с которой эта стружка была снята.

Чем **пластичнее** обрабатываемый материал, тем **больше усадка** стружки, тем **меньше *угол условной плоскости сдвига*** Φ. Угол Φ зависит не только от пластичности обрабатываемого металла, но и от переднего угла γ и режимов резания:

$$tg\,\Phi = \cos\gamma / (k_a - \sin\gamma).$$

При движении стружки по передней поверхности инструмента чистая (***ювенильная***, т.е. не окисленная и ещё не взаимодействовавшая с атмосферой), только что образовавшаяся прирезцовая поверхность стружки «прилипает» к передней поверхности инструмента. Этому явлению (***адгезии***) способствует высокая температура стружки из-за выделения теплоты при пластической деформации в зоне стружкообразования, большие нормальные контактные напряжения у режущей кромки.

Напряжения и силы при стружкообразовании

Схема силового взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом **в условной плоскости сдвига** в сечении, перпендикулярном к режущей кромке. На передней поверхности инструмента возникает **сила резания** (стружкообразования) ***R***, которую можно представить как геометрическую сумму сил нормального давления *N* и трения *F*: $\overline{R} = \overline{N} + \overline{F}$.

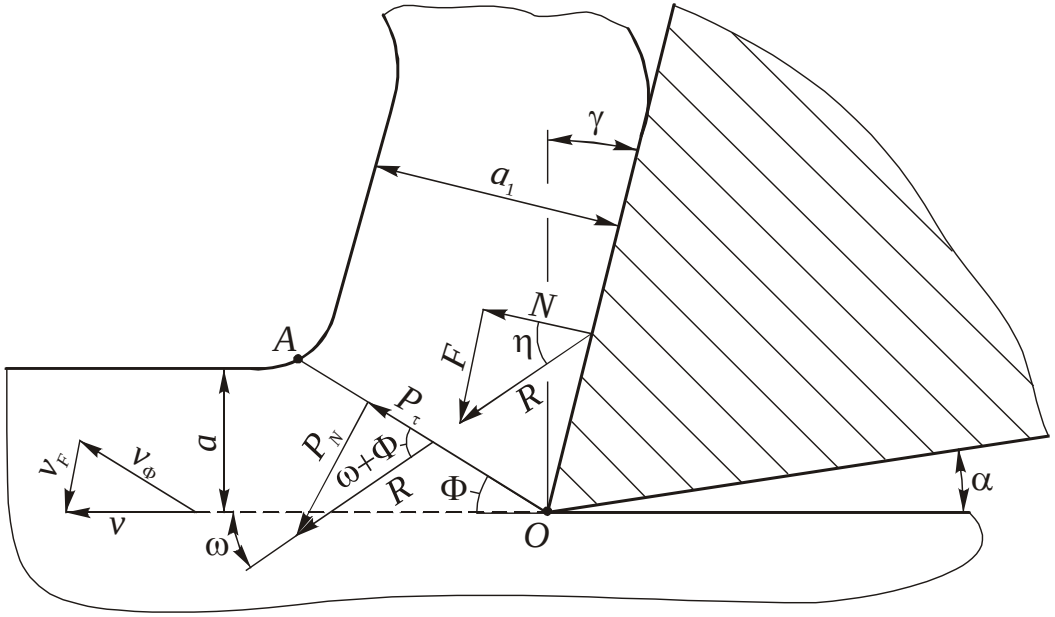
В этом случае **угол η** между силами *N* и *F* – это **угол трения**, а

$tg\eta = F/N = \mu$

-это **коэффициент трения μ**. Этот коэффициент трения μ отличается от обычного **коэффициента трения** *f=F/N*, определённого в условиях **внешнего трения,** тем, что при резании под действием высоких температур происходит **сдвиг слоёв металла** (**пластическая деформация**) относительно **соседних слоёв**, так называемое «**внутреннее» трение**.

В этом случае сила трения будет определяться не коэффициентом внешнего трения *f* (*F=N×f*), а

пределом прочности на сдвиг τ обрабатываемого материала с **учётом температуры** и **деформационного упрочнения**.



Схемы силового взаимодействия **режущего клина** с обрабатываемым материалом

Контактные процессы на поверхностях инструмента

В процессе резания в тонком прирезцовом слое стружки толщиной менее 0,01-0,3 мм линии текстуры **изгибаются в сторону, обратную движению стружки**. Это свидетельствует о наличии **вторичной пластической деформации** обрабатываемого материала, перешедшего в стружку, возникающей под действием силы трения на передней поверхности инструмента и тормозящей движение стружки. При этом, чем больше сила трения *F*, тем больше толщина заторможенного слоя и больше искривление линии текстуры. Большие значения силы трения *F* объясняются высокими касательными напряжениями *τ*, возникающими при трении свежеобразованной идеально чистой, новой (***ювенильной***) **поверхности стружки** по зачищенной, **освобожденной от окислов передней поверхности инструмента.**

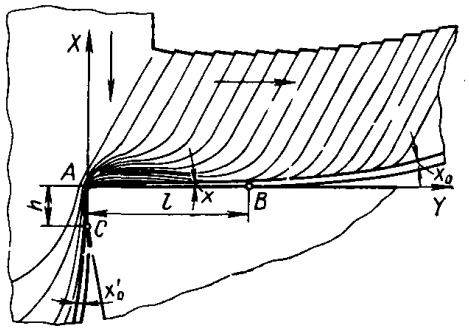


Рис. 1. Образование **зоны вторичной пластической деформации** (точение)

На очень малой по размерам площадке контакта у режущей кромки действуют **большие нормальные напряжения σ**. В условиях **высокой температуры** резания и **межмолекулярного взаимодействия прирезцового слоя стружки** с передней поверхностью инструмента **стружка перемещается** уже **не по передней поверхности инструмента**, а **по заторможенному слою**. Внешнее трение заменяется ***внутренним трением***. Длина контакта стружки с передней поверхностью *C* состоит из двух участков: 1) *OF* - участок пластического контакта ***длиной*** C_1; 2) *FB* - участок внешнего трения.

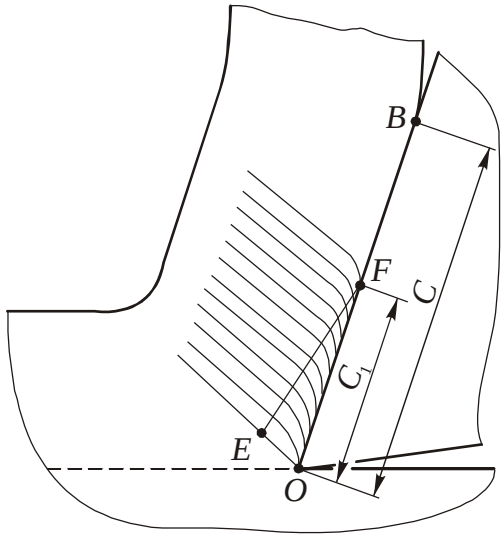


Рис. 2. Искривление текстуры из-за **застойной зоны *OEF*** (строгание)

На участке **вторичных пластических деформаций отсутствует обычное внешнее трение**, потому на **участке *OL* практически отсутствует абразивный износ**, что можно видеть на фотографиях передней поверхности изношенного инструмента. Для конструкционной незакалённой стали длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента $c \approx (5…10)\ a$. При точении заготовки резцом с главным углом в плане φ с продольной подачей s (мм/об) толщина срезаемого слоя $a = s \times \sin\varphi$ (мм).

Длина участка ***пластического*** контакта $c_1 = (0{,}3…0{,}7) \cdot c$, где c – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента (см. рис. 2.1). Для пластичных металлов, например, меди, коэффициент больше (приблизительно 0,7); для малопластичных, например, чугуна, – меньше (приблизительно 0,3); для **конструкционной незакалённой стали c_1 приблизительно 0,5**.

По данным Н.Н. Зорева при точении стали 50 резцом с передним углом γ=10° со скоростью резания v=82 м/мин и подачей s=0,42 мм/об длина участков контакта C_1=1,8 мм, а C=2,9 мм. При этом **высота заторможенного слоя** у режущей кромки составила 0,05 мм, затем на расстоянии 0,3 мм от кромки она **увеличилась до 0,2 мм**, а далее к концу участка **уменьшилась до 0,05 мм**. В этом случае **расчетная величина степени деформации сдвига** возросла от нуля в начале участка до **ε=39** – в конце его, что **в 20 раз выше,** чем в **основной массе стружки**, т.е. удельная работа пластической деформации в контактном слое стружки достигает очень больших значений. В соответствии с этим и **тепловыделение** здесь должно **в несколько раз превышать** тепловыделение, возникающее **в зоне стружкообразования**.

Работа касательных сил на передней поверхности инструмента фактически является не работой трения, а работой **пластической деформации контактного слоя** стружки. Если **изменяются удельные нагрузки** на площадке контакта стружки с передней поверхностью инструмента, то, соответственно, **изменяется и средний коэффициент трения** μ. В этом и заключается **взаимосвязь процессов, происходящих в зоне стружкообразования** (около условной плоскости сдвига) и в **зоне контакта стружки с передней поверхностью** инструмента. На процесс трения, кроме силовой нагрузки на передней поверхности, большое влияние оказывает **температура резания**.

На процесс трения большое влияние оказывают также **свойства обрабатываемого материала**. При **отсутствии СОЖ** коэффициенты трения при резании стали **μ=0,5…1,7**, свинца - μ =0,4…0,8, а алюминия μ - =0,93…1,5, что значительно **выше, чем при обычном внешнем трении скольжения**, происходящем при комнатной температуре.

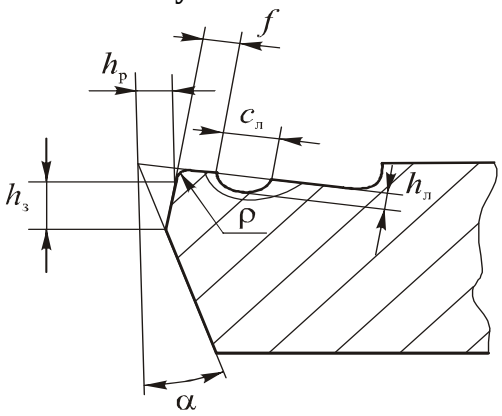
Контактные процессы на поверхностях инструмента и удельные силы резания и износ по задней поверхности

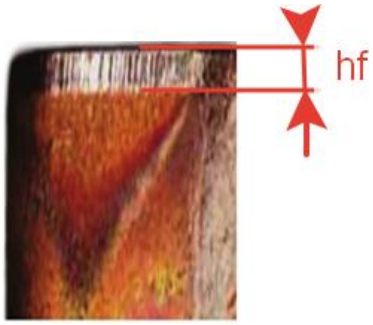
Удельные силы **<u>резания</u>** рассчитываются как отношение силы к площади поперечного сечения срезаемого слоя: $q_{Pz}=P_z/(s\cdot t)$ (Н/мм^2); $q_{Pxy}=P_{xy}/(s\cdot t)$ (Н/мм^2).

1 Па=1 Н/м^2 ; **1 МПа** = $1\cdot10^6$ Па = **1 Н/мм^2** .

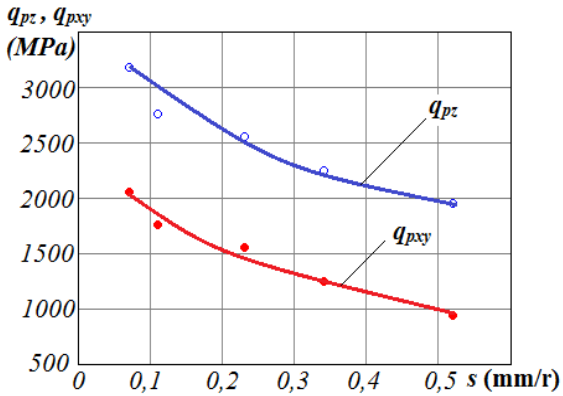
С **увеличением подачи и глубины** резания **удельные силы резания <u>уменьшаются</u>**.

С увеличением длины фаски износа h_f по задней поверхности удельные силы резания существенно увеличиваются, при этом **q_{Pxy} увеличивается быстрее ,** чем q_{Pz}.

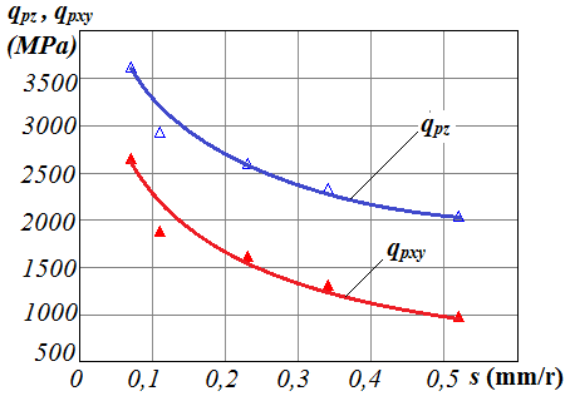




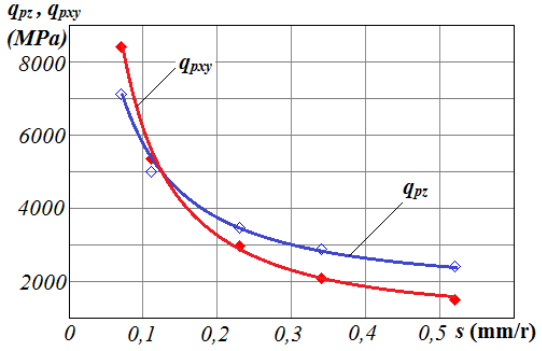
а) h_f=0.13 мм



б) h_f=0.29 мм



в) h_f=0.95 мм



Влияние подачи s (мм/об) на удельные силы резания при обработке стали 40Х при разной фаске на задней поверхности $h_з$. Сталь 40Х- Т15К6; t=2 мм; v= 2 м/с, округление режущей кромки ρ≈5 мкм.

Эксперименты Н.Г. Абуладзе показали, что длину участка пластического контакта при резании металлов можно определить по следующей эмпирической зависимости

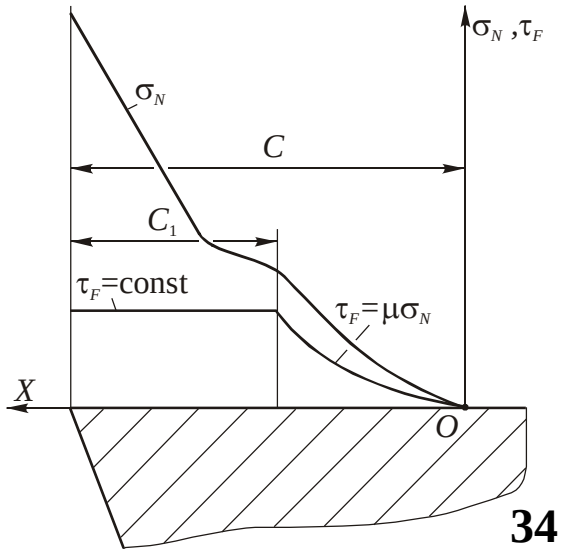
$C_1 = a\left[K(1+\mathrm{tg}\gamma)+\sec\gamma\right]$, а **общую длину контакта** $C=a(2{,}05K-0{,}5)$.

В уравнениях длины контакта на передней поверхности инструмента пропорциональны толщине срезаемого слоя a и зависят также от усадки К и переднего угла γ. При этом **скорость резания** v, **температура** Θ и **свойства обрабатываемого материала** влияют на длину контакта **через изменение усадки.**

Под действием составляющих силы резания на контактной площадке возникают соответственно нормальные σ и касательные τ напряжения. Эпюры этих напряжений определялись экспериментально **поляризационно-оптическим** методом или с помощью **разрезного резца**. В результате при резании сталей были получены типичные эпюры распределения напряжений по длине площадки контакта стружки с передней поверхностью $f=C\cdot b$.

$\sigma=\Delta Ni/\Delta Ci\cdot b$, $\tau=\Delta Fi/\Delta Ci\cdot b$

где ΔCi – приращение длины площадки контакта стружки с передней поверхностью; $\Delta\boldsymbol{Ni}$ и ΔFi – **приращение нормальной** и касательной силы на передней поверхности при соответствующем **приращении площадки контакта** стружки с передней поверхностью **на длину** ΔCi; b - ширина контактной поверхности стружки.



Метод ***разрезного резца***

Пластины (**рис. 1**) изготовлены так, что **первоначально** зазор *1* проходит в месте,
где $x_{i=1} = c$ [мм],
где c - длина контакта стружки с передней поверхностью .
В этом случае на пластине **B нет контакта со стружкой**, поэтому силы $N_{B\ i=1}$ и $F_{B\ i=1}$ **равны нулю (рис. 2)**.

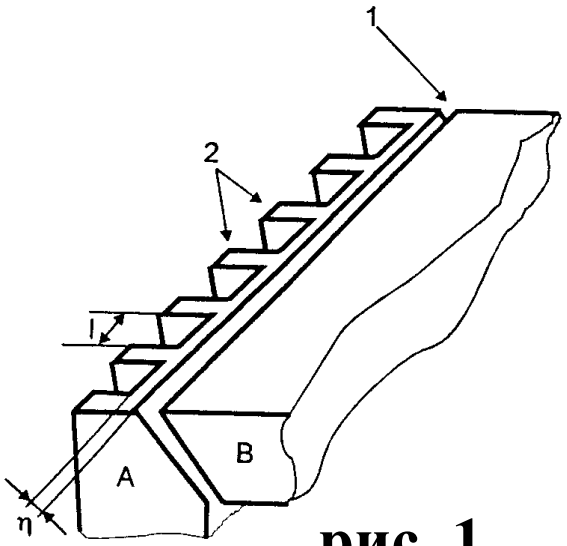


рис. 1

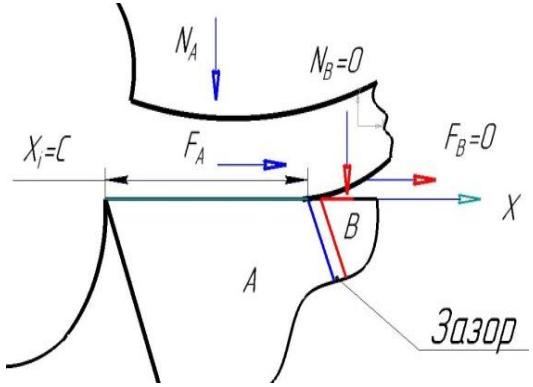


рис. 2

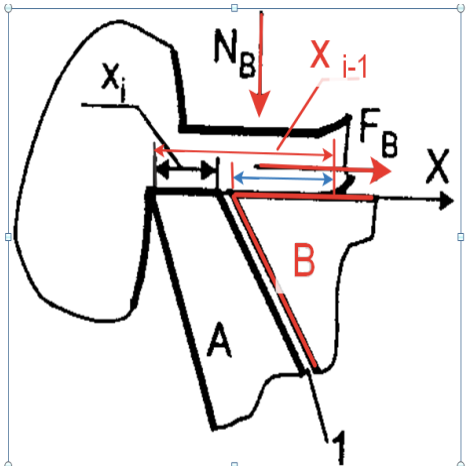


рис. 3

1) Изменение длины контакта стружки с пластиной **A**: $\Delta x_i = x_{i-1} - x_i$; **(рис. 2)**
2) Изменение нормальной силы N на пластине **A**:
$\Delta N_{Bi} = N_{Bi} - N_{Bi-1}$;
3) Удельная нормальная нагрузка на пластине **A** в точке $x_i \approx x_{i\,cp}$ $[x_{i\,cp} = (x_i + x_{i-1})/2)]$:
$q_{NBi} = \Delta N_{Bi}/(b \times \Delta x_i)$ [Н/мм^2] ,
где b – ширина контакта стружки с передней поверхностью на пластине A.
при $\Delta x_i \to 0$ мм $q_{NBi} \to \sigma_{Ni} \to \sigma_i$

$q_{FBi} = \Delta F_{Bi}/(b \times \Delta x_i)$ [Н/мм^2]
при $\Delta x_i \to 0$ мм $q_{FBi} \to \tau_{Ni} \to \tau_i$

Контактные процессы на передней поверхности инструмента *(продолжение)*

Исследование распределения нормальных σ и касательных τ контактных нагрузок на **передней поверхности** инструмента резца. методом разрезного

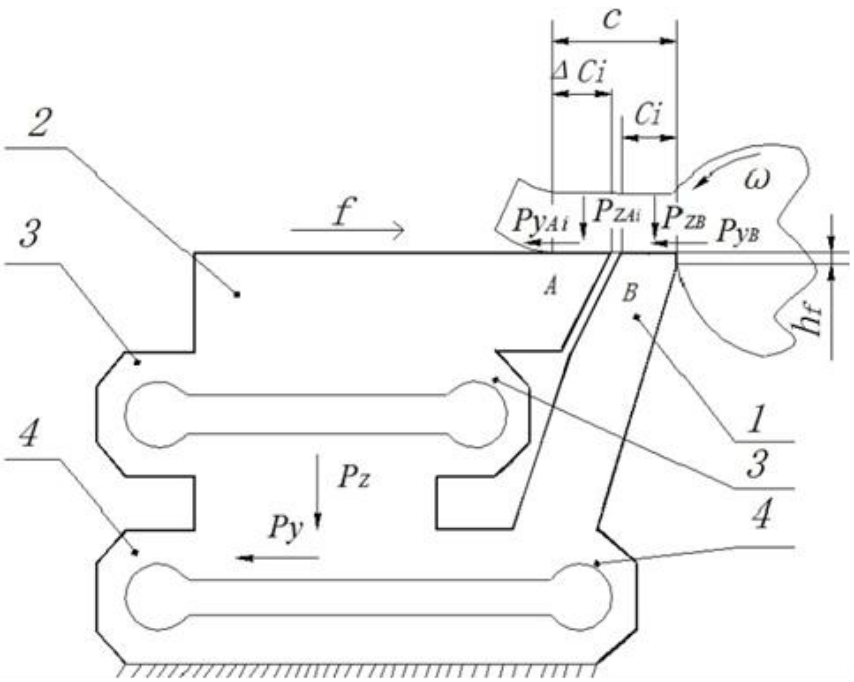


Рис. 1. Исследование распределения контактных напряжений на **передней поверхности** резца методом **разрезного резца**

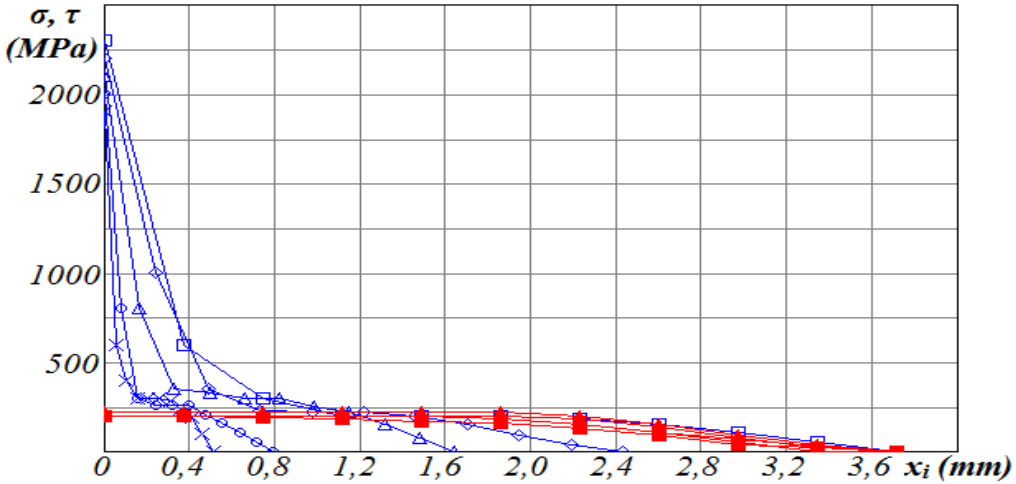


Рис. 2. Распределение **нормальных σ** (×, ○, Δ, ◊, □) и **касательных τ** (+, ●, ▲, ♦, ■) контактных напряжений (МПа) на **передней** поверхности резца при точении стали 40Х. γ=5 °, φ = 45 °, *v* =2 м/с, *t* =2 мм.
□, ■ – *s* = 0.52 мм/об; ◊, ♦ – *s* = 0.34 мм/об;
Δ, ▲ – *s* = 0.23 мм/об; ○, ● – *s* = 0,11 мм/об;
×, + – *s* = 0,07 мм/об.

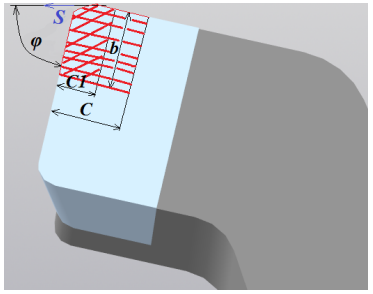


Рис. 3. Измерение общей длины контакта стружки ***c*** и длины пластического контакта стружки c_1 с передней поверхностью резца

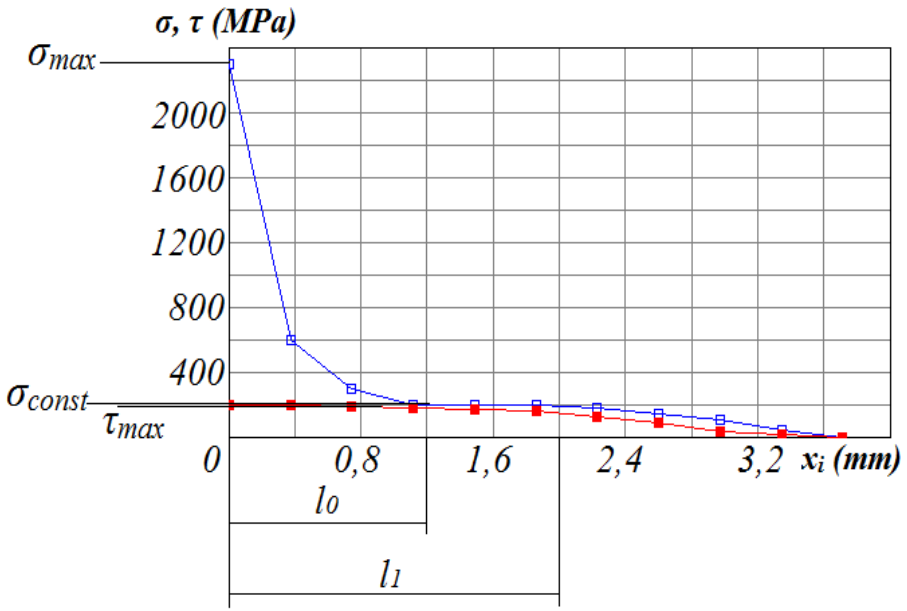
Контактные процессы на передней поверхности инструмента *(продолжение)*

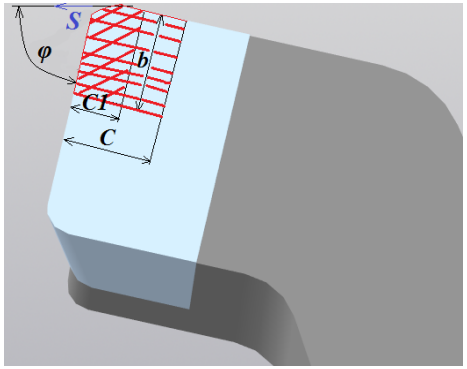
$$N = \int_0^c \sigma_{xi} \cdot dx_(H); \qquad F = \int_0^c \tau_{xi} \cdot dx_(H)$$

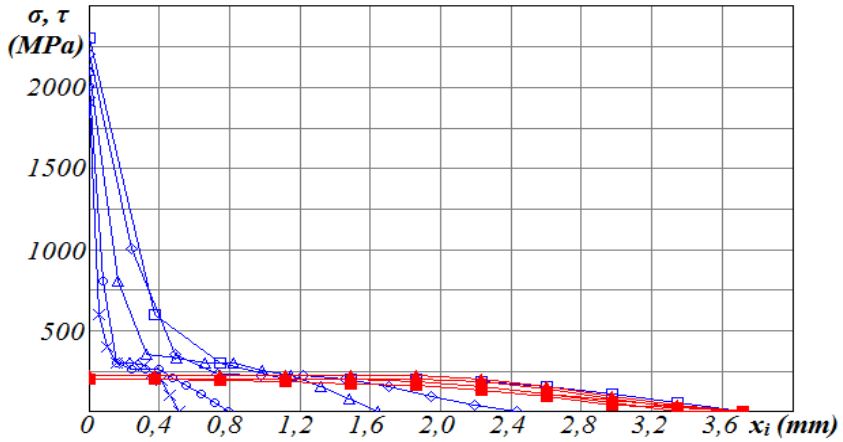
Параметры **эпюр** контактных напряжений на передней поверхности

1) $c \approx 10 \cdot a$ (мм);
2) $l_1 = c_1 \approx 0.55\ c$ (мм);
3) $\sigma_{max} = 792 \cdot s + 1.9 \cdot \sigma_в$ (МПа);
4) $\sigma_{const} = -183 \cdot s + 0.289 \cdot \sigma_в$ (МПа);
5) $\tau_{max} \approx 0.2\ \ \sigma_в$ (МПа);
6) $l_0 = 2.358 \cdot s - 5.1 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_в$ (мм)
7) $l_0 = 2.358 \cdot s - 5.1 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_в$ (мм)

Сталь 40Х: $\sigma_в = 1000$ МПа.



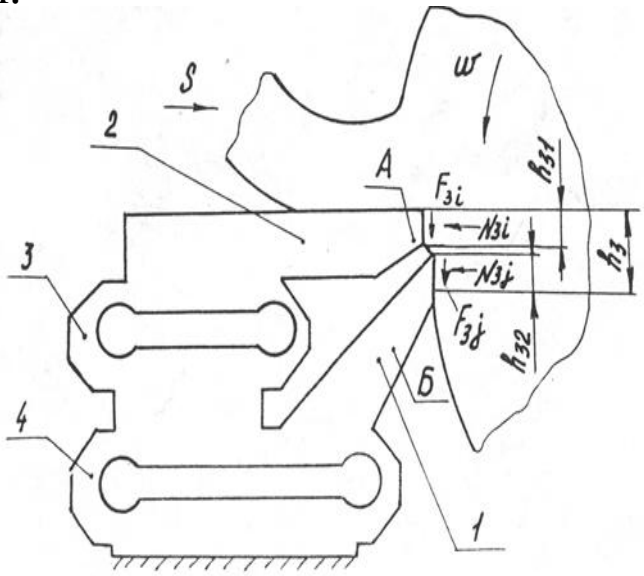


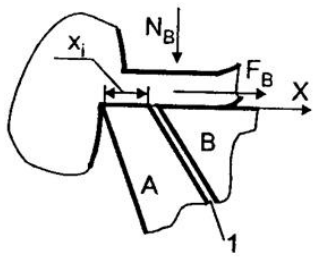


Измерение общей длины контакта стружки ***c*** и длины пластического контакта стружки c_1 с передней поверхностью резца

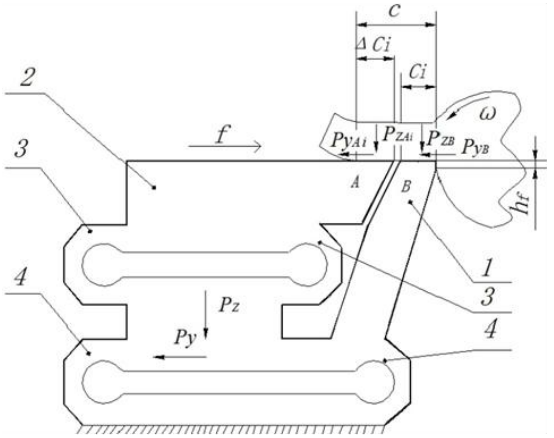
При исследовании распределения контактных напряжений на **фаске износа задней поверхности** с помощью разрезного резца упругая деформация элементов 3 приводит к **появлению уступа**, который начинает срезать дополнительную стружку с поверхности резания. Зазор забивается, что приводит к поломке пластин.

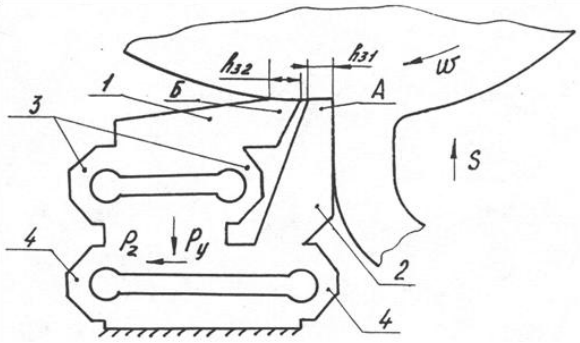
Требуется **изменить схему** проведения измерений.

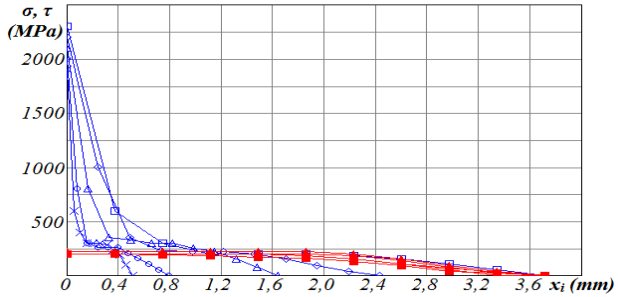




$$\sigma_N(x) = \frac{1}{b_1}\frac{dN_B}{dx}; \qquad \tau_F(x) = \frac{1}{b_1}\frac{dF_B}{dx}.$$







На **фаске износа задней поверхности** при обработке стали 40Х распределение контактных напряжений **коренным образом отличается от распределения на передней поверхности**.

У **режущей кромки напряжения минимальны**, а при удалении от режущей кромки они увеличиваются.

Чем **больше подача**, тем **меньше напряжения** у режущей кромки, тем **на большем расстоянии от неё они начинают увеличиваться**.

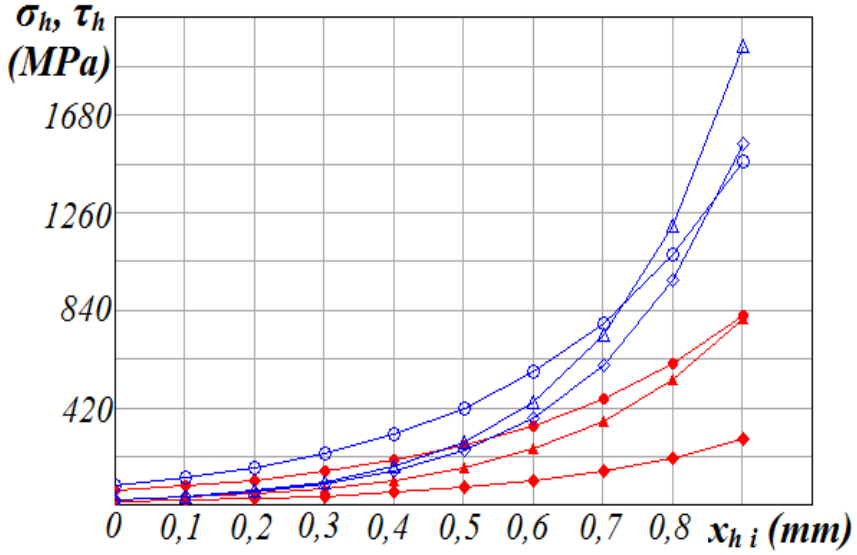
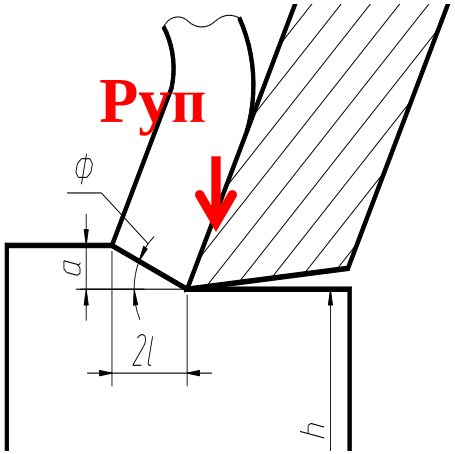
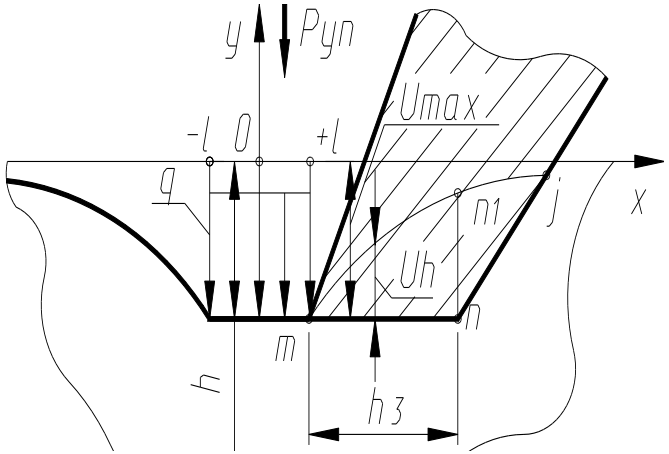


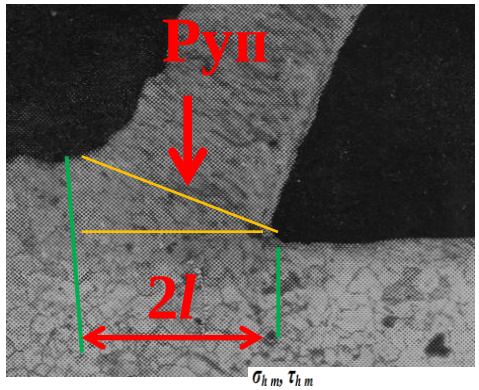
Рис. 1. Распределение **нормальных σ_h** (×, ○, Δ, ◊, □) и **касательных τ_h** (+, ●, ▲, ♦, ■) контактных напряжений (МПа) на **фаске задней** поверхности резца при точении стали 40Х.
γ=5 °, φ = 45 °, *v* =2 м/с, *t* =2 мм.
□, ■ – *s* = 0.52 мм/об; ◊, ♦ – *s* = 0.34 мм/об;
Δ, ▲ – *s* = 0.23 мм/об; ○, ● – *s* = 0,11 мм/об;
×, + – *s* = 0,07 мм/об.

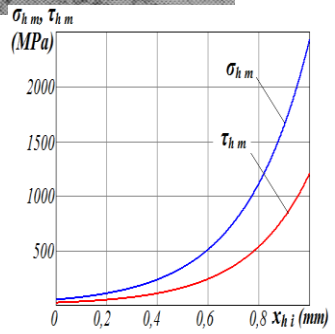
Контактные процессы на поверхностях инструмента *(продолжение)*

Исследования М.Ф. Полетики и В.Н. Козлова выявили, что движущаяся перед клином зона стружкообразования сопровождается волной упругой деформации, что приводит к опусканию границы полуплоскости на величину U_{max}. Восстанавливающаяся позади режущей кромки поверхность ***mn$_1$j*** взаимодействует с плоскостью фаски *mn* , длиной $h_з$, деформируясь до положения ***mnj*** и вызывая дополнительное давление на фаску износа задней поверхности **при удалении** от режущей кромки. **Прогиб поверхности среза *mn$_1$j*** вызывает **радиальная сила Руп**, действующая со стороны **передней поверхности** на участок **2*l*** *(2l=a·*ctgФ*)*. При образовании **сливной стружке** эта сила достаточно **стабильна,** поэтому **прогиб** происходит **всегда** во время резания. Чем **больше подача**, тем больше и участок 2*l*, тем **больше длина волны прогиба**. Поэтому на большем расстоянии от режущей кромки начинается увеличение контактных напряжений.



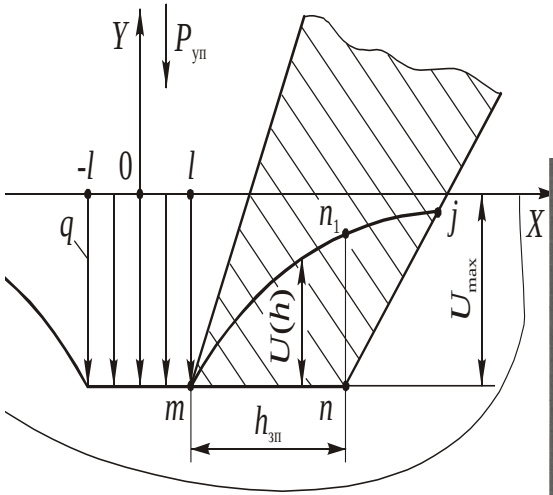


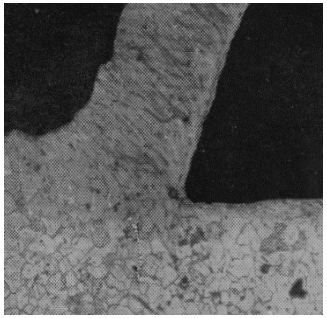


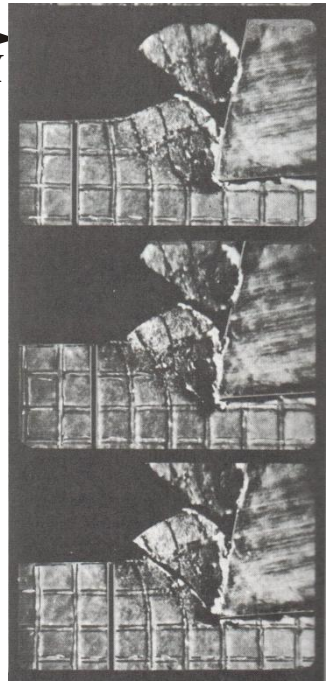


Контактные процессы на поверхностях инструмента *(продолжение)*

При **элементном стружкообразовании** характер взаимодействия режущего клина с поверхностью среза существенно изменяется. Последний этап формирования элемента стружки - его отделение от заготовки сопровождается резким **падением** (иногда даже до нуля) **нагрузки от** Руп **в зоне стружкообразования** на участке длиной ($-l \ldots +l$), где $2l = a \cdot \mathrm{ctg}\Phi$. Упруго восстанавливающаяся поверхность среза создает при этом дополнительное давление, примерно пропорциональное перемещению ***U(x)***, и, следовательно, тем большее, чем ближе к режущей кромке находится рассматриваемая точка. Эта дополнительная пульсирующая нагрузка по амплитуде значительно больше, чем обусловленная деформацией поверхности среза при сливном стружкообразовании, определяемой величиной *U(h)*.

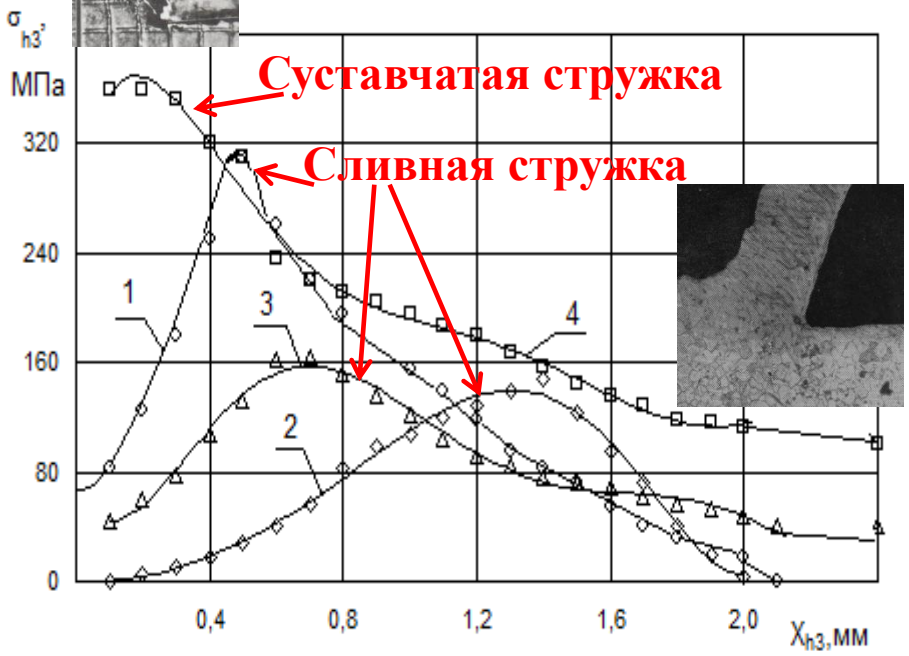






Пульсирующая дополнительная нагрузка приводит к изменению закона **распределения нормальной контактной нагрузки** вдоль фаски *mn*. В этом случае **наибольшее значение** нагрузки должно наблюдаться **у режущей кромки**.

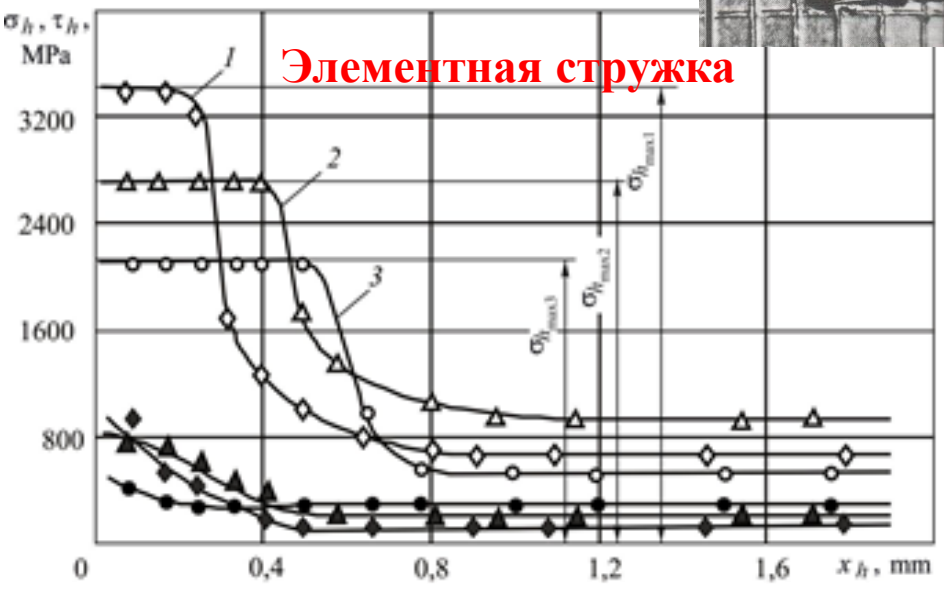
Контактные процессы на поверхностях инструмента *(продолжение)*



а) распределение нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений на фаске задней поверхности инструмента при **сливном стружкообразовании**. Л63-Р6М5, $\gamma=0^0$, $\alpha_\Phi=0^0$: 1 - S=0,06 мм/об, V=100 м/мин; 2 – S=0,21 мм/об, V=100 м/мин; 3 – S=0,21 мм/об, V=217 м/мин.

4 - ЛМцА 57-3-1 (образуется **суставчатая** стружка) – Р6М5, S=0,41 мм/об, V=100 м/мин.

Абсцисса – расстояние от режущей кромки на фаске задней поверхности X_{h3}, мм.



б) распределение нормальных (◊, Δ, ○) *σh* и касательных (♦, ▲, ●) *τh* контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности при обработке титанового сплава, **образующего элементную стружку**. ВТ3-1 - ВК8, γ=0 º, αh = 0 º, α = 10 º, *v*=1 м/с:

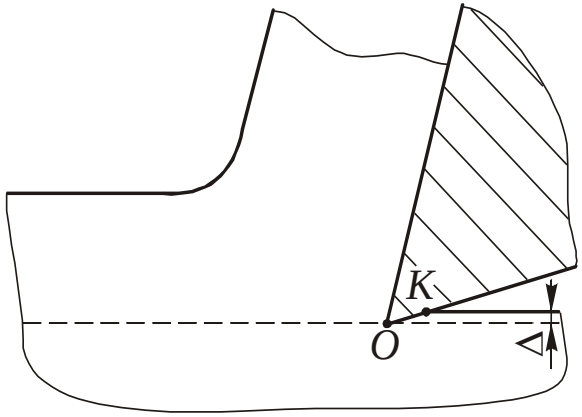
1 (◊, ♦) - s=0.41 мм/об; 2 (Δ, ▲) - s=0.21 мм/об; 3 (○, ●) - s=0.11 мм/об.

Абсцисса – расстояние от режущей кромки на фаске задней поверхности Xh, мм.

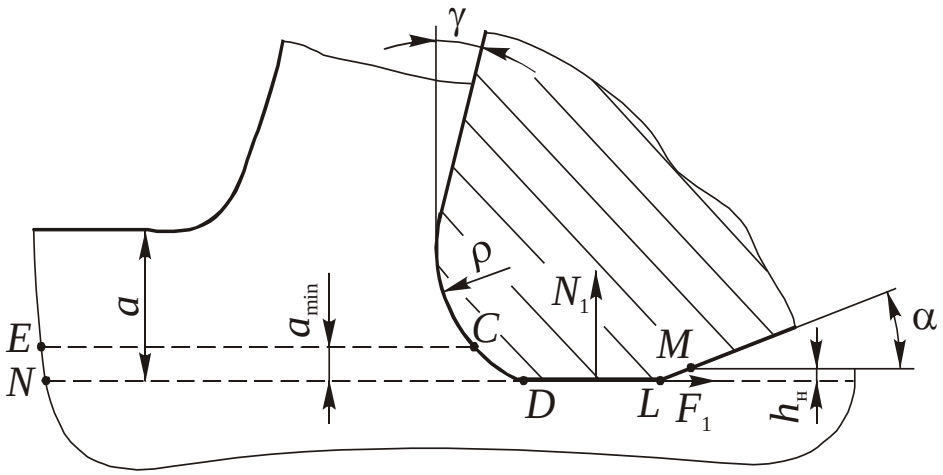
Контактные процессы на задней поверхности инструмента

В процессе резания **режущий клин** взаимодействует своей **задней поверхностью** с **поверхностью резания** на очень малой площадке контакта. Это объясняется **упругим восстановлением** - подъемом обработанной поверхности после прохождения резца. Величина такого **подъема** Δ у идеального острого режущего клина определяет длину *ОК* площади контакта по задней поверхности инструмента.

Реальный режущий клин всегда имеет **округление режущей кромки** (не путать с ***радиусом при вершине*** режущего инструмента), величина которой в зависимости от технологии заточки и инструментального материала обычно находится в пределах ρ=0,005…0,02 мм. Наличие радиуса округления таких размеров оказывает **положительное влияние** на **прочность** и надёжность работы инструмента, так как предотвращает преждевременное разрушение режущей кромки инструмента, но **увеличивает силу резания и температуру**.



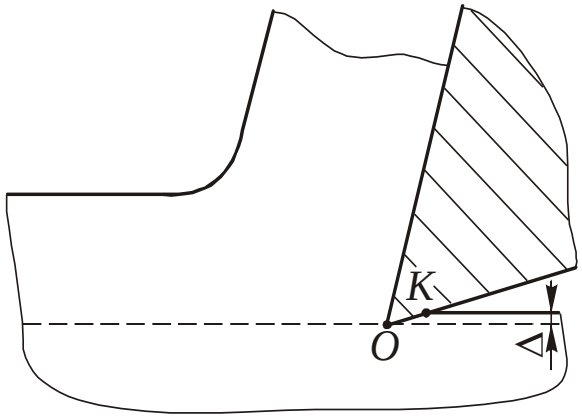
а)



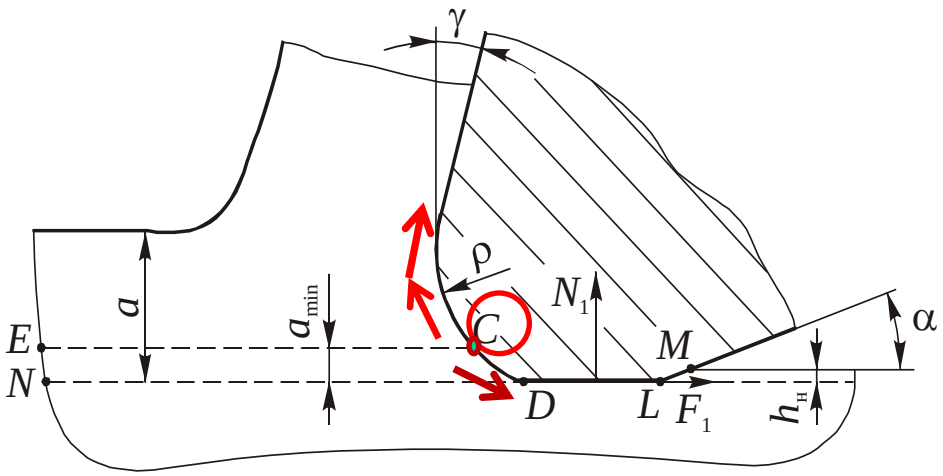
б)

Контактные процессы на поверхностях инструмента *(продолжение)*

При резании металл в точке ***C*** делится на два потока. **Верхний** поток уходит **со стружкой**, а **нижний**, толщиной a_{min}, **подминается радиусным участком** *CD* задней поверхности инструмента. При этом **реальная поверхность резания** *CE* не совпадает с **номинальной** поверхностью *ND*. Объем металла *CEND*, контактируя с участком *CD*, площадкой износа *DL* и участком *LM* задней поверхности, претерпевает значительную деформацию. Поэтому на обработанной поверхности появляется тонкий, **сильно деформированный (наклепанный)** слой, **толщиной** $h_н$. Напряжения, возникающие в этом слое, оказывают большое влияние на **износостойкость и усталостную прочность** деталей.



а)

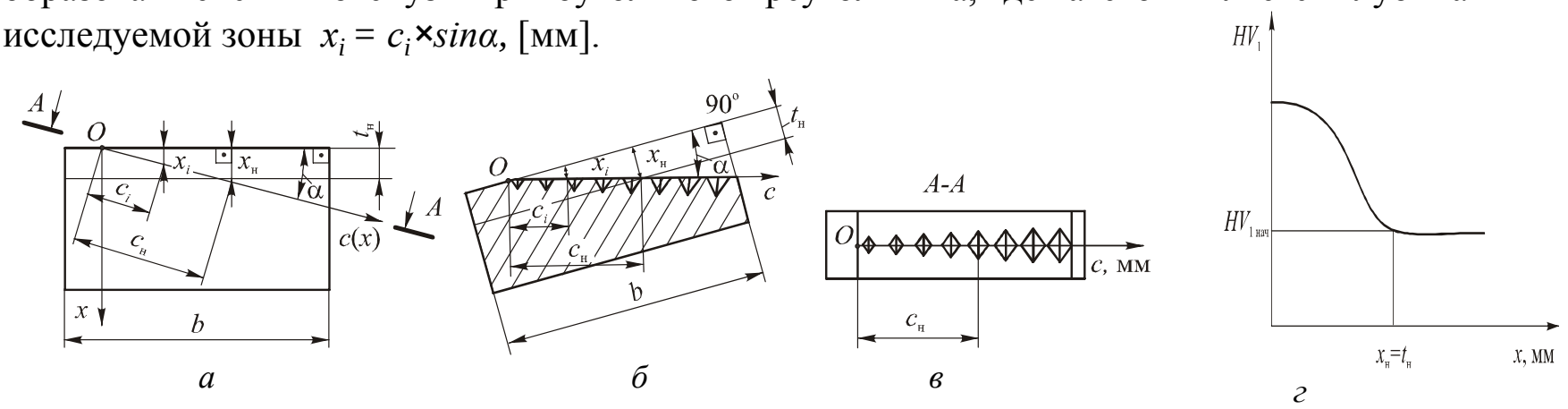


б)

Оценка качества обработанной поверхности

Пластическая деформация поверхностного слоя приводит к её ***наклёпу***. Наряду с повышением твёрдости это вызывает и повышенную склонность к образованию микро- и макротрещин, особенно при последующей закалке, существенному уменьшению усталостной прочности и увеличению остаточных напряжений. Все эти факторы могут привести к короблению заготовки сразу же после обработки или спустя некоторое время (наследственность может сохраняться даже после многократных последующих обработок этой поверхности), уменьшению надёжности работы детали при эксплуатации.

Для оценки глубины и степени пластической деформации применяется выборочный контроль твёрдости поверхностного слоя обработанных заготовок. **Глубина наклёпа** очень мала и составляет **сотые доли миллиметра** при получистовой и чистовой обработке, поэтому **для увеличения протяжённости исследуемой области** выполняется **косой шлиф** под углом ***α*** к поверхности заготовки. Величина этого угла – несколько градусов: чем меньше глубина слоя, тем меньше должен быть этот угол. После этого измеряется микротвёрдость по Виккерсу (HV) поверхности образовавшейся гипотенузы прямоугольного треугольника, где катетом является глубина исследуемой зоны $x_i = c_i \times sin\alpha$, [мм].



а *б* *в* *г*

Исследование глубины и степени наклёпа: *а* – выполнение косого шлифа под **углом *α*** к поверхности заготовки; *б* – положение контролируемой поверхности при измерении её микротвёрдости; *в* – размеры отпечатков при измерении микротвёрдости; *г* – **изменение микротвёрдости по глубине**.

Оценка качества обработанной поверхности

Под степенью наклепа понимают отношение $$\Delta H_м = \frac{H_{мн} - H_{мс}}{H_{мс}} \cdot 100\%,$$

где - наибольшая микротвердость наклепанного слоя; - микротвердость ненаклепанного слоя.

При точении жаропрочного сплава ЭИ 437 увеличение подачи от s=0,05 мм/об до s=0,6 мм/об увеличивает толщину наклепанного слоя от $\Delta_н$=0,09 мм до $\Delta_н$=0,155 мм, а степень наклепа – от $\Delta H_м$=23% до $\Delta H_м$=37%. Увеличение переднего угла от γ =-60° доγ =30° уменьшает глубину наклепанного слоя от $\Delta_н$=0,24 мм до $\Delta_н$=0,1 мм, а степень наклепа - от $\Delta H_м$=42% до $\Delta H_м$=35%. Рост износа инструмента увеличивает степень наклепа и глубину наклепанного слоя , а рост скорости резания , наоборот, снижает эти величины.

Для **уменьшения наклёпа** и **остаточных напряжений** применяется термическая обработка: **отжиг** и **отпуск**. **Отжиг** характеризуется нагревом на высокую температуру – вплоть до температуры рекристаллизации, – и медленным остыванием в догревочной печи. Он применяется только в том случае, когда степень наклёпа очень большая и требуется практически полностью избавиться от него.

Отпуск характеризуется нагревом на меньшую температуру и более быстрым остыванием на воздухе или в теплоизолированных камерах. Он бывает высоким, средним и низким в зависимости от температуры нагрева и скоростью охлаждения.

Для уменьшения остаточных напряжений может применяться **естественное** или **искусственное старение**, однако на промежуточных этапах изготовления детали они практически не используются.

Для уменьшения наклёпа и остаточных напряжений необходимо использовать жёсткое закрепление заготовки при её обработке, **острозаточенные инструменты** с оптимальной геометрией и **не допускать** их **существенного износа**, применять небольшие подачу и глубину резания, использовать **обильный полив СОЖ** для предотвращения нагрева заготовки и т.п. Всё это положительно сказывается на точности изготовления и увеличении надёжности работы.

Оценка качества обработанной поверхности

Остаточные напряжения характеризуются:

- знаком: **растягивающие** – со знаком (+), **сжимающие** – со знаком (-);
- текущей величиной по абсолютному значению $|\sigma_{ост\ i}|$ и максимальной величиной по абсолютному значению $|\sigma_{ост\ max}|$;
- глубиной нахождения максимального значения σ_{max}.

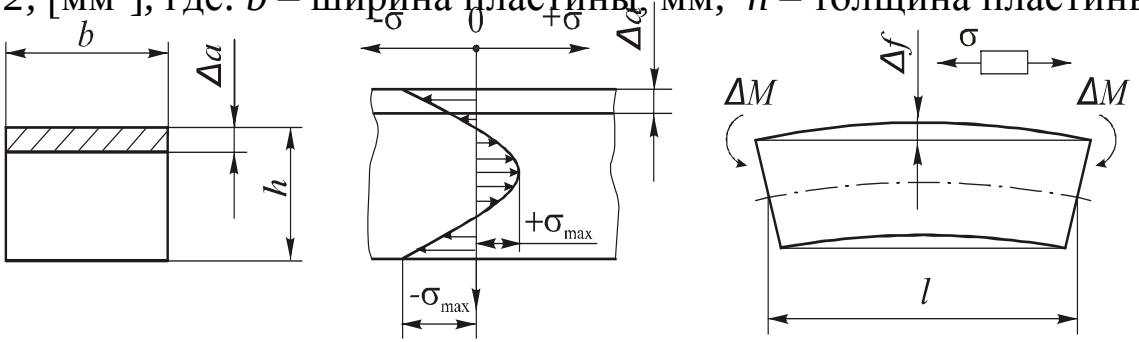
Остаточные напряжения могут определяться разрушающим контролем (механическим путём) и неразрушающим контролем (с использованием рентгеновских лучей, ультразвуковых или акустических колебаний).

Рентгеновский метод основан на измерении разницы параметров кристаллической решётки обработанной поверхности и не деформированной решётки материала заготовки. Существенными недостатками этого метода являются невысокая точность и трудоёмкость.

Для измерения остаточных напряжений **механическим путём** применяется последовательное поэтапное шлифование поверхности заготовки с измерением деформации заготовки на каждом этапе.

После удаления с поверхности пластины слоя материала толщиной Δa пластина изгибается с величиной прогиба Δf (рис. 2, *в*). Этот прогиб вызван появлением момента ΔM от перераспределения внутренних напряжений, которые были уравновешены до удаления слоя материала (рис. 2, *б*). Этот прогиб может быть рассчитан по формуле $\Delta f = \Delta M \times \ell^2 / 8EJ$, [мм], где: ℓ – длина пластины, мм; E – модуль упругости (модуль Юнга), н/мм (МПА); J – момент сопротивления изгибу, мм^4.

Для простейшего случая – изгиба пластины, – момент сопротивления определяется по формуле $J = b \times h^3 / 12$, [мм^4], где: b – ширина пластины, мм; h – толщина пластины, мм.



Оценка качества обработанной поверхности

Изгибающий момент при изгибе от перераспределения остаточных напряжений

$\Delta M = \sigma_{ост} \times \Delta a \times b \times h/2$, [Н·мм],

где: $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения на контролируемой глубине, Н/мм^2; Δa – толщина удаляемого слоя при определении остаточного напряжения механическим способом, мм.

Контролируемая глубина h_i рассчитывается по формуле $h_i = \Delta a_1 + \Delta a_1 + \ldots + \Delta a_i$, [мм],

где: Δa_i – толщина удаляемого слоя на каждом предварительном этапе определения остаточных напряжения, мм.

В результате преобразований получается формула для определения остаточные напряжения на контролируемой глубине h_i

$$\sigma_{ост i} = \frac{4}{3} \cdot \frac{E \cdot h^2}{\ell^2} \cdot \frac{\Delta f_i}{\Delta a} \quad , \ [\text{Н/мм}^2].$$

где: Δf_i – величина прогиба на i-том этапе определения остаточных напряжения, мм; E – модуль упругости (модуль Юнга), Н/мм^2. $E=\sigma/\varepsilon$, [Н/мм^2], где $\varepsilon=\Delta\ell/\ell$, где $\Delta\ell$ – удлинение образца длиной ℓ под действием растягивающей силы P, Н); $\sigma = P/S$, где S – площадь поперечного сечения образца, мм^2.

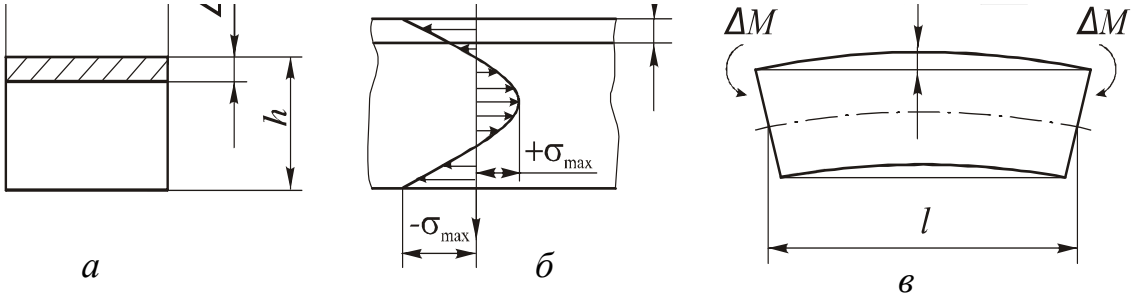
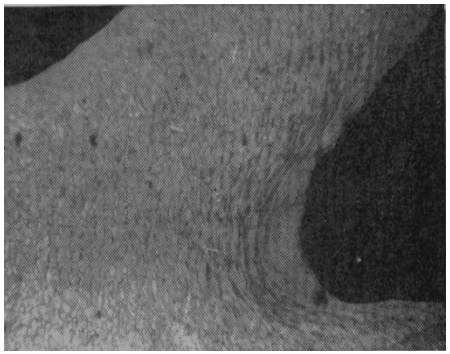


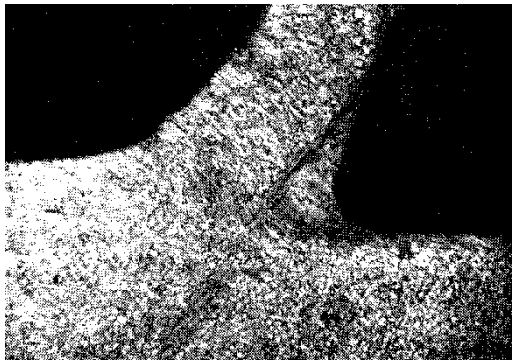
Рис. 1. Определение остаточных напряжений в заготовке механическим путём: *а* – удаление слоя металла толщиной Δa; *б* – пример **распределения остаточных напряжений в заготовке**; *в* – изгиб пластины после удаление слоя металла толщиной $\Delta\ a$ от перераспределения остаточных напряжений отпечатков при измерении микротвёрдости

Наростообразование

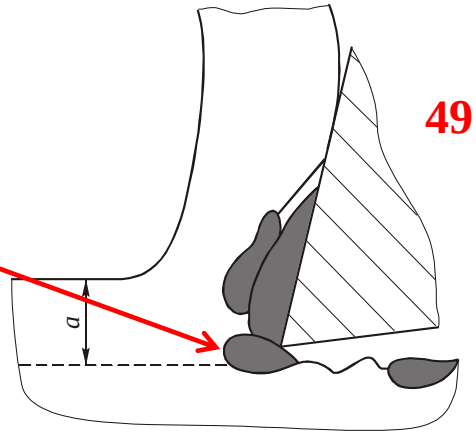
При разрушении нароста **одна его часть внедряется в обработанную поверхность**, а другая **уносится со стружкой**. Силы сцепления нароста с передней поверхностью достаточно большие и поэтому часто наблюдается **разрушение твердосплавных инструментов**, имеющих пониженное сопротивление на разрыв. По этой причине **твердые сплавы** рекомендуется **использовать** только на тех режимах резания, когда **нарост отсутствует**. Характерным признаком наростообразования является **высокая шероховатость** (*Rz, Ra*) обработанной поверхности, вызванная **внедрившимися частицами разрушенного нароста**. Нарост **предохраняет заднюю поверхность** инструмента от контакта с обработанной поверхностью, однако **полностью освободить ее от износа не может** из-за периодических срывов.

Ряд таких материалов, как медь и ее сплавы, титановые сплавы, высоколегированные стали с большим содержанием хрома и никеля, закаленные стали и белый чугун практически не образуют нарост. **Размеры нароста тем больше, чем пластичнее металл и чем меньше его прочность и твердость.**





Плохое качество обработанной поверхности вызвано **внедрившимися частицами разрушенного нароста.**



Наростообразование *(продолжение)*

Нарост появляется уже на малых скоростях резания при комнатной температуре и характеризуется в этом случае слабой устойчивостью. При повышении скорости резания температура резания растет и **при температуре резания Θ≈300°С** (в диапазоне скоростей резания $v_1 \ldots v_2$) **высота нароста *H* достигает максимума**. При дальнейшем повышении скорости резания в диапазоне $v_2 \ldots v_3$ нарост уменьшается из-за уменьшения его прочности и **совсем исчезает** при скорости резания , когда **температура резания Θ ≈600°С**.

Влияние на наростообразование **СОЖ** из-за трудностей проникновения последней на площадку контакта при высоких удельных давлениях проявляется главным образом **через изменение температуры резания**. Поэтому при использовании СОЖ область наростообразования расширяется, **смещаясь в сторону бóльших скоростей резания**. При этом устойчивость и **стабильность нароста на всех скоростях резания повышается**, а **коэффициент трения снижается**. Это объясняется частичным попаданием СОЖ через микропоры, трещины, неровности и особенно **с боковых сторон** сходящей стружки.

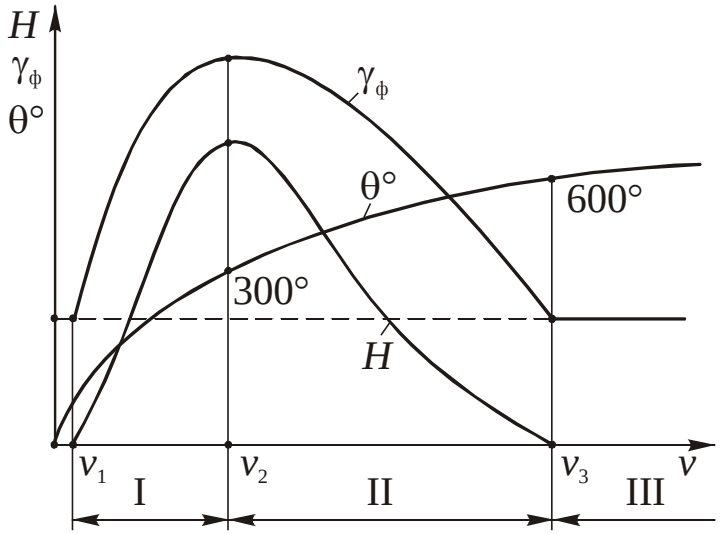


Схема влияния скорости резания *v* на температуру резания Θ, высоту нароста *H* и фактическое значение переднего угла γф

Наростообразование *(продолжение)*

С **ростом скорости резания** в диапазоне $v_1 \ldots v_2$ **температура резания** Θ **растет**, что вызывает **увеличение высоты нароста** H, а следовательно и **фактического переднего угла** $\gamma_ф$.

В диапазоне **скоростей резания** $v_2 \ldots v_3$ с ростом температуры резания **нарост становится менее прочным** и его **высота уменьшается** до полного исчезновения при температуре резания Θ =600°С (происходит отпуск).

Изменение фактического переднего угла $\gamma_ф$ с образованием нароста определяет характер **изменения усадки стружки** и соответственно **степени ее деформации** - кривая K_1.

На кривой K_2 показано изменение усадки стружки **для металлов, не образующих нарост**, что определяет и характер изменения силы резания.

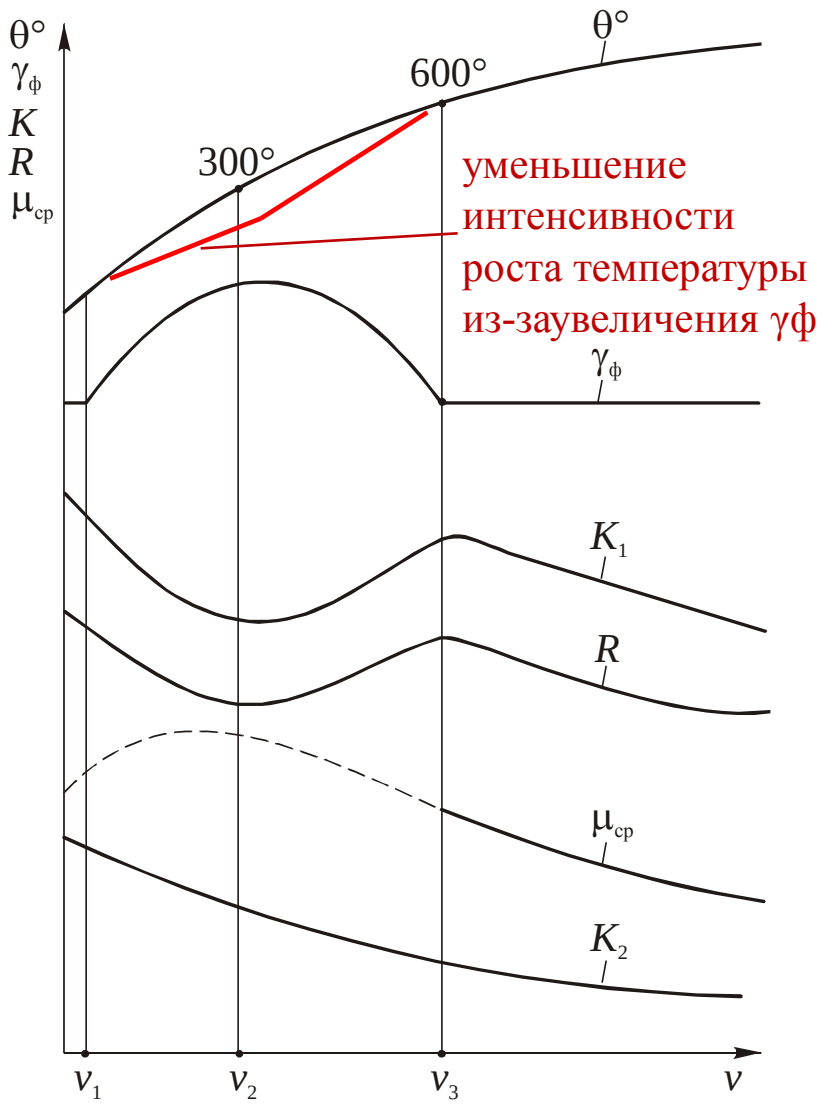


Схема взаимосвязи скорости резания v, температуры резания Θ, фактического переднего угла $\gamma_ф$, усадки стружки K, силы резания R и среднего коэффициента трения $\mu_{ср}$

Наростообразование *(продолжение)*

Резание в области отсутствия нароста, то есть на **повышенных скоростях** $v > v_3$ сопровождается уменьшением среднего коэффициента трения $\mu_{ср}$ из-за **увеличения удельного нормального напряжения** σ. В свою очередь это вызывает **уменьшение угла действия** ω и **увеличение угла наклона условной плоскости сдвига** Φ. В результате происходит снижение усадки стружки K и силы резания R.

Увеличение скорости резания вызывает также **увеличение скорости деформации** $\acute{\varepsilon}$ в области стружкообразования, что приводит к **уменьшению пластичности** обрабатываемого материала и **уменьшению области** стружкообразования. Это приводит к **увеличению угла наклона** условной плоскости сдвига Φ и **уменьшению силы** резания R.

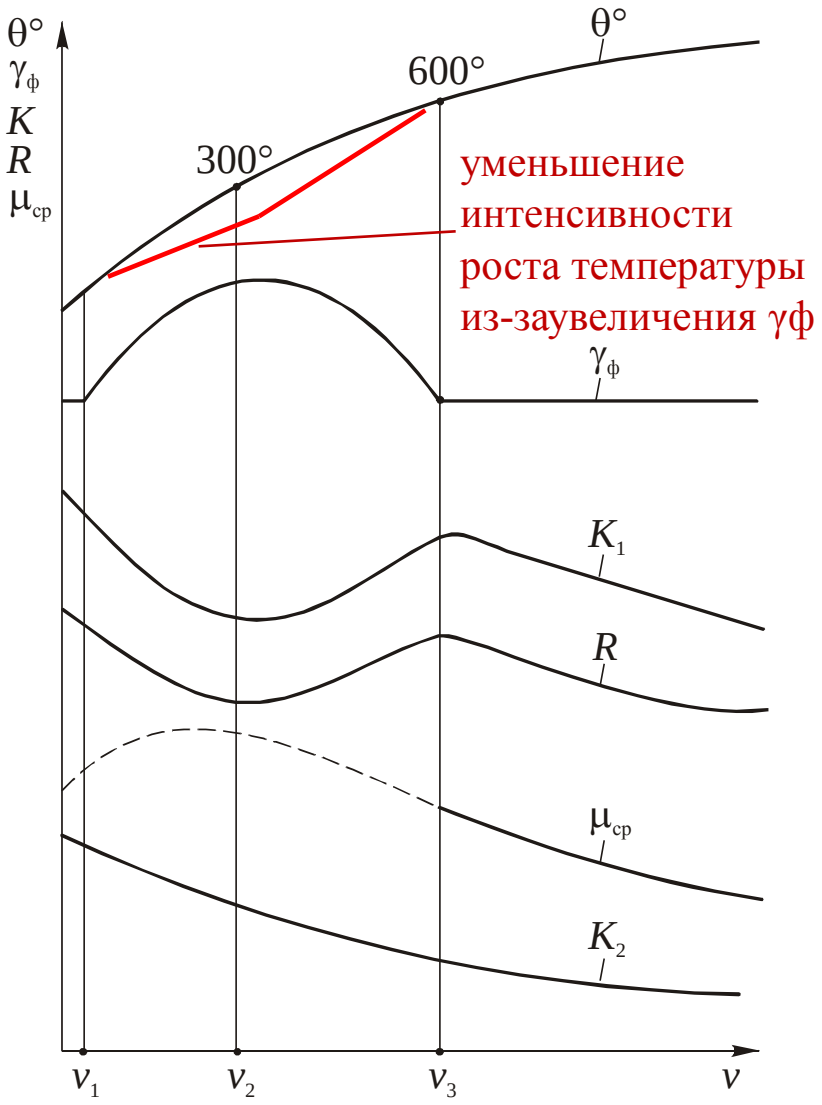


Схема взаимосвязи скорости резания v, температуры резания Θ, фактического переднего угла $\gamma_ф$, усадки стружки K, силы резания R и среднего коэффициента трения $\mu_{ср}$

Обобщенные **эмпирические** уравнения для расчетов составляющих силы резания учитывают влияние основных параметров режима резания и имеют следующий вид:

$$P_z = C_{pz} t^{x_{pz}} s^{y_{pz}} v^{n_{pz}} K_{pz};$$

$$P_x = C_{px} t^{x_{px}} s^{y_{px}} v^{n_{px}} K_{px};$$

$$P_y = C_{py} t^{x_{py}} s^{y_{py}} v^{n_{py}} K_{py}.$$

Значения **показателей степеней** x_{pz}, y_{pz} и т.д. можно рассчитать из графиков **зависимости *составляющей силы*** от ***глубины резания*** *t* или подачи *s*, в двойных логарифмических координатах, т.к. график степенной функции $P_z = C'_{Pz} \cdot t^{x_{pz}}$ (при ***s=const***) в координатах $\lg P_z$–$\lg t$ представляет собой прямую линию.

$$x_{pz} = tg\tau = A/B.$$

Аналогичный график строится при ***t=const*** ($P_z = C'_{Pz} \cdot s^{y}$).

После определения показателей степеней x_{pz}, y_{pz} и т.д. **коэффициенты** C_{Pz}, C_{Pz} и C_{Pz} рассчитываются из указанных формул при **известных силах** *Pz*, *Pz* и *Pz*, **определённых из экспериментов**.

