



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет

Теория резания и режущий инструмент (ч.1-1)

Лектор - Козлов Виктор Николаевич,
доцент отделения **машиностроения** ИШНПТ
моб. тел. 8-913-812-58-34, **kovn@tpu.ru**

ВКС 380 440 5794, **Пароль:** 1DepTr

Лекции – 32 часа, лабораторные работы – 32 часа,
практические занятия – 32 часа. **СРС - 120 ч.,**
всего 216 ч., **6 кредитов. Экзамен**

+ **Индивидуальное задание** 15-20 стр. пояснительной
записки и чертежи фасонного резца и протяжки (формат
A2 – A3).

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. **Основы лезвийной обработки** – 8 ч. лк, 8 ч. лаб. работ; 8ч. практ. занятий;
2. **Токарная обработка. Резцы и мерные режущие инструменты** – 8 ч. лк, 8 ч. лаб. работ; 8 ч. практ. занятий;
3. **Фрезерование и фрезы** – 8 ч. лк, 8 ч. лаб. работ; 8 ч. практ. занятий;
4. **Резьбонарезные и зубообрабатывающие режущие инструменты** – 4 ч. лк, 4 ч. лаб. работ, 4 ч. практ. занятий;
5. **Абразивная обработка** – 4 ч. лк, 4 ч. лаб. работ, 4 ч. практ. занятий;

Индивидуальное домашнее задание (**ИДЗ**) – проектирование фасонного резца и протяжки.

Экзамен.

Оценка текущей учебной работы в семестре

- 1) В конце каждой лекции – **мини-контрольная** работа на 5 мин. по оценке освоения материалов лекции. Можно пользоваться только **своим** конспектом лекций. Оценивается : **1** балл – «хорошо» и «отлично»; 0,5 балла – «удовлетворительно»; 0 баллов – «неудовлетворительно».

Всего за **мини контрольные** на **лекциях** можно получить **максимум 16** баллов.

- 2) По каждой **пропущенной** лекции или **практическому занятию** по 2-3 дополнительных вопроса на экзамене.
- 3) По защищённой **лабораторной** работе **0,5** балла (максимум **8** баллов). 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) В конце каждой практики – **мини-контрольная** работа на 5 мин. по оценке освоения материалов. Оценивается : 0,5 балл – «хорошо», «отлично» и «удовлетворительно»; 0 баллов – «неудовлетворительно». Всего за **мини контрольные** на **практиках** можно получить **максимум 8** баллов.
- 5) По каждой теме (5 шт.) выполняется **контрольная работа** по **4** балла за каждую (максимум **20** баллов).
- 6) За выполнение и **защиту ИДЗ** – максимум **8** баллов
- ИТОГО за работу в семестре** максимум **60** баллов.
- 7) 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 **2** балла за реферат.

Раздел 1. Основы лезвийной обработки

ВИДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

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

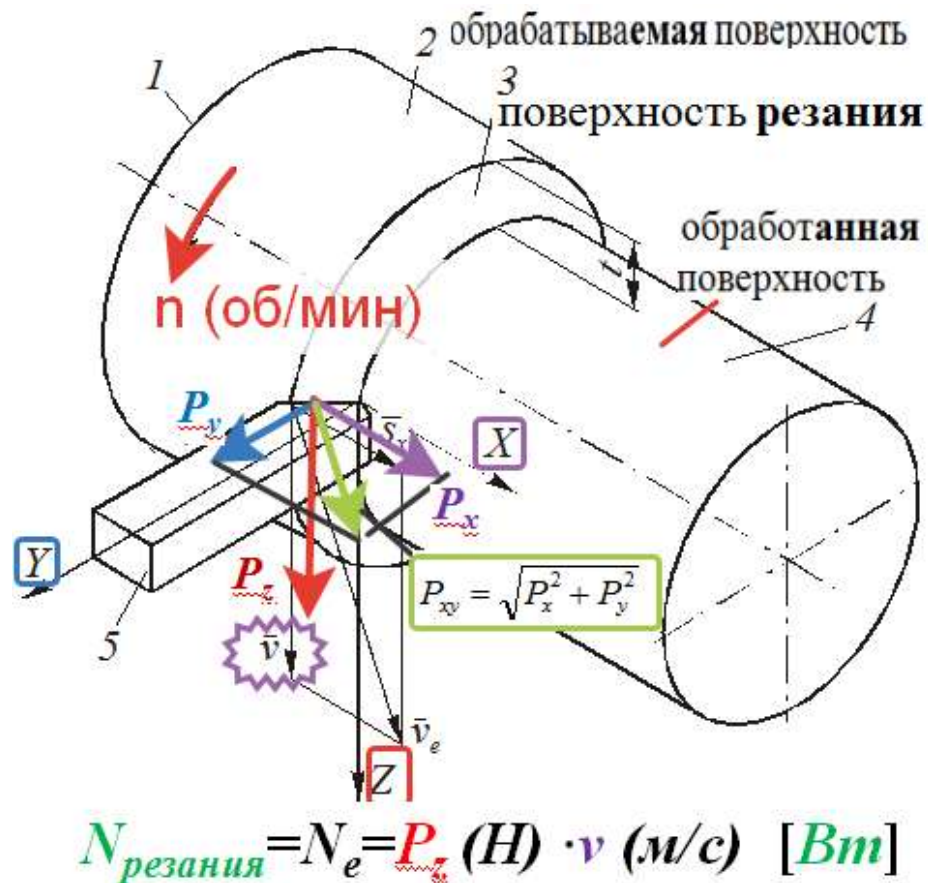
За один проход резца с исходной поверхности заготовки 2, называемой **обрабатываемой поверхностью** ($\varnothing d_{нач}$), снимается припуск толщиной t :

$t = (d_{нач} - d_{конечн})/2$. **Поверхность 3**, получаемая после прохода главной режущей кромки, называется **поверхностью резания (непрерывно обновляемая)**, а поверхность 4 – **обработанной поверхностью** ($\varnothing d_{конечн}$).

На инструмент действует сила резания R (P), которую для удобства измерения и влияния на технологическую систему и деталь (систему **СПИД – станок-приспособление-инструмент-деталь**) 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):

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

$$v = (\pi \times d \times n) / 1000 [м/мин]$$



$$P_z : P_y : P_x = 1 : (0,4...0,5) : (0,25...0,3)$$

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 P_{xy} , лежащую в **основной плоскости**, т.е. $\bar{R}_{xy} = \bar{P}_x + \bar{P}_y$ $P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$

Вектор 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 - $P_x/P_y = \tan(\phi + \eta)$. О величинах силы резания R и ее составляющих можно судить на примере точения углеродистой стали средней твердости при $\phi = 45^\circ$, $\lambda = 0$, $\gamma = 15^\circ$ и отношении $t/s > 1$ (прямой рез) по следующим приближенным значениям

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

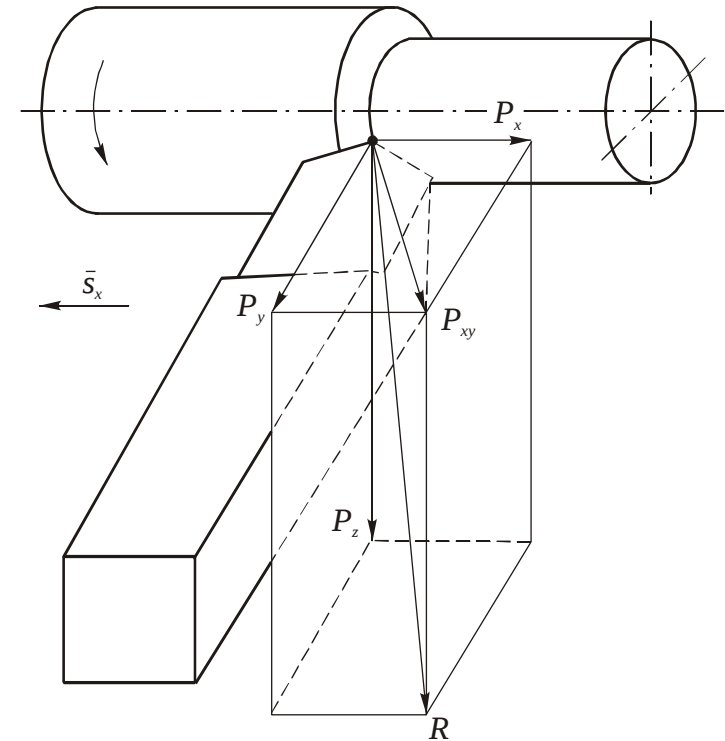


Схема разложения равнодействующей силы резания R на технологические составляющие P_z , P_x и P_y

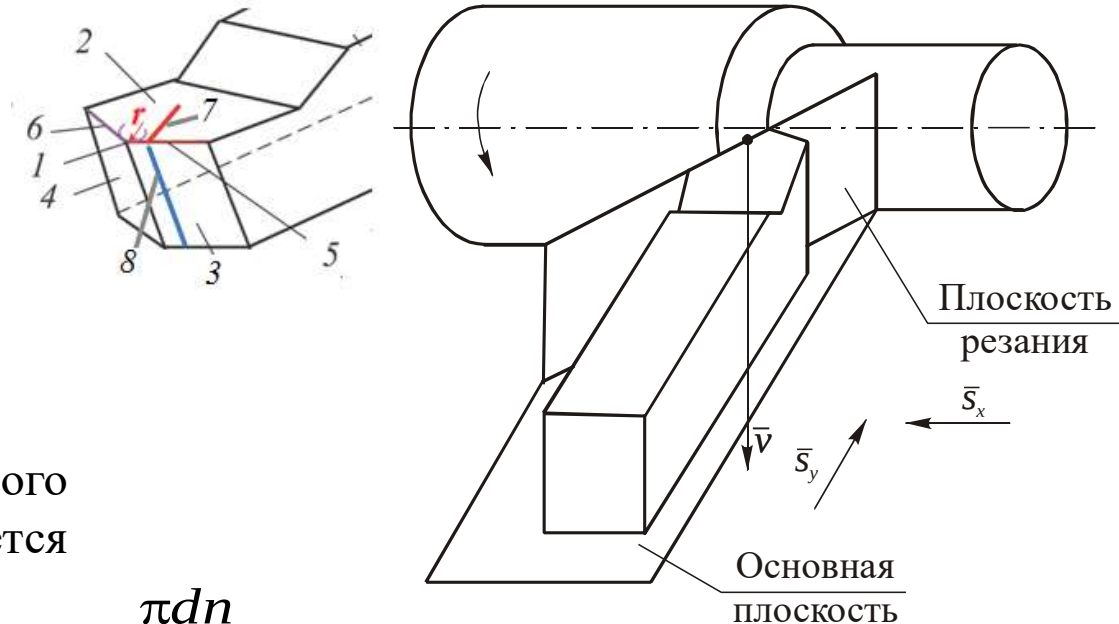
Токарный проходной резец

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 подачи**. 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.

1 – вершина режущей части; 2 – передняя поверхность; 3 – главная задняя поверхность; 4 – вспомогательная задняя поверхность; 5 – главная режущая кромка; 6 – вспомогательная режущая кромка; 7 – след передней поверхности на главной секущей плоскости; 8 – след главной задней поверхности на главной секущей плоскости.

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

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

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


Геометрия проходного резца в плане (на виде сверху)

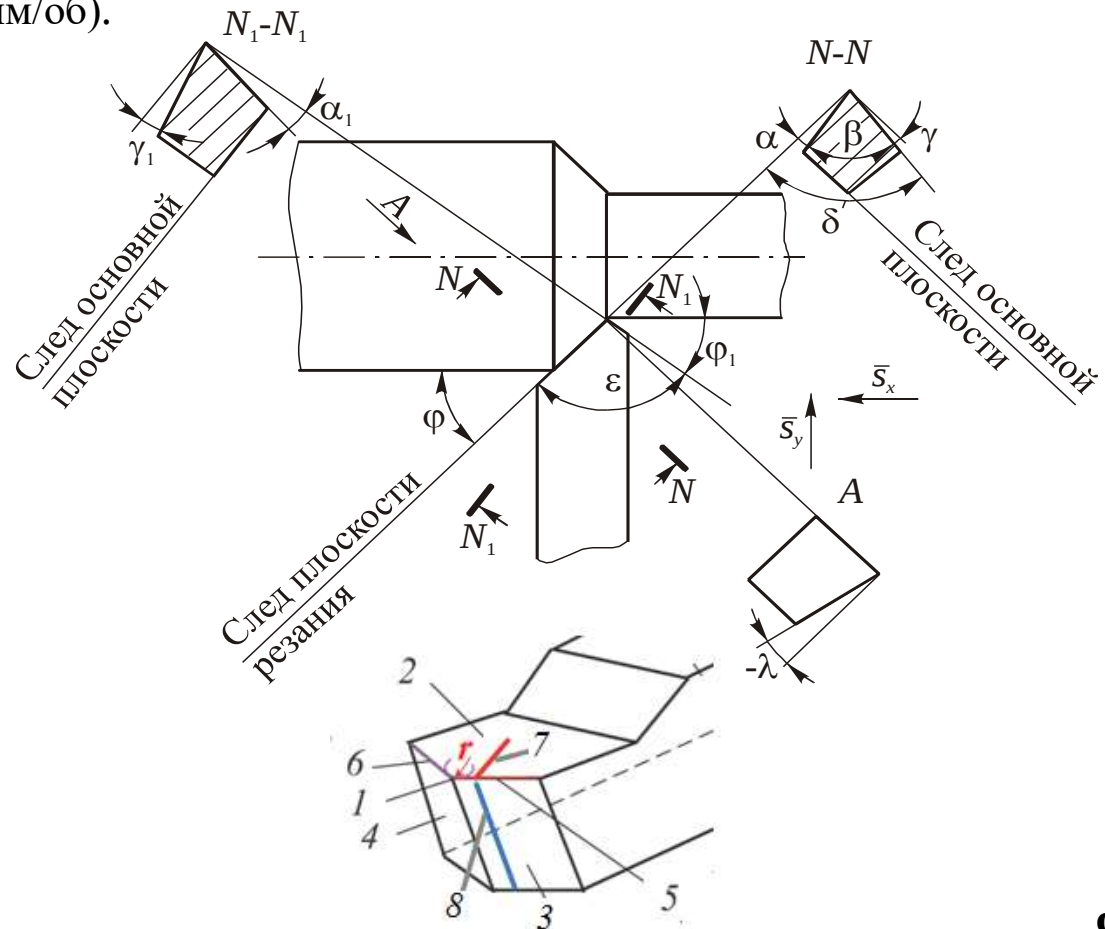
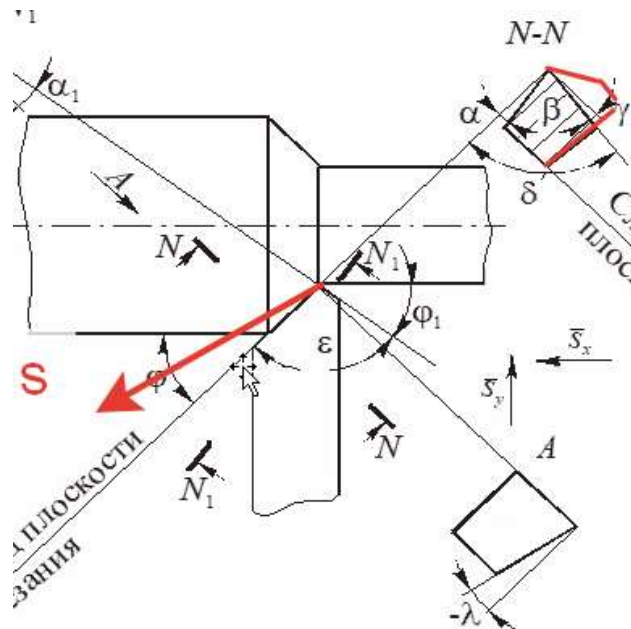
Главный угол в плане φ - угол между направлением подачи и проекцией главной режущей кромки на основную плоскость.

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. $\varepsilon = 180^\circ - (\varphi + \varphi_1)$.

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.

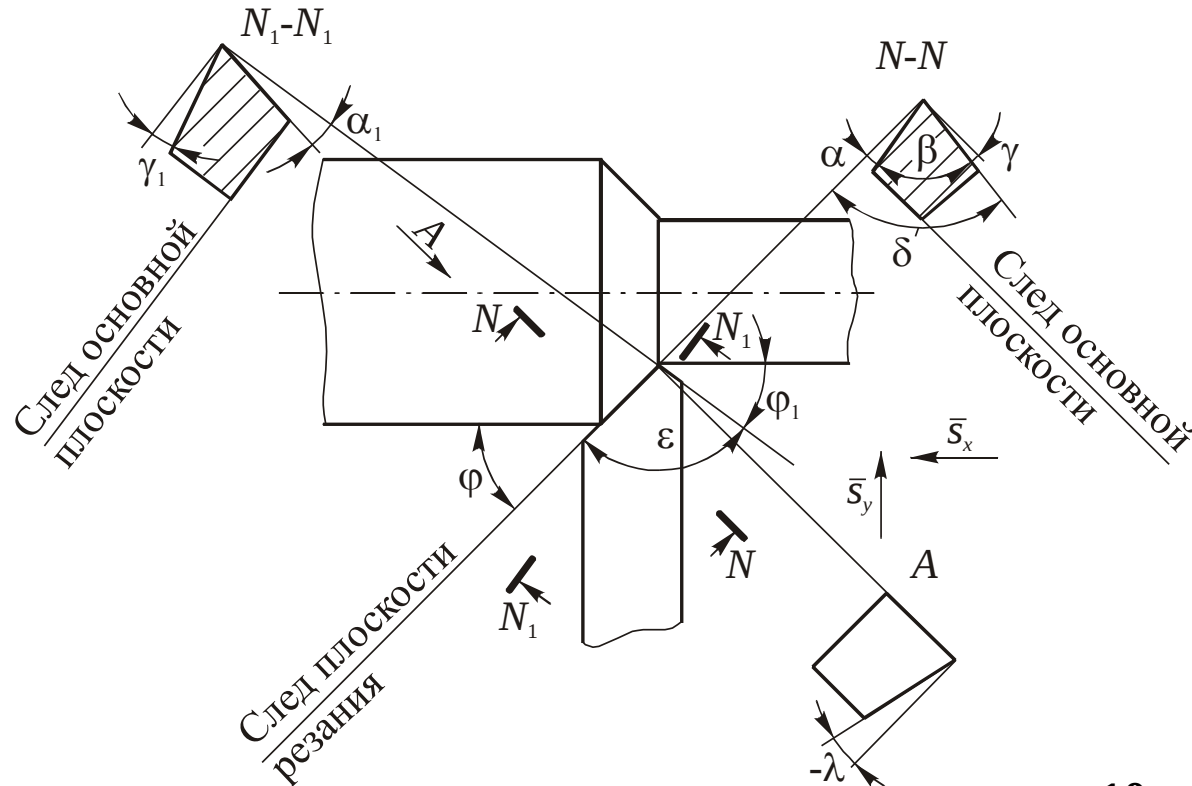


Углы токарного проходного резца в главной секущей плоскости

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): $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$.

Аналогично и в сечении вспомогательной режущей кромки резца **вспомогательной секущей плоскостью N_1-N_1** .



Углы в главной секущей плоскости (продолжение)

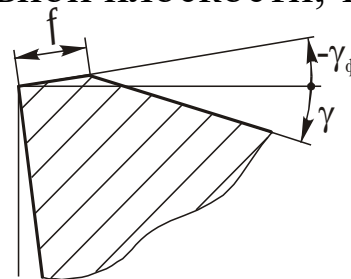
При измерении переднего угла следует учитывать, что в зависимости от положения передней поверхности относительно основной плоскости **передний угол γ** может иметь **положительное** или **отрицательное** значения. В первом случае передняя поверхность резца направлена вниз от режущей кромки, а во втором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

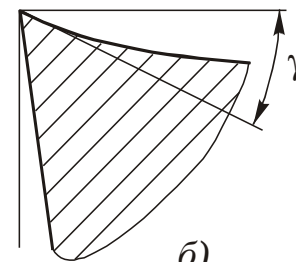
отрицательным $\gamma_{\phi}=(-5^{\circ}\dots-15^{\circ})$, длина фаски $f \approx (0,2\dots0,8) \cdot a$, где **a – толщина среза**, которая зависит от рабочей подачи s и главного угла в плане ϕ :

$a = s \cdot \sin \phi$, 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.



а)

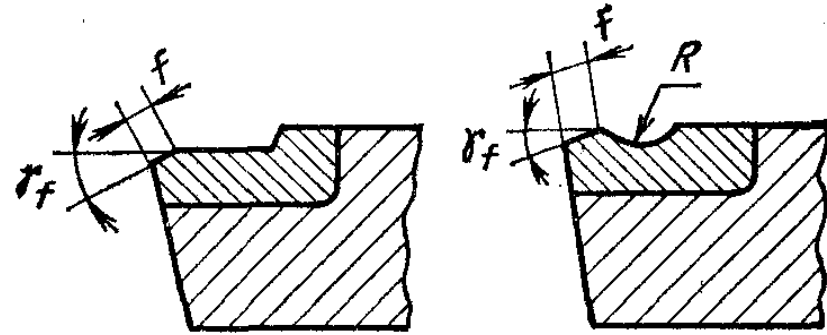


б)

Оптимальным главным передним углом считается $\gamma=+15^{\circ}$ при обработке чистой поверхности **незакалённой** стальной заготовки **средней и малой твёрдости** резцом из **быстрорежущей стали**, и **$\gamma=+10^{\circ}$ – резцом с твёрдосплавной пластиной**. Если выполняется черновая обработка или с ударами, то оптимальный угол $+5^{\circ}$ и 0° соответственно. При обработке **закалённой** заготовки или с **твёрдой коркой** $\gamma=-5^{\circ}\dots-10^{\circ}$, 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 $+30^{\circ}$.

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 зависят 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).

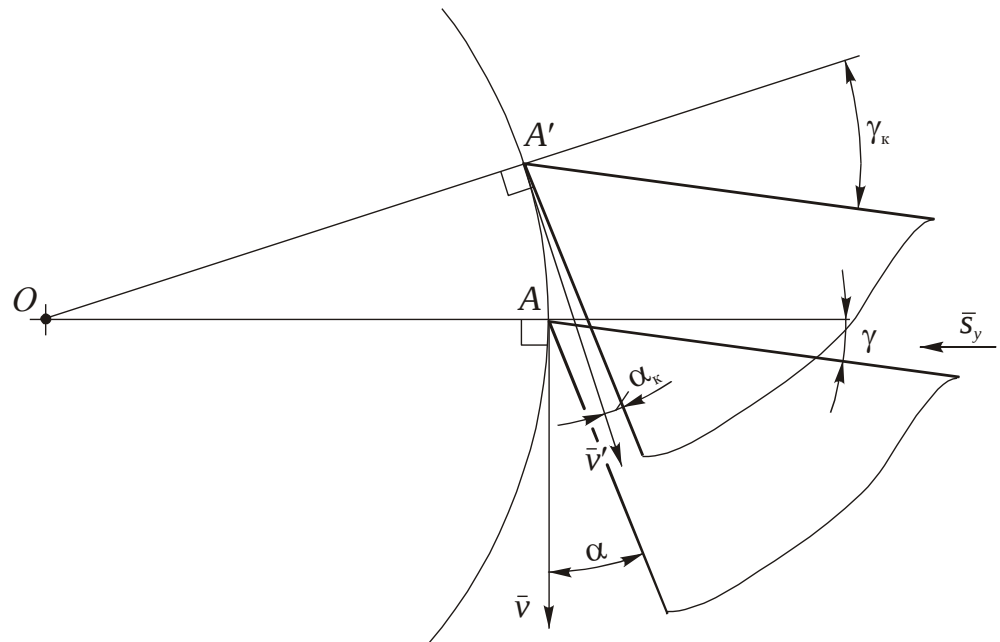


При получистовой и чистовой обработке **незакалённой стали** и других нетвёрдых материалов, **канавка используется отдельно без заточки фаски** и **выходит к главной режущей кромке**. Наличие канавки позволяет **увеличить главный передний угол γ** на участке контакта передней поверхности со стружкой 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 $\alpha = 6 \dots 10^\circ$

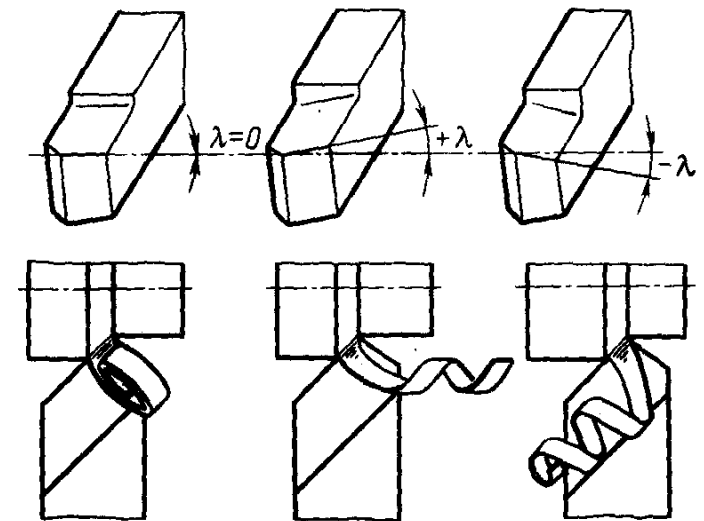


В плоскости резания (вид на главную режущую кромку) измеряют **угол наклона главной режущей кромки λ** - угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью.

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 **$\lambda=0^\circ$ - 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 : $a = s \sin \varphi$;

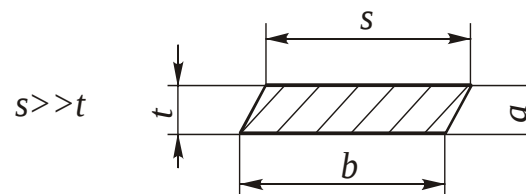
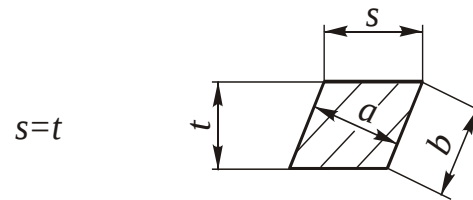
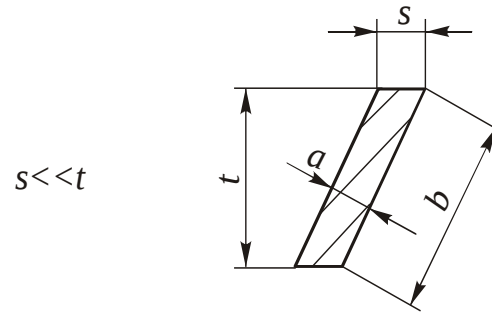
$$b = t / \sin \varphi.$$

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

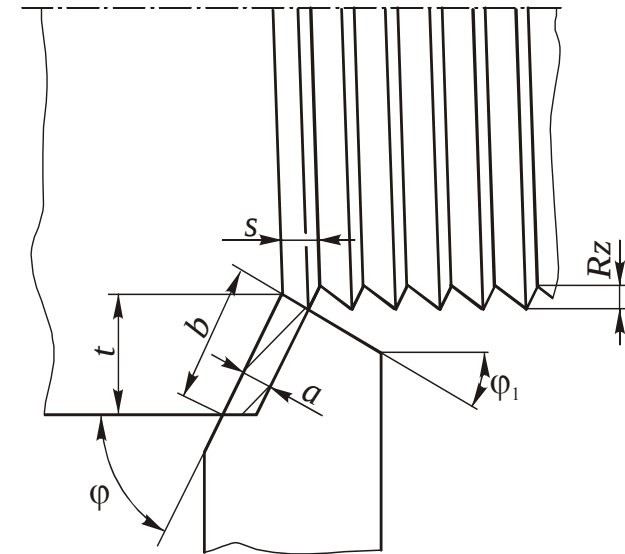
Фактическая площадь сечения среза меньше площади параллелограмма на величину площади гребешков (микронеровностей), остающихся на обработанной поверхности

$$F_\phi = F_H - F_{гр} = st - sRz / 2$$

где Rz - высота гребешков.



а)



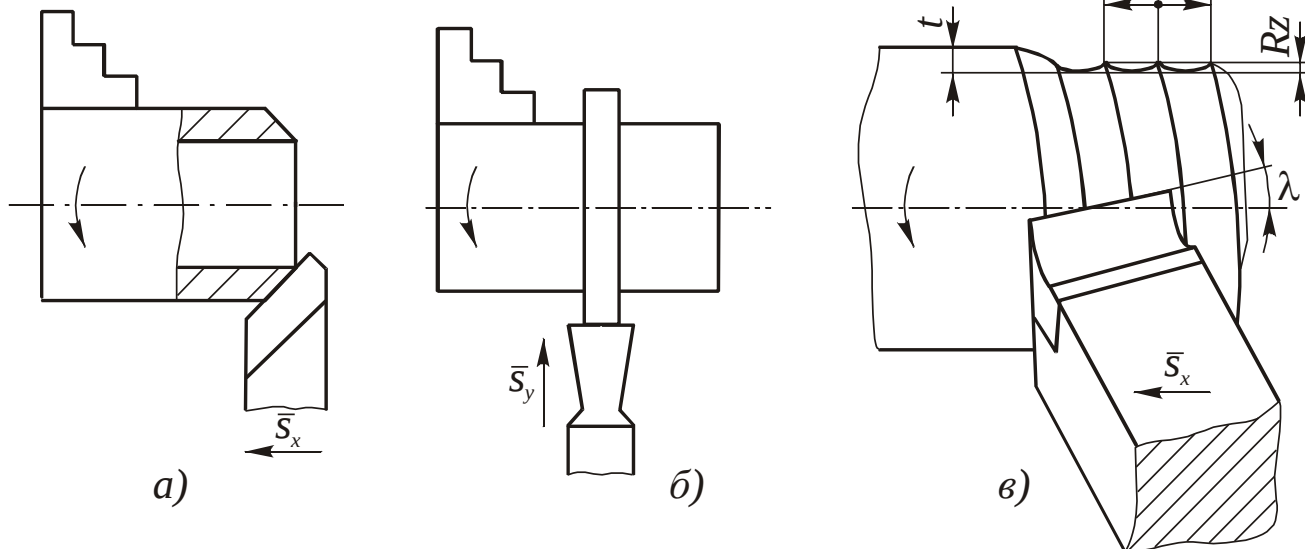
б)

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 $\phi < 45^\circ$ резко возрастает радиальная нагрузка P_y на заготовку и инструмент, на практике главный угол в плане обычно берут в пределах $\phi = 45 \dots 90^\circ$.

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*).

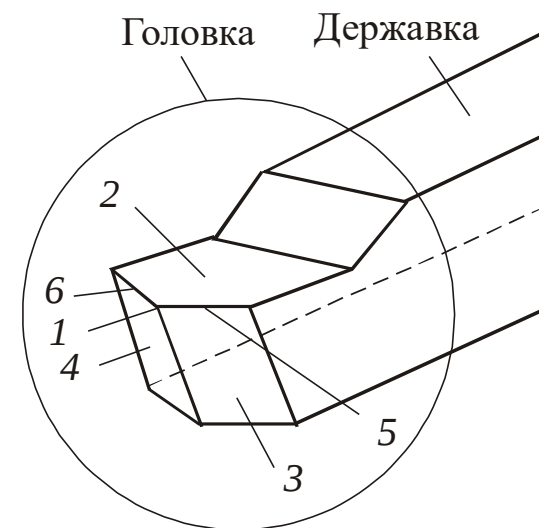
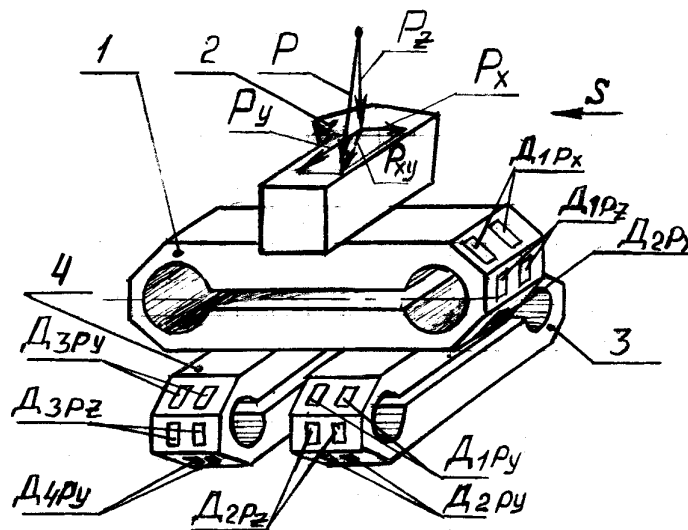
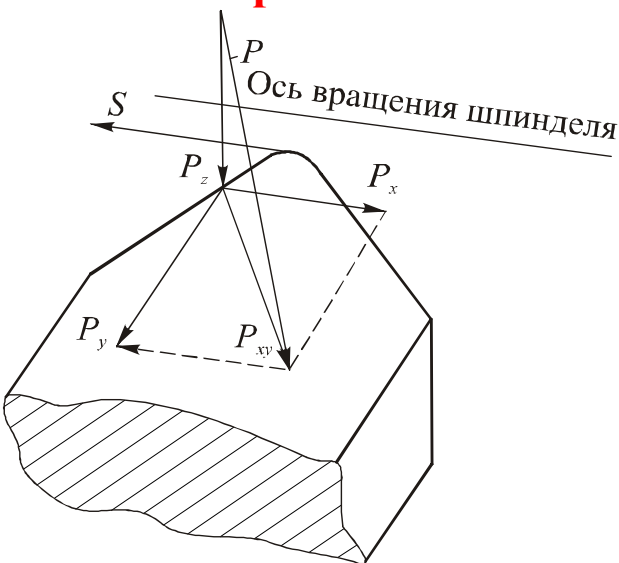
При **прямоугольном** (ортогональном) резании **подача s направлена перпендикулярно главной режущей кромке** (*б*), стружка сходит в направлении, перпендикулярном к режущей кромке. При **косоугольном** резании (при наличии угла λ) она отклоняется от нормали примерно на этот же угол. При движении подачи с $\phi \neq 90^\circ$ 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**.



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.

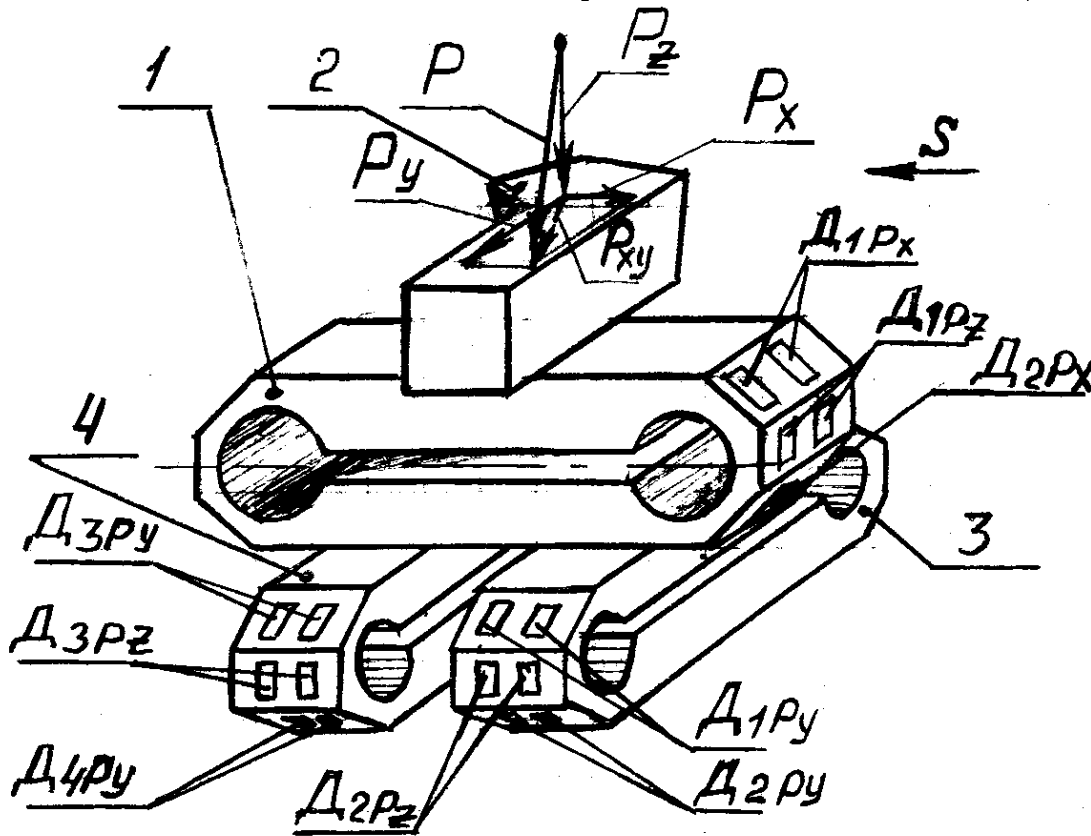
Для отсчета углов заточки токарного проходного резца используют две координатные плоскости:
плоскость резания и основную плоскость.



Поверхности и грани
(режущие кромки) резца

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

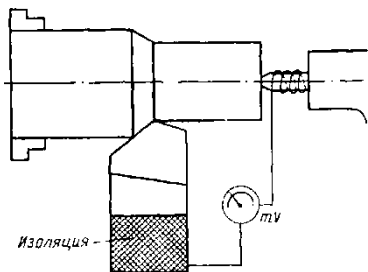
Измерение составляющих **силы резания P**



Тензометри-
ческий
проволочный
датчик

Усилитель с
регистрирующими
приборами
(микроамперметрами) по
четырёх каналам: I_{Pz} , I_{Py} , I_{Px}
и Θ (μA)

Упрощенная схема измерения
средней температуры резания
 Θ ° [или μA] за счёт термо-
электродвижущей силы (ТЭДС)
естественной термопарой



Инструментальные материалы

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

- 1) высокая **твёрдость**, более чем в 3...4 раза превышающая твёрдость обрабатываемого материала;
- 2) высокая **красностойкость** (*теплостойкость*) - способность сохранять необходимую твёрдость 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).

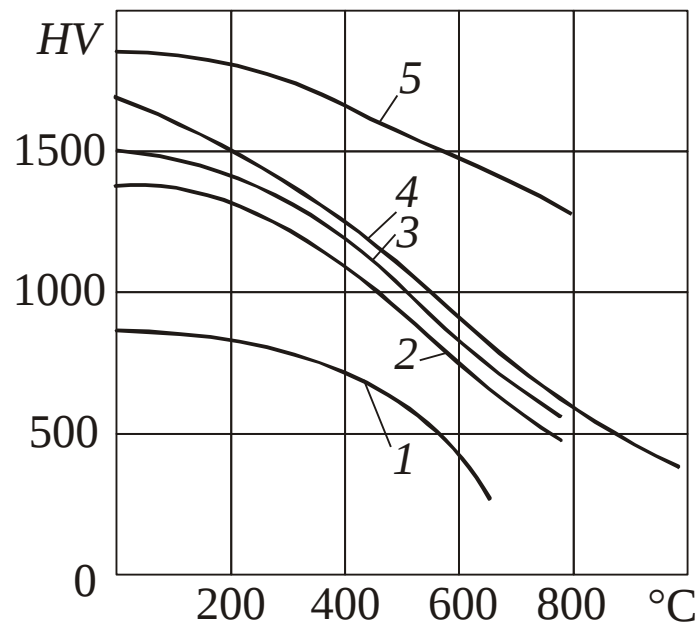
Все известные на сегодняшний день инструментальные материалы условно можно разделить на следующие группы:

- 1) инструментальные стали;
- 2) быстрорежущие стали;
- 3) безвольфрамовые сплавы;
- 4) металлокерамические твердые сплавы;
- 5) сверхтвёрдые материалы (СТМ);
- 6) абразивные материалы.

Инструментальные стали - это углеродистые и низколегированные стали.

Углеродистые стали ($C=0,7...1,3\%$) 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_3 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°C**. 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 – быстрорежущая 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 **высокого содержания углерода** ($C=0,9...1,1\%$) после термообработки имеют твердость **HRC_2 61...63**, обладают **хорошей прокаливаемостью** по сечению и **несколько повышенной красностойкостью** (теплостойкостью) (до **250...300°C**).

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°C), **углерод - твердость** (до **HRC_2 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°C**).

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

Инструментальные материалы (продолжение)

При маркировке **быстрорежущих** сталей содержание углерода ($C=0,85...1,2\%$) 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°C** (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** (C (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** ($C=0,80...0,88\%$, $W=5,5...6,5\%$, $Cr=3,8...4,4\%$, $V=1,7...2,0\%$, $Mo=5,0...5,5\%$), имеющая близкую к стали Р18 **теплостойкость**, **повышенные технологические свойства**, но несколько худшую **стойкость**. Стали **повышенной теплостойкости** имеют **повышенное содержание ванадия** (стали марок Р6М5Ф3, Р12Ф3) и **кобальта** (стали марок Р6М5К5, Р9К10, Р9М4К8, Р18К5Ф2). Они используются для **резания труднообрабатываемых** материалов, так как благодаря повышенному содержанию кобальта они отличаются высокими износо- и красностойкостью (до **640°C**), а также твердостью (до **HRC₃ 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 мелкогабаритные** инструменты изготавливаются из твёрдых сплавов.

Благодаря высокой теплостойкости (800...1000°C), 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**.

Инструментальные материалы (продолжение)

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 вольфрама (WC – 92%) – для черновой обработки;

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

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

T15K6 – для получистовой обработки и черновой без ударов (6% кобальта, 15% карбида титана (TiC), остальное (79%) – карбид вольфрама (основа);

T5K10 – для черновой обработки с ударами (но стойкость примерно в 2 раза меньше, чем при T15K6);

T30K4 – 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 **T15K6**: 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 **T15K6**: $v = 350-550$ 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°C), **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°C) метод, основанный на **химическом осаждении** покрытия из **газовой фазы**;

PVD (*Physical vapour deposition*) – **низкотемпературный** (300...800°C) 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°C) **метод катодного напыления и ионной бомбардировки (КИБ)**, осуществляемый на установках типа «Булат-3Т», «Пуск» и др.

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 $1400...1500^{\circ}C$) 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, ТМ3, 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 ($\sigma_{\text{и}}=210...480$ МПа), низкую красностойкость (800°C). 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, Al_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, достигающей 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.

Ко *второй группе* композитов относятся: композит 05, состоящий из КНБ и двуокиси алюминия Al_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 $0,5 \dots 1,0$ 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, достигающей до **2000 м/мин**, и обеспечивают высокое качество обработанной поверхности, благодаря чему исключается операция шлифования.