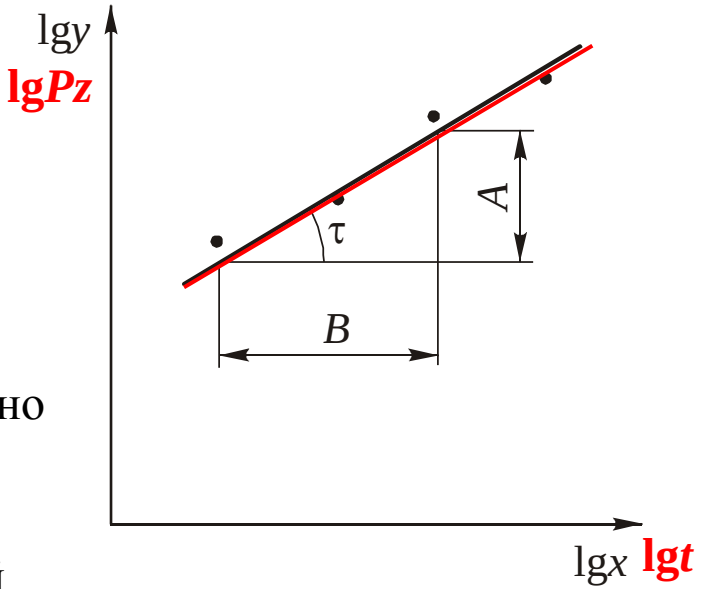


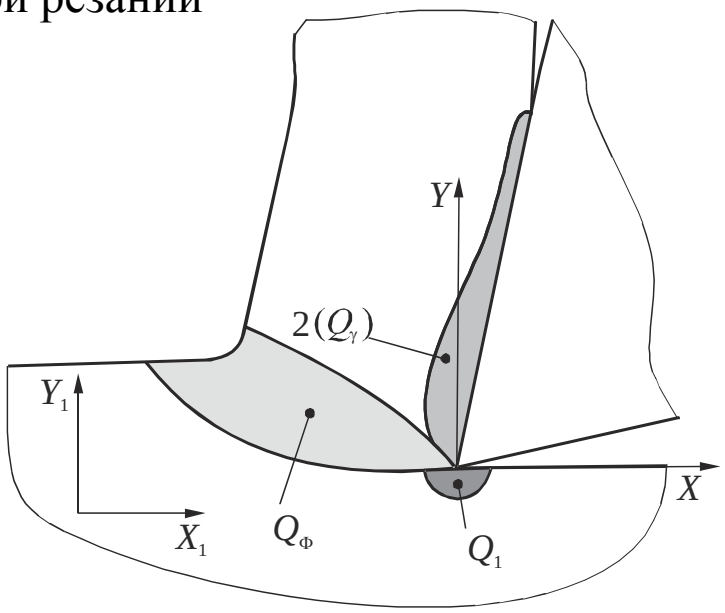
Схема для определения показателя степени *k* в уравнении $y = C_x \cdot x^k$.
$k = tg\tau = (A/B)$.
Отрезки *A* и *B* **измеряются линейкой** на графике lg*y*–lg*x* ($\lg P_z$–$\lg t$)

3. Исследование температуры резания

Тепловые явления при резании. Пластические деформации и трение на контактных площадках режущих инструментов сопровождаются столь обильным выделением теплоты, что инструмент и заготовка нагреваются до весьма высоких температур. При этом нагрев инструмента определяет его износ, уровень допустимых режимов резания и производительность обработки, а нагрев заготовки влияет на точность обработки и уровень технологических остаточных напряжений в обработанных поверхностях. Температура резания оказывает влияние также и на закономерности физических явлений, происходящих при резании материалов, и на их взаимосвязь. Наглядным примером этому служат рассмотренные выше закономерности наростообразования и связанные с ним изменения деформаций и сил резания. Общее количество теплоты, выделяющейся при резании

$$Q = Q_{\Phi} + Q_{\gamma} + Q_1$$

В соответствии с законом теплообмена теплота от источников теплообразования отводится в направлении менее нагретых частей, находящихся с ними в контакте, а именно: в заготовку, стружку и режущий инструмент. При этом часть теплоты отводится в окружающую среду, например, с помощью подводимой в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Однако если резание осуществляется на воздухе, то эту теплоту из-за ее малой величины обычно не учитывают.



ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

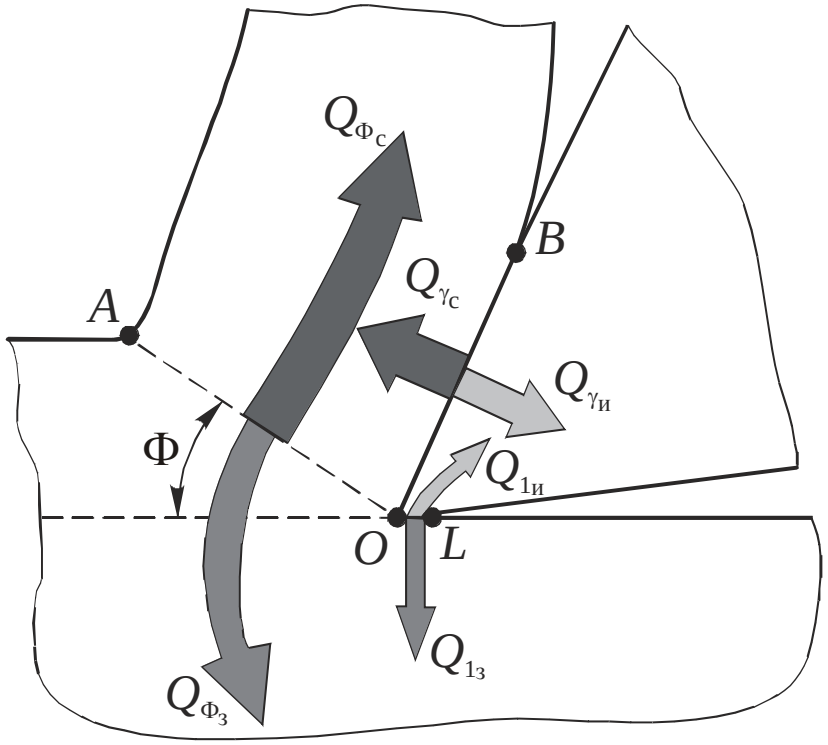
На основании изложенного **уравнение теплового баланса** имеет вид:

$$Q_{\Phi} + Q_{\gamma} + Q_1 = Q_{з} + Q_{с} + Q_{и} + Q_{ос}$$

Если рассматривать тепловой баланс **в единицу времени**, то левая часть уравнения представляет собой сумму **тепловых мощностей** трех источников образования теплоты, которые можно найти по **уравнениям удельных работ резания** и **трения**, используя тепловой эквивалент механической работы Aтэ.

Приходные статьи теплового баланса определяются относительно просто и с достаточно высокой точностью, но составляющие расходной (правой) части уравнения определяют либо **экспериментально**, либо путем сложных теплофизических расчетов.

Обычно количество теплоты, отводимой в стружку, заготовку и инструмент, определяют экспериментально с помощью калориметров.



Потоки теплоты, отводимой в стружку, заготовку и инструмент

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

Для измерения средней температуры, а также для определения теплового баланса (определения количества теплоты, выделяющейся в зоне стружкообразования и переходящей в инструмент, стружку, заготовку и окружающую среду). Этот ***калориметрический*** способ, впервые применённый Можаевым, заключается в том, что резание производится в теплоизолированной среде и вся образующаяся стружка падает в калориметр с водой. После непродолжительного резания (5…10 секунд пока не установится температурный баланс) измеряется температура воды, детали и инструмента. Зная их вес и теплоёмкость, по разности температуры воды в калориметре до, и после резания рассчитывается количество теплоты, перешедшей в них во время резания.

$$\Theta_{стр.} = \Theta_{см.} + \frac{G_{воды} \cdot (\Theta_{смвес} - \Theta_{воды})}{G_{стр.} \cdot C_{стр.}}$$

где: $\Theta_{стр}$ – средняя температура стружки,
$\Theta_{см}$ – температура смеси воды и стружки в калориметре,
$G_{воды}$ – вес воды в калориметре,
$G_{стр}$ – вес стружки в калориметре;
$\Theta_{воды}$ – начальная температура воды;
$c_{стр}$ – теплоемкость стружки.

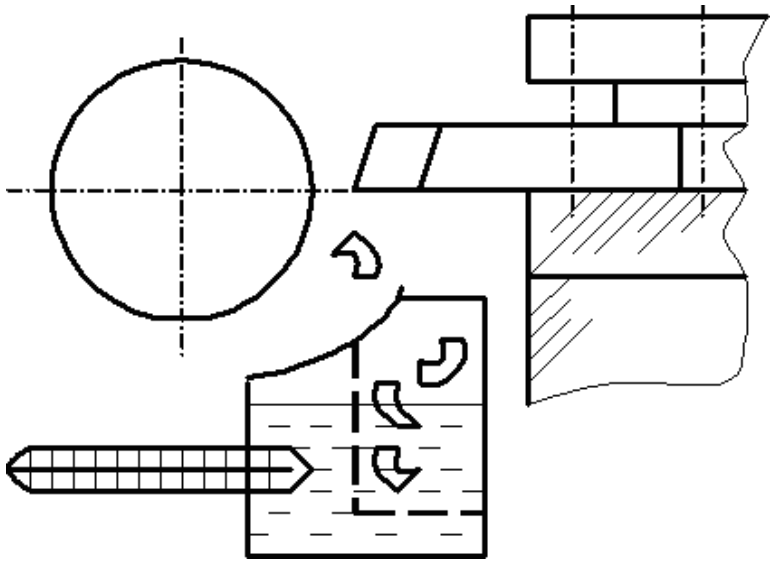
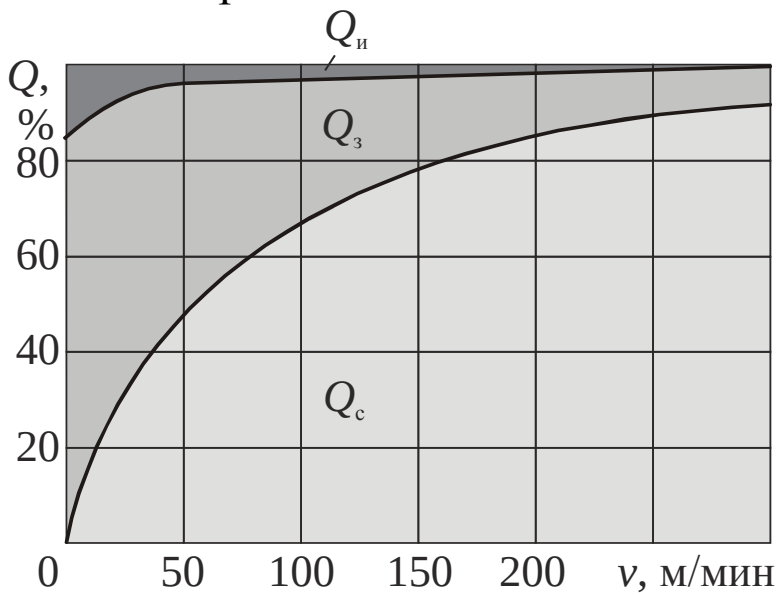


Схема проведения исследовании калориметрическим методом

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

По данным отечественных и зарубежных исследователей установлена следующая картина распределения теплоты по указанным направлениям. Здесь **с ростом скорости резания** *v* **количество теплоты, уходящей в стружку** *Q*с, монотонно **возрастает**, причем наиболее интенсивно это происходит при резании на низких скоростях. **Доля теплоты**, поступающей в **заготовку** *Q*з и **инструмент** *Q*и, при увеличении скорости резания **наоборот сокращается**. Например, при точении стали 40Х со скоростью резания *v*=20…50 м/мин в стружку уходит 30…50% теплоты, в заготовку – 45…65%; при скорости резания *v* =150 м/мин в стружку уходит 75% теплоты, а в заготовку – около 20%. В инструмент обычно переходит небольшая доля теплоты - около 10…15%.

Такое влияние скорости резания на распределение теплоты объясняется тем, что с увеличением скорости резания все **большее количество теплоты остается в стружке** и все меньшее ее количество успевает перейти в заготовку и инструмент. К тому же с ростом скорости резания **снижается степень деформации** обрабатываемого материала, а следовательно, силы резания и площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Все это приводит к **сокращению доли теплоты, переходящей в инструмент**.

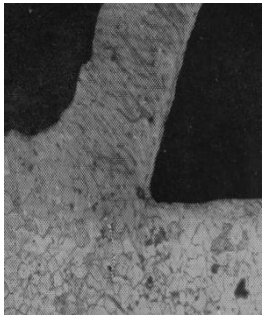


Распределение теплоты между стружкой , заготовкой и инструментом при точении стали 40Х (Т15К6, *t*=1,5 мм, *s*=0,12 мм/об)

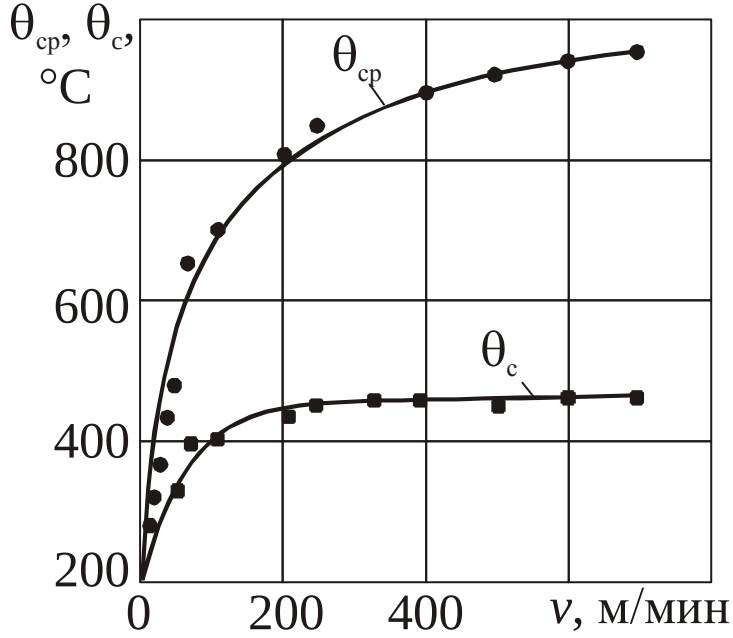
ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

Уменьшение доли тепла, уходящего в инструмент не означает, что температура на контактных площадках инструмента и в самом режущем клине снижается. Напротив, **с ростом скорости резания температура значительно увеличивается**. Это объясняется тем, что **теплота** на контактных площадках инструмента **концентрируется** в очень узком по толщине слое, составляющем **несколько микрометров**, а также тем, что **с ростом скорости** схода стружки пропорционально **увеличивается работа трения** на передней поверхности инструмента.

Из рисунка следует, что **средняя температура на передней поверхности** $\theta_{ср}$ инструмента намного **выше,** чем **температура в стружке** θ_c. В связи с тем, что **на площадке контакта стружки с инструментом** эти **температуры примерно равны**, то это свидетельствует о **неравномерности распределения температуры по толщине стружки,** которая постепенно снижается по мере приближения к ее свободной стороне.



Чем **выше теплопроводность обрабатываемого** материала, тем больше теплоты переходит **в заготовку**, а **чем выше скорость резания**, тем **меньше теплоты переходит в инструмент.**

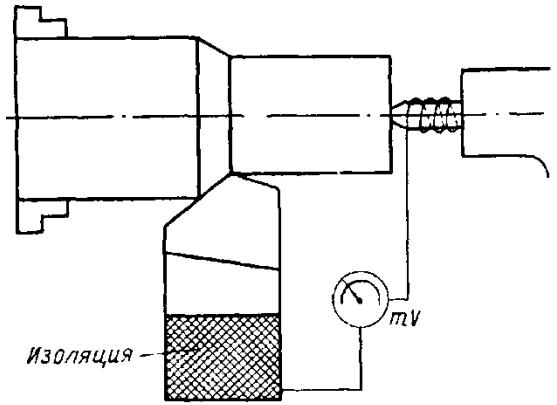


Влияние скорости резания на среднюю температуру **на передней поверхности** $\theta_{ср}$ и температуру **в стружке** θ_c при точении стали 40Х (Т15К6, t=1,5 мм, s=0,12 мм/об)

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

Среди многочисленных методов определения **температуры** можно выделить четыре группы. К **первой группе** относятся методы, с помощью которых ***измеряется*** только **средняя температура стружки**, изделия или резца: метод **естественной термо-ЭДС**, калори метрический метод. Ко **второй** группе принадлежат методы, с помощью которых ***измеряется*** температура **узкоограниченных участков** зоны резания или резца, например: метод **искусственных термопар**; оптический и радиационный методы. К **третьей** группе относятся методы, позволяющие сразу ***экспериментально*** определить **распределение температуры** на определенных участках изделия или резца (температурные поля): метод цветов побежалости, метод **термокрасок (термочувствительных покрытий)**. К **четвёртой** группе относятся **расчётные** и **аналоговые** методы, которые **требуют начальных экспериментальных** данных, полученных непосредственно при резании.

Наиболее простым способом определения средней температуры рабочих поверхностей инструмента (***температуры резания***) является способ ***естественной термо-ЭДС*** (электродвижущей силы), который основан на физическом эффекте возникновении разности потенциалов при нагреве места спая разнородных материалов. Если свободные концы проволок соединить, то в цепи возникает термоток, электродвижущая сила которого **пропорциональна разности температур** места спая и холодных концов проволок.



Упрощенная схема **естественной термопары**

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

Измерение силы тока термо-ЭДС показывает лишь качественную картину. Для получения **температуры резания** необходимо выполнить **тарирование** места контакта инструмент-заготовка. Для этого стержень или пластина из инструментального материала приваривается к стержню или пластине из обрабатываемого материала (обычно в среде инертного газа) таким образом, чтобы образцы сходились под острым углом. После этого место сварки образцов помещается в муфельную печь, а свободные концы подключаются к тому же микроамперметру, что использовался при резании. Места подключения проводов к образцам должны находиться вне зоны нагрева.

При включении печи место сварки начнёт нагреваться. Максимально достижимая температура в печи, как правило, не более 1200 ºС, но этого вполне достаточно. Температура в печи контролируется предварительно протарированной искусственной термопарой, шкала прибора которого проградуирована уже в градусах по Цельсию (ºС). Наблюдение за рабочим микроамперметром покажет соответствие между температурой и силой тока термо-ЭДС. Например, при температуре T =880 ºС ток I = 100 мкА. Тогда **тарировочный коэффициент** по току термо-ЭДС I рассчитывается по формуле: $К_I = T/I$ = 880/100 = 8,8 ºС/мкА. Если во время эксперимента микроамперметр показывает 50 мкА, то можно вычислить среднюю температуру резания: $T = I \times К_I$ = 50×8,8 = 440 ºС.

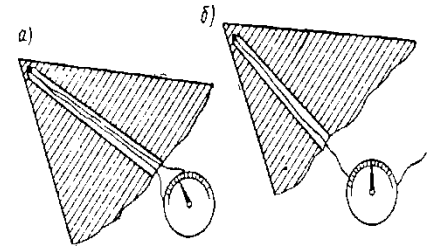
Недостатки: 1) **необходимость тарирования**, что может внести существенную погрешность; 2) измерение лишь некоторой **средней температуры**, в то время как в области контакта стружки с передней поверхностью температура может изменяться в широких пределах: от тысячи до сотни градусов. **Температура резания** при обработке стали 45 со скоростью V=150 м/мин с подачей s=0,3 мм/об и глубиной резания t=3 мм (условия при черновой обработке) составляет около 600 ºС.

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

Вторым способом измерения температуры является измерение температуры на боковой поверхности резца с помощью ***искусственной термопары,*** при котором место спая термопары прикладывают к боковой поверхности резца при свободном резании. Такой способ возможен при **точении диска резцом**, ширина которого лишь на десятые доли миллиметра больше толщины обрабатываемого диска, причём **толщина диска должна быть более 5 мм**. Только в этом случае на боковой поверхности резца температура будет почти такая же, что и внутри режущего клина, и на поверхности его контакта со стружкой. К недостаткам способа относится довольно большие размеры спая термопары (0,3…0,5 мм), что сопоставимо с длиной контакта стружки с передней поверхностью (0,2-5 мм), где наиболее важно знать температуру,

Третьим способом измерения температуры, свободным от вышеуказанного недостатка, является способ ***закладных искусственных термопар***. В инструменте сверлятся или прожигаются глухие отверстия малого диаметра (0,2…0,4 мм), в которые вводят искусственные термопары с изоляционным покрытием на разную глубину. Наиболее ценная информация получается при подходе изнутри к рабочим поверхностям инструмента на 0,05…0,1 мм в зоне контакта инструмента со стружкой, т.е. измеряется температура практически на рабочей поверхности инструмента. Особая ценность этой информации заключается в том, что повышение температуры именно поверхностей контакта инструмента со стружкой и заготовкой приводит к повышению интенсивности износа при резании. Использованием закладных искусственных термопар можно исследовать **распределение температуры** как в режущем клине, так и на поверхности инструмента при несвободном косоугольном резании, наиболее часто применяющимся в производстве. Недостатком способа является **высокая трудоёмкость** подготовки инструмента к исследованиям.

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*



Термопары Я.Г. Усачева

Четвёртым способом измерения температуры является измерение температуры на боковой поверхности резца ***с помощью пирометра*** (пирометрический способ) и ***тепловизора*** (температура определяется по инфракрасному излучению с нагретой поверхности).

Способ ***тепловизора*** более чувствительный и позволяет измерять температуру в любом диапазоне, в то время как пирометрический может быть использован только при температурах более 400 ºС, т.к. основан на сопоставлении излучения видимого света от нагреваемой поверхности с излучением от спирали. Силу тока, проходящего через спиральку, увеличивают до тех пор, пока спиралька она не нагреется до такой тепературы, что станет невидимой на фоне нагреваемой поверхности, а шкала амперметра предварительно тарируется и на ней указывается не только сила тока, но и соответствующая при этом температура. К **недостаткам** указанных способов относится довольно **большой диаметр чувствительной зоны**, особенно у пирометрического способа. С помощью тепловизора можно измерять также температуру стружки и заготовки.

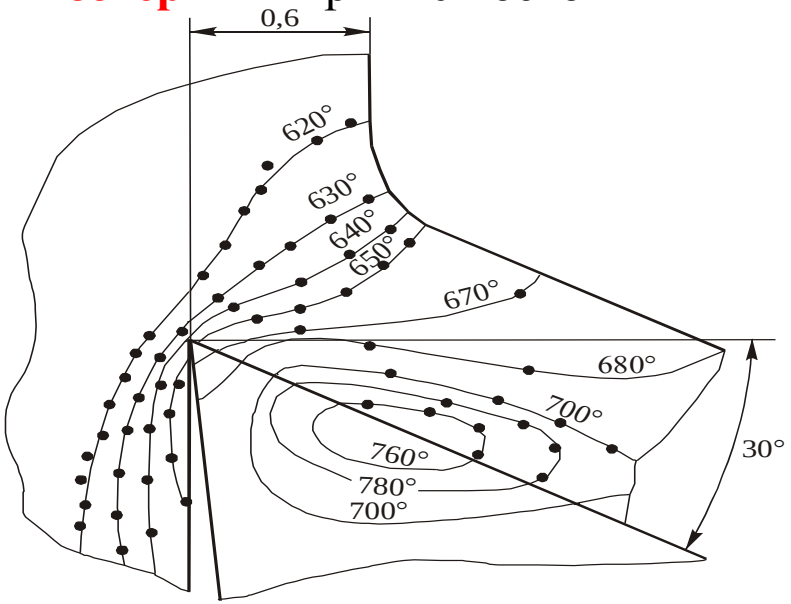
Среднюю температуру стружки можно приблизительно определить и просто **по её цвету** в процессе резания. При сильном износе или завышенной скорости резания и нагреве металла (стружки) до 650 ºС появляется тёмно-красный цвет, до 700 ºС – вишнёво-красный, до 800 ºС – светло-красный, до 900 ºС – оранжевым, до 1000 ºС – оранжево-жёлтым, до 1100 ºС – светло-жёлтый, до 1150 ºС – соломенно-жёлтый, до 1200 ºС – белый. Необходимо помнить, что **тепло не сразу доходит до наружной поверхности стружки** после её выделения в зоне первичной пластической деформации, поэтому стружка приобретает соответствующий температуре цвет только спустя некоторое время, например, после отделения от передней поверхности резца.

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

Измерение температуры резания с помощью **термопар** **не позволяет точно замерять температуры на площадках контакта** и получать точные картины **распределения температуры** в режущем клине, заготовке и стружке, что важно знать при оценке интенсивности износа отдельных участков инструментов с целью выбора их оптимальных геометрических параметров и назначения оптимальных режимов резания. Частичное решение этой задачи дает применение **пятого** метода – термочувствительных покрытий (термоиндикаторов) и радиационного метода.

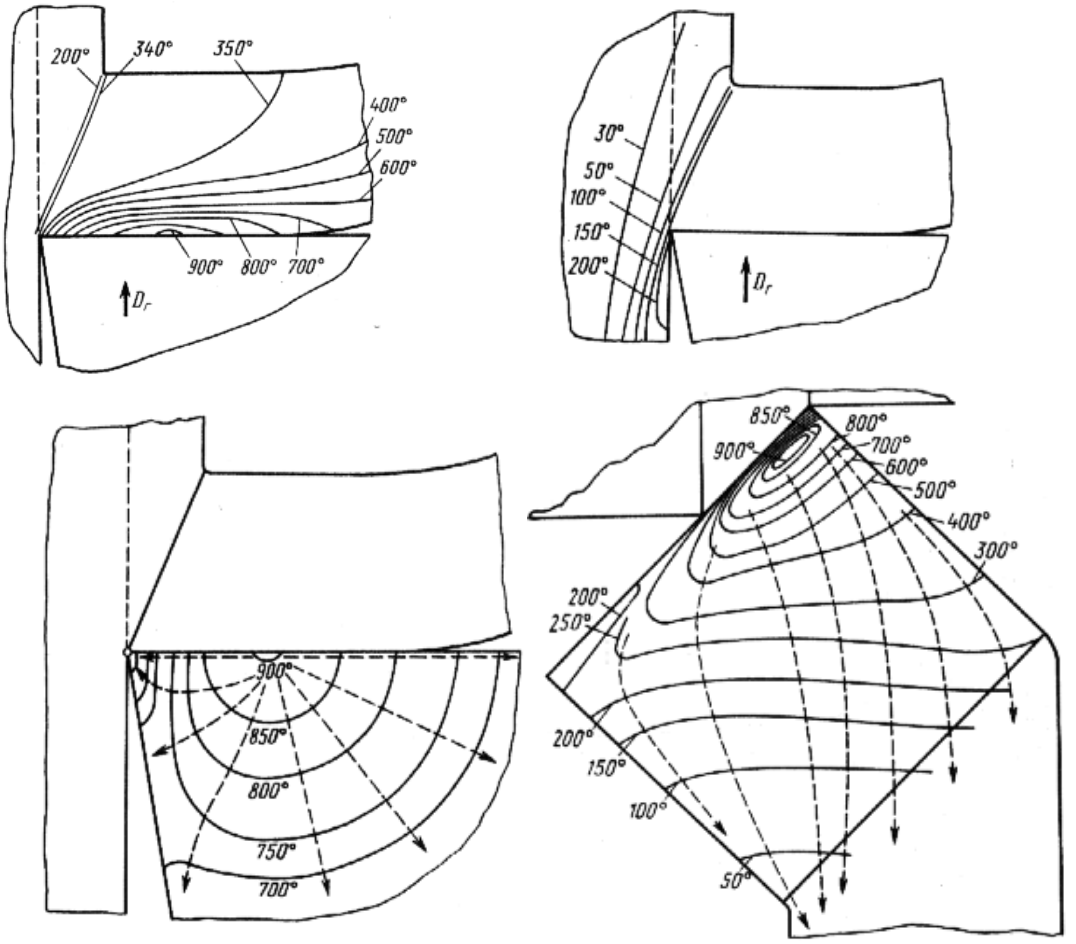
Метод термочувствительных покрытий основан на способности ряда веществ **изменять свой цвет** под воздействием температуры. Если нанести тонкий слой термокраски на боковую поверхность резца, то, используя тарировочные таблицы и оценивая изменение цвета под действием температуры на разных участках с помощью инструментального микроскопа, можно построить **изотермы** – кривые **постоянных температур** в режущем клине.

Радиационный метод основан на измерении температуры с помощью оптических фотоэлектрических датчиков и специальных приборов, позволяющих измерять температуру в инфракрасной части спектра в отдельных точках боковой поверхности резца и зоны резания. Результаты таких измерений, выполненных Г.Бутройдом (Великобритания), показаны на рисунке.



Расчётный, метод ***конечных элементов,*** заключается в том, что инструмент, стружка и заготовка разбиваются на квадратные, прямоугольные и треугольные элементы (конечные элементы), задаются режимы резания, теплопроводность и теплоёмкость инструментального и обрабатываемого материала и другие механические и теплофизические характеристики.

По специальной программе на компьютере рассчитывается температура и напряжения в центре каждого элемента. Расчёт производится многократно, в каждой следующей серии расчётов используются данные от предыдущего расчёта, в результате чего точность увеличивается. По окончании расчёта точки с одинаковыми величинами температур соединяются линией и получают изотермы. Чем меньше размер элементов и большее количество серий вычислений, тем выше точность расчёта, но больше времени требуется на расчёт. При наличии достоверных экспериментальных данных в некоторых точках инструмента или заготовки точность расчёта также увеличивается.



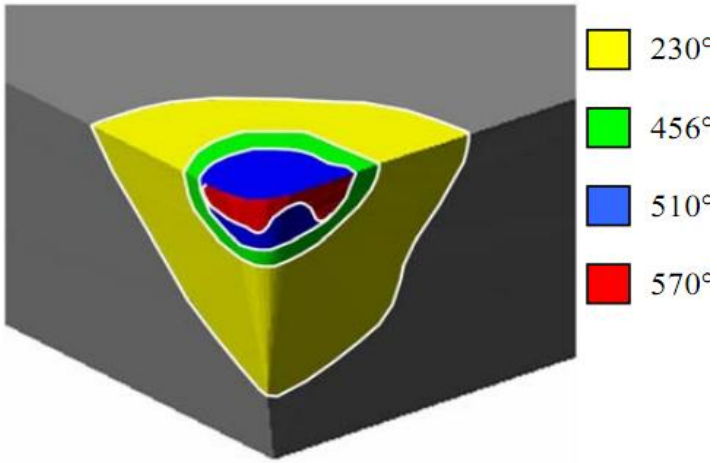
Распределение температуры в стружке (*а*), заготовке (*б*), режущем клине (*в*) и на передней поверхности резца (*г*) при резании стали 45 резцом из Т15К6. V=150 м/мин, S=0,3 мм/об, $\gamma=0^{o}$, $\alpha=10^{o}$, $\varphi=45^{o}$.

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ *(продолжение)*

Косвенным способом измерения температуры в процессе резания является ***анализ микроструктуры*** тончайшего слоя обработанной поверхности, претерпевающей заметные изменения предостаточно большом нагреве, применённый Б.И. Костецким. Но этот метод не получил распространения, так как его можно использовать только при высоких режимах резания или большом износе инструмента по задней поверхности, когда поверхность резания или обработанная поверхность нагревается выше критических точек.

Необходимо отметить, что степень изменения температуры резания в процессе работы является в известной мере критерием обрабатываемости металла и качества режущего инструмента. Однако **не всегда имеется закономерная связь между температурой резания и интенсивностью износа** режущего инструмента, так как износ в значительной степени зависит от микроструктуры обрабатываемого материала.

Приблизительно температуру на поверхности инструмента можно определить по цветам побежалости. **Цвета́ побежа́лости** – радужные цвета, образующиеся на гладкой поверхности металла в результате формирования тонкой прозрачной поверхностной оксидной плёнки и интерференции света в ней. Этот метод дает значительно большую погрешность, доходящую иногда, как показали опыты Б.Т. Прушкова, даже до 20—30% в зависимости от толщины среза, времени работы и др.



Экспериментально-аналитическое распределение температуры на поверхностях СМП

4. Испытания режущих инструментов на стойкость

Инструментальные материалы, используемые для изготовления режущих инструментов, должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1) высокая **твердость**, более чем в 3…4 раза превышающая твердость обрабатываемого материала;

2) высокая **красностойкость** (*теплостойкость*) - способность сохранять необходимую твердость до определенной температуры;

3) высокая **износостойкость** при повышенной температуре - сопротивляемость износу режущего клина;

4) высокие **прочность** и **формоустойчивость** режущего клина;

5) **технологичность** – способность обрабатываться;

6) **стоимость.** Правильнее оценивать по **относительной стоимости** – стоимость инструмента, отнесённая к **объёму** удалённого материала (при черновой обработке) или к **обработанной площади** до **затупления** (предельно допустимого износа) (при чистовой и получистовой обработке).

Все известные на сегодняшний день инструментальные материалы условно можно разделить на следующие группы:

1) инструментальные стали;

2) быстрорежущие стали;

3) безвольфрамовые сплавы;

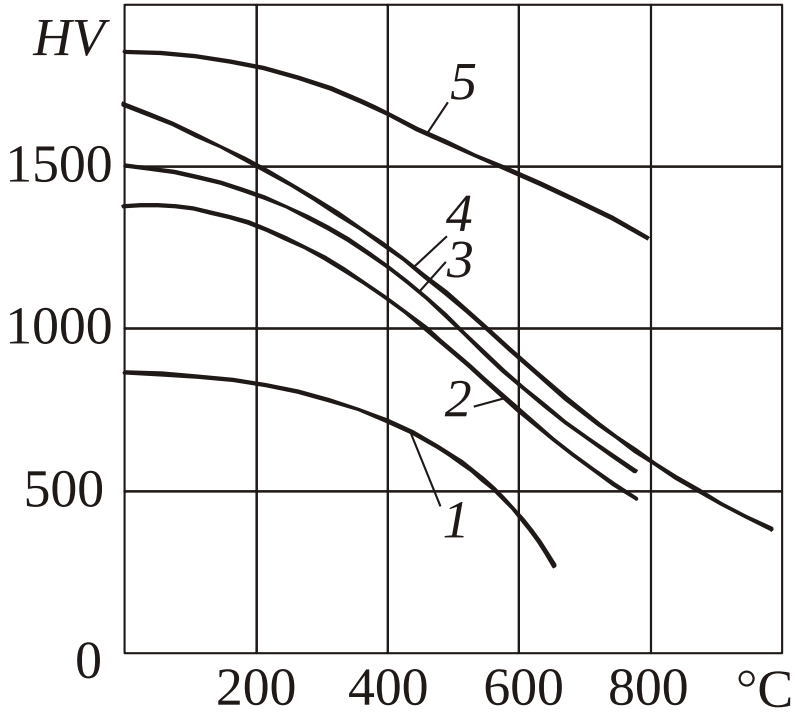
4) металлокерамические твердые сплавы;

5) сверхтвердые материалы (СТМ);

6) абразивные материалы.

Инструментальные стали - это углеродистые и низколегированные стали. Углеродистые стали (С=0,7…1,3%) обозначаются буквой У и цифрой - от У7 до У13, где буква У означает «углеродистые», а цифра - десятые доли процента углерода. У высококачественных высокоуглеродистых сталей, содержащих мало примесей, в конце обозначения ставится буква А, например, У13А. После закалки в воде и отпуска твердость углеродистых инструментальных сталей составляет $HRC_Э$ 61…63. Эти стали обладают низкой стоимостью и высокой технологичностью, а также высокими прочностью и износостойкостью.

Главным недостатком высокоуглеродистых сталей является их **низкая красностойкость**, равная **200…250°С**. Поэтому при резании конструкционных сталей инструментами из углеродистых инструментальных сталей средняя скорость резания ***v*** не превышает **5 м/мин**. В этой связи стали У7 и У8 применяют в основном для изготовления слесарных инструментов, а стали У10…У12 – для изготовления режущих инструментов, работающих на низких скоростях резания и ручной подаче.



Влияние температуры на «горячую» твердость по Виккерсу некоторых инструментальных материалов: *1* – быстро-режущая сталь; *2* – твердый сплав марки ВК10; *3* - твердый сплав марки ВК6; *4* - твердый сплав группы ТТК; *5* - минералокерамика

Инструментальные материалы *(продолжение)*

Для улучшения технологических и режущих свойств **углеродистых сталей** в них вводят в небольших количествах (1…3%) **легирующие элементы** (хром, кремний, марганец, вольфрам, молибден, ванадий и др.). Сталь **ХВГ** применяется для изготовления **длинномерных инструментов**, требующих **минимального коробления** при термообработке (протяжки, развертки, метчики и др.); сталь **9ХС** – для изготовления **ручных инструментов** (развертки, плашки, фрезы и сверла); сталь **Х6ВФ** – для изготовления резьбонакатных инструментов.

Низколегированные инструментальные стали за счет в**ысокого содержания углерода** (С=0,9…**1,1**%) после термообработки имеют твердость ***HRC*$_э$ 61…63**, обладают **хорошей прокаливаемостью** по сечению и несколько **повышенной красностойкостью** (теплостойкостью) (**до 250…300°С**).

Быстрорежущие стали (б/р сталь, HSS) (ГОСТ 19265-73) отличаются от инструментальных углеродистых и низколегированных сталей **высокой степенью** легированности **вольфрамом, молибденом, хромом** и ванадием. В результате термической обработки быстрорежущих сталей легирующие элементы придают им **высокую красностойкость** (до 620°С), углерод - **твёрдость** (до ***HRC*$_э$ 63…64**), а легирующие элементы и углерод - **прочность на изгиб** (до $\sigma_и$=3000…3500 МПа). Поэтому **скорость резания** инструментами из быстрорежущих сталей **в 4…6 раз выше** скорости резания инструментами из инструментальных сталей (***v* = 25-50 м/мин, 600°С**).

Благодаря **высокой прочности** быстрорежущие стали имеют широкое применение, особенно для изготовления **сложнофасонных** инструментов (сверла, фрезы, резьбонарезные и зуборезные инструменты).

При маркировке **быстрорежущих** сталей содержание **углерода** (С=0,85…1,2%) и **хрома** (Cr=3,1…4,4%) **не указывают**. После буквы **Р** (*Rapid* – быстрый) следует процентное содержание **вольфрама** (W), а после букв М – молибдена, Ф – ванадия и К – кобальта. Красностойкость **600°С** (**до появления синего цвета** стружки), скорость резания v = 20-80 м/мин, глубина резания t=5-0,1 мм; подача s = 0,8-0,05 мм/об.

Наилучшими эксплуатационными свойствами обладает б/р сталь марки **Р18** (С (углерод)=0,7…0,8%, W (вольфрам)=17…18,5%, Cr (хром)=3,8…4,4%, V (ванадий)=1,0…1,4%, Mo (молибден)=1%). К недостаткам этой стали относятся высокое содержание **дефицитного вольфрама** и несколько заниженная прочность на изгиб ($\sigma_и$=2900…3100 МПа). Введение **молибдена** (до 5,5%) позволило при тех же режущих свойствах **снизить** содержание **вольфрама** и **повысить прочность на изгиб** до $\sigma_и$=3300…3400 МПа. **Наибольшее применение** получила быстрорежущая сталь марки **Р6М5** (С=0,80…0,88%, W=5,5…6,5%, Cr=3,8…4,4%, V=1,7…2,0%, Mo=5,0…5,5%), имеющая близкую к стали Р18 **теплостойкость, повышенные технологические свойства,** но **несколько худшую стойкость**. Стали **повышенной теплостойкости** имеют **повышенное содержание ванадия** (стали марок Р6М5**Ф**3, Р12**Ф**3) и **кобальта** (стали марок Р6М5**К**5, Р9**К**10, Р9М4**К**8, Р18**К**5**Ф**2). Они используются для **резания труднообрабатываемых** материалов, так как благодаря повышенному содержанию кобальта они отличаются высокими износо- и красностойкостью (**до 640°С**), а также твердостью (до $\boldsymbol{HRC_Э}$ **65**). К технологическим недостаткам этих сталей относятся **худшая шлифуемость**, вызванная повышенным содержанием ванадия, и **пониженная прочность на изгиб** (до $\sigma_и$=2000 МПа), вызванная введением кобальта, а также их **высокая стоимость.**

Металлокерамические твердые сплавы - это композиции из порошков тугоплавких соединений: **карбидов** вольфрама, титана, тантала и др., спеченных со **связкой**, чаще всего из кобальта, при высоких температурах в вакууме или защитной атмосфере по технологии, напоминающей изготовление изделий из минеральной керамики. Отсюда и произошло название сплавов – металлокерамические.

Несмотря на высокую стоимость, применяемость инструментов, оснащенных твердосплавными пластинами (в том числе с покрытиями), в настоящее время составляет примерно 55%, а количество стружки, снимаемой этими инструментами, достигает 50…60% от всего объема снимаемой стружки. Совершенствование технологии получения **мелкозернистых карбидов** позволило **увеличить предел прочности на изгиб** (до $\sigma_и$=3500 МПа**)**, поэтому всё чаще **даже сложнопрофильные мелкоразмерные** инструменты изготавливаются из твёрдых сплавов.

Благодаря высокой теплостойкости (800…1000°С), твердости (*HRA* 87…91) и износостойкости скорость резания твердосплавными инструментами ***v*=150-550 м/мин**, что в 4…5 раз выше скоростей резания, достигаемых быстрорежущими инструментами. Однако по прочности на изгиб, которая составляет $\sigma_и$=900…1600 МПа, твердые сплавы существенно (в 2…3 раза) уступают быстрорежущим сталям.

Твердые сплавы условно делят на четыре основные группы: 1) **однокарбидные вольфрамокобальтовые (ВК);** 2) **двухкарбидные титано-вольфрамовые (ТК)**; 3) трехкарбидные титано-тантало-вольфрамовые (ТТК); 4) безвольфрамовые на основе карбида и карбонитрида титана.

Металлокерамические твердые сплавы условно делят на четыре основные группы:
1) **однокарбидные вольфрамокобальтовые (группа ВК,** старое название - **«победит») –** для обработки **чугуна, титановых сплавов, труднообрабатываемых сплавов и материалов, цветных металлов и сплавов,** т.к. к ним меньше прилипает стружка**:**

ВК8 (8% кобальта, остальное – карбид волфрама (WC – 92%) **– для черновой** обработки**;**

ВК4 (4% кобальта, остальное – карбид волфрама (WC – 92%) **– для чистовой** обработки**;**

2) **двукарбидные титано-вольфрамовые (группа ТК) – для обработки стали:**

Т15К6 – для получистовой обработки и черновой без ударов (6% кобальта, 15% карбида титана (TiC), остальное (79%) – карбид вольфрама (основа);

Т5К10 – **для черновой обработки с ударами** (но стойкость примерно в 2 раза меньше, чем при Т15К6);

Т30К4 – для чистовой обработки **закалённых** сталей.

3) **трехкарбидные** титано-тантало-вольфрамовые (ТТК);
4) **безвольфрамовые твердые сплавы** на основе карбида и карбонитрида титана.

При черновой обработке незакалённой стали твёрдым сплавом **Т15К6:** скорость резания v = 80-200 м/мин, глубина резания t=2-4 мм; подача s = 0,8-0,4 мм/об.

При получистовой и чистовой обработке незакалённой стали твёрдым сплавом **Т15К6:** v = 350-550 м/мин, глубина резания t=0,5-0,1 мм; подача s = 0,21-0,05 мм/об.

Инструментальные материалы *(продолжение)*

Широко используются **износостойкие** одно- и многослойных **покрытия** из **карбидов, нитридов** и **карбонитридов** титана, окиси алюминия и др. материалов. Оптимальная их толщина 6…10 мкм на твердосплавных пластинах и 2…6 мкм – на быстрорежущих инструментах. Высокая **твердость** (микротвердость HV_1=1180..600 при температуре 600…1000°С), **износостойкость, химическая инертность** к обрабатываемому материалу и **низкая теплопроводность** позволяет **повысить стойкость инструментов в 2…5 раз** и увеличить скорость резания на 20…60%.

В многослойных покрытиях каждый слой имеет собственное функциональное назначение. **Наружный слой** кроме **высокой твердости** должен иметь **низкий коэффициент трения** по отношению к обрабатываемому материалу. Последующие **слои** должны иметь **низкую теплопроводность**, препятствуя проникновению теплоты в инструмент. **Внутренний слой** должен обладать хорошей **адгезионной способностью к инструментальному материалу.**

Для нанесения покрытий в настоящее время наибольшее применение получили **два метода**: ***CVD*** (*Chemical vapour deposition*) – **высокотемпературный** (900…1000°С) метод, основанный на **химическом осаждении** покрытия из **газовой фазы;**

PVD (*Physical vapour deposition*) – **низкотемпературный** (300…800°С) метод, основанный на **физическом осаждении** покрытия из газовой фазы.

В большинстве случаев покрытия наносят методом *PVD*. Твердость таких покрытий при любой температуре выше, чем покрытий, полученных методом *CVD*.

В России наиболее широко применяется низкотемпературный (600°С) **метод катодного напыления** и **ионной бомбардировки** (КИБ), осуществляемый на установках типа «Булат-3Т», «Пуск» и др.

Инструментальные материалы *(продолжение)*

Минеральная режущая керамика в своей основе имеет оксид алюминия Al_2O_3 и получается путем плавления глинозема (бокситов) в электрических печах. Это так называемая оксидная или белая (по цвету) керамика, например марки ЦМ332, ВО-100. Она имеет очень высокие теплостойкость (до 1400…1500°С) и твердость (*HRA* 90…92), бóльшую, чем у твердых сплавов, что позволяет обрабатывать ею металлы со **скоростью 600** м/мин и более.

Основные недостатки минералокерамики заключаются в ее **низкой прочности на изгиб** (320 МПа), которая на порядок меньше прочности на изгиб быстрорежущей стали и в большой нестабильности прочностных свойств.

В последнее время созданы новые марки режущей керамики на основе **нитрида кремния Si_3N_4**, так называемая **нитриднокремниевая (серая) керамика** марок ТВИН-200, ОНТ-20, **силинит Р**, у которой прочность на изгиб увеличена до 800 МПа. Это позволяет использовать ее не только при чистовом точении высокопрочных сталей и чугунов, но и **при фрезеровании**, для которого характерна ударная нагрузка.

Для повышения прочности в состав минералокерамики вводят различные тугоплавкие соединения: карбиды и оксиды вольфрама, молибдена, титана и др. Это так называемые **керметы*** - оксидно-карбидная (черная) керамика марок В-3, ВОК-60, ВОК-63, ВОК-200, ТВИН-400. Благодаря указанным добавкам, меньшим зернистости и пористости, а также армированию нитевидными монокристаллами карбида кремния SiC черная керамика по сравнению с белой керамикой имеет более высокую изгибную прочность (560…700 МПа), более стабильные свойства, но меньшую износостойкость.

За рубежом керметы (***cermet***) – это **группа безвольфрамовых** твердых сплавов, состоящих из **карбида и карбонитрида титана** и **цементирующего металла** (Ni, Co и др.), выполняющего роль связки.

Инструментальные материалы *(продолжение)*

Безвольфрамовые материалы. Большое внимание уделяется разработке новых **твердых сплавов**, не содержащих карбидов дорогого и дефицитного вольфрама. Карбиды вольфрама заменены карбидами титана с добавками молибдена, никеля и других тугоплавких металлов. Разработанные сплавы ТМ1, ТМЗ, ТН-30, КТН-16 и др. обладают высокой износостойкостью.

Карбидохромистые твердые сплавы, например КХН-20, КХН-30 (цифры указывают на процентное содержание никеля, остальное – карбиды хрома), хорошо сопротивляются изнашиванию и коррозии, обладают низкой склонностью к схватыванию. Пониженная склонность к адгезионному взаимодействию (схватыванию) с обрабатываемым материалом снижает износ инструмента по передней поверхности, обеспечивая более низкую шероховатость обработанной поверхности. Применяются при чистовой и получистовой обработке низколегированных, высокохромистых и хромоникелевых сплавов и цветных металлов вместо стандартных сплавов Т30К4 и Т15К6.

Сверхтвердые инструментальные материалы (**СТМ**) – это **алмазы** (природные и синтетические) и **кубический нитрид бора** (КНБ) - эльбор, кубанит, боразон.

Алмаз – самый твердый в природе материал (в 4…5 раз тверже твердого сплава), имеет высокую теплопроводность и низкий коэффициент трения, малую прочность на изгиб ($\sigma_и$=210…480 МПа), низкую красностойкость (800°С). При более высокой температуре алмаз окисляется и графитизируется до СО и С. Алмаз весьма **хрупок** и это сильно снижает области его применения в металлообработке. Крупный недостаток алмаза заключается и в его **химическом сродстве с железом**. Поэтому кристаллы природного алмаза не применяют для обработки сталей, а используют только при тонком точении цветных металлов и сплавов на высоких скоростях резания.

Синтетические алмазы имеют малые размеры и в основном применяются для изготовления абразивных инструментов и композиционных материалов.

Кубический нитрид бора *(КНБ)* – это синтетический материал со сложной алмазоподобной кристаллической решеткой, не имеет природного аналога. КНБ синтезирован как и искусственный алмаз при температуре 1360…2000 °С и давлении 6000…9000 МПа. из так называемого «белого графита» - химического соединения бора и азота. На основе плотных модификаций кубического нитрида бора создан ряд инструментальных материалов, носящих название композиционных (композиты). ***Композиты*** делят на ***две группы***: материал с массовой долей КНБ от 95 % и выше и массовой долей КНБ 75 % с различными добавками (например, $A1_2O_3$).

К ***первой группе*** относят эльбор Р (композит 01), бельбор (композит 02), гексанит (композит 10) и др. Материалы этой группы различаются технологией изготовления и исходным сырьем, поэтому имеют разные названия.

По твердости **эльбор** близок к алмазу, но обладает более высокой теплостойкостью, доходящей до 1200°С. Эльбор **химически инертный** материал и поэтому пригоден для обработки металлов самого разного состава. Благодаря высокой твердости и износостойкости его применяют для резания очень твердых материалов, закаленных сталей и даже твердых сплавов.

Эльбор выпускают **в виде порошков**, применяемых для изготовления абразивных инструментов и композиционных материалов, а также **в виде поликристаллов** - пластин диаметром 4…40 мм, которые используются для оснащения резцов и фрез. Поликристаллы марок Композит 01, 02, 03, 05, 09, 10 (гексанит-Р) в зависимости от состава и технологии изготовления имеют прочность на изгиб 470…1200 МПа.

Инструментальные материалы *(продолжение)*

Ко ***второй группе*** композитов относятся: композит 05, состоящий из КНБ и двуокиси алюминия $A1_2O_3$; композит 09, представляющий собой поликристаллы твердого нитрида бора (ПТНБ). **Композит 09** используется для оснащения инструмента, работающего **в условиях ударных нагрузок**. Для обработки резанием используется также силинит-Р – материал на основе нитрида кремния (SiN) и не содержит дефицитных элементов. Для силинита-Р характерно отсутствие склонности к адгезии по отношению к большинству сталей, сплавов на основе меди, алюминия. Он обладает более высокими прочностью, ударной вязкостью и теплопроводностью, чем инструменты из минералокерамики. Силинит-Р имеет достаточно высокие эксплуатационные свойства при точении и фрезеровании чугуна, а также при точении закаленных сталей.

Композиты обладают большой хрупкостью, поэтому для увеличения прочности инструменты из них имеют **отрицательный передний угол (до -20 °)** и небольшие углы в плане (от 10 до 30 °).

Двухслойные композиционные материалы в виде пластин, у которых верхний слой толщиной 0,5…1,0 мм получают методом спекания при высоких температурах порошков из **эльбора** или синтетического алмаза, а **подложка** изготовлена из **твердого сплава**, имеют большие размеры и их удобнее крепить механическим способом.

Инструменты, оснащенные **СТМ**, успешно работают в основном на **высокоточных и высокоскоростных станках с ЧПУ** и обрабатывающих центрах на **чистовых операциях** со скоростью резания, доходящей до **2000 м/мин**, и обеспечивают высокое качество обработанной поверхности, благодаря чему исключается операция шлифования.

Инструментальные материалы *(продолжение)*

За рубежом обозначение твердых сплавов производится по ***ISO* 513**, который подразделяет твердые сплавы на **шесть групп** в зависимости не от состава, как в нашей стране, а от обрабатываемого материала, типа образующейся стружки и других факторов.

Буквенное обозначение (**цвет**) → **Области применения**

P (**синий**) → Обработка сталей, стального литья и некоторых ковких чугунов (сливная стружка)

M (**желтый**) → Обработка нержавеющих сталей, жаропрочных и титановых сплавов (стружка скалывания)

K (**красный**) → Обработка серых чугунов с шаровидным графитом, ряда ковких чугунов, а также закаленных сталей, цветных металлов и пластмасс (элементная стружка)

N (**зеленый**) → Обработка алюминия и цветных металлов

S (**светло-коричневый**) → Обработка жаропрочных и титановых сплавов

H (**светло-серый**) → Обработка закаленных сталей и чугунов

В зависимости от вида обработки (точение, сверление, фрезерование и др.) области применения твердых сплавов могут изменяться

В свою очередь группы твердых сплавов делятся **на подгруппы**, которые обозначаются индексами: 01, 10, 20, …, 50. Чем **меньше индекс**, тем **меньше сечение срезаемого слоя** и **больше скорость резания**, а инструментальный материал характеризуется высокой износостойкостью. С увеличением индекса растут подача и глубина резания, а у инструментального материала – прочность. Например: ***P* 05** – означает, что твердый сплав предназначен для чистовой обработки стали; ***P* 50** – для черновой обработки стали; ***M* 25** – для получистовой обработки нержавеющей стали и т.д.

Прочность режущих инструментов

Потеря формы режущего клина может произойти либо из-за хрупкого **разрушения**, **пластической деформации** под действием высокой температуры и больших контактных напряжений, либо из-за **износа** клина по **передней** и **задней** поверхностям, **округления** режущей кромки.

Хрупкое разрушение режущего клина происходит в виде мелкого **выкрашивания** режущих кромок, **отслаивания** инструментального материала на отдельных участках лезвий или крупных сколов. Такие разрушения характерны для инструментов из инструментальных материалов, обладающих наименьшей пластичностью и прочностью на изгиб, таких, как, например, твердые сплавы, минералокерамика и СТМ.

Выкрашивание режущих кромок происходит обычно при работе с ударами и переменной нагрузкой, имеющей место при врезании и выходе инструмента из контакта с заготовкой, а также связано с поверхностными дефектами инструментального материала, остаточными напряжениями и микротрещинами, вызванными пайкой и заточкой инструмента.

Отслаивание инструментального материала характерно **для твердых сплавов**. Оно возникает из-за дефектов структуры твердого сплава под действием больших сил **адгезии** со стороны сходящей стружки и особенно при активном наростообразовании.

Сколы режущей части инструмента обычно включают объёмы режущей пластины **за пределами площадки контакта стружки** с инструментом, когда микротрещины, увеличиваясь под действием внешних нагрузок, сливаются в магистральную макротрещину, приводящую к разрушению режущего клина. Сколы режущей части инструмента наиболее опасны, так как ведут к большим потерям инструментального материала и браку изделия.

Расчёт на прочность методом конечных элементов

Сущность ***метода конечных элементов*** (МКЭ) заключается в том, что рассматриваемая область разбивается на большое число отдельных **элементов** простой геометрической формы, связанных в узловых точках налагаемыми связями. Каждому элементу предписываются конкретные свойства, неизменные внутри каждого элемента. На **узлы**, являющимися общими для выделенного элемента и остальным телом инструмента, налагаются необходимые **связи**. К элементам рабочих поверхностей прикладываются **контактные нагрузки**, после чего определяются деформации и напряжения в каждом элементе. ANSYS - одно из основных программных обеспечений численного анализа МКЭ.

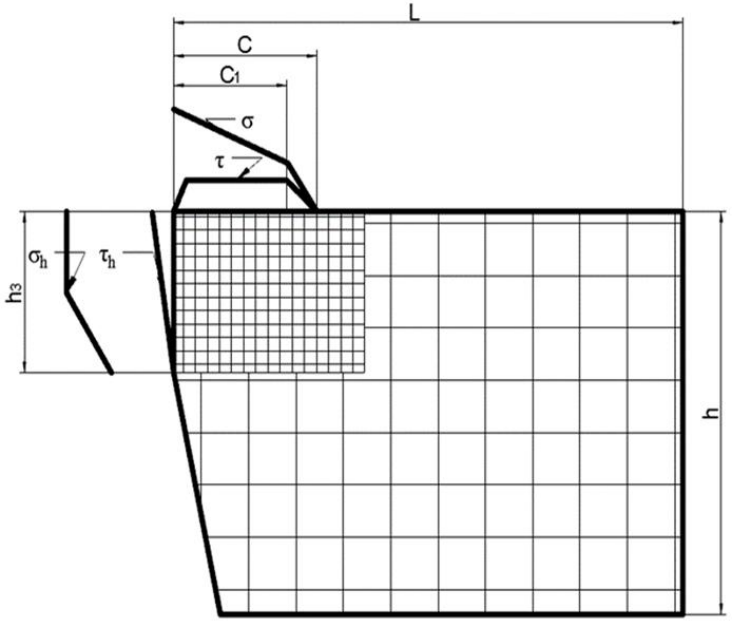
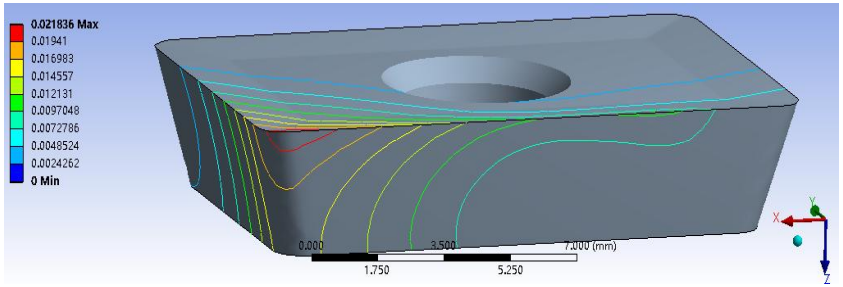
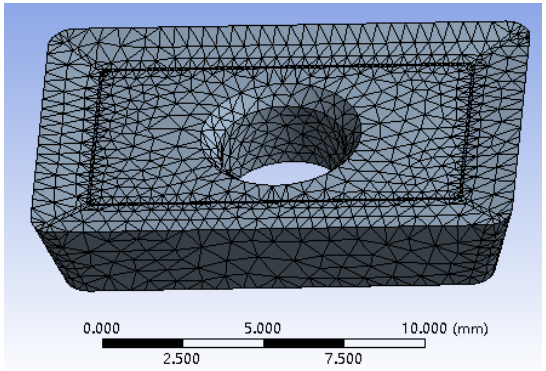


Рис.1. Разбивка тела резца на конечные элементы с приложением внешних распределённых нагрузок

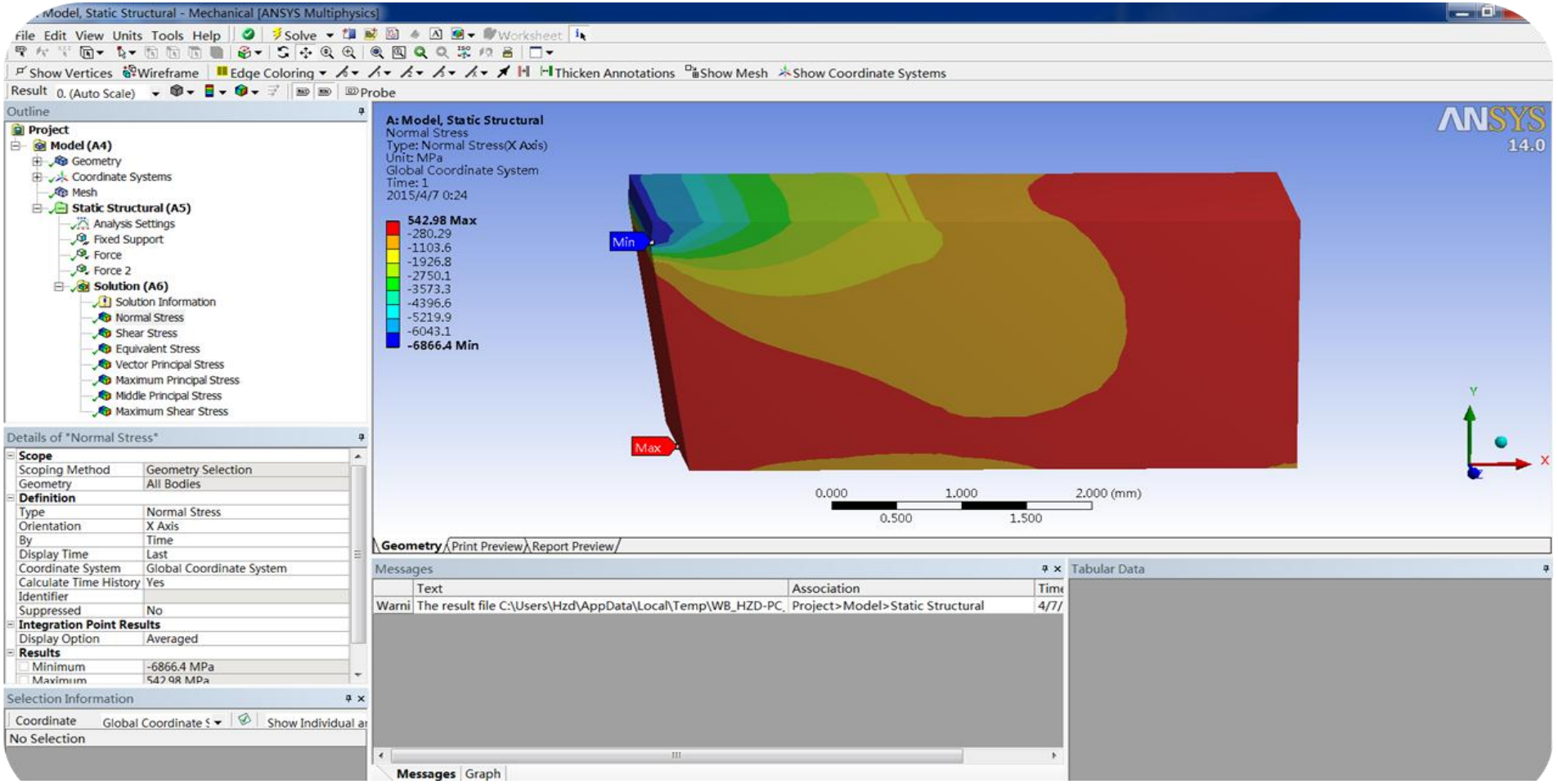
Основные этапы использования программы:

1) Создание 3D модели;
2) Задание внешних связей (опорных поверхностей);
3) Приложение внешних нагрузок;
3) Расчёт распределения напряжений, деформаций, температур, их анализ.





Расчёт **напряжённо-деформированного состояния (НДС)** (распределение внутренних напряжений и деформаций) в режущем клине резца **методом конечных элементов (МКЭ)**



Результаты расчёта распределения внутренних напряжений в режущем клине резца **методом конечных элементов (МКЭ) (FEM).**

Используемое программное обеспечение - **программа «ANSYS»**

Запас прочности режущего инструмента

Для учёта влияния всех внутренних напряжений и температуры в зоне НДС рассчитывается **эквивалентное напряжение σ_η**.Учитывая изменчивость свойств инструментальных материалов с ростом температуры, В.А.Остафьев рекомендует следующие критерии предельного состояния для сплавов группы *WC-Co*, когда температура $\theta < 870$ К:

$$\sigma_\eta = 0,24 \cdot \sigma_i + 0,76 \cdot \sigma_1 \cdot 0,8^{1-\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{\sigma_1}} \le \sigma_{\text{â}} \qquad (1)$$

интенсивность напряжений в рассматриваемой точке:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2} \qquad (2)$$

Запас прочности инструментального материала:

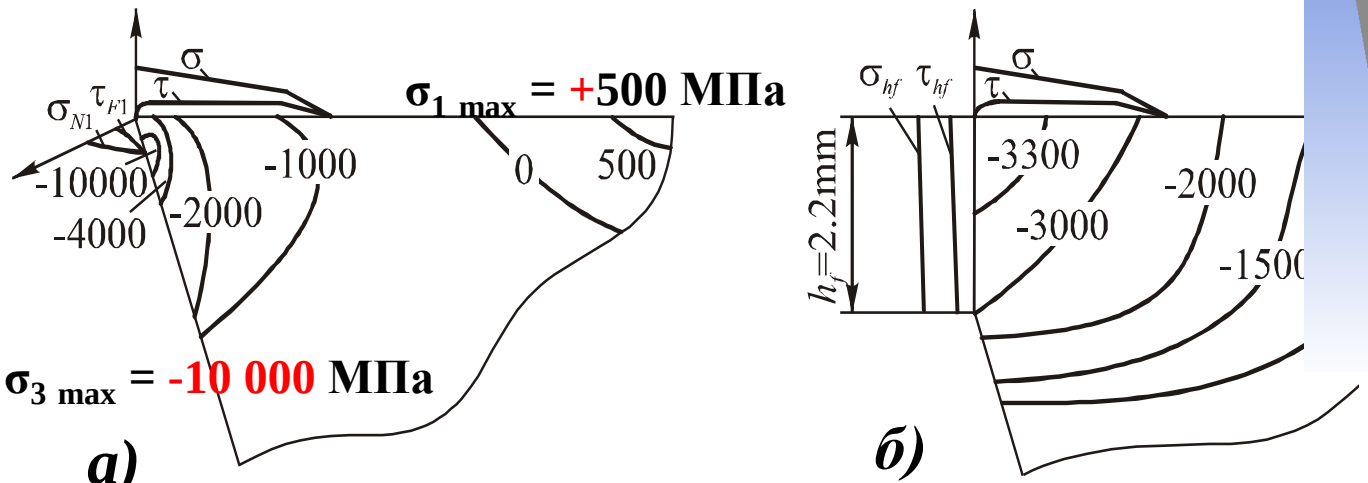
$$n = \sigma_в / \sigma_\eta \qquad (3)$$

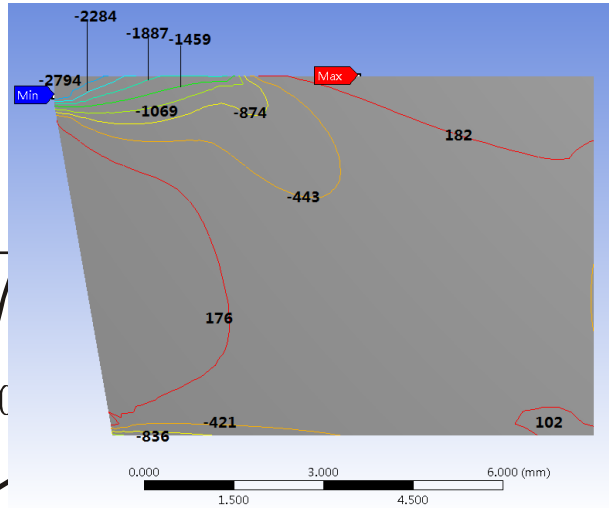
Для твердого сплава **ВК8** с размером зерна от 1 до 2 мкм пределы прочности: при **растяжении $\sigma_в$= 780 МПа**, при **сжатии $\sigma_{-в}$= 4200 МПа, предел прочности на изгиб** $\sigma_и$=**1200** МПа. При уменьшении размера зерна до 0,1 мкм $\sigma_и$= 3500 МПа.

Прочность режущих инструментов *(продолжение)*

За **пределами площадки контакта** стружки с передней поверхностью на расстоянии 1-5 длин контакта действуют **растягивающие напряжения (+σ)**. Они создают благоприятные условия для зарождения и развития трещин, что, в конечном счете, приводит к сколу крупных частей клина или к полному разрушению инструмента. При этом точка **максимума растягивающих напряжений** отстоит от режущей кромки на расстоянии 2,0…2,5 длины контакта. Фактическое разрушение может не совпадать с этой точкой, так как на него влияет местоположение **дефекта**, дающего начало магистральной трещине. Поэтому место разрушения относительно режущей кромки может находиться левее и правее указанной точки и носит **случайный**, вероятностный **характер**.

При растяжении $\sigma_в$= 780 МПа, при **сжатии** $\sigma_{-в}$= **4200 МПа.**





в) h_f = 0,5 мм

Распределение главного внутреннего напряжения σ_1 в режущем клине резца при прямоугольном свободном точении диска из **титанового сплава** ВТ3-1. [Козлов В.Н.]

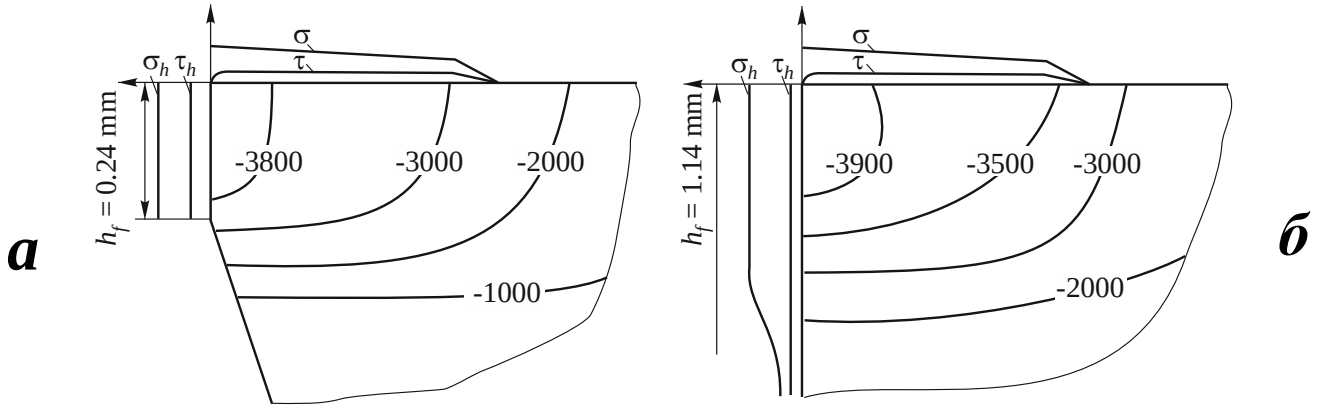
82

ВТ3-1 - ВК8, γ=0 °, α_h = 0 °, α = 10 °, v=1 м/с, подача s (f) = 0.21 мм/об → толщина среза a = 0.21 мм.

а – острозаточенный резец; ***б*** – длина фаски износа на задней поверхности h_f = 2.2 мм; ***в)*** h_f = 0,5 мм.

Прочность режущих инструментов *(продолжение)*

Из параметров режима резания наибольшее влияние на величину растягивающих напряжений оказывает **толщина среза *a*,** с увеличением которой растут контактные напряжения. Значение предельно допустимой толщины среза, при которой может произойти хрупкое разрушение режущего клина, зависит как от **свойств обрабатываемого материала**, так и от **величины угла заострения** режущего клина. На величину этого угла влияет в **основном только передний угол,** так как задний угол на резцах изменяется в небольших пределах, а именно: при черновой обработке α=6…8°, а при чистовой обработке α=8…12°. Передний угол изменяется в более широких пределах от γ=+35° и до отрицательных значений (γ=-10…-35°). В последнем случае, а также **при износе по задней поверхности** на передней поверхности режущего клина создаются благоприятные **напряжения сжатия**, но значительно **возрастают сила резания и температура резания**.



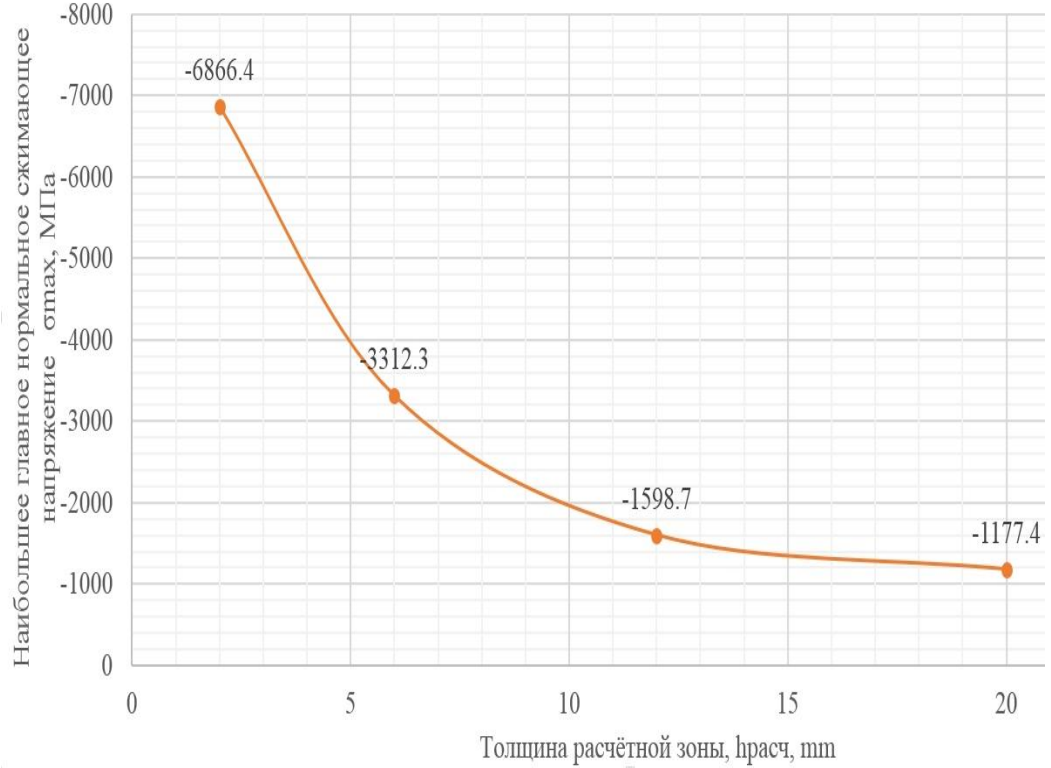
а ***б***

Распределение главного внутреннего напряжения σ_1 в режущем клине резца при прямоугольном свободном точении диска из титанового сплава ВТ3-1. [Козлов В.Н.]
ВТ3-1 - ВК8, γ=0 °, α_h = 0 °, α = 10 °, *v*=1 м/с, подача *s* (*f*) = **0,41 мм/об** → *a* = 0,41 мм.
а – h_f = 0,24 мм; ***б*** – h_f = 1,14 мм

Прочность режущих инструментов *(продолжение)*

Применение твердых сплавов показало, что на передней поверхности режущего клина весьма целесообразно создавать упрочняющую фаску под углом $\gamma_ф$=0…-5°, а за ней - положительный передний угол. Для повышения прочности твердосплавных пластин **их толщина** должна быть **больше толщины срезаемого слоя примерно в 10 раз ($h_{пласт}$ от 4 до 5 мм).** Увеличение толщины режущей пластины более 6 мм нецелесообразно, т.к. при незначительном увеличении прочности пластины происходит существенное **увеличение её стоимости.**

Исключение – черновая обработка труднообрабатываемых материалов, когда требуется **твёрдосплавная опорная пластина (модуль упругости Юнга** твёрдого сплава (E=54·10^{11} МПа) в 2 раза больше, чем у стали**)** и толщина **режущей пластины** от 6 до 12 мм (см. рисунок).



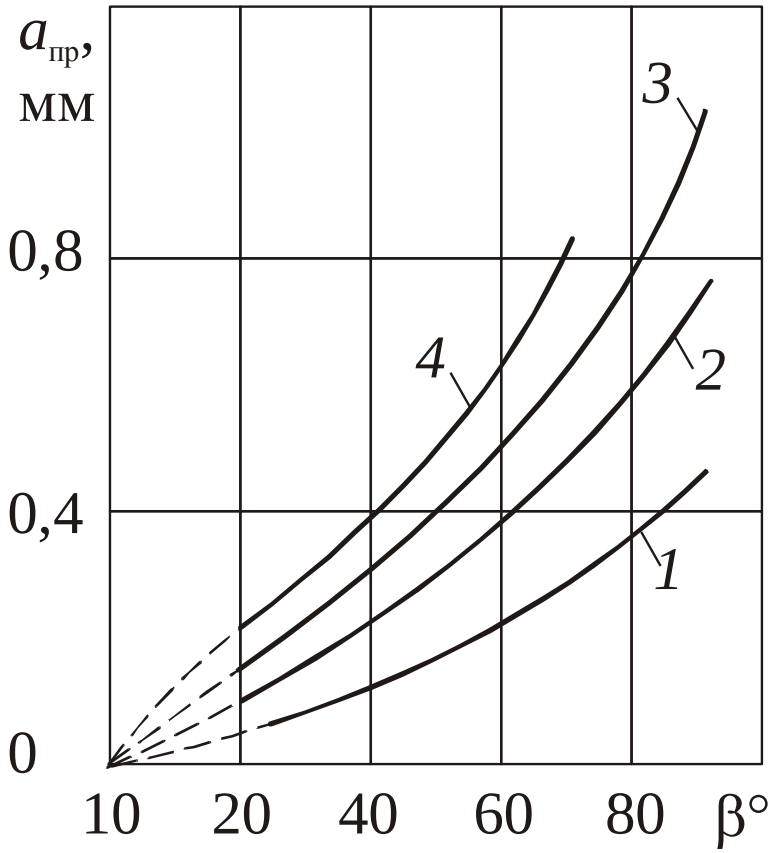
Влияние **толщины режущей пластины** $h_{пластины}$ (мм) на величину наибольшего сжимающего нормального напряжения в режущем клине $\sigma_{3\,max}$ (МПа). **ВТ3-1** – ВК8, γ=0°, v=1 м\с, s= 0,21 мм/об, $h_з$ =0,2 мм [Чжан Ц., Хуан Ч., Козлов В.Н.]

Прочность режущих инструментов *(продолжение)*

На хрупкое разрушение большое влияние оказывает число циклов нагружения при прерывистой обработке, и изменение напряжений при врезании и выходе режущего клина.

С ростом числа циклов нагружения снижается усталостная прочность инструментального материала и увеличивается вероятность хрупкого разрушения режущего клина. Поэтому **при фрезеровании**, для которого характерна прерывистая обработка с ударами, **предельная толщина среза *a* в 2…3 раза меньше**, чем при **точении**.

Следует отметить, что кроме этих причин **отрицательное влияние** на прочность твердосплавных пластин оказывает также их **переточка**. В этом преимущество **сменных многогранных пластин** (**СМП**).



Влияние угла заострения режущего клина на предельную толщину срезаемого слоя при точении:
1 – сталь 110Г13Л; *2* – сплав ХН60ВТ;
3 – сталь 12Х18Н10Т; *4* – сталь ШХ15 (ВК8)

Износ режущего инструмента

Износ режущего инструмента есть результат трения стружки о переднюю поверхность инструмента и его задней поверхности об обработанную поверхность. Это процесс, протекающий при высоких температурных и контактных нагрузках. По сравнению с износом деталей в машинах при резании удельные давления выше в 300…400 раз, а температура - в 15…20 раз. Кроме того, при резании износ происходит на очень малых площадках контакта, верхние слои которых могут испытывать пластические деформации.

Различают **четыре основных вида износа** режущих инструментов: 1) механический; 2) адгезионный; 3) диффузионный; 4) химический (окислительный).