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 нержавеющей 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

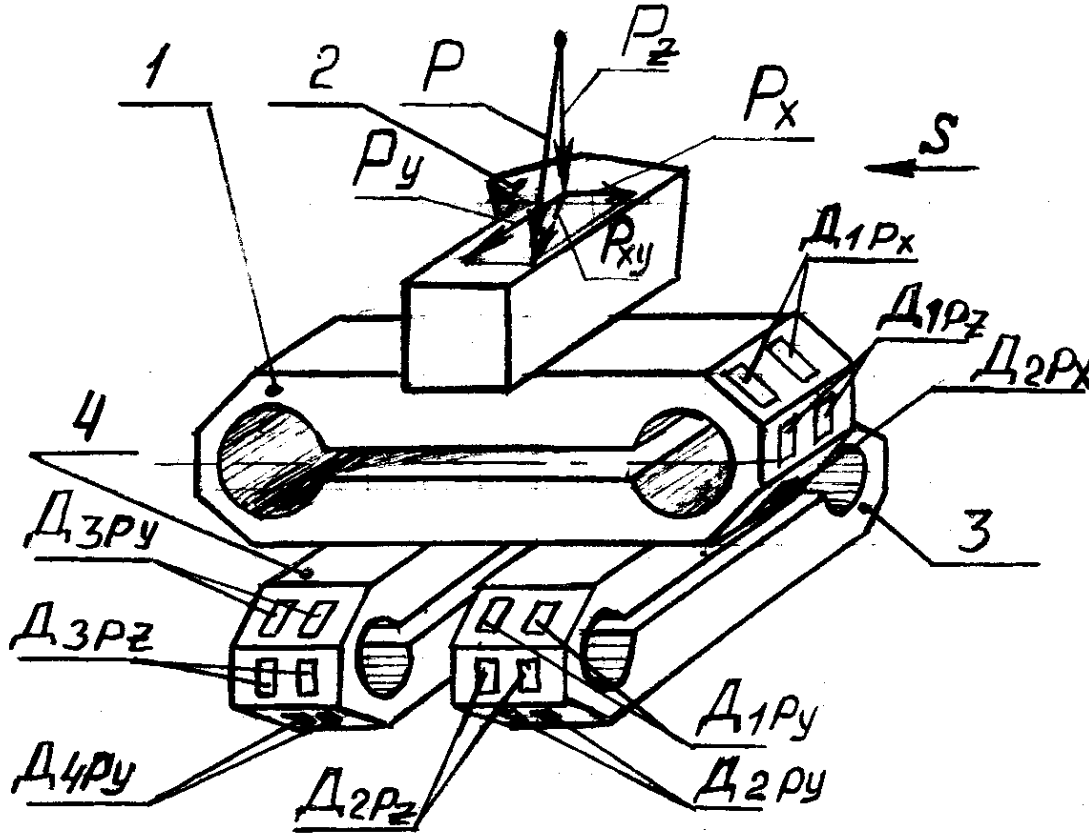
S (светло-коричневый) → Обработка жаропрочных и титановых сплавов

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.

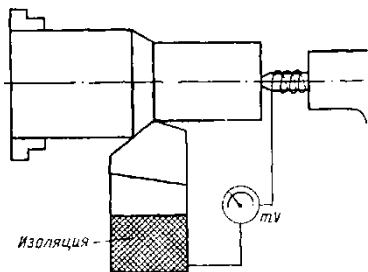
Измерение составляющих **силы резания P**



Тензометри-
ческий
проволочный
датчик

Усилитель с
регистрирующими
приборами
(микроамперметрами) по
четырёх каналам: I_{Pz} , I_{Py} , I_{Px}
и Θ (μA)

Упрощенная схема измерения
средней температуры резания
 Θ ° [или μA] за счёт термо-
электродвижущей силы (ТЭДС)
естественной термопарой



Упругая деформация кольца

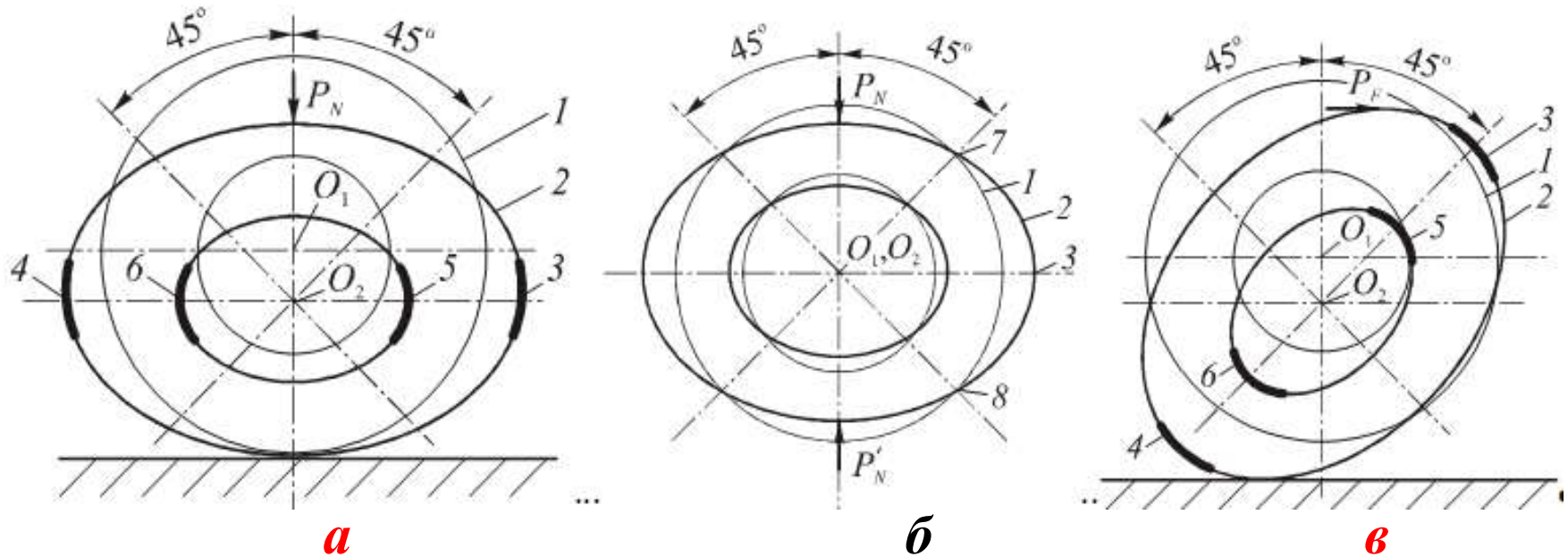


Схема деформирования упругого элемента динамометра: **а** – схема деформирования кольца под воздействием только **вертикальной силы P_N** ; **б** – схема деформирования кольца под воздействием только вертикальной силы P_N сверху и снизу, при которой ось кольца не смещается; **в** – схема деформирования кольца под воздействием только **горизонтальной** силы P_F ;

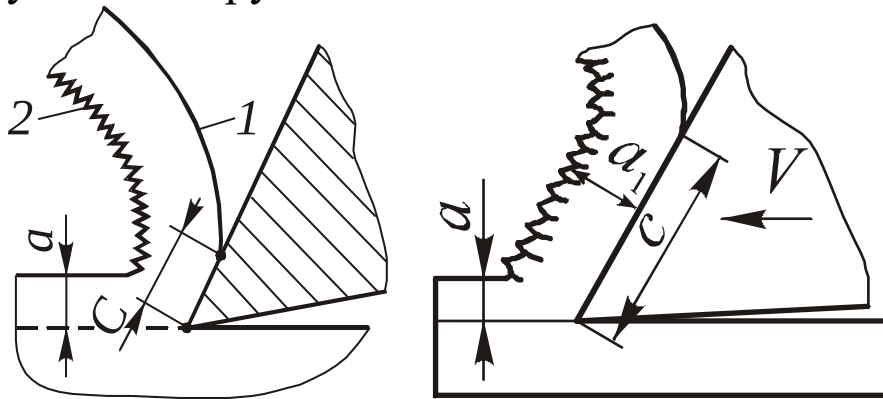
1 - положение поверхности кольца **до деформирования**; **2** – положение поверхности кольца **после деформирования вертикальной** силой P_N ; 3, 4, 5, 6 – места расположения тензодатчиков для наибольшей чувствительности к деформации кольца

Процессы в зоне стружкообразования.

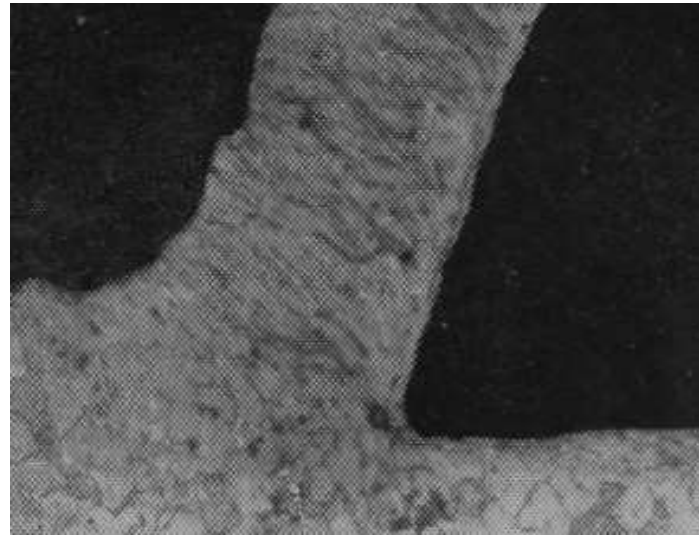
Виды стружки.

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.

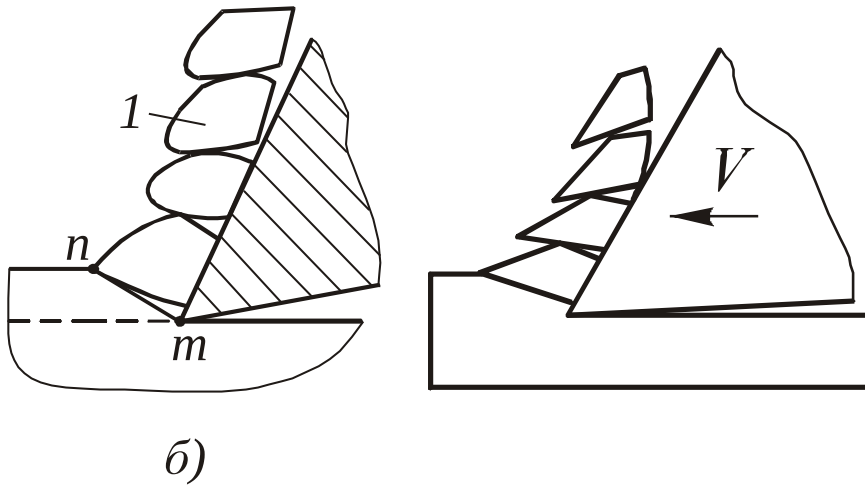


а)



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.



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**. При этом скол отдельных кусочков металла происходит по поверхности, часто располагаемой **ниже** линии среза.

Стружка отрыва (рис. **д**) состоит из комка. Она встречается **при резании весьма мягких материалов** или некоторых металлов, склонных к налипанию на передние поверхности инструментов. При этом отрыв 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**.

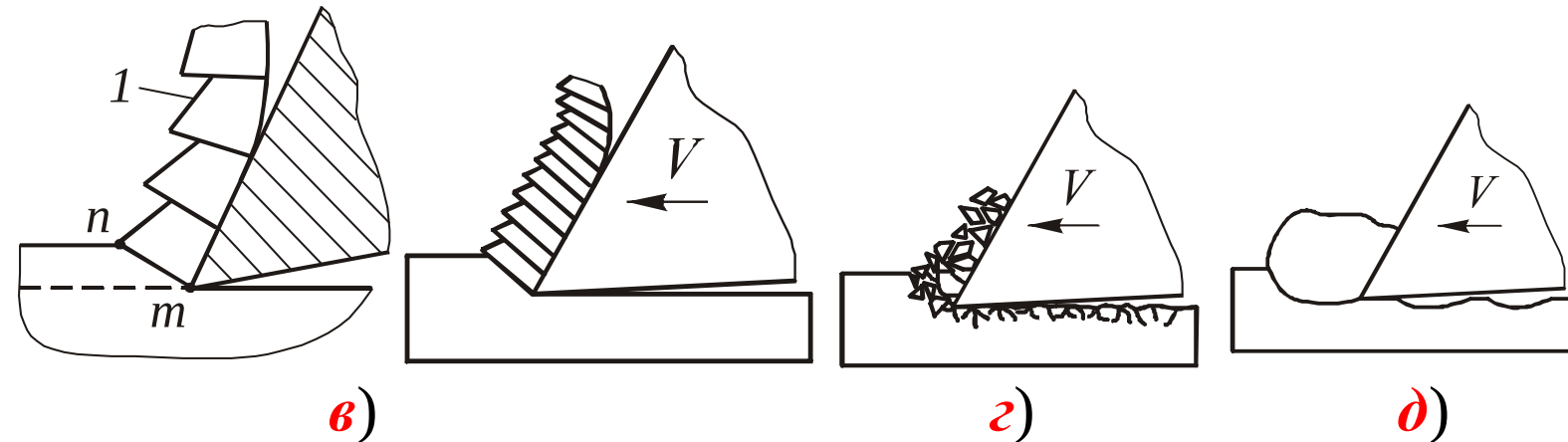
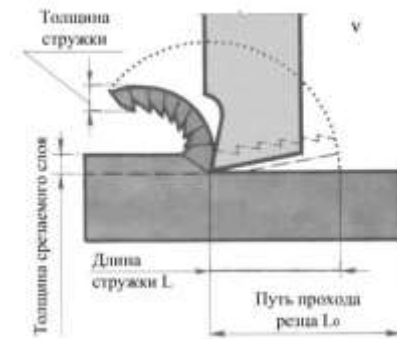
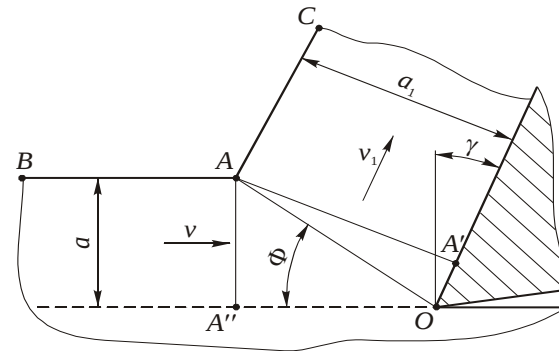


Схема стружкообразования

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.).

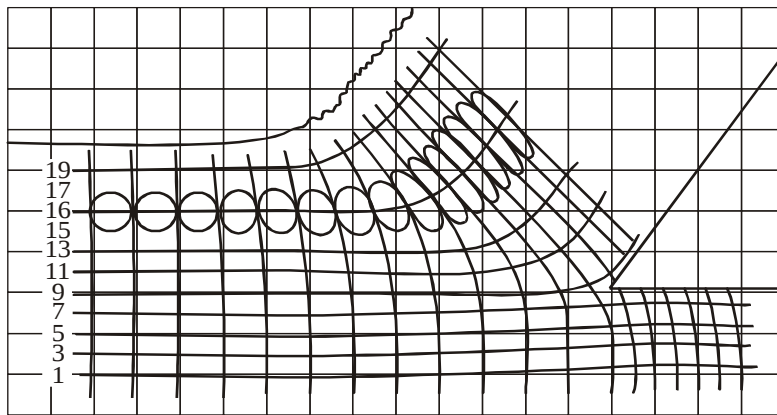
Согласно схеме И.А. Тиме срезаемый слой толщиной превращается в стружку толщиной путем сдвига бесконечно тонких слоев материала в **плоскости ОА**, расположенной **к плоскости резания** под углом наклона **условной плоскости сдвига Φ** . В результате деформации обрабатываемого материала при его переходе в **стружку её толщина a_1** становится **больше** толщины среза **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 **ОА** 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.

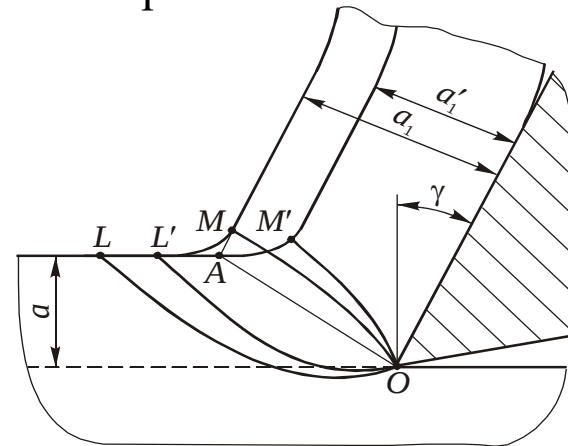


Деформации срезаемого слоя при свободном прямоугольном резании.

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 (*a*), 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).



a)



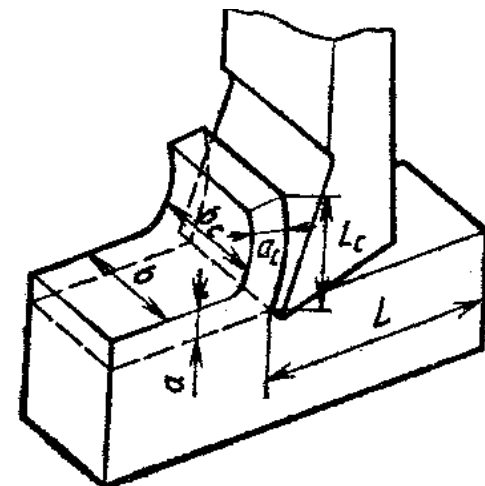
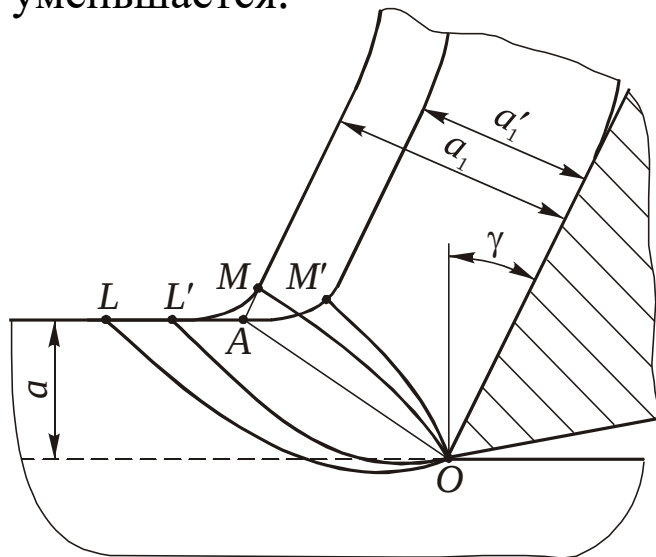
6)

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 резания 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 $\dot{\epsilon}$, 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.



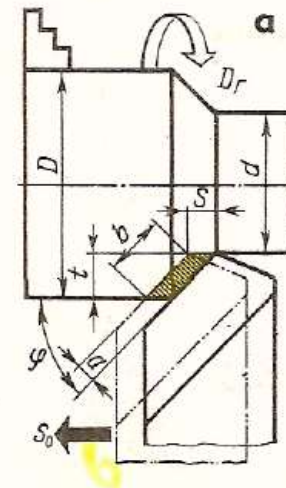
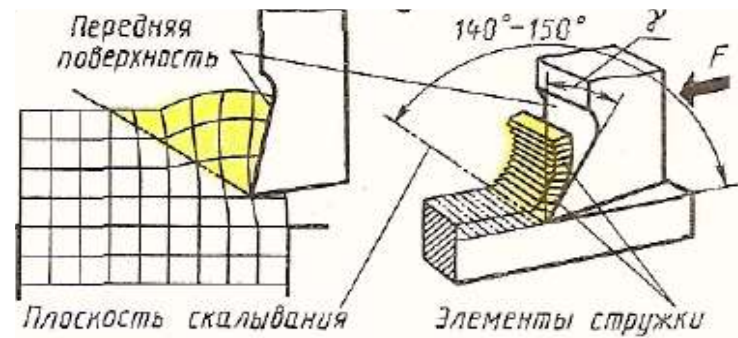
Микрофотография «корня» стружки (Б.М. Орлов)

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.

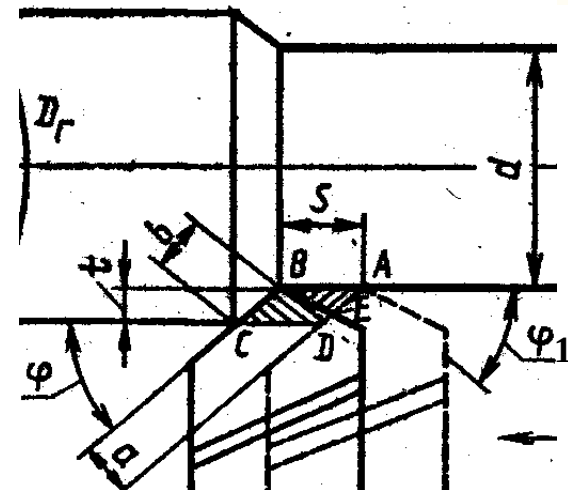
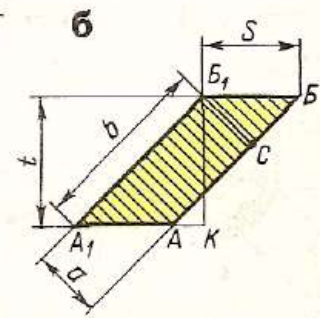
Под действием этой силы сначала происходит упругая деформация удаляемого слоя заготовки, а затем, по мере увеличения перемещения и силы, и пластическая деформация. Срезаемый слой деформируется, отдельные его частицы смещаются относительно друг друга. Чем **больше** главный **передний угол** γ резца, 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.



$$a = s \sin \varphi;$$

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



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 строганной 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 среза **a** при строгании равна глубине резания **t** . Линия среза P_1-P_2 теоретически касается вершины режущей кромки и параллельна направлению скорости резания.

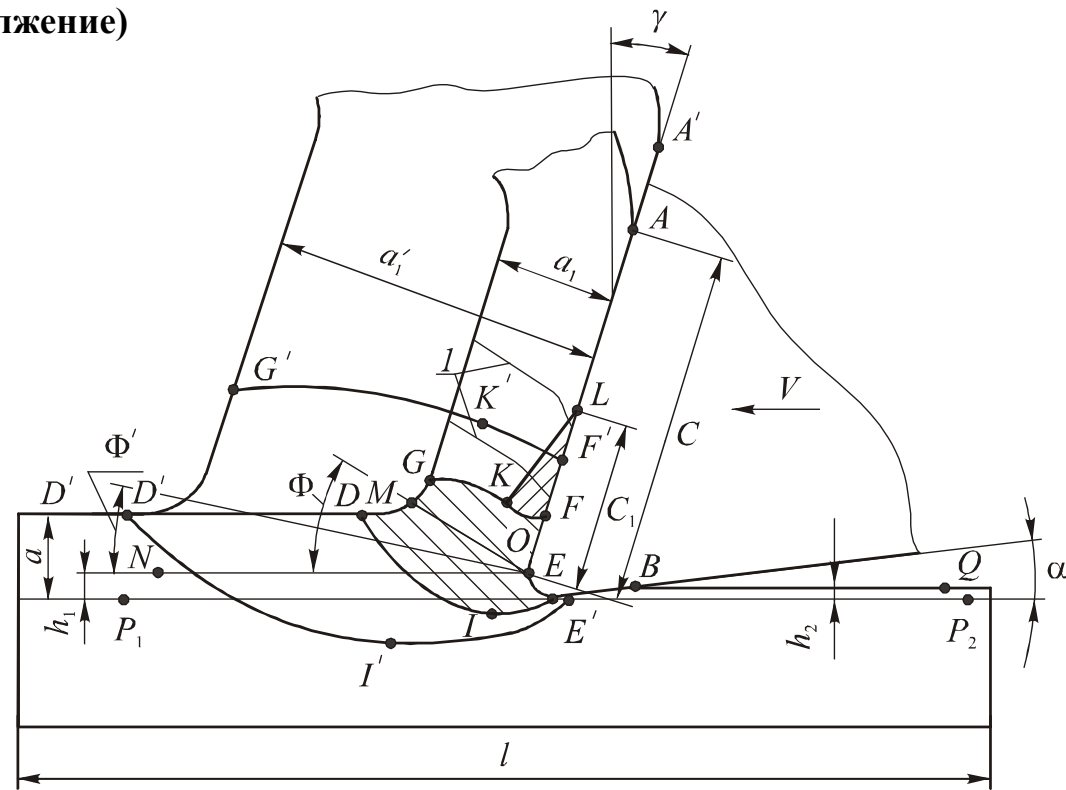


Схема уруго-пластической деформации в зоне стружкообразования при строгании пластины

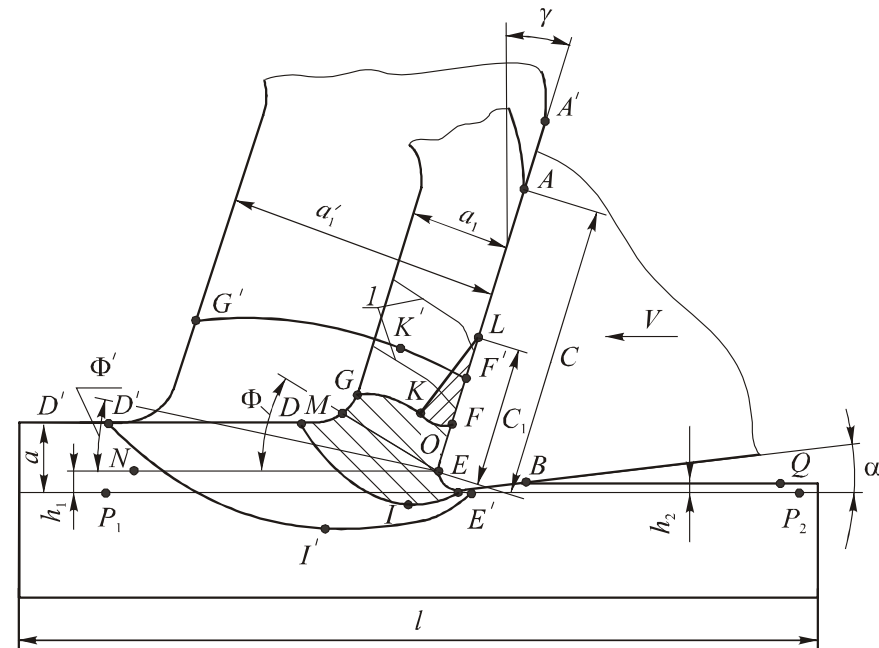
Практически всегда режущая кромка имеет **округление радиусом ρ** вследствие износа или неизбежно образуется в процессе обычной заточки инструмента. При резании часть металла в точке O **вдавливается под радиусный участок** и проходит под задней поверхностью резца. Поэтому фактически линия среза определяется 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 обработке до десятых долей миллиметра при черновой обработке, но при анализе явлений на передней поверхности инструмента в первом приближении ею можно пренебречь.

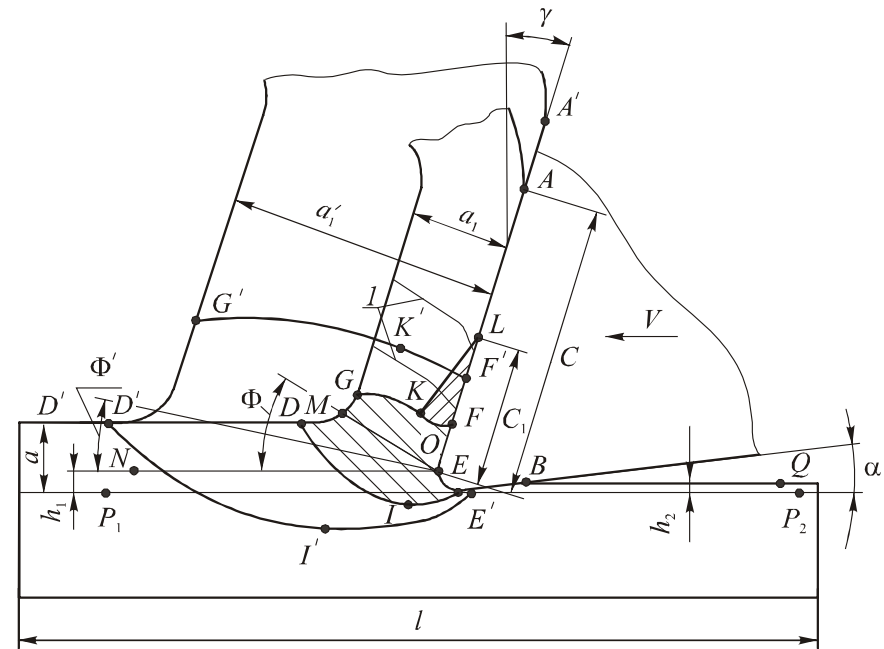
Величина **упругого восстановления обработанной поверхности h_2** немного меньше h_1 и зависит от тех же факторов плюс выдавливание на боковые поверхности пластины и пластическая деформация металла на обработанной поверхности. От величины h_2 в большой степени зависит глубина и степень пластической деформации 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 $G-K-F$.



Процессы в зоне стружкообразования (продолжение)

Скорость деформаций $\dot{\epsilon}$ 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 элементарной стружки со сдвигом элементов стружки по плоскости сдвига при строгании пластины (увеличено в 5 раз)

Процессы в зоне стружкообразования (продолжение)

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:

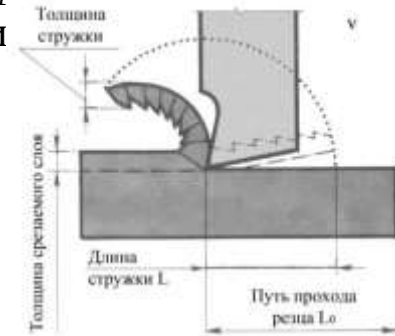
$$l \times a \times b = l_1 \times a_1 \times b_1; l / l_1 = (a_1 \times b_1) / (a \times b); k_l = l / l_1 = (a_1 / a) \times (b_1 / b) = k_a \times k_b,$$

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:

$$\operatorname{tg} \Phi = \cos \gamma / (k_a \cdot \sin \gamma).$$

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.

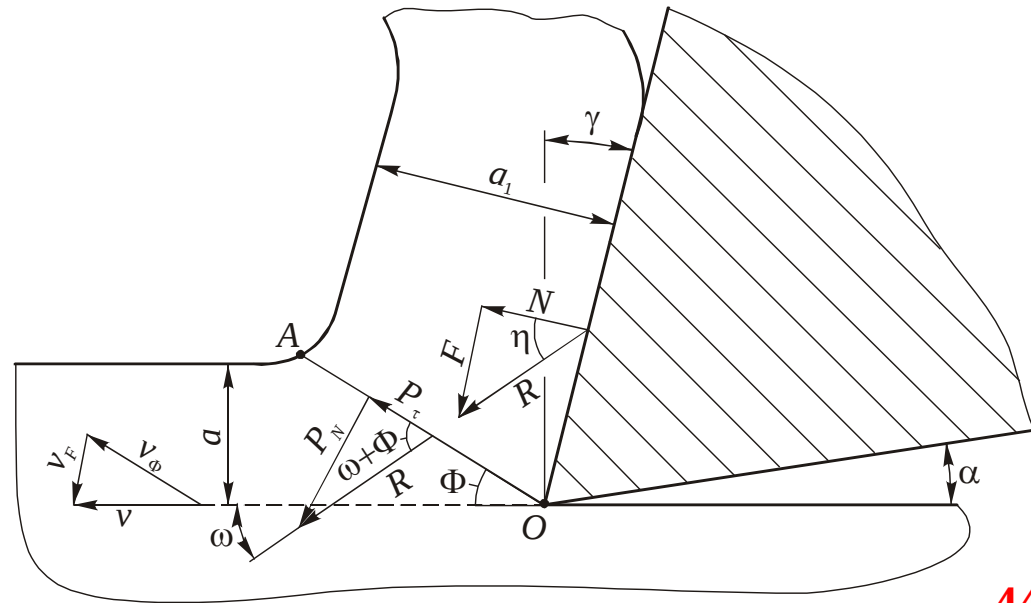


Напряжения и силы при стружкообразовании

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 : $\bar{R} = \bar{N} + \bar{F}$.

В этом случае **угол η** между силами N и F – это **угол трения**, а $\operatorname{tg} \eta = F / N = \mu$ –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 ($F=N \times f$), а **пределом прочности на сдвиг $\tau_{\text{пред}}$** 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 1 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 свежееобразованной идеально чистой, новой (**ювенильной**) **поверхности стружки** по зачищенной, **освобожденной от окислов передней поверхности инструмента**.

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.

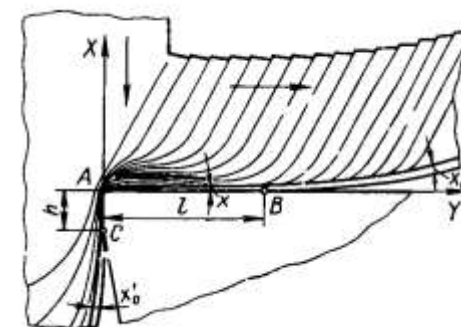


Рис. 1. Образование зоны
вторичной пластической
деформации (точение)

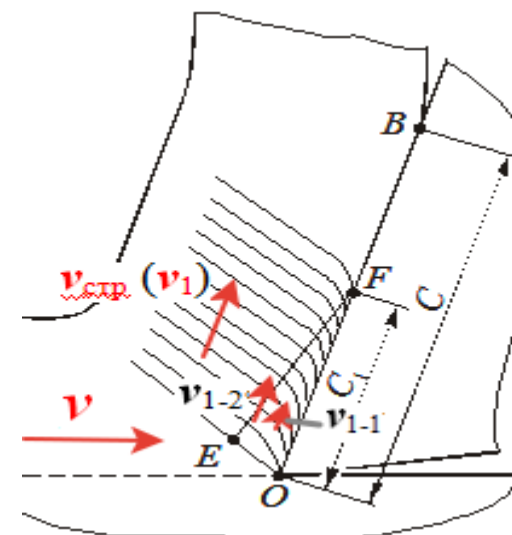


Рис. 2. Искривление текстуры из-за застойной зоны *OEF* (строгание)

На участке вторичных пластических деформаций отсутствует обычное внешнее трение, потому на участке OL практически отсутствует и абразивный износ, что можно видеть на фотографиях передней поверхности изношенного инструмента. Для конструкционной незакалённой стали длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента $c \approx (5...10) \times a$. 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 $c_1 = (0,3...0,7) c$, 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 – приблизительно 0,5.

По данным Н.Н. Зорева при точении стали 50 резцом с передним углом $\gamma=10^\circ$ 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 и до $\epsilon=39$ – 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 $\mu=0,5\dots 1,7$, свинца - $\mu=0,4\dots 0,8$, а алюминия $\mu=0,93\dots 1,5$, 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

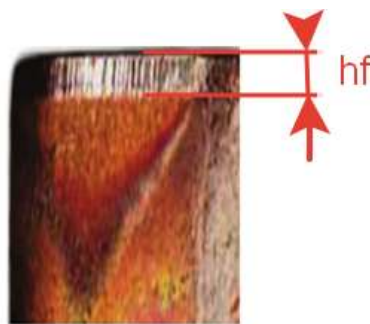
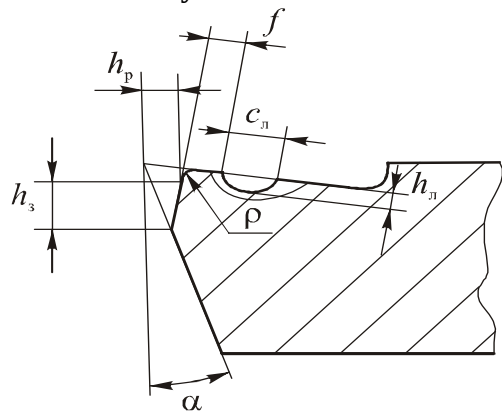
Удельные силы **резания** рассчитываются как отношение силы к площади поперечного сечения срезаемого слоя:

$$q_{pz} = P_z / (s \cdot t) \text{ (Н/мм}^2\text{)}; q_{pxy} = P_{xy} / (s \cdot t) \text{ (Н/мм}^2\text{)}.$$

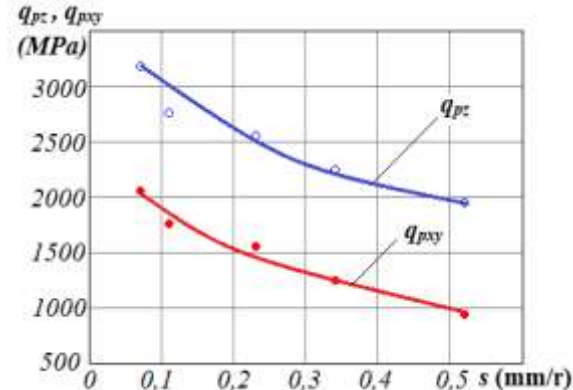
$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2; 1 \text{ МПа} = 1 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1 \text{ Н/мм}^2.$$

С увеличением подачи и глубины резания удельные силы резания **уменьшаются**.

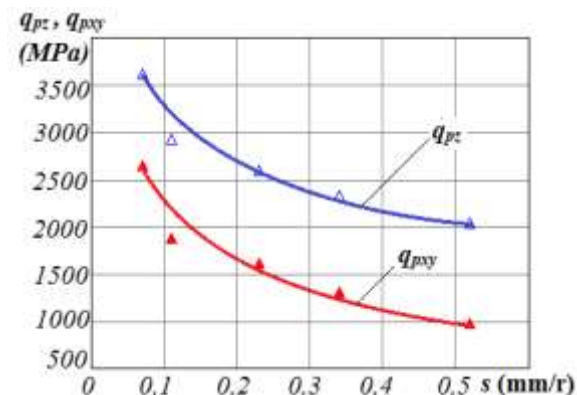
С увеличением длины фаски износа h_f по задней поверхности удельные силы резания существенно увеличиваются, при этом q_{pxy} увеличивается быстрее, чем q_{pz} .



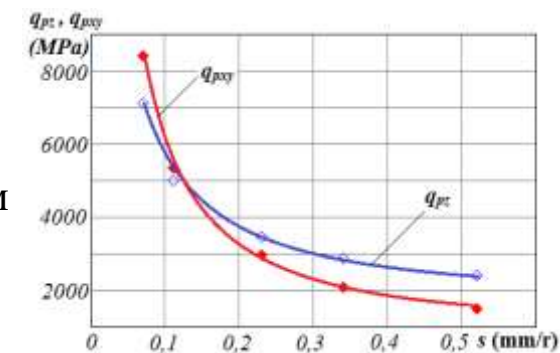
а) $h_f = 0.13 \text{ мм}$



б) $h_f = 0.29 \text{ мм}$



в) $h_f = 0.95 \text{ мм}$



Влияние подачи s (мм/об) на удельные силы резания при обработке стали 40Х при разной фаске на задней поверхности h_3 . Сталь 40Х- Т15К6; $t=2 \text{ мм}$; $v=2 \text{ м/с}$, округление режущей кромки $\rho \approx 5 \text{ мкм}$.

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

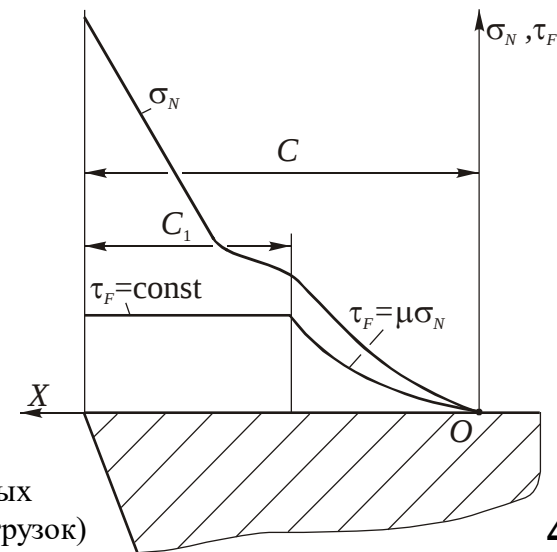
$$C_1 = a[K(1 + \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma] , \text{ а общую длину контакта } C = a(2,05K - 0,5).$$

В уравнениях длины контакта на передней поверхности инструмента пропорциональны **толщине среза a** и зависят также от усадки **K** 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 $f = C \cdot b$.

$$\sigma = \Delta N_i / \Delta C_i \cdot b, \quad \tau = \Delta F_i / \Delta C_i \cdot b$$

где ΔC_i – приращение длины площадки контакта стружки с передней поверхностью; ΔN_i и ΔF_i – **приращение нормальной** и касательной силы на передней поверхности при соответствующем **приращении площадки контакта** стружки с передней поверхностью **на длину ΔC_i** ; b - ширина контактной поверхности стружки.



Эпюры контактных напряжений (нагрузок)

Метод *разрезного резца*

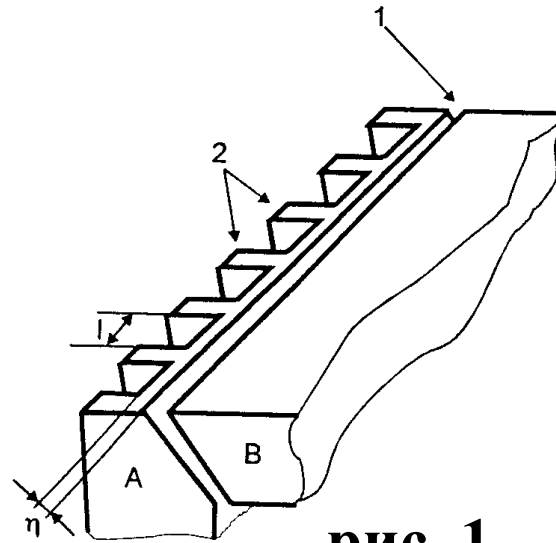


рис. 1

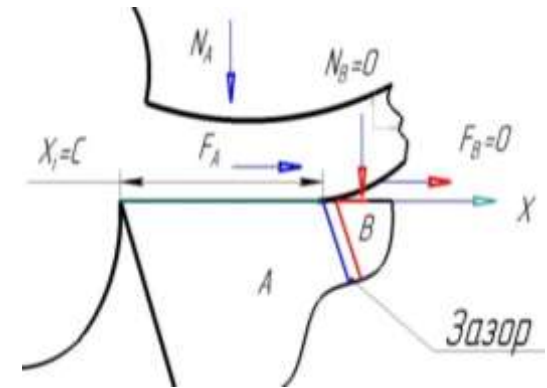


рис. 2

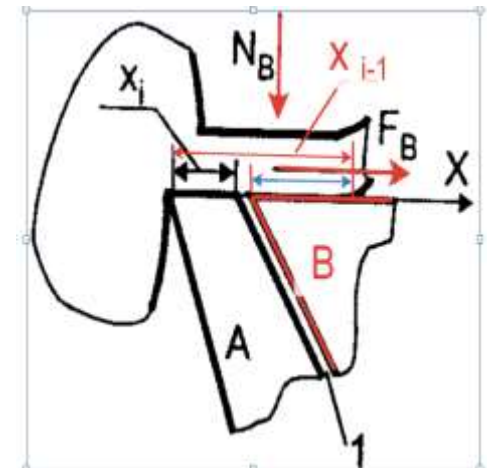


рис. 3

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 **В** нет
контакта со стружкой, поэтому
силы $N_{B\ i=1}$ и $F_{B\ i=1}$ **равны нулю**
(рис. 2).