Механический (абразивный) износ происходит в результате резания - трения твердых включений инструментального и обрабатываемого материалов (упрочненные частицы нароста, карбиды, нитриды, интерметаллиды* и др.) о переднюю и заднюю поверхности инструмента. Особенно много указанных включений находится в чугунах, а также в высоколегированных сталях и сплавах. Например, в алюминиевых сплавах этими частицами являются высокотвердые частицы кремния. Интерметаллические соединения – химические соединения металлов с металлами, например, $CuAl_2$, $MgZn_2$, Al_2CuMn. Входят в структуру большого числа промышленных металлических сплавов, обеспечивая им упрочнение

При черновой обработке отливок это могут быть остатки формовочного песка, заполняющие раковины отливок и действующие как абразивный материал.

В наибольшей степени **механический (абразивный) износ** проявляется при работе инструментов из быстрорежущих сталей и наблюдается в виде **царапин**, канавок и других микронеровностей на передней и задней поверхностях инструмента. В меньшей степени механический износ наблюдается на твердосплавных инструментах из-за более высокой твердости и износостойкости твердых сплавов.

Адгезионный износ является результатом действия сил адгезии, то есть сил межмолекулярного взаимодействия ювенильных (новых, юных - химически чистых, очищенных от окислов) свежеобразованных поверхностей стружки и заготовки при их контакте с поверхностями инструмента в процессе совместного трения.

Диффузионный износ происходит в результате взаимного переноса (диффузии) атомов контактирующих инструментального и обрабатываемого материалов. Скорость диффузионных процессов зависит от подвижности атомов, которая, в свою очередь, определяется температурой резания. Диффузия становится заметной при температуре резания свыше 800…900°С, т.е. в области применения твердых сплавов и СТМ.

При резании твердосплавными инструментами материалов на основе железа наиболее быстро диффундирует углерод, имеющий наименьший радиус атомов, и значительно медленнее кобальт, вольфрам и титан. В результате поверхность твердого сплава обезуглероживается. При этом в твердый сплав проникает железо, ухудшающее его структуру, происходит охрупчивание и разупрочнение твердого сплава до такой степени, что отдельные участки этих слоев разрушаются и уносятся обрабатываемым материалом и стружкой.

Износ режущего инструмента *(продолжение)*

При резании стали двухкарбидными сплавами группы ТК карбиды титана растворяются в стали медленнее, чем карбиды вольфрама. Аналогично железо быстрее диффундирует в карбид вольфрама, нежели в карбид титана. Поэтому **двухкарбидные сплавы** в **меньшей степени** подвержены **диффузионному износу**, чем однокарбидные.

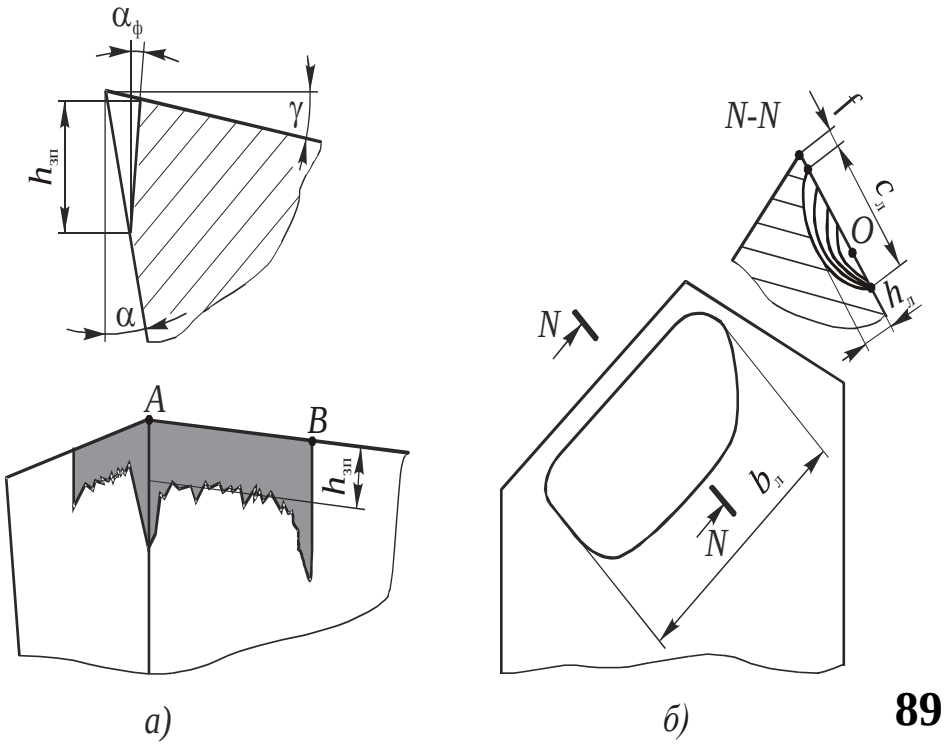
При обработке **чугунов** (C>2.14…**4,3**%) диффузия **углерода** из твердого сплава замедляется, **температура резания меньше**, чем при резании сталей; поэтому **однокарбидные** сплавы из-за повышенной **прочности** карбидов вольфрама **превосходят двухкарбидные** и по **износостойкости. Однокарбидные** твердые сплавы используют также при резании **цветных металлов** и сплавов, при обработке **титановых сплавов (**из-за химического сродства двухкарбидные сплавы дают худшие результаты).

Химический (окислительный) износ происходит за счет окисления при высоких температурах трущихся слоев благодаря высокой проникающей способности кислорода и ускоренного его соединения с ювенильными поверхностями стружки и инструмента. Образовавшиеся окисные пленки очень хрупки и поэтому легко разрушаются, оголяя нижеследующие слои, которые в свою очередь также окисляются и подвергаются разрушению. Окислительное изнашивание существенно увеличивается **при температуре** резания более **700**°С. У твердых сплавов наиболее быстро **окисляется кобальтовая связка**, при разрушении которой нарушается монолитность сплава, **ослабляется связь между зернами карбидов** титана и вольфрама. Окислительный износ можно существенно уменьшить за счет применения **инертных га**зов: азота, аргона и гелия

Износ режущего инструмента *(продолжение)*

Независимо от типа и назначения режущие инструменты изнашиваются прежде всего по **задним поверхностям**. Наиболее интенсивно изнашиваются участки задних поверхностей, прилегающих к режущей кромке, где контактные напряжения особенно высоки. В результате этого образуется площадка (**фаска**) износа $h_{зп}$ (h_f) **с нулевым** ($\alpha_ф$=0°) (α_h=0°), а в отдельных случаях и с небольшим **отрицательным задним углом** $\alpha_ф$. При несвободном резании ширина (**длина**) фаски износа $h_{зп}$ вдоль длины режущих кромок неравномерна. Она несколько **увеличена на вершине резца** (точка *A*), где высокая температура и условия трения наиболее неблагоприятны. Иногда на **краю площадки** (точка *B*) наблюдается **локальный износ** в виде узкой проточины, из-за упрочненного поверхностного слоя заготовки.

Износ **по передней поверхности** протекает с **образованием лунки** шириной $c_л$, длиной $b_л$ и глубиной $h_л$. Здесь точка *O* наибольшей глубины лунки примерно соответствует **максимуму температуры** резания на площадке контакта стружки с передней поверхностью. Передний край лунки отстоит на небольшом расстоянии f от режущей кромки. Лунка располагается параллельно режущей кромке, несколько не доходя до вспомогательной режущей кромки.



СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

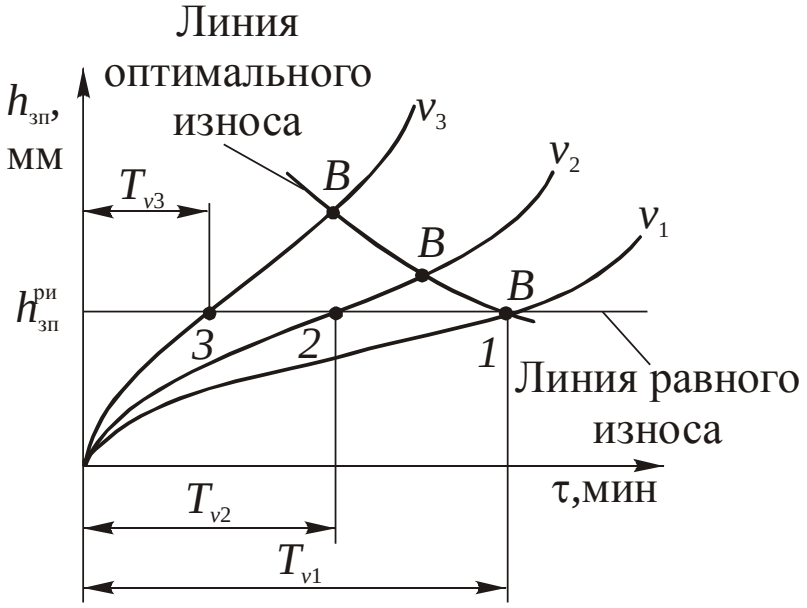
Продолжительность резания новым или переточенным инструментом до его отказа, то есть **до достижения предельно допустимого износа**, называется **периодом стойкости** или **стойкостью** инструмента (***T***).

Кроме времени стойкость можно оценивать **площадью обработанной поверхности**, числом обработанных заготовок, отверстий и др.

От стойкости инструмента зависит производительность процесса резания. Поэтому в теории и практике обработки материалов резанием вопросу повышения стойкости режущих инструментов уделяется большое внимание. Стойкость режущих инструментов обычно определяют по кривым износа . Однако для этого необходимо знать предельно допустимую величину износа, то есть **критерий затупления**.

На практике чаще всего в качестве этого критерия принимают допустимую для данного инструмента **длину фаски износа по задней поверхности $h_{зп}$** . Верхним пределом этой величины является такое ее значение, после которого начинается период катастрофического износа (на типичной кривой это точка перегиба *B*) (0,75…1,25 мм)..

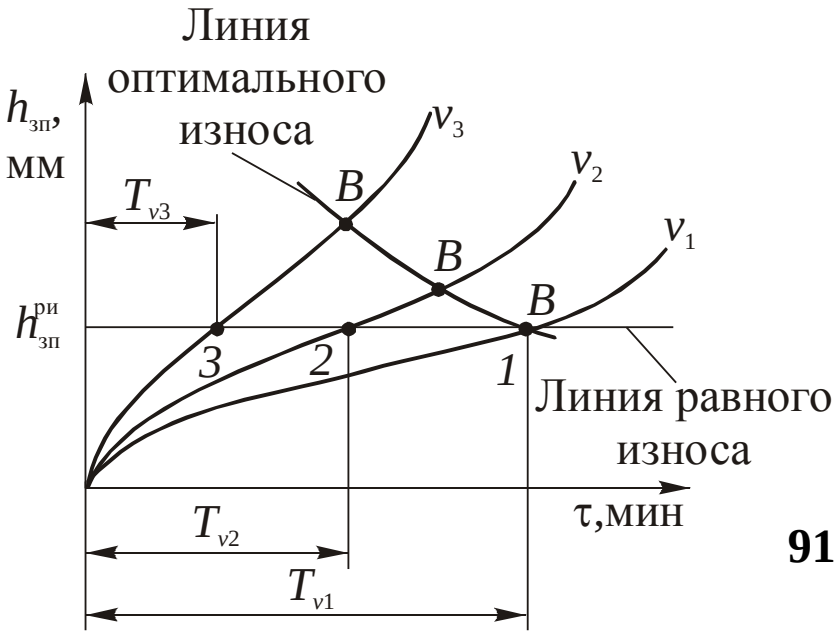
При чистовой обработке **радиальная составляющая** сила резания P_y становится достаточно большой, и происходит упругая деформация системы СПИД, приводящая к уменьшению точности обработки, поэтому $h_{зп\ доп}$ меньше (0,25 мм).



СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ *(продолжение)*

При построении кривых износа для разных скоростей резания $v_3 > v_2 > v_1$ видно, что с ростом скорости резания кривые становятся круче и происходит смещение точки B в сторону больших допустимых значений $h_{зп}$, т.е. в этом случае за оптимальный износ, строго говоря, следовало бы принимать для каждой скорости свое значение $h_{зп}$. Однако на практике с целью упрощения износ по задней поверхности $h_{зп}^{ри}$ принимают одинаковым (равновеликим) для всего семейства кривых износа и называют его **критерием равного износа**. В ряде случаев, например на автоматических линиях или на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) целесообразно применять более производительный и более экономичный **критерий оптимального износа**, о котором будет сказано далее. Численные значения критериев затупления определяют экспериментально. Они зависят от многих условий резания и, главным образом, от сочетания свойств режущего и обрабатываемого материалов.

Например, при **несвободном точении твердым сплавом сталей и чугунов** наибольшая величина фаски износа измеряется **у вершины резца** в главной секущей плоскости, т.е. в месте с наихудшими условиями теплоотвода. При этом допустимое максимальное значение фаски износа составляет: при **обработке стали** $h_{зп}$=0,8…**1,0** мм, а при обработке чугуна с подачей **s≤0,3** мм/об – $h_{зп}$=1,4…**1,7 мм** и с подачей s>0,3 мм/об - $h_{зп}$=0,8…1,0 мм.

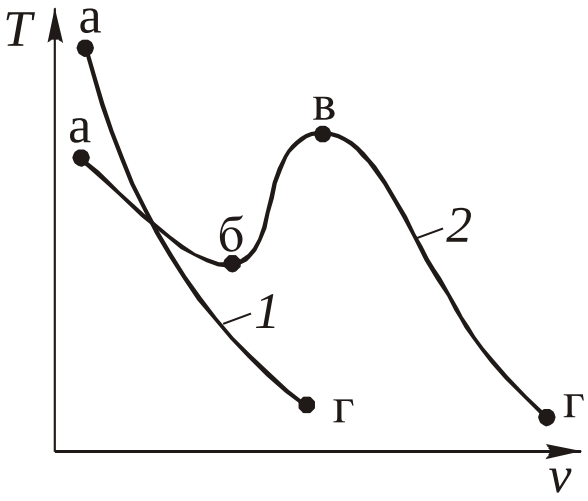


СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ *(продолжение)*

Момент **затупления** режущего инструмента иногда определяют и по **технологическим** критериям: а) **увеличение шероховатости** обработанной поверхности, вызванное износом инструмента; б) **потеря размера детали** при чистовой обработке; в) **появление «свиста»**; г) **появление вибраций**; д) **изменение цвета стружки**; е) изменение характерных **особенностей стружки** и т.п. Обычно **величина износа** инструмента при **использовании этих критериев ниже принятого** при **определении стойкости**, обеспечивающей **максимальное время работы** инструмента.

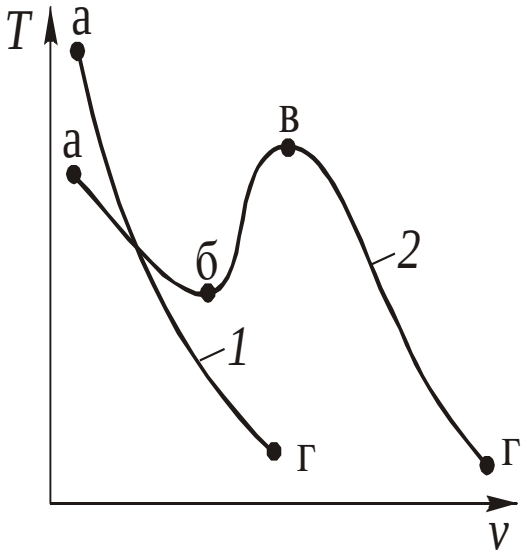
Наибольшее влияние на износ инструментов оказывает **температурно**-скоростной фактор. Поэтому уже в первых работах по совершенствованию режущих инструментов *F.W. Taylor* (Ф.У. Тейлор) предложил **оценивать их работоспособность** путем нахождения зависимости «стойкость-скорость» (*T-v*).

Строят зависимости **износа** от **времени** и, задаваясь критерием **равной стойкости** для разных скоростей резания, **находят значения** соответствующих **величин стойкости** при всех прочих равных условиях резания. Графически в прямоугольных координатах связь стойкости со скоростью выглядят в виде кривых *1* или *2*. **Монотонно убывающая кривая *1*** близка к параболе и **характерна для быстрорежущих инструментов и однокарбидных твердосплавных** резцов, обрабатывающих чугун.



СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ *(продолжение)*

Кривая ***2*** имеет **два перегиба** в точках б и в. Эта кривая встречается при резании твердосплавными инструментами легированных сталей и сплавов, в том числе труднообрабатываемых сталей, при изменении скоростей резания в широком диапазоне. Для удобства построения указанные кривые строят в логарифмических координатах и тогда зависимость - аппроксимируют в виде степенных эмпирических формул типа $T = \frac{C_1}{v^{m_1}}$



где C_1 – постоянная величина, зависящая от **обрабатываемого** и **инструментального** материалов;

m - показатель относительной стойкости, зависящий от вида обработки, инструментального и обрабатываемого материалов (*m*=0,1…0,75). Чем **больше *m***, тем **быстрее уменьшается стойкость** инструмента при **увеличении скорости** резания.

При проведении стойкостных испытаний и построении зависимостей ***T - v*** из-за неоднородности инструментального и обрабатываемого материалов наблюдается **значительный разброс экспериментальных данных,** поэтому для определения средних, более вероятных, значений стойкости, необходимо **многократно повторять** опыты. Логарифмирование приводит **степенное уравнение ($v = a \cdot T^m$)** к **линейному** (***lgv = lga + m·lgT = const + m·lgT***). Для построения **линейного графика** (**прямой**) достаточно знать положение **только двух точек**, что сокращает требуемое количество экспериментов. Поэтому часто стойкостные графики строят в **двойных логарифмических координатах.**

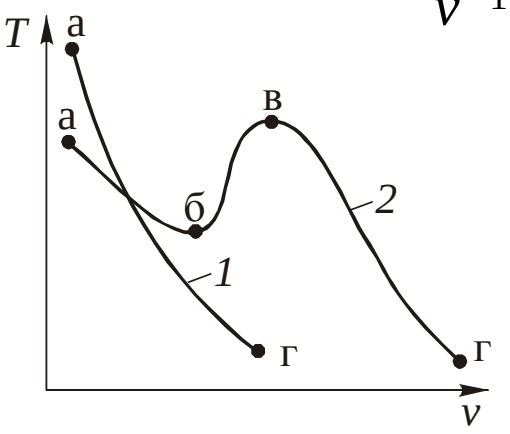
Падение стойкости на **участке а-б** объясняется влиянием **адгезионного износа**, который при изменении скорости резания в пределах $v_а ... v_б$ **возрастает. Увеличение стойкости на участке б-в** связывают с уменьшением силы адгезионного (межмолекулярного) взаимодействия, вызванное ростом температуры резания. При **дальнейшем увеличении скорости**, когда температура резания составляет **более 800…900°С**, в пределах $v_б ... v_г$ превалирует **диффузионный износ**. Применение твердосплавных инструментов на скоростях **менее $v_б$** нецелесообразно.

Влияние подачи s и глубины резания t на стойкость инструментов T определяют по той же методике, что и влияние скорости резания. На основании трех частных зависимостей находят общую зависимость

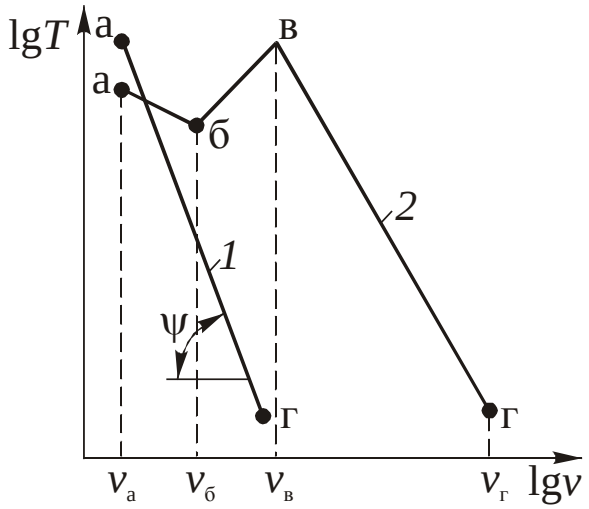
$$T = \frac{C_4}{v^{m_1} s^{p} t^{q}}$$

При этом из-за влияния режима резания на температуру показатели степени в формуле располагаются в порядке убывания, т.е. $m_1 > p > q$.

$$T = \frac{C_1}{v^{m_1}}$$



а)



б)

Зависимость стойкости инструмента Т от скорости резания v : *а* – в обычных координатах; *б* – **в двойных логарифмических координатах**

СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ *(продолжение)*

Наименьшее влияние на стойкость инструментов оказывает глубина резания ***t***, а **наибольшее влияние – скорость резания *v***. Увеличение подачи ***s***, а, следовательно, и толщины срезаемого слоя ***a***, снижает стойкость инструмента существенно больше, чем увеличение глубины резания *t* или соответственно ширины среза *b*. Поэтому для того, чтобы **стойкость инструмента была выше**, при постоянной площади сечения срезаемого слоя следует **увеличивать ширину среза за счет уменьшения толщины**, т.е. работать с **большим отношением** *b/a* (***t/s***). Это правило носит универсальный характер и справедливо для всех видов режущих инструментов и способов обработки различных материалов.

Расчет скорости резания выполняют формуле $$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} s^{y_v}},$$

где $m=1/m_1$, $x_v=q/m_1$, $y_v=p/m_1$, $C_v=C_4^{1/m1}$ при $x_v < y_v <1$.

Для **достижения более высокой скорости** резания, а следовательно и **производительности** необходимо работать с **максимальным увеличением отношением** *b/a* (**увеличением глубины** резания ***t*** или **уменьшением** главного угла в плане **φ)**. Показатели степени *m*, x_v, и y_v не являются постоянными, а зависят от **типа инструмента**, свойств обрабатываемого и инструментальных материалов, а также от подачи и глубины резания.

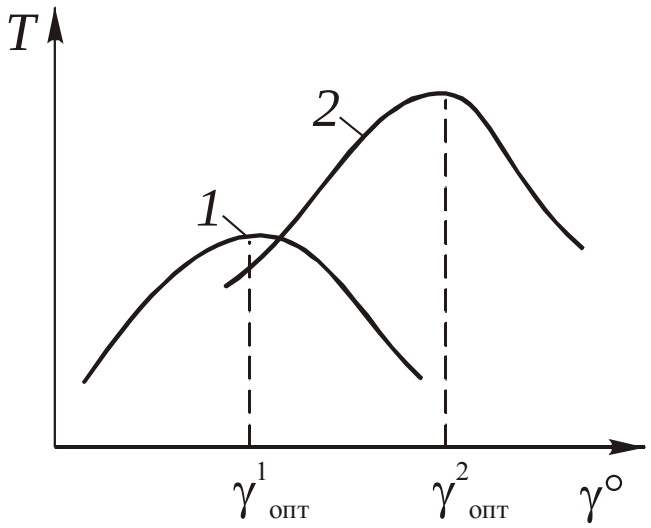
Обрабатываемые материалы	Инструмент. материалы	Глубина *t*, мм	Подача *s*, мм/об	C_v	*m*	x_v	y_v
Конструкцион. сталь, $\sigma_в$=735 МПа	Т15К6	1…5	0,3…0,7	350	0,2	0,15	0,35
	Р6М5	--	--	**22,7**	0,3	--	0,5
Серый чугун, НВ 186	ВК6	1…5	0,4	317	0,2	0,15	0,20

Наибольшее влияние на допустимую скорость резания оказывают свойства **обрабатываемого материала**. Например, при резании **закаленной стали** или высокопрочного чугуна скорость резания **в 200 раз меньше**, чем при **обработке алюминия**. Далее по убывающей следует **влияние инструментального материала**, при изменении которого скорость резания может изменяться **до 75 раз**, а при изменении геометрии инструмента, глубины и ширины среза – **до 3…5** раз.

Влияние на стойкость геометрических параметров режущих инструментов

С **увеличением переднего угла γ снижаются степень деформации, силы резания** и **трения, уменьшается тепловыделение**, что способствует **повышению стойкости** инструмента.

Однако **увеличение угла γ** приводит к **уменьшению угла заострения** и поэтому **ухудшает отвод теплоты** от режущей кромки и **снижает прочность** режущего клина. Влияние переднего угла на стойкость ***T*** представляет собой горбообразную кривую, **максимуму** которой соответствует **оптимальное значение переднего угла**. Для **быстрорежущих** резцов при точении **стали** 45 $\gamma_{опт}$=18°, а **чугуна** - $\gamma_{опт}$=0…5°. Для **твёрдых сплавов** $\gamma_{опт}$=**+10…-10°**, для минералокерамики, эльбора и алмазы $\gamma_{опт}$=0…-15°.



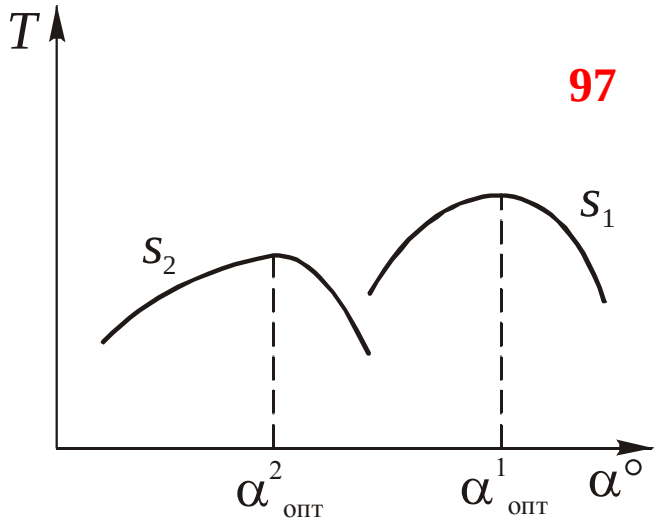
1 - твердый обрабатываемый материал;
2 – мягкий материал

СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ *(продолжение)*

При **отрицательных** углах γ резко **возрастают силы резания, температура** и, как следствие, **количество выделяемой теплоты**. В результате **стойкость инструмента падает, увеличивается вероятность** возникновения **вибраций** и даже разрушения режущих пластин. Для **твердых сплавов** используется форма пластины с **упрочняющей фаской** на передней поверхности под углом $\gamma_ф$=0…-5° и положительным передним углом γ за этой фаской. Длина (**ширина) фаски** зависит от **толщины среза** ***a*** и в среднем $f = (1…2)\cdot a$, т.е. ***длина (ширина) фаски не должна превышать длину контакта стружки с инструментом***. В противном случае деформации и силы резания будут определяться величиной переднего угла на фаске $\gamma_ф$.

Задний угол α обеспечивает зазор между заготовкой и задней поверхностью режущего клина и, тем самым, способствует снижению интенсивности износа инструмента и повышению его стойкости. Угол α также как и угол γ влияет на **прочность** режущего клина через изменение угла заострения β, а также на условия отвода теплоты от вершины инструмента и поэтому зависимость *T*-*v* также принимает экстремальный характер.

На оптимальное значение угла α оказывают влияние **толщина среза** *a*, а, следовательно, и **подача** *s* и **свойства обрабатываемого и инструментального материалов**. При этом, чем **меньше подача** *s* , тем **больше оптимальный угол** $\alpha_{опт}$. При снижении прочности обрабатываемого материала и повышении прочности и износостойкости инструментального материала угол $\alpha_{опт}$ увеличивают.



СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ *(продолжение)*

У проходных резцов $\alpha_{опт}$=6…8°, у отрезных и фасонных резцов, работающих с меньшей подачей, $\alpha_{опт}$=10…12°, а у дисковых фрез, работающих с подачей 0,01 мм/зуб - $\alpha_{опт}$=30°.

Главный угол в плане φ определяет отношение *b/a* ширины срезаемого слоя к его толщине, которое с увеличением угла непрерывно уменьшается, достигая минимума при φ=90°. **Уменьшение угла φ** способствует **улучшению отвода теплоты** от режущей кромки, а, следовательно, и снижению температуры резания и поэтому **стойкость** инструмента монотонно **увеличивается**. Однако при этом меняется соотношение осевой и радиальной составляющих силы резания P_x/P_y. Причем **увеличение радиальной составляющей P_y** при малых значениях угла φ сопровождается увеличением вибраций. Поэтому оптимальное значение угла φ в основном зависит от жесткости технологической системы, а именно: чем выше жесткость системы, тем меньше угол φ. На практике чаще всего угол φ=45…60°, а на операциях, связанных с подрезкой торцев ступенчатых деталей, угол φ=90°.

Угол наклона главной режущей кромки λ, как и передний угол, оказывает влияние на стойкость инструментов через изменения условий стружкообразования и направления схода стружки. При несвободном резании с ударными нагрузками угол **λ** способствует повышению прочности вершины резца. При изменении угла **λ** **температура** увеличивается, а главная составляющая силы резания P_z остаётся неизменной. В тоже время существенное влияние на износ оказывает **возрастающая сила трения вдоль режущей кромки.**

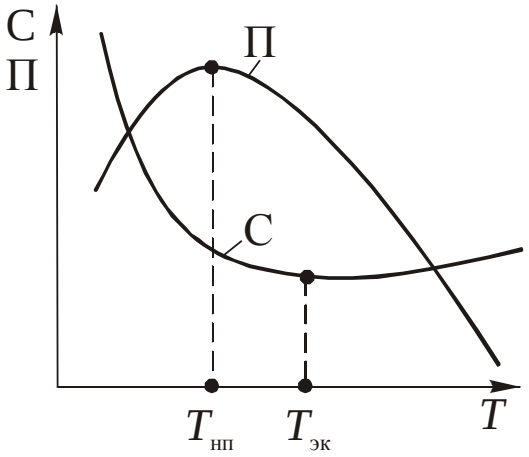
СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ *(продолжение)*

Положительное значение угла **λ** используют для повышения прочности резца при действии **ударных нагрузок**, при **низкой прочности** инструментальных материалов и **повышенной твердости** обрабатываемых материалов. Например, рекомендуется: при работе твердосплавными резцами $\lambda=0\ldots5°$; при точении и строгании с ударами $\lambda=10\ldots15°$; при точении с ударами закаленных сталей $\lambda=30\ldots45°$.

При кинематическом косоугольном резании **круглыми самовращающимися резцами** благодаря значительному **снижению сил трения** и постоянному **обновлению режущей кромки температура резания и интенсивность износа с ростом кинематического угла $\lambda_к$ снижаются** до такого уровня, что позволяет вести обработку быстрорежущими резцами на скоростях, достигаемых при работе проходными твердосплавными резцами. Однако при этом **увеличивается радиальная составляющая силы резания P_y**, что приводит к уменьшению точности и **вероятности появления вибрации**.

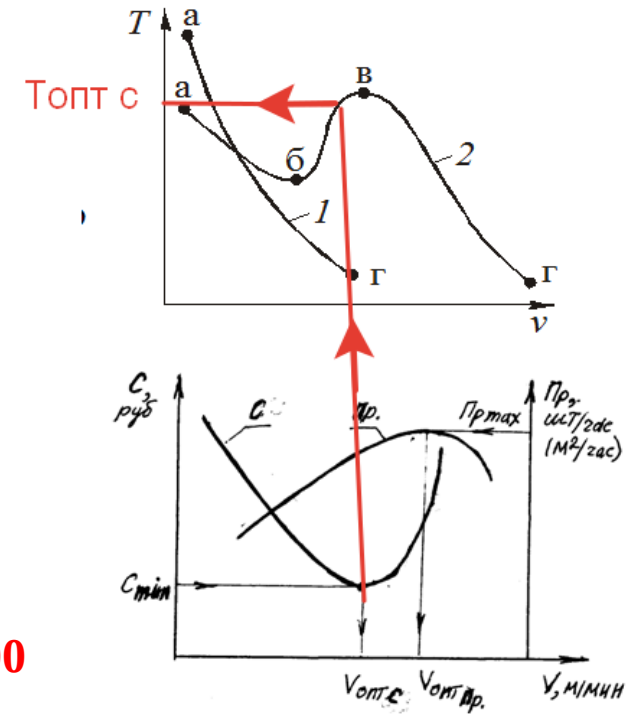
Расчёт оптимальной скорости резания

Скорость резания зависит от принятой стойкости инструмента. При оптимизации режимов резания за основной критерий чаще всего принимают критерии **минимальной себестоимости** и **максимальной производительности**. Используют также и другие критерии, связанные, например, с технологическими требованиями к детали (шероховатость обработанной поверхности, точность размеров и др.). При использовании первого критерия за оптимальную скорость резания принимают скорость, обеспечивающую минимальную себестоимость операции. При этом расчет скорости ведут по уравнению с использованием нормативов по режимам резания.



$$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} s^{y_v}}$$

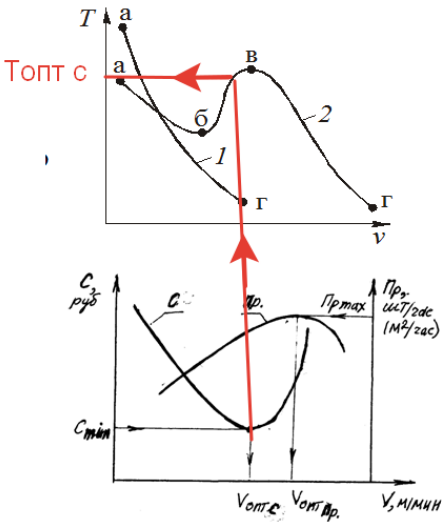
Стойкость T используется чаще всего оптимальной по минимальной себестоимости (C_{min}): Т опт с .



5. Обрабатываемость

Обрабатываемость материалов резанием - это способность материалов поддаваться обработке резанием или иначе - комплекс свойств материалов, обеспечивающих при их обработке резанием достижение следующих технологических показателей: 1) скорость резания при заданной стойкости (например, скорость резания при стойкости =60 мин); 2) качество обработанной поверхности (шероховатость, наклеп, остаточные напряжения); 3) сила резания и потребляемая мощность; 4) форма стружки, ее транспортабельность и т.д.

$$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} s^{y_v}}$$



Обрабатываемость зависит от химического состава обрабатываемого материала, его механических и теплофизических свойств, вида обработки резанием, конструкции инструмента и инструментального материала, режима резания, применяемых СОТС и других факторов.

Коэффициент обрабатываемости, под которым понимают отношение , где $v_{60}^{А}$ - скорость резания при v=60 мин, характеризующая обрабатываемость исследуемого материала А; $v_{60}^{Б}$ – скорость резания при =60 мин, характеризующая обрабатываемость эталонного материала Б.

$$K_{об} = \frac{v_{60}^{А}}{v_{60}^{Б}}$$

За эталон обычно принимают сталь 45 (σв=650 МПа, *НВ* 180) и поэтому для нее коэффициент обрабатываемости $К_{об}$=1. При получистовом точении стали 45 твердосплавным резцом *v*=135 м/мин, а резцом из быстрорежущей стали Р18 - *v*=75 м/мин. Чем выше значение коэффициента обрабатываемости , тем лучше обрабатываемость материала.

Обрабатываемость *(продолжение)*

Обрабатываемость всех углеродистых **сталей** зависит в основном **от содержания в них углерода**, с увеличением которого твердость сталей повышается, а скорость резания снижается.

У **среднеуглеродистых** и низколегированных сталей (С=0,35…0,55%) коэффициент обрабатываемости колеблется в пределах $К_{об}$=0,7…1,0. Введение в эти стали в небольшом количестве (1…2%) легирующих элементов обеспечивает повышение прочности и других механических свойств (предела текучести, относительного удлинения) при небольшом снижении коэффициента обрабатываемости. Обрабатываемость этих сталей может быть **улучшена за счет изменения структуры** методами дополнительной термообработки (отжиг, нормализация, закалка с последующим отпуском).

Наилучшей обрабатываемостью обладают стали со структурой **перлит** (феррит+цементит). У пластинчатого перлита цементит, обладающий повышенной твердостью, имеет форму пластин и феррит в виде сетки. Путем термообработки пластинчатый перлит может быть превращен в зернистый перлит с цементитом в виде мелких глобулярных (округлых) зерен. При этом обрабатываемость такой стали существенно улучшается. Однако с увеличением размеров глобулей шероховатость обработанной поверхности ухудшается. Для чистовой операции лучшую обрабатываемость по этому критерию обеспечивает пластинчатый перлит.

На обрабатываемость сталей оказывают влияние также некоторые металлургические факторы, в частности **способы литья** и **прокатки**. Например, **конверторные** низкоуглеродистые стали **обрабатываются лучше**, чем выплавленные в мартеновских и электрических печах, **так как содержат в больших количествах серу** и **фосфор**. **Холоднокатаные** стали, содержащие **углерод до 0,3%, обрабатываются лучше**, чем горячекатаные, а **при содержании углерода С>0,4% - хуже**.

Самой худшей обрабатываемостью обладают **высоколегированные коррозионностойкие** и **жаростойкие стали**, так как содержат в больших количествах легирующие элементы: хром (15…18%), никель (8…11%), марганец (1…2%). Иногда в них входят в небольших количествах титан, вольфрам, молибден, ниобий при некотором снижении содержания хрома и никеля.

Обрабатываемость *(продолжение)*

Чугуны относятся к материалам с относительно низкой прочностью, **не испытывающим пластических деформаций в процессе образования стружки**. Поэтому силы резания и затрачиваемая при этом мощность ниже, чем при обработке сталей, а из-за малой пластичности чугунов образуется элементная, реже **суставчатая стружка**, снижающая площадь ее контакта с передней поверхностью инструмента. В результате **контактные напряжения возрастают и концентрируются около режущей кромки**. Поэтому при обработке чугунов следует применять более прочные **однокарбидные сплавы группы ВК**. Температура резания при обработке чугунов ниже, чем при обработке сталей той же твердости, **обрабатываемость их также ниже, чем у стали**. Это связано главным образом с высоким **абразивным** действием весьма **твердого цементита**, что интенсифицирует износ и особенно инструментов из быстрорежущих сталей.

Различают белые, серые, ковкие и высокопрочные чугуны. Три последних чугуна имеют следующие основы, оказывающие определяющее влияние на их обрабатываемость: ферритная; ферритно-перлитная и перлитная. Из всей номенклатуры чугунов **наилучшую обрабатываемость** по критерию имеют **ферритные чугуны**, содержащие феррит и графит. Обрабатываемость перлитных ковких и сверхпрочных чугунов, содержащих перлит и графит, ухудшается. **Самую низкую обрабатываемость** имеют **белые чугуны**, содержащие перлит, цементит и карбиды легирующих элементов (хром, ванадий, молибден). Например, прокатные валки из отбеленного чугуна обрабатывают **твердосплавными** резцами со скоростью резания v**=3…10 м/мин**. Однако наилучшие результаты при чистовой обработке таких валков дают инструменты, оснащенные эльбором.

Обрабатываемость *(продолжение)*

Титановые сплавы обладают высокими физико-механическими свойствами и широко применяются в авиа- и ракетостроении. Их условно можно разделить на следующие основные группы: 1) повышенной пластичности ($\sigma_в$<600 Н/мм^2); 2) средней прочности ($\sigma_в$=600 Н/мм^2); 3) высокой прочности ($\sigma_в$=1000…1500 Н/мм^2); 4) жаропрочные ($\sigma_в$ =450…1250 Н/мм^2). При этом, **чем выше прочность титанового сплава, тем хуже его обрабатываемость**.

В целом титановые сплавы при довольно высокой прочности обладают **пониженной пластичностью**, обусловленной наличием в их составе алюминия. **Теплопроводность титановых сплавов в 17 раз меньше, чем алюминия**, а при резании они **склонны к упрочнению**. Срезаемая стружка имеет **малую усадку**, а ширина площадки контакта в 1,5…2,0 раза меньше, чем при резании углеродистых сталей. По этой причине нормальные **контактные напряжения высоки**, хотя силы резания примерно такие же, как и при резании стали. Из-за **плохой теплопроводности** возникает **высокая температура** в области вершины режущего клина (в 2 раза большая, чем у стали 40), что приводит к **пластической деформации вершины** и опусканию режущей кромки.

В зависимости от марки сплава коэффициент обрабатываемости титановых сплавов колеблется в пределах от 0,8 (сплав ОТ4-1) до 0,45 (сплавы ВТ14, ВТ1 и др.). Поэтому для резания титановых сплавов используют инструментальные материалы высокой прочности: быстрорежущие стали повышенной теплостойкости и однокарбидные **твердые сплавы группы ВК**. Сплавы, содержащие **карбиды титана**, для **обработки титановых сплавов непригодны** из-за химического сродства с обрабатываемым материалом.

Цветные металлы и сплавы на основе меди и алюминия обладают **наилучшей обрабатываемостью** по сравнению со сталями. Иногда имеются проблемы с прилипанием стружки к заготовке и инструменту (алюминиевая стружка) и стружкозавиванием (медная).

6. Выбор СОЖ при обработке резанием .

Смазочно-охлаждающие технологические средства

Знание природы износа необходимо для правильного выбора геометрии режущего инструмента, его материала, режимов резания и смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). **Цель СОТС – уменьшение интенсивности износа** режущего инструмента, **улучшение качества обработанной поверхности** (уменьшение шероховатости и задиров, величины и глубины остаточных напряжений), **увеличение производительности обработки**, повышение эксплуатационных характеристик детали. Улучшение обрабатываемости материалов при использовании в процессе резания СОТС является результатом их физико-химических воздействий на обрабатываемый материал, основными из которых являются: ***смазывающее, охлаждающее, режущее, моющее, защитное и упрочняющее***.

СОТС должны не вызывать коррозию детали, приспособления и оборудования; не оказывать вредного физиологического влияния на рабочего (раздражение кожи и слизистых оболочек, запах); быть **устойчивыми при эксплуатации и хранении**; **не воспламеняться** при температурах, сопровождающих процесс резания; **не иметь неприятного запаха**.

СОТС делятся на твердые, жидкие, пластичные и газообразные.

К ***твердым*** СОТС относятся: **неорганические** материалы со сложной структурой (тальк, слюда, графит, бура, нитрид бора, дисульфиды молибдена, вольфрама и титана, и др.); твердые **органические соединения** (мыло, воск, твердые жиры); **полимерные пленки** и **ткани** (нейлон, полиамид, полиэтилен и др.); **металлические** пленочные покрытия (медь, латунь, свинец, олово, барий, цинк).

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

Твердые СОТС применяются редко, но обеспечивают **низкий коэффициент трения** (графит - f=0,04, дисульфид молибдена - f =0,03) и выдерживают **высокие температуры** и **давления.**

К ***смазочно-охлаждающим жидкостям*** (***СОЖ***) относятся: водные растворы минеральных электролитов, эмульсии; минеральные, животные и растительные масла; минеральные масла с добавками фосфора, серы и хлора (сульфофрезолы); керосин и растворы поверхностно-активных веществ в керосине; масла и эмульсии с добавками твердых смазывающих веществ; расплавы металла и др. Наиболее часто используются **водные** и **масляные СОЖ**.

Наряду с охлаждающим и смазывающим свойствами СОЖ должна обладать и ***моющим действием,*** которое заключается в удалении из зоны резания продуктов износа инструмента и заготовки в виде твердых частиц карбидов, мелкой стружки и т.п., усиливающих абразивный износ инструмента и повышающих шероховатость обработанной поверхности. Моющее действие улучшается за счет введения в СОЖ ***эмульгаторов***, уменьшающих поверхностное натяжение жидкости. Молекулы СОЖ при этом активно обволакивают удаляемые частицы, препятствуют их слипанию и облегчают их удаление из зоны резания. Это особенно важно при резании хрупких материалов и абразивной обработке.

Наибольшее распространение получили **водосодержащие эмульсии**, которые состоят из **воды** с мельчайшими **капельками масла**. Применение **воды** в качестве основного ингредиента **уменьшает стоимость СОЖ** и **повышает её способность отводить тепло**, т.к. вода по сравнению с маслом имеет большую теплопроводность, а теплоёмкость её тоже достаточно высока. Капельки масла оказывают **антифрикционное** действие, увеличивают **проникающую способность, уменьшают коррозию** приспособления и станка. Для увеличения проникающей способности в СОЖ добавляются вещества, **уменьшающие коэффициент поверхностного натяжения** жидкости и **увеличивающие смачиваемость** поверхностей стружки, заготовки в зоне контакта и инструмента. Это приводит и к расклинивающему эффекту, облегчающему стружкообразование. Для уменьшения коррозии применяются также специальные присадки (**ингибиторы ржавчины**). В качестве ингибиторов коррозии используют также кальцинированную соду, тринатрий фосфат и др., содержание которых составляет 0,5…5,0%. Для **уменьшения схватываемости** применяются присадки, способствующие адсорбированию на ювенильных поверхностях образующихся химических соединений и **появлению защитной плёнки**. Эта плёнка также защищает поверхности инструмента от контакта с кислородом воздуха и **препятствует окислению.**

Масляные эмульсии изготавливают на основе концентрата, называемого эмульсолом, который состоит из **масляной основы**, эмульгатора, а также большого числа противоизносных, противозадирных и других присадок. Масляная основа ***эмульсола*** представляет собой смесь различных минеральных масел, например, индустриального, объемом до 70…85%. Эмульгаторы предотвращают слипание капель масла и играют роль смазочных веществ и ингибиторов (замедлителей) коррозии.

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

Специальные вещества вводят в СОТС и для увеличения **пластифицирующего свойства**, т.е. облегчения пластического деформирования металла. Это приводит к локализации пластической деформации в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала, уменьшает трение между стружкой и инструментом, **улучшает качество обработанной поверхности**.

Действие даже **одной капли СОЖ** может сказываться в течении нескольких минут при невысокой скорости резания. Для повышения эффективности на высоких скоростях резания и улучшения завивания или дробления стружки применяется **подача СОЖ в зону резания под небольшим давлением**. Образование паровой подушки уменьшает охлаждающий эффект СОЖ, поэтому желательна её подача струёй с достаточно большим напором.

В некоторых случаях в целях **экономии СОЖ** она подаётся в зону резания **в виде тумана**. При испарении СОЖ температура резания существенно снижается, хотя **охлаждающий эффект** при этом **существенно меньше**, чем при поливе. Достоинством воздушно-капельной смеси является и меньшее загрязнение станка и приспособления.

В зависимости от характера операции эмульсии изготавливают с разной концентрацией эмульсола – чем больше нагрузки, тем выше должна быть концентрация (от 0,05 до 20,0%). Наиболее распространенными являются ***эмульсолы*** марок ЭТ-2, НГЛ-205, Аквол, Укринол и др.

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

В современных СОЖ та или иная присадка начинает эффективно работать при достижении заранее **определённого температурного диапазона**.

В состав СОЖ часто вводятся антипенные и антитуманные присадки, а для **стабилизации СОЖ – антиоксиданты**. Для предотвращения размножения бактерий в СОЖ производится добавка **бактерицидных присадок** (до 0,05…0,15%).

Масляные эмульсии изготавливают на основе концентрата, называемого эмульсолом, который состоит из масляной основы, эмульгатора, а также большого числа противоизносных, противозадирных и других присадок. Масляная основа ***эмульсола*** представляет собой смесь различных минеральных масел, например, индустриального, объемом до 70…85%. Эмульгаторы предотвращают слипание капель масла и играют роль смазочных веществ и ингибиторов (замедлителей) коррозии.

Масляные (углеводородные) **СОЖ** состоят из минерального масла, к которому добавляют специальные присадки различного назначения, улучшающие их свойства. Достоинствами масляных СОЖ являются хорошие смазывающие и **антикоррозионные свойства**, а недостатками – **в 5…8 раз более низкая**, чем у водных СОЖ, **охлаждающая способность**, теплопроводность и теплоемкость, более **высокая стоимость** и повышенная **пожароопасность**. Поэтому масляные СОЖ применяют в основном при резании **с большими контактными давлением и малым тепловыделением**, требующих смазывающего действия СОЖ (резьбонарезание, протягивание, зубонарезание, глубокое сверление).

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

Для уменьшения номенклатуры масел иногда применяют ***многофункциональные*** СОТС, которые представляют собой масла, использующиеся **в гидросистемах**, для смазки оборудования и как СОЖ при резании. Иногда в их состав включается **раствор для очистки заготовок**. В результате их использования детали после лезвийной обработки остаются совершенно чистыми, а гидросистеме не угрожает попадание воды.

В некоторых случаях в качестве СОЖ могут применяться даже ***сжиженные газы***, например, азот, который безвреден, но в связи с низкой температурой существенно уменьшает температуру резания и защищает инструмент от окисления, образуя при своём испарении защитную атмосферу вокруг инструмента.

Некоторые жидкости существенно улучшают качество обработки, как, например, **четырёххлористый углерод CCl_4**. Он предотвращает появление нароста, облегчает стружкообразование, но при нагреве происходит **выделение газа фосгена**, что ограничивает его применение только в научных исследованиях с большой осторожностью. Некоторые СОТС могут быть использованы только **при защиты органов дыхания и глаз с помощью противогаза**, а иногда при работе в ОЗК.

При обработке труднообрабатываемых материалов могут быть использованы ***расплавы лёгкоплавких металлов***, таких, как эвтектика олово-цинк, что позволяет проводить обработку высокопрочных материалов, не поддающихся резанию с другими СОТС. Однако необходимость нагрева металлов ограничивает применение таких СОТС.

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

При обработке труднообрабатываемых материалов, например, при сверлении хромоникелевой стали 18Х2Н4ВА *(HRC 36-40)*, могут быть использованы ***суспензии*** – это взвеси мелкодисперсного порошка (5…15%) в водоэмульсионной, масляной или иной жидкой среде. При попадании частиц порошка в зону резания они могут даже расплавляться после выпаривания жидкой составляющей. Наиболее ярко преимущества суспензионных СОТС проявляется при невысоких скоростях резания (5…10 м/мин).

*К **пластичным (пастам)*** смазочным веществам относятся густые мазеобразные продукты, занимающие по консистенции промежуточное положение между твердыми и жидкими смазочными веществами. Их получают загущением минеральных и синтетических масел. Применяют в основном четыре вида загустителей: мыльные, углеводородные, неорганические и органические.

Пластичные смазки лучше жидких удерживаются на поверхностях при тяжелых режимах резания и трения, но используются в основном при обработке давлением. При резании они применяются весьма ограничено из-за трудностей введения в зону резания, невозможностью сбора, очистки и повторного использования. Поэтому пластичные смазки применяют в основном **на ручных операциях** с низкими скоростями резания путем периодического смазывания инструмента кистью, шприцами и т.п., например, при нарезании резьбы метчиками и плашками, развертывании, полировании и др.

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

К ***газообразным*** СОТС относятся активные (**воздух**, азот, двуокись углерода) и инертные газы (азот, аргон); пары поверхностно-активных веществ, распылённые жидкости. Наиболее дешёвым и доступным газообразным СОТС является воздух. Охлаждение воздушной струёй не требует специального оборудования (на производстве практически всегда имеется компрессор для подачи сжатого воздуха к механизированным приспособлениям), **способствует завиванию** и дроблению сливной **стружки, не загрязняет стружку**, но от этого вида охлаждения часто отказываются из-за **сильного шума**.

При снятии тонких стружек часто **полностью отказываются от применения СОТС**, т.к. даже малое округление режущей кромки, связанное с зернистым строением инструментального материала, приводит к вдавливанию тонкого слоя обрабатываемого материала на поверхности среза под заднюю поверхность. Стружка при этом не образуется, особенно в период постепенного врезания.

При ***черновой и получистовой обработке***, когда необходимо эффективное охлаждающее действие, применяют водные растворы электролитов и поверхностно-активных веществ, масляные эмульсии.

При ***чистовой обработке***, когда требуется получить высокое качество обработанной поверхности, основное значение приобретают смазочные свойства СОТС. В этих случаях применяют чистые и активированные минеральные масла и сульфофрезол. При чистовой обработке с высокими скоростями резания рекомендуется применять эмульсии с 5—10 %-ным раствором эмульсола.

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

Эффективность действия СОЖ в значительной степени зависит ***от способа подвода*** их в зону резания. Наиболее распространенным способом подачи СОЖ является ***полив свободной струей*** (рис. 1, *а*). Этот метод подачи жидкости в зону резания малоэффективен и обладает следующими недостатками: большой расход жидкости (от 10 до 16 л/мин), разбрызгивание жидкости, слабое смазочное действие

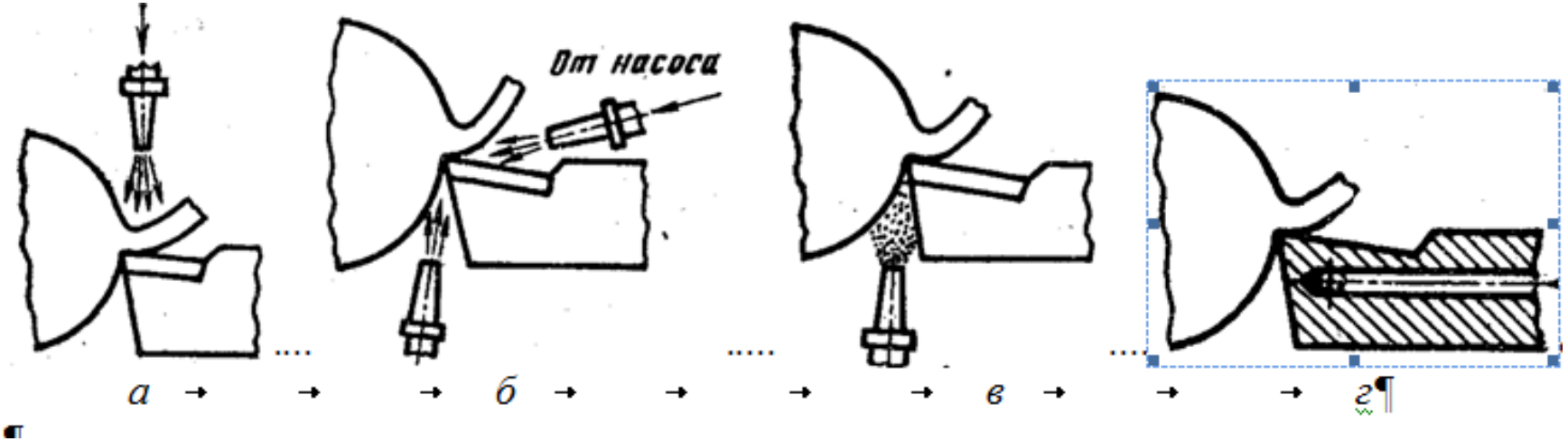


Рис. 1. Способы подвода СОТС в зону резания: *а* - полив свободной струей; *б* - струйное охлаждение; *в* - охлаждение распыленной жидкостью; *г* - внутреннее охлаждение резца.

Более эффективным является ***высоконапорное охлаждение*** (рис. 1, *б*). Жидкость подаётся под давлением 1,5…2,0 МПа со стороны задней и (или) передней поверхности инструмента через отверстие малого диаметра 0,3…0,5 мм с высокой скоростью струи (40…50 м/с). При этом способе расход жидкости меньше, чем при поливе, и составляет примерно 0,5 л/мин. В результате высокого давления частицы жидкости интенсивнее проникают в микротрещины и зазоры, быстрее превращаются в пар и охлаждают нагретые поверхности. Однако высоконапорное струйное охлаждение имеет и недостатки: необходимость **применения насосов; сильное разбрызгивание** жидкости, требующее применения специальных защитных устройств; необходимость тщательной **очистки жидкости; высокий уровень шума.**

Смазочно-охлаждающие технологические средства *(продолжение)*

Наиболее эффективным является подвод СОЖ напорной струей со стороны задней поверхности резца. При этом подача воды по сравнению с резанием без применения СОЖ снижает температуру резания в зоне активного наростообразования (v<60 м/мин) на 400°С, эмульсии – на 200°С, а масляной СОЖ - на 100°С (рис. 2). За **зоной наростообразования** (>60 м/мин) это влияние менее заметно (**снижение температуры находится в пределах 50…100°С**). Если СОЖ подается поливом, то даже такая сильная охлаждающая среда, как вода, снижает температуру очень слабо, примерно на 50…80°С. При **промышленной скорости резания** (более 220 м/мин) **способ подачи** СОЖ практически **не имеет значения**. Поэтому обычный **полив эмульсии сверху является предпочтительным,** и возможна даже обработка **без охлаждения, если это не сказывается на качестве** обработанной поверхности.

При резании сталей 45 **быстрорежущими** резцами (v<60м/мин) несмотря на **небольшое снижение температуры** даже при подаче эмульсии поливом, коэффициент обрабатываемости увеличивается на 20…30% ($К_{об}$=1,2…1,3). При напорном охлаждении этот эффект существенно возрастает и **тем сильнее**, чем **более труднообрабатываемый** материал подвергается обработке резанием.

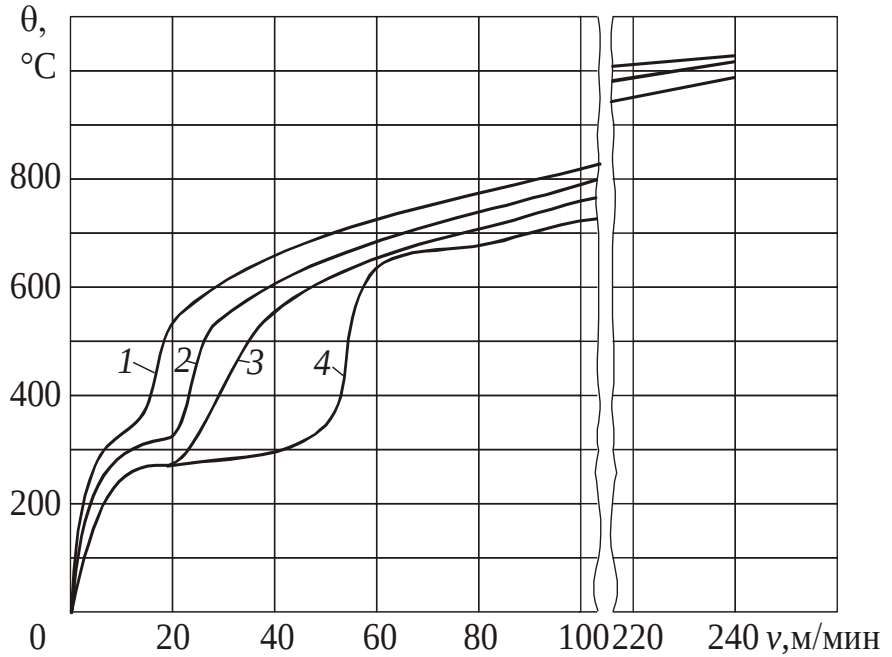


Рис.2. Влияние напорного охлаждения на **температуру резания θ** при точении стали 30 (s=0,43мм/об, t=2 мм, r=0,3 мм, γ=0°, φ=70°): *1* – без СОЖ; *2* – масляная СОЖ типа МР-7; *3* – эмульсия (5% раствор эмульсола ЭТ-2); *4* – вода (Б.М. Орлов)

Расчет режимов резания (оптимальной (рациональной) скорости резания)

Последовательность расчёта **оптимальной** скорости резания при **черновой** обработке:

1) Выбор материала режущей части **с учётом обрабатываемого материала**, его твёрдости, вида обработки, состояния обрабатываемой поверхности.
2) Назначение геометрии режущей части режущего инструмента (φ, γ, r, λ, φ_1, α).
3) Расчёт и назначение глубины резания $\boldsymbol{t} = (d_1 - d_2)/2 \leq 4$ мм (**$t \leq 2$ мм при $d_2 \leq 20$ мм**).
4) Число проходов $i = 2z_{max}/t$ (округляется до ближайшего большего числа);
5) Выбор подачи по таблицам $\boldsymbol{s}_{табл}$ (мм/об) исходя из:
   а) диаметра заготовки и сечения державки резца;
   б) толщины режущей пластины $h_{пл}$ и глубины резания t;
   в) требуемой шероховатости обработанной поверхности R_z (мкм) и радиуса при вершине резца r (мм).
г) назначение **ближайшей меньшей подачи по паспорту станка.**
6) Выбор подачи по паспорту станка $\boldsymbol{s}_{\textbf{пасп}} \leq \boldsymbol{s}_{табл}$ (мм/об).

7) Расчёт скорости резания $\boldsymbol{v}_{\textbf{расч}}$ (м/мин): $$V = \frac{C_V}{(T^m \cdot t^x \cdot s^y)} \cdot K_V$$

где T – это период работы инструмента до затупления (допустимого износа). При многоинструментной обработке период стойкости T следует увеличивать, потому что увеличивается простои станка при замене инструментов. Он зависит прежде всего от одновременно работающих инструментов.

K_V - поправочный коэффициент, для получения действительного значения скорости резания.

$$V = \frac{C_V}{(T^m \cdot t^x \cdot s^y)} \cdot K_V$$

Расчет оптимальной скорости резания *(продолжение)*

$$K_V = K_{Mv} \times K_{Uv} \times K_{Пv} \times K_{\varphi v} \times K_{\varphi 1v} \times K_{Rv} \times K_{Qv} \times K_{ov}$$

где $K_{Mv} = K_Г \cdot (750/\sigma_в)^{nv}$ - коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала (прочности) на скорость резания. Для стали 45 предел прочности на растяжение $\sigma_в = 750$ *МПа*, $K_Г = 1$, $nv = 1$ [2 (Справочник технолога-машиностроителя под ред. Косиловой А.Г., Т.2, 1985г.), стр. **261-262**], поэтому $K_{Mv} = 1 \cdot (750/750)^1 = 1$;

$K_{Пv} = 0,9$ - коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки [2, стр. 263, *табл.5*];

K_{Uv} - коэффициент, учитывающий материал режущей части. Для режущей пластинки из твердого сплава Т15К6 $K_{Uv} = 1$ [2, стр. 263, *табл.6*];

$K_{\varphi v} = 1,0$ - коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (главный угол в плане $\varphi = 45°$) [2, *стр. 271, табл.18*];

$K_{\varphi 1v} = 1$ - коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 10°$) [2, *стр.271, табл.18*];

$K_{Rv} = 1$ - коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (радиус при вершине резца R) [2, *стр.271, табл.18*];

$K_{Qv} = 1,12$ – коэффициент, учитывающий поперечное сечение державки *табл.16* [1];

$K_{Ov} = 1$ - коэффициент, учитывающий вид обработки.

$K_V = 1 \times 1 \times 0,9 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1,12 \times 1 = 1,0.$

$$V = \frac{C_V}{(T^m \cdot t^x \cdot s^y)} \cdot K_V = \frac{350}{(60^{0,2} \cdot 1,95^{0,15} \cdot 0,5^{0,35})} \cdot 1 = 178 \text{ м/мин.}$$

8) Расчёт скорости вращения шпинделя $n_{расч} = 1000 \cdot v_{расч} / \pi \cdot d_2 = \frac{1000 \cdot 178}{\pi \cdot 35} = 1620$ об/мин.

9) Выбор скорости вращения шпинделя **по паспорту станка** $\boldsymbol{n_{пасп}} \le n_{расч}$.(n=1600 об/мин)

Расчет мощности станка

Для расчёта ***мощности*** станка необходимо рассчитать составляющую силы резания P_z. Для наружного продольного точения [2 (Справочник технолога-машиностроителя под ред. Косиловой А.Г., Т.2, 1985г.), стр. **271**]

$$P_{z,y,x} = C_P \times t^x \times s^y \times V^n \times K_P \text{, [Н]}, \quad (1)$$

где C_P – коэффициент, зависящий от обрабатываемого и режущего материала;

K_P – поправочный коэффициент.

$$K_P = K_{Mp} \times K_{\varphi p} \times K_{\gamma p} \times K_{\lambda p} \times K_{Rp}, \quad (2)$$

где K_{Mp} - коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала (прочности) на силу резания. Для стали 45 предел прочности на растяжение $\sigma_в = 750 МПа$, поэтому $K_{Mp} = 1$ [2, стр. **264, табл. 9**];

$K_{\varphi p}$ - коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане φ на силу резания [2, стр. **275, табл. 23**];

$K_{\gamma p}$ - коэффициент, учитывающий влияние главного переднего угла в главной секущей плоскости γ на силу резания;

$K_{\lambda p}$ - коэффициент, учитывающий влияние угла наклона главной режущей кромки λ на силу резания;

K_{Rp} - коэффициент, учитывающий влияние радиуса при вершине резца R на силу резания;

Расчет мощности станка *(продолжение)*

Для чернового точения наружной поверхности Ø31,1h11 наибольшая глубина резания $t = t_{max}$ = 1,95 мм. Коэффициенты и показатели степеней, найденные в табл. 22 [2, стр.273], заносим в табл.1. Рассчитываем составляющие силы резания

- $P_z = 10 \times 300 \times 1{,}95^{\,1} \times 0{,}5^{\,0{,}75} \times 178^{-015} \times 1{,}0 = 3478$ Н;
- $P_y = 10 \times 243 \times 1{,}95^{\,0{,}9} \times 0{,}5^{\,0{,}6} \times 178^{-0{,}3} \times 1{,}0 = 618$ Н;
- $P_x = 10 \times 339 \times 1{,}95^{\,1} \times 0{,}5^{\,0{,}5} \times 178^{-0{,}4} \times 1{,}0 = 588$ Н;

Таблица 1. Расчет составляющих силы резания при черновой обточке диаметра Ø31,1h11

Компонента	C_P	x	y	n	K_{Mp}	$K_{\varphi p}$	$K_{\gamma p}$	$K_{\lambda p}$	K_{Rp}	K_P	$P_{z,y,x}$, Н
P_z	300	1	0,75	-0,15	1	1,0	1,0	1	1	1,0	3478
P_y	243	0,9	0,6	-0,3	1	1,0	1,0	1	1	1,0	618
P_x	339	1	0,5	-0,4	1	1,0	1,0	1	1	1,0	588

Мощность резания рассчитывается по формуле: $N = \dfrac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}$ [кВт]

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания (совпадающая по направлению с вектором скорости резания), Н; V – скорость резания, м/мин.

В нашем примере при черновой обточке Ø31,1h11: $N_д = \dfrac{3478 \cdot 164{,}8}{1020 \cdot 60} = 9{,}3$ кВт

Рассчитываем требуемую мощность **станка** $N_{ст} = N_д \cdot K$, кВт, (3)

где K – коэффициент, учитывающий к.п.д. коробки скоростей, потери на коробку подач, увеличение силы резания при износе инструмента. Обычно К = 1,2…1,5.

В примере: $N_{ст} = N_д \cdot K = 9{,}3 \times 1{,}3 = 12{,}09$ кВт. По этой мощности выбираем станок.

Расчет мощности станка *(продолжение)*

Если предлагаемое оборудование **менее мощное** чем рассчитанное, то приходится **уменьшать частоту вращения** шпинделя, что уменьшит скорость резания, а значит и производительность. Если это не помогает, то **уменьшают подачу**. В исключительных случаях необходимо уменьшать глубину резания, т.к. это вызовет необходимость выполнять обработку **за несколько проходов**, что ещё больше уменьшит производительность.

Необоснованно увеличенный запас мощности принятого оборудования приведёт к **увеличению стоимости оборудования** и затрат электроэнергии, требуемой площади для размещения станка, хотя и увеличит технологические возможности.

При получистовом (по 10…8 квалитету) и чистовом (по 7…6 квалитету) точении припуск на обработку небольшой (2z = 0,6…0,1 мм), поэтому он удаляется за один рабочий ход (проход) с небольшой глубиной резания (t = 0,3…0,05 мм). При выборе подачи учитывают требуемую шероховатость поверхности (Ra =3,2…0,63 мкм) и радиус при вершине резца (обычно r = 0,5-0,8 мм).

Несмотря на большую скорость резания (V=350…550 м/мин), мощность станка требуется небольшая из-за сравнительно **малых сил резания**, поэтому **мощность** резания, как правило, **не рассчитывается**.

При **небольшом диаметре** заготовки (менее 20 мм) проблемой становится обеспечить требуемую высокую скорость резания, т.к. требуется частота вращения шпинделя более 3000 об/мин. В этом случае приходится ограничиваться наибольшей частотой вращения шпинделя станка, **скорость всё равно остаётся небольшой**, что порой вызывает **ухудшение шероховатости** поверхности из-за появления нароста. Современные станки позволяют вести обработку с ***n*** до **5 000** об/мин.

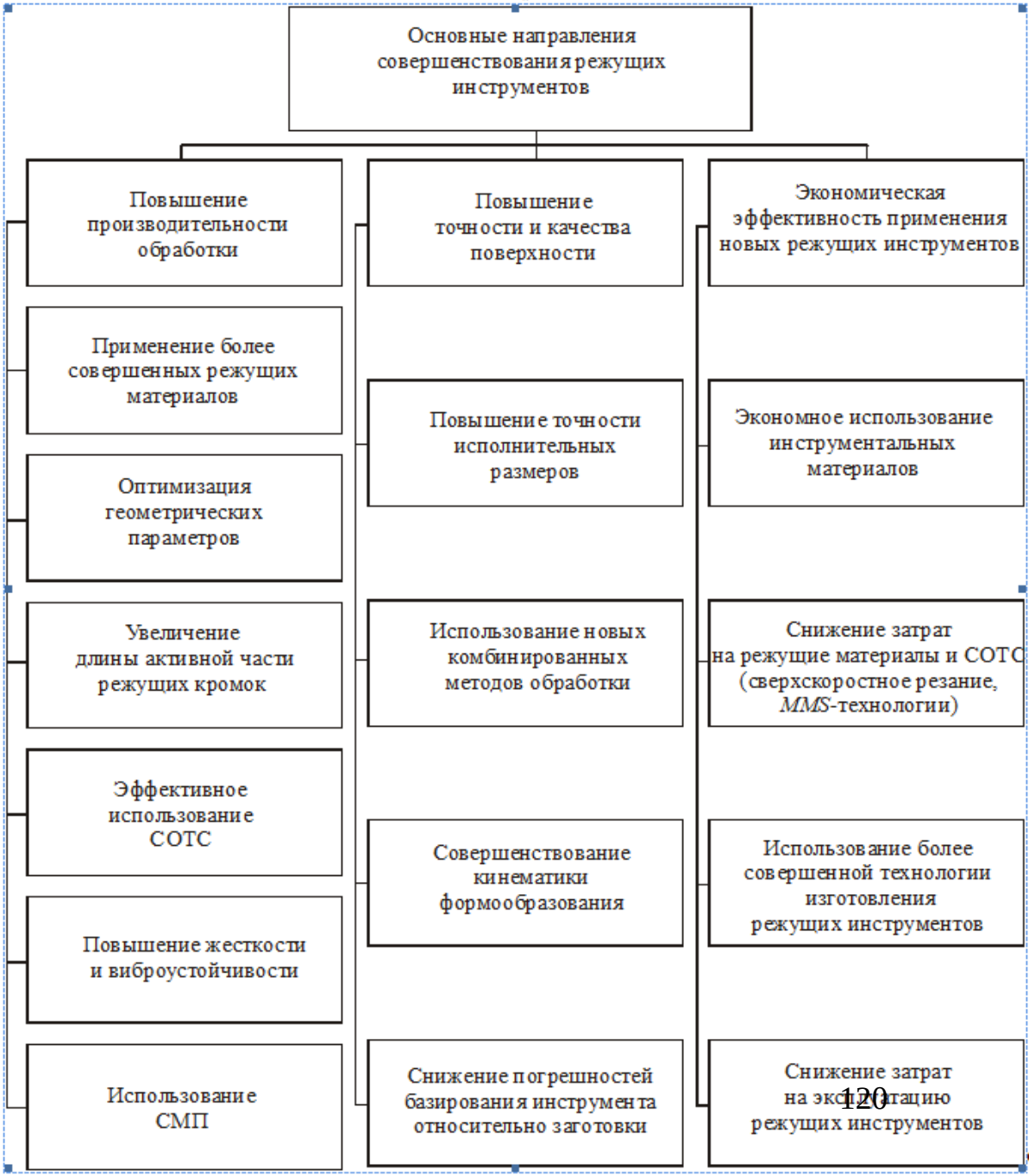
Совершенствование инструментов и способов обработки

Вставки и **ножи** из конструкционных сталей с инструментальными материалами.

Внедрение **сверхскоростного резания** (v>800 м/мин) без СОТС. При сверхвысоких скоростях интенсивность износа снижается, но это возможно лишь для новых видов инструментальных материалов и при использовании более совершенных станков (n>5000 об/мин).

***MMS*-технология** (Minimalmengenschmierung) - охлаждение зоны резания **небольшим количеством СОЖ**, подаваемой под давлением до 0,6 МПа с помощью потока воздуха. Расход СОЖ (аэрозоль), обычно не превышает 80 мл/ч. Исключаются затраты на СОЖ и **очистку стружки**.

Горячее **пластическое деформирование** (прокатка, прессование) для изготовления сложно-профильных и концевых инструментов (сверл, фрез и т.п.).



7. Исследование качества поверхностного слоя, обработанного резанием

Измерение шероховатости обработанных поверхностей, микротвердости и остаточных напряжений.

8. Исследование качества износостойких покрытий режущих инструментов

Контроль толщины, твердости, модуля упругости и адгезионной прочности, связи покрытия с подложкой.

Основные виды обработки

Токарная обработка. Резцы

Резцы являются одними из самых распространенных режущих инструментов. Они применяются при работе на токарных, расточных, строгальных, долбежных и других типах станков при обработке наружных и внутренних поверхностей самых разнообразных форм. Резцы можно классифицировать, например, по следующим основным признакам:

1) тип станка – токарные, расточные, строгальные и др.;
2) вид операции – проходные, подрезные, отрезные, фасонные, резьбонарезные и др.;
3) направление подачи – радиальные, тангенциальные;
4) конструкция – цельные, сборные: сварные, с напайкой или механическим закреплением режущих пластин;
5) материал режущей части – быстрорежущие, твердосплавные, с пластинами из керамики или сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор и др.).

60…70% инструментальных материалов приходится на **быстрорежущие стали**, **20…30%** – на **твердые сплавы**, 5…10% – на остальные материалы. Высокий процент применяемости быстрорежущих сталей объясняется главным образом их прочностными и технологическими свойствами, обеспечивающими высокую надежность и универсальность инструментов. Вторыми по применяемости являются твердые сплавы, на долю которых благодаря их высоким режущим свойствам приходится более половины объема снимаемой стружки. В последнее время с появлением **супермелкозернистых твёрдых сплавов** увеличивается ассортимент свёрл и фрез малого диаметра за счёт HSS.

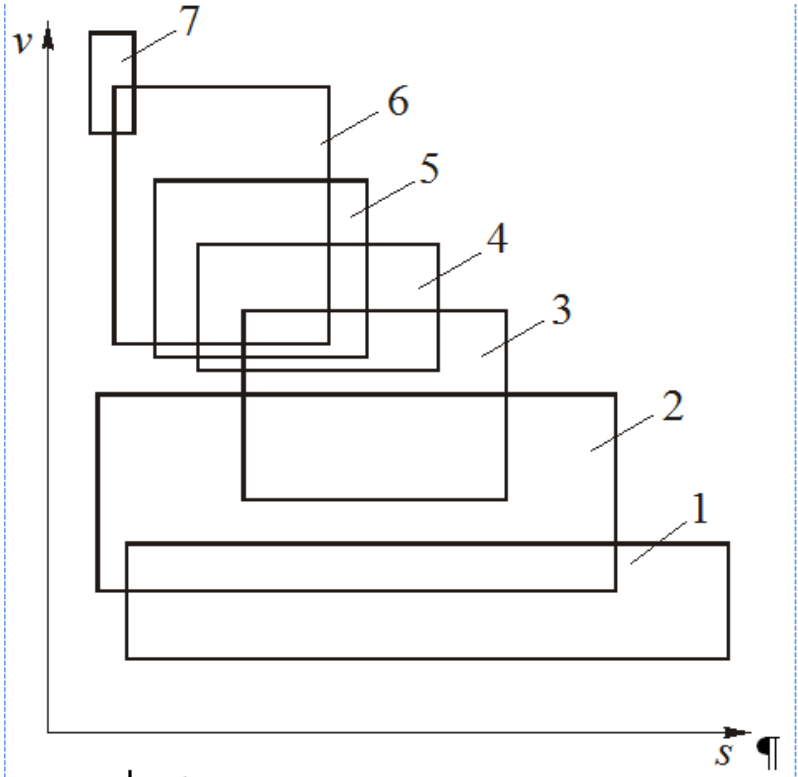


Рис. 1. Области применения режущих материалов по скорости резания *v* и подаче *s*: *1* – быстрорежущие стали; *2* – твердые сплавы; *3* – твердые сплавы с покрытиями; *4* – нитридная керамика; *5* – черная керамика (керметы); *6* – оксидная (белая) керамика; *7* – кубический нитрид бора

Рис. 1. Типы резцов:
а – подрезной (проходной отогнутый правый);

б – подрезной (проходной упорный правый);

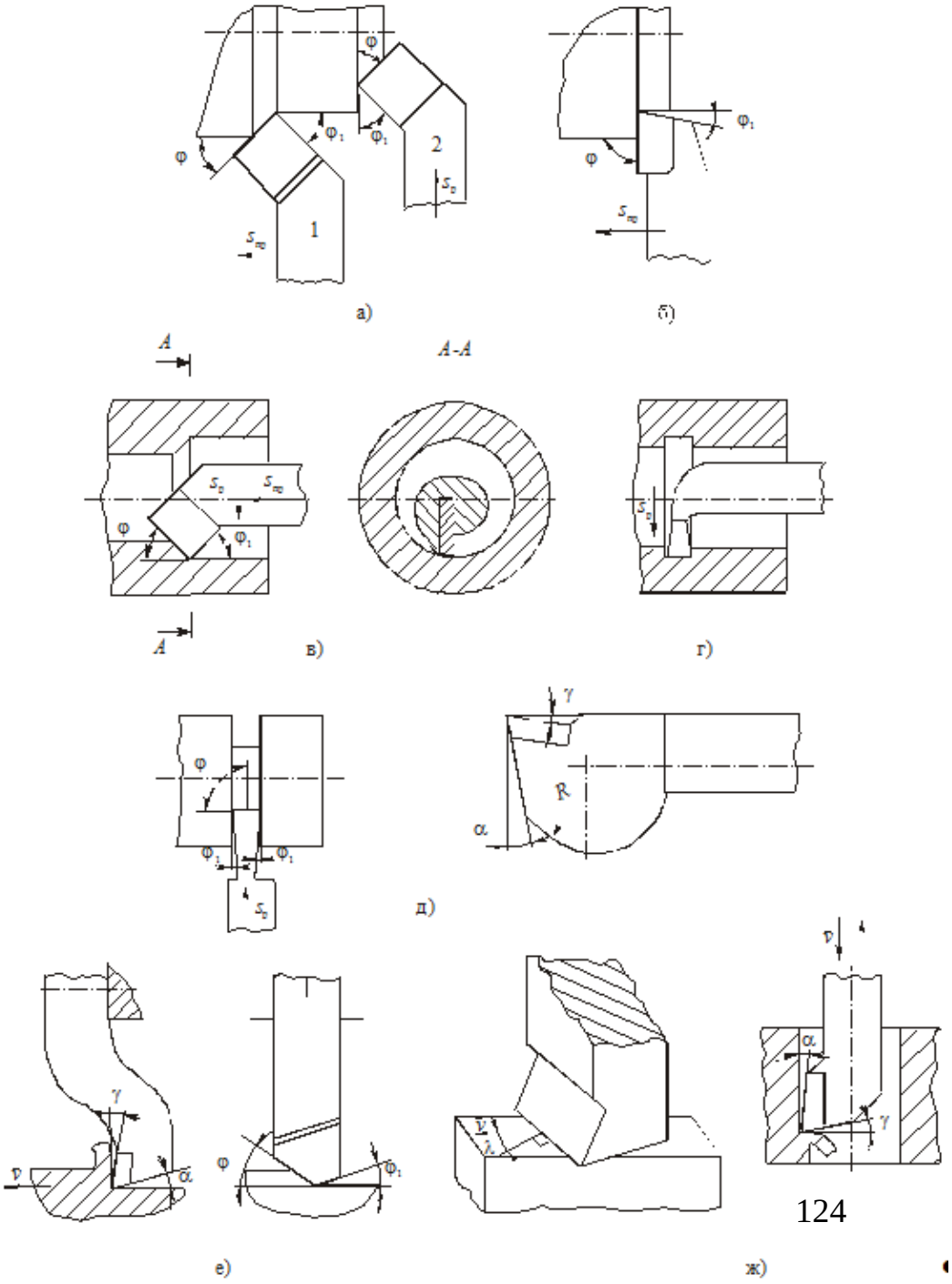
в – расточной для сквозных отверстий;

г – расточной канавочный;

д – отрезной;

е – строгальный;

ж – долбежный.



Токарная обработка. Резцы

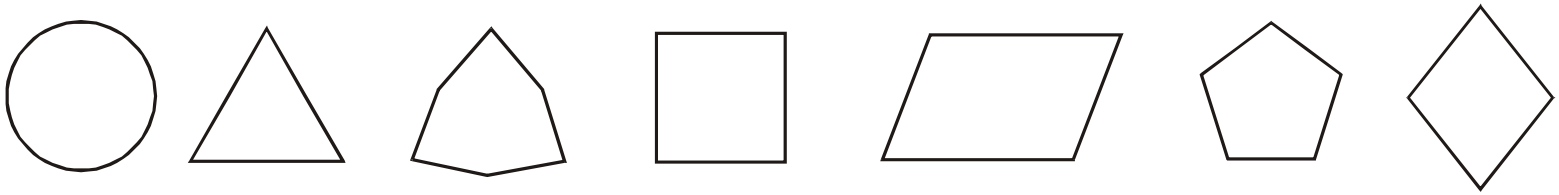
Инструменты, **оснащенные СМП**, по сравнению с напайными имеют следующие **преимущества:**
1) более высокая прочность, **надежность** и **стойкость (**при работе **без ударов);**
2) меньше **расходы на смену** и утилизацию пластин;
3) **меньше простои оборудования при замене и наладке инструмента**, что особенно важно при эксплуатации современных дорогостоящих станков с ЧПУ и автоматических линий;
4) более благоприятные условия для **нанесения на пластины износостойких покрытий**, что позволяет значительно (до 4…5 раз) повысить их стойкость, а следовательно, и производительность процесса резания;
5) меньше потери остродефицитных материалов (вольфрама, кобальта, тантала и др.) за счет увеличения **возврата пластин на переработку**.

Недостатки инструментов, оснащенных СМП:
1) **высокая стоимость** из-за их высокой точности, а следовательно, высокой трудоемкости изготовления пластин и инструмента в целом;
2) **повышенные габариты корпусов инструментов** из-за необходимости размещения в них элементов крепления пластин;
3) **невозможность полного обеспечения оптимальной геометрии режущей части** инструмента из-за заданной формы пластин и условий их крепления.

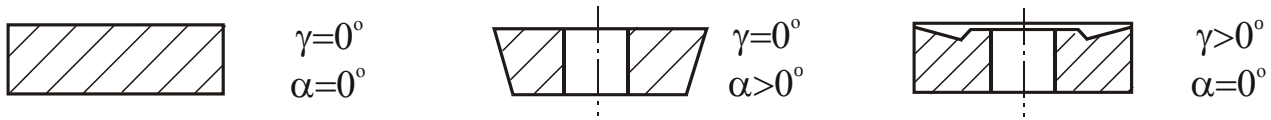
Геометрические параметры инструментов, оснащенных СМП, определяют **в статике** при изготовлении пластин и **корректируют при их закреплении в корпусе** (державке) инструмента **с учетом кинематики станка** и условий резания.

Токарная обработка. Резцы

СМП по геометрическим параметрам делятся на: а) негативные ($\gamma=0°$, $\alpha = 0°$); б) позитивные ($\gamma=0°$, $\alpha > 0°$); в) негативно-позитивные ($\gamma>0°$, $\alpha = 0°$) (рис. 2 *б*). **Задний** угол **α** при установке **негативных** и **негативно-позитивных** пластин создается **за счет их поворота** при креплении в державке резца. При этом у **негативных** пластин **передние углы становятся отрицательными**, т.е. $(-\gamma)=\alpha$, у **негативно-позитивных** пластин угол **γ уменьшается на величину угла α**. У **позитивных** пластин угол **γ равен углу поворота пластины** по часовой стрелке, а **угол α уменьшается** на эту же величину.



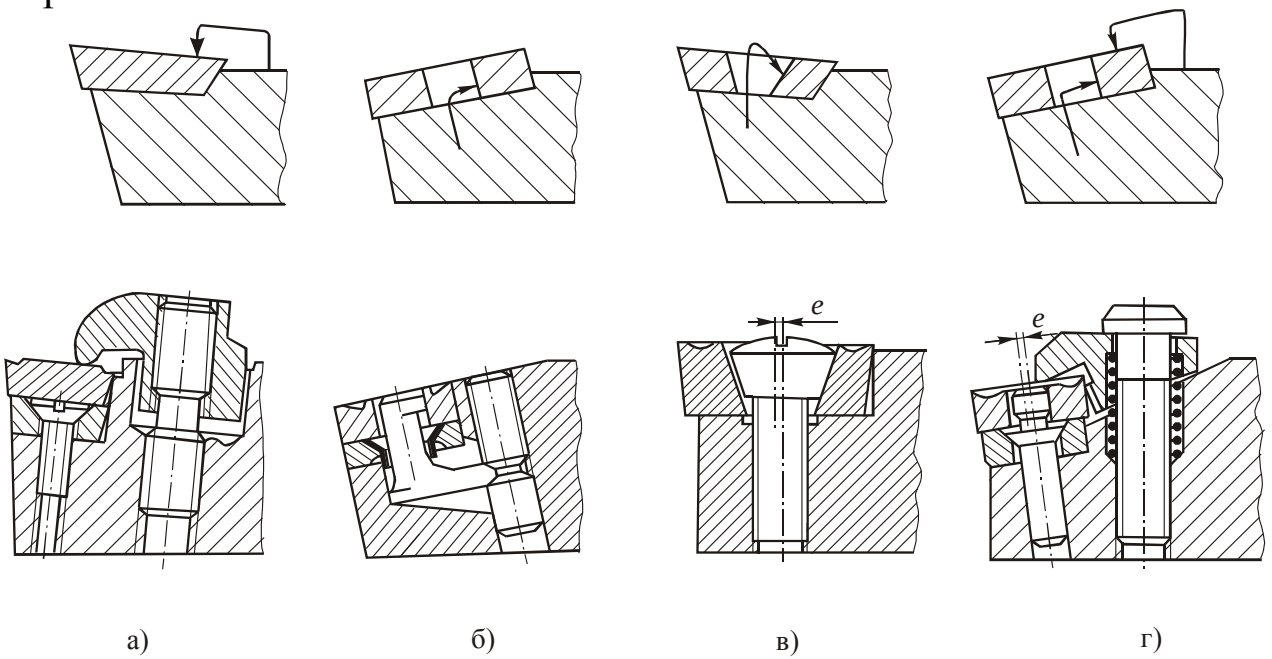
а)

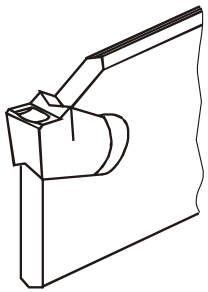


б)

Рис. 2. Твердосплавные сменные многогранные пластины (**СМП**): *а* – формы пластин; *б* – геометрические параметры пластин (**негативных**, **позитивных**, **негативно-позитивных**).

Пластины **негативные** и **негативно-позитивные** крепятся чаще всего **прихватом сверху** (схема ***а***) или по схеме ***г*.** Последняя обеспечивает более надежное крепление, **не требуется поднимать** прихват. Крепление винтом (схема ***в***) используется для **малонагруженных** пластин и является простым и компактным.

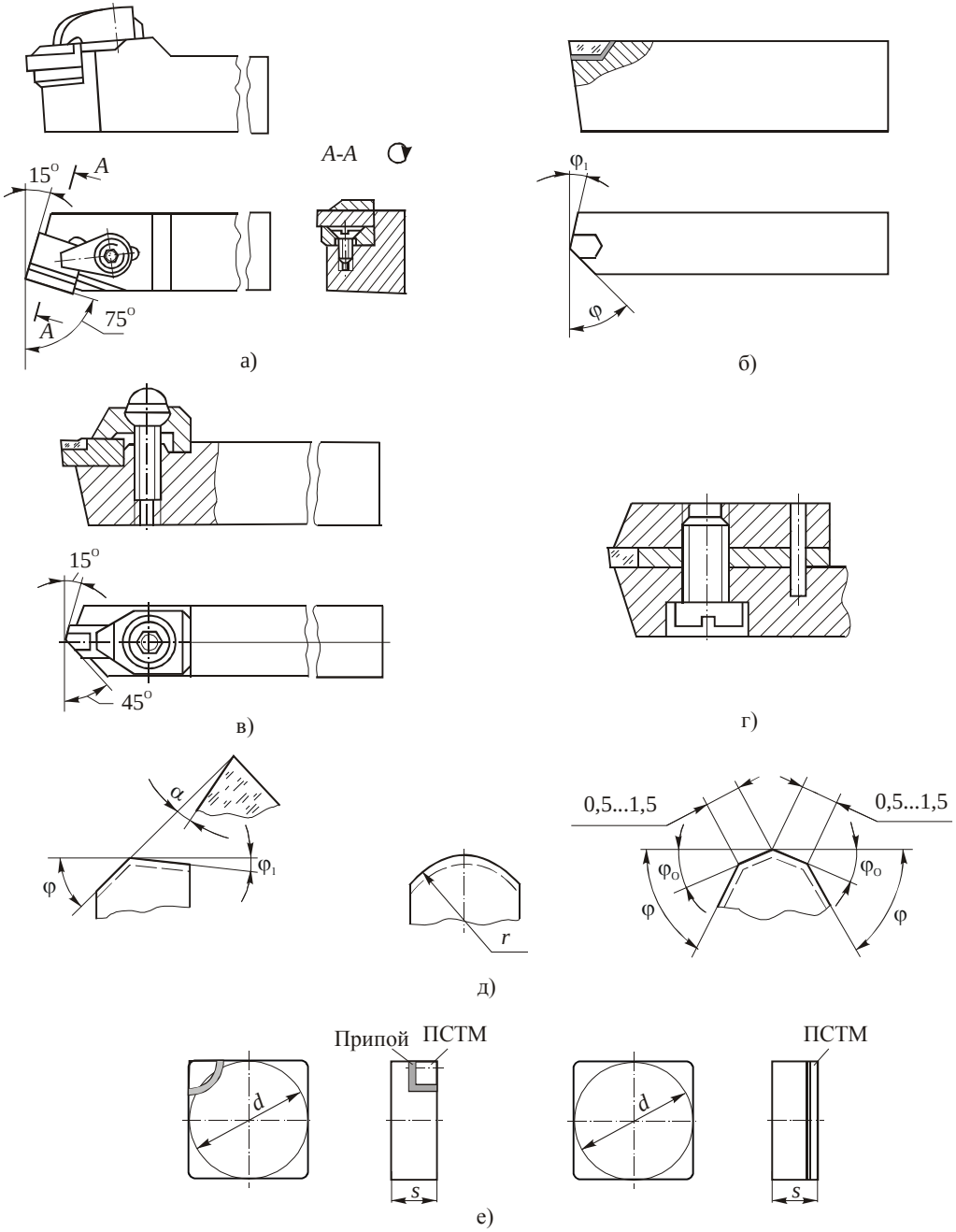




д)

Рис. 3. Схемы механического крепления твердосплавных СМП: *а* – прихватом сверху; *б* – **рычагом через отверстие**; *в* – винтом с конической головкой; *г* – штифтом через отверстие и прихватом сверху; *д* – за счет упругой деформации стенки паза

У резцов наибольшее распространение получили **пластины с отверстием**. Благодаря этому обеспечиваются свободный сход стружки по передней поверхности и значительно **меньшие габариты элементов крепления**, размещаемых в корпусе державки, **пластина не выпадает из гнезда** (паза).
Но при черновой обработке **отверстие** является **концентратором напряжений**, поэтому может приводить к разрушению СМП.

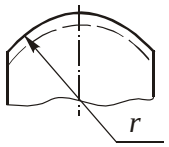


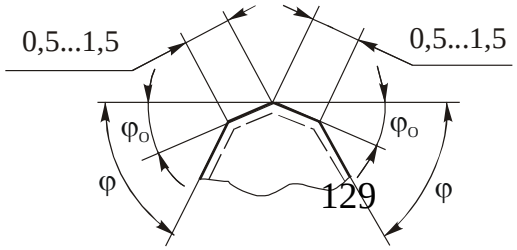
Резцы, оснащенные **керамикой и синтетическими сверхтвердыми материалами** обеспечивают значительное повышение производительности и стойкости, высокие точность и качество обработанной поверхности. Их недостатком является **низкая прочность** режущего клина, которая ограничивает область их применения. Наибольшую эффективность они показали при **чистовом точении сталей,** особенно **закаленных, чугунов различной твердости и даже твердых сплавов** с содержанием кобальта выше 25%. Обработка на высокоточных, **жестких, скоростных** и мощных станках с ЧПУ.

Рис. 4. Сборные токарные резцы с **керамикой** и **СТМ** : *а* – с механическим креплением пластины из **керамики**; *б* – с припаянным **кристаллом алмаза**; *в* – с **промежуточной вставкой**; *г* – с механическим креплением кристалла алмаза; *д* – **формы режущих кромок алмазных резцов** (прямолинейная, радиусная, фасеточная); *е* – СМП с напайками из **ПСТМ (**поликристаллические сверхтвердые материалы)

Так как алмазы и эльбор имеют очень малые размеры, то их крепление осуществляется пайкой, зачеканкой или механическим путем. Крепление алмаза пайкой осуществляется либо непосредственно в державку (рис. 4, *б*), либо с применением промежуточных вставок (рис. 4, *в*). В последнем варианте вставка прессуется и спекается вместе с алмазом методом порошковой металлургии. Вершина резца **в плане** выполняется **со скруглением** *r*=**0,2**…0,8 мм или с несколькими фасками (**фасетками**) (рис.4, *д*). В сечении, нормальном к режущей кромке, **радиус скругления режущего клина** достигает величины **ρ<1 мкм**. Благодаря этому алмазное точение позволяет **снизить шероховатость** обработанной поверхности до *Ra* 0,08…0,32 мкм и **повысить точность обработки** до *JT* 5…7. При точении и растачивании цветных металлов, пластмасс и композиционных материалов стойкость алмазных резцов во много раз выше стойкости твердосплавных резцов. Алмазные резцы могут работать более **200…300 ч без подналадок** и смены инструмента, что особенно важно для автоматизированного производства. При этом алмазы массой 0,5…0,6 карата допускают 6…10 переточек. Для обработки закалённой стали резцы также оснащаются поликристаллическими сверхтвердыми материалами (**ПСТМ**) из **кубического нитрида бора** трехгранной, круглой, квадратной и ромбической форм небольших размеров с диаметром вписанной окружности *d* = 4…12,7 мм, толщиной 3…5 мм (γ = 0°, α= 0…11°).

В последние годы стали применяться **двухслойные пластины**, которые представляют собой **твердосплавную пластину** с нанесенным **слоем поликристаллов кубического нитрида бора** на ее наружной поверхности или с **напайками по ее уголкам** при φ=45° (рис.4, *е*). Такие пластины имеют более крупные размеры и их можно крепить механическим путем в державках, применяемых для крепления твердосплавных пластин.





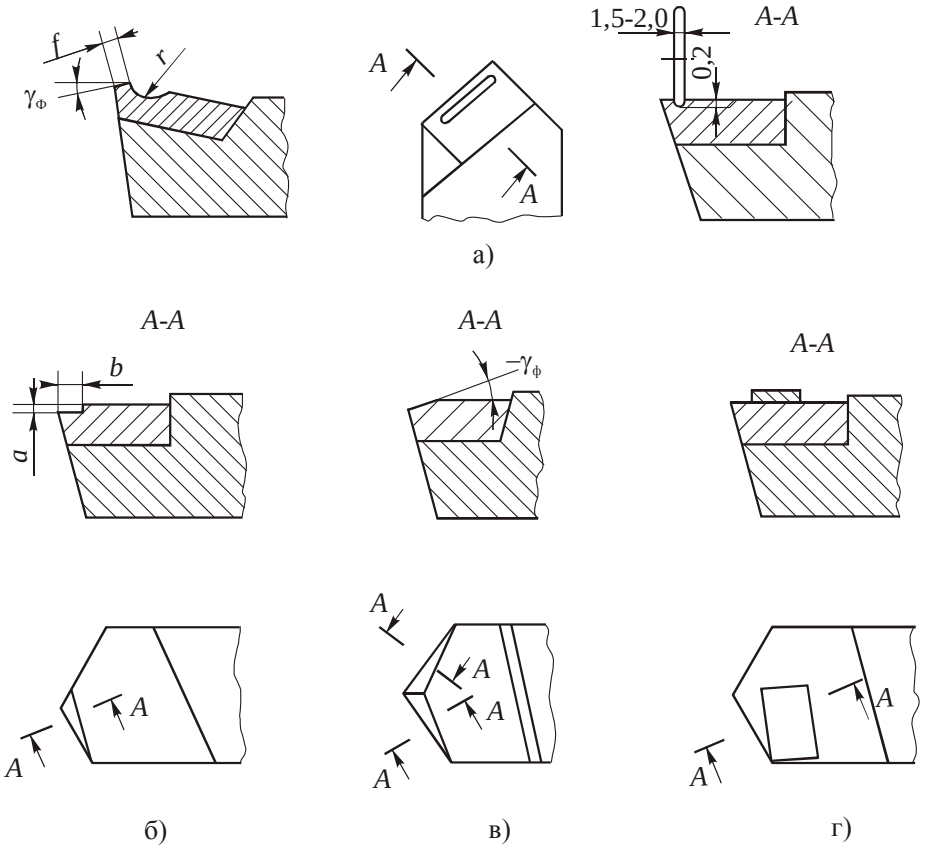
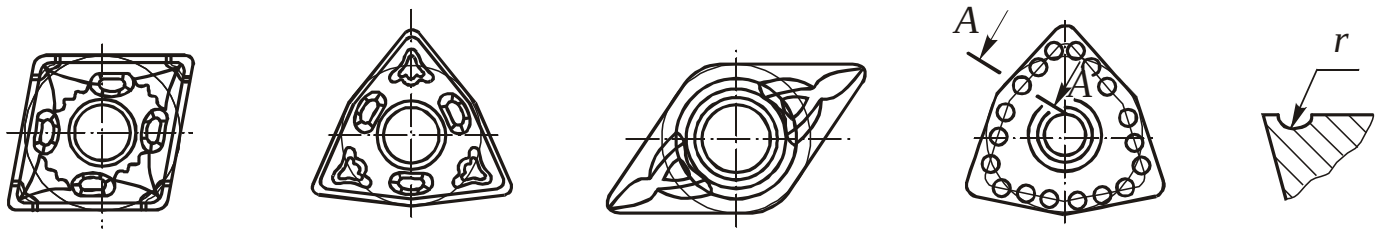


Рис. 1. Способы стружколомания и стружкозавивания: *а* – лунки; *б* – уступ; *в* – фаски *с* $\gamma_ф$<0; *г* – накладной нерегулируемый стружколом; *д* – регулируемый стружколом

Проблема надежного **удаления стружки** из зоны резания имеет наиболее острое значение при использовании твердосплавных резцов и особенно при обработке пластичных материалов, когда из-за резко **возросших скоростей резания** значительно увеличивается объем образующейся стружки и изменяется ее форма. Нагретая до высоких температур стружка в виде **непрерывной ленты** наматывается на заготовку и резец, портит обрабатываемую поверхность и представляет собой серьезную опасность для рабочих. Поэтому станочнику приходится часто **останавливать станок** для ее удаления. Для получения транспортабельной формы стружки в виде отдельных кусочков, **сегментов, колец, коротких завитков** или сплошной пружины применяют специальные способы **стружкозавивания** и **стружколомания**. Обычно для этого на передней поверхности резца на пути сходящей стружки создают специальные **препятствия в виде лунок, канавок,** сферических **выступов** или **углублений** вдоль режущей кромки, а также накладных нерегулируемых уступов и регулируемых стружколомов.

Лунки и уступы на **напайных пластинах** получают путем **вышлифовывания** алмазными кругами у проходных резцов с напайными твердосплавными пластинами. Они **не универсальны**, для каждого обрабатываемого материала и определенного режима резания требуется определять опытным путем их параметры, обеспечивающие нужную форму стружки. У резцов, оснащенных **СМП** получают методом **прессования**. Принимают порой экзотический вид с использованием лунок, канавок и уступов переменной глубины, высоты и ширины. Эффект стружкодробления достигается как за счет **изменения ширины площади контакта стружки** с передней поверхностью резца, так и за счет силового воздействия на сходящую стружку. Кроме того, эффект усиливается за счет **изменения по длине режущей кромки условий контакта стружки** с передней поверхностью резца и **улучшения условий подвода СОЖ** в область контакта.



Накладные регулируемые стружколомы закрепляются на суппорте станка. Напайная твердосплавная пластина-уступ устанавливается в определенном положении относительно режущей кромки, которое обеспечивает надежное дробление или завивание стружки. Устройство позволяет регулировать положение такого уступа относительно режущей кромки при смене режимов резания. Недостатком уступа является сложность и громоздкость конструкции, ухудшающие условия отвода стружки.

В **автоматизированном** производстве **кинематический способ** дробления стружки за счёт принудительных **колебаний резца в направлении подачи**. При этом толщина стружки меняется и стружка распадается на отдельные кусочки. Следует отметить, что этот метод несколько **снижает стойкость инструмента** и требует применения **специальных устройств**, встраиваемых в механизм подачи станка, что усложняет конструкцию последнего.

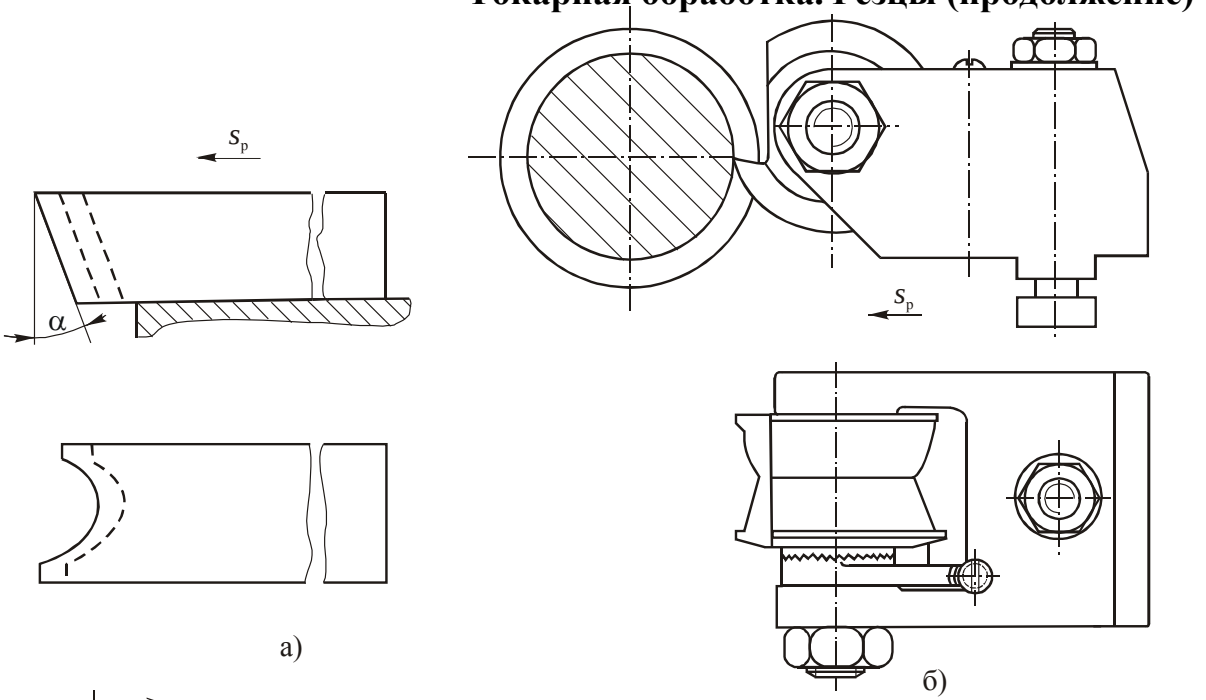
Токарная обработка. Резцы (продолжение)

Для обработки коротких (до 50 мм), но **сложных поверхностей** используются **фасонные резцы**, позволяющие использовать станки с простой кинематикой: на станках-автоматах и револьверных станках в условиях крупносерийного или массового типа производства. В качестве заготовок деталей чаще всего используют калиброванный прокат в виде прутка. **Преимущества:** 1) обеспечивают **идентичность формы** детали и высокую **точность размеров, не зависящую от квалификации рабочего**; 2) обладают **высокой производительностью** за счет большой длины активной части режущей кромки; 3) имеют **большой запас на переточку**; 4) **простая переточка по плоскости передней** поверхности; 5) **не требуют больших затрат времени на наладку** и настройку станка. **Недостатки** фасонных резцов: 1) **сложность изготовления** и **высокую стоимость**; 2) это **резцы специальные**, так как они пригодны для изготовления деталей только заданного профиля;
3) **большие радиальные нагрузки** у резцов, работающих с радиальной подачей, вызывают вибрации и упругие деформации нежестких заготовок, что требует снижения подачи и уменьшает производительность; 4) **кинематические** передние и задние **углы** фасонных резцов в процессе резания **меняются по длине режущих кромок** в большом диапазоне, существенно отличаясь от оптимальных значений.

Стержневые резцы подобны призматическим, но имеют малый запас на переточку. Они применяются в основном для затылования фрез, а также для нарезания резьбы. **Крепление** в суппорте станка **подобно креплению токарных резцов.**

Призматические тангенциальные резцы позволяют обрабатывать детали малой жесткости, но требуют специальных станков и поэтому на практике применяются очень редко. Их недостатком также является переменность передних и задних углов в процессе снятия припуска.

Круглые резцы более технологичны и с большей точностью. Но меньший запас на переточку и меньшая жесткость крепления, так как у насадных резцов диаметр оправки зависит от диаметра резца: не более 100 мм из-за **ухудшения качества быстрорежущей стали**. Призматические резцы имеют большую жесткость и крепятся с помощью **ласточкина хвоста** в державках стержневого типа, обладают большим запасом на переточку, обеспечивают большую точность обработки.



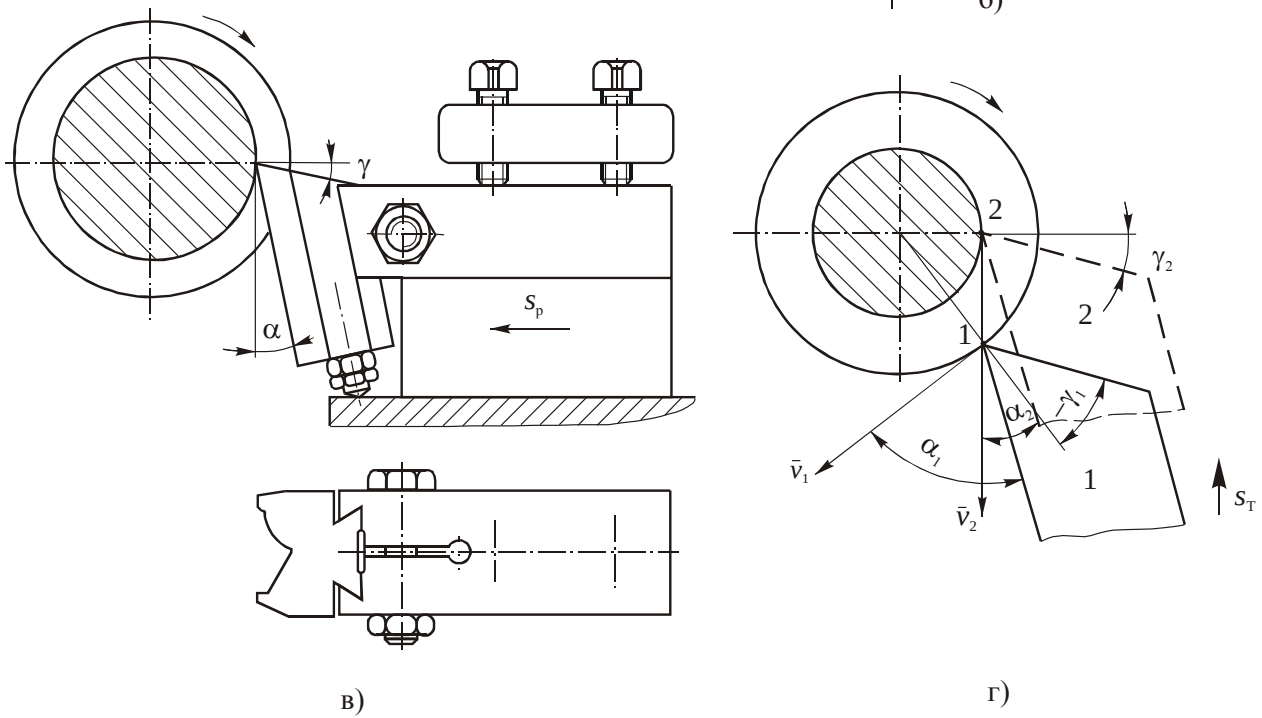


Рис. 2. Типы фасонных резцов:
а – стержневой;
б – круглый;
в – призматический;
г – призматический тангенциальный

Токарная обработка. Резцы (продолжение)

Для обработки внутренних фасонных поверхностей используются только круглые фасонные резцы с креплением на станке с помощью хвостовика, выполненного за одно целое с резцом.

Особенностью фасонных резцов, работающих с радиальной подачей, является переменное значение передних и задних углов по длине режущей кромки.

У круглых резцов задний угол α создается за счет превышения центра резца $O_р$ над центром детали $O_д$ на величину h, а передний угол γ – за счет выреза по плоскости передней поверхности, отстоящей от центра на величину H (рис.2.10). При этом точки режущей кромки на наружной окружности резца (точки *1* и *3*) лежат на линии оси центров станка. R – радиус наружной окружности резца, r – радиус заготовки. В других точках режущей кромки углы α и γ в сечении, перпендикулярном к оси резца, зависят от положения координатных плоскостей (основной и резания) и касательных к задней и передней поверхностям.

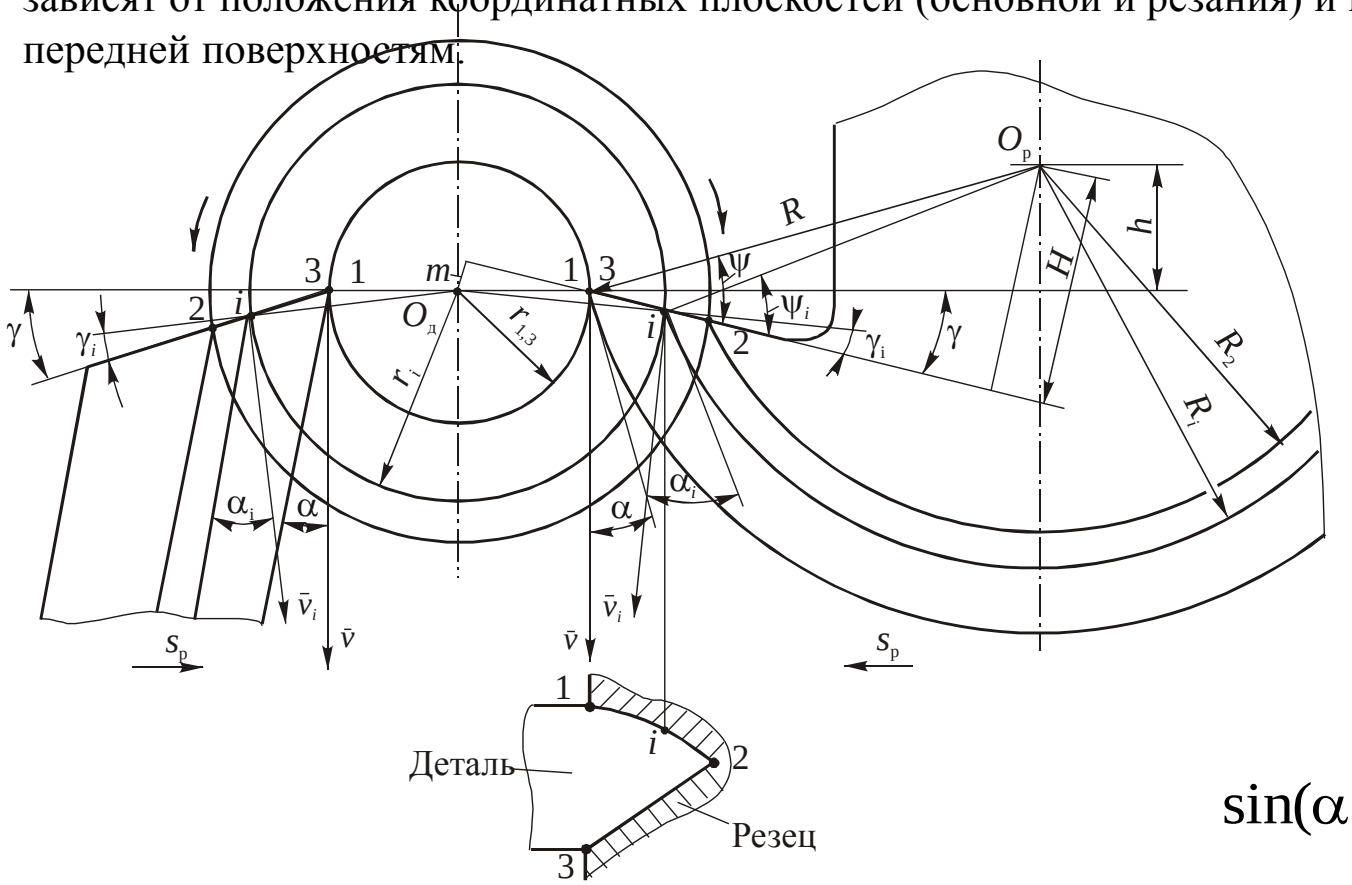


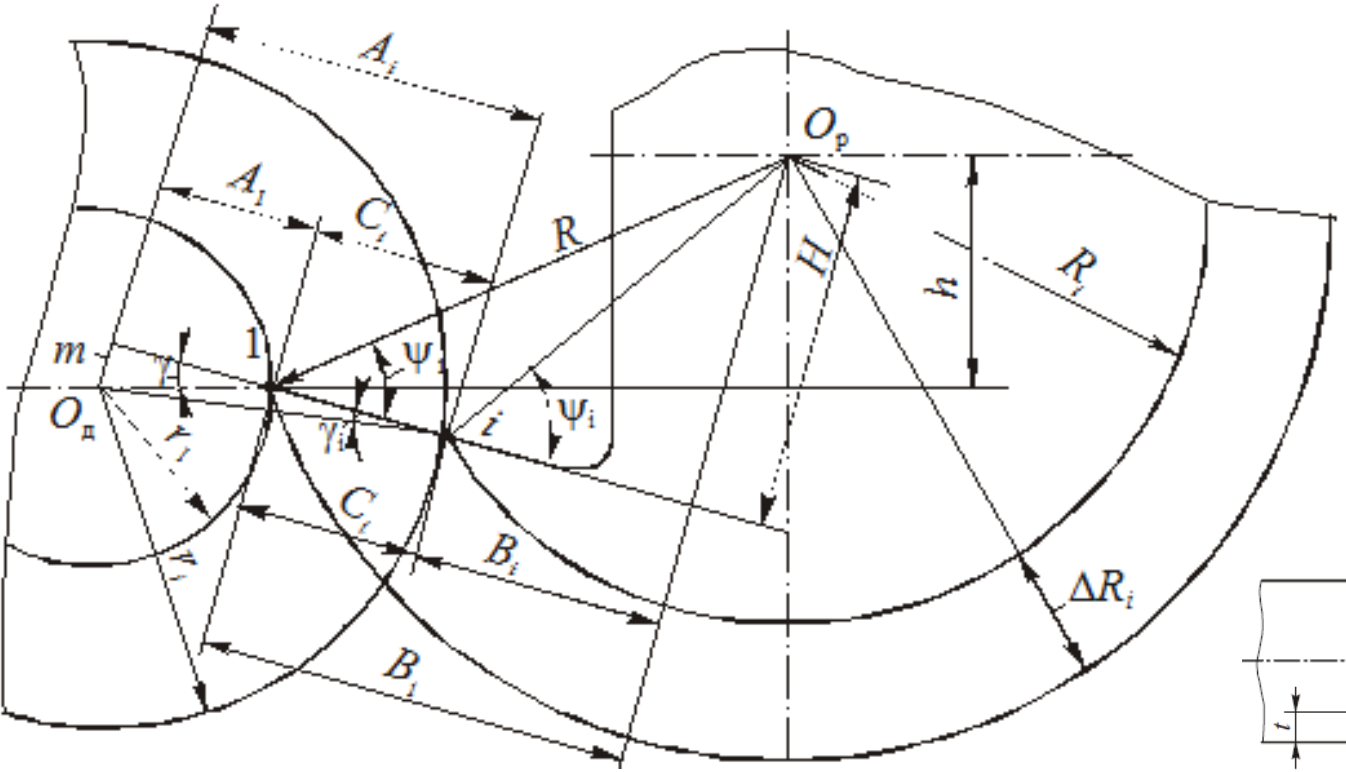
Рис. 3. Геометрические параметры **круглых** (**справа**) и **призматических** (**слева**) фасонных резцов с радиальной подачей

$$\sin\alpha = h/R;$$

$$\sin(\alpha+\gamma) = \sin\psi = H/R,$$

Токарная обработка. Резцы (продолжение)

Исходные данные для **расчета профиля резца**: обрабатываемый материал и профиль детали, задаваемый радиусами окружностей, проходящих через **узловые точки** r_1, r_2,…,r_i, и осевыми размерами a_1, a_2,…,a_i. По рекомендациям [23 и др.] выбирают углы **γ** и **α** у **вершинной точки** и **радиус наружной окружности резца** R_1 **(наибольший диаметр резца)**. Требуется рассчитать радиусы окружностей R_i, на которых лежат точки резца, соответствующие **узловым точкам профиля детали**. Определяют параметры вершины резца (точка **1**, соответствующая **самой глубокой точки профиля детали** (наименьшего диаметра r_1) и лежащей на линии центров станка: $h = h_1 = R_1 \cdot \sin\alpha$; $m = r_1 \cdot \sin\gamma$; $\psi_1 = \alpha+\gamma$; $A_1 = r_1 \cdot \cos\gamma$; $H = R \cdot \sin\psi_1$; $B_1 = R \cdot \cos\psi_1$.



Для ***i*-й точки** профиля находят последовательно:

$\sin\gamma_i = m/r_i$;

$C_i = r_i \cdot \cos\gamma_i - A_1$;

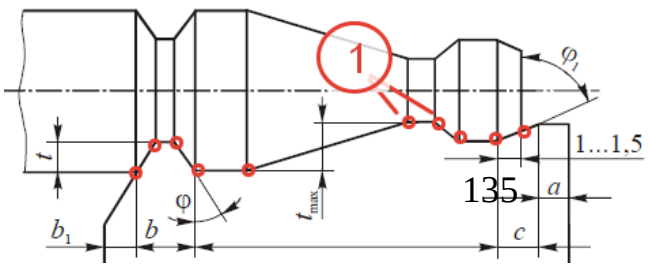
$B_i = B_1 - C_i$;

$\operatorname{tg}\psi_i = H/B_i$;

$R_i = H/\sin\psi_i$;

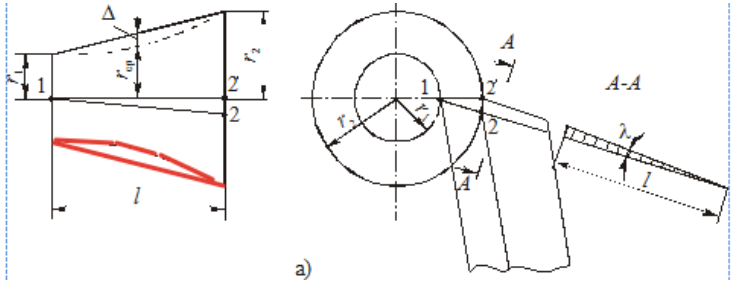
$\Delta R_i = R - R_i$.

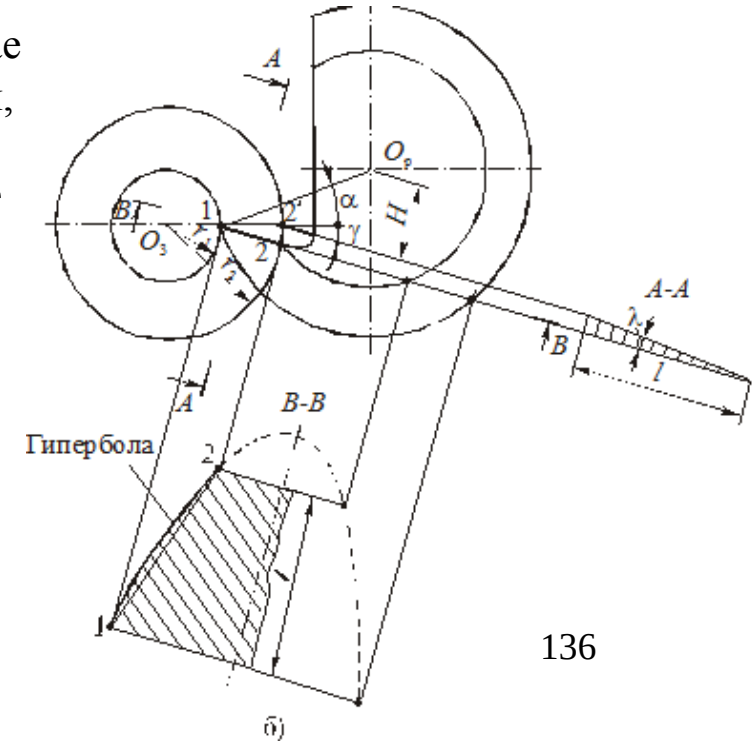
$\psi_i = \alpha_i + \gamma_i$



По найденным координатам узловых точек в указанных сечениях на рабочих чертежах фасонных резцов вычерчивают профиль, обычно в увеличенном масштабе. При этом **прямолинейные участки** профиля получают **соединением прямой двух крайних точек**, а **криволинейные – по лекалу через точки отдельных отрезков**, на которые предварительно разбивают заданный профиль детали. Обычно берут **не менее трех–четырех точек.**

Погрешности возникают **при обработке конических участков** детали из-за несовпадения режущей кромки с образующей конуса. При обточке усеченного конуса призматическим резцом режущая кромка *1…2* скрещивается в пространстве с осью конуса и при вращении ее относительно оси детали образуется не конус, а **однополостной гиперболоид**, показанный штриховыми линиями. Наибольшее отклонение фактического профиля от конического Δ приходится на точку профиля с радиусом $r_{ср}=(r_1+r_2)/2$. В случае применения **призматических резцов** ее можно свести до нуля, заточив переднюю грань дополнительно **под углом λ.** При этом режущая кромка резца займет положение *1…2′*, т.е. будет совпадать с образующей конуса. Такой прием не дает возможности получить точный конический профиль детали при использовании **круглых фасонных** резцов. При пересечении конического тела резца плоскостью передней грани, проходящей параллельно оси, получается криволинейная режущая кромка в форме гиперболы. **Дополнительная заточка передней грани под углом λ** несколько снижает погрешность обработки, но **совместить полностью режущую кромку с образующей конуса не удается.**

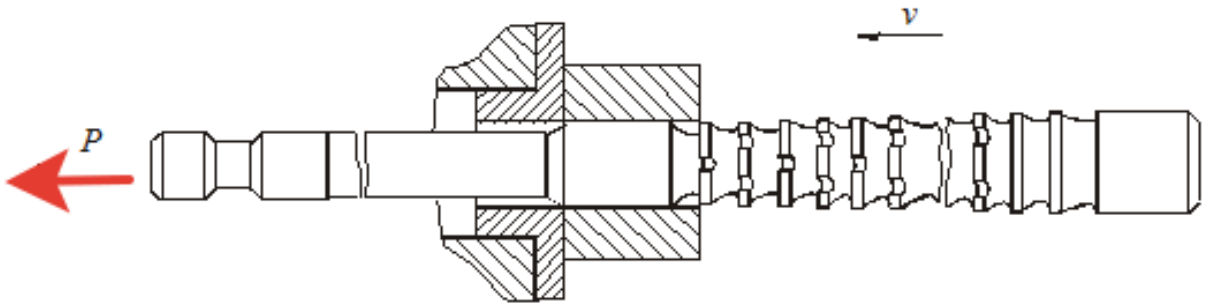




Протяжки

Протяжки – это многозубые высокопроизводительные инструменты, нашедшие широкое применение в серийном и особенно в массовом производствах. Они относятся к инструментам с конструктивной подачей (движение подачи отсутствует). Деление припуска между зубьями протяжки осуществляется за счет **превышения по высоте** или ширине **каждого последующего зуба** относительно предыдущего. Превышение по высоте, определяющее толщину срезаемого слоя a_z, называется **подъемом** или **подачей на зуб. Деление припуска по ширине** осуществляется с целью облегчения процесса резания и используется в протяжках с групповой схемой резания.

Протяжки, применяемые для обработки отверстий различных форм, называются **внутренними протяжками**. Для обработки наружных поверхностей, т.е. поверхностей с открытым незамкнутым контуром, применяют **наружные протяжки**. Главное движение протяжки, обеспечивающее процесс резания, чаще всего прямолинейное, поступательное. Реже встречаются протяжки с вращательным или винтовым главным движением. Процесс протягивания осуществляется на специальных **горизонтальных** или вертикальных **протяжных станках**.



Достоинства процесса протягивания: 1) **высокая производительность**. При этом активная длина режущих кромок очень большая, хотя скорость резания невелика (6…12 м/мин). При протягивании отверстия диаметром 30 мм одновременно пятью зубьями ширина срезаемого слоя составляет около 470 мм. В целом **производительность при протягивании в 3…12 раз выше**, чем при других видах обработки; 2) **высокая точность** (*JT* 7… *JT*8) и **низкая шероховатость** (*Ra* 0,32…2,5 мкм) обработанных поверхностей благодаря наличию черновых, чистовых и калибрующих зубьев, а в некоторых конструкциях протяжек еще и выглаживающих зубьев.

3) высокая стойкость инструмента, исчисляемая несколькими тысячами деталей. Это достигается благодаря оптимальным условиям резания и большим запасам на переточку; 4) **простота конструкции станков (**станки не имеют коробок подач, а главное движение осуществляется с помощью силовых гидроцилиндров).

Недостатки протяжек: 1) **высокие трудоемкость и стоимость инструмента** из-за сложности конструкций протяжек и высоких требований к точности их изготовления; 2) протяжки – это **специальные инструменты**, предназначенные для изготовления деталей только одного типоразмера; 3) **высокие затраты на переточку из-за** сложности конструкций.

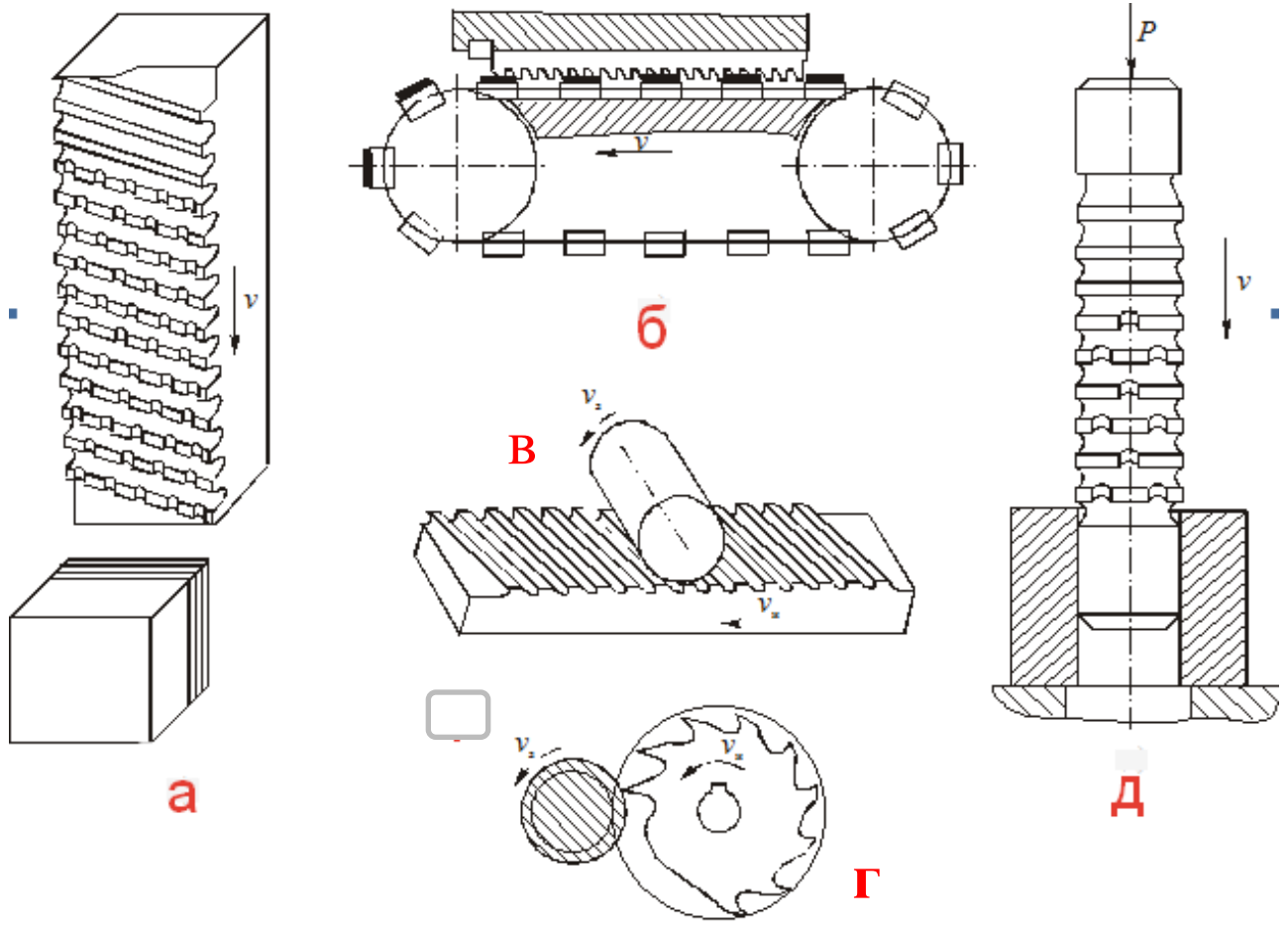
Экономическая эффективность применения протяжек достигается лишь **в массовом и серийном производствах**. Однако даже на предприятиях с единичным и мелкосерийным производствами протяжки могут дать значительный экономический эффект при обработке **сложных фасонных отверстий**, если формы обрабатываемых поверхностей и их размеры имеют узкие допуски. Например, при протягивании многошлицевых отверстий экономически оправдано применение протяжек даже при партии 50 деталей в год, а круглых отверстий – не менее 200 деталей.

1) Протяжки испытывают очень большие растягивающие нагрузки, поэтому внутренние протяжки обязательно **проверяют на прочность по наиболее слабым сечениям;** 2) срезаемая при протягивании **стружка должна свободно размещаться в стружечных канавках** в течение всего времени нахождения режущих зубьев в контакте с заготовкой и свободно выходить из канавки после прекращения процесса резания: 3) при протягивании круглых отверстий **не допускаются кольцевые стружки**, потому что для освобождения от них протяжек потребовались бы большие затраты времени; 4) длина протяжек должна **быть меньше рабочего хода протяжного станка;** 5) учитывать возможности оборудования **для их термической и механической обработки**. При этом протяжки должны иметь достаточную жесткость при изготовлении и эксплуатации, поэтому при протягивании иногда используют люнеты и другие приспособления.

Наибольшее применение (до 60%) нашли протяжки для обработки круглых отверстий. Гранные, **шлицевые**, наружные имеют отличительные особенности только **расчета их режущей части.**

Протяжки (продолжение)

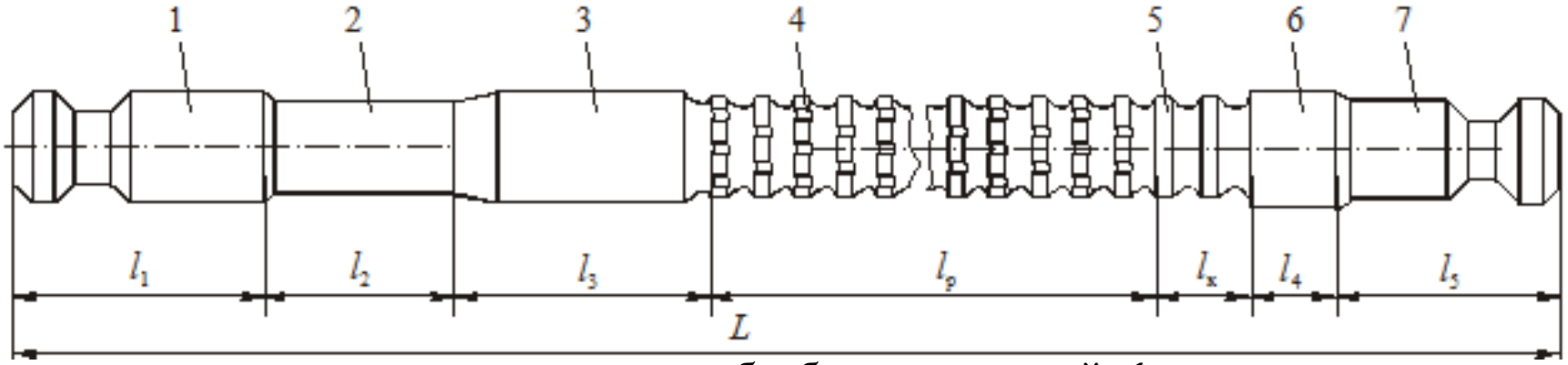
При обработке отверстий **прошивками** (рис. д) сила приложена к торцу инструмента и прошивки работают на сжатие. Для обеспечения продольной устойчивости прошивок их **длина не должна превышать 15 диаметров.** По конструкции прошивки подобны протяжкам.



Схемы протягивания: а – плоскостей; б – непрерывное протягивание наружной поверхности; в – обработка цилиндрической поверхности плоской протяжкой; г – круглой протяжкой; д – обработка отверстия прошивкой

Протяжки (продолжение)

Основные части круглой внутренней протяжки: ***хвостовик*** **1** служит для присоединения протяжки к патрону станка, диаметр хвостовика должен быть ***меньше диаметра отверстия под протягивание*** на ***1…2 мм***. ***Шейка*** **2** и следующий за ней ***переходный конус*** выполняют вспомогательную роль. Их длина должна обеспечивать возможность присоединения протяжки к патрону перед началом протягивания. Переходный конус обеспечивает свободное вхождение передней направляющей в протягиваемое отверстие. ***Диаметр шейки берется меньше диаметра хвостовика на 0,3…1,0 мм***. ***Передняя направляющая 3*** служит ***для центрирования оси заготовки относительно оси протяжки*** перед протягиванием, чтобы исключить перекос заготовки. Длина передней направляющей должна быть равна длине L_0 протягиваемого отверстия, а при больших длинах – не менее $0{,}6L_0$. Форма передней направляющей должна соответствовать форме отверстия в заготовке, а **допуск на диаметр** направляющей берется по ***e*8**. ***Задняя направляющая 6*** предохраняет протяжку от перекоса при выходе ее калибрующей части из обработанного отверстия. По длине она несколько меньше длины передней направляющей, а ее **диаметр** равен по номиналу диаметру отверстия, но с допуском по ***f*7**. Форма задней направляющей должна быть такой же, как у протянутого отверстия. **Задний хвостовик 7** необходим для автоматического возврата протяжки в исходное положение после протягивания,



Конструктивные элементы протяжки для обработки отверстий: ***1*** **– хвостовик;** ***2*** **– шейка;** ***3*** **– передняя направляющая;** ***4*** **– режущая часть;** ***5*** **– калибрующая часть;** ***6*** **– задняя направляющая;** ***7*** **– задний хвостовик**

Протяжки (продолжение)

Режущая (рабочая) часть 4 протяжки служит для удаления припуска и формирования поверхности протянутого отверстия. Она содержит ***черновые*** и ***чистовые***, а при групповой схеме резания еще и ***переходные зубья***, располагаемые на ступенчато-конической поверхности. Длина режущей части равна произведению числа зубьев на их шаг, который, в свою очередь, зависит от требований к точности протягиваемого отверстия, шероховатости его поверхности и величины снимаемого припуска. Диаметры зубьев рассчитывают исходя из принятой схемы резания.

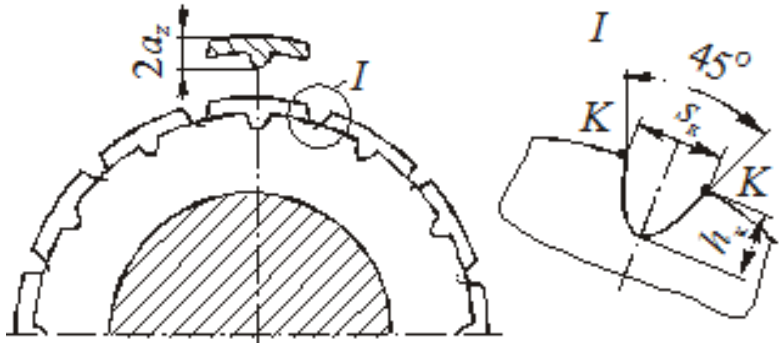
Калибрующая часть 5 содержит 4…10 зубьев одинакового диаметра, равного диаметру последнего чистового зуба, и служит для калибровки отверстия, уменьшения рассеивания его размеров, а также является запасом на переточку: по мере износа чистовых зубьев калибрующие зубья заточкой могут быть переведены в чистовые. Тем самым увеличивается общий срок службы протяжки.

Калибрующие зубья припуск не срезают, а удаляют микронеровности поверхности, остающиеся после прохода чистовых зубьев, и обеспечивают направление протяжки в отверстии.

Конструкция режущей части протяжки определяется принятой **схемой резания**, под которой понимают принятый порядок последовательного срезания припуска.

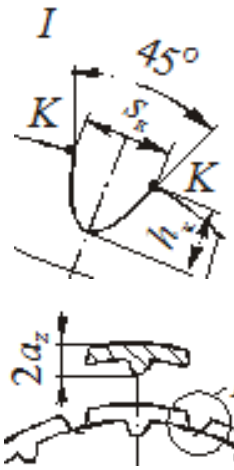
Различают следующие **схемы резания**: **а**) по ***способу деления припуска*** по толщине и ширине – ***одинарная*** и ***групповая***; **б**) по ***способу формирования обработанной поверхности*** – профильная, генераторная и комбинированная.

Одинарная схема резания характерна тем, что каждый зуб протяжки срезает припуск определенной толщины ***по всему периметру*** обрабатываемого отверстия за счет того, что ***диаметр каждого последующего зуба больше диаметра предыдущего*** на величину $2a_z$, где a_z – ***подъем*** или подача ***на зуб*** ($a_z = s_z$).



Так как кольцевая стружка недопустима, то для ***деления стружки по ширине*** на режущих кромках необходимо делать стружкоделительные ***канавки V-образной формы,*** которые располагают в ***шахматном порядке*** при переходе от одного зуба к другому.

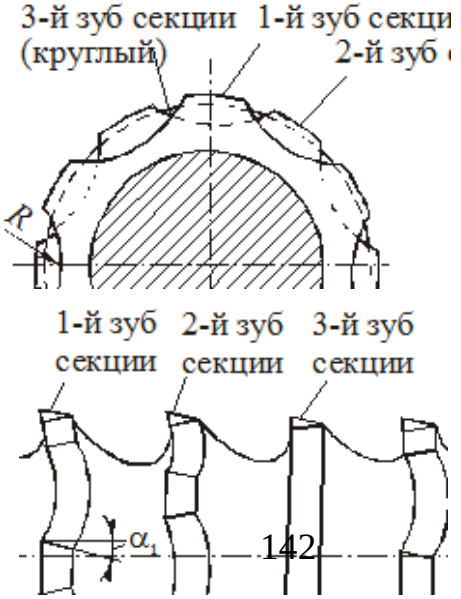
Протяжки (продолжение)



Стружкоделительные канавки имеют глубину $h_к$=0,4…1,0 мм и ширину $s_к$=0,6…1,2 мм в зависимости от диаметра протяжки. Снимаемые каждым зубом стружки получаются в виде отдельных частей ***с ребром жесткости*** толщиной $2a_z$ за счет того, что на участке канавки предыдущего зуба стружка не снимается. Ребро жесткости ***ухудшает свертываемость стружки*** в канавках между зубьями, из-за чего приходится значительно ***снижать величину подачи на зуб***. Это приводит к нежелательному ***увеличению длины протяжки***. Толщина среза: при обработке сталей – a_z=0,02…0,04 мм; чугуна – a_z=0,03…1,0 мм; алюминия – a_z=0,02…0,05 мм; бронзы и латуни – a_z=0,05…0,12 мм.

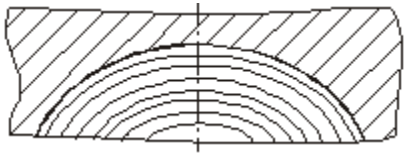
Жёсткость ***стружки*** мешает ее завиванию во впадине между зубьями - она упирается в дно впадины, в результате чего возможны ее заклинивание. Канавки прорезают шлифовальным кругом при небольшом (2…3°) ***поднятии заднего центра*** протяжки для ***создания заднего угла по дну канавки***. При этом ослабляются режущие кромки зубьев в точках ***К*** пересечения канавок с задней поверхностью и приводит к более интенсивному износу зубьев на этих участках.

Схема группового резания отличается от одинарной тем, что все ***режущие зубья*** делятся на ***группы*** или ***секции, состоящие из 2…5 зубьев***, в пределах которых ***зубья имеют одинаковый диаметр***. **Припуск** по ***толщине делится между группами зубьев***, а **по** ***ширине*** – между зубьями группы ***благодаря широким выкружкам***, выполненным в шахматном порядке. Каждый зуб снимает отдельные части припуска участками режущей кромки, где нет выкружек. Благодаря большой ширине выкружек снимаемая ***стружка не имеет ребер жесткости***, хорошо скручивается в канавках между зубьями, даже при увеличении толщины среза до a_z=0,4 мм при обработке стали и до a_z=1,2 мм – при обработке чугуна. За счет этого при групповой схеме резания возможно существенное ***сокращение длины режущей части*** протяжки.



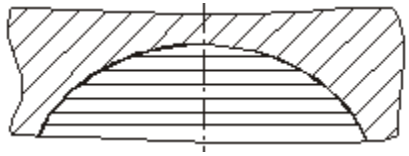
Широкие выкружки на зубьях при ***групповой*** схеме резания обеспечивают увеличение угла стыка выкружек и режущих кромок до 130…150°. Это в сочетании с задними углами $\alpha_1 = 4…6°$ на вспомогательных режущих кромках, полученными при вышлифовывании выкружек, обеспечивает ***повышение стойкости протяжек*** в 2…3 раза по сравнению с одинарной схемой резания. ***Последний зуб*** в группе, не имеющий выкружек и выполняющий роль ***зачистного***, делают с ***занижением на 0,02…0,04 мм*** по диаметру относительно других зубьев. Это необходимо, чтобы ***избежать образования кольцевых стружек***, возможных ***при упругом восстановлении*** обработанной поверхности после прохода прорезных зубьев. ***Недостатком*** групповой схемы является ***повышенная трудоемкость изготовления*** протяжки по сравнению с одинарной схемой.

Форма режущих кромок зубьев определяется схемой формирования обработанной поверхности. При ***профильной схеме*** ***контур всех режущих кромок подобен профилю протягиваемого отверстия.*** Окончательное ***формирование обработанной поверхности*** выполняют только ***последние зубья***, а остальные служат для удаления припуска. При ***сложной форме отверстий*** использование такой схемы ***нецелесообразно***, так как усложняет изготовление протяжки. Профильная схема применяется ***при формировании простых по форме поверхностей*** (круглых или плоских).



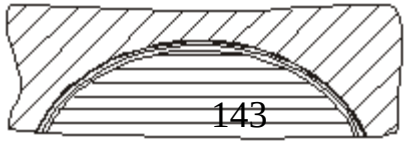
профильная схема

При ***генераторной схеме*** форма режущих кромок не совпадает с формой обработанной поверхности, которая формируется последовательно всеми зубьями. В этом случае ***упрощается изготовление*** протяжки путем ***шлифования напроход*** всех зубьев абразивным ***кругом одного профиля.*** Однако при этом на обработанной поверхности возможно **появление рисок** (ступенек) вследствие погрешностей заточки зубьев, что ухудшает качество обработанной поверхности.



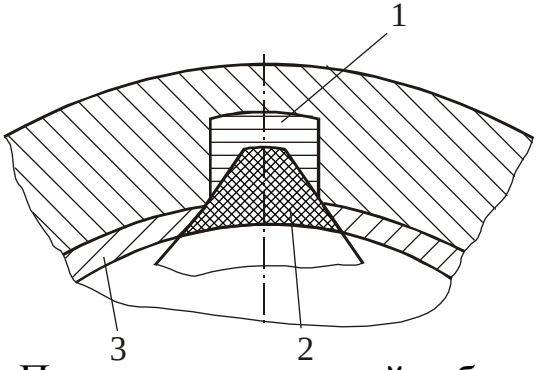
генераторная схема

При ***комбинированной*** ***схеме два–три последних режущих зуба и все калибрующие зубья*** работают ***по профильной***, а остальные – по генераторной

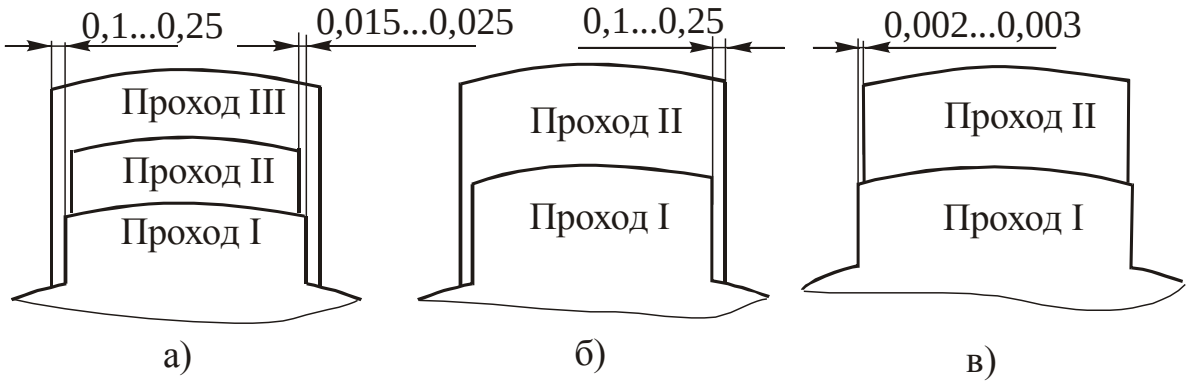


комбинированная схема

Шлицевые отверстия широко распространены в машиностроении. Они используются для обеспечения **подвижных** и неподвижных соединений типа «вал – втулка» и **передачи больших крутящих моментов**. Из-за **сложной формы шлицевых отверстий** обработка их **протягиванием предпочтительнее** других способов (долбление, строгание и т.д.), так как обеспечивает более высокие производительность, точность размеров и взаимного расположения поверхностей. Шлицевые протяжки внешне похожи на шлицевые валы, шлицы которых превращены в режущие зубья путем прорезания стружечных канавок и создания передних и задних углов. Для удаления срезаемого припуска во впадинах шлицев высота зубьев h переменна. При использовании одинарной схемы резания каждый последующий зуб выше предыдущего на величину подъема a_z. В зависимости от глубины пазов, определяющих толщину срезаемого припуска, шлицевые протяжки изготавливаются комплектами из двух, трех и более штук. При больших размерах шлицевых пазов (по высоте и длине) используют комплект из 3-х протяжек (допуск на ширину паза менее 0,05 мм). Окончательная ширина паза обеспечивается последней протяжкой комплекта, а предыдущие протяжки для снижения сил трения и облегчения работы делаются по ширине зуба зауженными. При этом можно увеличить подъем на черновых зубьях до a_z = 0,12…0,30 мм.



Припуск, снимаемый зубьями **комбинированной шлицевой** протяжки: *1* – шлицевыми; *2* – фасочными; *3* – круглыми

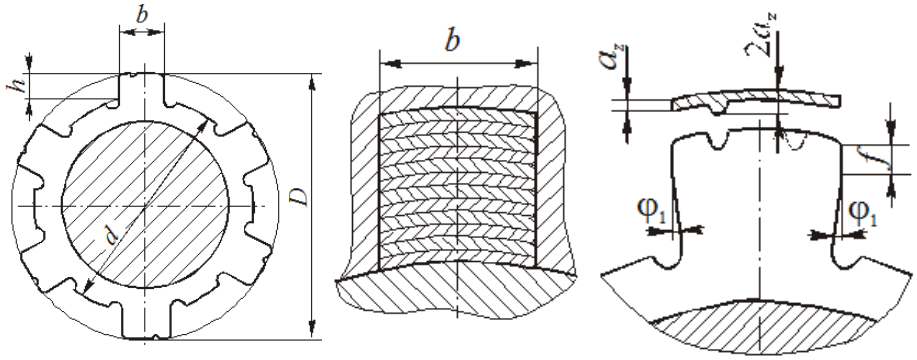


Распределение припуска между шлицевыми протяжками комплекта из: *а* – трех протяжек; *б* – двух протяжек; *в* – двух протяжек (Δb > 0,06 мм)

Протяжки (продолжение)

Отверстие под протягивание **шлицевых отверстий** получают **сверлением**, последующим растачиванием, зенкерованием или развертыванием. Образование пазов по **наружному диаметру** производится по **профильной схеме** резания, а по **боковым сторонам** – по **генераторной схеме**. При **ширине шлицевого паза свыше 6 мм** на главных режущих кромках при переходе от одного зуба к другому в шахматном порядке выполняют **одну** или **две стружкоразделительные канавки**. У шлицевых протяжек **стружкоразделительные канавки делаются на всех режущих и даже на калибрующих зубьях**. Для снижения трения шлицевых выступов зубьев протяжки о боковую поверхность пазов выполняется **вспомогательный угол в плане на боковых сторонах зуба φ_1 = 1°30′…2°** с оставлением **фаски шириной f = 0,8…1,0 мм** для лучшего направления протяжки в отверстии. Это делается в том случае, когда высота зуба больше 1,5 мм. Такой конструкции шлицевой протяжки свойственны те же недостатки, что и круглым протяжкам с одинарной схемой резания. В частности, наличие ребра жесткости на срезаемой стружке ухудшает ее свертываемость и не позволяет увеличивать подъем на зуб. **Групповая схема** резания применяется если **число шлицев больше 6…8,** длина отверстия L_o > 30 мм, а глубины пазов большие. Такие протяжки изготавливаются диаметром до 450 мм.

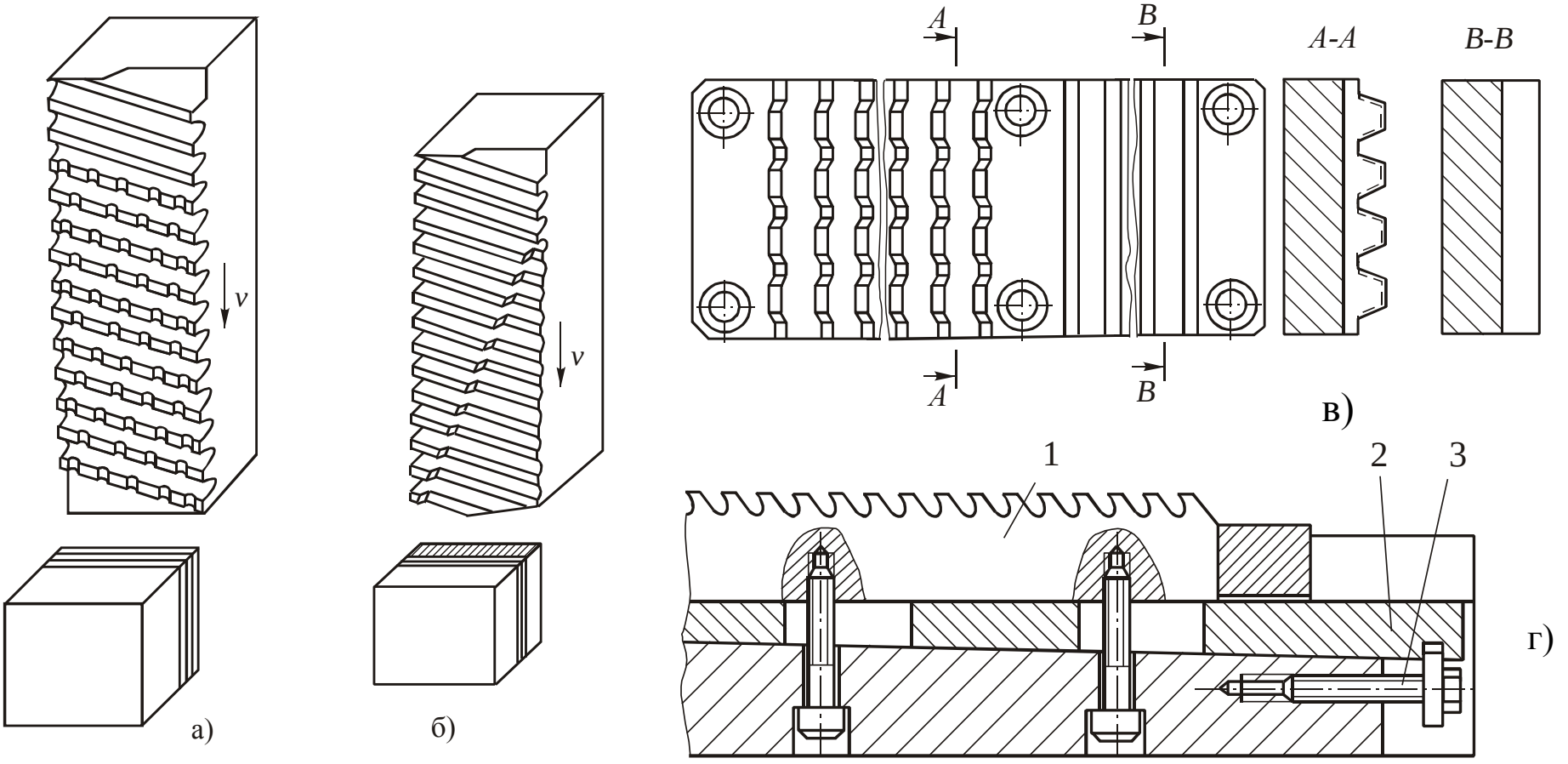
Наружным протягиванием обрабатывают различные поверхности с незамкнутым, открытым контуром: плоскости, уступы, пазы, **вогнутые и выпуклые цилиндрические и сложные фасонные поверхности**, например впадины зубчатых колес и т.п. Чаще всего используется одинарная схема резания, но при протягивании широких плоских поверхностей и срезании больших припусков используется разновидность **групповой** схемы резания – **трапецеидальная схема.**



Шлицевая протяжка с одинарной схемой резания и зуб шлицевой протяжки

Протяжки (продолжение)

Наружным протягиванием обрабатывают различные поверхности с незамкнутым, открытым контуром: плоскости, уступы, пазы, **вогнутые и выпуклые цилиндрические и сложные фасонные поверхности**, например впадины зубчатых колес и т.п. Чаще всего используется одинарная схема резания, но при протягивании широких плоских поверхностей и срезании больших припусков используется разновидность **групповой** схемы резания – **трапецеидальная схема.**



Схемы резания, применяемые при протягивании наружных поверхностей: *а* – профильная; *б* – генераторная с чистовыми зубьями, выполненными по профильной схеме; *в* – трапецеидальная схема; *г* – регулирование по высоте секции сборной наружной протяжки с помощью клина

Мерные режущие инструменты. Свёрла

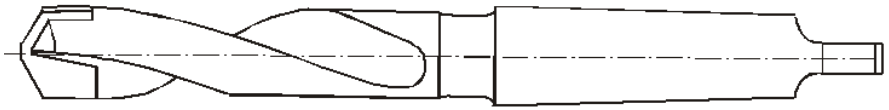
Мерные режущие инструменты – это инструменты, при применении которых диаметр отверстия равен диаметру инструмента (свёрла, зенкеры, развёртки и т.п.).

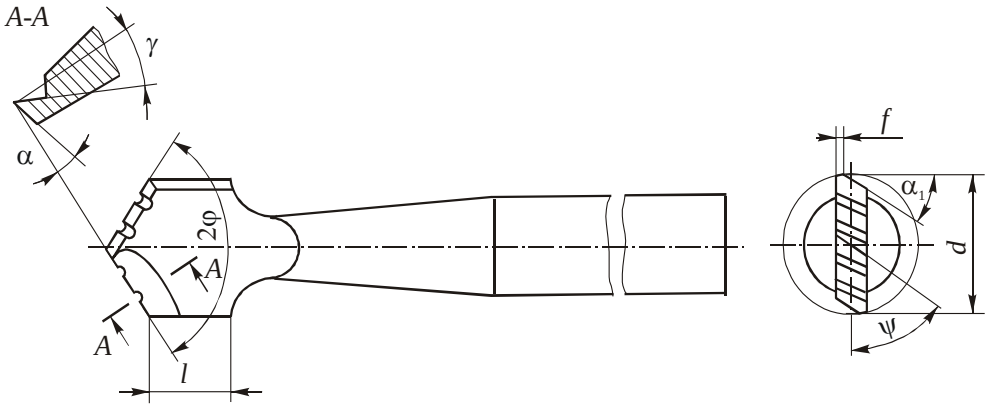
Сверла – это осевые режущие инструменты, предназначенные **для образования отверстий в сплошном материале**, а также для обработки (**рассверливания**) отверстий, предварительно изготовленных ковкой, штамповкой, литьем или сверлением. Они широко применяются в машиностроении, занимая по этому признаку второе место после резцов.