- 1) Изменение длины контакта стружки с
пластиной **А**: $\Delta x_i = x_{i-1} - x_i$; (рис. 2)
- 2) Изменение нормальной силы N на пластине **А**:
 $\Delta N_{Bi} = N_{Bi} - N_{Bi-1}$;
- 3) Удельная нормальная нагрузка на пластине **А** в
точке $x_i \approx x_{i\text{ ср}} [x_{i\text{ ср}} = (x_i + x_{i-1})/2]$:
 $q_{NBi} = \Delta N_{Bi} / (b \times \Delta x_i)$ [Н/мм²] ,
где b – ширина контакта стружки с передней
поверхностью на пластине **А**.
при $\Delta x_i \rightarrow 0$ мм $q_{NBi} \rightarrow \sigma_{Ni} \rightarrow \sigma_i$

$$q_{FBi} = \Delta F_{Bi} / (b \times \Delta x_i)$$

при $\Delta x_i \rightarrow 0$ мм $q_{FBi} \rightarrow \tau_{Ni} \rightarrow \tau_i$

Контактные процессы на передней поверхности инструмента (*продолжение*)

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

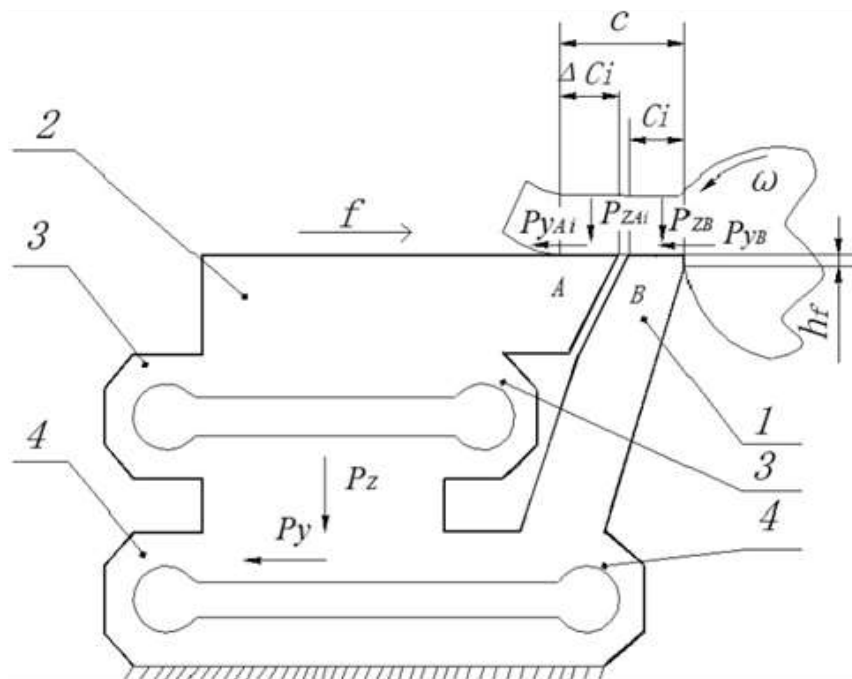


Рис. 1. Исследование распределения контактных напряжений на **передней поверхности резца** методом **разрезного резца**

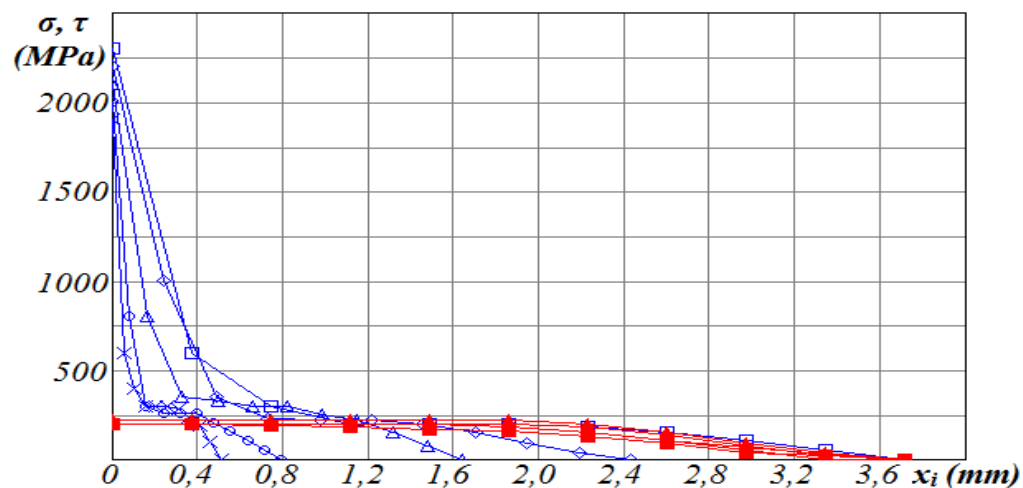


Рис. 2. Распределение **нормальных σ** ($\times$, $\circ$, Δ , $\diamond$, $\square$) и **касательных τ** ($+$, $\bullet$, $\blacktriangle$, $\blacklozenge$, $\blacksquare$) контактных напряжений (МПа) на **передней** поверхности резца при точении

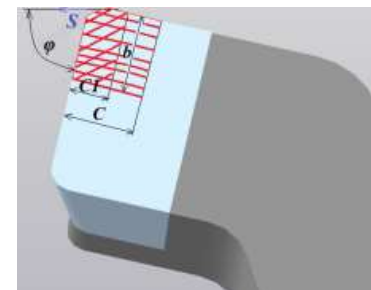
стали 40X. $\gamma=5^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $v=2$ м/с, $t=2$ мм.

$\square$, $\blacksquare$ – $s=0,52$ мм/об; $\diamond$, $\blacklozenge$ – $s=0,34$ мм/об;

Δ , $\blacktriangle$ – $s=0,23$ мм/об; $\circ$, $\bullet$ – $s=0,11$ мм/об;

$\times$, $+$ – $s=0,07$ 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)

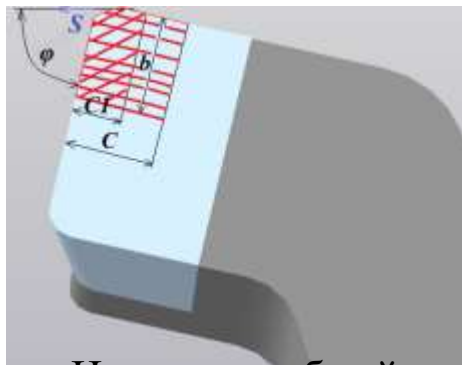
$$N = N_{Pz} - N_{Pxy} = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma;$$

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

$$F = F_{Pxy} + F_{Pz} = P_{xy} \times \cos \gamma + P_z \times \sin \gamma.$$

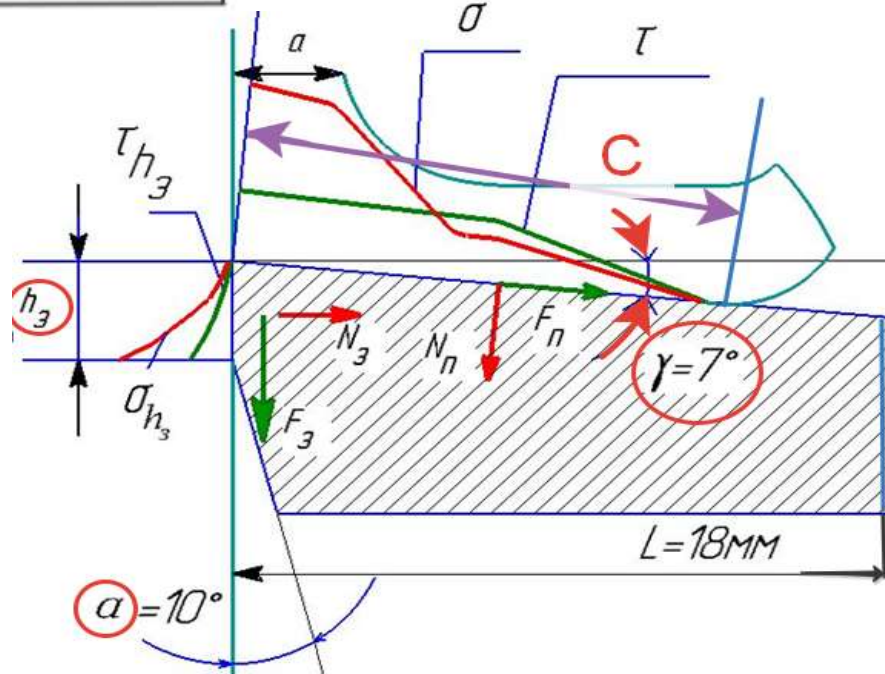
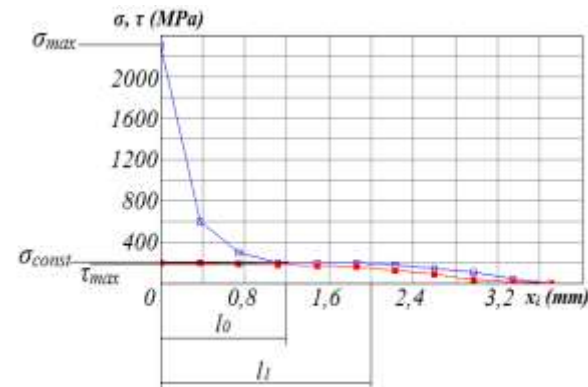
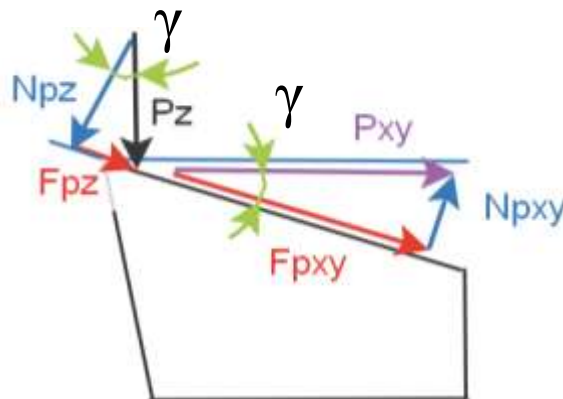
Параметры **эпюр** контактных напряжений на передней поверхности

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



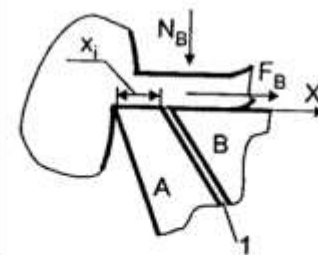
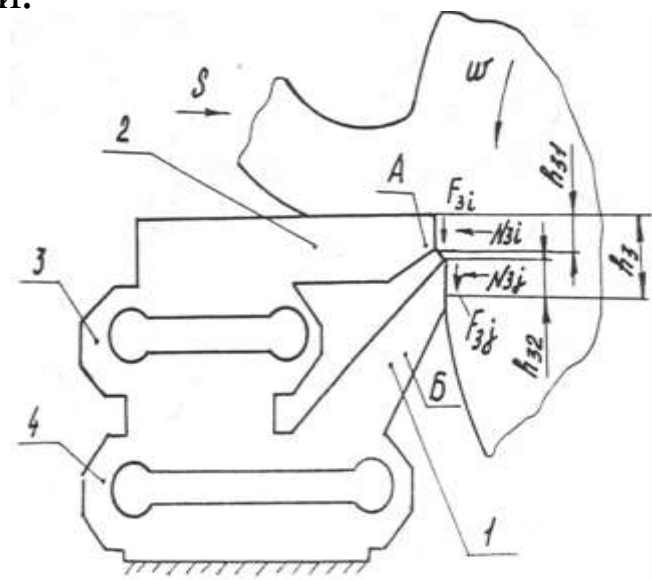
Сталь 40X:
 $\sigma_B = 550$ МПа.

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

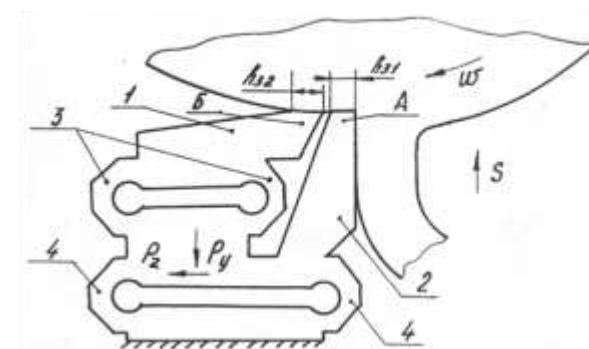
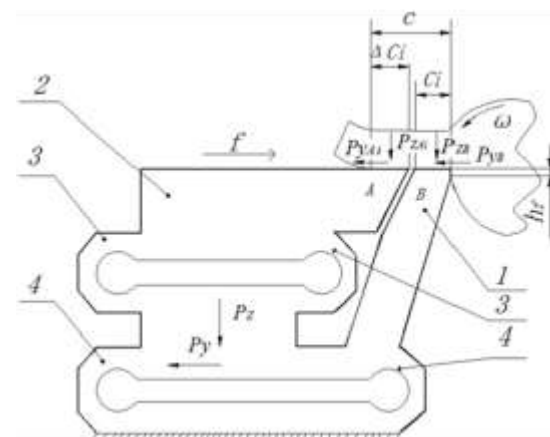


При исследовании распределения контактных напряжений на **фаске износа задней поверхности** с помощью разрезного резца упругая деформация элементов 3 приводит к **появлению уступа**, который начинает срезать дополнительную стружку с поверхности резания. **Зазор забивается**, что приводит к поломке пластин.

Требуется **изменить схему** проведения измерений.



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



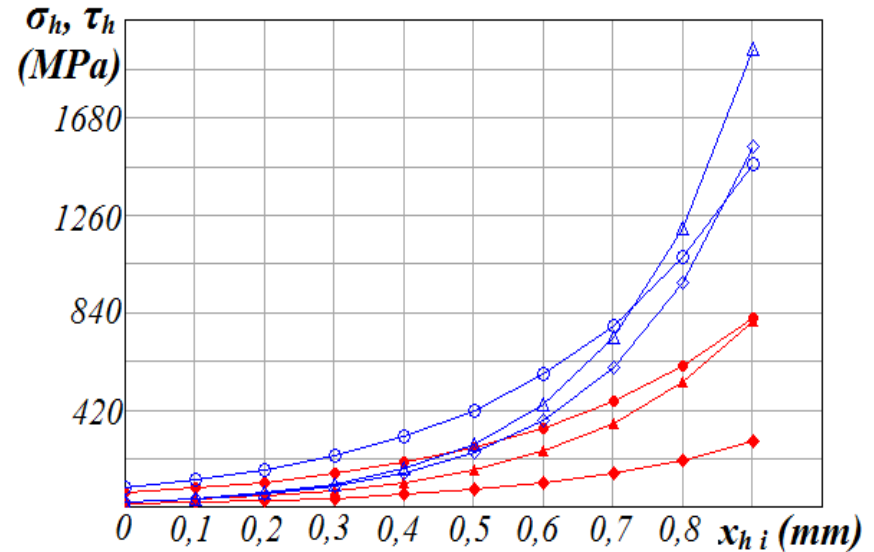
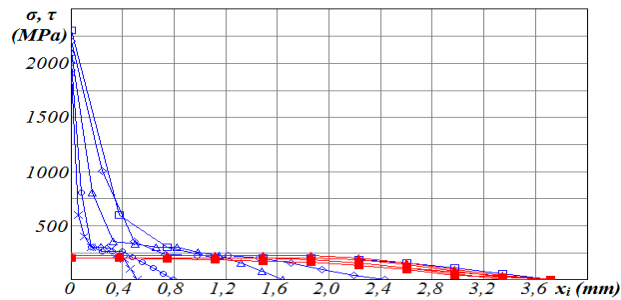
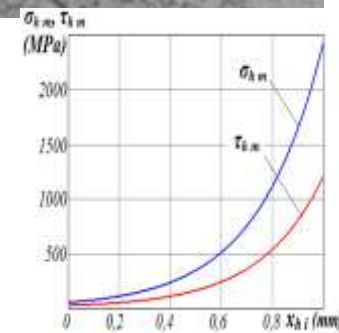
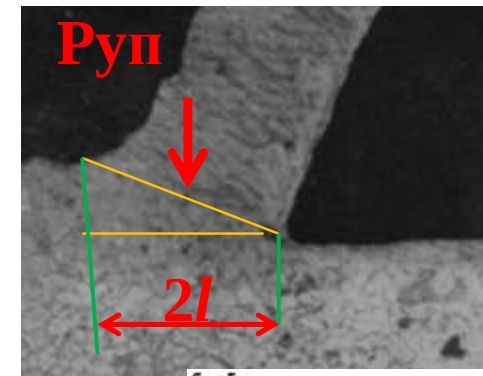
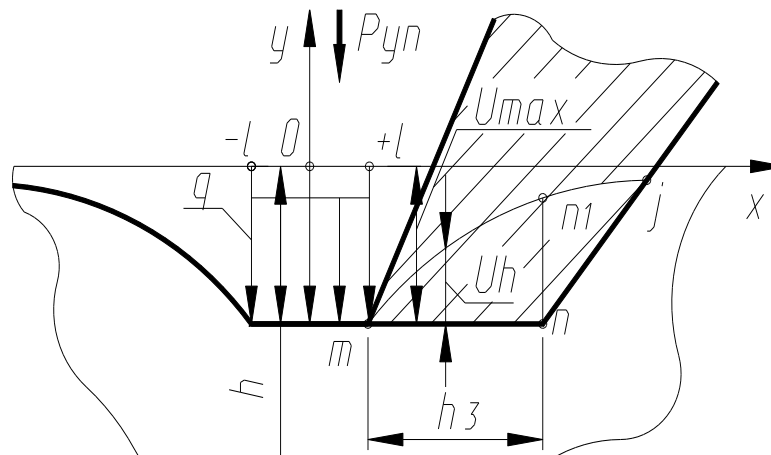
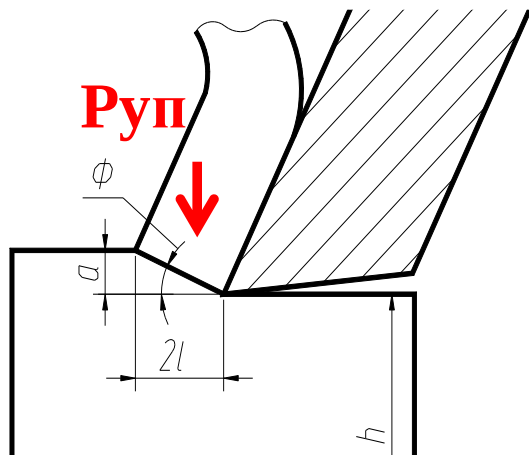


Рис. 1. Распределение **нормальных** σ_h ($\times$, $\circ$, Δ , $\diamond$, $\square$) и **касательных** τ_h ($+$, $\bullet$, $\blacktriangle$, $\blacklozenge$, $\blacksquare$) контактных напряжений (МПа) на **фаске** задней поверхности резца при точении стали 40Х.

$\gamma=5^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $v=2$ м/с, $t=2$ мм.

$\square$, $\blacksquare$ – $s=0.52$ мм/об; $\diamond$, $\blacklozenge$ – $s=0.34$ мм/об;
 Δ , $\blacktriangle$ – $s=0.23$ мм/об; $\circ$, $\bullet$ – $s=0.11$ мм/об;
 $\times$, $+$ – $s=0.07$ мм/об.

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_1j взаимодействует с плоскостью фаски mn , длиной h_3 , деформируясь до положения mnj и вызывая дополнительное давление на фаску износа задней поверхности при удалении от режущей кромки. **Прогиб** поверхности среза mnj вызывает **радиальная сила R_{yn}** , действующая со стороны **передней поверхности** на участок $2l$ ($2l = a \cdot \operatorname{ctg} \Phi$). При образовании **сливной стружки** эта сила достаточно **стабильна**, поэтому **прогиб** происходит **всегда** во время резания. Чем **больше подача**, тем больше и участок $2l$, тем **больше длина волны прогиба**. Поэтому на большем расстоянии от режущей кромки начинается увеличение контактных напряжений.

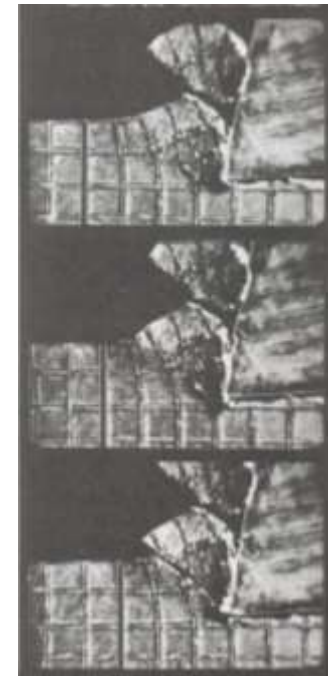
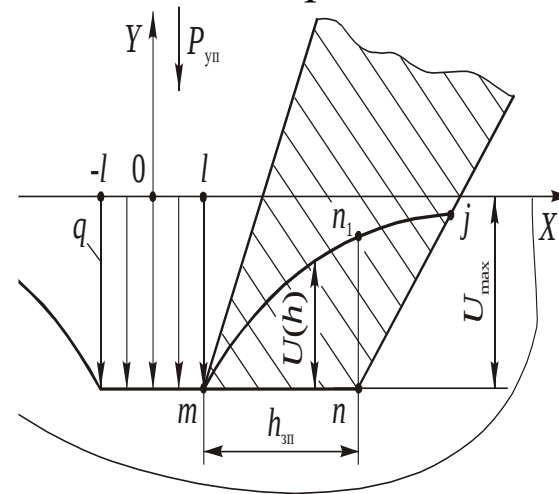


Контактные процессы на поверхностях инструмента (продолжение)

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 $R_{уп}$ в зоне стружкообразования** на участке длиной $(-l...+l)$, где $2l=a \cdot \text{ctg}\Phi$. 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**.