Кинематика процесса сверления состоит из двух движений: главного – вращательного вокруг оси инструмента (заготовки) и поступательного – движения подачи вдоль той же оси. По **конструктивному исполнению** сверла отличаются большим разнообразием, которое можно свести к следующим основным типам:

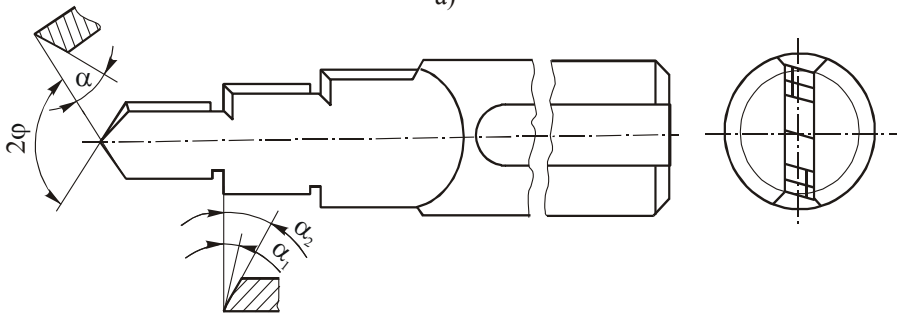
1) **перовые** (лопаточные);

2) **спиральные** (с винтовыми канавками); 3) **специальные** (для сверления глубоких отверстий, кольцевые, комбинированные и др.).

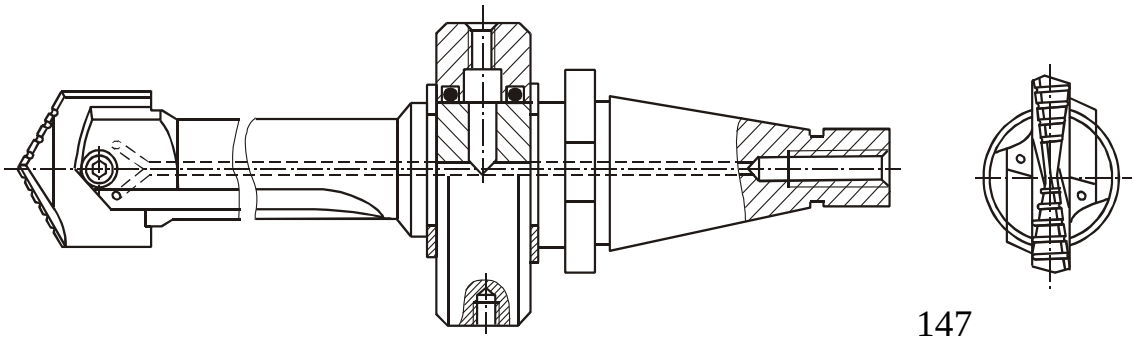




а)



б)



в)

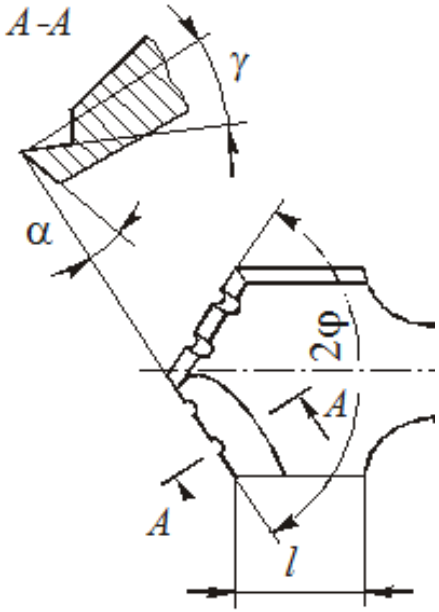
Мерные режущие инструменты. Свёрла (продолжение)

В качестве материала рабочей части в основном используются быстрорежущие стали и прежде всего сталь марки **Р6М5**. В последние годы в больших объемах выпускаются различные конструкции сверл, оснащенных **твердыми сплавами.**

Достоинствами перовых сверл являются **простота конструкции**, а также возможность изготовления их **любого диаметра** и длины **даже в условиях ремонтных мастерских.**

Недостатки перовых сверл: 1) **затрудненные условия отвода стружки**; 2) **склонность к вибрациям** из-за малой жесткости режущей части; 3) **небольшой запас на переточку**; 4) **низкую производительность** процесса сверления **из-за малых значений подачи** и в связи с необходимостью **периодического вывода сверла** из отверстия для освобождения от стружки.

Часто применяется для сверления неглубоких **ступенчатых отверстий** на **станках-автоматах**, что позволяет сократить число операций и, следовательно, инструментов. **Сборное** перовое сверло с **режущей сменной пластиной** может закрепляться в стержне любой длины.



Для улучшения отвода стружки предусматривается ее деление по ширине с помощью **стружкодробящих канавок на задних поверхностях**. Через патрон и отверстие в стержне можно подавать под давлением СОЖ, которая одновременно с отводом тепла из зоны резания вымывает стружку из отверстия.

Набор быстросменных пластин, разных по диаметру, позволяет сократить номенклатуру сверл и расходы на их изготовление. Такие сверла в последние годы стали широко применять **на многооперационных станках с ЧПУ**, главным образом при рассверливании отверстий.

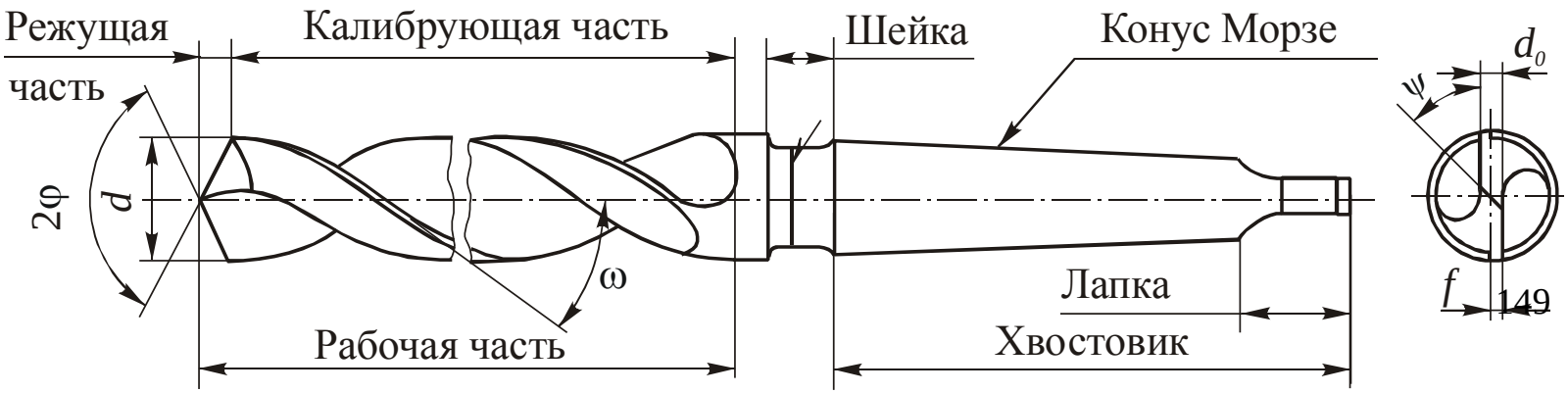
Схемы резания, применяемые

Свёрла (продолжение)

Спиральные или, **правильнее, винтовые, сверла** были впервые показаны на Всемирной торговой выставке в 1867 г. американской фирмой Морзе. До настоящего времени основные особенности их конструкции сохранились практически неизменными. Спиральные сверла нашли наибольшее применение благодаря следующим **достоинствам:** 1) **хороший отвод стружки** из обрабатываемого отверстия из-за наличия винтовых канавок; 2) **положительные передние углы** на большей длине главных режущих кромок; 3) **большой запас на переточку**, которая производится **по задним поверхностям** и **может выполняться вручную** или на специальных заточных станках, в том числе станках-автоматах; 4) **хорошее направление сверла в отверстии** из-за наличия калибрующих ленточек на наружной поверхности калибрующей части инструмента.

Производство спиральных сверл осуществляется в **специализированных** цехах или **заводах** в условиях крупносерийного или массового производства. **Поэтому**, несмотря на сложное конструктивное исполнение, **себестоимость этих сверл невелика.**

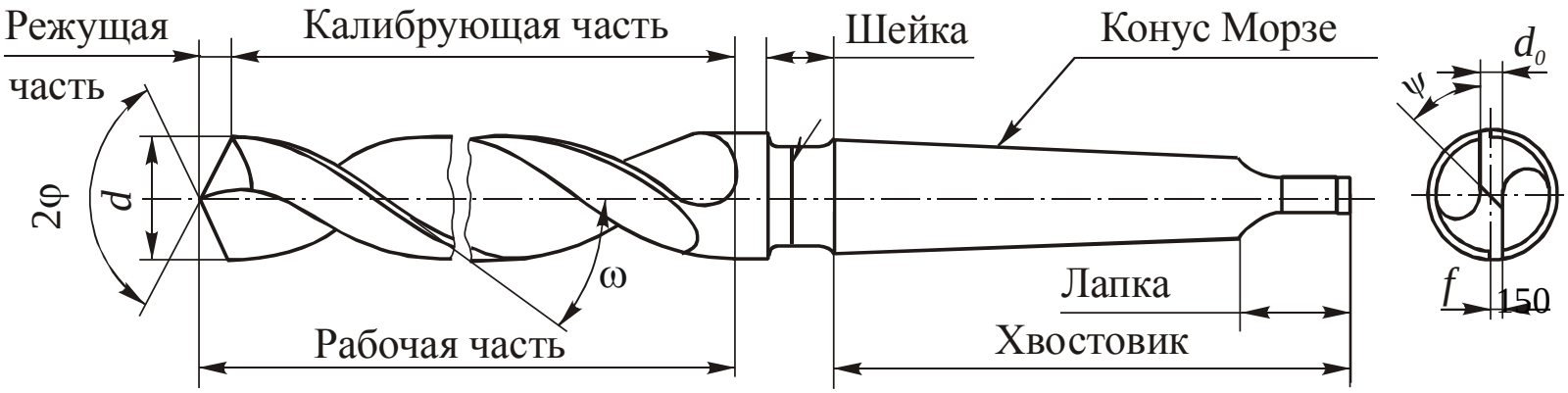
На **конической режущей части** с углом **2φ** при вершине расположены **две главные режущие кромки** – линии пересечения винтовых передних и задних поверхностей. Форма задних поверхностей определяется методом заточки. В результате пересечения двух задних поверхностей образуется **поперечная режущая кромка**, наклоненная к главной режущей кромке **под углом ψ**. Эта кромка располагается на сердцевине сверла **с условным диаметром** $d_0 = =(0{,}15\ldots0{,}25)d$, где d – диаметр сверла.



Свёрла (продолжение)

Две вспомогательные режущие кромки лежат на пересечении передних поверхностей и цилиндрических калибрующих ленточек, направляющих сверло в отверстии и образующих калибрующую часть сверла. **Угол наклона вспомогательных кромок к оси сверла ω определяет в основном величину передних углов γ** на главных режущих кромках, которые переменны по величине в разных точках этих кромок. Для снижения трения **калибрующих ленточек** о стенки отверстия их ширину в зависимости от диаметра сверла принимают равной $f = =(0{,}32…0{,}45)\sqrt{d}$, а высоту $\Delta = 0{,}1…0{,}3$ мм. Во избежание защемления сверла в отверстии предусматривается **уменьшение его диаметра к хвостовику – обратная конусность**, равная 0,03…0,12 мм на 100 мм длины рабочей части. У **сердцевины сверла** с целью повышения его прочности и жесткости предусматривается **прямая конусность**, т.е. увеличение ее диаметра в направлении к хвостовику, равное 1,4…1,7 мм на 100 мм длины. При **переточке сверла диаметр** отверстия и глубина канавок будут немного уменьшаться.

Режущая и калибрующая части сверла составляют его рабочую часть, по длине которой сверла делятся на короткую, среднюю и длинную серии. Стандартные спиральные сверла изготавливают диаметром 0,1…80 мм **с допусками по *h*8…*h*9**. За рабочей частью сверла следует шейка, которая используется для нанесения маркировки сверла: диаметра, материала режущей части, товарного знака завода-изготовителя.

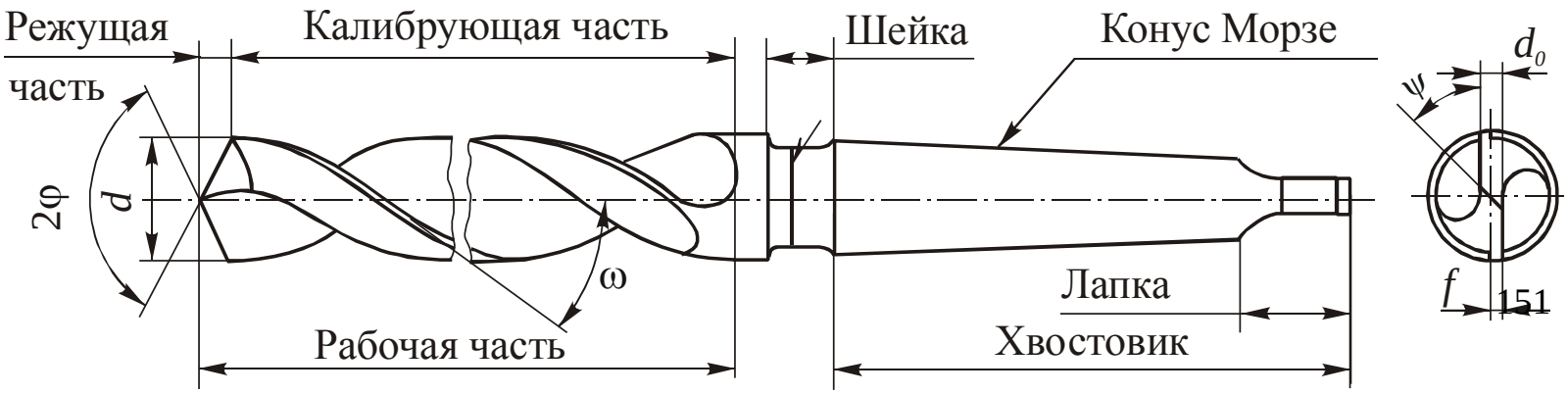


Свёрла (продолжение)

Хвостовики бывают двух типов: **конические** (типа Морзе) **с лапкой на конце** для сверл d = 6…80 мм и **цилиндрические** – для сверл d = 0,1…20 мм. У сверл d > 8 мм **хвостовики делают из конструкционной стали** 45 или 40Х, **свариваемой с рабочей частью**. Для **увеличения силы трения** в месте крепления сверла в патроне и **возможности правки сверл** по длине **хвостовики термически не обрабатывают. Лапки сверл** для упрочнения **закаливают**, так как они используются для выбивания сверл из отверстия шпинделя станка или из переходной втулки.

Угол при вершине 2φ, который играет роль главного угла в плане. Обычно 2φ =116…120°. При этом **главные режущие кромки строго прямолинейны** и совпадают с линейчатой образующей винтовой передней поверхности. При заточке сверл угол заточки ($2\varphi_{зат} \neq 2\varphi$) может быть изменен в пределах от 70 до 135°. При этом **режущие кромки становятся криволинейными**, меняются соотношение ширины и толщины срезаемой стружки, а также величины передних углов на главных режущих кромках. Соответственно меняются степень деформации срезаемого припуска, силы и температура резания и условия отвода стружки.

На основании производственного опыта оптимальное значение угла 2φ рекомендуется брать в зависимости от обрабатываемого материала, например, при обработке **конструкционных сталей** 2φ = **116…120°**, нержавеющих и высокопрочных сталей 2φ = 125…150°, чугуна, бронзы 2φ=90…100°, чугуна высокой твердости 2φ = 120…125°, цветных металлов (алюминиевые сплавы, латунь, медь) 2φ = 125…140°.



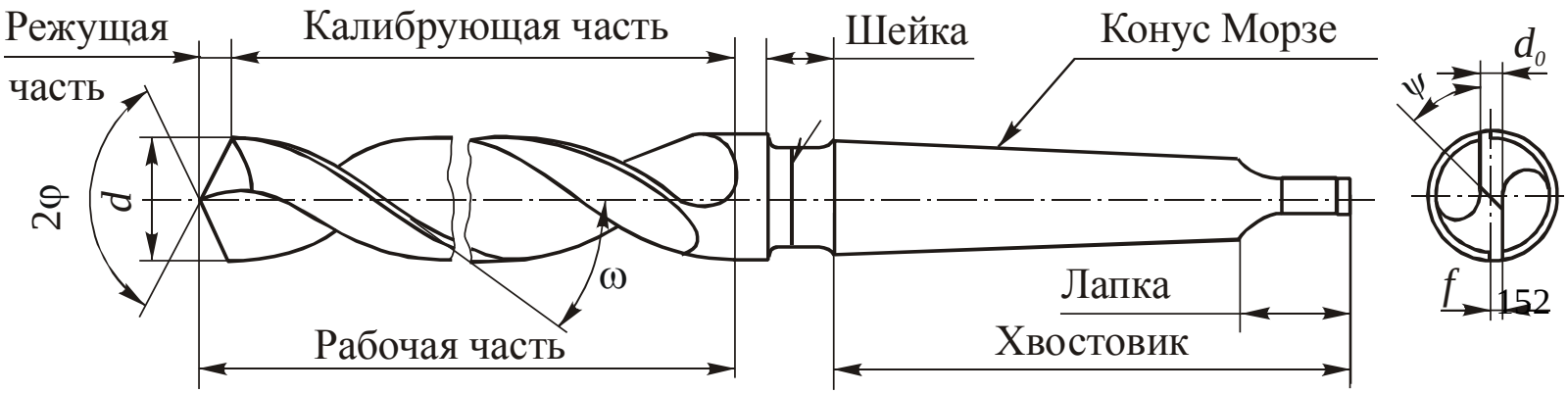
Свёрла (продолжение)

Угол наклона винтовой канавки ω, замеренный на наружном диаметре сверла, является одним из важнейших параметров, определяющих величину передних углов в каждой точке главных режущих кромок. У стандартных сверл этот угол назначается в зависимости от их диаметра: **ω = 25…28°** для $d < 10$ мм и **ω = 28…32° для $d > 10$ мм**. Так как этот угол оказывает также большое влияние на отвод стружки из зоны резания, то **у специальных спиральных сверл его увеличивают до 40…60°.**

Однако с **увеличением угла ω снижается поперечная жесткость сверл**, увеличиваются значения передних углов, особенно на периферийных участках режущих кромок, что может сильно **ослабить прочность** режущего клина и **снизить стойкость** сверл. В этом случае **выполняют подточку** передней поверхности **с целью уменьшения углов γ.**

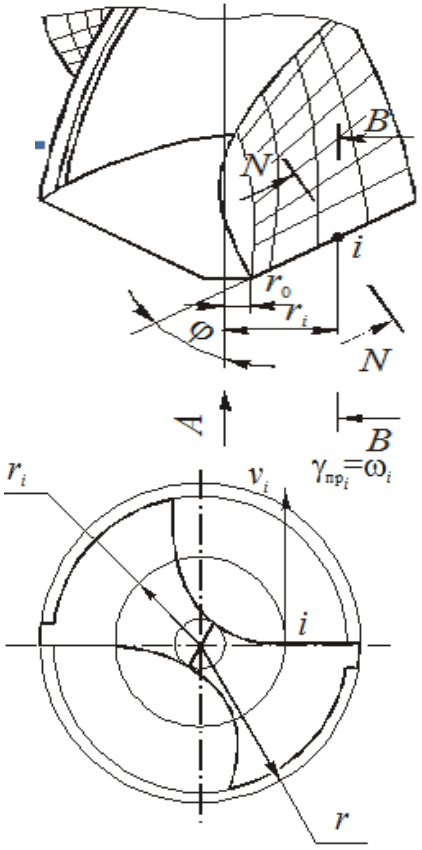
При проектировании новых конструкций сверл для обработки определенных видов материалов по рекомендациям *ISO* значение ω при обработке сталей следует брать равным 25…35°, чугунов и других хрупких материалов – 10…15°, алюминия, меди и других вязких легкообрабатываемых материалов – 35…45°.

Передний угол γ спиральных сверл имеет переменное значение по длине главных режущих кромок. У стандартных сверл с прямолинейными режущими кромками образующая поверхности совпадает с режущей кромкой и составляет угол φ с осью сверла. При ее винтовом движении траектории каждой точки режущей кромки представляют собой винтовые линии с одним и тем же шагом P, который можно измерить на наружном диаметре сверла: $P = \pi d / \mathrm{tg}\,\omega$

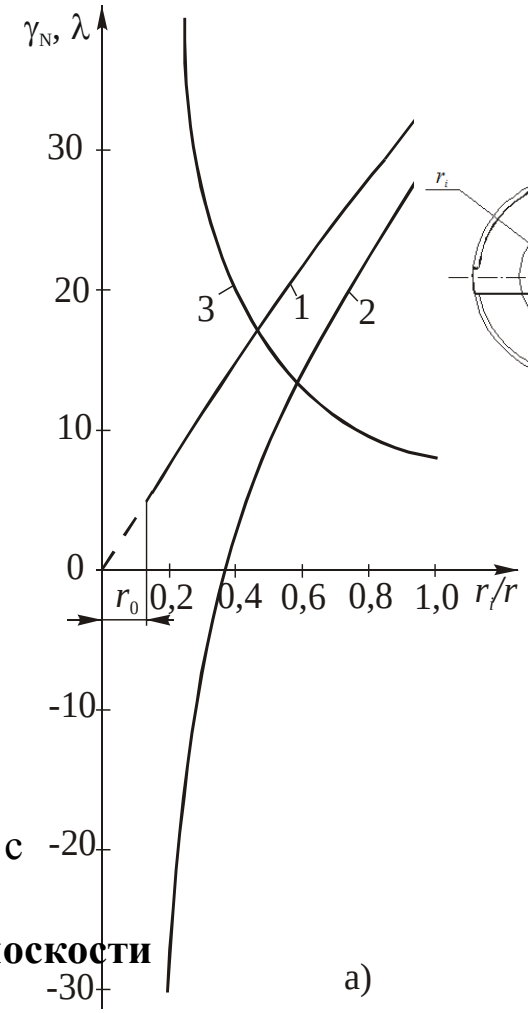


Свёрла (продолжение)

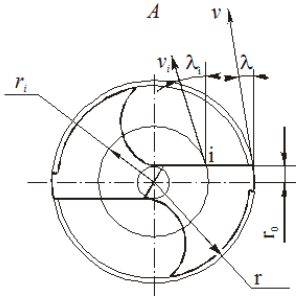
Распределение **передних углов γ_{Ni}** и **угла наклона главной режущей кромки λ_i** по длине главных режущих кромок спирального сверла: ***а*: *1* – γ_{Ni}** у сверл с режущими кромками, расположенными в осевой плоскости, ***2*** **– γ_{Ni}** и ***3*** **– λ_i у стандартных сверл**; ***б*** – поворот вектора скорости резания v_i в разных точках режущей кромки; ***в*** – определение фактического значения угла γ_{Ni} с учетом угла поворота η_i координатных плоскостей.



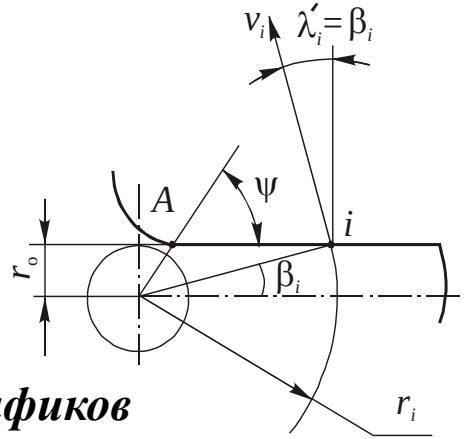
для **графика *1*** – для сверла с режущими кромками, расположенными **в осевой плоскости**



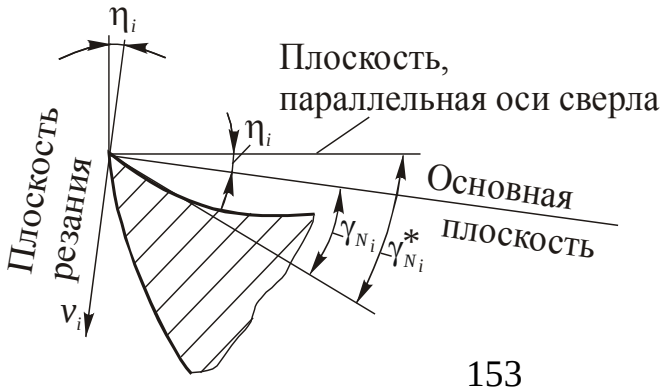
а)



для графиков 2 и 3



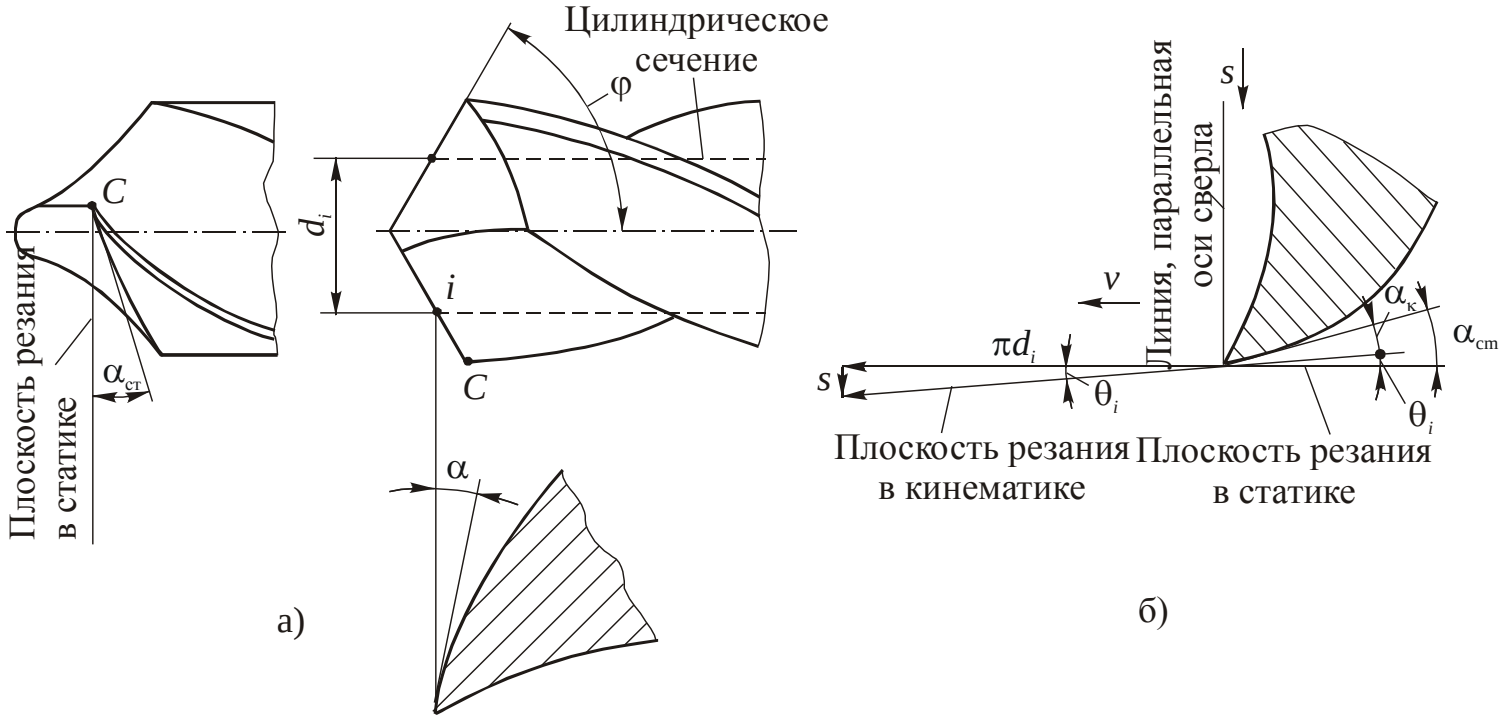
б)



в)

Свёрла (продолжение)

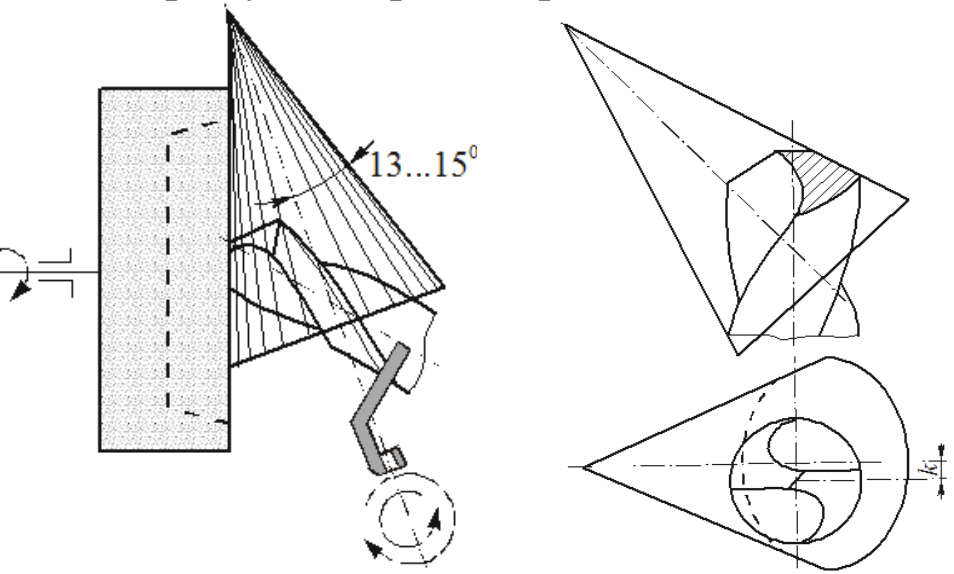
Задний угол α на главных режущих кромках создается путем заточки перьев сверл по задним поверхностям, которые могут быть оформлены как части плоской, конической или винтовой поверхностей. У спиральных сверл принято измерять задний угол в цилиндрическом сечении, соосном со сверлом, как угол зазора между **касательной к задней поверхности** и ***поверхностью резания***. За последнюю принимают в **статике** плоскость, проходящую через главную режущую кромку перпендикулярно к осевой плоскости сверла, т.е. без учета угла поворота координатных плоскостей на угол θ_i (η_i). На практике контроль заднего угла α производится с помощью инструментального микроскопа в точке *C*, лежащей на наружном диаметре, т.е. на ленточке (рис. *а*).



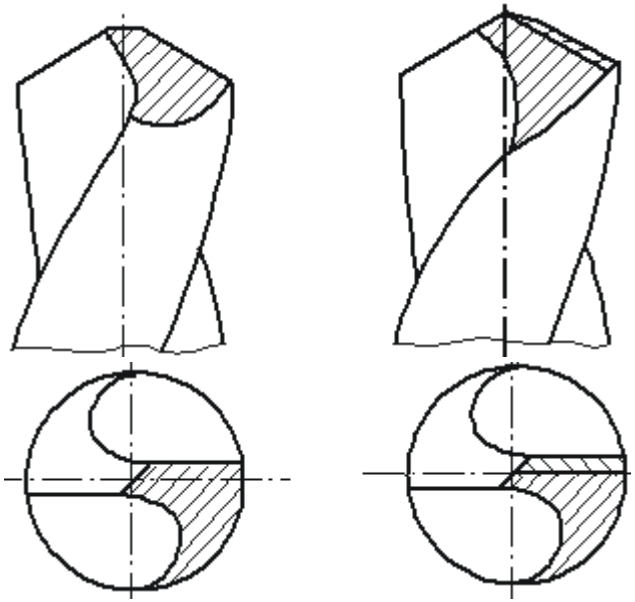
Задние углы в статике $\alpha_{ст}$ и кинематике $\alpha_к$ спирального сверла в цилиндрическом сечении

Свёрла (продолжение)

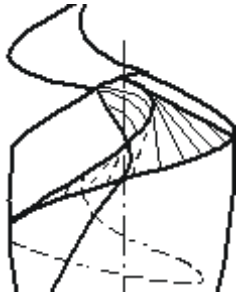
Способ заточки (всегда выполняется по ***задней поверхности***) должен обеспечить некоторое ***увеличение*** α_i с приближением i-й точки ***к оси сверла*** из-за влияния подачи на величину **кинематического заднего угла** $\alpha_к$, которое становится более заметным в точках режущих кромок, расположенных **ближе к сердцевине**.



Коническая заточка – величина угла α регулируется смещением k оси сверла.



Одноплоскостная и двухплоскостная заточка

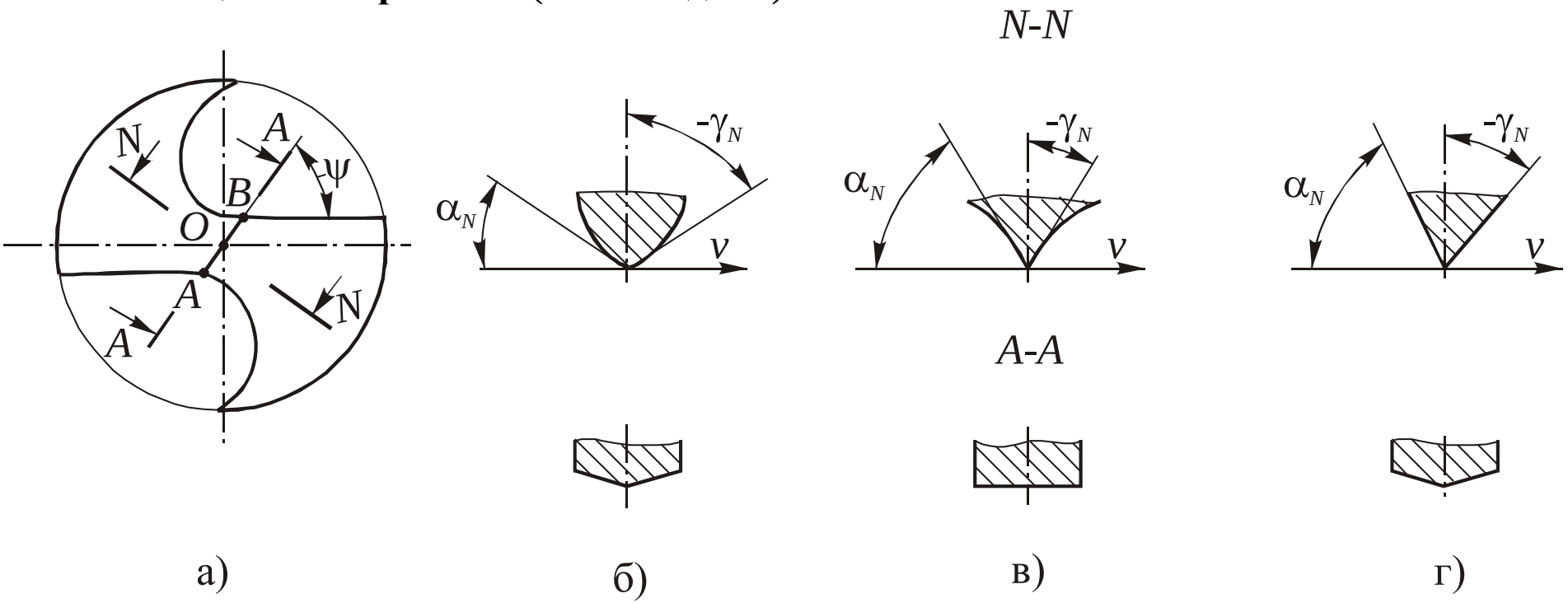


Винтовая заточка - в **серийном производстве** сверл

При ***одноплоскостной*** заточке угол α должен быть 20…25°, что резко ослабляет режущий клин. Поэтому такой метод нашел применение только при ***заточке сверл малых диаметров*** (d < 3 мм). **Двухплоскостная** заточка применяется гораздо чаще, особенно у **твёрдосплавных** свёрл.

Свёрла (продолжение)

Поперечная режущая кромка сверла формируется при заточке как линия пересечения задних поверхностей перьев. Она состоит из двух полукромок *AO* и *OB* (рис. *а*) являющихся продолжением до оси двух главных режущих кромок. Передние и задние поверхности этих полукромок являются частью главных задних поверхностей сверла. При всех методах заточки **передние углы на полукромках имеют отрицательные значения**. Наибольшее из них будет при конической заточке ($\gamma_N \approx -\varphi$) (рис. *б*), а наименьшее – при винтовой заточке (рис. *в*). По этой причине **на поперечную режущую кромку**, несмотря на ее небольшую длину, приходится до **40…60% осевой составляющей силы резания (силы подачи)**.

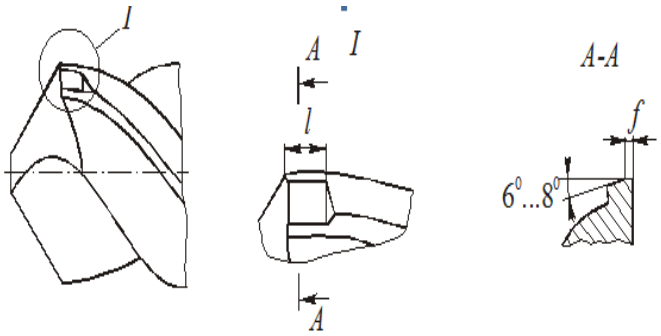


Геометрические параметры поперечной режущей кромки спирального сверла:
а – вид сверла с торца; *б* – коническая заточка; *в* – винтовая заточка; *г* – двухплоскостная заточка

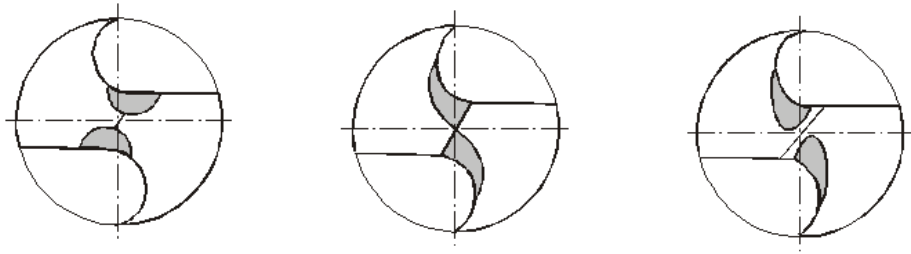
Свёрла (продолжение)

Недостатки геометрии стандартных спиральных сверл: 1) наличие **нулевых задних углов на вспомогательных** режущих кромках; 2) **отрицательные** передние углы на **поперечной** режущей кромке; 3) **большие передние углы** на **периферийных уча**стках главных режущих кромок. Для уменьшения недостатков:

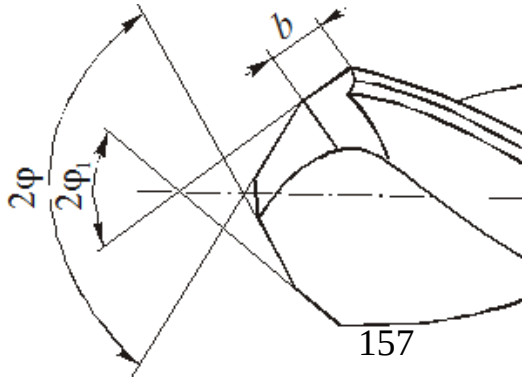
1) **подточка ленточки** путем создания на вспомогательных кромках задних углов $\alpha_1 = 6…8°$ с оставлением небольшой фаски шириной $f = 0{,}3…0{,}1$ мм на длине $l=(0{,}1…0{,}2)d$, чтобы не ухудшить направление сверла в отверстии. Благодаря этому снижается сила трения на ленточках, а при сверлении сталей на них предотвращается налипание мелкой стружки, что приводит к повышению стойкости инструмента**.**



2) **подточка поперечной режущей кромки**, **снижающие осевую составляющую** силы резания, **улучшающие условия засверливания** и увеличивающие производительность процесса сверления за счет **увеличения подачи**.



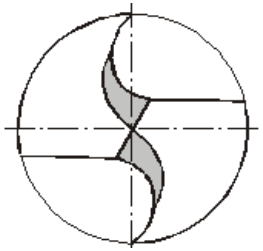
3) **заточка под двойными углами при вершине сверла.** При этом $2\varphi = 116°$, а $2\varphi_1 = 70…90°$, с шириной дополнительной заточки по уголкам $b=(0{,}1…0{,}2)d$. Уменьшается износ наиболее уязвимых периферийных участков режущих кромок сверла, где скорость резания наибольшая, а передние углы меньше на 7…8°.

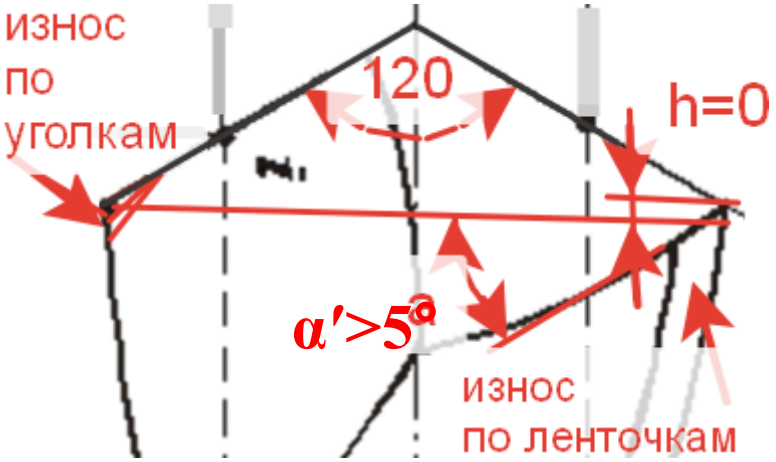


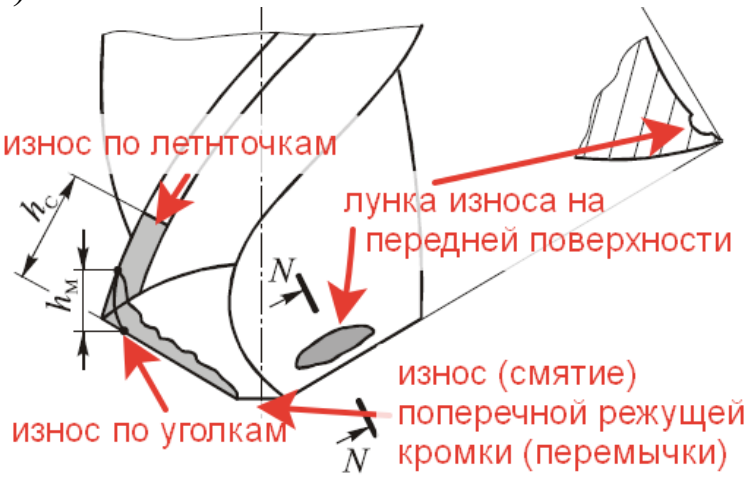
Свёрла (продолжение)

При заточке свёрл необходимо контролировать:

1) **угол при вершине** 2φ = 90 - 140° в зависимости от твёрдости обрабатываемого материала (для сверления конструкционной стали средней твёрдости **2φ ≈120°**);
2) уголки сверла должны быть **на одном уровне (Δh=0 мм)**;
3) **отсутствие износа по уголкам** или их завал;
4) наличие **положительного заднего угла α>7°**, соответствующего положительному углу **α′>5°;**
5) **отсутствие износа по ленточкам**;
6) **отсутствие завала режущей кромки** рядом с поперечной режущей кромкой или смятие поперечной режущей кромки;
7) при диаметре сверла более 8 мм желательна **подточка поперечной режущей кромки;**
8) **обратная конусность** по наружному диаметру (обеспечивается при изготовлении свёрл).

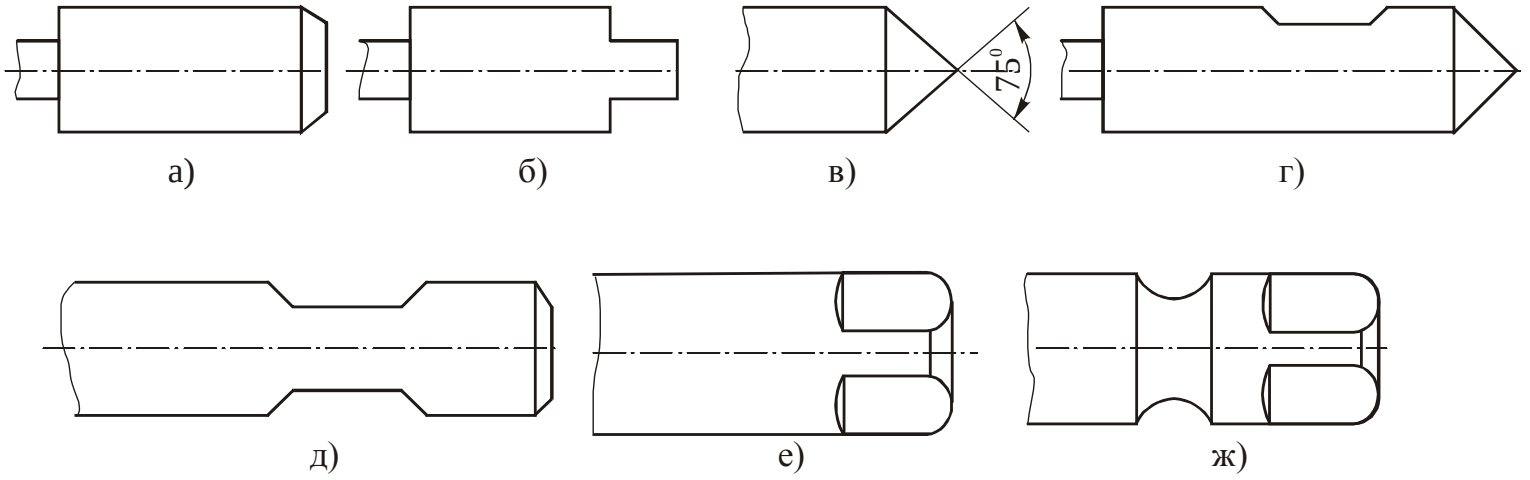






Свёрла (продолжение)

Концевые инструменты изготавливают с цилиндрическими или коническими хвостовиками, которые входят в отверстия шпинделей станков непосредственно или через переходные втулки, оправки и патроны. Достоинствами цилиндрических хвостовиков являются: **простота** при высокой точности изготовления, **возможность регулирования вылета инструмента в осевом направлении**. Недостаток – наличие зазора при подвижной посадке. Для **передачи крутящего момента** некоторые типы хвостовиков **имеют поводки в виде квадратов, лысок или вырезов** для крепления винтами. Гладкие цилиндрические хвостовики применяют у инструментов **малых диаметров**, закрепляемых в **цанговых** или **кулачковых патронах**. Отверстие **цангового патрона** должен быть **равен диаметру цилиндрического хвостовика, хвостовик обработан по 9-7 квалитету.**

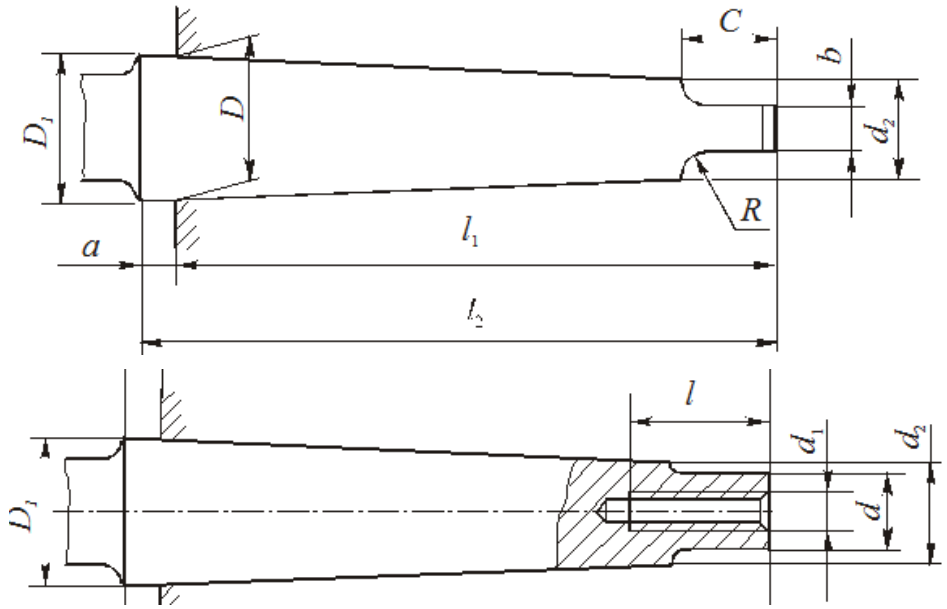


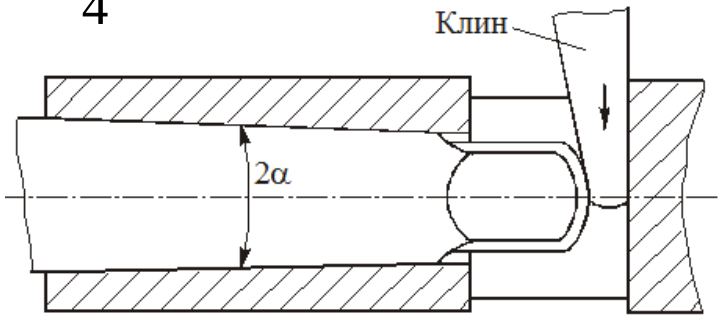
Задние углы в статике $\alpha_{ст}$ и кинематике $\alpha_к$ спирального сверла в цилиндрическом сечении

Свёрла (продолжение)

Лучшее центрирование с посадкой без зазора обеспечивает крепление с помощью **конических хвостовиков**. Чаще всего используют самотормозящиеся хвостовики типа Морзе (№ 0…6) **конусностью** от **1:19,002** до **1:20,02** . Конусы Морзе распределены по 8 категориям. За рубежом это МТ0, МТ1, МТ2, МТ3, МТ4, МТ5, МТ6, МТ7. В Германии такая же нумерация, но буквенное обозначение МК. В нашей стране и на постсоветском пространстве КМ0, КМ1, КМ2, КМ3, КМ4, КМ5, КМ6 и №80. Используются и **метрические** конусы с конусностью **1:20** (угол конуса 2α = 2°50′). Достоинством конусов является возможность передачи крутящих моментов без дополнительных элементов и только за счет **сил трения на поверхностях контакта конуса с гнездом**. При этом, например, у сверл момент трения увеличивается при возрастании осевой составляющей силы резания. В формуле α = 2°50′ , Δα=10°, μ=0,096 (сталь по стали)

$$M_{кр} = \frac{\mu P_o}{\sin\alpha} \cdot \frac{D+d}{4} \cdot (1-0{,}04\Delta\alpha).$$





Хвостовики с **лапкой** и с **затяжкой в гнездо болтом (штревелем). Лапка не должна передавать крутящий момент**. Она предназначена только для выбивания инструмента из гнезда с помощью клина

Для увеличения силы трения **хвостовики** обычно **термически не обрабатывают**, за исключением лапки, которую закаливают для предохранения от смятия. Чтобы не повредить клином центровое отверстие, торец лапки обрабатывают по радиусу.

В наши дни конусы Морзе изготавливают в соответствие с международным стандартом **ISO** и **DIN**. В России система стандартизации объединяет в один класс как **просто конусы Морзе**, так и **метрические** и **инструментальные** (ГОСТ 25557-82). Ситуация с единым ГОСТом сложилась из-за того, что конусы Морзе со времен СССР пользуются в России большой популярностью, а параллельно с этим появилось много новых.

С развитием машиностроительной отрасли возникла потребность в расширении модельного ряда конусов Морзе. Для этого был разработан метрический конус, который не имел особых конструктивных отличий от своего предшественника. Его конусность равнялась 1:20, при этом угол 2°51’51″, а уклон 1°25’56″. **Метрические конусы** позволили создать большой выбор инструмента для различных станков и операций. Классифицируются они на две категории: **большие** и **малые.** Большие обозначаются, например № 120, 200, и цифры соответствуют наибольшему диаметру метрического конуса.

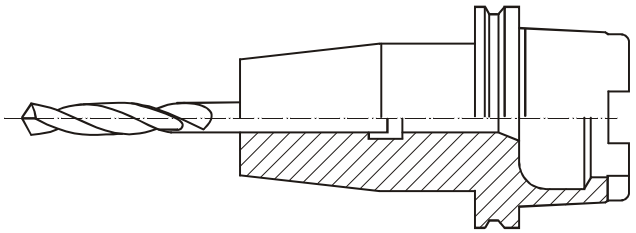
Особой популярностью, благодаря своему качеству, пользуются инструментальные конусы Морзе компаний HSK, Capto и Kennametal. Хорошая устойчивость к изменениям температуры и соответствие жестким требованиям в станкостроении позволило конусам Морзе этих брендов стать лидерами рынка. HSK – это полые инструменты с конусностью 1:10. Обозначаются буквой латинского алфавита и **цифрой**, обозначающей **больший диаметр фланца**. Главной особенностью таких изделий является быстрая замена инструмента, что очень важно в станках с ЧПУ.

По причине избыточности длины конуса Морзе при некотором его применении, был образован стандарт укороченных конусов. В обозначении конуса находится значение наибольшего диаметра образованного после уменьшения длины при сохранении соотношения. Таким образом девять типоразмеров укороченных конусов, B7, B10, B12, B16, B18, B22, B24, B32, B45 получили распространение при установке сверлильных патронов и другого инструмента.

Для увеличения силы трения **хвостовики** обычно **термически не обрабатывают**, за исключением лапки, которую закаливают для предохранения от смятия. Чтобы не повредить клином центровое отверстие, торец лапки обрабатывают по радиусу.

Широкое применение у быстросменных инструментов нашли также хвостовики с **конусностью 7:24** (2α =16°35′). Они обеспечивают хорошее центрирование, но **не являются самотормозящими.** Поэтому для передачи крутящего момента на **торце хвостовиков** предусмотрены **шпоночные пазы**. Крепление в шпинделе осуществляется путем затяжки **штревелем** или **специальным захватом** за цилиндрическую выточку на конце хвостовика. Раньше такие конусы применялись на фрезерных станках для крепления фрез в шпинделе непосредственно или через оправку. Сейчас их стали широко применять для крепления режущих и вспомогательных инструментов **на станках с ЧПУ.**

Разработан ГОСТ Р 51547–2000 на **полые** конические хвостовики типа *HSK* (Hohlschafte Kegel), обеспечивающие надежное базирование и закрепление режущих инструментов при сверхскоростной обработке (с частотами вращения **более 8000 мин$^{-1}$**). В отличие от хвостовиков 7:24, они имеют значительно **меньшие габариты**, а крепление инструмента в них осуществляется по **«горячей» посадке** – с натягом (*H*7/*p*6, *H*7/*n*6). Действие таких патронов основано на том, что при нагреве в специальных устройствах посадочное отверстие патрона увеличивается в диаметре. Хвостовик закрепляемого инструмента вставляется в это расширенное отверстие. После охлаждения патрона до комнатной температуры диаметр посадочного отверстия возвращается к исходному размеру. При этом обеспечиваются очень большие усилия зажима.



Крепление по «горячей» посадке сверла в патроне типа *HSK* для сверхскоростной обработки

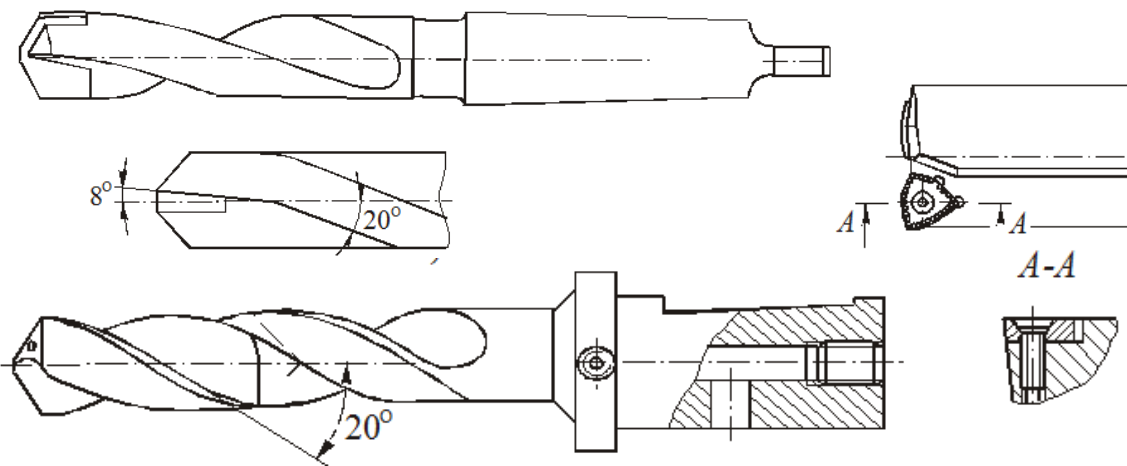
У всех концевых инструментов на торцах предусматривают центровые отверстия, необходимые для их изготовления и переточки. Они, как правило, имеют предохранительные выточки или фаски, так как при повреждении конической опорной поверхности центровых отверстий увеличивается биение режущих кромок. У инструментов **малых диаметров** вместо отверстий делают **прямые конусы.**

Особенности конструкций твердосплавных сверл. Удельный вес твердосплавных сверл в общем объеме их применения составляет **не более 10%.** Это объясняется неблагоприятными условиями работы твердых сплавов при сверлении: нежестким (**консольным) креплением сверл**; большими осевыми нагрузками; **переменной величиной скорости резания**, уменьшающейся до нуля на поперечной режущей кромке; **большой шириной срезаемой стружки**; опасностью **появления вибраций и пакетирования стружки** в канавках сверла; **малыми числами оборотов** и недостаточными мощностью, жесткостью и точностью сверлильных станков.

Более широкое распространение твердосплавные сверла получили **при сверлении чугунов, цветных металлов и неметаллических материалов** (мрамор, кирпич, пластмассы и т.п.). При сверлении сталей часто наблюдается **выкрашивание режущих кромок**, особенно в виде разрушения поперечной режущей кромки. **Повышение жесткости сверл** за счет максимально возможного **сокращения длины рабочей части** инструмента, хотя при этом приходится сокращать запас на переточку, использование **внутреннего напорного охлаждения** и другие усовершенствования позволяют получать **хорошие результаты при сверлении труднообрабатываемых** сталей и сплавов, т.е. там, где быстрорежущие сверла имеют очень низкую стойкость. Для оснащения сверл используют **твердые сплавы** марок **ВК8**, ВК10М, ВК15М, обладающие наибольшей прочностью. **Увеличивают диаметр сердцевины сверл** до $d_0 =$ (0,25…0,35)d и выполняют **подточку поперечной режущей кромки**. Мелкоразмерные сверла (***d*=2…6 мм**) изготавливают **цельными** твердосплавными или составными, когда хвостовик изготавливается из стали, а рабочая часть – из твердого сплава. Сверла d =10…30 мм оснащают **напайными пластинами** или **коронками из твердого сплава**. При этом корпус сверла изготавливается из стали 9ХС или Р6М5. На корпусах таких сверл **направляющие ленточки обычно не делают**, так как при высоких скоростях резания, допускаемых твердым сплавом, они **быстро выходят из строя** и не выполняют роли направляющих сверла. **Обратная конусность** только на твердосплавной режущей части с созданием вспомогательных углов в плане $\varphi_1 = 25…30'$. **Диаметр корпуса сверла занижается** на 0,2…0,3 мм по сравнению с диаметром конца твердосплавной части.

Твёрдосплавные свёрла (продолжение)

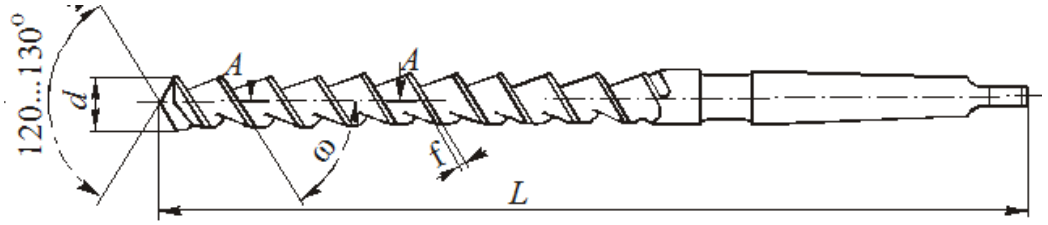
Угол при вершине **2φ=120…140°**, угол наклона стружечных канавок **ω=0…20°**, заточка двух- или трехплоскостная с задним углом на главных режущих кромках **α=7…9°**. Передний угол γ = 8°, а на **коронках с винтовыми канавками переменный**, как у быстрорежущих сверл, зависящий от угла ω. **Хвостовик конический** или **чаще всего цилиндрический**, как более технологичный. Наибольшую надежность имеют **сверла с напайными твердосплавными коронками и каналами для внутреннего подвода СОЖ**. В этом случае длина коронок принимается равной (1…2)*d*, угол при вершине 2φ = 140°, угол наклона винтовых канавок ω = 20°, заточка двух- или трехплоскостная с подточкой поперечной режущей кромки, **хвостовик цилиндрический** с допуском по *h*6 и **лыской для крепления винтом** в специальном патроне. Могут применяться сверла, оснащенные **неперетачиваемыми пластинами (СМП)** с механическим креплением на корпусе. Они используются для сверления отверстий глубиной и диаметром *d* = 20…60 мм. В их корпусах выполнены отверстия для подвода СОЖ в зону резания. Стружечные канавки чаще всего делают прямыми, как более технологичные, для небольших диаметров стружечные канавки могут быть и винтовыми с углом наклона ω = 20°. СМП позитивного типа с α>0 в форме параллелограмма, ромба, прямоугольника или неправильного треугольника с шестью режущими кромками и центральным отверстием конической формы для крепления винтом. **Пластины располагаются с обеих сторон** относительно оси сверла таким образом, что **делят припуск по ширине с перекрытием в средней части.** Одна из пластин обрабатывает центральную часть отверстия, а другая – периферийную.

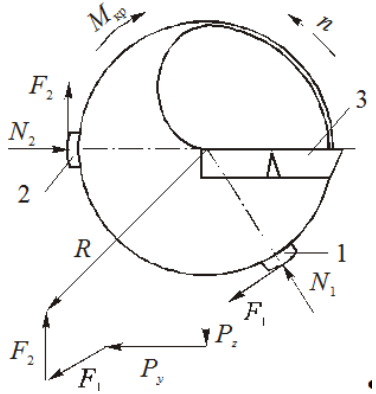


Сверло с **СМП** с механическим креплением на корпусе

Свёрла для глубоких отверстий

К **глубоким отверстиям** обычно относят отверстия, глубина которых превышает 5*d*. Однако уже при *h* > 3*d* в случае сверления отверстий спиральными сверлами наблюдаются трудности с подводом СОЖ в зону резания и удалением стружки из отверстия, что приводит к снижению стойкости инструмента. Улучшить условия отвода стружки из отверстий при использовании спиральных сверл можно за счет **увеличения угла наклона канавок до 40…60° (шнековые сверла)** и обеспечения **надежного дробления стружки**. В противном случае приходится периодически выводить сверло из отверстия для освобождения инструмента от стружки, что значительно снижает производительность, хотя при этом увод оси отверстия несколько уменьшается. Лучшие результаты дает использование внутреннего напорного подвода СОЖ в зону резания, которое обеспечивает **надежный отвод стружки из отверстия и отвод тепла из зоны резания**, благодаря чему повышается стойкость сверл. Причем эффективность СОЖ будет тем выше, чем выше скорость ее протекания через зону резания, которая определяется давлением и количеством (расходом) подаваемой жидкости.

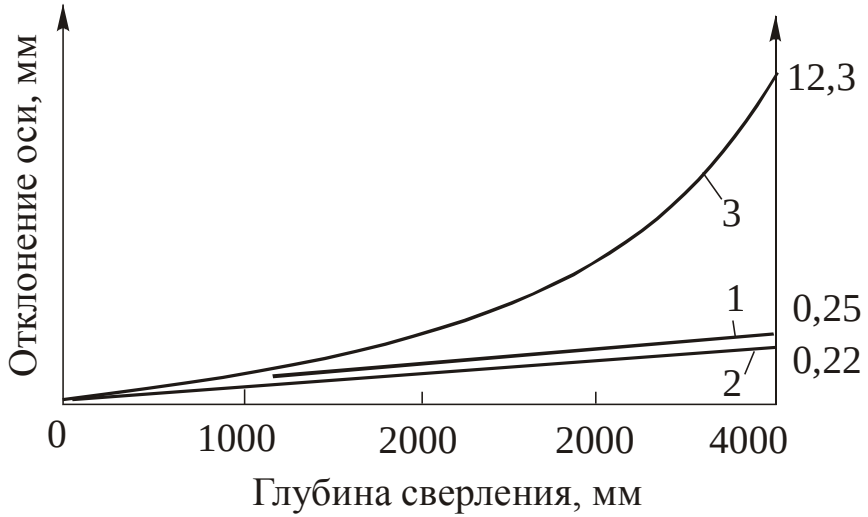




Чтобы свести до **минимума увод** и повысить точность отверстий используется способ **базирования режущей части инструмента с опорой на обработанную поверхность**. Расположение режущих кромок создаёт неуравновешенную радиальную составляющую силу резания, **прижимающую опорные направляющие корпуса к поверхности отверстия**, которые обработаны впереди идущими режущими кромками (рисунок справа). При этом **засверливание** должно производиться **через кондукторную втулку** или по предварительно подготовленному в заготовке отверстию глубиной (0,5…1,0)*d*.

Свёрла для глубоких отверстий (продолжение)

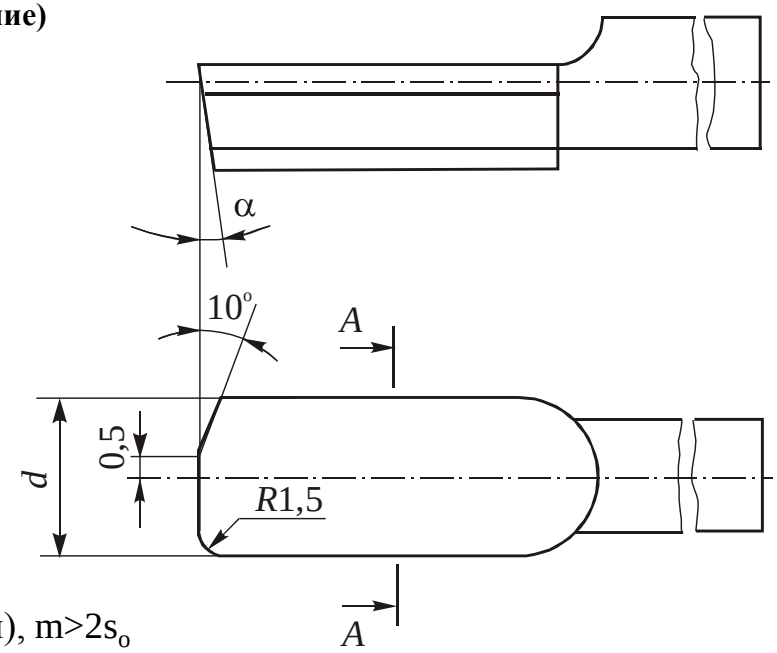
Был исследован увод оси сверла для трех схем сверления: 1) **заготовка вращается**, а сверло совершает движение подачи; **2) заготовка и сверло вращаются в противоположных направлениях**; 3) заготовка неподвижна, **вращается сверло**. **Наилучшим** является **второй вариант**, но к нему близок и первый. Худшие результаты дает третья схема, которая применяется в случаях сверления несимметричных заготовок с большой массой (например, корпусные детали).

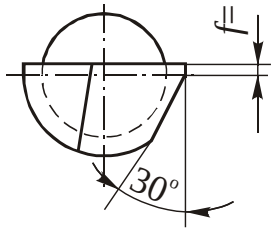


Исторически первой и наиболее простой конструкцией сверла глубокого сверления являются **пушечные сверла**, стержень большой длины, равной глубине обрабатываемого отверстия, срезанный в рабочей части примерно до половины диаметра и заточенный с торца с задним углом α. Во **избежание заедания** сверла в отверстии передняя поверхность расположена выше оси инструмента на величину 0,2…0,5 мм. Сверло имеет **одну главную режущую кромку,** перпендикулярную к оси. С другой стороны от оси сверла по торцу делают срез под углом 10°, отступив от оси на расстояние 0,5 мм. Со стороны вспомогательной режущей кромки на наружной поверхности срезают лыску под углом 30° с оставлением цилиндрической ленточки шириной f = 0,5 мм. У пушечного сверла передний угол $\gamma = 0°$, а задний $\alpha = 8…10°$. Для снижения осевой составляющей силы резания передняя поверхность пушечного сверла выполняется по радиусу R с очень небольшим занижением около оси инструмента. В процессе сверления радиальная односторонне направленная нагрузка воспринимается цилиндрической поверхностью сверла, опирающейся на стенку обработанного отверстия.

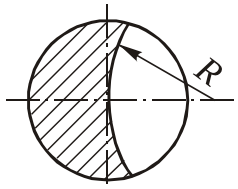
Свёрла для глубоких отверстий (продолжение)

а – **пушечное** сверло (d = 3…36 мм); не обеспечивается непрерывный отвод стружки, приходится сверло периодически выводить из отверстия. Из-за низкой поперечной жесткости и большой ширины срезаемого слоя оно склонно к вибрациям, работает с малыми подачами, применяется в единичном и мелкосерийном производстве.

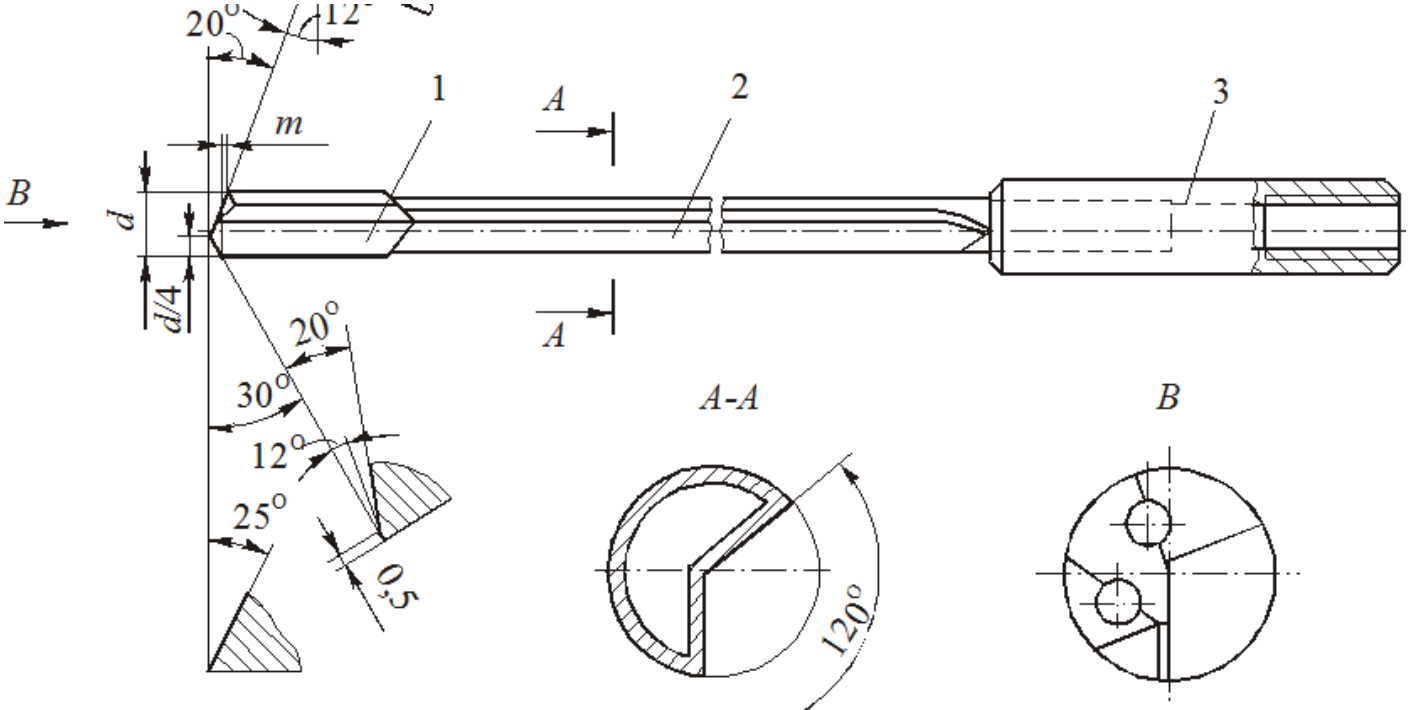




A-A



б – **ружейное** сверло (d =1…30 мм), m>2s_o с трубчатым стеблем из стали30ХМА; d≤2 мм – цельные твердосплавные;



Ружейные сверла имеют **внутренний канал** для подвода СОЖ и прямую (иногда винтовую) канавку для наружного отвода пульпы (смесь стружки и СОЖ). Они применяются для сверления отверстий глубиной (5…100)d и диаметром 1…30 мм, минимальный увод оси при высокой точности ($H8$…$H9$) и низкой шероховатости (Ra 0,32…1,25 мкм); СОЖ на масляной основе с противозадирными присадками (S, Cl, P)

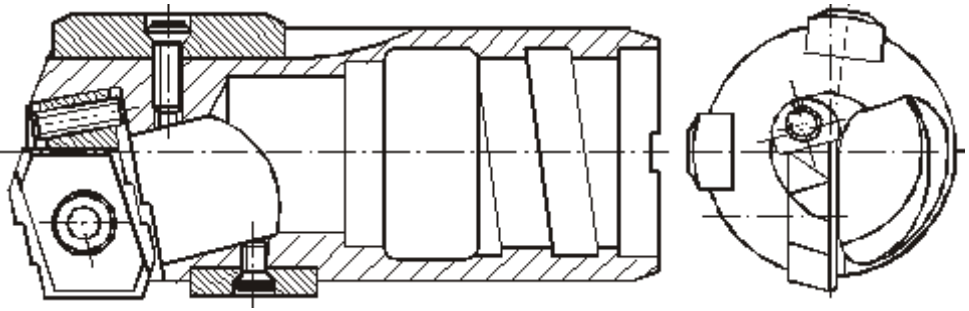
Свёрла для глубоких отверстий (продолжение)

Технические требования к изготовлению ружейных сверл весьма жесткие. Рабочая часть шлифуется с допуском по *h*5 или *h*6, а хвостовик – по *h*6. Радиальное биение наконечника относительно хвостовика не более 0,01…0,02 мм. При настройке операции необходимо обеспечить соосность шпинделя и сверла в пределах 0,01 мм, а соосность кондукторной втулки и шпинделя станка – в пределах 0,005 мм. Давление и расход **СОЖ на масляной основе** с противозадирными присадками (S, Cl, P) зависят от диаметра сверла. При малых диаметрах сверл давление СОЖ достигает 9…10 МПа. Применение эмульсий на водной основе приводит к **затиранию направляющих** и возникновению **вибраций.**

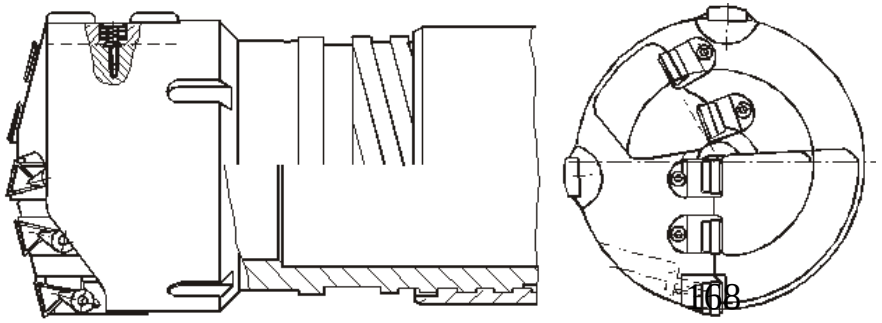
Недостаток ружейных сверл – **малая** поперечная и крутильная **жесткость** из-за ослабленного канавкой стебля, необходимо снижать подачу, а следовательно, и производительность процесса сверления.

Сверла и сверлильные головки БТА (Bohring and Trepanning Association) при малых диаметрах сверления ($d \leq 18$ мм) твердосплавные режущие и направляющие пластины напаиваются на трубчатый стебель, а при больших диаметрах ($d > 18$ мм) – на головки, навинчиваемые на стебель.

d = 6…18 мм



d = 18…65 мм



d > 65 мм

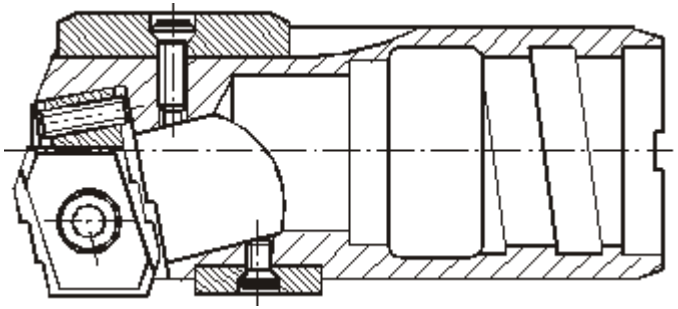
Сверла БТА имеют **толстостенный стебель кольцевого сечения** и работают с **наружной подачей СОЖ** между стенками стебля и обработанного отверстия и с **внутренним отводом СОЖ и стружки** через отверстия в головке и стебле. Подача СОЖ через **специальные маслоприемники**, которые устанавливаются на **специальных станках** для обработки глубоких отверстий, обеспечивающих торцевое уплотнение между заготовкой и кондукторной втулкой.

Достоинства сверл БТА состоят в том, что благодаря высокой жесткости трубчатого стебля подача увеличивается в 2…4 раза, а **стружка**, удаляемая из зоны резания по **внутреннему каналу, не портит обработанную поверхность.**

Глубина сверления отверстий сверлами БТА при горизонтальном положении заготовки достигает **100*d***, а при вертикальном – 50*d*.

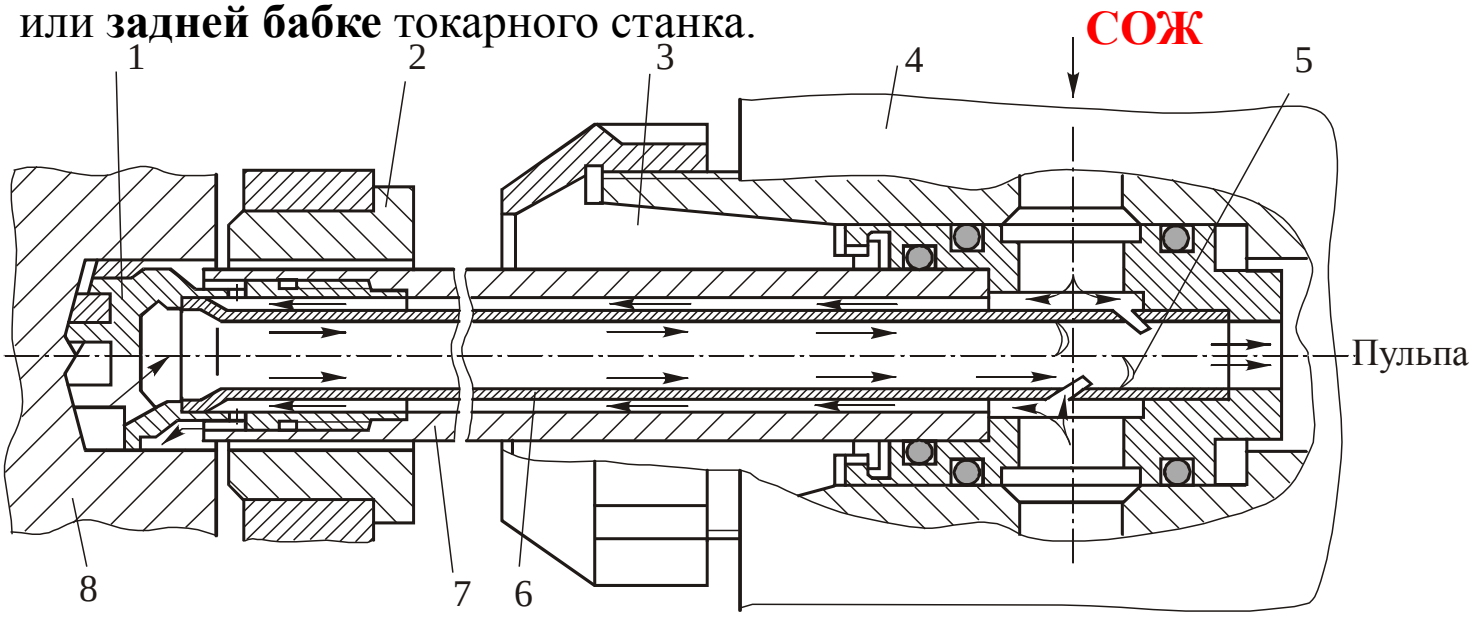
Недостатки сверл БТА: 1) **сложность** и высокая стоимость головки; 2) **трудности** с надежным **удалением стружки** через относительно небольшое по сечению входное отверстие в режущей части, при закупоривании которого процесс сверления становится невозможным.

Для дробления стружки на **напайных** твердосплавных пластинах **затачиваются стружкодробящие уступы**, а на **СМП – сферические мелкие лунки**, получаемые в процессе изготовления пластин.



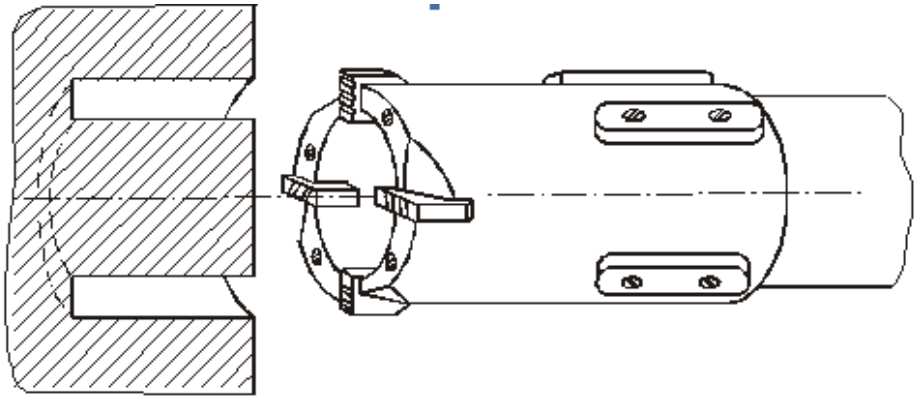
Головка БТА

Эжекторные сверла подобны головкам БТА. Отличия в способах подвода СОЖ и отвода пульпы (смесь стружки и СОЖ), суть которых состоит в том, что подвод осуществляется между стенками стебля *7* и тонкостенной трубы *6*, вставленной внутри стебля, и далее через отверстия в корпусе головки в зону резания. В хвостовой части тонкостенной трубы прорезаны С-образные пазы, исполняющие роль сопла *5* эжектора, отсасывающего пульпу через внутреннюю полость этой трубы. СОЖ делится на два потока: рабочий, идущий в зону резания, и **вспомогательный, идущий на слив** и составляющий примерно 1/3 от общего количества СОЖ. Именно этот вспомогательный поток и создает разряжение во внутренней трубе. Под действием атмосферного давления рабочий поток, пройдя через зону резания, вместе со стружкой всасывается в зону пониженного давления и уходит на слив. Поэтому **эжекторные сверла** могут использоваться на универсальных станках, не требуются специальные маслоприемники, а подача и отвод СОЖ осуществляются с помощью специальных патронов *4* на шпинделе сверлильного станка или **задней бабке** токарного станка.



Эжекторное сверло

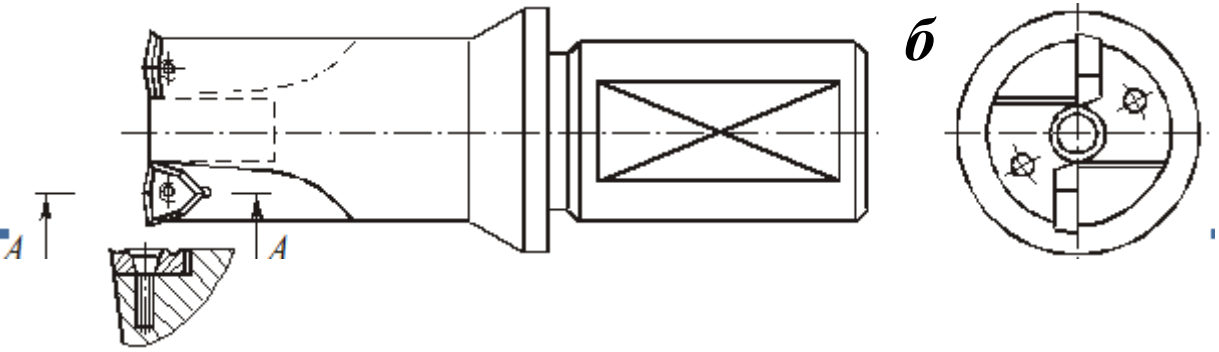
Кольцевые сверла – для обработки сквозных отверстий диаметром свыше **50 мм**



а

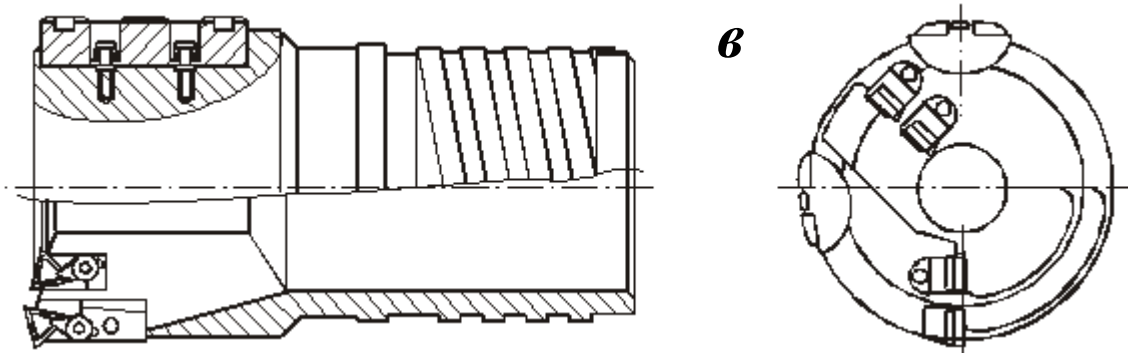
Кольцевые сверла:

а – с механическим креплением режущих и направляющих пластин;



б

б – для **неглубоких** отверстий, оснащенные СМП;

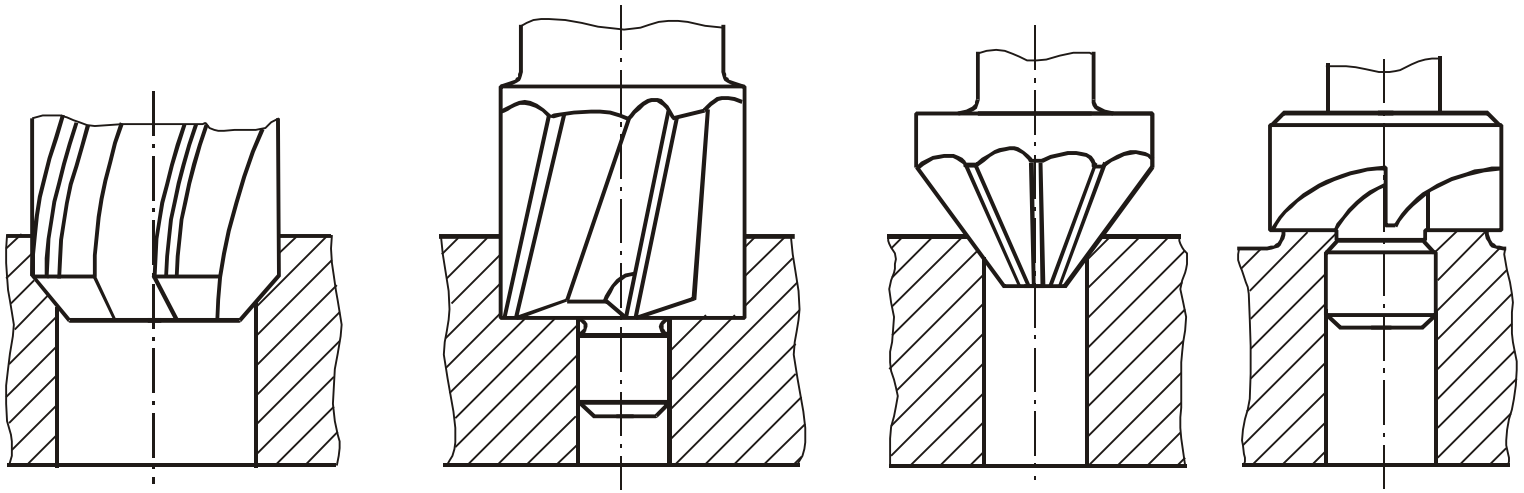


в

в – оснащенные СМП головки одностороннего резания **с внутренним отводом стружки** для сверления глубоких отверстий

При сверлении **глубоких отверстий диаметром** более **120 мм** и **глубиной 100*d*** применяют **внутренний отвод стружки** через отверстия в корпусе головки и стебле **кольцевого сверла**. Для крепления пластин в сверлах больших диаметров используют промежуточные вставки. Такие сверла, кроме режущих пластин, имеют также опорные твердосплавные направляющие пластины

Зенкеры – это осевые многолезвийные режущие инструменты, которые применяются для промежуточной или окончательной **обработки отверстий, предварительно полученных** сверлением, литьем, ковкой или штамповкой, с **целью повышения их точности** по **диаметру** до *JT*11… *JT***9**, по форме поверхности (уменьшению отклонения от **круглости и цилиндричности**), расположению поверхности (уменьшению отклонения от **соосности** и **параллельности**) и уменьшения шероховатости обработанной поверхности до *Ra* 6,3…2,5 мкм. Зенкеры, являясь **мерными инструментами, не требуют настройки на размер**, что обеспечивает сокращение вспомогательного времени и повышает точность отверстий. Для повышения точности они снимают меньшие припуски (t = 1,5…4,0 мм при d = 18…80 мм), имеют большее число режущих кромок (***z* = 3…4**) и направляющих ленточек. Из-за малой глубины стружечных канавок они имеют большую, чем сверла, жесткость, а отсутствие поперечной кромки позволяет вести обработку с **более высокими подачами (в 2-3 раза)**.



Типы зенкеров: *а* – цилиндрический зенкер; *б, в* – зенковки; *г* – цековки

Зенкеры классифицируются:

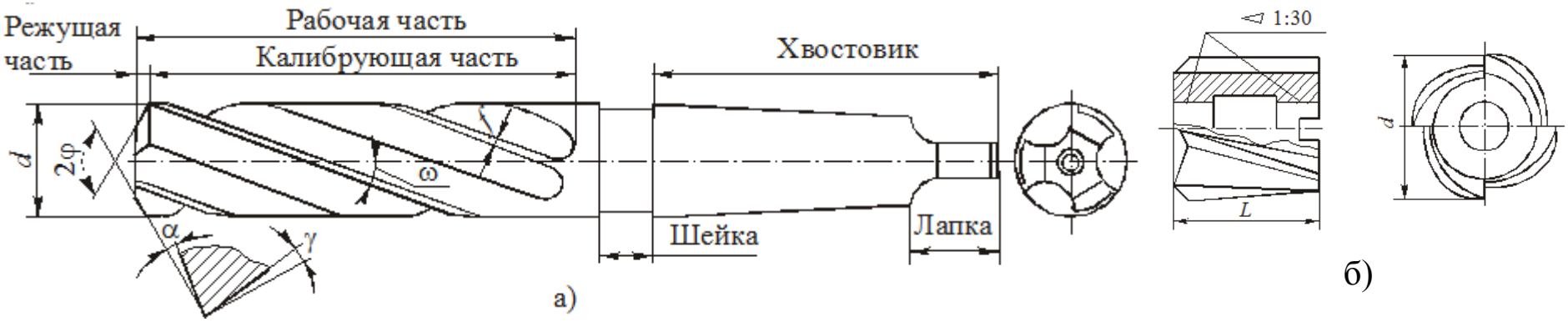
а) по **виду обработки** – цилиндрические **зенкеры** (применяются для увеличения диаметра отверстий), **зенковки** (применяются для обработки цилиндрических или конических углублений под головки болтов, винтов, а также для снятия фасок, цековки – для подрезки торцов бобышек и приливов на корпусных деталях;

б) по **способу крепления** зенкера – хвостовые (с цилиндрическим и коническим хвостовиками (d = 10…40 мм, z = 3)) и насадные (d = =32…80 мм, z = 4);

в) по **конструкции** зенкера – цельные, сборные (со вставными ножами, d = 40…120 мм) и регулируемые по диаметру;

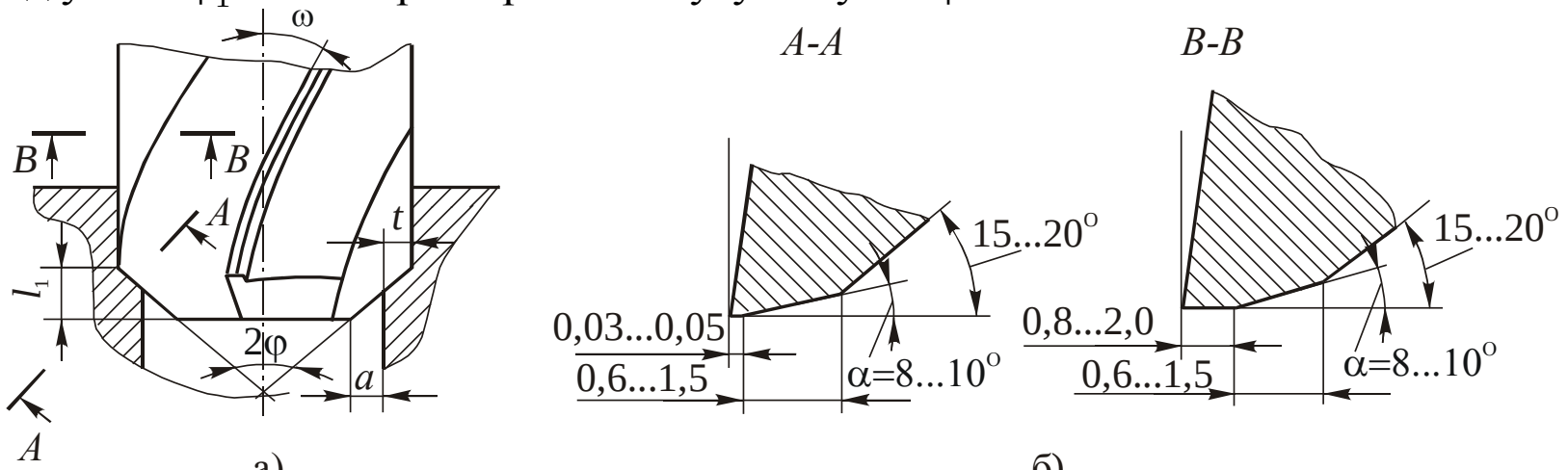
г) по **виду режущего материала** – быстрорежущие и твердосплавные.

К **основным конструктивным элементам зенкеров относятся**: режущая часть (заборный конус), калибрующая часть, число канавок (зубьев), форма канавок, крепежная часть. К **геометрическим параметрам относятся**: угол при вершине 2φ, передние γ и задние α углы, углы наклона канавок ω и главных режущих кромок λ.



Цилиндрические зенкеры: *а* – хвостовой; *б* – насадной

Режущая часть зенкера предназначена для удаления припуска. При обработке сталей угол φ = 60°. С целью повышения стойкости зенкеров рекомендуется дополнительная заточка по уголкам под углом φ_1 = 30°. При обработке чугунов угол φ = 60° или 45°.



а) б)

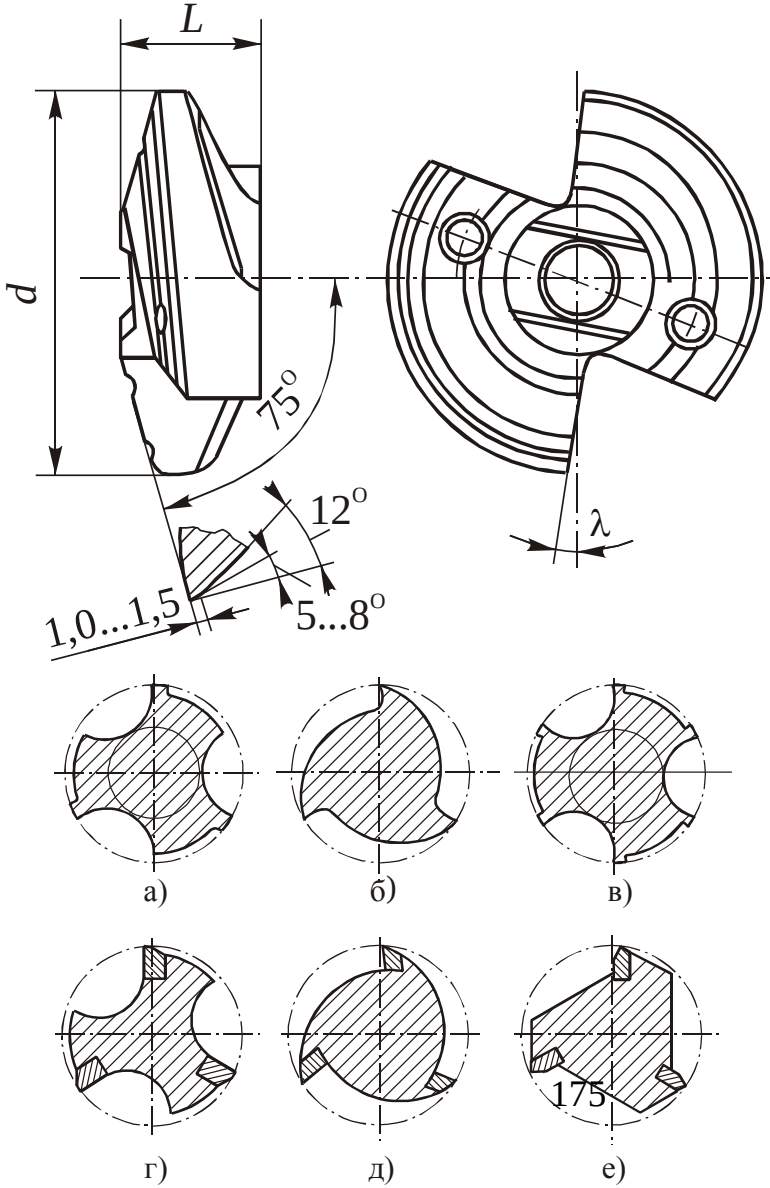
Режущая часть зенкера: *а* – элементы режущей части; *б* – формы заточки зубьев зенкера

Калибрующая часть зенкера **обеспечивает необходимую точность размера** отверстия, **направляет зенкер** в процессе обработки отверстия и служит запасом на его переточку. На ней расположены **цилиндрические ленточки** шириной *f* = 0,8…2,0 мм для *d*=10…80 мм. Радиальное биение ленточек не более 0,04…0,06 мм, обратная конусность 0,04…0,10 мм на 100 мм (у твердосплавных зенкеров уменьшение диаметра **0,05…0,08 мм на длине режущей пластины**), а диаметр корпуса инструмента занижается на 0,01…0,02 мм.

Цилиндрический хвостовой зенкер с коническим хвостовиком

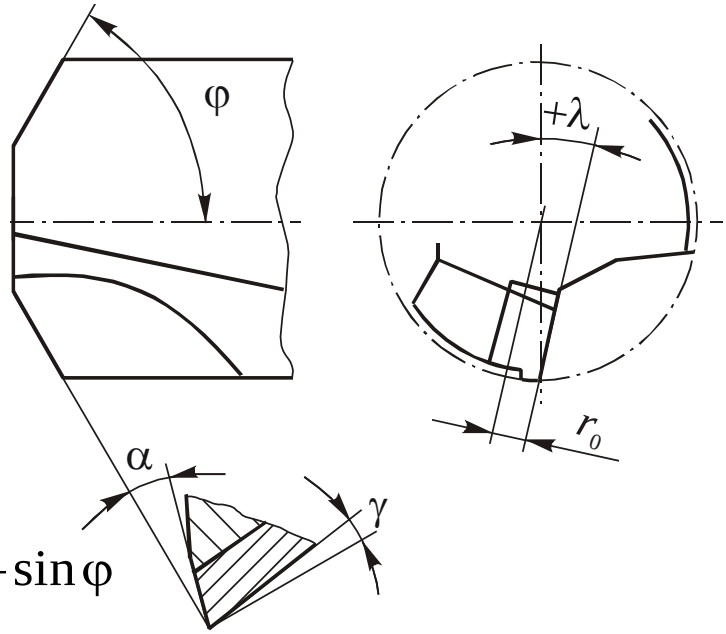
Увеличение ширины ленточек твердосплавных зенкеров нецелесообразно, так как оно сопровождается налипанием на них мелкой стружки и приводит к снижению стойкости инструмента. При увеличении обратной конусности наблюдаются вибрации и происходит быстрая потеря размера зенкера при его переточке.

В **тяжелом машиностроении** для снятия **больших припусков** и при **невысоких требованиях к качеству** отверстия применяют **двузубые зенкеры** (зенкеры-улитки), насаживаемые на оправки. Они имеют короткие и большие по объему канавки и служат для обработки отверстий диаметром до 300 мм. Зенкеры изготавливают с **тремя** (хвостовые) или **четырьмя** (насадные) **канавками**. Применяются также насадные зенкеры **крупных размеров** ($d > 58$ мм) с **шестью** и **более канавками. Канавки** зенкеров **обычно винтовые (ω = 20°)**, но **могут быть и прямыми**, например у **твердосплавных зенкеров** для обработки сталей и чугунов высокой твердости. У сборных зенкеров со **вставными ножами**, в том числе с напайными твердосплавными пластинами, **канавки косые**, наклонные к оси. **Криволинейная форма канавок (а, в, г)** упрощает изготовление зенкеров и сокращает число операций, но требует специальных фасонных фрез и **уменьшает жёсткость.**



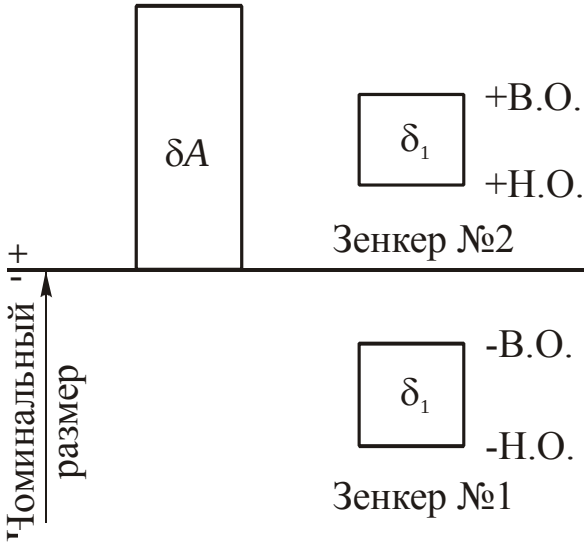
При проектировании новых зенкеров рекомендуются следующие значения **передних** углов: при обработке **сталей γ_N=8…12°**, чугунов γ_N=6…10°, цветных металлов γ_N=25…30°, твердых сталей и чугунов γ_N=0…5°.

Для повышения прочности режущих кромок у зенкеров с напайными твердосплавными пластинами создают **положительный угол наклона главной режущей кромки λ**, предохраняющий от выкрашивания место стыка главных режущих и вспомогательных кромок. Рекомендуется брать угол **λ=+12…+15°**. При этом сход стружки происходит в направлении к хвостовику, а режущая кромка имеет превышение r_0 над осевой плоскостью, отсюда $\sin\lambda = \frac{r_0}{r}\sin\varphi$

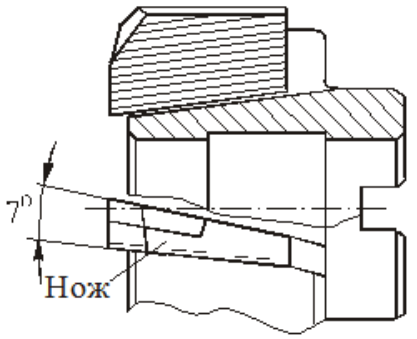


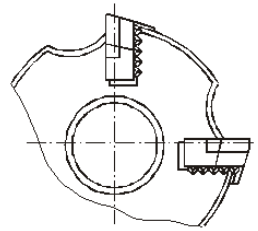
Задний угол **α** у зенкеров, как и у спиральных сверл, создается **заточкой по плоскости, по конической** или **винтовой поверхностям**. Для контроля осевого биения режущих кромок **на режущей** части при заточке или доводке на задней поверхности **около режущей кромки необходимо оставлять узкую ленточку** шириной 0,03…0,05 мм с нулевым задним углом (**α=0°**). При этом величина **биения режущей кромки** должна быть не более 0,05…0,06 мм. Заточка узкой ленточки крайне необходима, так как биение режущих кромок оказывает большое влияние на нормальную работу зенкеров и особенно зенкеров, оснащенных твердым сплавом.

Допуск на диаметр зенкеров устанавливается в зависимости от назначения зенкера и допуска на обработанное отверстие. По назначению, величине и расположению допуска на диаметр отверстия различают: **зенкер № 1** – для обработки отверстий **под развертывание** и **зенкер № 2** – для **окончательной обработки** отверстий. У зенкера **№2** поле допуска на диаметр зенкера перекрывается полем допуска на отверстие (**δ*A***), т.е. оба отклонения имеют знаки «+». При этом поле допуска на изготовление зенкера $\boldsymbol{\delta_1} \approx 0{,}25\delta A$, а верхнее отклонение (**+В.О.**) берется с учетом возможной разбивки отверстия **В.О.**$=+(0{,}3\ldots0{,}4)\delta A$.



Сборные зенкеры оснащают ножами, закрепляемыми **в корпусе из конструкционной стали**, который обычно крепится на оправке отверстием **с конусностью 1:30** и торцевой шпонкой. Режущие ножи зенкеров изготавливают из быстрорежущей стали Р6М5 или с напайными пластинами из твердых сплавов марок ВК8, Т15К6 и др. Корпус зенкера снабжен **клиновидными пазами** с углом 5…7°, в которые устанавливаются ножи с рифлениями на их опорных поверхностях.





После износа зенкера **возможно регулирование** его диаметра за счет перестановки пластин по рифлениям. Недостатком такой конструкции является **невозможность регулирования вылета пластин вдоль оси зенкера**. Чтобы исправить этот недостаток, зенкеры с опорной стороны дополнительно снабжают клиньями. При этом ножи и клинья вставляются в плоские пазы, благодаря чему оказывается возможным двойное регулирование: по диаметру и вдоль оси. Однако конструкция такого зенкера несколько усложняется.

Развертки – это осевые многолезвийные режущие инструменты, применяемые для чистовой обработки отверстий. **Точность отверстий** после развертывания составляет ***JT*8…*JT*6**, а шероховатость поверхности – *Ra*1,25…0,32 мкм. При этом наилучшие результаты достигаются в случае **двухкратного** развертывания, когда первая развертка снимает 2/3 припуска, а вторая – оставшуюся 1/3. Такие же показатели можно получить и при шлифовании, однако после развертывания качество обработанной поверхности выше, так как на шлифованной поверхности остаются частицы абразива, которые приводят к ускоренному износу сопрягаемых деталей.

В отличие от зенкеров, развертки имеют **большее число зубьев** ($z = 6…14$) и, как следствие, лучшее направление в отверстии. Они снимают значительно меньший припуск (**t = 0,15…0,50 мм**), чем при зенкеровании. С целью достижения минимальной шероховатости поверхности развертки при обработке сталей работают на низких скоростях резания ($v = 4…12$ м/мин), т.е. **до области появления нароста**. Тем не менее благодаря большому числу зубьев производительность при развертывании достаточно высока, так как **машинное время $t_м$** уменьшается за счет увеличения числа зубьев: $t_м = L_o/s_z \cdot z \cdot n$,
где L_o – длина обрабатываемого отверстия, мм; s_z – подача на зуб, мм; z – число зубьев; n – частота вращения развертки (заготовки), мин$^{-1}$.

Для получения высокой точности отверстий развертки изготавливают с более жесткими допусками, чем зенкеры, а отверстия под развертывание получают сверлением, зенкерованием или растачиванием. **Развертывание непосредственно после сверления** используют только **при обработке отверстий небольших диаметров** (менее 6 мм).

Малый диаметр отверстия, а значит и малая жёсткость, не позволяют **зенкеру на предыдущей обработке** улучшить расположение оси отверстия после зенкерования.

Развертки классифицируют по следующим признакам:

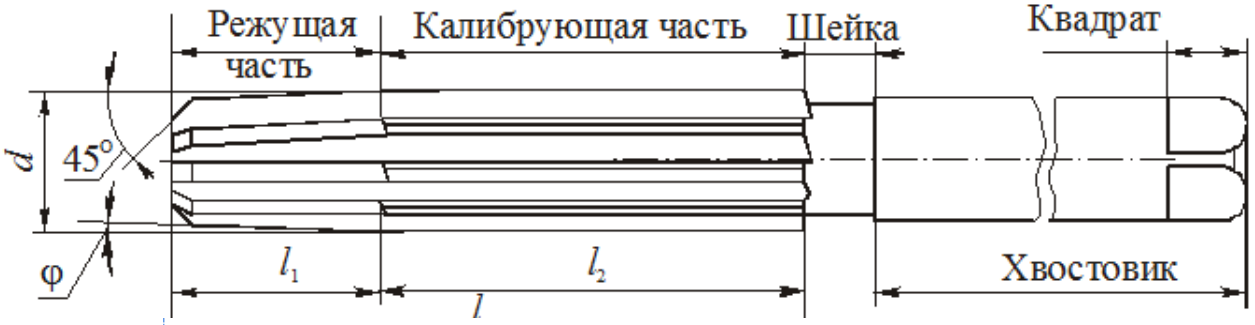
а) **вид привода** – ручные и машинные; б) **способ крепления** – хвостовые и насадные;

в) **вид обрабатываемого отверстия** – цилиндрические и конические;

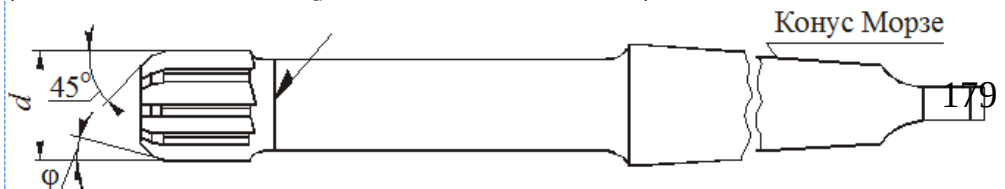
г) **вид режущего материала** – быстрорежущие, твердосплавные и алмазные;

д) **конструкция** – цельные и сборные (со вставными ножами).

Ручными развертками обрабатывают отверстия путем вращения инструмента вручную воротком, в который вставляется квадрат цилиндрического хвостовика. Эти развертки (d=3…40 мм) изготавливают из инструментальной стали марки **9ХС**. Для лучшего направления развертки в отверстии у нее затачивают **большой длины заборный конус** и **калибрующую часть**. В остальном конструкция ручных разверток не отличается от машинных. **Рабочая часть** цилиндрических разверток состоит из **режущей** и **калибрующей** частей. На левом торце снимается ***фаска*** под углом φ = 45° для облегчения вхождения инструмента в отверстие и предохраняет ***режущие*** кромки от повреждения. Далее следует ***заборный конус*** с углом в плане **φ** с зубьями, которые снимают припуск на обработку. **Фаска** и **заборный конус** составляют **режущую часть** развертки.



а – ручная развёртка;

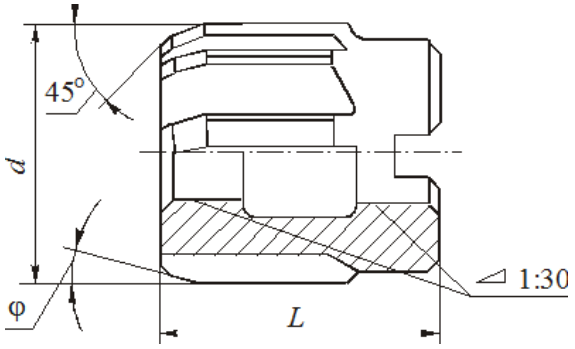


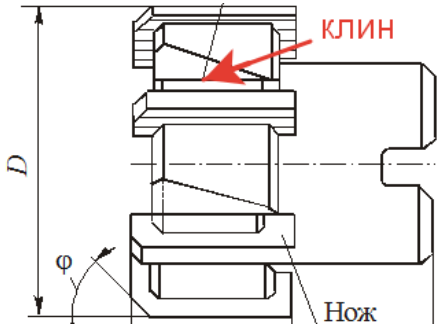
б – машинная развёртка;

Угол в плане φ заборного конуса оказывает большое влияние на условия работы развертки, так как он определяет соотношение между шириной b и толщиной t слоя, срезаемого каждым зубом: $b=t/\sin\varphi$, $a=s_z\cdot\sin\varphi$. С **уменьшением угла φ сила подачи** P_x **уменьшается** и обеспечиваются плавный вход и выход развертки из отверстия. По этим причинам у **ручных** разверток угол **φ**=1…2°. У **машинных** разверток при обработке **сталей φ=12…15°**, чугуна φ=3…5°, а при обработке **глухих отверстий φ = 45°**.

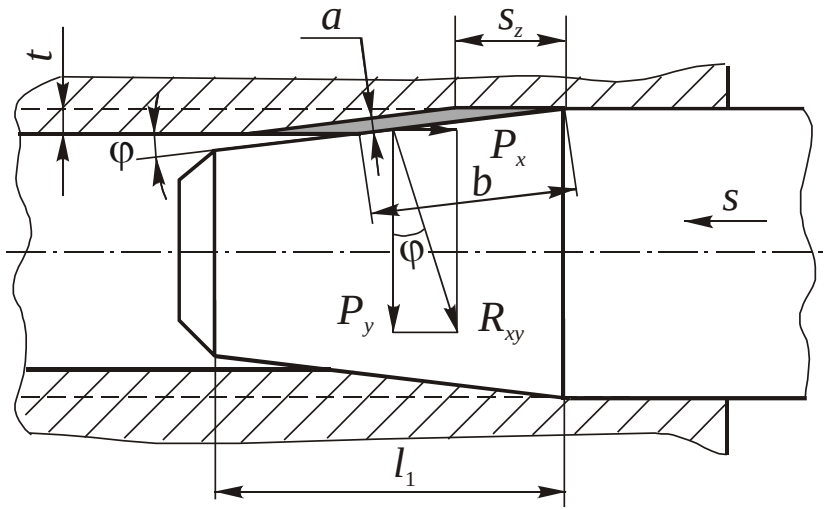
Длина заборного конуса развертки $l_1\approx1{,}3\cdot t\cdot\mathrm{ctg}\varphi$.

Калибрующая **часть** до половины её длины l_2 цилиндрическая, а на **остальной части** имеет **небольшую обратную конусность** (0,01-0,06/100 мм) для уменьшения разбивки отверстия при выходе из него развёртки.

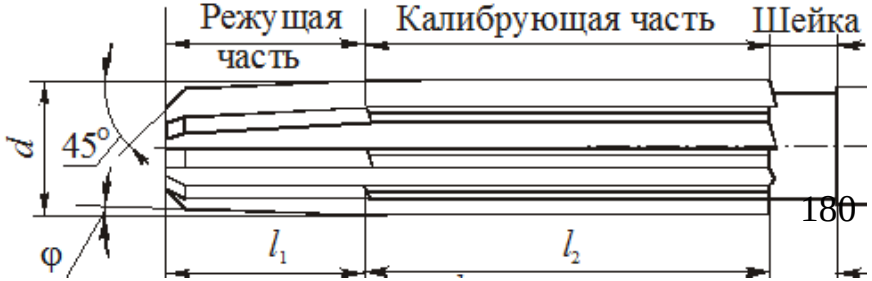




в – развертка насадная; *в* – развертка сборная



Радиальная P_y и осевая P_x составляющие силы резания и параметры сечения срезаемого слоя

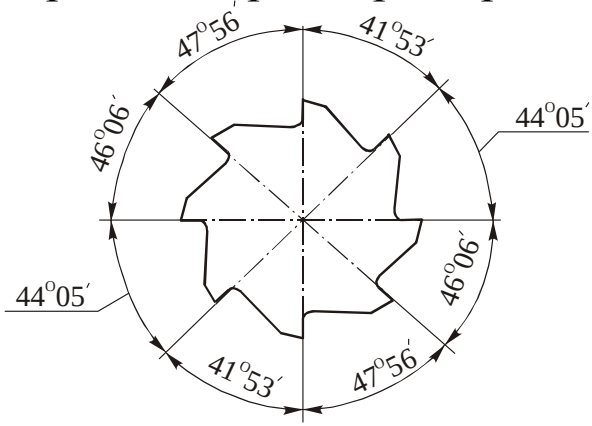


Если **длина калибрующей части мала** (особенно у машинных развёрток), то **обратную конусность** иногда делают сразу **за заборным конусом**, не оставляя цилиндрического участка. Общая длина рабочей части разверток равна: у ручных разверток $l=(4…10)\cdot d$, у машинных $l=(0{,}75…2)\cdot d$.

Радиальное биение зубьев разверток относительно их оси **не более 0,01…0,02 мм** и замеряется в начале калибрующей части.

Число зубьев разверток выбирается в зависимости от диаметра d инструмента (обычно 6-10) и должно быть **чётным** для облегчения измерения диаметра. У сборных разверток число зубьев уменьшается.

Для **снижения огранки** и шероховатости поверхности обработанного отверстия **шаг зубьев** по наружной окружности развертки **переменный**. Для удобства измерения диаметра **накрест** расположенные **углы берут равными**, чтобы режущие кромки противоположных зубьев лежали **в диаметральной плоскости**.



Стружечные канавки у разверток чаще всего **прямые**. Зубья изготавливают с **передним углом γ = 0°**. При обработке **вязких материалов** во избежание налипов стружки и вырывов на обработанной поверхности зубья затачивают с положительными углами γ = 5…10°.

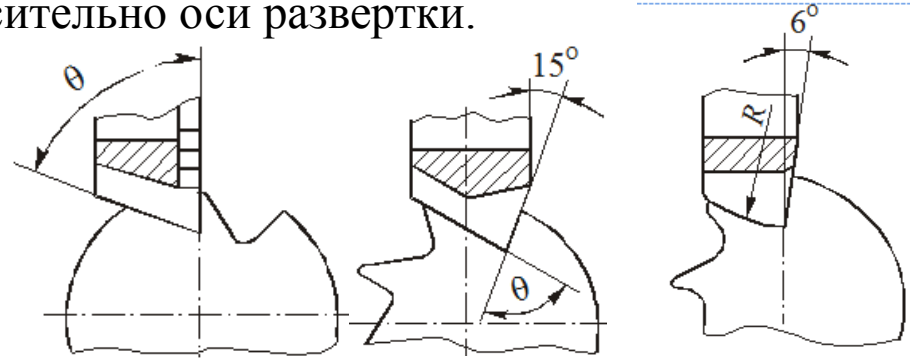
Задний угол, равный **α = 5…12°**, получают заточкой задних поверхностей развертки по плоскости. Причем, в отличие от других видов инструментов, меньшее значение этого угла рекомендуется брать при чистовой обработке, а большее – при черновой.

Зубья на заборном конусе затачивают доостра, а на калибрующей части у них оставляют узкие цилиндрические направляющие ленточки шириной 0,08…0,40 мм для d = 3…50 мм. Их тщательно **доводят**, благодаря чему обеспечивается **выглаживание** микронеровностей обработанной поверхности и предотвращается налипание мелкой стружки, ухудшающей шероховатость поверхности отверстий и снижающей стойкость разверток.

Профиль канавок между зубьями разверток формируется одно- или двухугловыми фрезами с углом θ = 65…110°. Для средних и крупных разверток с целью лучшего размещения стружки в канавках применяется профиль с вогнутой спинкой.

Неравномерность углового шага между зубьями обеспечивается путем **изменения глубины канавок при фрезеровании**, что достигается специальной настройкой станка. У сборных разверток неравномерность углового шага зубьев создается за счет небольшого изменения направления пазов под ножи относительно оси развертки.

Для обработки отверстий **с продольными пазами** делаются **винтовые канавки с углом наклона ω**, равным: при обработке **сталей ω =12…20°**, чугунов – ω = 7…8°, **легких сплавов – ω = 30…45°**.



Во избежание самозатягивания и заедания развертки в отверстии **направление винтовых канавок** развёртки **должно быть обратным направлению её вращения**. При этом шероховатость обработанной поверхности уменьшается, а усилие подачи возрастает. У **ручных** разверток **допускается** совпадение направления винтовых канавок с направлением вращения, так как они работают с малой подачей.

Из-за малого припуска на обработку отверстия ($2z$ = 0,3…0,9 мм) рабочий **не должен пытаться исправить положение оси предварительно обработанного отверстия** с помощью развёртки, поэтому требование к её положению очень высокое. **Крепление разверток** на станке должно обеспечивать **совпадение осей развертки, кондукторной втулки и обрабатываемого отверстия**. При жестком креплении развертки в шпинделе станка все погрешности вращения (биение, разбивка и т.п.) переносятся на деталь. Лучшие результаты достигаются при креплении разверток в **плавающие патроны**. Наибольшую точность обеспечивают патроны, допускающие не только **качание развертки** в двух плоскостях, но **и смещение**, параллельное оси вращения заготовки. Для получения особо точных размеров и высокой прямолинейности оси отверстий применяют принудительное направление разверток с помощью гладких **цилиндрических направляющих**, устанавливаемых впереди или сзади их рабочей части, и их диаметры должны быть больше диаметров разверток.

Допуски на диаметр развертки должны быть очень малыми, примерно в **3 раза меньшими, чем допуски на обрабатываемое отверстие**.

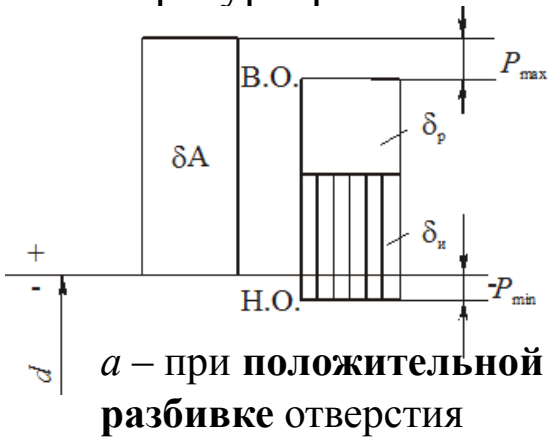
При назначении допусков на диаметр развертки необходимо стремиться к тому, чтобы: 1) обеспечить размер отверстия детали в пределах допуска δA; 2) допуск на изготовление развертки $\delta_р$ должен быть **не очень маленьким**, иначе резко возрастает стоимость ее изготовления; 3) для повышения стойкости развертки необходимо предусмотреть **допуск на износ (переточку)** $\delta_и$ развертки; 4) учитывать возможность появления **разбивки отверстия**, которая **может быть положительной** или **отрицательной**.

Во

При **положительной разбивке** диаметр отверстия после вывода развертки становится **больше её диаметра**. Основные причины такой разбивки: 1) несовпадение осей вращения развертки и обрабатываемого отверстия; 2) биение режущих кромок; 3) нарост и мелкая стружка на направляющих ленточках и др.

Отрицательная разбивка проявляется **в уменьшении диаметра** отверстия после вывода развертки. Она встречается реже и имеет место **при обработке тонкостенных** заготовок, развертывании отверстий **в цветных металлах** вследствие упругих деформаций поверхностей отверстий, а также при работе **твердосплавных разверток** по **закаленным сталям** из-за высокой температуры резания и **термических деформаций детали.**

Расположения полей допусков на диаметр развертки и отверстия:
а – при положительной разбивке отверстия; *б* – при отрицательной разбивке отверстия.
P – допуск на разбивку.



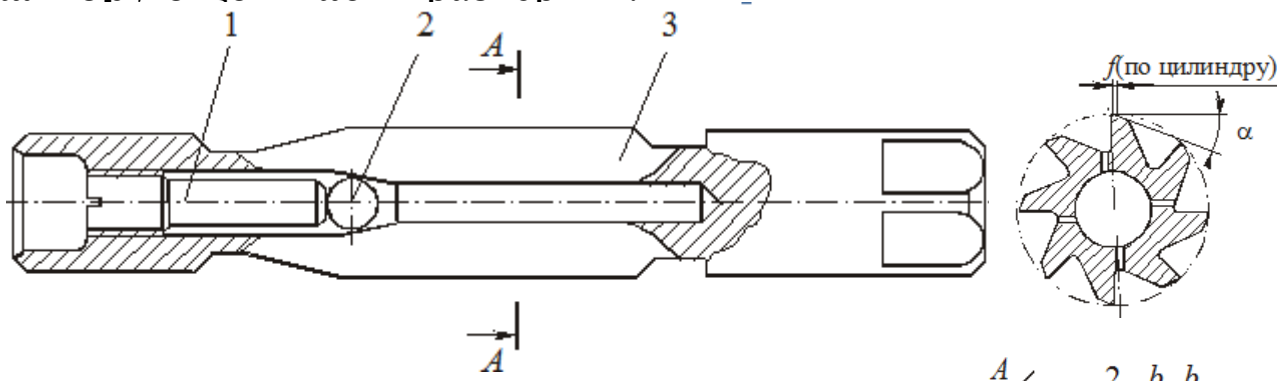
а – при **положительной разбивке** отверстия

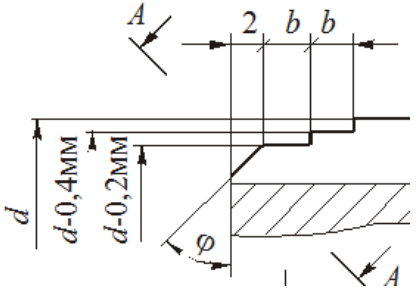
б – при **отрицательной разбивке** отверстия

В ремонтном деле применяются цилиндрические **ручные развертки, регулируемые по диаметру за счёт упругой деформации** калибрующей части. **Насадные сборные** развёртки можно регулировать по диаметру за счет перестановки ножей по рифлениям. Более тонкую регулировку можно осуществить путем перемещения ножей с рифлениями вдоль пазов, наклоненных под углом 5° к оси развертки.

Регулировка цилиндрической **ручной развертки по диаметру:** в корпусе *3* развертки, изготовленном из стали 9ХС, имеется отверстие, состоящее из конической и цилиндрической частей, в которое помещается шарик *2*, передвигаемый регулировочным винтом *1* вдоль оси. **Между зубьями** по впадине сделаны **продольные прорези**. По мере **перемещения шарика винтом** за счет упругих деформаций стенок развертки **увеличивается диаметр калибрующей части** развертки.

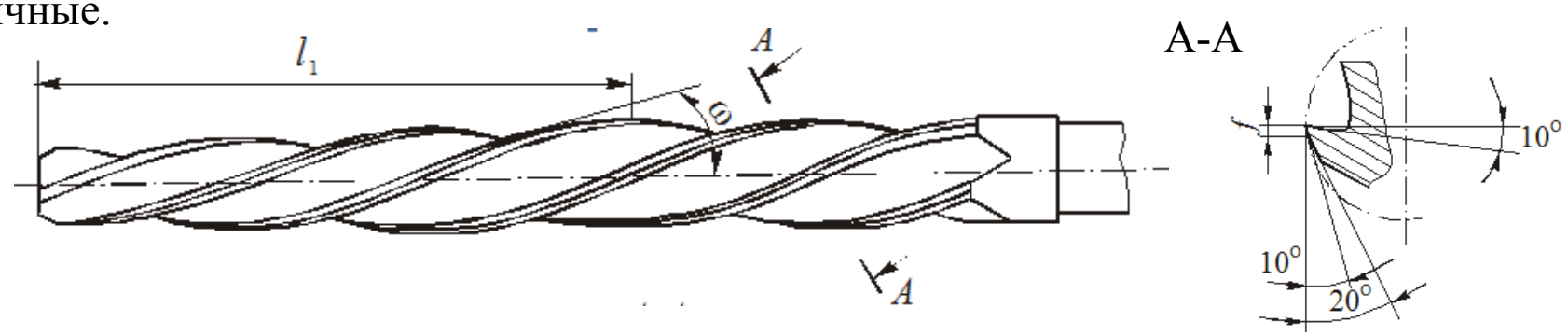
Величина Δ регулирования диаметра небольшая и берется в зависимости от диаметра развертки, например, для *d*=10…20 мм Δ=0,25 мм, для ***d*=20…30 мм →Δ=0,4 мм**, для *d*=30…50 мм Δ=0,5 мм.





Развертки с кольцевой заточкой нашли широкое применение **в тяжелом машиностроении** благодаря высокой производительности и надежности в работе. **Режущая часть** таких разверток **не имеет заборного конуса**, а состоит из трех участков. В начале находится **направляющий конус**, снимающими припуск, как зенкер. Затем следуют второй и третий участки, выполненные в виде **кольцевых поясков** шириной *b* = 2…4 мм и диаметром на 0,2…0,4 мм меньшим, чем диаметр калибрующей части. **Главные режущие кромки**, снимающие припуск, расположены **на торцах уступов под углом φ = 90°** к оси и имеют **нулевой задний угол**. Калибрующая часть – цилиндрическая, шлифуется по направляющим ленточкам шириной *f* **без обратного конуса** за одну установку. Число зубьев уменьшено, за счет чего увеличен объем стружечных канавок. Стружечные **канавки прямые**, но для обработки прерывистых поверхностей применяют винтовые канавки с направлением, обратным вращению развертки.

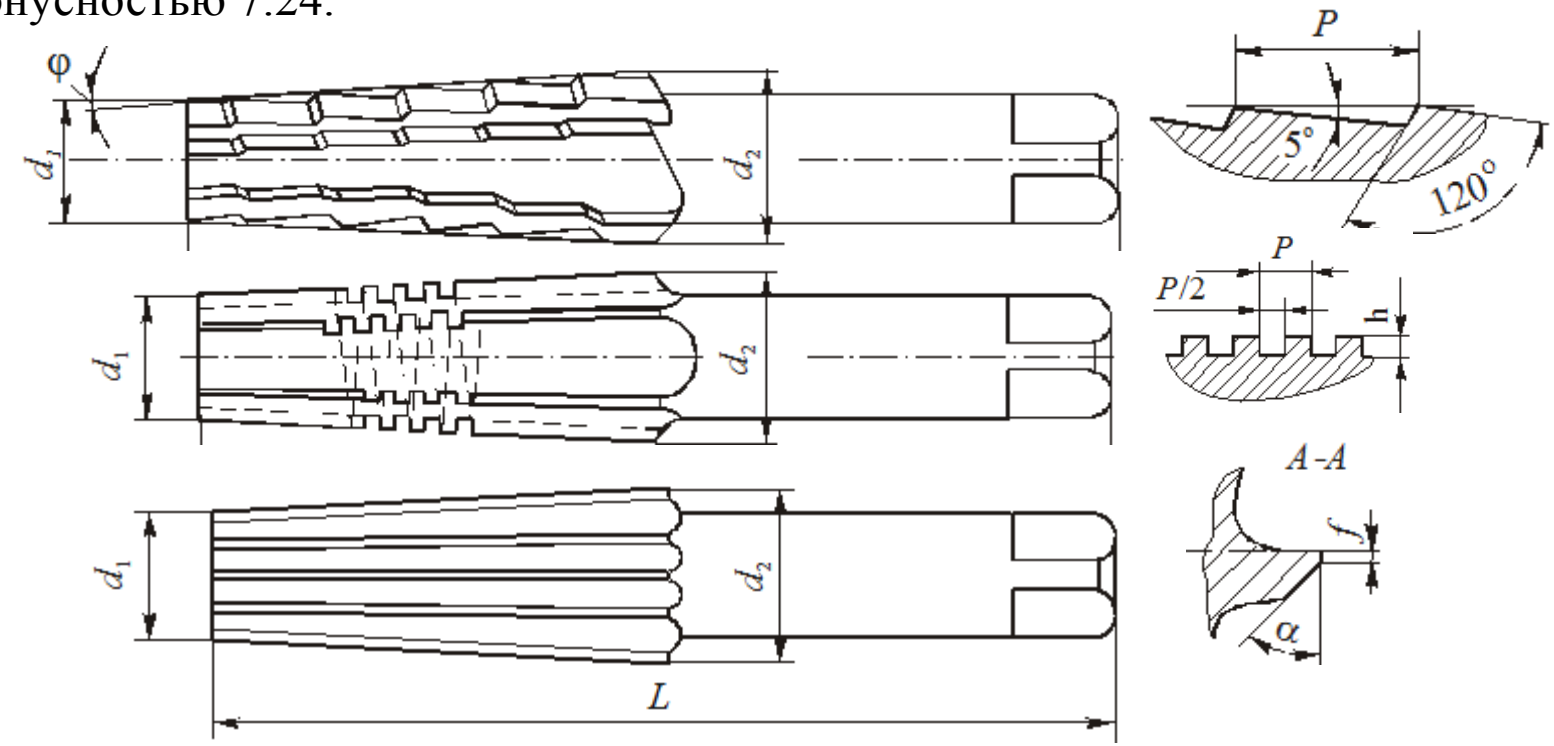
Котельные развертки применяют при подготовке отверстий под заклепки в двух или более соединяемых листах. Они получили широкое распространение в котло-, корабле- и авиастроении, а также при изготовлении мостовых конструкций. Котельные развертки работают **в тяжелых условиях**, так как из-за неизбежных **несовпадений осей отверстий** в пакетах листов приходится удалять **большой припуск – до 1…2 мм на сторону**, т.е. почти как при зенкеровании. При этом обрабатываемые материалы, как правило, вязкие и пластичные.



Для лучшего направления разверток в отверстии, снижения осевых усилий и уменьшения шероховатости поверхности используются **винтовые зубья с углом ω = 25…30°** с направлением, обратным вращению инструмента. Котельные развертки имеют **малый угол заборного конуса**, равный **2φ = 3…5°30′** и, соответственно, большую длину режущей части, равную 1/3…1/2 длины рабочей части инструмента. Число **зубьев *z* = 4…6** при диаметре разверток *d* = 6…40 мм. Передний угол зубьев в сечении, перпендикулярном к винтовым канавкам, γ = 12…15°, задний угол α = 10°. **Зубья на калибрующей части** имеют узкие направляющие **ленточки шириной *f* = 0,2…0,3 мм** с **обратной конусностью** 0,05…0,07 мм на 100 мм длины. Котельные развертки изготавливают как ручные с цилиндрическим хвостовиком, так и машинные с коническим хвостовиком, устанавливаемые на радиально-сверлильных станках или на пневматических дрелях.

выполненные

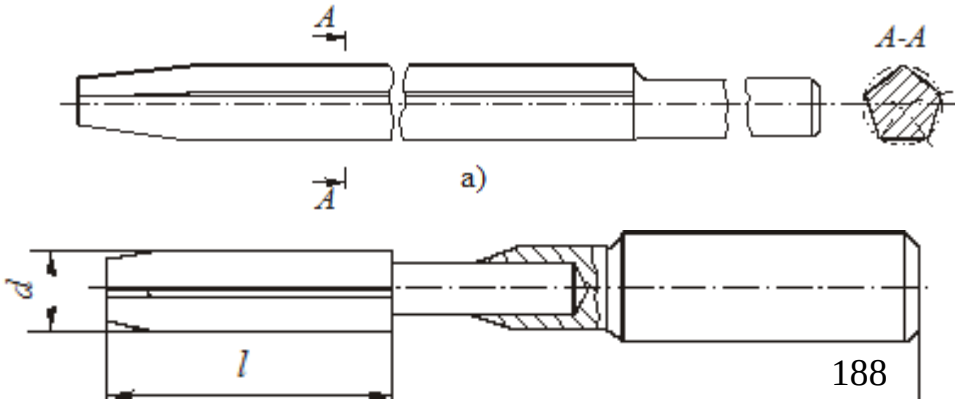
Конические развертки применяют для получения точных конических отверстий под штифты (конусность 1:50), конусы Морзе и метрические, посадочные отверстия насадных зенкеров и разверток (конусность 1:30) и др. Конические отверстия формируют **комплектом развёрток** либо **из цилиндрических, полученных сверлением**, либо из конических отверстий, полученных расточкой при обработке очень крутых конусов, например с конусностью 7:24.



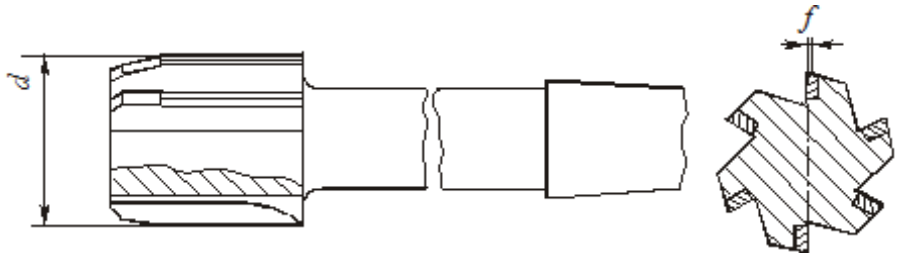
Длина режущих кромок, снимающих припуск, большая и **равна длине образующей конуса**, а **толщина срезаемого слоя** определяется **перепадом диаметров,** поэтому условия работы **тяжёлые.** Требования **к точности конических отверстий высоки**, так как от нее часто зависят прочность и **герметичность** соединяемых деталей, величина **передаваемого крутящего момента** и др. У конических разверток **отсутствует разделение на режущую и калибрующую** части. При обработке отверстий с **конусностью большей 1:20** обрабатываются **только с помощью комплекта разверток.**

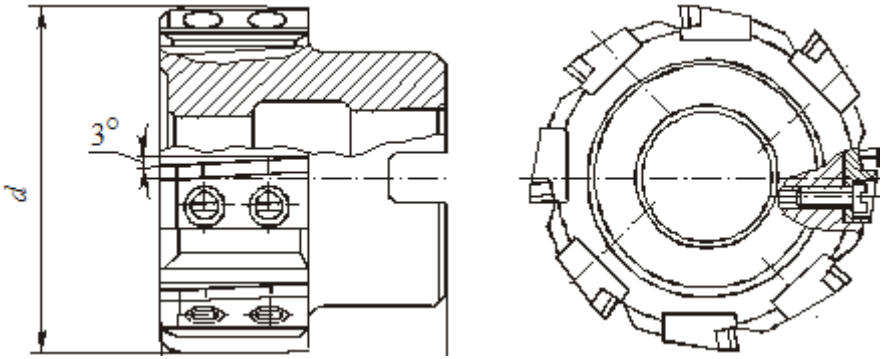
Развертки твердосплавные. Условия резания при развертывании благоприятны для применения твердых сплавов, так как для этих инструментов характерны малые нагрузки на режущие зубья, устойчивое положение в отверстии и высокая жесткость. Применение **твердых сплавов** благодаря их высокой износостойкости **в несколько раз повышает стойкость разверток**, особенно при обработке отверстий в **труднообрабатываемых сталях и высокопрочных чугунах**. Однако реализовать возможность повышения скорости резания в несколько раз при использовании твердосплавных разверток не удается из-за **возникновения вибраций**, ухудшающих качество обработанной поверхности. Только в конструкциях **разверток одностороннего резания** с использованием **внутреннего напорного охлаждения** и с работой **хвостовика на растяжение** удалось при обработке конструкционных сталей достичь скоростей резания v = 120 м/мин. Три варианта: 1) изготовление рабочей части **целиком из твердых сплавов**, полученных методом прессования или из пластифицированных заготовок с последующим их спеканием; 2) **пайка** стандартных **пластин** непосредственно **на корпус** развертки или **на ножи в сборных** развертках; 3) **механическое крепление пластин** на корпусе развертки.

Диаметром **до 3** мм изготавливают **целиком из твердого сплава** в виде трех-, четырех- или **пятигранника;** диаметрами **3…12** мм с цельной твердосплавной рабочей частью и со **стальным хвостовиком,** соединенным пайкой.

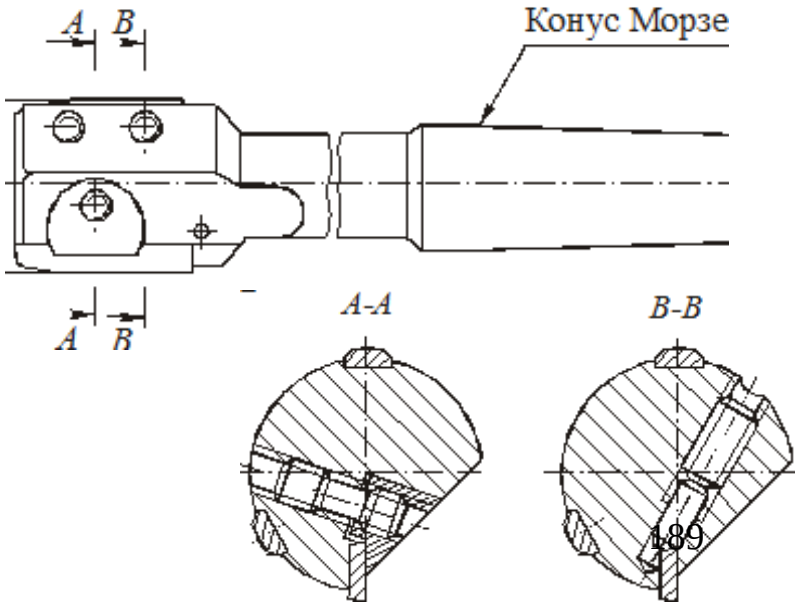


Концевая развертка с твердосплавными пластинками, **напаянными на корпус**, и с пластинами, **напаянными на ножи**, закрепленные винтами на корпусе инструмента. Такие развертки диаметрами 150…300 мм можно регулировать по диаметру с помощью подкладок под ножи. При развертывании температура резания невелика, поэтому вместо пайки стали использовать высокопрочные клеи, что значительно упрощает процесс изготовления разверток и обеспечивает повышение стойкости твердосплавных пластин за счет отсутствия термических напряжений.



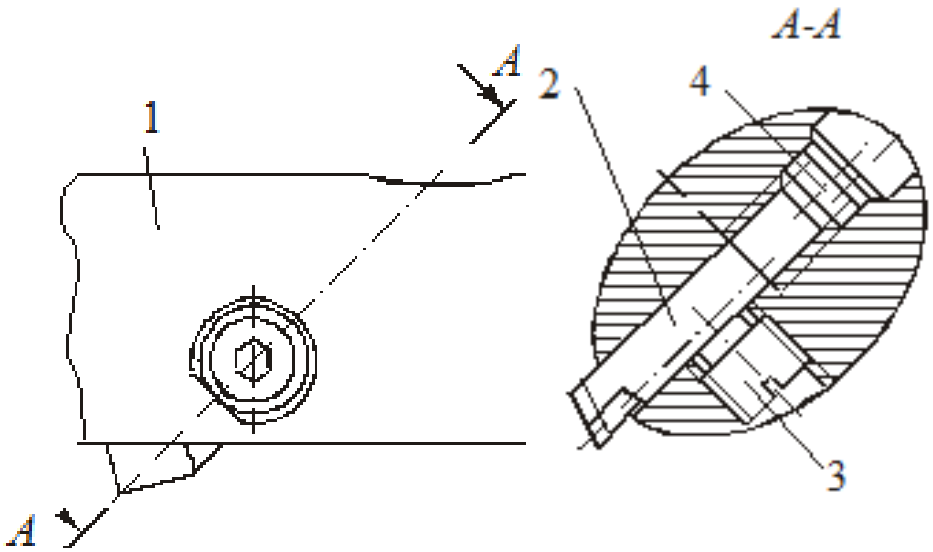


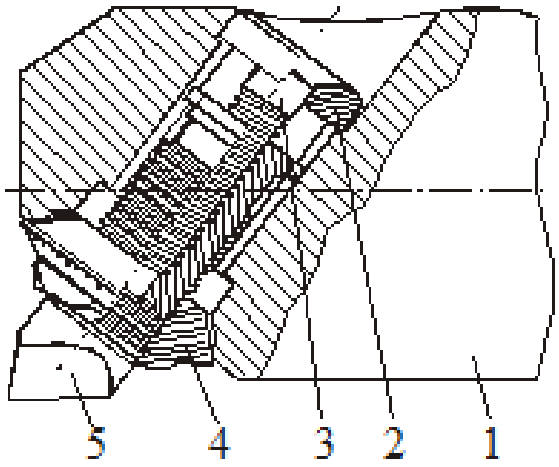
Развертки одностороннего резания изготавливают с одним или несколькими ножами и опорными пластинами в диапазоне диаметров 8…100 мм, и применяются для развертывания **неглубоких отверстий.** Режущие пластины у них могут быть регулируемыми по диаметру с использованием разных способов механического крепления.



Расточные инструменты применяются для увеличения диаметров отверстий и являются широко универсальными инструментами, так как, в отличие от зенкеров, разверток и других инструментов, **допускают** настройку **в радиальном направлении**. Обрабатывают отверстия диаметром 1…1000 мм и более с точностью *JT* 5…*JT*6 и шероховатостью *Ra* 0,8…1,6 мкм. В механообработке нашли применение следующие типы расточных инструментов: 1) **стержневые резцы**; 2) **двухсторонние пластинчатые резцы-блоки**; 3) **расточные головки** для обработки неглубоких отверстий; 4) **расточные головки для обработки глубоких отверстий.**

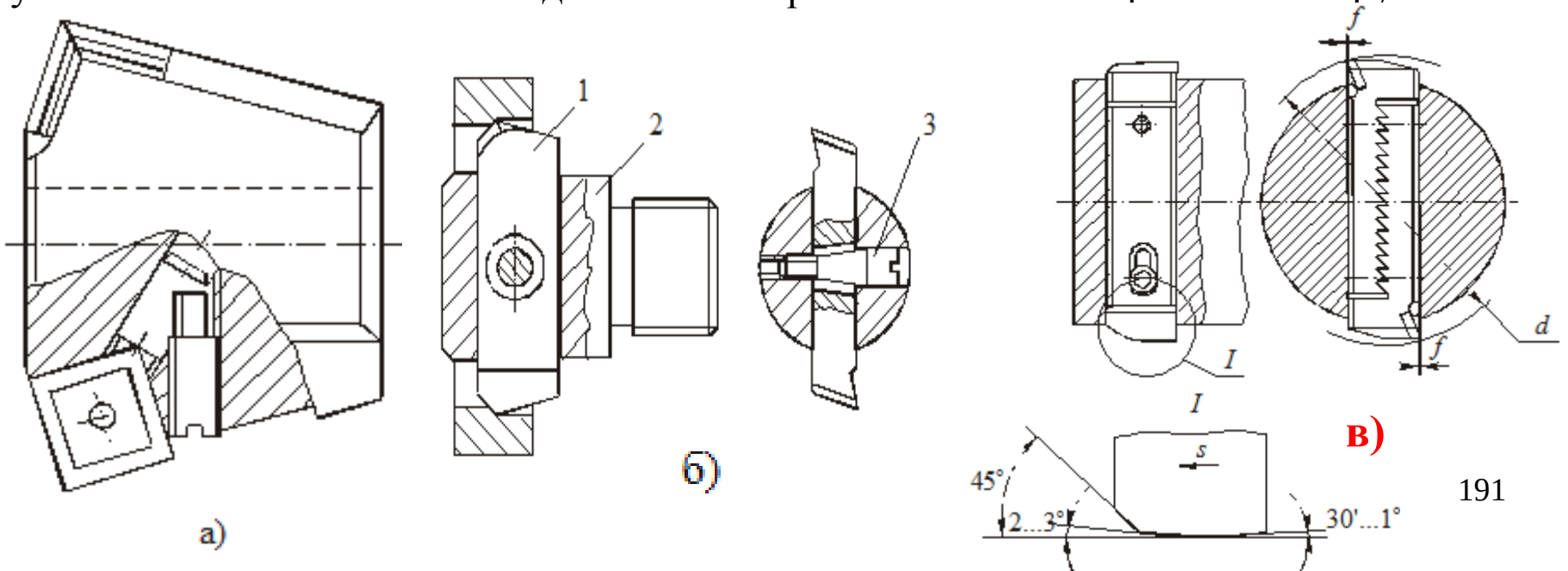
Стержневые резцы имеют одну режущую кромку из быстрорежущей стали или в виде СМП из твердого сплава или СТМ. Державки в поперечном сечении имеют круглую, квадратную или прямоугольную формы. Наиболее простой и распространенный способ закрепления резца с державкой квадратной или круглой форм. Здесь резец *2* закреплен винтом *3* в оправке *1*. Вылет резца регулируется винт





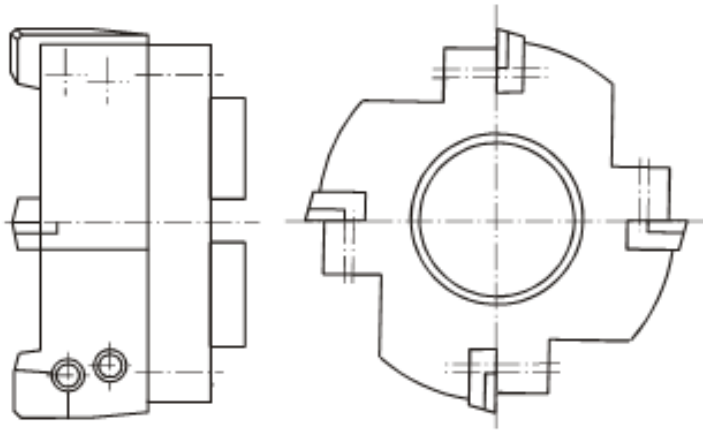
Для растачивания **точных отверстий** диаметром более 20 мм с **микрорегулированием** за 1 деление **гайки 4 с шагом 0.5 мм** ход резца на **0,01 мм**

Двухсторонние пластинчатые резцы-блоки применяют для предварительного и окончательного растачивания отверстий диаметром **более 25 мм**. По сравнению с однолезвийными инструментами они обладают **большей производительностью,** обеспечивают **большую точность** и **низкую шероховатость** поверхности отверстий. Резцы-блоки целиком из быстрорежущей стали, или оснащают пластинами из твердого сплава сборными и регулируемыми по диаметру. Крепление пластинчатых расточных резцов в оправках либо осуществляется **неподвижно** $d = 50…150$ мм (рис. ***а***), либо допускают «**плавание**» по одной оси: **двухлезвийные блоки** (рис. ***б, в***). Выпадению резца-блока *1* из борштанги *2* препятствует винт *3*, входящий **с зазором в отверстие,** выполненное в корпусе резца-блока. Известны конструкции четырех и более лезвийных блоков, «плавающих» с помощью крестовины по двум взаимно перпендикулярным осям *4*. «Плавающее» крепление резцов-блоков $d = 25…600$ мм применяется для компенсации углового и линейного несовпадения осей обрабатываемых отверстий и инструмента.



а) б) в)

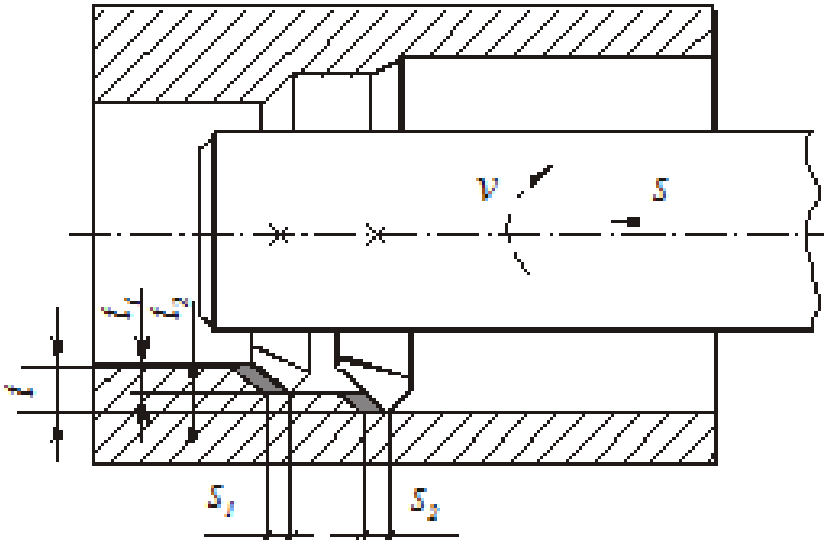
Расточные головки для обработки **неглубоких отверстий** имеют несколько режущих кромок (d = 120…300 мм, z = 4…8). Они жестко крепятся в оправке и применяются для **предварительной обработки** отверстий.



При конструировании многокромочных расточных головок нашли применение две схемы резания: 1) деления глубины резания; 2) деления подачи.

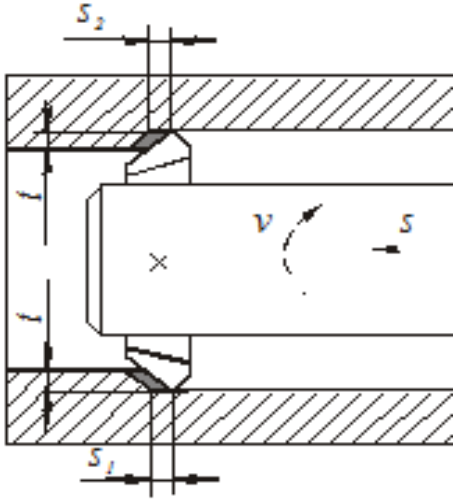
При **схеме деления глубины резания** заданная глубина t последовательно срезается каждым резцом головки:

$$t = t_1 + t_2 + \ldots + t_n$$

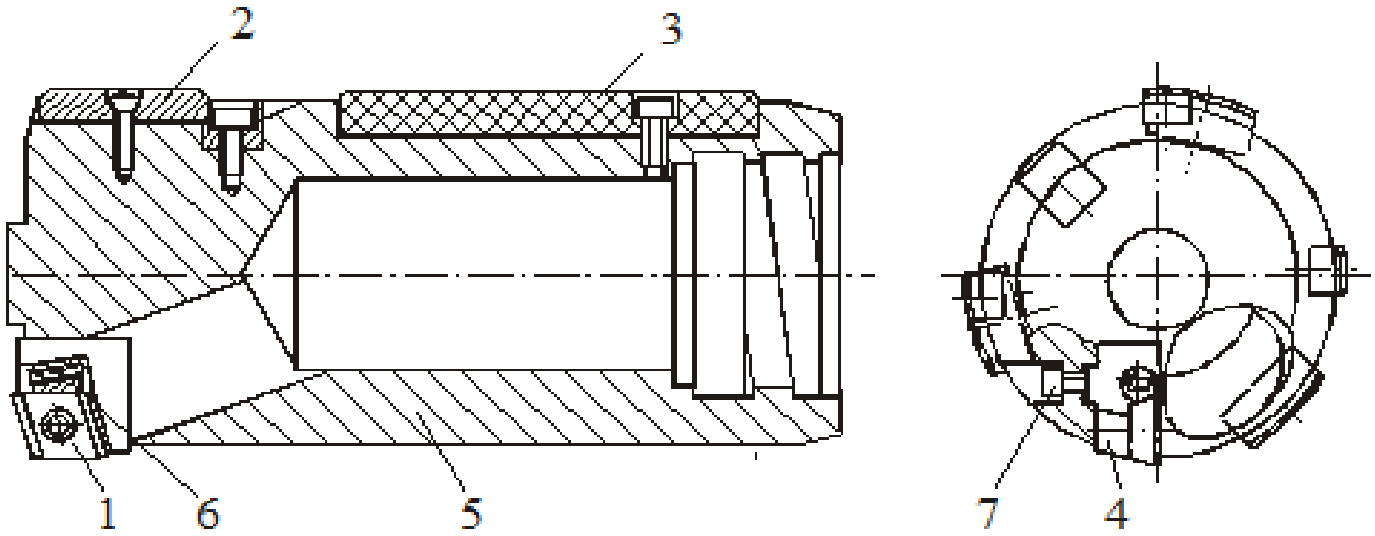


При **схеме деления подачи** каждая режущая кромка головки снимает **полную глубину резания *t***, а подача *s* на один оборот инструмента или заготовки равна сумме подач, приходящихся на каждый зуб, смещённые вдоль оси

$$S = S_{Z_1} + S_{Z_2} + \ldots + S_{Z_n}$$



Расточные головки для обработки глубоких отверстий относятся к инструментам **одностороннего резания** с определенностью базирования для растачивания глубоких отверстий диаметром 45…250 мм. Режущий элемент головки выполнен в виде кассеты *4* с продольной шпонкой, входящей в соответствующий паз на корпусе *5* головки. Кассета крепится в корпусе винтом *7*. На ней с помощью клина *6* закреплена твердосплавная пластина *1* ромбической формы, которая имеет две режущие кромки. Настройка головки на диаметр производится путем смены направляющих *2* и регулировки вылета кассеты. В процессе обработки три твердосплавные направляющие *2* под действием радиальных составляющих сил резания и трения прижимаются к поверхности обработанного отверстия, обеспечивая тем самым поперечную устойчивость инструмента. Три пластмассовые (из полиамида) направляющие *3* служат для гашения колебаний расточной головки.