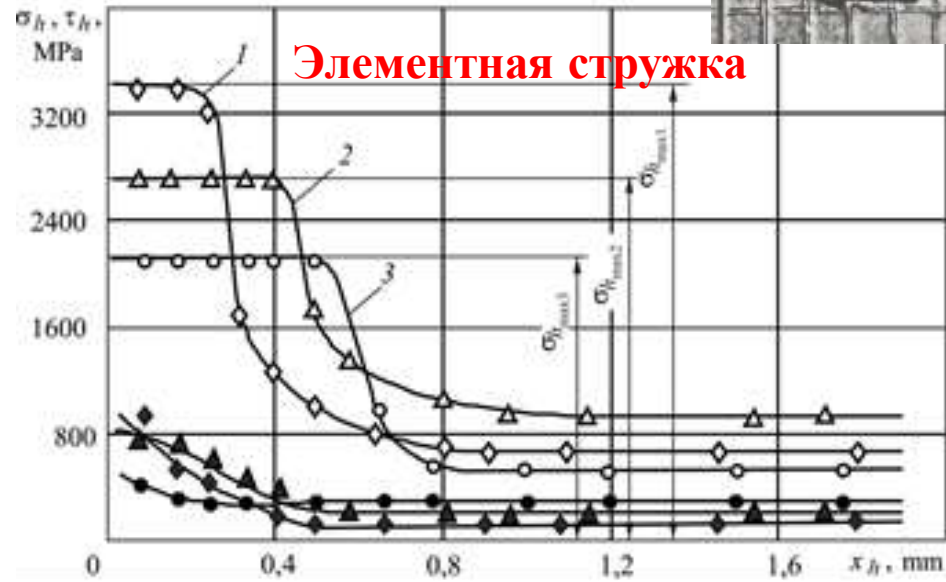


Контактные процессы на поверхностях инструмента (продолжение)



а) распределение нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений на фаске задней поверхности инструмента при **сливном** стружкообразовании. Л63-Р6М5, $\gamma=0^\circ$, $\alpha_\phi=0^\circ$: 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. Уменьшение σ_h связано с влиянием радиуса кривизны поверхности диска $R_{\text{диска}}$



б) распределение нормальных ($\diamond$, Δ , $\circ$) σ_h и касательных ($\blacklozenge$, $\blacktriangle$, $\bullet$) τ_h контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности при обработке титанового сплава, **образующего элементарную стружку**. ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v=1$ м/с:

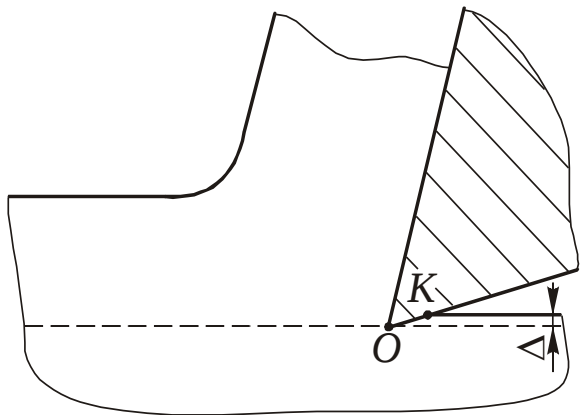
1 ($\diamond$, $\blacklozenge$) - $s=0.41$ мм/об; 2 (Δ , $\blacktriangle$) - $s=0.21$ мм/об; 3 ($\circ$, $\bullet$) - $s=0.11$ мм/об.

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

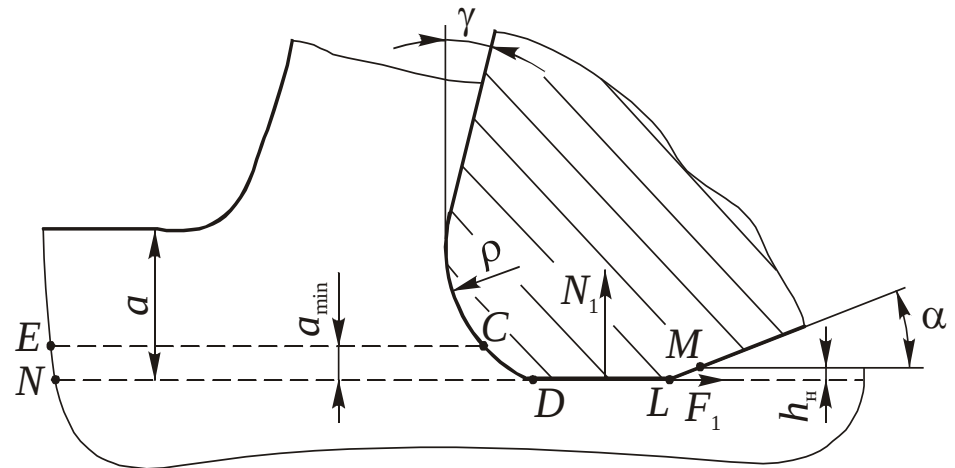
Контактные процессы на задней поверхности инструмента

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 OK 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 $\rho = 0,005 \dots 0,02$ 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.



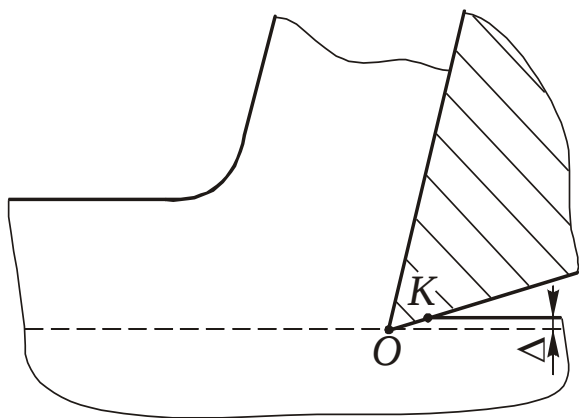
a)



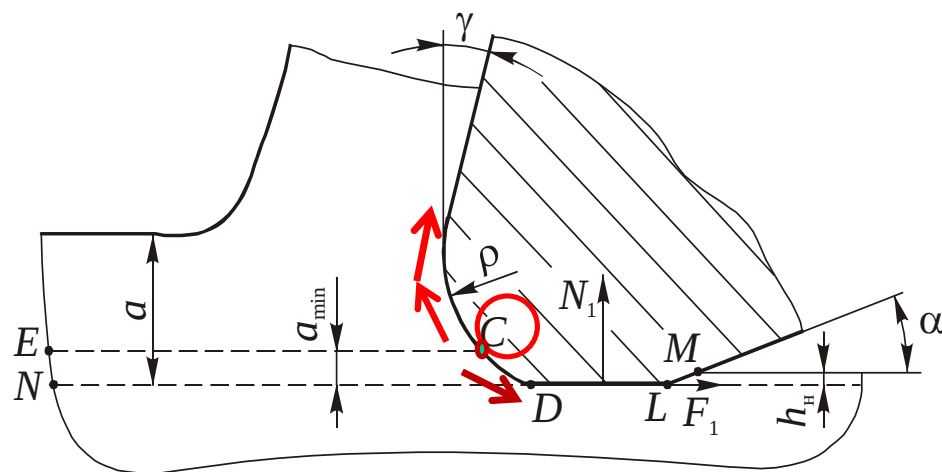
б)

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_n . Напряжения, возникающие в этом слое, оказывают большое влияние на **износостойкость и усталостную прочность** деталей.



а)

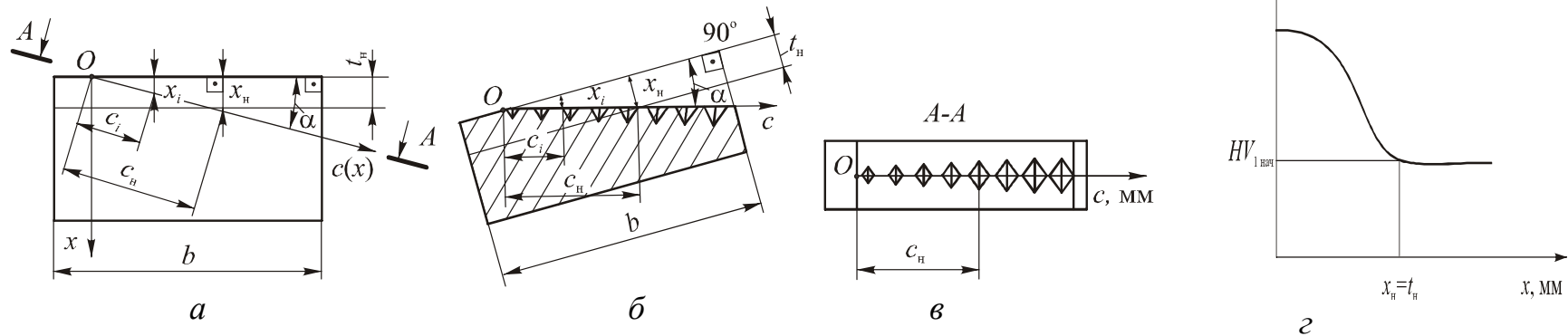


б)

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_1) поверхности образовавшейся гипотенузы прямоугольного треугольника, где катетом является глубина исследуемой зоны $x_i = c_i \times \sin \alpha$, [мм].



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.

Под степенью наклепа понимают отношение

$$\Delta H_M = \frac{H_{MH} - H_{MC}}{H_{MC}} \cdot 100\%,$$

где H_{MH} - наибольшая микротвердость наклепанного слоя; H_{MC} - микротвердость ненаклепанного слоя (исходного материала).

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 $\Delta_n=0,09$ мм до $\Delta_n=0,155$ мм, а степень наклепа – от $\Delta H_M=23\%$ до $\Delta H_M=37\%$. Увеличение переднего угла от $\gamma = -60^\circ$ до $\gamma = 30^\circ$ уменьшает глубину наклепанного слоя от $\Delta_n=0,24$ мм до $\Delta_n=0,1$ мм, а степень наклепа - от $\Delta H_M=42\%$ до $\Delta H_M=35\%$. Рост износа инструмента увеличивает степень наклепа ΔH_M и глубину Δ_n наклепанного слоя, а рост скорости резания v , 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.

Остаточные напряжения характеризуются:

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

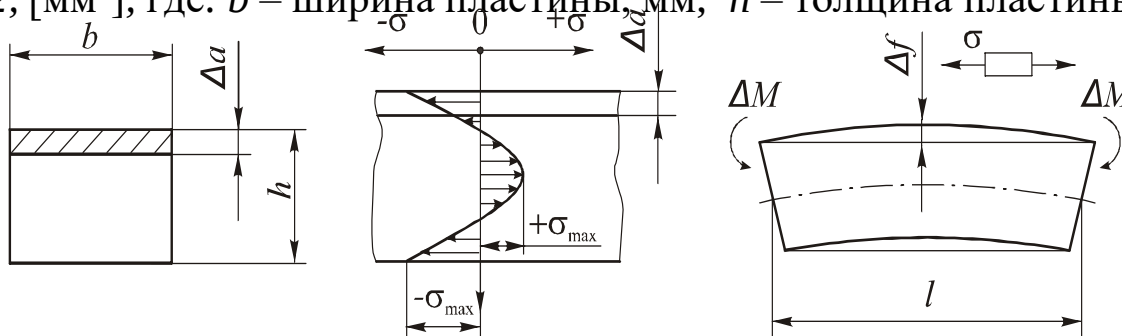
Остаточные напряжения могут определяться разрушающим контролем (механическим путём) и неразрушающим контролем (с использованием рентгеновских лучей, ультразвуковых или акустических колебаний).

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, мм⁴.

Для простейшего случая – изгиба пластины, – момент сопротивления определяется по формуле $J = b \times h^3 / 12$, [мм⁴], где: b – ширина пластины, мм; h – толщина пластины, мм.



Оценка качества обработанной поверхности

Изгибающий момент при изгибе от перераспределения остаточных напряжений

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

где: $\sigma_{\text{ост}}$ – остаточные напряжения на контролируемой глубине, Н/мм²; Δa – толщина удаляемого слоя при определении остаточного напряжения механическим способом, мм.

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

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

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

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

где: Δf_i – величина прогиба на i -том этапе определения остаточных напряжения, мм; E – модуль упругости (модуль Юнга), Н/мм². $E = \sigma/\epsilon$, [Н/мм²], где $\epsilon = \Delta \ell/\ell$, где $\Delta \ell$ – удлинение образца длиной ℓ под действием растягивающей силы P , Н); $\sigma = P/S$, где S – площадь поперечного сечения образца, мм².

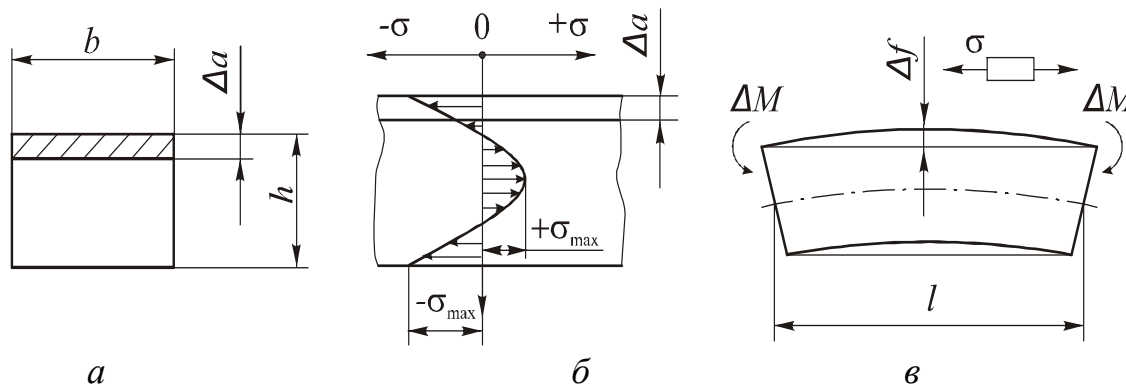
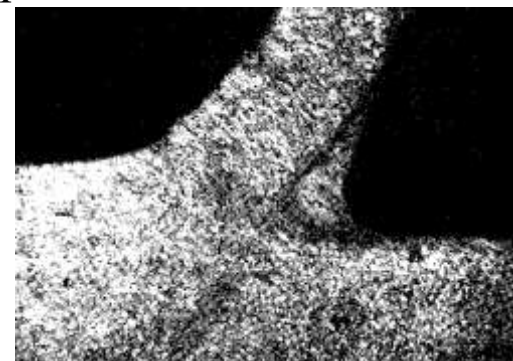
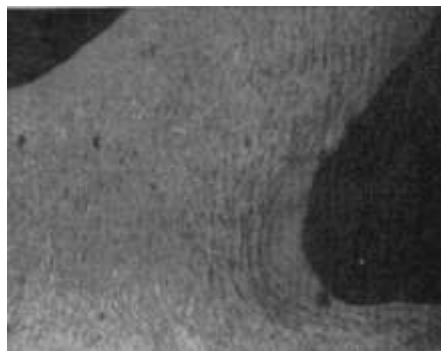


Рис. 1. Определение остаточных напряжений в заготовке механическим путём: а – удаление слоя металла толщиной Δa ; б – пример распределения остаточных напряжений в заготовке; в – изгиб пластины после удаление слоя металла толщиной Δa от перераспределения остаточных напряжений отпечатков при измерении микротвёрдости; г – изменение микротвёрдости по глубине.

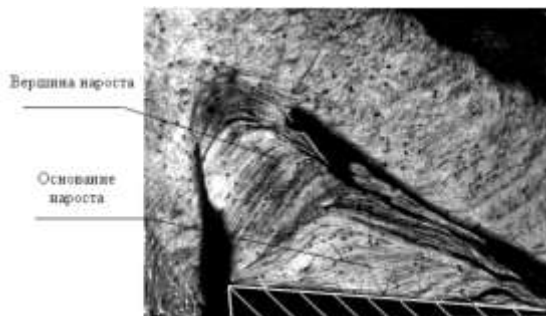
Наростообразование

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 (R_z , R_a)** 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.

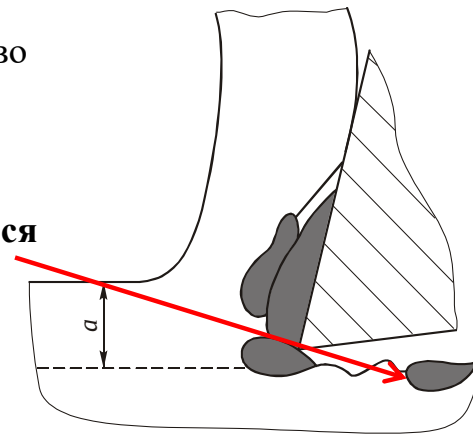
Ряд таких материалов, как медь и ее сплавы, титановые сплавы, высоколегированные стали с большим содержанием хрома и никеля, закаленные стали и белый чугун практически не образуют нарост. **Размеры нароста тем больше, чем пластичнее металл и чем меньше его прочность и твердость.**



64



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 $\Theta \approx 300^\circ\text{C}$** (в диапазоне скоростей резания $V_1 \dots V_2$) **высота нароста H достигает максимума**. При дальнейшем повышении скорости резания в диапазоне $V_2 \dots V_3$ нарост уменьшается из-за уменьшения его прочности и **совсем исчезает** при скорости резания, когда температура резания $\Theta \approx 600^\circ\text{C}$.

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**.

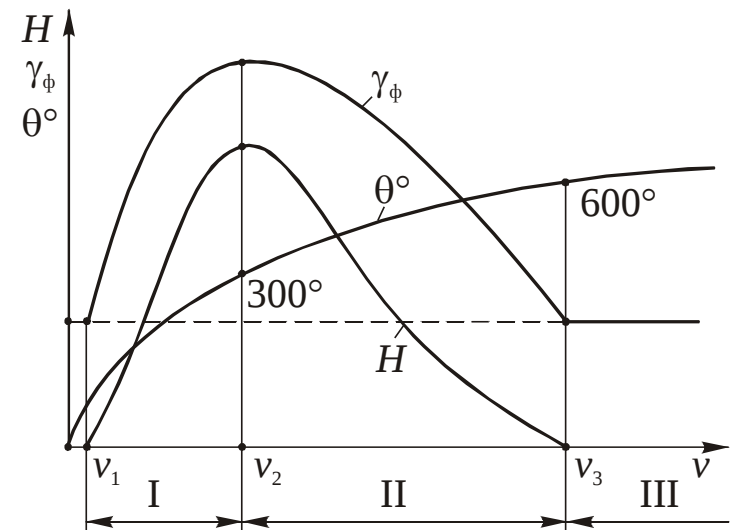


Схема влияния скорости резания v на температуру резания Θ , высоту нароста H и фактическое значение переднего угла γ_ϕ

Наростообразование (продолжение)

С ростом скорости резания в диапазоне $V_1 \dots V_2$ температура резания Θ растет, что вызывает увеличение высоты нароста H , а следовательно и фактического переднего угла $\gamma_{\text{ф}}$.

В диапазоне скоростей резания $V_2 \dots V_3$ с ростом температуры резания нарост становится менее прочным и его высота уменьшается до полного исчезновения при температуре резания $\Theta = 600^\circ\text{C}$ (происходит отпуск).

Изменение фактического переднего угла $\gamma_{\text{ф}}$ 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.

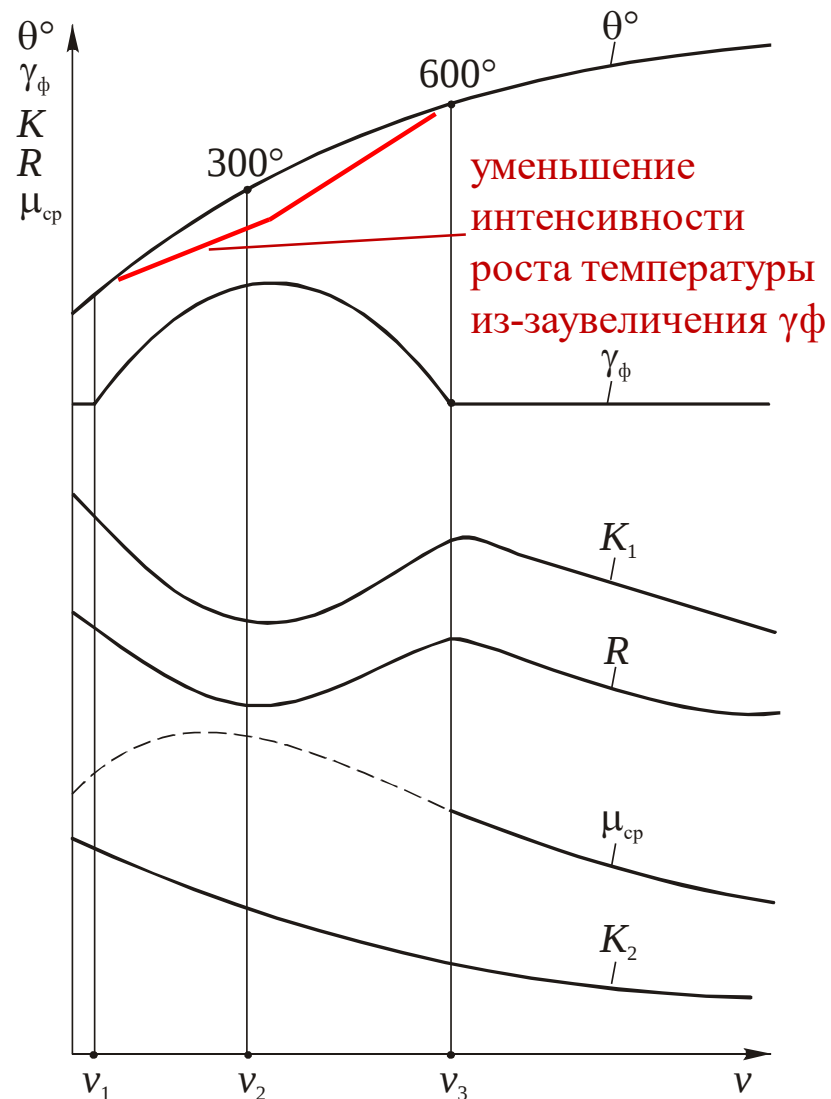


Схема взаимосвязи скорости резания v , температуры резания Θ , фактического переднего угла $\gamma_{\text{ф}}$, усадки стружки K , силы резания R и среднего коэффициента трения $\mu_{\text{ср}}$

Наростообразование (продолжение)

Резание в области отсутствия нароста, то есть на **повышенных скоростях** $V > V_3$ сопровождается уменьшением среднего коэффициента трения $\mu_{\text{ср}}$ 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 $\dot{\epsilon}$** 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** .