Расточная головка фирмы «Botek» (Германия) для обработки глубоких отверстий: *1* – твердосплавная режущая пластина; *2* – твердосплавная направляющая; *3* – пластмассовая направляющая; *4* – кассета; *5* – корпус головки; *6* – клин; *7* – винт

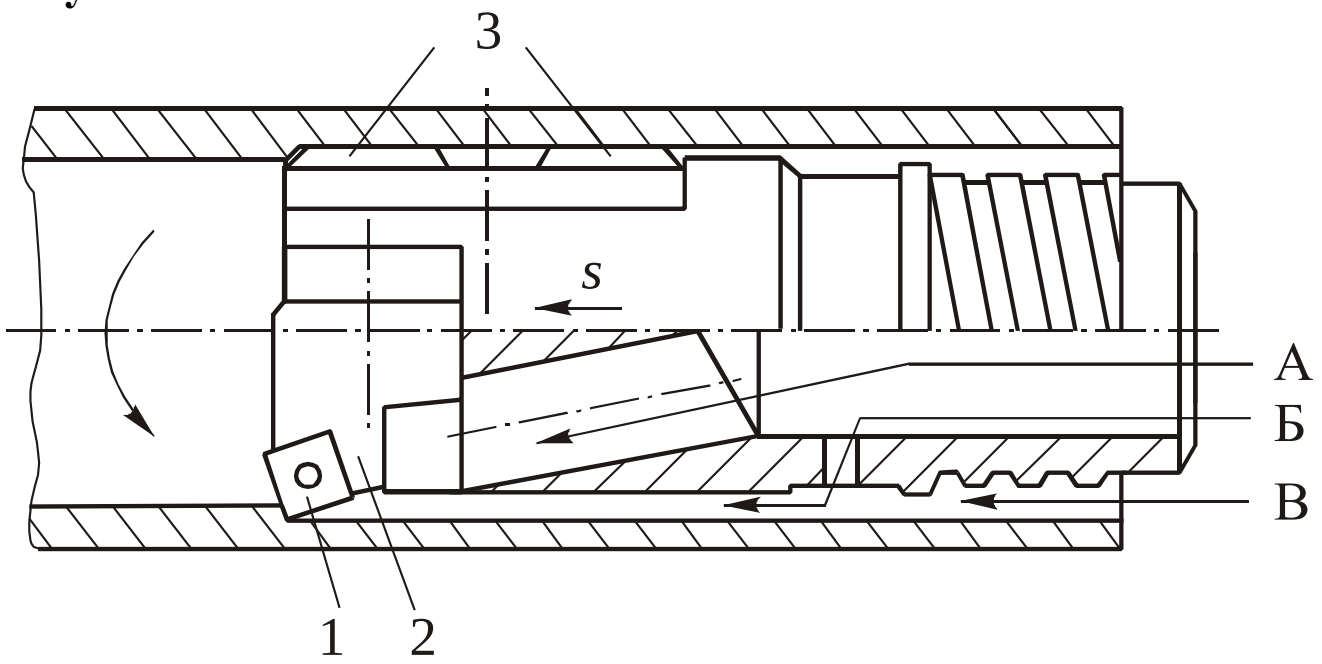
Расточная головка фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция) для растачивания гильз пневмо- и гидроцилиндров под последующую раскатку. Такая головка может работать по трем вариантам:

1) **с внутренним подводом СОЖ** и **наружным отводом стружки** (*А*). В варианте ***А*** **стружка отводится вперед**;

2) **с внутренним подводом СОЖ** и **внутренним отводом стружки** с помощью эжектора (*Б*);

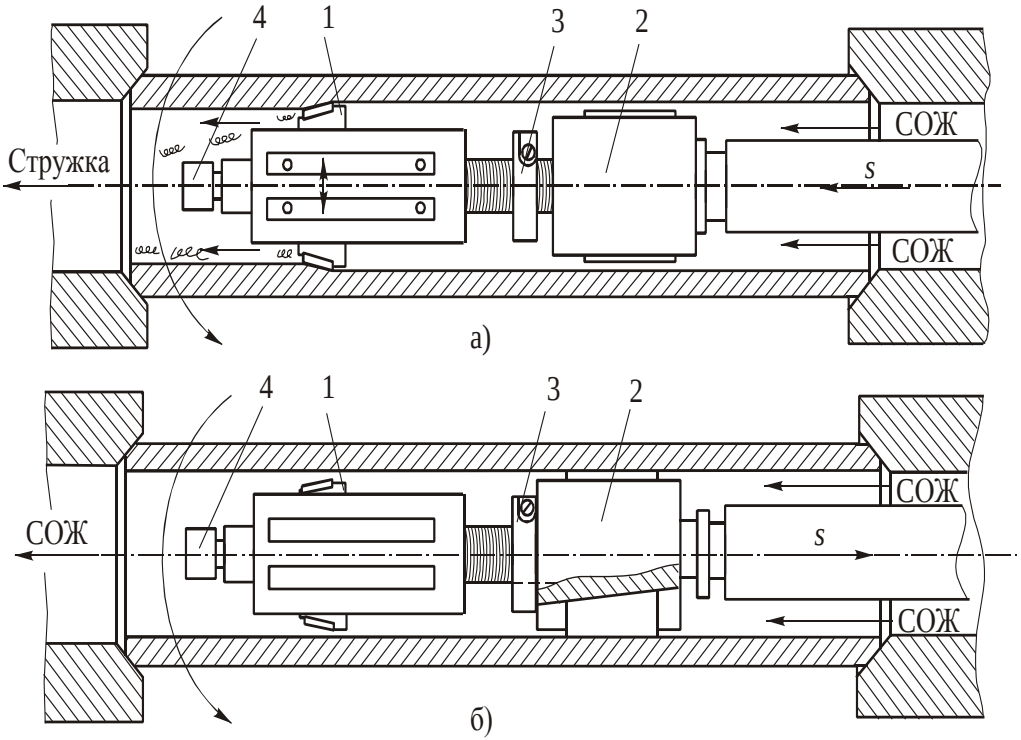
3) с **наружным подводом СОЖ** и **внутренним отводом стружки** (*В*).

В вариантах ***Б*** и ***В*** – **стружка отводится** назад и поэтому в процессе обработки **отверстие должно быть заглушено.**



Расточная головка фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция) для обработки гильз гидроцилиндров: *А* – с внутренним подводом СОЖ; *Б* – с эжекторным отводом стружки; *В* – с наружным подводом СОЖ; *1* – твердосплавная режущая пластина; *2* – кассета; 3 – твердосплавная направляющая

Комбинированный режуще-деформирующий инструмент фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция) для растачивания гильз пневмо- и гидроцилиндров под последующую раскатку может работать по трем вариантам: При прямом ходе инструмента (рис. *а*) осуществляется **растачивание отверстия** плавающим двухлезвийным расточным блоком *1*, оснащенным твердым сплавом. При этом обойма роликового раскатника *2* сдвинута вправо на некоторое расстояние от опорного кольца *3*, а ролики раскатника не касаются поверхности обработанного отверстия.

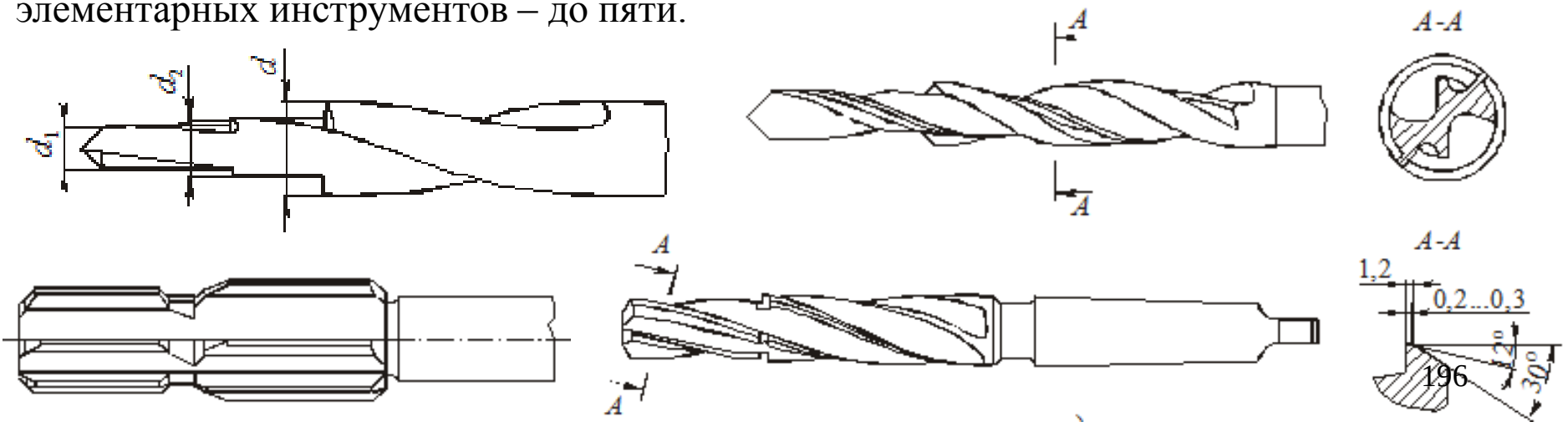


После окончания растачивания резцы плавающего блока (рис. *б*) *1* с помощью пневматического нажимного устройства *4* утапливаются. Затем включается обратная подача инструмента, обойма раскатника *2* отодвигается влево и упирается в опорное кольцо *3*. Ролики начинают пластически деформировать поверхность обработанного отверстия. При этом шероховатость поверхности отверстия достигает *Ra* 0,05…0,20 мкм, а ее твердость в результате наклепа увеличивается на 50%. Обработка ведется с использованием СОЖ на масляной основе с противозадирными присадками (P, S, Cl).

Комбинированный режуще-деформирующий инструмент фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция)
Схемы обработки гильзы гидроцилиндра комбинированным режуще-деформирующим инструментом: *1* – плавающий двухлезвийный расточный блок; *2* – роликовый раскатник; *3* – опорное кольцо; *4* – нажимное устройство

Комбинированные инструменты – это соединение двух и более одно- или разнотипных инструментов, закрепленных на одном корпусе, которое позволяет за один проход совмещать несколько операций или переходов. Благодаря этому значительно сокращается машинное и вспомогательное время и повышается производительность процесса обработки отверстий. Эти инструменты применяются на сверлильных, револьверных, расточных, агрегатных станках, токарных автоматах, автоматических линиях и обрабатывающих центрах.

При обработке цилиндрических отверстий широко используются комбинированные инструменты, являющиеся соединениями **инструментов разных типов: сверло – зенкер,** сверло – метчик, сверло – развертка, зенкер – развертка и др. При обработке **ступенчатых отверстий применяются соединения однотипных инструментов**: ступенчатые сверла, зенкеры, развертки и др. При этом значительно уменьшается отклонение от соосности ступеней и повышается точность размеров между торцами обработанных поверхностей. Число ступеней в таких инструментах может доходить до шести, а число объединенных элементарных инструментов – до пяти.

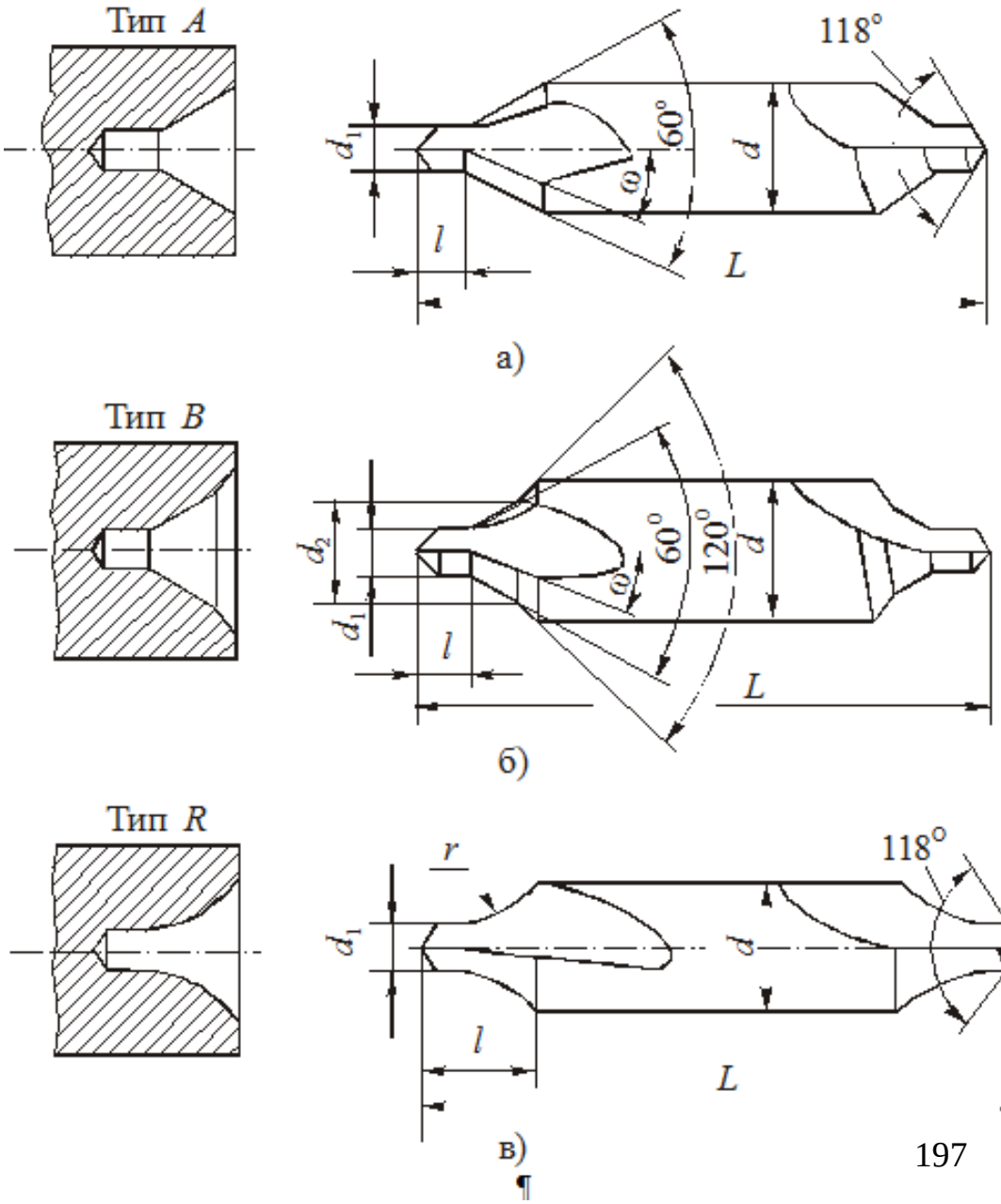


Центровочные сверла-зенковки и получаемые ими типы отверстий:

а – без предохранительной фаски;

б – с предохранительной фаской;

в – радиусное

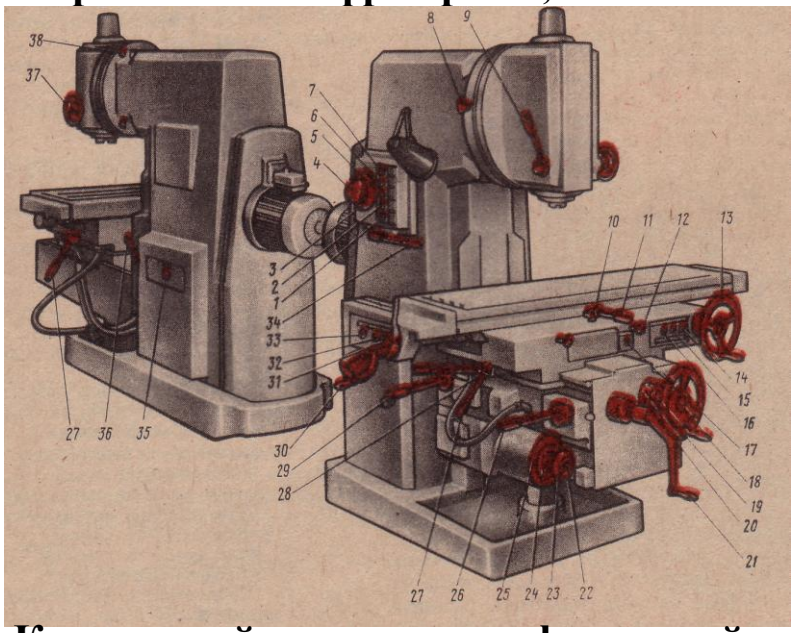


Фрезы – это многозубые режущие инструменты, применяемые для обработки **плоскостей, пазов, фасонных поверхностей**, тел вращения, а также для **разрезки материалов.**

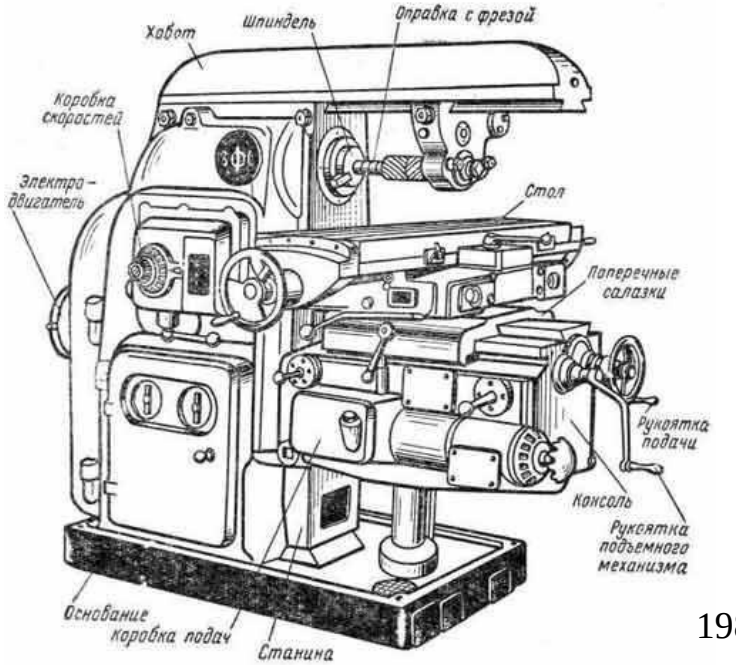
В процессе фрезерования в контакте с заготовкой, как правило, находится несколько зубьев, снимающих стружку переменной толщины. При этом благодаря большой суммарной активной длине режущих кромок обеспечивается **высокая производительность процесса фрезерования**.

Повышению производительности также способствует **высокая скорость** фрезерования, которая достигается за **счет периодического выхода зубьев из зоны резания, обеспечивающего охлаждение** и снятие тепловой напряженности в режущем клине.

Кинематика фрезерования проста: **фреза получает вращение** от главного привода, а **заготовка,** закрепленная на столе станка, – **движение подачи** от отдельного привода станка, кинематически не связанное с вращением фрезы. **Движение подачи** может быть **прямолинейным**, вращательным или винтовым, а режущие кромки фрезы – прямолинейными, наклонными к оси, винтовыми или фасонными. **Типы фрезерных станков – консольные вертикально-фрезерные и горизонтально-фрезерные, безконсольные.**



Консольный вертикально-фрезерный



Консольный горизонтально-фрезерный

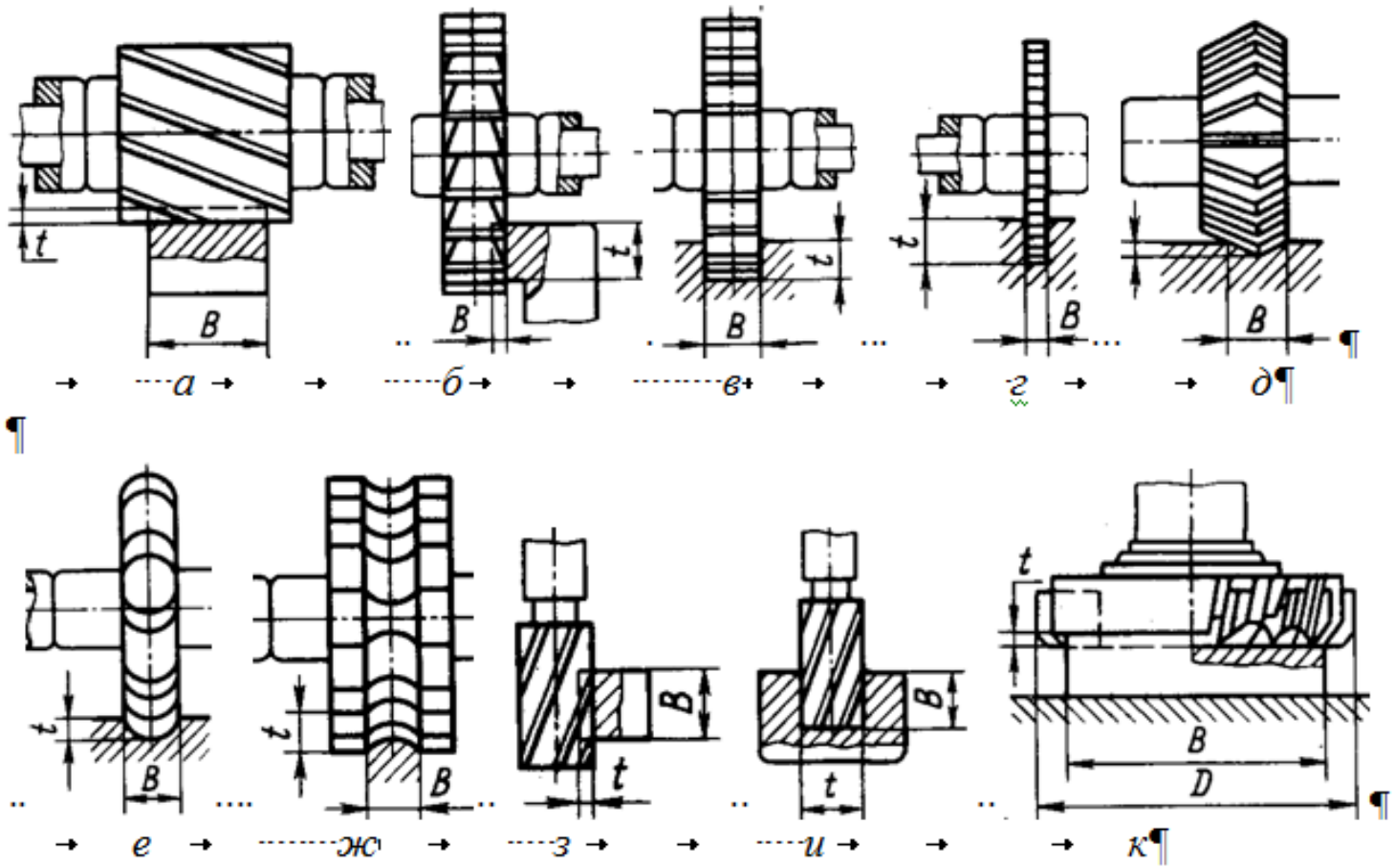
Консольный универсально -фрезерный станок ФУ 251 с делительной головкой на столе

Типы фрезерных станков

Консольный вертикально-фрезерный станок 6Л12, ЛССП (1 889 464 руб)

Вертикально-фрезерный обрабатывающий центр Haas VF-1 (от 64 022,74 USD)

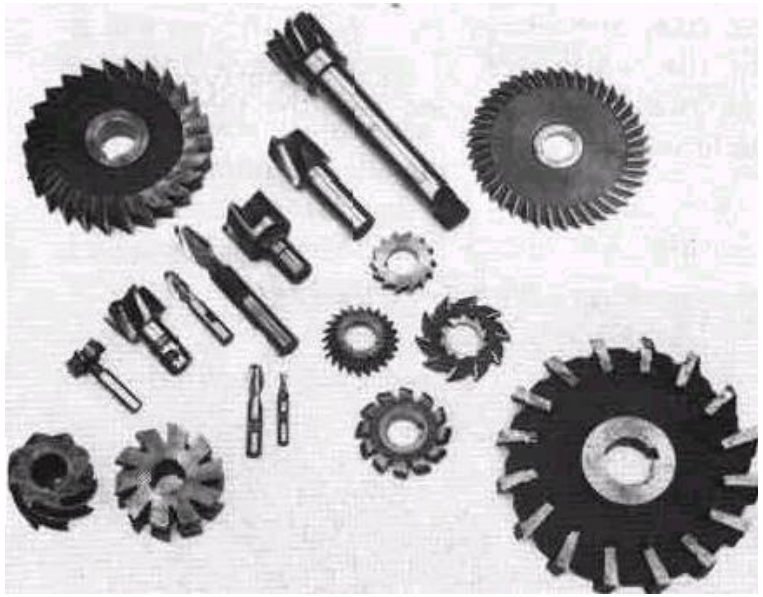
В зависимости от **типа фрезерного станка** используются соответствующие **типы фрез**:

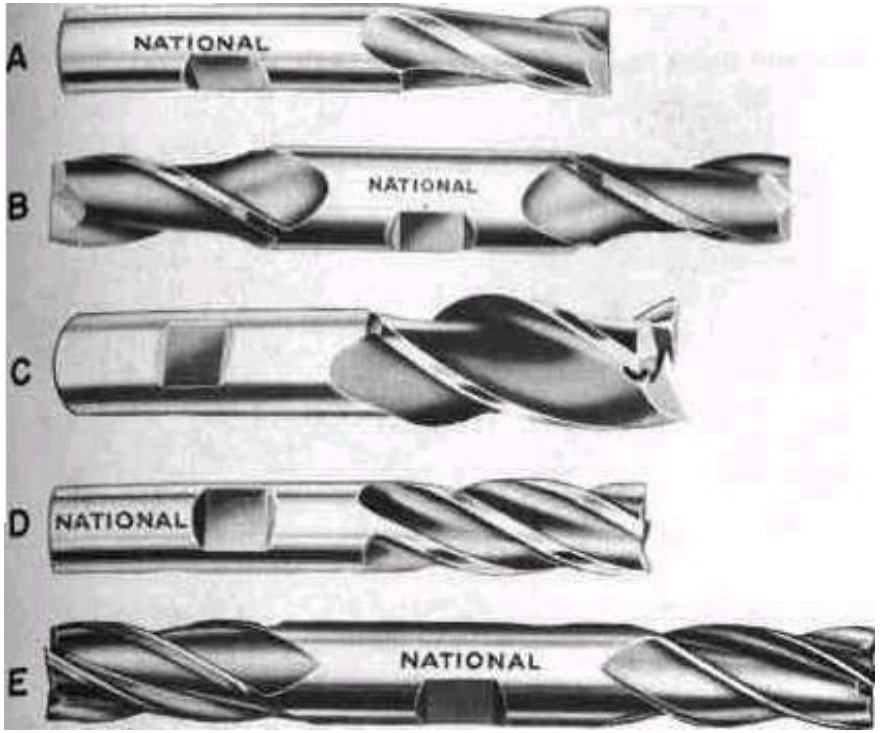


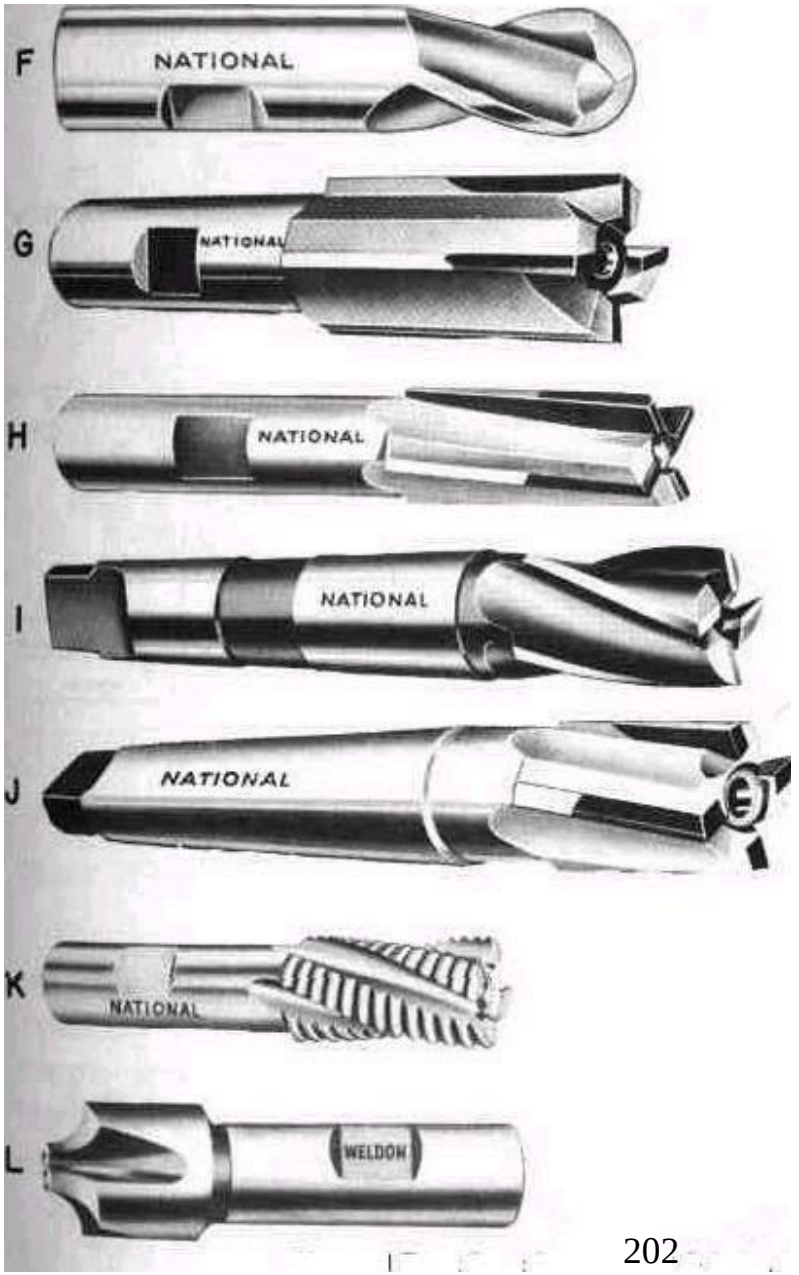
Типы фрез и элементы срезаемого слоя металла: *а* – цилиндрические; *б* – дисковые трехсторонние; *в* – дисковые пазовые; *г* – дисковые прорезные и отрезные; *д* – дисковые угловые; *е* – дисковые фасонные с выпуклым профилем; *ж* – дисковые фасонные с вогнутым профилем; *з, и* – концевые; *к* – торцовые.

t – глубина резания; *B* – ширина фрезерования; *D* – диаметр фрезы

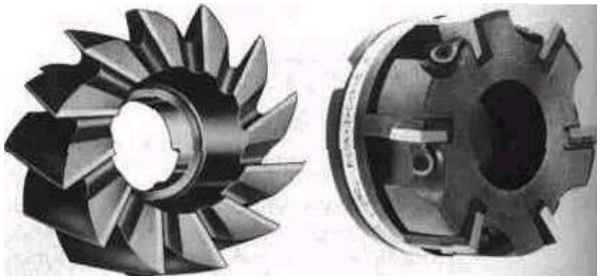
Фрезы (продолжение)

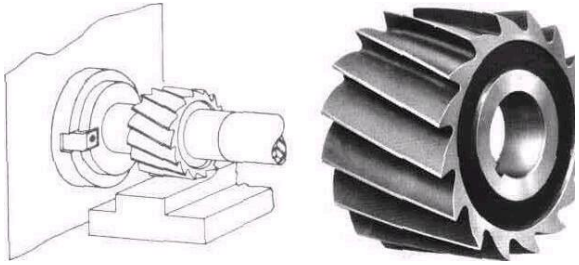


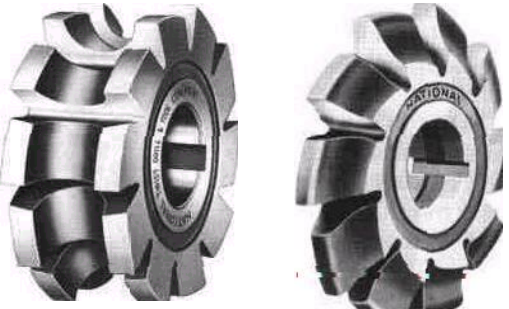


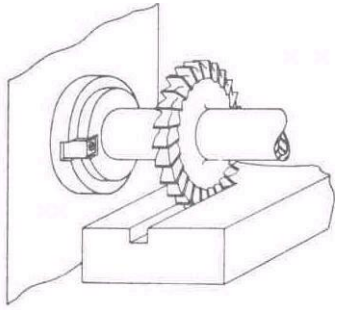


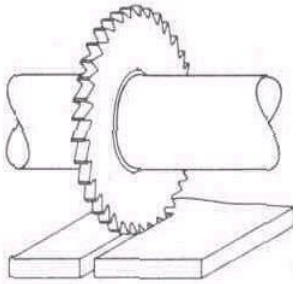
Фрезы (продолжение)

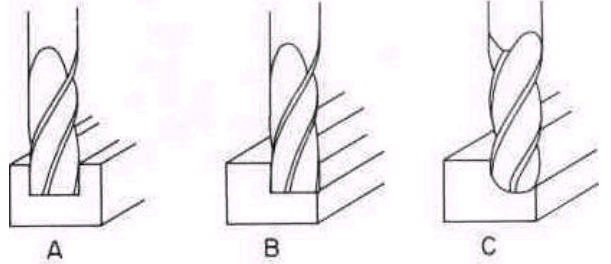


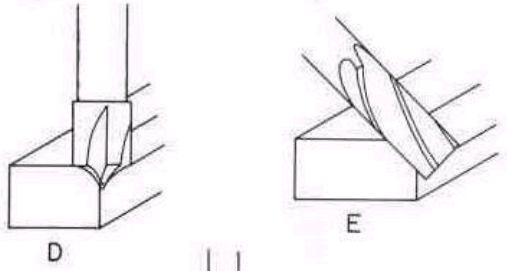


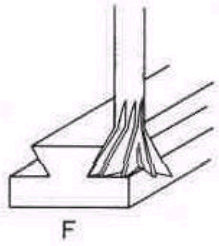


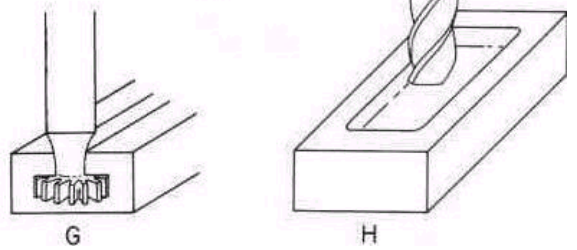






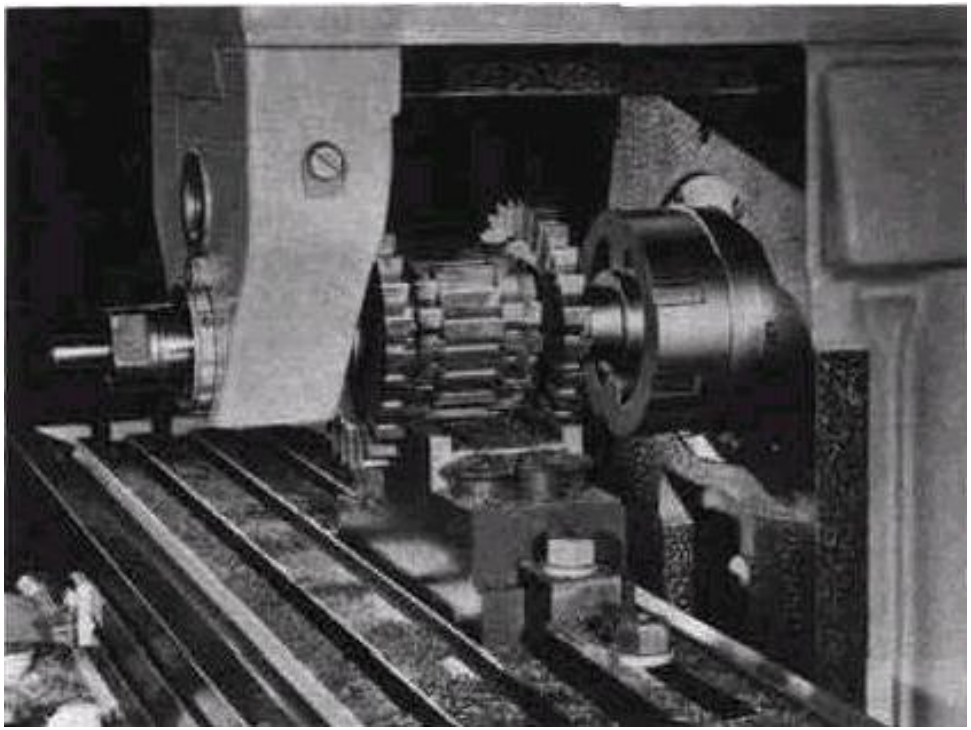






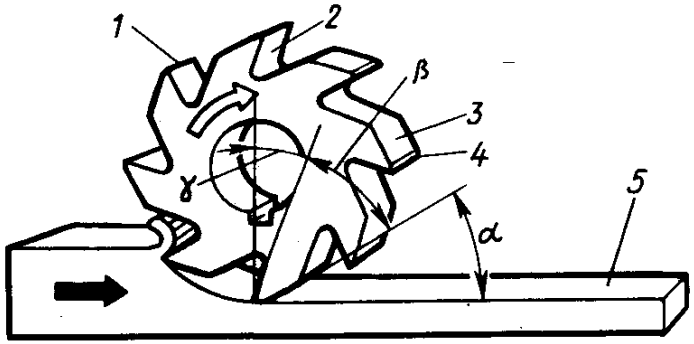
Виды обработки, выполняемые концевыми фрезами: (A) фрезерование шпоночных пазов и канавок, (B) уступов, (C) выпуклых радиусных и фасочных поверхностей, (D) вогнутых радиусных, (E) наклонных поверхностей, (F) «ласточкин хвост», (G) Т-образные пазы, (H) фрезерование карманов.

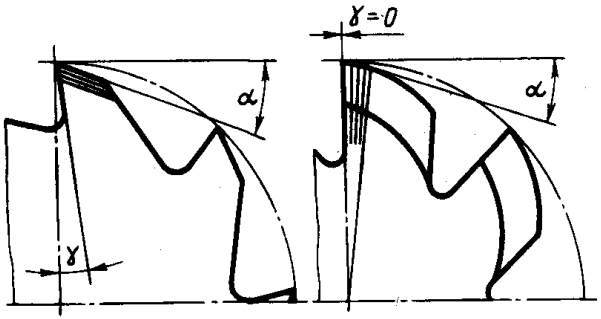
Фрезы (продолжение)



Так как **фреза получает вращение *n*** (об/мин) от главного привода, а **заготовка**, закрепленная на столе станка, – **движение подачи $s_м$ (мм/мин)** от **отдельного привода** станка, кинематически не связанное с вращением фрезы, то подача назначается в два этапа. Сначала по справочнику назначается **подача на зуб s_z (мм/зуб)** , а затем по **числу зубьев фрезы *z* (шт), глубине резания *t* (мм) и ширине фрезерования *B* (мм)** рассчитывается **скорости резания *v* (м/мин)**. После этого **рассчитывается частота вращения шпинделя** (фрезы) $n = 1000 \cdot v/\pi \cdot d_{фр}$ **(об/мин), которая устанавливается на станке**. После этого рассчитывается минутная подача $s_м = s_z \cdot z \cdot n$ **(мм/мин)** , которая и **устанавливается на станке**. В наибольшей степени на шероховатость обработанной поверхности влияет подача на зуб s_z (мм/зуб). Поскольку на фрезерном станке **устанавливается минутная подача $s_м$, то при увеличении скорости резания *v* (м/мин), а значит и увеличении частоты вращения шпинделя $n = 1000 \cdot v/\pi \cdot d_{фр}$ (об/мин), необходимо увеличивать минутную подачу $s_м$, чтобы величина подачи на зуб s_z оставалась неизменной, а производительность увеличилась.**

Геометрические элементы режущей части цилиндрической фрезы: *1* – режущая кромка; *2* – передняя поверхность; *3* – задняя поверхность; *4* – ленточка; *5* – обработанная поверхность заготовки



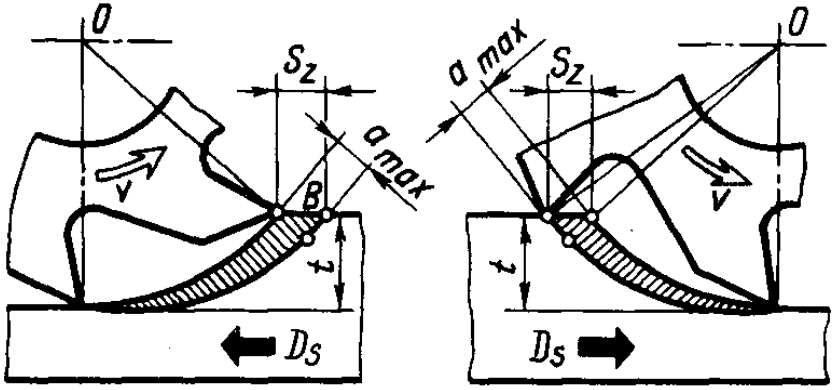


а *б*

Схема заточки фрез:
а – острозаточенных (заточка по задней поверхности);
б – затылованных (заточка по передней поверхности)

Схемы фрезерования

Фрезерование может быть осуществлено двумя **способами** (по двум **схемам**): ***встречное фрезерование***, когда **направление подачи направлено против направления вращения фрезы** (скорости резания) (рис. *а*), и ***попутное фрезерование***, когда направления движения подачи и вращение фрезы совпадают (рис. *б*).



а – **встречное** фрезерование; *б* – попутное фрезерование

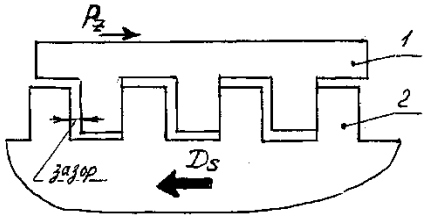


Схема выборки зазора в винтовой передачи при **встречном** фрезеровании;
1 – гайка стола;
2 – ходовой винт

Достоинства встречного фрезерования

1) Нагрузка на зуб фрезы возрастает постепенно: от нуля при врезании (т.к. **толщина среза** $a_i = a_{нач} = 0$ мм) до максимума (т.к. $a_i = a_{max}$) на выходе из контакта;

2) Зубья фрезы работают из-под «корки», выламывая её снизу, начинают **врезаться в уже обработанную** чистую поверхность, что уменьшает износ при фрезеровании поковок с поверхностью, покрытой окалиной и наклёпанным слоем, а также литых заготовок;

3) Составляющая сила резания P_z направлена против движения подачи D_s, поэтому при этой схеме **зазоры между боковыми поверхностями резьбы ходового винта и гайкой стола всегда выбраны** , что, в отличие от попутного фрезерования, позволяет избежать рывков, т.е. резкого перемещения стола с гайкой в направлении действия силы резания при врезании очередного зуба.

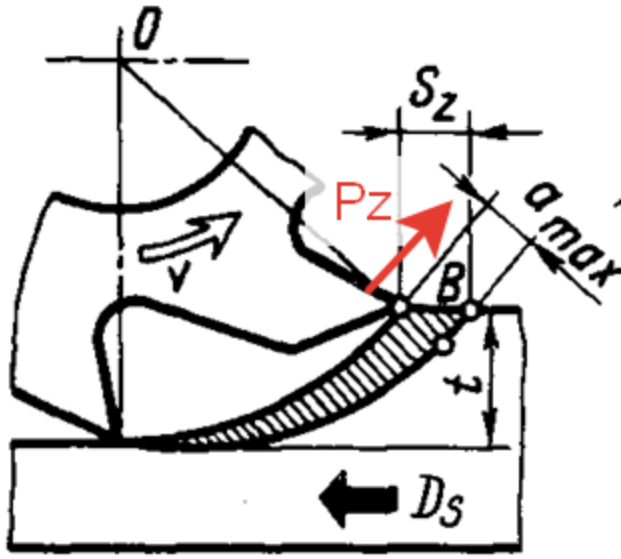
Недостатки встречного фрезерования:

1) на этапе окончания работы зуба фрезы составляющая **сила резания P_z стремится оторвать заготовку от стола** станка (P_z будет направлена вправо и немного вверх, см. рис. *а*), что при больших сечениях среза приводит к дрожанию (вибрации) и ухудшению шероховатости обработанной поверхности, требуется надёжное закрепление заготовки;

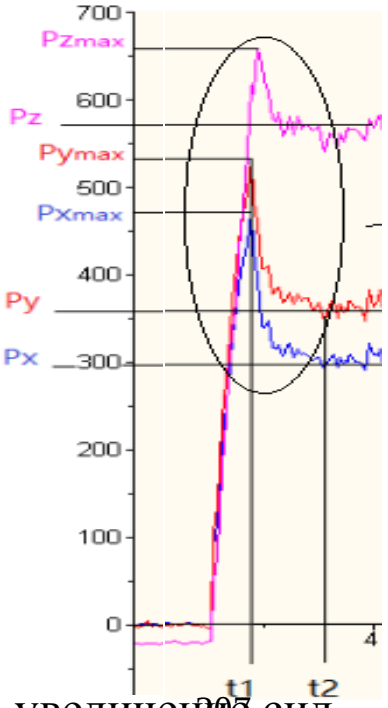
2) при врезании режущая кромка зуба начинает работу с **нулевой толщиной среза**, что увеличивает составляющие силы резания **до появления стружки (рис. б)** , увеличивает **трение по задней поверхности** и приводит к повышенному износу по задней поверхности. Но при обработке заготовки с «коркой» этот износ всё таки не такой интенсивный по сравнению с врезанием в «корку»;

3) врезание с нулевой толщиной среза приводит к затиранию поверхности, увеличивает наклёп и шероховатость обработанной поверхности;

4) к **окончанию работы зуба толщина среза максимальна a_{max}**, что приводит **к резкому снятию нагрузки на зуб** при выходе из контакта с заготовкой, что увеличивает вероятность выкрашивания режущей кромки.



а – **встречное** фрезерование



б – увеличение сил резания при врезании

Достоинства попутного фрезерования:

1) при попутном фрезеровании заготовка **прижимается** к столу силой P_z, требуется небольшая сила для прижатия заготовки к столу;

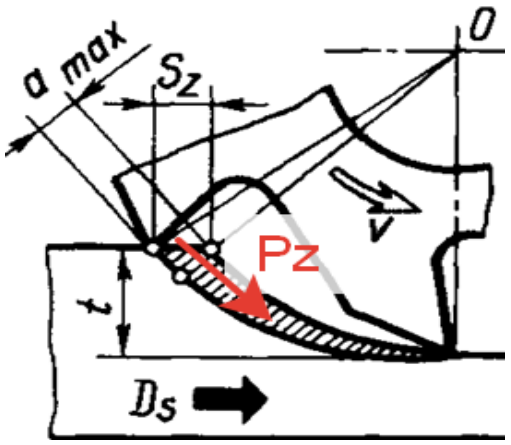
2) каждый зуб фрезы начинает **врезаться с максимальной толщиной среза, нет подмятия слоя металла** под режущую кромку, поэтому при предварительно обработанной и чистой поверхности износ по задней поверхности уменьшается;

3) при выходе из контакта с заготовкой толщина среза равна нулю ($a_{конечн}$= 0 мм), что уменьшает шероховатость обработанной поверхности и вероятность выкрашивания режущей кромки из-за плавного уменьшения нагрузки до нуля, увеличивает точность обработки.

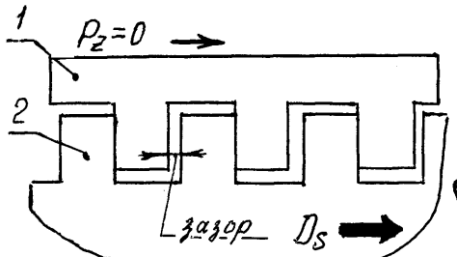
Недостатки попутного фрезерования:

1) при наличии на заготовке окалины (корки) зуб ударяется о неё, что приводит к быстрому разрушению режущей кромки.

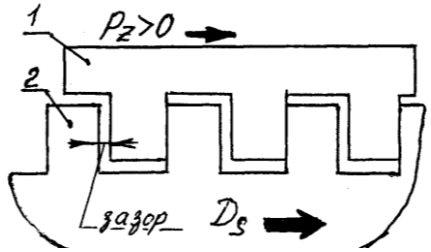
2) составляющая сила резания P_z направлена по направлению движения подачи, поэтому **если контакта зуба фрезы с заготовкой нет**, то **появляется зазор** между боковыми поверхностями резьбы ходового винта и гайкой стола из-за люфта (рис. ***а***, зазор ***слева*** от витка винта). Когда зуб начинает врезаться, то от появившейся силы P_z стол дёргается в направлении действия этой силы, и зазор исчезает (рис. ***б***, зазор уже ***справа*** от витка винта).



попутное фрезерование



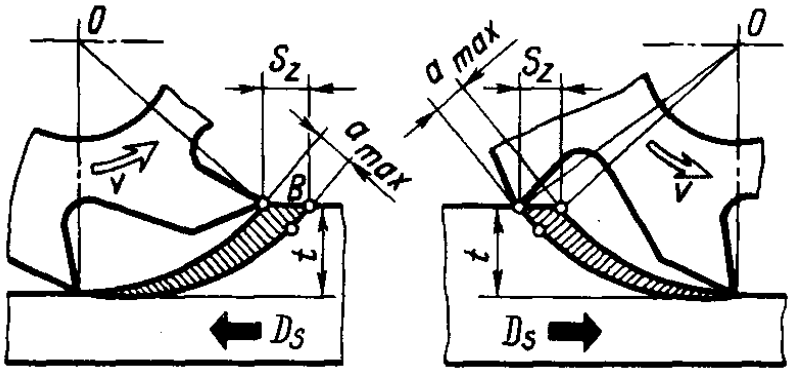
а - зазор ***слева*** от витка винта



б - зазор ***справа*** от витка винта

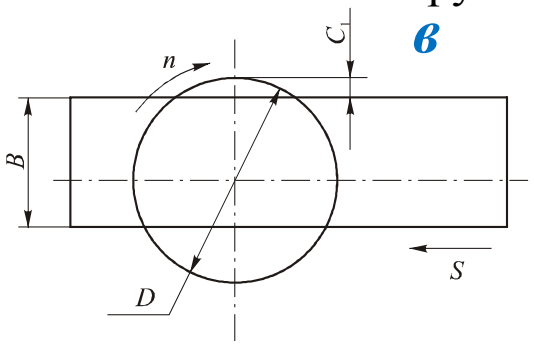
Схема резкой выборки зазора в винтовой передачи при **попутном** фрезеровании; *1* – гайка стола; *2* – ходовой винт

Встречное фрезерование применяется при **черновой** обработке,
а **попутное** – при **чистовой**, но обязательно при наличии без зазорного соединения по боковой поверхности ходового винта и гайки стола.



а – **встречное** фрезерование; *б* – **попутное** фрезерование

При **торцовом** фрезеровании для достижения производительных режимов резания **диаметр фрезы *D* должен быть больше ширины фрезерования *B***, т.е. ***D* = (1,25…1,5)×*B***, а при обработке заготовок обязательным является их **несимметричное расположение относительно фрезы**: для заготовок из **конструкционных углеродистых и легированных сталей** – сдвиг их **в направлении врезания зуба фрезы** (рис. ***в***) (C_1=2-4 мм), чем обеспечивается начало резания **при малой толщине срезаемого слоя**; для заготовок из **жаропрочных и коррозионно-стойких сталей** – сдвиг заготовки **в сторону выхода зуба фрезы из резания** (рис. ***г***), чем обеспечивается выход зуба из резания с минимально возможной толщиной срезаемого слоя (C_2=2-4 мм). Несоблюдение указанных правил приводит к значительному снижению стойкости инструмента.



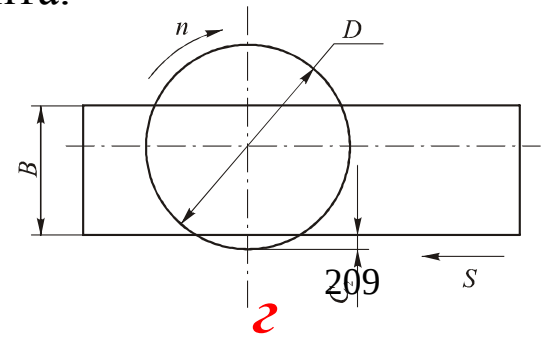
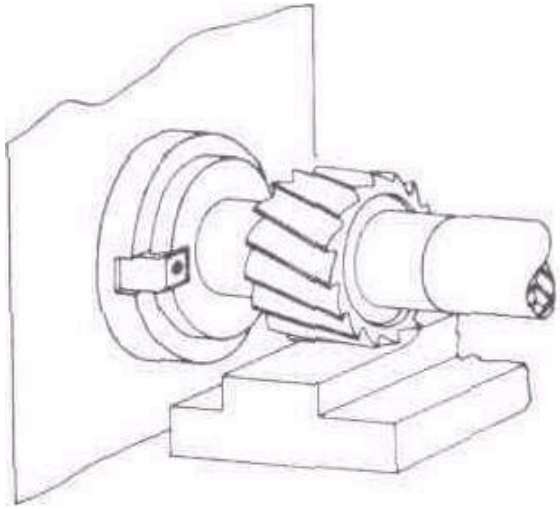
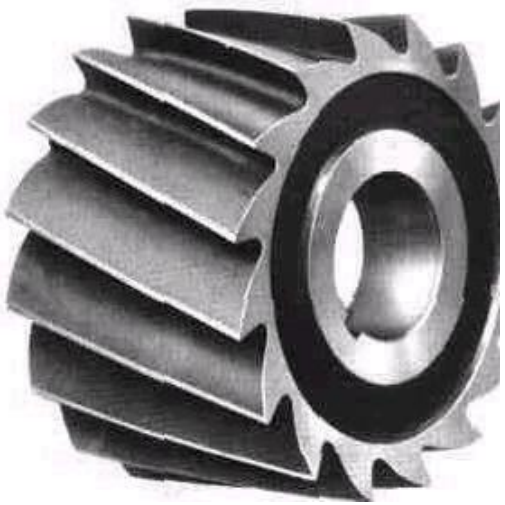


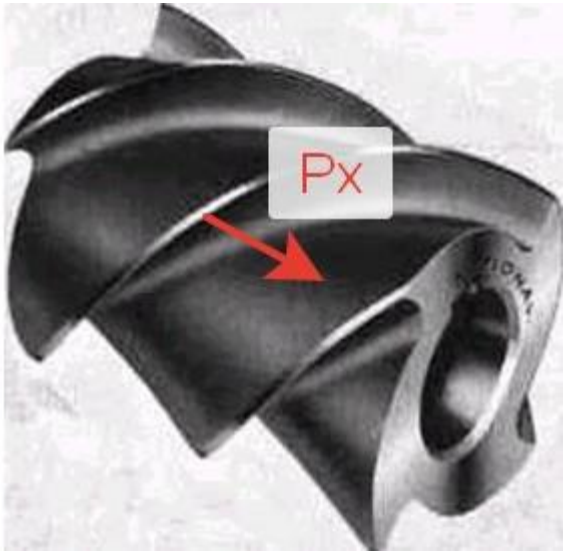
Рис. ***в*** – при торцовом фрезеровании констр. стали (C_1=2-4 мм);
г – при торцовом фрезеровании **жаропрочных и коррозионно-стойких сталей** (C_2=2-4 мм)

Фрезерование (продолжение)

Для уменьшения неравномерности фрезерования используется большое количество зубьев, а у цилиндрических и концевых фрез дополнительно используется косозубая и винтовая форма стружечных канавок.



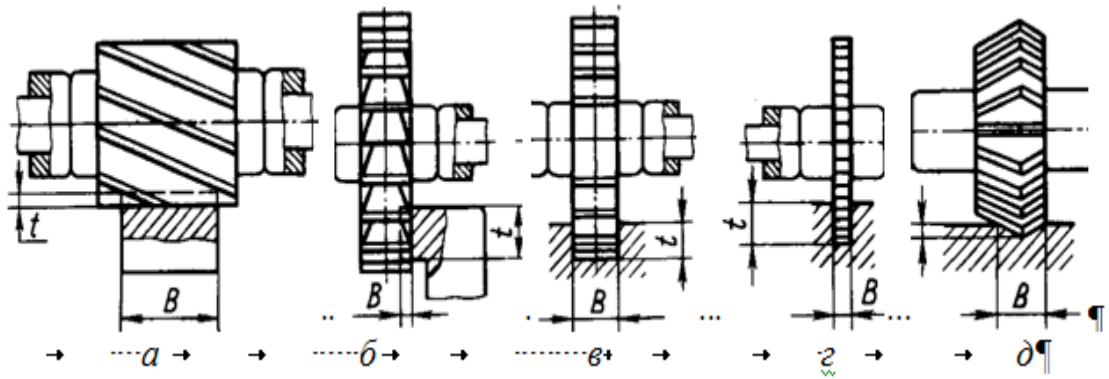




Глубина фрезерования *t* и ширина фрезеровании *B* – понятия, связанные с размерами слоя заготовки, срезаемого при фрезеровании. **Во всех видах фрезерования, за исключением торцового, *t* определяет продолжительность контакта зуба фрезы с заготовкой; *t* измеряется в направлении, перпендикулярном к оси фрезы.**
Ширина фрезерования *B* определяет длину лезвия зуба фрезы, участвующую в резании; ***B* измеряется в направлении, параллельном оси фрезы.**
При **торцовом фрезеровании эти понятия меняются местами (рис. *к*).**

Виды фрез

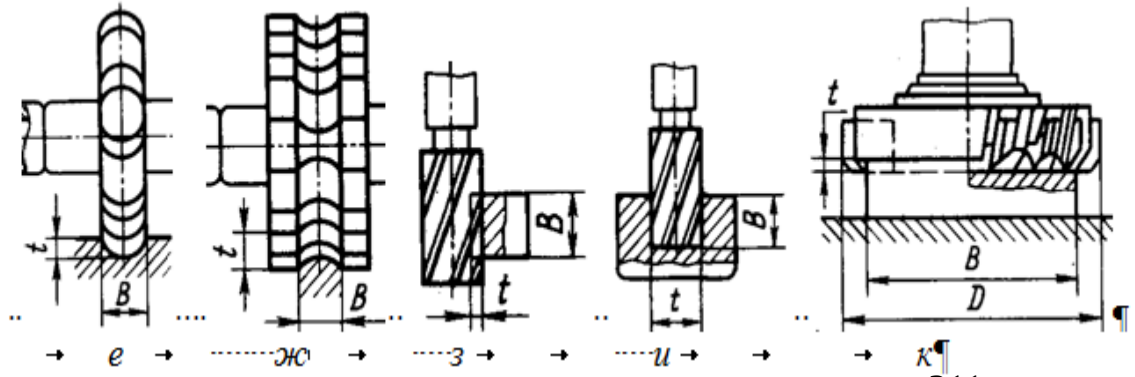
***а* – цилиндрические;**
***б* – дисковые трехсторонние;**
***в* – дисковые пазовые;**
***г* – дисковые прорезные и отрезные;**
***д* – дисковые угловые;**



***е* – дисковые фасонные с выпуклым профилем;**
***ж* – дисковые фасонные с вогнутым профилем;**

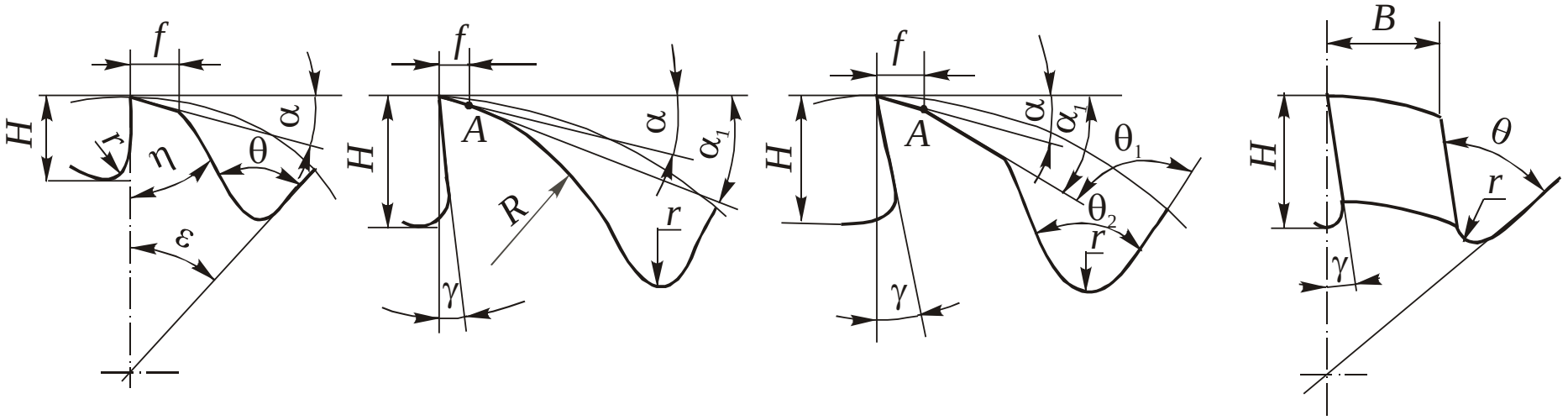
***з, и* – концевые;**

***к* – торцовые.**



***t* – глубина резания; *B* – ширина фрезерования; *D* – диаметр фрезы**

По конструкции зубьев фрезы делятся на две большие группы: с **остроконечными** и с **затылованными** зубьями. Процесс фрезерования характеризуется снятием тонких стружек переменной толщины. **Переточка** остроконечных зубьев **по задней поверхности**, где в основном **происходит износ** при фрезеровании, позволяет уменьшить припуск на переточку, **увеличить срок службы фрезы**, уменьшить объем зубьев и главное – **увеличить их число *z***, от которого пропорционально зависит производительность процесса фрезерования (**$s_м = s_z \cdot z \cdot n$**). **При увеличении числа зубьев** фрезы **снижается шероховатость** обработанной поверхности и **уменьшается неравномерность процесса резания**. На практике получили распространение три формы остроконечных зубьев: 1) трапециевидная, 2) параболическая; 3) усиленная.



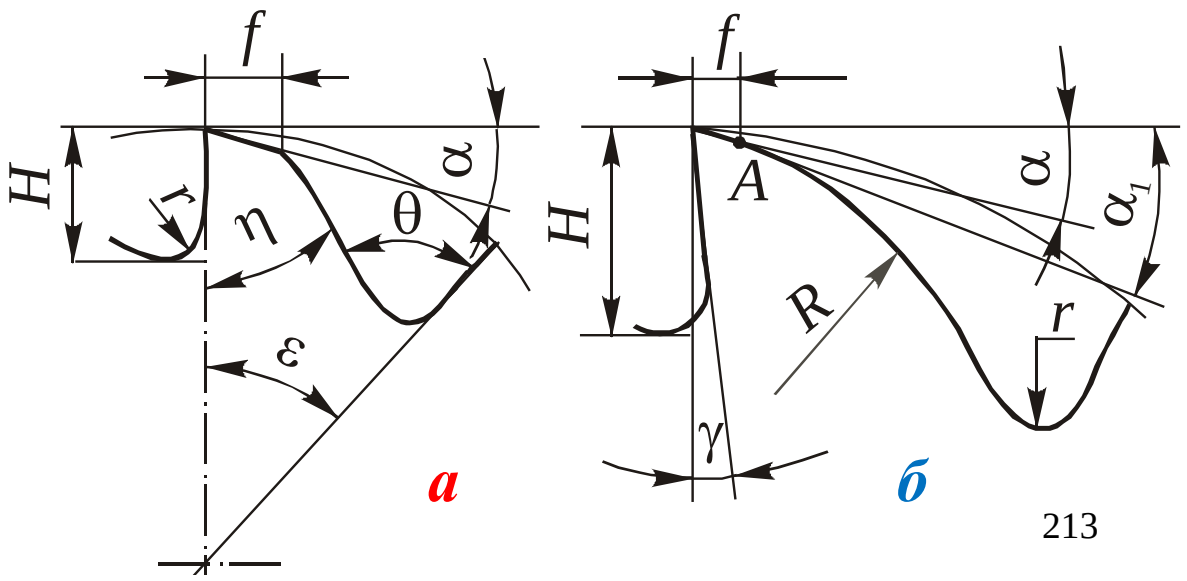
а) б) в) г)

Формы зубьев фрез: *а* – трапециевидная; *б* – параболическая; *в* – усиленная; *г* – затылованный зуб

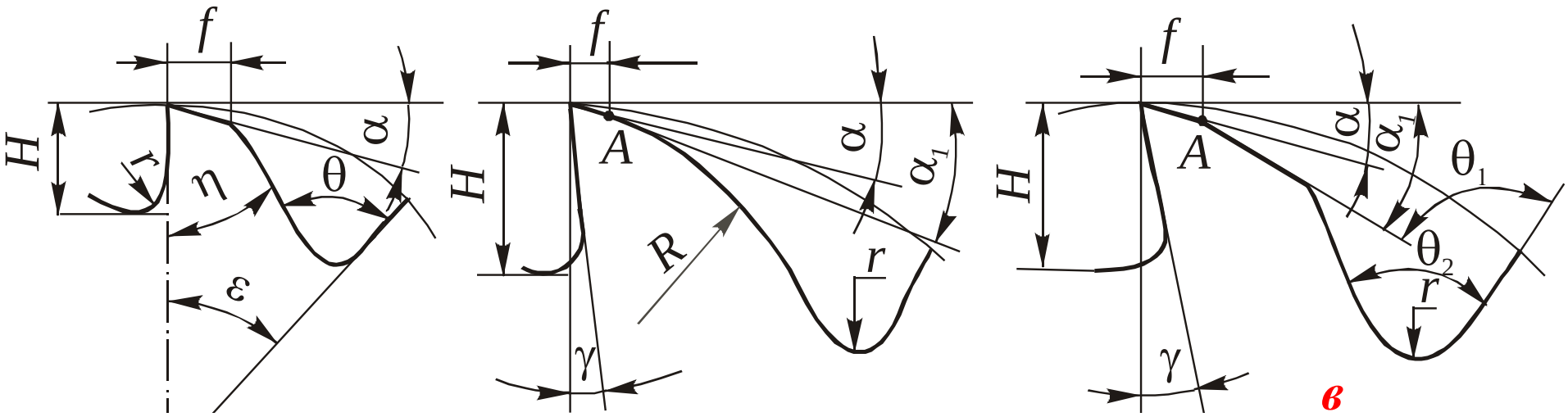
Трапециевидная форма (рис. ***а***) наиболее простая в изготовлении, но при этом зуб несколько ослаблен, поэтому имеет небольшую высоту и малый объем стружечной канавки. По мере переточки зуба по задней грани (фаска $f = 1…2$ мм) его высота уменьшается и он становится более прочным. Однако такая форма зубьев допускает **небольшое число переточек** и применяется на фрезах **для чистовой** обработки. При этом **число зубьев максимальное** из-за их малого объема. Канавки в таких фрезах изготавливают либо **фрезерованием**, либо вышлифовыванием эльборовыми или алмазными кругами в цельных заготовках на станках с ЧПУ.

Параболическая форма зуба (рис. ***б***) обладает **наибольшей прочностью на изгиб**, так как спинка зуба, оформленная по параболе, обеспечивает равнопрочность во всех сечениях по высоте зуба. Недостатком этой формы является необходимость **для каждой высоты зуба** иметь свою **сложную фасонную канавочную фрезу**. Поэтому с целью упрощения профиля спинки таких фрез **параболу часто заменяют дугой окру**жности радиусом $R = (0{,}3…0{,}4)d$.

Формы зубьев:
а – трапециевидная;
б – параболическая



Усиленная форма зуба (рис. ***в***) применяется для **тяжелых работ** вместо параболической формы. Такой зуб имеет ломаную спинку, а также увеличенные толщину и высоту. Получают эти зубья двойным фрезерованием угловыми фрезами с углами $\theta_1 = 28…30°$ и θ_2. Хотя при этом число операций увеличивается вдвое, такие зубья **проще в изготовлении, чем параболические**. Они имеют **больший запас на переточку** и высокую прочность. При этом используются **стандартные канавочные фрезы** с прямолинейными режущими кромками. При переточке зубья затачиваются по задней поверхности под углом α доостра с обязательным выхаживанием во избежание биения режущих кромок. **Иногда** оставляют **цилиндрические ленточки** шириной $f_л$=0,02…**0,03 мм**, которые упрощают **контроль биения зубьев** фрезы.



Формы зубьев *а* – трапециевидная; *б* – параболическая; ***в*** – усиленная;

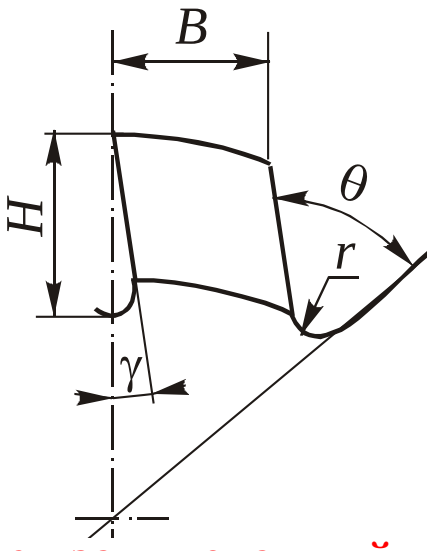
Затылованный зуб (рис. *г*) внешне отличается **большей толщиной**, а главное – **формой задней поверхности,** которая выполняется на специальной операции, называемой **затылованием**, с целью создания **задних углов во всех точках режущих кромок.** Достигается это за счет того, что радиальное сечение зуба, содержащее фасонный профиль, по мере поворота фрезы вокруг оси смещается в направлении к центру с помощью фасонного резца или шлифовального круга. **Благодаря затылованию** профиль режущей кромки зуба **при переточках по передней** поверхности во всех радиальных сечениях остается **неизменным,** поэтому используется при обработке **фасонных поверхностей** . **Простая** переточка по передней поверхности. Кроме того, зубья такой формы обладают **высокой прочностью**, а по мере переточки **объем канавок для размещения стружки увеличивается**, что благоприятно сказывается на работе фрезы. **Недостатки:**

1) число **зубьев у затылованных фрез значительно меньше**, чем у фрез с остроконечными зубьями. Это объясняется тем, что затылованные зубья имеют большую толщину, так как **при переточке по передней поверхности приходится снимать больший припуск**, чтобы избавиться от **износа**, который сосредоточен **на задней поверхности** зуба;

2) после переточки наблюдается большое **радиальное биение зубьев**, что приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности и снижению стойкости фрез;

3) у фрез с нешлифованным профилем зубьев после термообработки остаются **обезуглероженные участки на задней поверхности, т.к. обрабатываются до термообработки и не шлифуются после неё**. Это снижает их стойкость;

4) **остаточные термические напряжения** могут вызывать **искажение профиля** режущих кромок фрезы.



***г* – затылованный зуб**

Порядок выбора и расчёта режимов резания при фрезеровании

Уточняется **марка обрабатываемого материала**, вид фрезерования, выбирается **тип** и **размер фрезы**, уточняется **количество зубьев**. Определяется глубина резания *t*, а для чернового фрезерования и наибольшая **возможная глубина резания *t*** и ширина фрезерования *B*, допустимая типом и размером фрезы, мощностью станка. После этого назначается подача. При фрезеровании различают ***подачу*** на один зуб s_z, подачу на один оборот фрезы *s* и подачу минутную $s_м$, мм/мин, которые находятся в следующем соотношении: $s_м = s \times n = s_z \times z \times n$ (1)

где *n* – частота вращения фрезы, об/мин; *z* – количество зубьев фрезы.

Исходной величиной подачи **при черновом фрезеровании** является величина ее **на один зуб s_z**, при чистовом фрезеровании – на один оборот фрезы *s*, по которой для дальнейшего использования вычисляют величину подачи на один зуб $s_z = s/z$**.**

Рекомендуемые подачи для различных фрез и условий резания указаны в справочнике «Справочник технолога-машиностроителя» под редакцией Косиловой , т. 2, раздел «Общие сведения о выборе режимов резания», табл. 33 — 38. Рассчитывается скорость резания. ***Скорость резания*** – окружная скорость фрезы, м/мин,

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s_z^y B^u z^p} K_v$$

Значения коэффициента C_v и показателей степени приведены в табл. 39, а периода стойкости *T* – в табл. 40.

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания $K_v = K_{Mv} \times K_{nv} \times K_{uv}$, где K_{Mv} - коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (см. табл. 1 - 4); K_{nv} - коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (см. табл. 5); K_{uv} - коэффициент, учитывающий материал инструмента (см. табл. 6).

Порядок выбора и расчёта режимов резания при фрезеровании

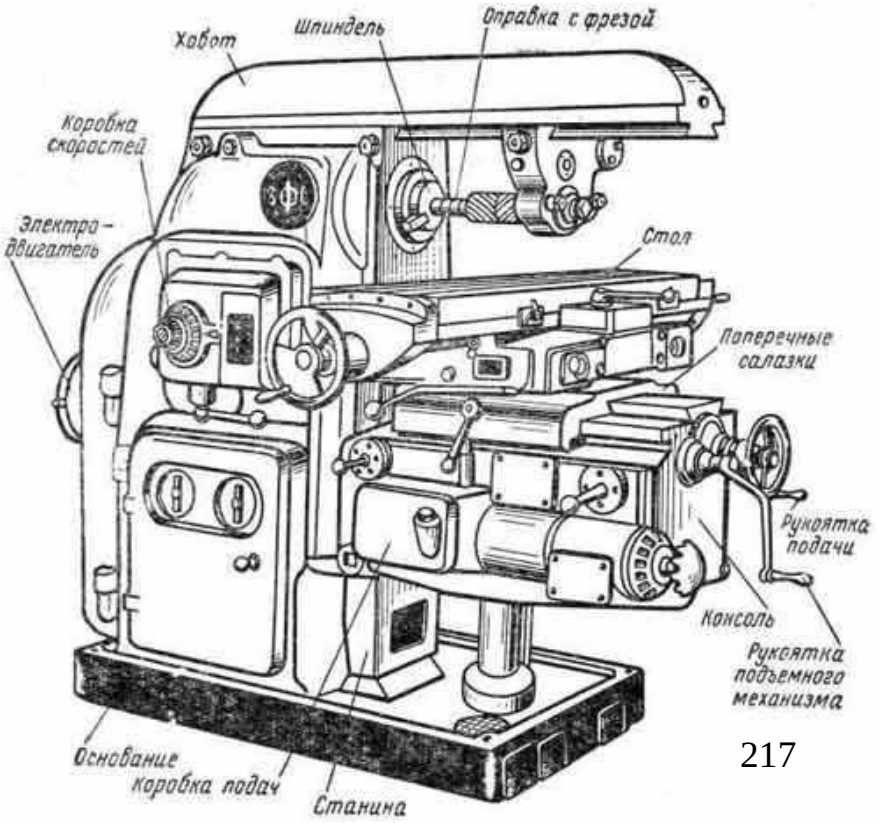
$$v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s_z^y B^u z^p} K_v$$

После расчёта скорости резания, м/мин,
рассчитывается **частота вращения фрезы $n_{расч} = 1000 \cdot v/\pi \cdot D$**, об\мин.
По паспорту станка определяется ближайшая наименьшая частота вращения шпинделя, $n_{пасп}$, которая и принимается для установки на станке.

Рассчитывается **минутная подача $s_м$:** $s_м = s_{об} \times n = s_z \times z \times n$

По паспорту станка определяется ближайшая наименьшая подача, $s_{м\ пасп}$, которая и принимается для установки на станке.

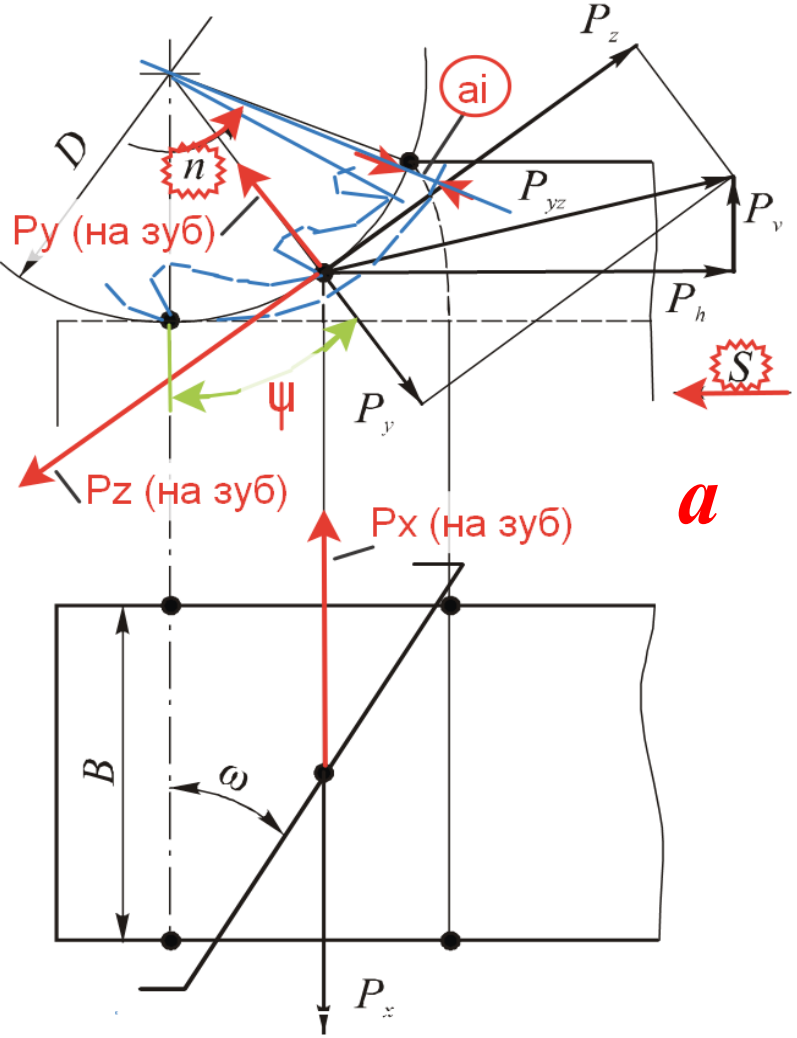
Особенности конструкций фрез, оснащенных твердым сплавом (с.184)

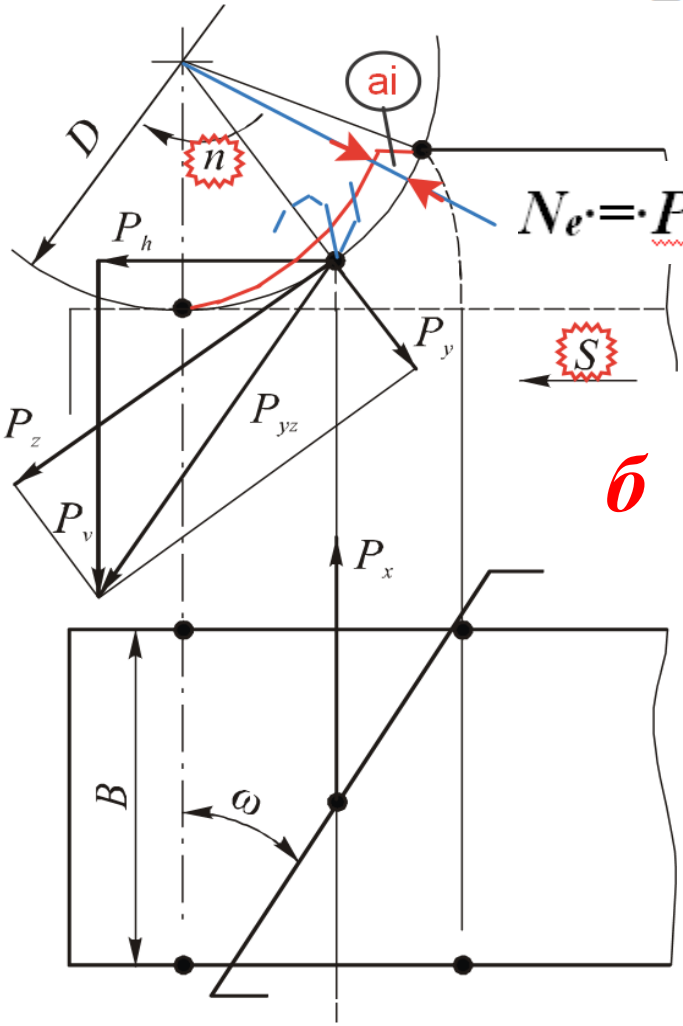


Расчёт составляющих Pz, Py, Ph, Pv, Px силы резания

Фрезерование	P_h/P_z	P_v/P_z	P_y/P_z	P_x/P_z

$$P_z = \frac{10 C_p t^x s_z^y B^u z}{D^q n^w} \times K_{Mp}$$





$$M = \frac{P_z \times D}{2 \times 1000}$$

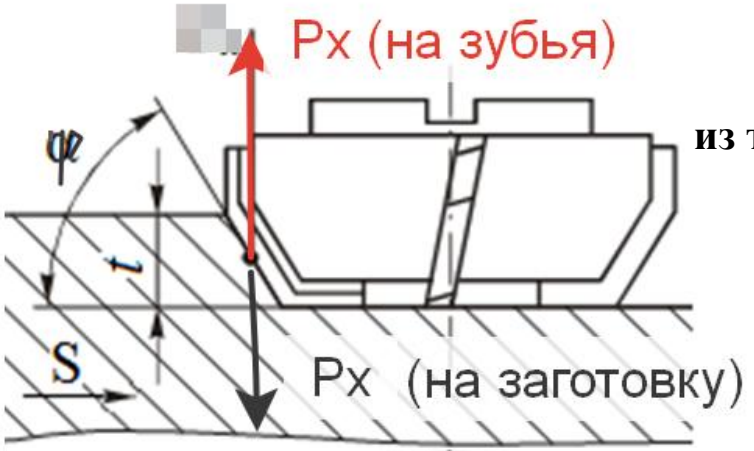
$$N_e = P_z \times v / (1020 \cdot 60)$$

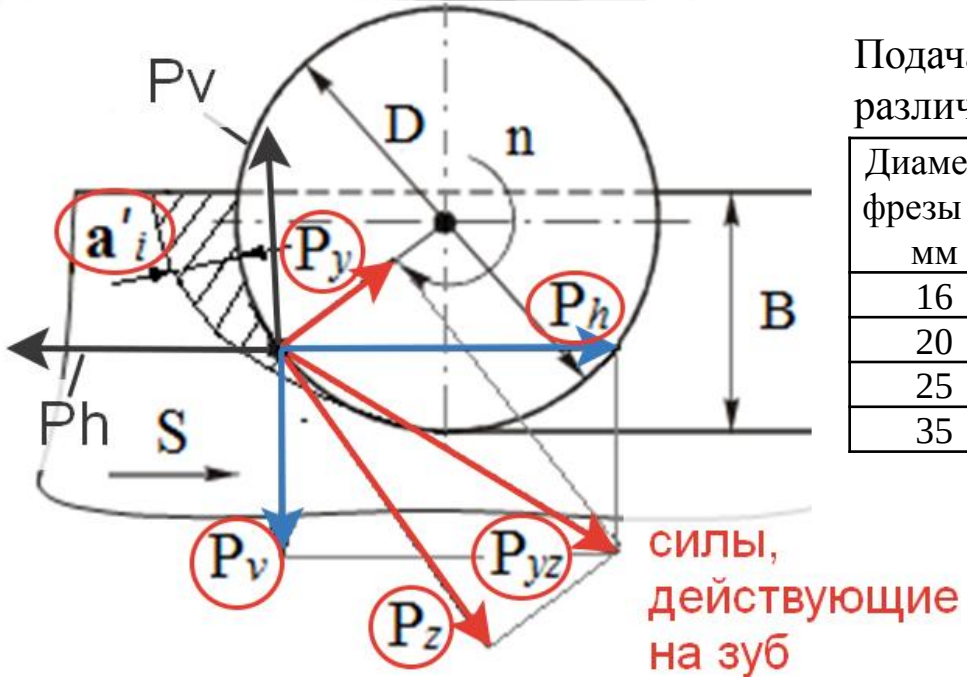
$$a_i = s_z \cdot \sin \psi;$$

$$a_{max} \approx s_z \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{d}}$$

Составляющие силы резания при фрезерования цилиндрической фрезой: ***а*** - при встречном фрезеровании (против подачи); ***б*** — попутном (в направлении подачи)

Направление составляющих Pz, Py, Ph, Pv, Px силы резания





Подачи при **черновом** фрезеровании **торцовыми**, цилиндрическими и дисковыми фрезами с **пластинами из твердого сплава** (при $B > 30$ мм подачу уменьшить на 30%)

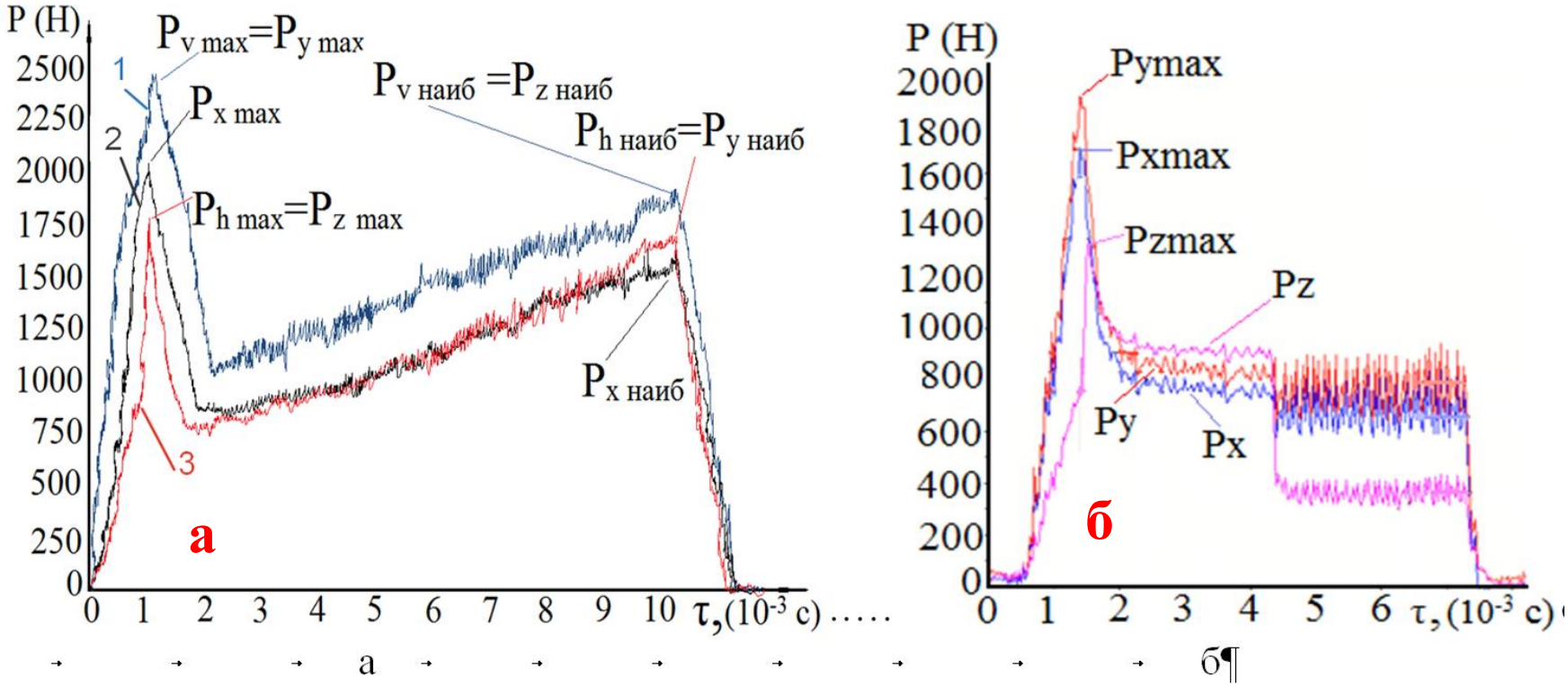
Мощность станка, кВт	Сталь	
	Подача на зуб фрезы s_z, мм (мм/зуб), при	
	Т15К6	Т5К10
5 - 10	0,09 - 0,18	0,12 - 0,18
Св. 10	0,12 -0,18	0,16 - 0,24

Подача при фрезеровании стальных заготовок различными фрезами из **быстрорежущей** стали

Диаметр фрезы D, мм	Тип фрезы	Подача на зуб s_z, мм, при глубине фрезерования t, мм		
		3	5	6
16	**Концевые**	0,08 - 0,05	0,06 - 0,05	—
20		0,10 - 0,06	0,07 - 0,04	—
25		0,12 - 0,07	0,09 - 0,05	0,08 - 0,04
35		0,16 - 0,10	0,12 - 0,07	0,10 - 0,05

Составляющие силы резания при несимметричном **встречном** торцовом фрезеровании

Фрезерование торцовой фрезой с φ=45° (а) и точение резцом с φ=45° (б)



→ → → а → → → → → → → → б¶

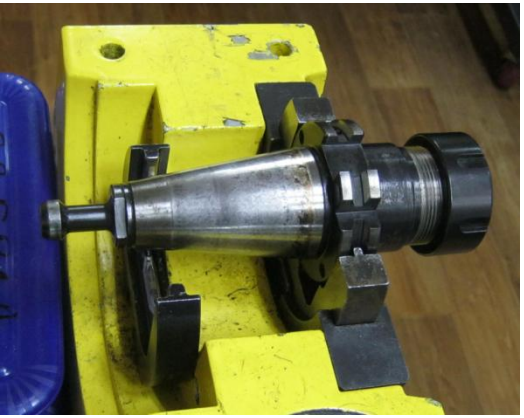
Изменение составляющих силы резания при обработке стали 40Х. Ордината – составляющие силы резания (Н), абсцисса – время обработки τ (с).

а — при торцовом фрезеровании фрезой с одним зубом с углом наклона главной режущей кромки φ = 45 °, **1** – P_v, **2** – P_x, **3** – P_h;

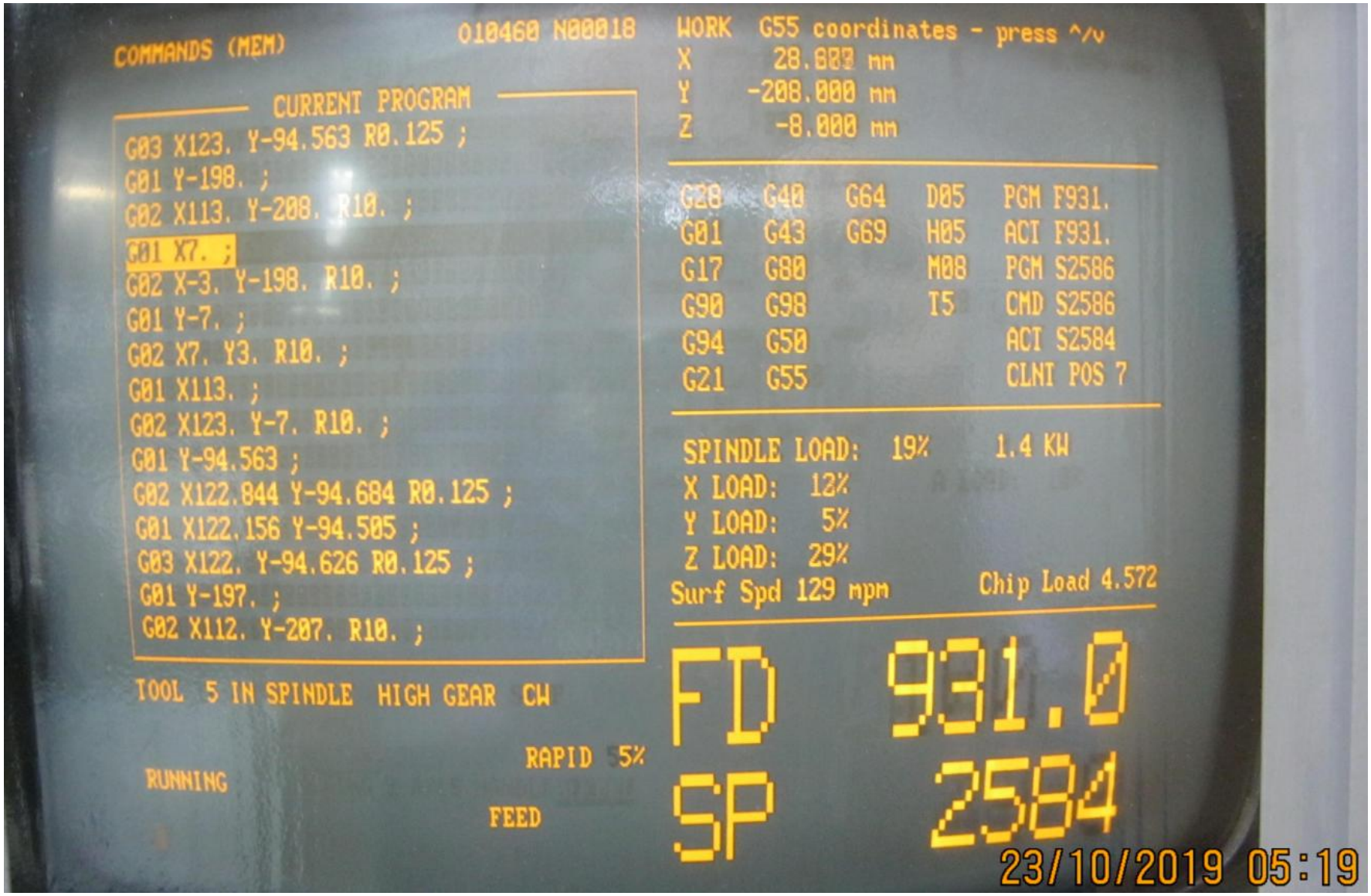
б — при точении резцом **с врезанием в коническую поверхность**, оставленную после предыдущей обработки резцом с углом в плане φ = 45 °, s = 0,07 мм/об, v = 120 м/мин, t = 1,8 мм

Испытание твёрдосплавных фрез

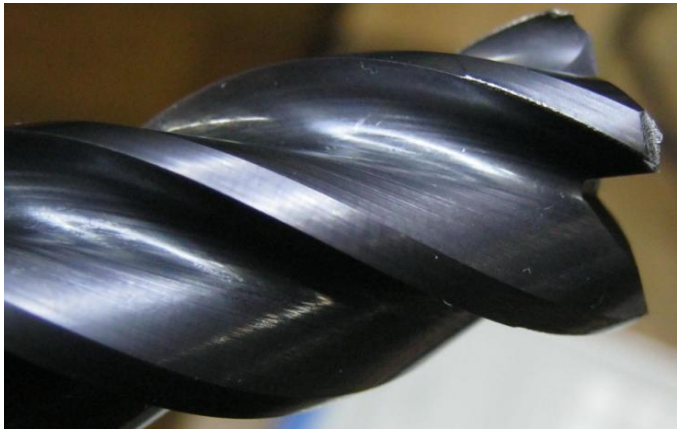
Рабочее место фрезеровщика



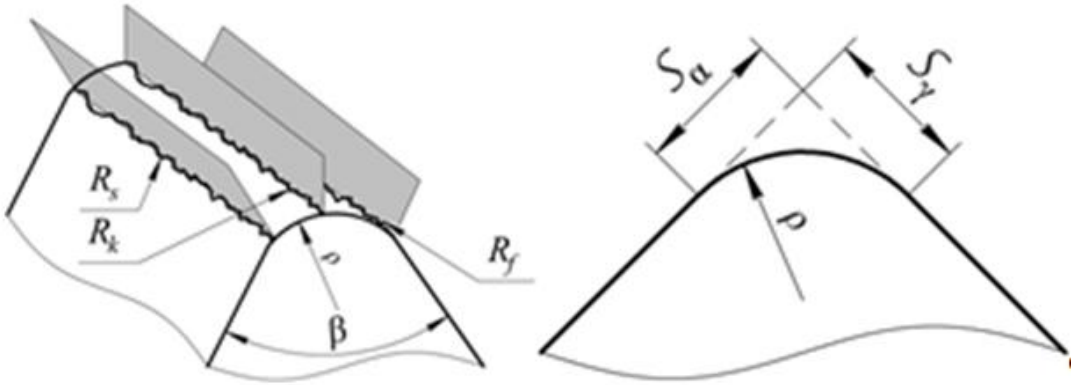
Пульт управления станком



Контроль состояние режущих кромок



Общий вид микроскопа MikroCad Premium (Канада)



Контроль состояние режущих кромок

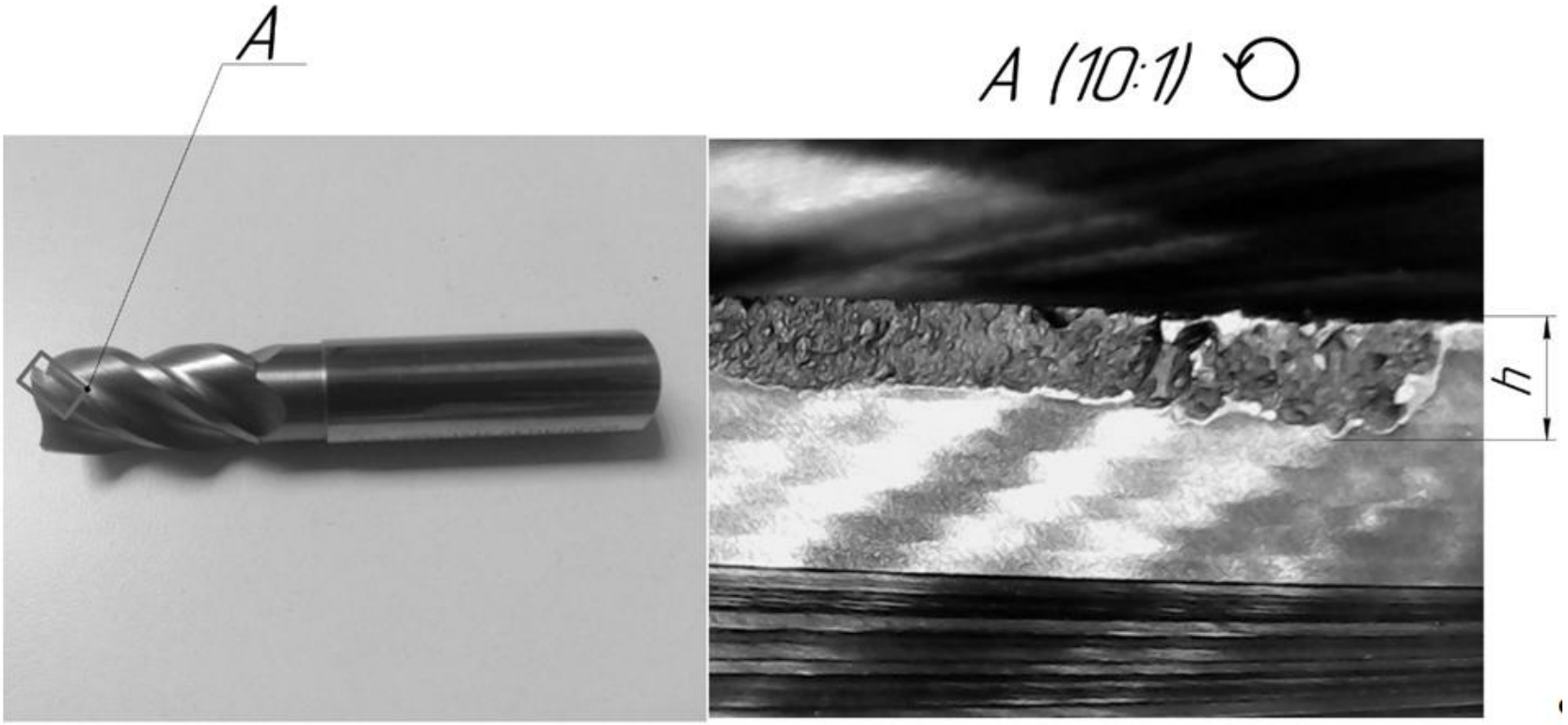
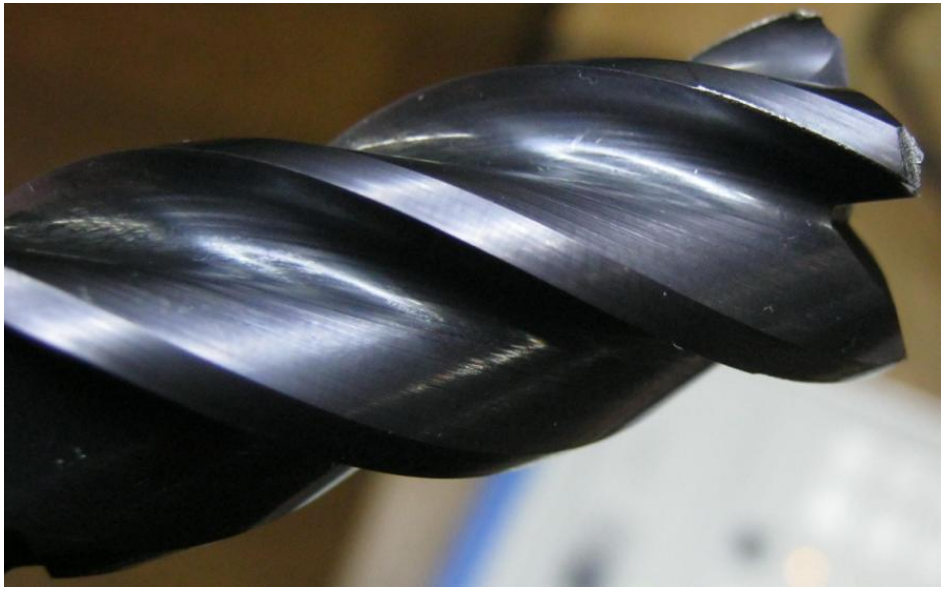
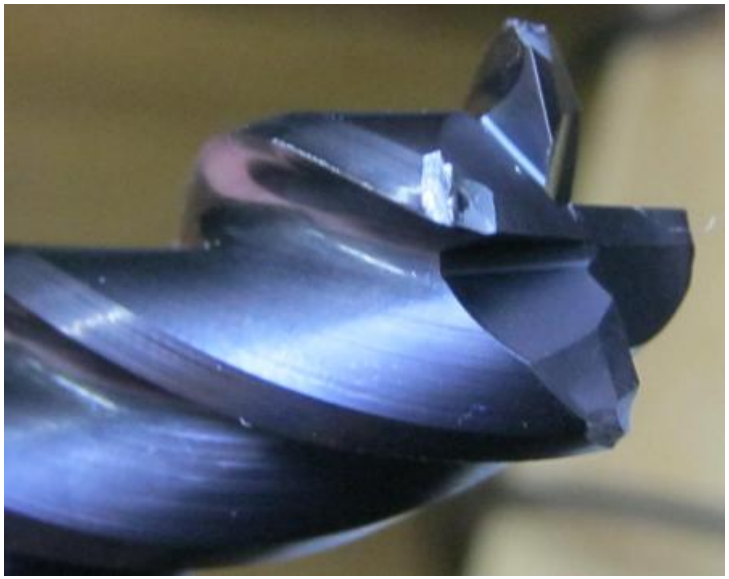


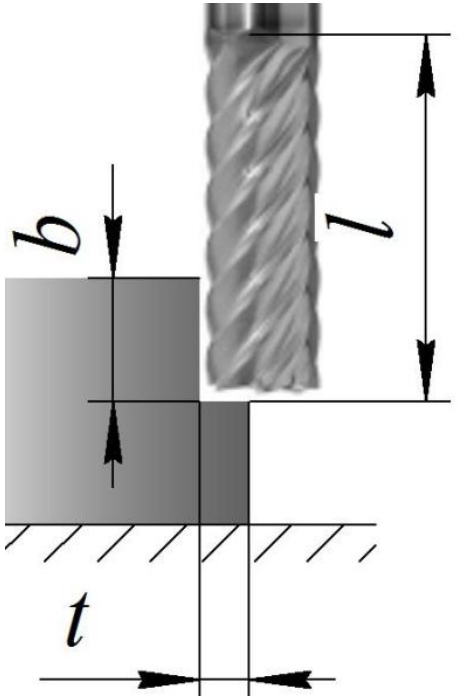
Фото износа (выкрашивания) режущей кромки по задней поверхности

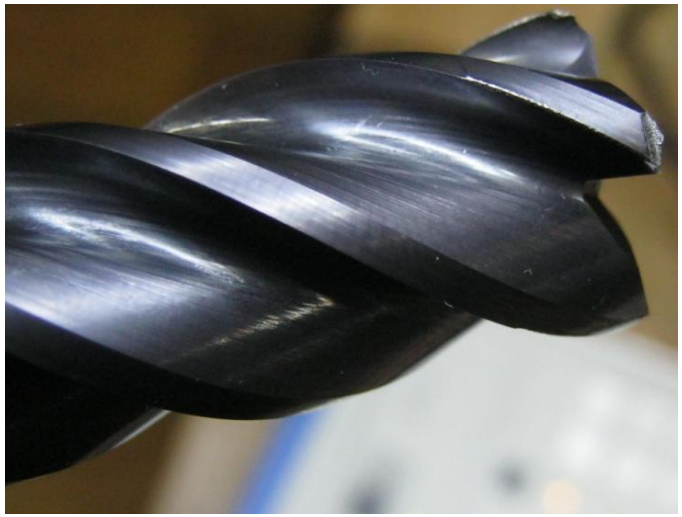
Пульт управления станком

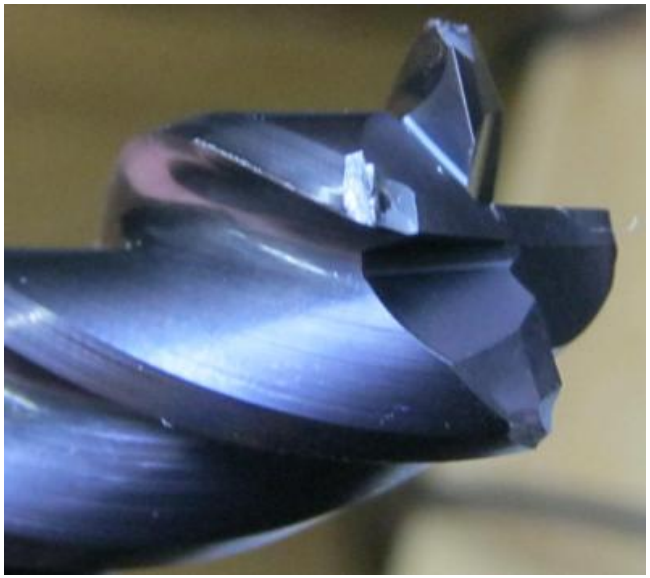




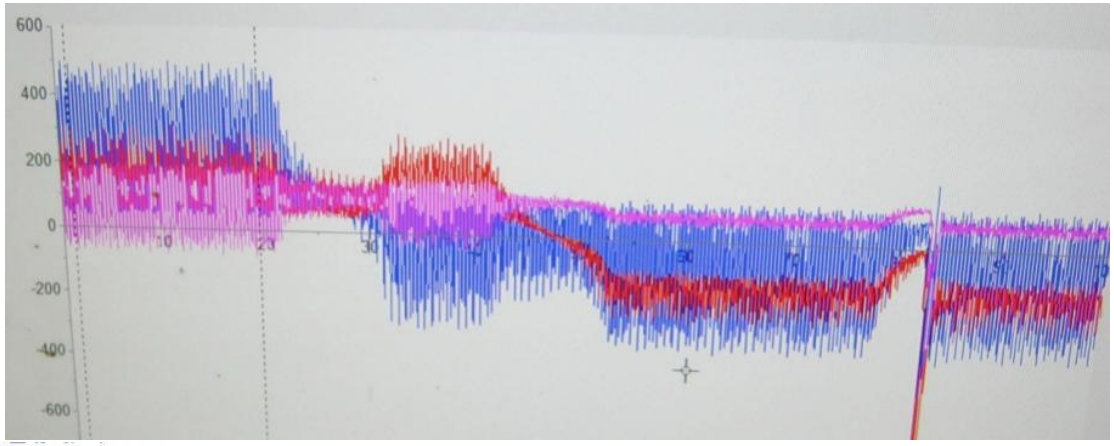
Состояние режущих кромок

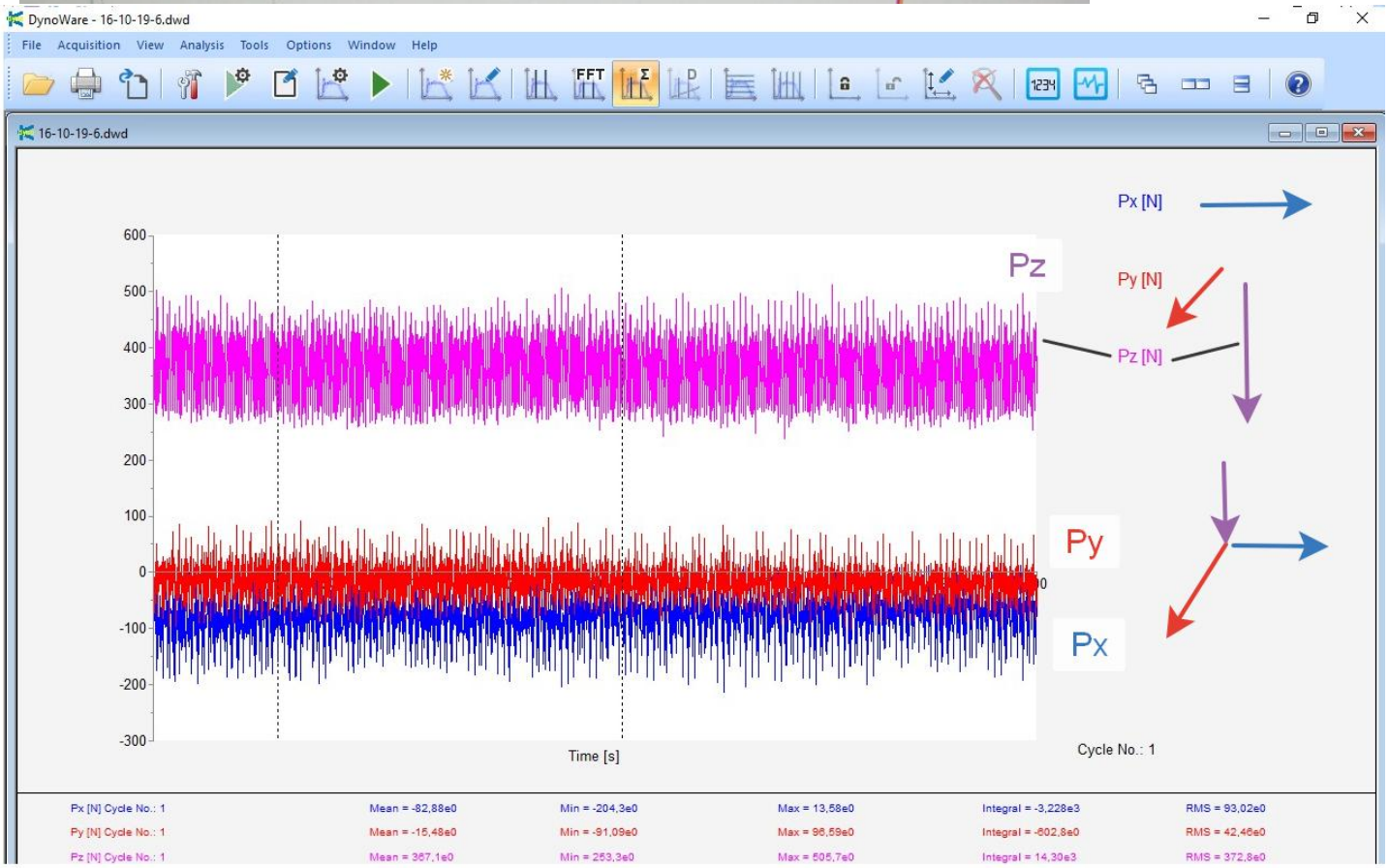




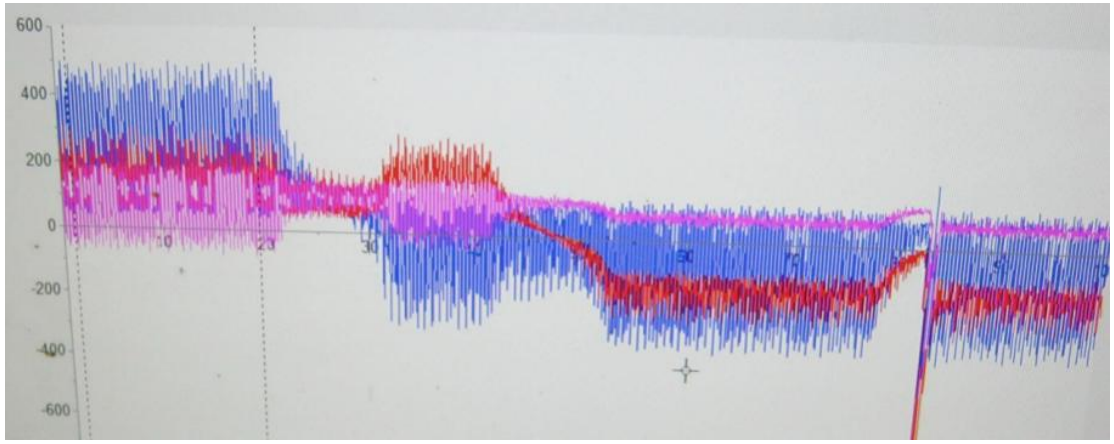


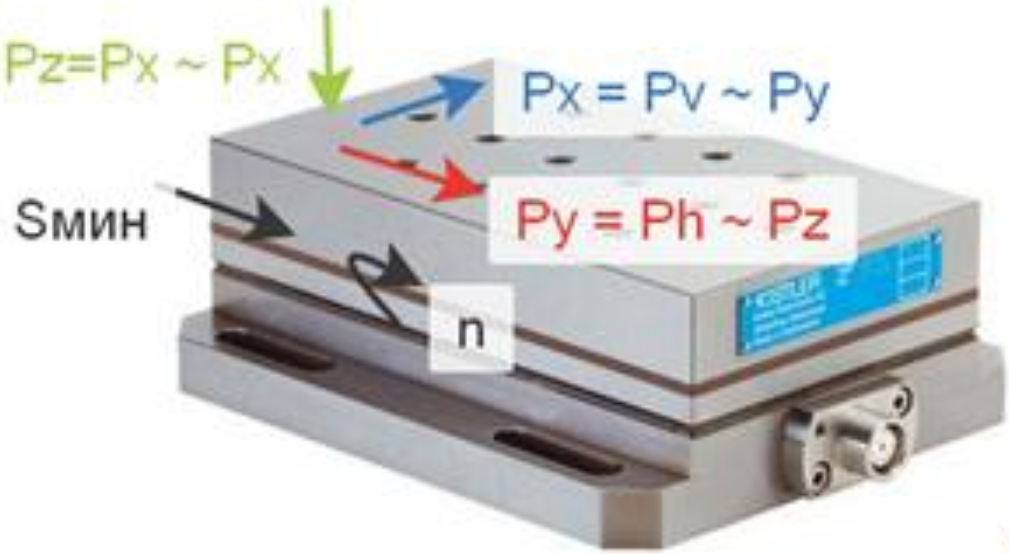
Измерение составляющих силы резания

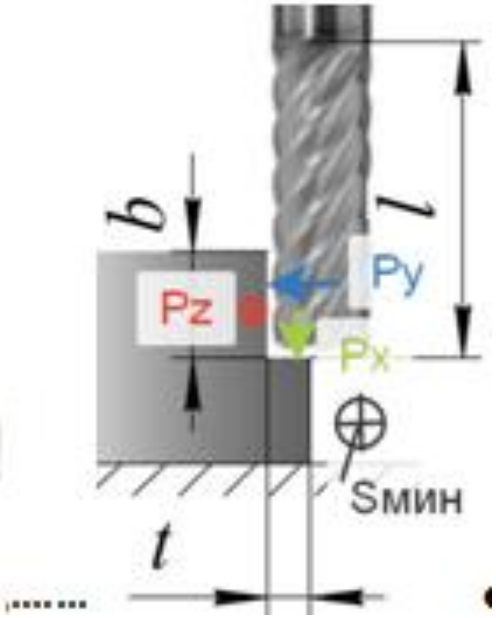




Измерение составляющих силы резания



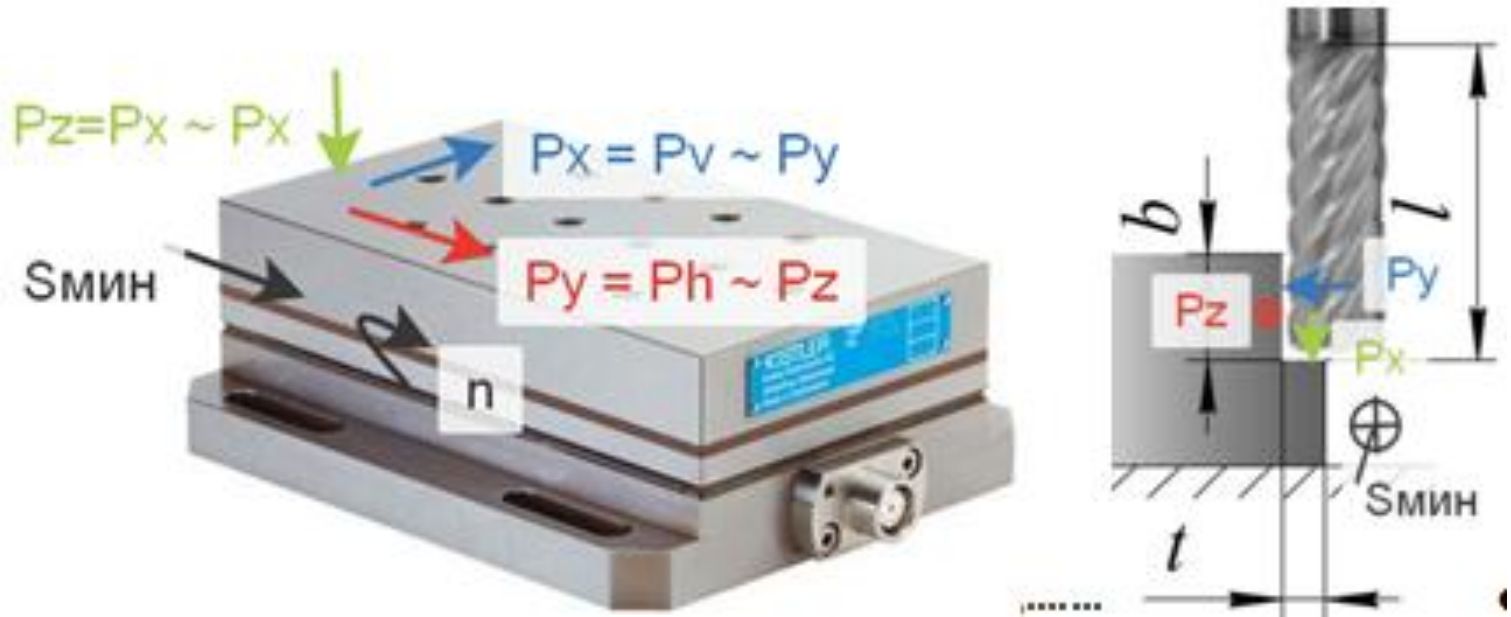




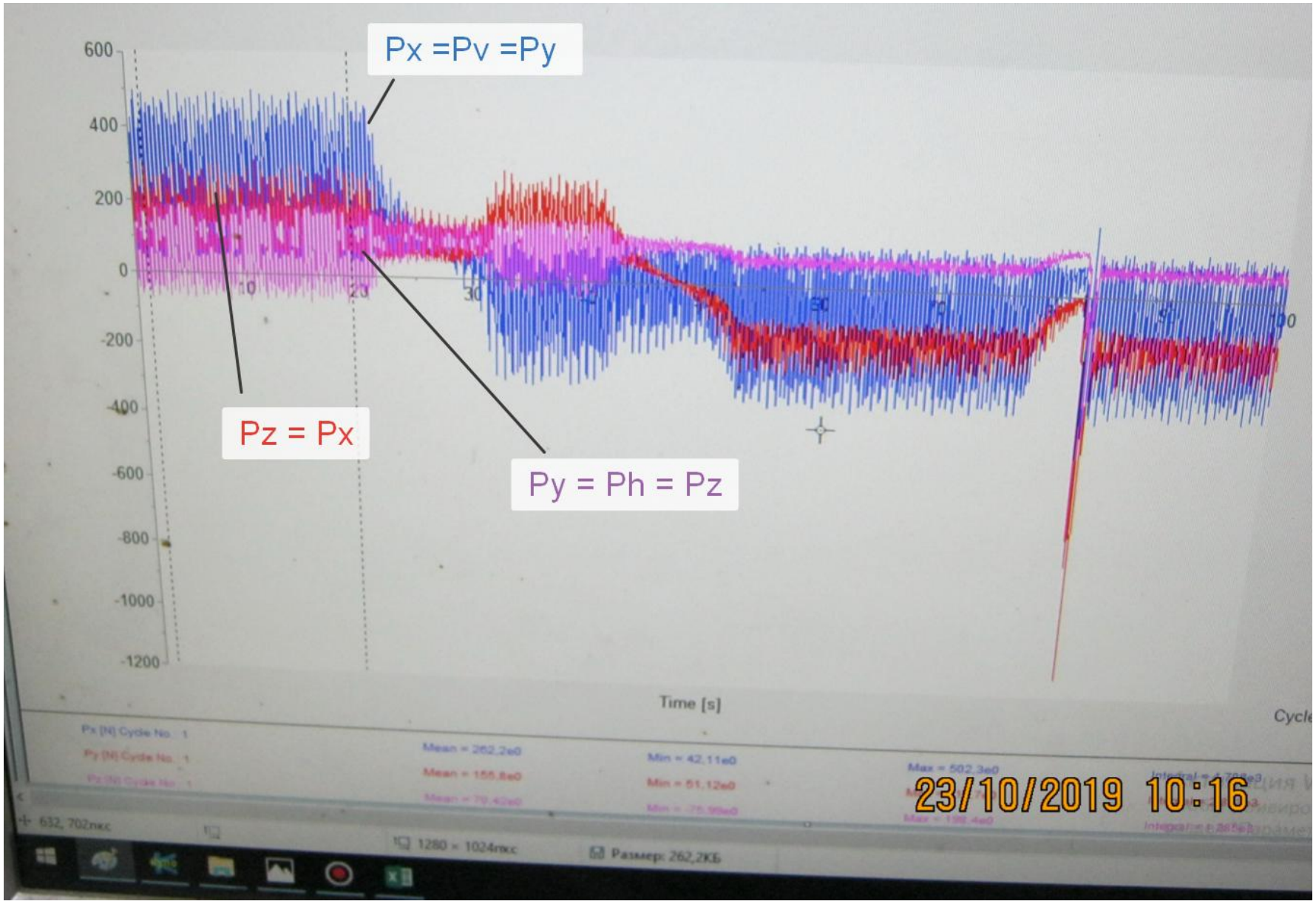
Измерение составляющих силы резания

Общепринято символами Pz, Py и Px обозначать составляющие силы резания, которые действуют на каждый зуб фрезы и поворачиваются вместе с фрезой относительно оси вращения шпинделя. При малой глубине резания t = 1 мм эти направления соответствуют другой системе сил, действующими на заготовку **со стороны зубьев фрезы** (указаны третьими по порядку символами): **Pz**=**Px** = Px, **Px**=**Pv** = **Py**, **Py**=**Ph** = **Pz**). Этими же цветами (**Pz** – зелёный, **Px** – синий, **Py** – красный) эти силы обозначаются на мониторе. Переходя к системе сил, действующих на заготовку со стороны фрезы, будут использоваться следующие приближения: **Px** = **Pz**, **Py** ≈ **Px**, **Pz** ≈ **Py**.

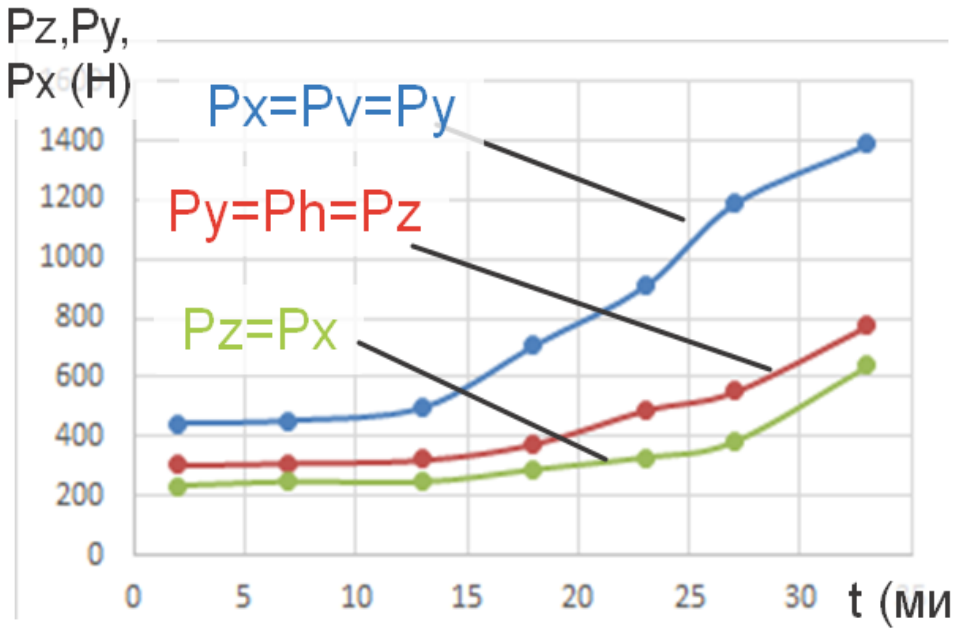
Таким образом, на фотографии монитора (**отчёта** Kistler, который исправить невозможно, т.к. его действия зашиты в программу завода-изготовителя) **Pz** означает, что на самом деле это Px; **Px** означает, что на самом деле это **Py**; **Py** означает, что на самом деле это **Pz**. На графиках изменения сил в процессе фрезерования указаны действительные составляющие силы резания, действующие на заготовку со стороны фрезы.

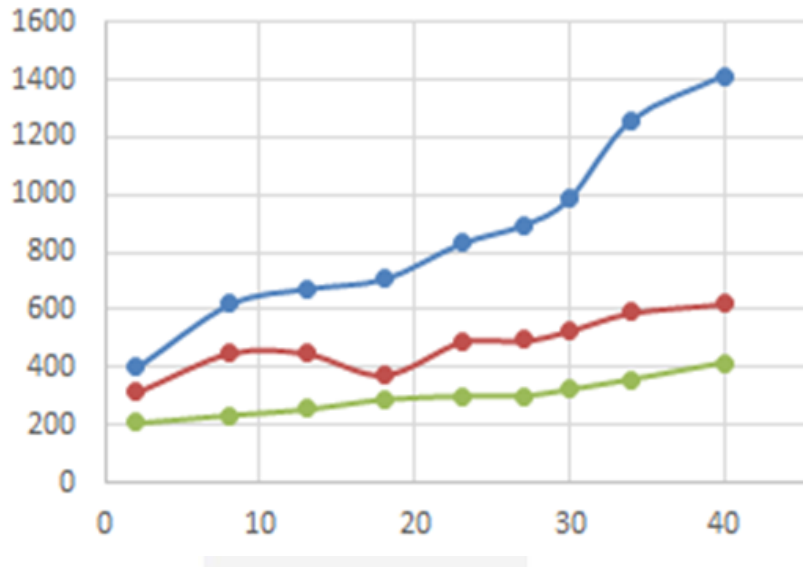


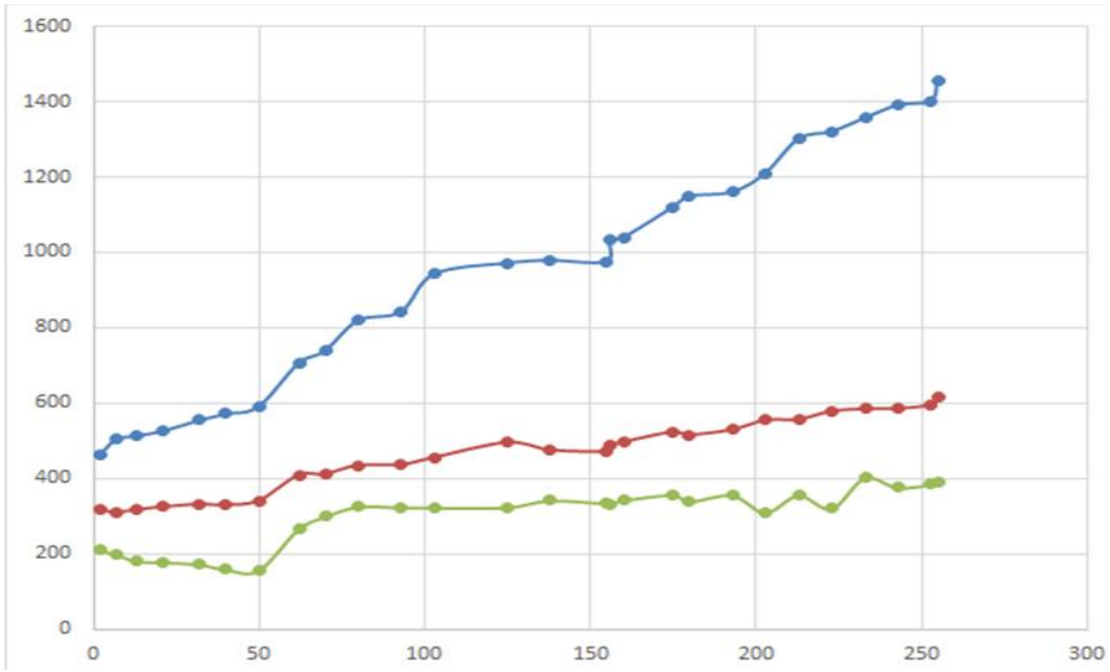
Измерение составляющих силы резания

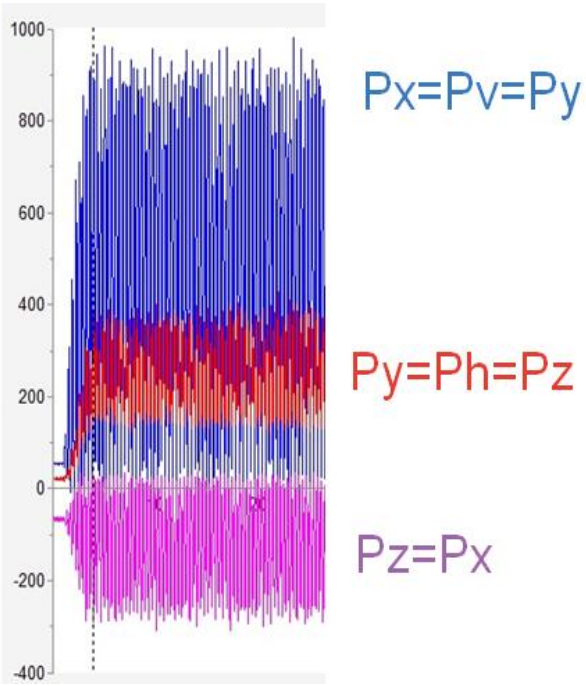


Измерение составляющих силы резания

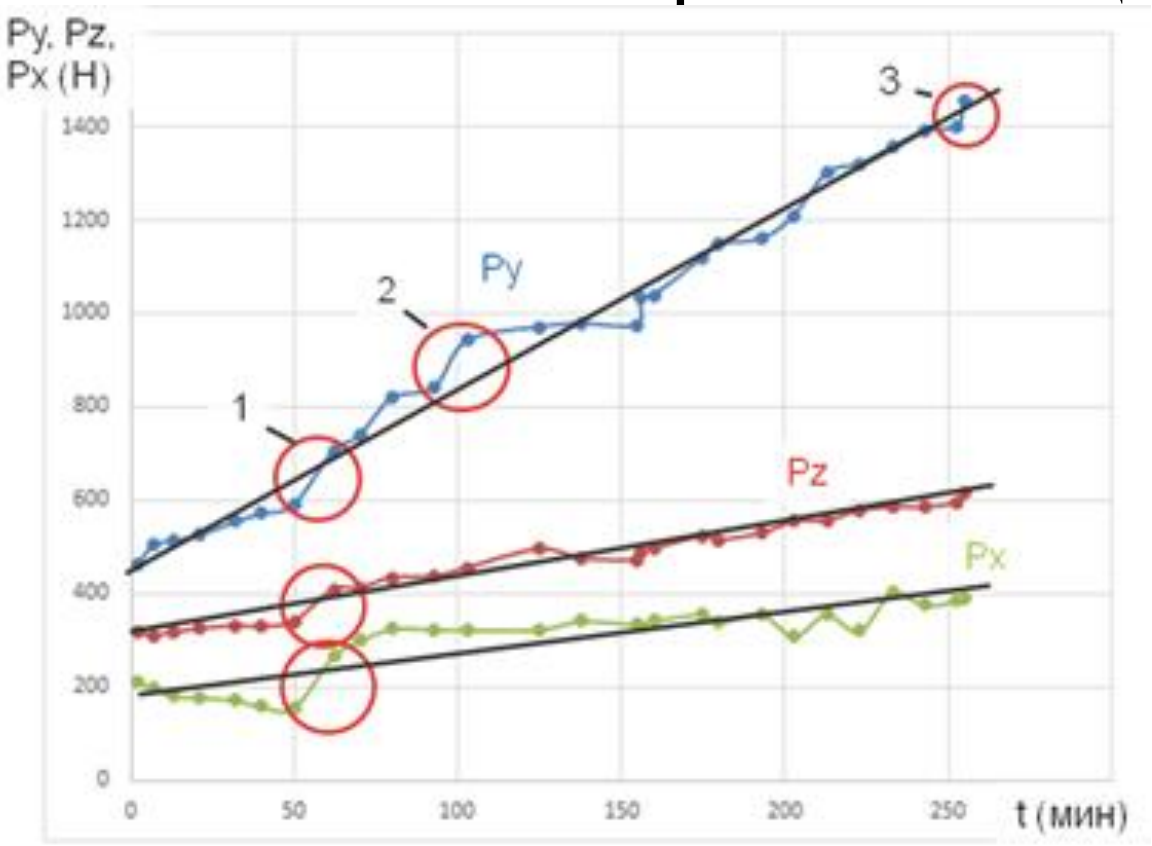








Измерение составляющих силы резания



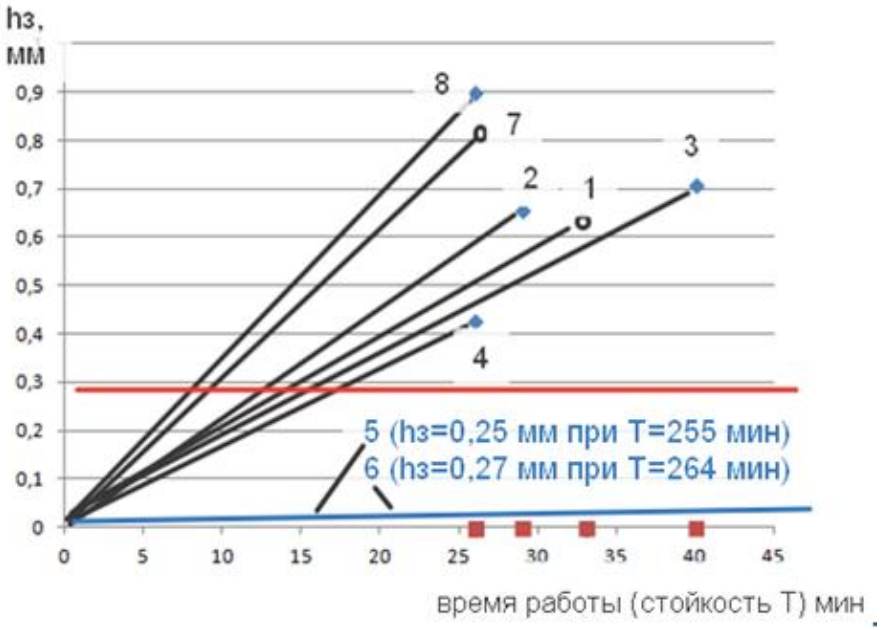
На графиках изменения сил резания **Py** в зависимости от времени работы τ (мин) фрезы можно выделить 3 области, в которых резко увеличивается величина этой составляющей (на рис. обозначены цифрами 1, 2 и 3). По нашему мнению это связано со сколом вершины одного или нескольких зубьев. Для **области 1** это подтверждается ростом составляющих Pz и Px (особенно Px). В **областях 2** и **3** скачка этих составляющих сил резания не наблюдается, что косвенно говорит о сколе только на периферии режущих кромках.

Увеличение длины фаски износа (выкрашивания) по задней поверхности в меньшей степени сказывается на составляющую Pz, т.к. это приводит к увеличению тангенциальной составляющей силы трения на этой фаске. В связи с малым коэффициентом трения на фаске задней поверхности даже существенное увеличение нормальной контактной нагрузки на фаске из-за износа (т.е. увеличение Py) незначительно скажется на увеличение Pz.

Изменение сил резания **Px**, **Py**, **Pz** (H) в зависимости от времени работы τ (мин) может быть **аппроксимировано прямолинейной зависимостью**. Для фрезы №__ формулы для расчёта сил резания: $Py = 420+3{,}96\cdot\tau$ (H); $Pz = 310+1{,}2\cdot\tau$ (H); $Px = 200+0{,}8\cdot\tau$ (H).

Портативный микроскоп мод. 50-500x фирмы Kromatech (KHP)

Фрезерование (продолжение)

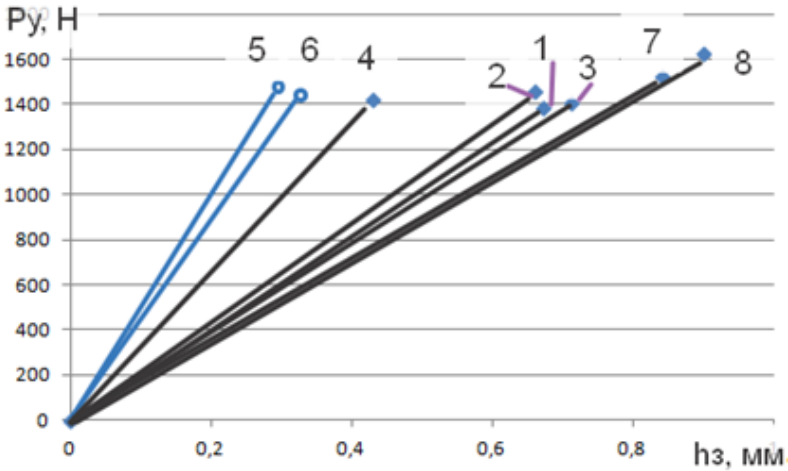


Наибольшая стойкость наблюдается у фрез с наименьшим радиусом округления режущей кромки (фреза №3, ρ=11,15 мкм, стойкость T=40 мин; фреза №1, ρ=12,40 мкм, стойкость T=33 мин).

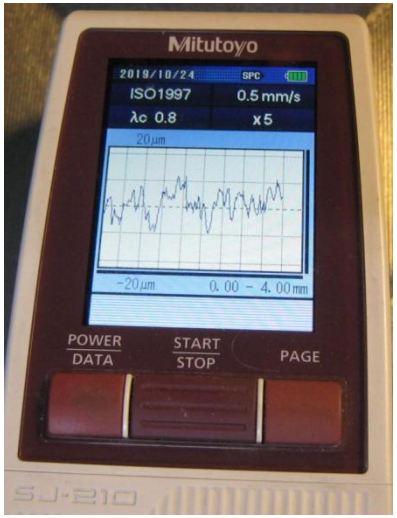
Однако у фрезы №4, имеющей достаточно большой радиус округления ρ=12,9 мкм, интенсивность износа по критерию длины фаски износа hз наименьшая: при времени работы τ = 26 мин hз = 0,43 мм.

Фреза №3, имеющая наибольшую стойкость T = 40 мин, при таком же времени работы τ = **26** мин имеет бóльший износ – hз = 0,53 мм.

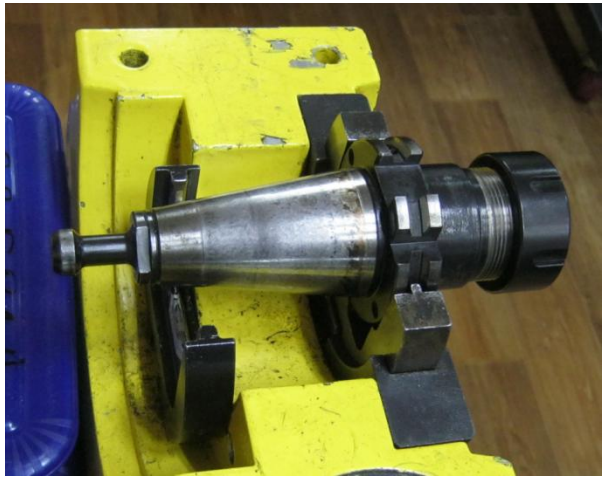
Испытание фрезы №4 остановили из-за увеличения силы Py до 1428 Н. У фрезы №3 после **40** мин работы Py = 1410 Н.

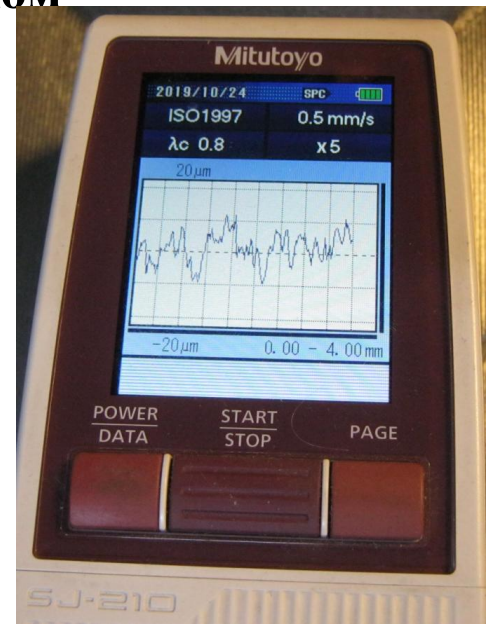


профилометр мод. SJ-210
фирмы Mitutoyo (Япония)



Пульт управления станком





Особенности конструкций фрез, оснащенных твердым сплавом (с.184)

Конструкции фрез и условия их работы позволяют широко использовать для их оснащения высокопроизводительные **твердые сплавы**, минералокерамику и СТМ, которые, однако, обладают пониженной прочностью на изгиб и хрупкостью. Широкому применению твердых сплавов способствуют следующие достоинства процесса фрезерования: 1) благоприятная форма стружки, имеющая малые толщину и длину, обеспечивающая ее хорошую транспортабельность; 2) прерывистость процесса резания, снижающая тепловое напряжение режущих элементов; 3) высокие жесткость и виброустойчивость.

Основное применение		Дополнительное применение	
■	Чистовая	□	Чистовая
■■	Получистовая	□□	Получистовая
■■■	Черновая	□□□	Черновая

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

PUJA-40W40-R5WN06 – фреза плунжерная, чистовая, с углом 10°, возможность осевого плунжерения, Ø40, концевая креплением «Weldon» Ø40, правая, 3 зуба, с пластиной WN..0603.. .
FUAL-63N22-R4ZO11/45 - фреза торцевая, черновая с углом 90°, с удлиненной режущей кромкой, Ø63, насадная с внутренним подводом СОЖ Ø22, правая, 4 зуба, с пластиной ZO..1104.. , 45 суммарная длина режущей кромки.

Фрезерование (продолжение)

Марка твердого сплава		P	M	K	N	S	S	H
TP20AM Износостойкая основа из среднезернистого, легированного сплава с градиентной структурой + мультислойное PVD покрытие		■ ■■ □□□	□ □□			□ □□		
TP25AM Основа из среднезернистого, легированного сплава с градиентной структурой + мультислойное PVD покрытие		■■ ■■■	□□ □□□			□□ □□□		
TP40AM Прочная основа из среднезернистого, легированного сплава с градиентной структурой + мультислойное PVD покрытие		■■■	□□□			□□□		
AP10TT Износостойкая основа из мелкозернистого сплава + мультислойное PVD покрытие			■ ■■	■ ■■				□
AP30XM Прочная основа из мелкозернистого сплава + мультислойное PVD покрытие			■■■	■■■				
AP10XM Износостойкая основа из мелкозернистого сплава + мультислойное PVD покрытие			■ ■■	■ ■■		■		■
BP35XM Основа из среднезернистого сплава + мультислойное PVD покрытие				■■■		■■		
A10 Износостойкий мелкозернистый сплав без покрытия					■ ■■		■ ■■	
A30 Прочный мелкозернистый сплав без покрытия					■■■		■■■	

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

Фрезерование (продолжение)

Группы обрабатываемого материала	Обозначение, вид, описание					
	Вид	Описание	Вид	Описание	Вид	Описание
P		**FP** острая режущая кромка, чистовая геометрия		**EP** скругленная режущая кромка, получистовая геометрия		**SP** упрочняюшая фаска, черновая геометрия
M S		**FM** острая режущая кромка, чистовая геометрия		**EM** скругленная режущая кромка, получистовая геометрия		**SM** упрочняюшая фаска, черновая геометрия
K H		**FK** острая режущая кромка, чистовая геометрия		**EK** скругленная режущая кромка, получистовая геометрия		**SK** упрочняюшая фаска, черновая геометрия
N	**Полированная передняя поверхность**					
		FN острая режущая кромка, чистовая геометрия		**EN** скругленная режущая кромка, получистовая геометрия		

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

F	R	A	S	–	80	N	27
F	H	B	X	–	160	N	40
P	U	J	A	–	40	W	40
F	U	A	L	–	63	N	22
1	2	3	4		5	6	7

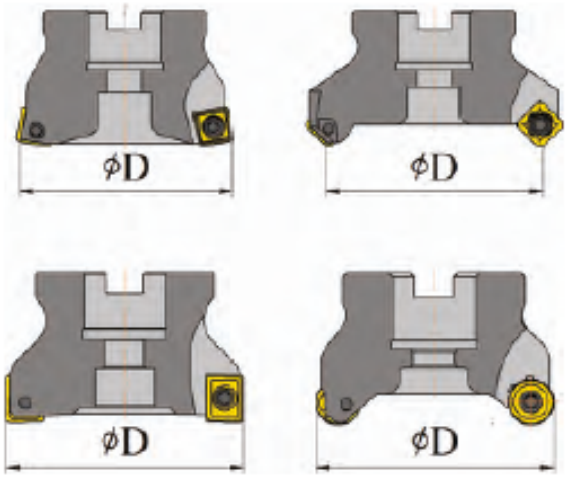
1	Тип обработки
F	Фрезерование плоскостей и уступов
T	фрезерование пазов и отрезка
C	Профильное фрезерование
P	Плунжерная обработка

2	Вид обработки
U	Универсальная
F	Чистовая
R	Черновая
H	Обдирочная

3	Угол в плане							
Угол	90°	75°	60°	45°	91°	00°	15°	10°
Обозначение	A	B	E	D	G	R	K	J

4	Применение
S	Стандартные (фрезы общего применения)
L	Удлинённая режущая кромка
D	Возможность сверления
A	Возможность осевого плунжерения
X	Обдирка
C	Обработка цветных металлов
H	Удлинённая серия

5 Диаметр фрезы



Примеры обозначения:

1-2-3-4 5-6-7 8-9-10-11-12

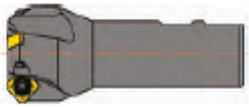
PUJA-40W40-R5WN06 – фреза **плунжерная**, **универсальная**, с углом **φ=10°**, с возможностью осевого **плунжерования**, ØD фрезы **40** мм, тип«**W**eldon», **Øприсоединения 40** мм, (8)-правая (w**R**ite), **5** зубьев, с пластиной **WN**..0603… ;

FRAL-63N22-R4ZO11/45 – фреза **торцевая**, **черновая**, с углом **φ=90°**, с **удлинённой режущей кромкой**, ØD фрезы **63** мм, **насадная** (**N**), **Øприсоединения 22** мм , *с внутренним подводом СОЖ*, **правая, 4 зуба**, с пластиной **ZO**..1104… , / суммарная длина режущей кромки **45** мм.

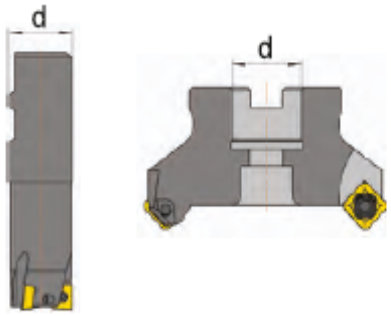
Фрезерование (продолжение)

–	R	6	ZP	15	-	-
–	R	12	SN	19	-	P
–	R	3	XD	13	-	-
–	R	4	ZA	11	/45	-
	8	9	10	11	12	13

6 Вид посадки

A	W	N
Цилиндр	«Weldon»	Насадная
		

7 Диаметр посадки



8 Направление обработки

R	L
Правое	Левое

9 Количество зубьев

10 Форма пластины

11 Длина режущей кромки

12 Суммарная длина режущей кромки

13 Дополнительные сведения

P	Крепление токарных пластин, тип «P»
D	Крепление токарных пластин, тип «D»

Примеры обозначения:

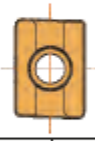
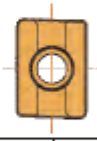
1-2-3-4 – 5-6-7 – 8-9-10-11-12

P-U-J-A – 40-W-40 – R-5-WN06

PUJA-40W40-R5WN06 – фреза **плунжерная**, **универсальная**, с углом **φ=10°**, с возможностью осевого **плунжерования**, ØD фрезы **40** мм, тип«**W**eldon», **Øприсоединения 40** мм, (8)-правая (w**R**ite), **5** зубьев, с пластиной **WN**..0603… ;

FRAL-63N22-R4ZO11/45 – фреза **торцевая**, **черновая**, с углом **φ=90°**, с **удлинённой режущей кромкой**, ØD фрезы **63** мм, **насадная** (**N**), **Øприсоединения 22** мм , *с внутренним подводом СОЖ*, **правая, 4 зуба**, с пластиной **ZO**..1104… , / суммарная длина режущей кромки **45** мм.

Фрезерование (продолжение)

Вид фрезы										
Обозначение	FUDS		FRAS				FUGA			
Примечание	Однорядные									
Диаметр фрез	Угол в плане									
	45°		90°				91°			
25			*				*			
32	*		*				*			
40	*		*	*			*	*		
50	*	*		*	*	*		*	*	*
63		*			*	*			*	*
80		*			*	*			*	*
100		*			*	*			*	*
125		*				*				*
160										
Пластина: Длина режущей кромки	13		11	15	11	15	11	15	11	15
Пластина: Вид										
Пластина: Обозначение	SDHT 1305AD SDHW 1305AD		ZAHT 1104.. R	ZPHT 1506... R	ZAHT 1104.. R	ZPHT 1506.. R	ZAHT 1104.. R	ZPHT 1506.. R	ZAHT 1104.. R	ZPHT 1506.. R
Стр.	190	191	193	199	194	200	195	201	196	202

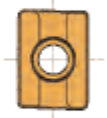
Примеры обозначения:

1-2-3-4 – 5-6-7 – 8-9-10-11-12

P-U-J-A – 40-W-40 – R-5-WN06

PUJA-40W40-R5WN06 – фреза **плунжерная**, **универсальная**, с углом **φ=10°**, с возможностью осевого **плунжерования**, ØD фрезы **40** мм, тип«**W**eldon», **Øприсоединения 40** мм, (8)-правая (w**R**ite), **5** зубьев, с пластиной **WN**..0603… ;

FRAL-63N22-R4ZO11/45 – фреза **торцевая**, **черновая**, с углом **φ=90°**, с **удлинённой режущей кромкой**, ØD фрезы **63** мм, **насадная** (**N**), **Øприсоединения 22** мм , *с внутренним подводом СОЖ*, **правая, 4 зуба**, с пластиной **ZO**..1104… , / суммарная длина режущей кромки **45** мм.

FUAS		**FUJA**		**FUAL**		**FUAC**	
Однорядные				**Длиннокромочные**		**Для алюминия**	
Угол в плане							
90°		**10°**		**90°**		**90°**	
				*			
*		*		*		*	
*		*		*		*	
	*		*		*	*	*
	*		*		*		*
	*		*		*		*
	*		*		*		*
	*		*		*		*
13		13		11	15	18	
							
SOHT 1305.. R SOHW 1305.. R		XDHT 1305XDR		ZAHT 1104.. R	ZPHT 1506.. R	APKT 1806.. R	
205	206	208	209	197	203	211	212

Примеры обозначения:

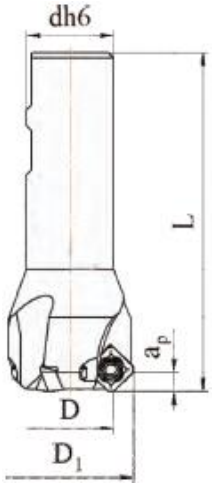
1-2-3-4 – 5-6-7 – 8-9-10-11-12

P-U-J-A – 40-W-40 – R-5-WN06

PUJA-40W40-R5WN06 – фреза **плунжерная**, **универсальная**, с углом **φ=10°**, с возможностью осевого **плунжерования**, ØD фрезы **40** мм, тип«**W**eldon», **Øприсоединения 40** мм, (8)-правая (w**R**ite), **5** зубьев, с пластиной **WN**..0603… ;

FRAL-63N22-R4ZO11/45 – фреза **торцевая**, **черновая**, с углом **φ=90°**, с **удлинённой режущей кромкой**, ØD фрезы **63** мм, **насадная** (**N**), **Øприсоединения 22** мм , *с внутренним подводом СОЖ*, **правая, 4 зуба**, с пластиной **ZO**..1104… , / суммарная длина режущей кромки **45** мм.

Обработка:
пазов,
плоскостей,
уступов,
фасок



Серия SD

45° Концевые

Обозначение	D	D_1	d	L*	a_p	Z	Пластины
FUDS-32W32-R3SD13	32	46,5	32	125	6,8	3	SDHT 1305AD SDHW 1305AD
FUDS-40W32-R4SD13	40	54,5	32	125	6,8	4	

Комплект

Винт	Ключ
SM5×14	K20IP

Примеры обозначения:
1-2-3-4 – 5-6-7 – 8-9-10-11-12
P-U-J-A – 40-W-40 – R-5-WN06

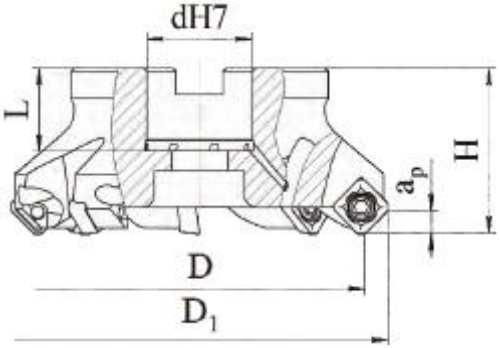
PUJA-40W40-R5WN06 – фреза **плунжерная**, **универсальная**, с углом **φ=10°**, с возможностью осевого **плунжерования**, ØD фрезы **40** мм, тип«**W**eldon», **Øприсоединения 40** мм, (8)-правая (w**R**ite), **5** зубьев, с пластиной **WN**..0603… ;

FRAL-63N22-R4ZO11/45 – фреза **торцевая**, **черновая**, с углом **φ=90°**, с **удлинённой режущей кромкой**, ØD фрезы **63** мм, **насадная** (**N**), **Øприсоединения 22** мм , *с внутренним подводом СОЖ*, **правая, 4 зуба**, с пластиной **ZO**..1104… , / суммарная длина режущей кромки **45** мм.

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 **φ=45°**, **стандартная**, ØD 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	

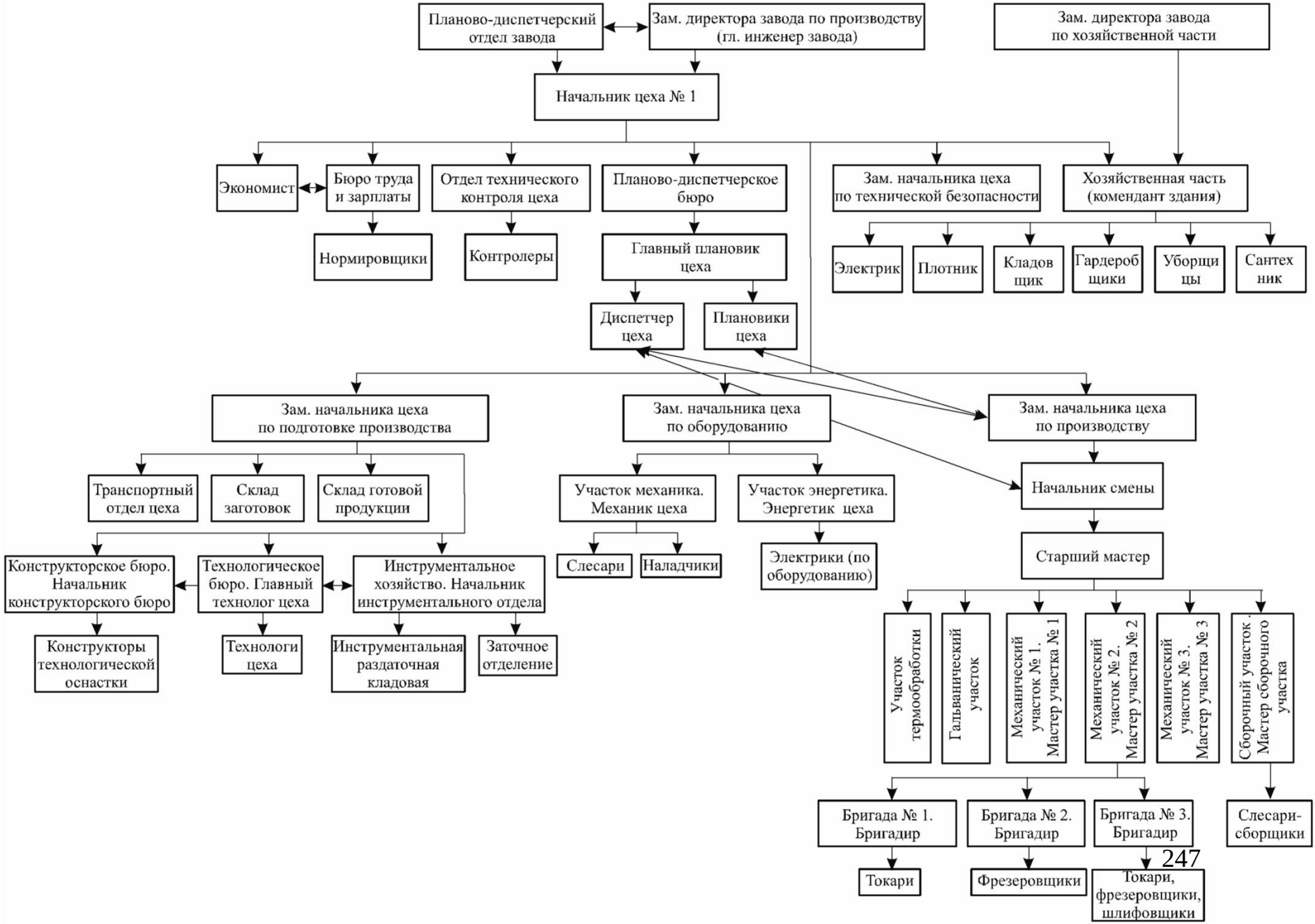



Схема службы управления механосборочным цехом