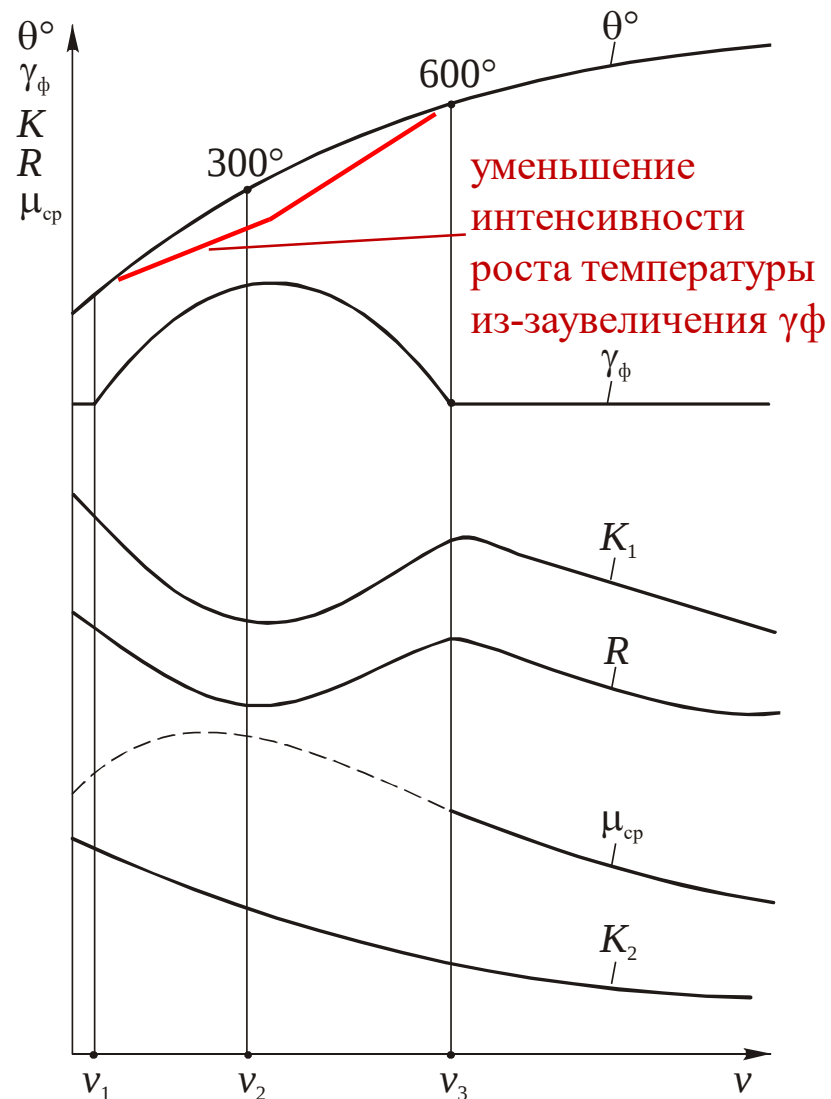


Схема взаимосвязи скорости резания v , температуры резания Θ , фактического переднего угла γ_ϕ , усадки стружки K , силы резания R и среднего коэффициента трения $\mu_{\text{ср}}$

Несвободное резание. *Расчёт составляющих силы резания*

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 $s = \text{const}$) в координатах $\lg P_z - \lg t$ представляет собой прямую линию.

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

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

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

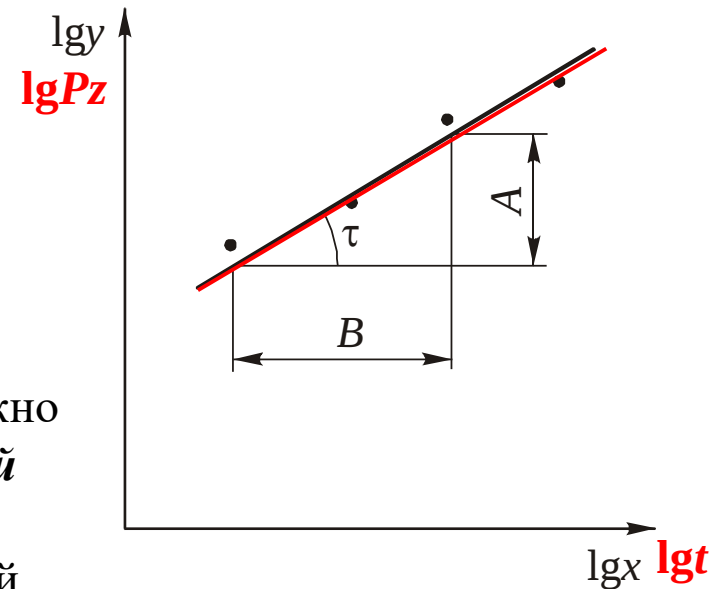


Схема для определения показателя степени k в уравнении $y = C_x \cdot x^k$.

$$k = \operatorname{tg} \tau = (A/B).$$

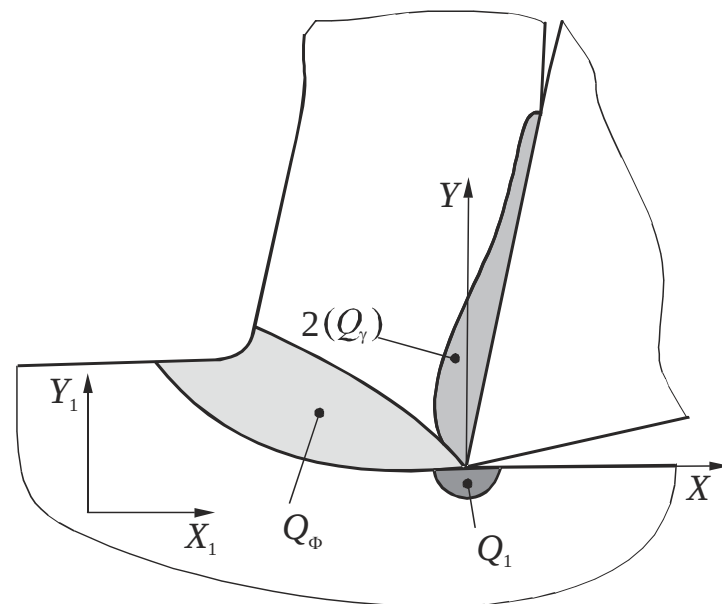
Отрезки A и B измеряются **линейкой** на графике $\lg y - \lg x$ ($\lg P_z - \lg t$)

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)

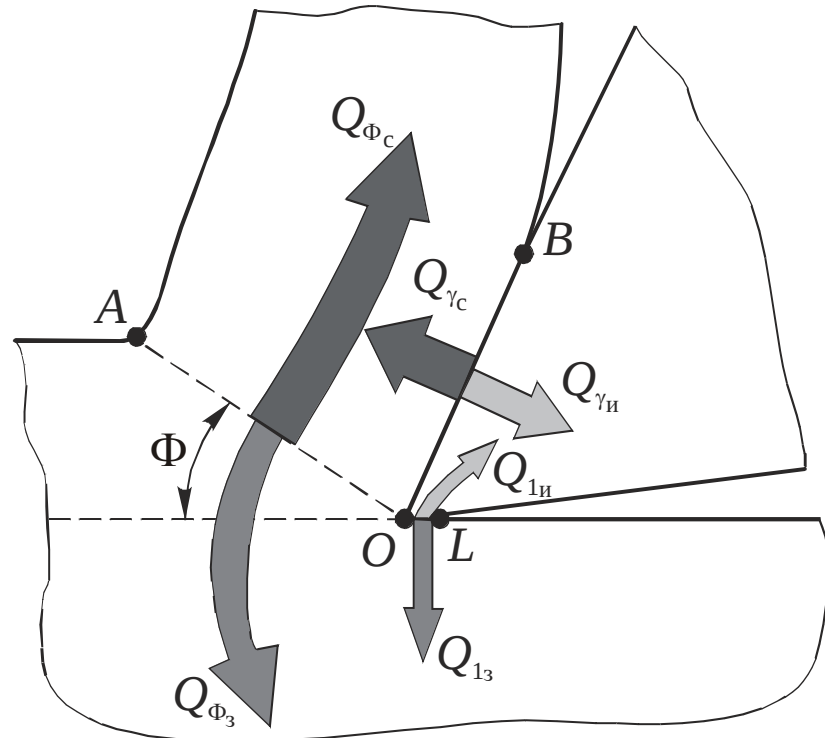
На основании изложенного **уравнение теплового баланса** имеет вид:

$$Q_{\Phi} + Q_{\gamma} + Q_1 = Q_3 + Q_c + Q_{\text{и}} + Q_{\text{ос}}$$

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 $A_{\text{тэ}}$.

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.

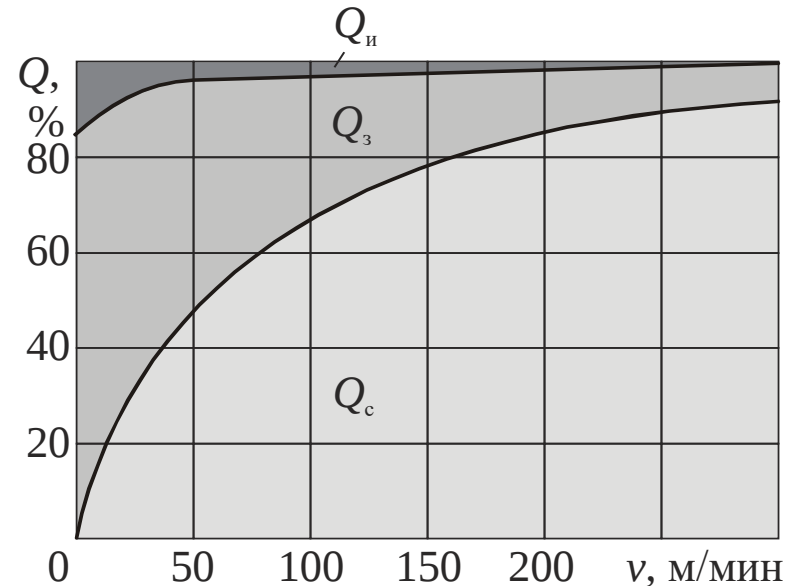


Потоки теплоты, отводимой в
стружку, заготовку и **инструмент**

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ (продолжение)

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_c , монотонно возрастает**, причем наиболее интенсивно это происходит при резании на низких скоростях. **Доля теплоты, поступающей в заготовку Q_z и инструмент $Q_{\text{и}}$, при увеличении скорости резания наоборот сокращается**. Например, при точении стали 40Х со скоростью резания $v=20\dots50$ 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%.

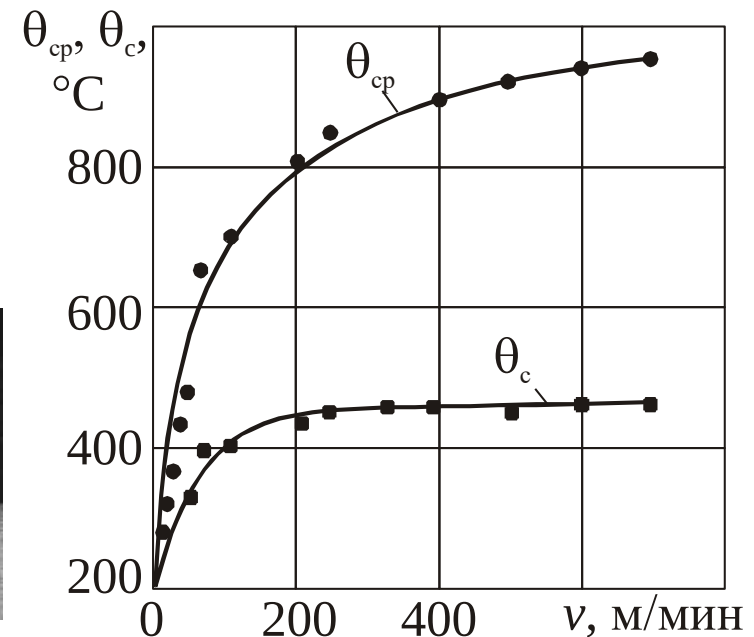
Такое влияние скорости резания на распределение теплоты объясняется тем, что с увеличением скорости резания все **большее количество теплоты остается в стружке** и все меньшее ее количество успевает перейти в заготовку и инструмент. К тому же с ростом скорости резания **снижается степень деформации** 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 ($T15K6$, $t=1,5$ мм, $s=0,12$ мм/об)

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 θ_{cp}** 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.



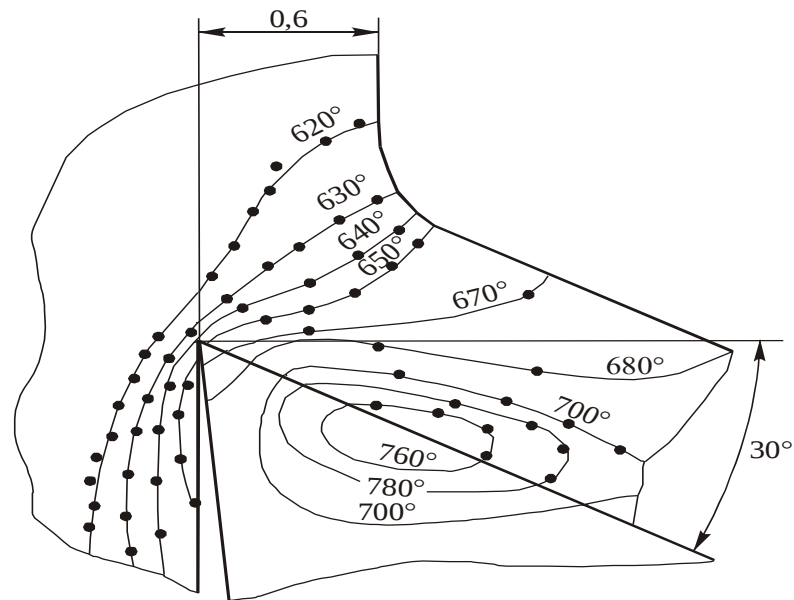
Влияние скорости резания на **среднюю температуру на передней поверхности θ_{cp}** и температуру **в стружке θ_c** при точении стали 40X (Т15К6, $t=1,5$ мм, $s=0,12$ мм/об)

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 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.



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.

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.

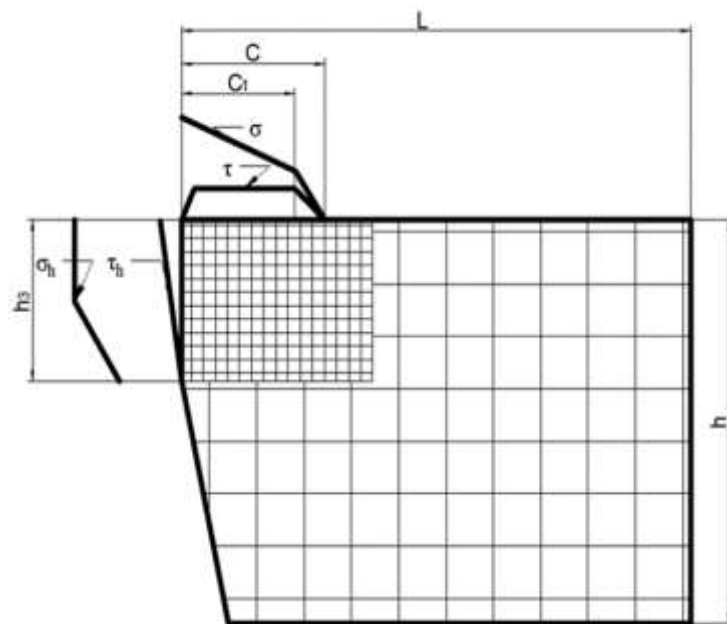
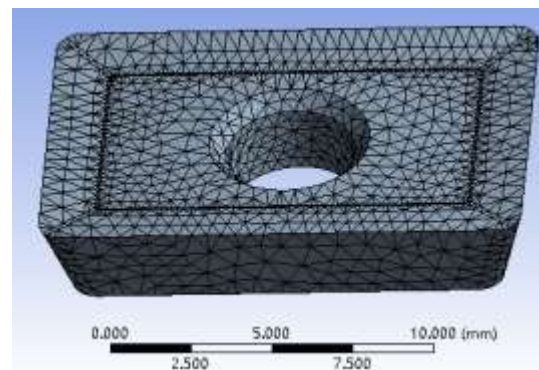
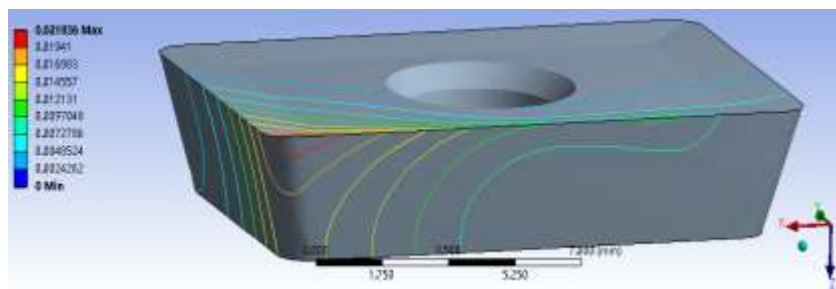
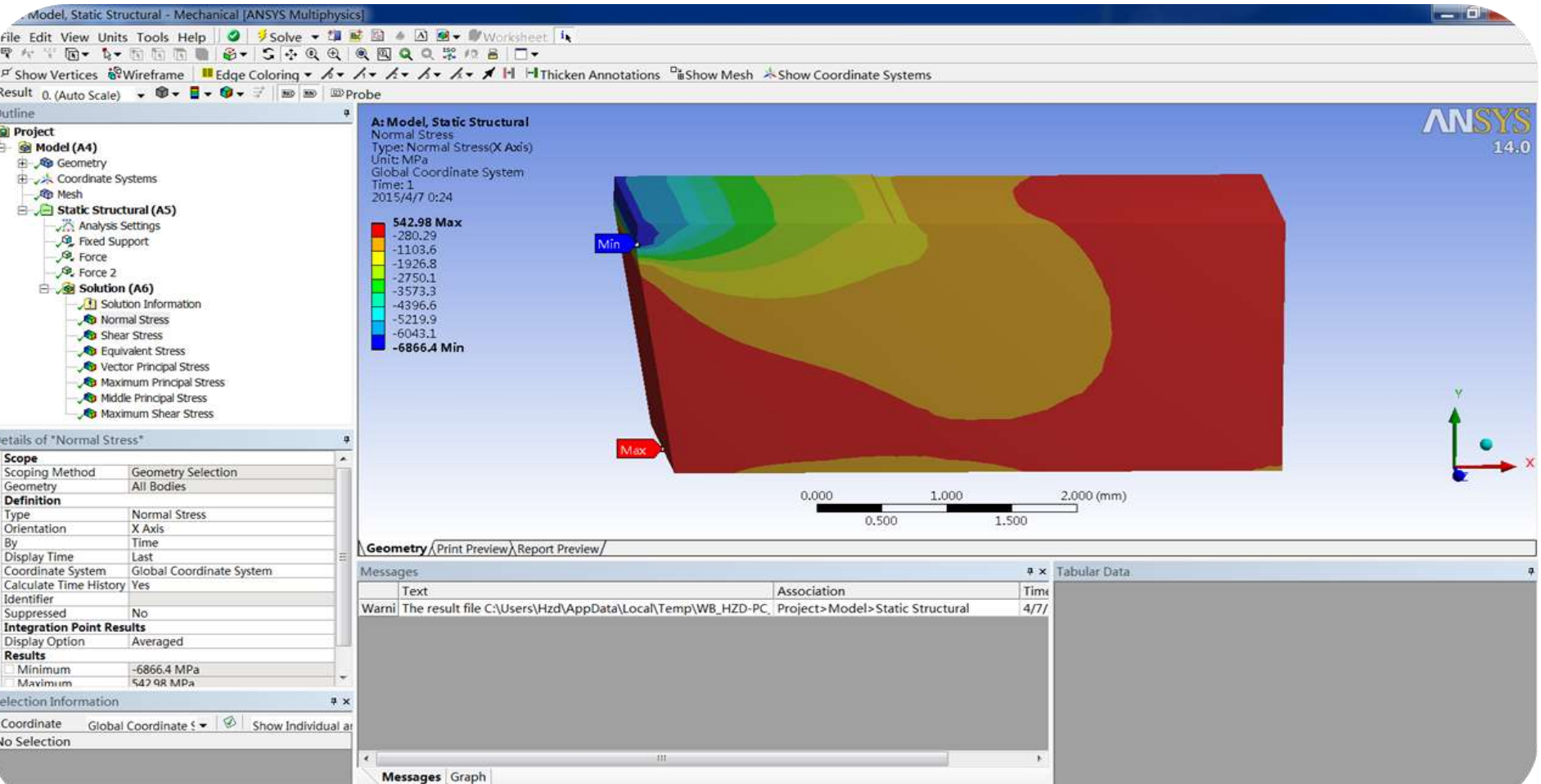


Рис.1. Разбивка тела резца на конечные элементы с приложением внешних распределённых нагрузок



Расчёт напряжённно-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:

$$\sigma_\eta = 0,24 \cdot \sigma_i + 0,76 \cdot \sigma_1 \cdot 0,8^{1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1}} \leq \sigma_{\hat{a}} \quad (1)$$

интенсивность напряжений в рассматриваемой точке:

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

Запас прочности инструментального материала:

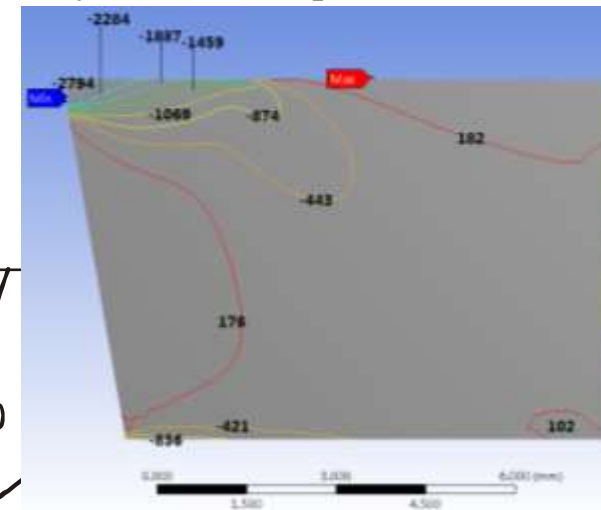
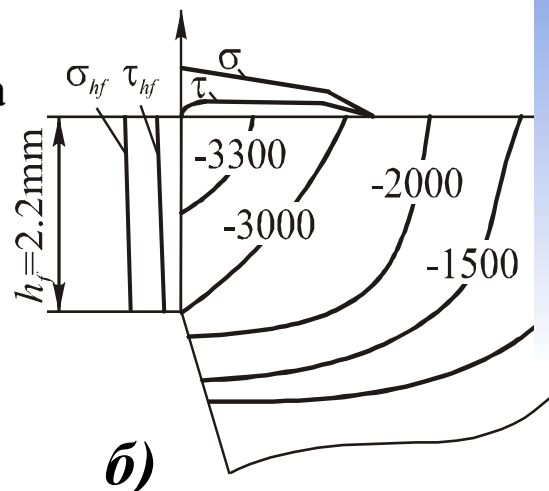
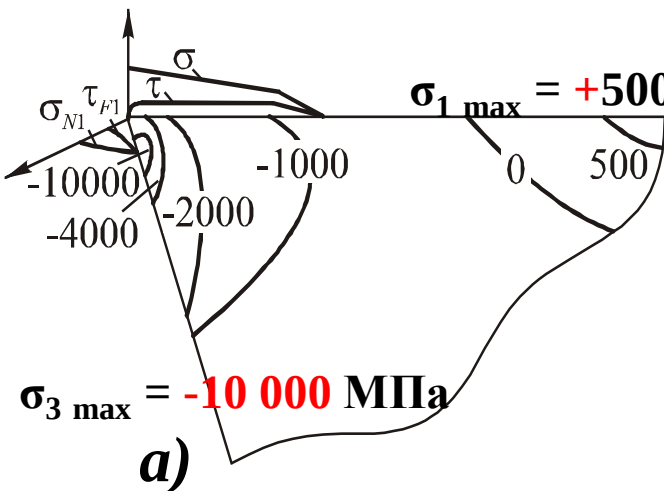
$$n = \sigma_{\sigma} / \sigma_\eta \quad (3)$$

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



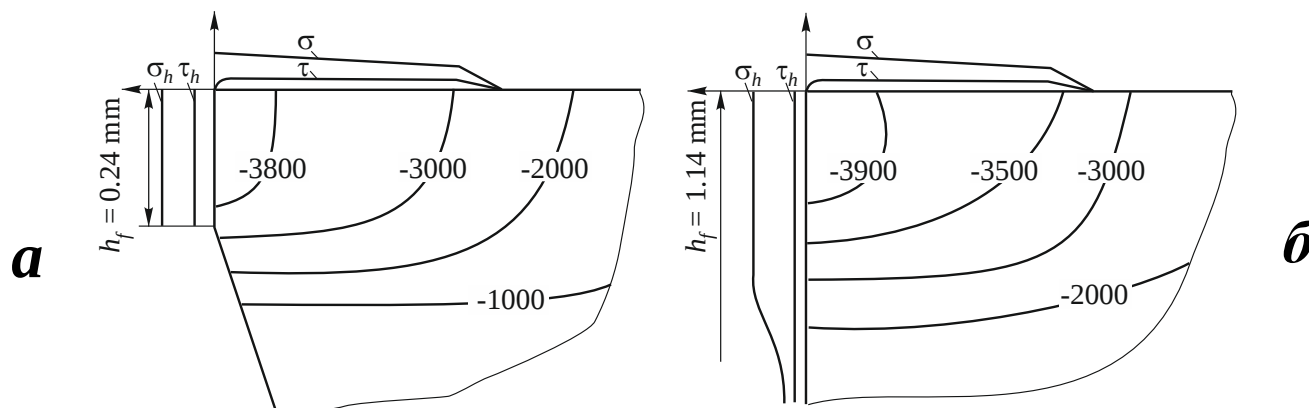
в) $h_f = 0,5$ мм

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

ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1$ м/с, подача $s(f) = 0.21$ мм/об $\rightarrow$ толщина среза $a = 0.21$ мм.

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

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 $\alpha=6...8^\circ$, а при чистовой обработке $\alpha=8...12^\circ$. Передний угол изменяется в более широких пределах от $\gamma=+35^\circ$ и до отрицательных значений ($\gamma=-10...-35^\circ$). 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**.



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

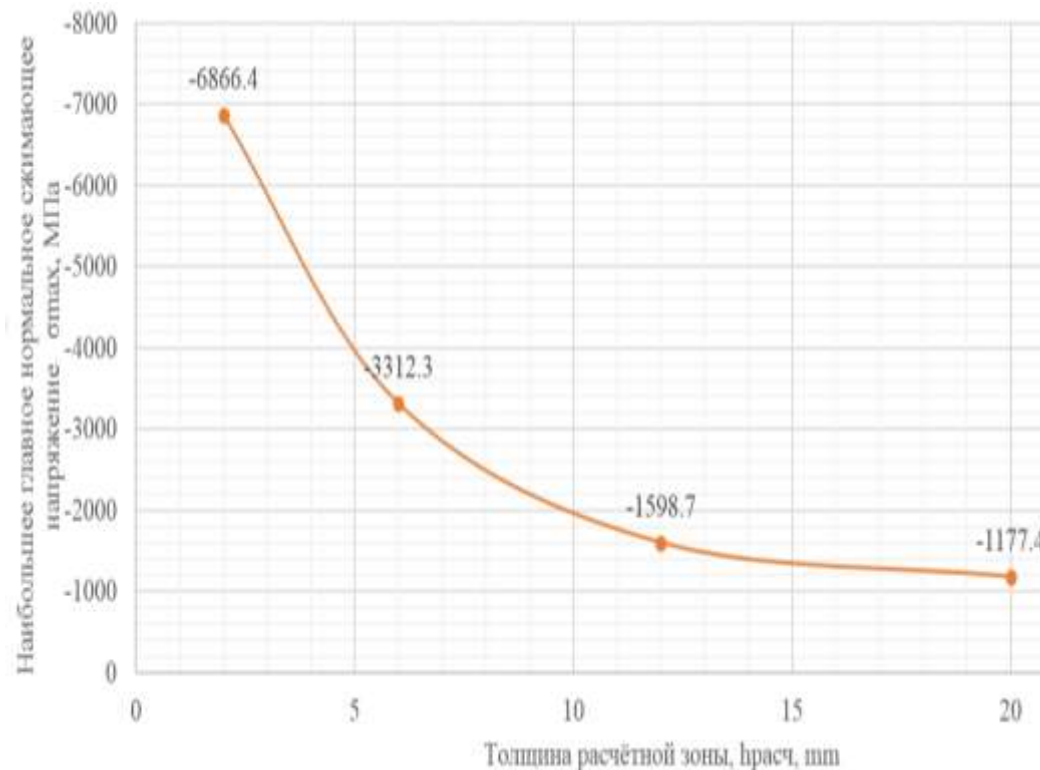
ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v=1$ м/с, подача s (f) = **0,41 мм/об** $\rightarrow a = 0,41$ мм.

a – $h_f = 0,24$ 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 $\gamma_f=0\dots-5^\circ$, а за ней - положительный передний угол. Для повышения прочности твердосплавных пластин их толщина должна быть больше толщины срезаемого слоя примерно в 10 раз ($h_{\text{пласт}}$ 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 ($E=54\cdot 10^{11}$ МПа) в 2 раза больше, чем у стали) и толщина режущей пластины от 6 до 12 мм (см. рисунок).



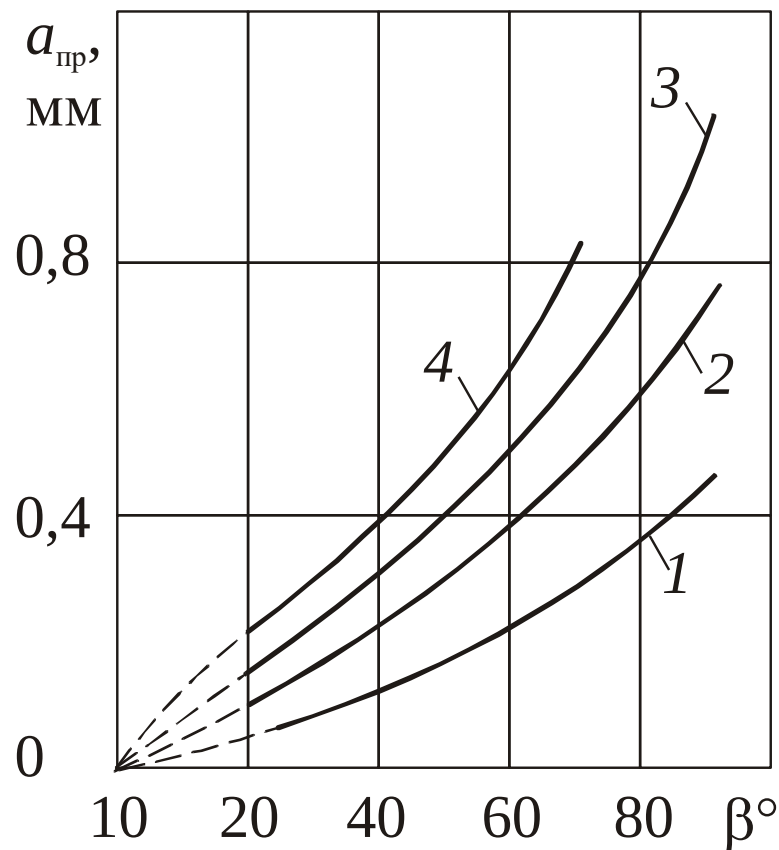
Влияние толщины режущей пластины $h_{\text{пластины}}$ (мм) на величину наибольшего сжимающего нормального напряжения в режущем клине $\sigma_{3 \max}$ (МПа). ВТЗ-1 – ВК8, $\gamma=0^\circ$, $v=1$ м\с, $s=0,21$ мм/об, $h_z=0,2$ мм [Чжан Ц., Хуан Ч., Козлов В.Н.]

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.

Износ режущего инструмента (продолжение)

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 $800...900^{\circ}\text{C}$, 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.**

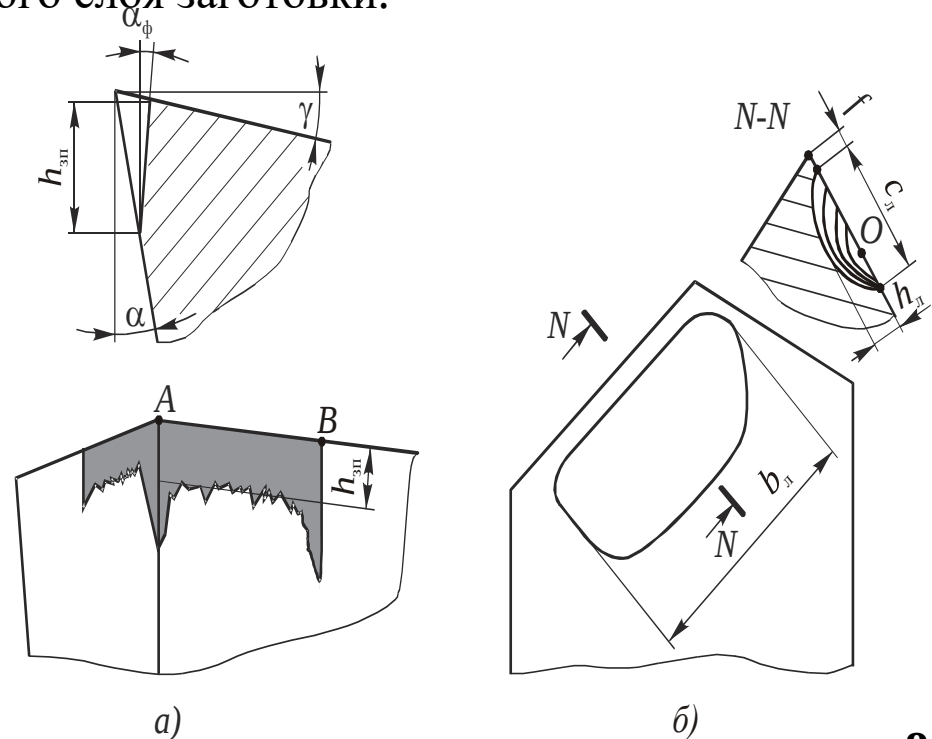
При обработке **чугунов** ($C > 2.14 \dots 4,3\%$) диффузия **углерода** из твердого сплава замедляется, **температура резания меньше**, чем при резании сталей; поэтому **однокарбидные** сплавы из-за повышенной **прочности** карбидов вольфрама **превосходят двухкарбидные** и по износостойкости. **Однокарбидные** 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°C** . 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 газов**: азота, аргона и гелия

Зоны износа режущего инструмента (продолжение)

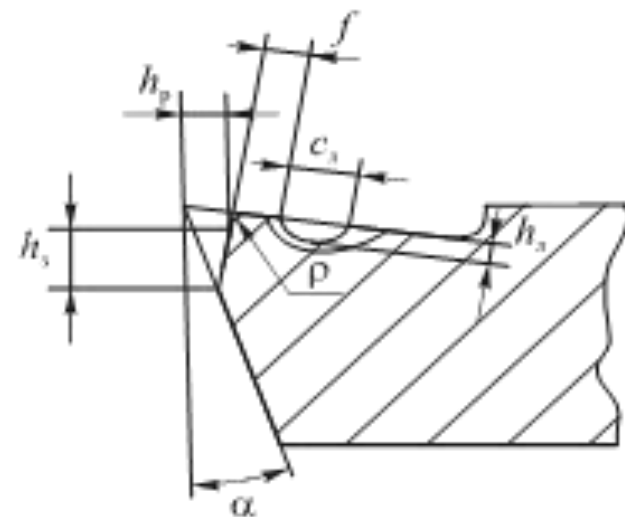
Независимо от типа и назначения режущие инструменты изнашиваются прежде всего по **задним поверхностям**. Наиболее интенсивно изнашиваются участки задних поверхностей, прилегающих к режущей кромке, где контактные напряжения особенно высоки. В результате этого образуется площадка (**фаска**) износа длиной $h_{зп}$ (h_f) с **нулевым** ($\alpha_{\phi}=0^\circ$) ($\alpha_h=0^\circ$), а в отдельных случаях и с небольшим **отрицательным** задним углом α_{ϕ} . 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 проточкины, 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.



Износ режущего инструмента (продолжение)

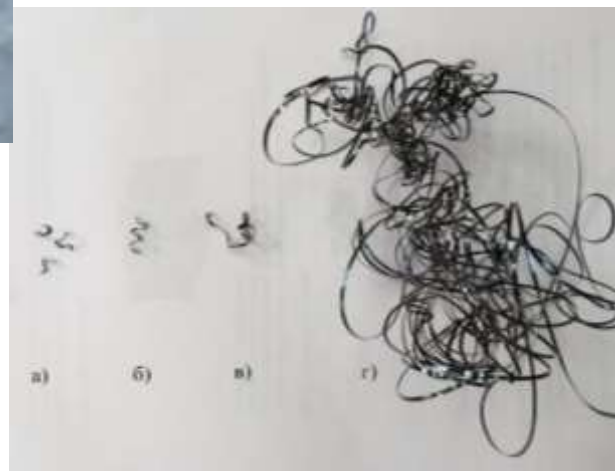
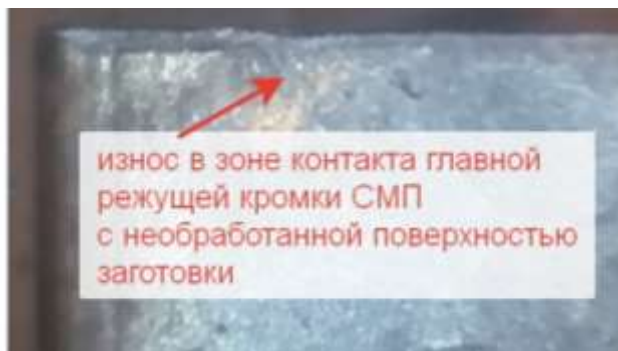
Из-за упрочненного поверхностного слоя заготовки происходит **локальный износ** в виде узкой проточки и **округление режущей кромки ρ**



износ в зоне
контакта с
необработанной
поверхностью



износ в зоне контакта главной
режущей кромки СМП
с необработанной поверхностью
заготовки



износ от закалённой
на воздухе стружки



рабочая вершина СМП

Изменение **формы** стружки **после локального износа** в зоне контакта главной режущей кромки с необработанной поверхностью заготовки (**наматывание стружки** вокруг державки резца и заготовки - рис. б)



*а) Процесс
стружкообразования.*

$h_z = 0,08 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$;
 $s = 0,13 \text{ мм/об}$; $t = 1 \text{ мм}$



*б) Процесс стружкообразования
после локального износа.*

$h_z = 0,14 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$;
 $s = 0,13 \text{ мм/об}$; $t = 1 \text{ мм}$

СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

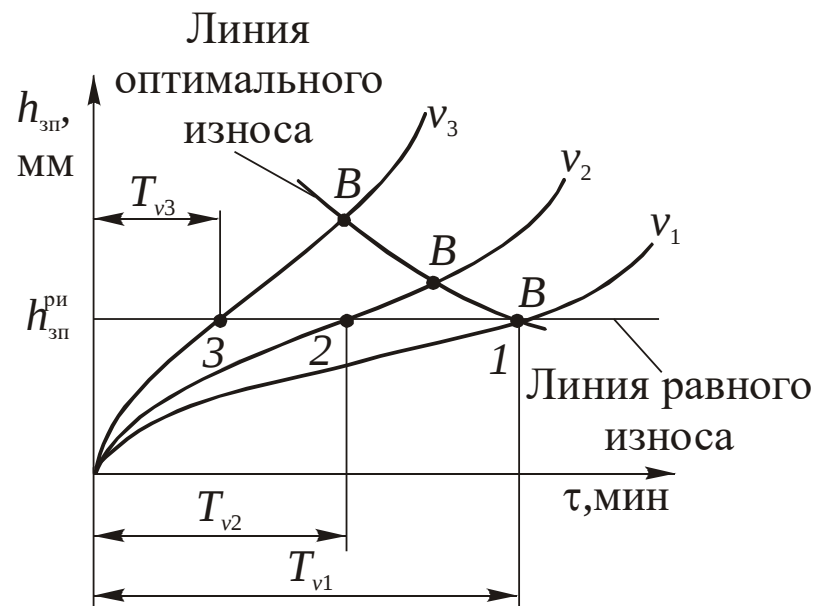
Продолжительность резания новым или переточенным инструментом до его отказа, то есть до достижения предельно допустимого износа, называется **периодом стойкости** или **стойкостью** инструмента (T).

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)..

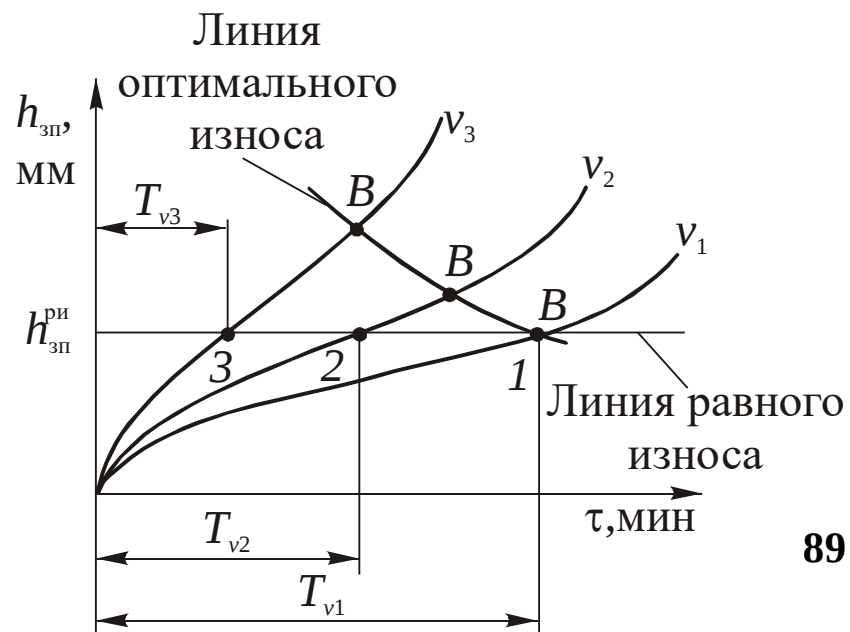
При чистовой обработке **радиальная составляющая** сила резания P_y становится достаточно большой, и происходит упругая деформация системы СПИД, приводящая к уменьшению точности обработки, поэтому $h_{зп}$ доп меньше (0,25 мм).



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** $h_{зп} = 0,8 \dots 1,0$ мм, а при обработке чугуна с подачей $s \leq 0,3$ мм/об – $h_{зп} = 1,4 \dots 1,7$ мм и с подачей $s > 0,3$ мм/об – $h_{зп} = 0,8 \dots 1,0$ мм.



СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (продолжение)

Зависимость **длины фаски износа по задней поверхности h_3** (мм) **от времени резания τ** (мин) при обработке стали 40X - WNMG080404-ТМ **с покрытием TiN**.
 $s = 0,13$ мм/об; $t = 1$ мм; 1 – $v = 180$ м/мин; 2 – $v = 360$ м/мин

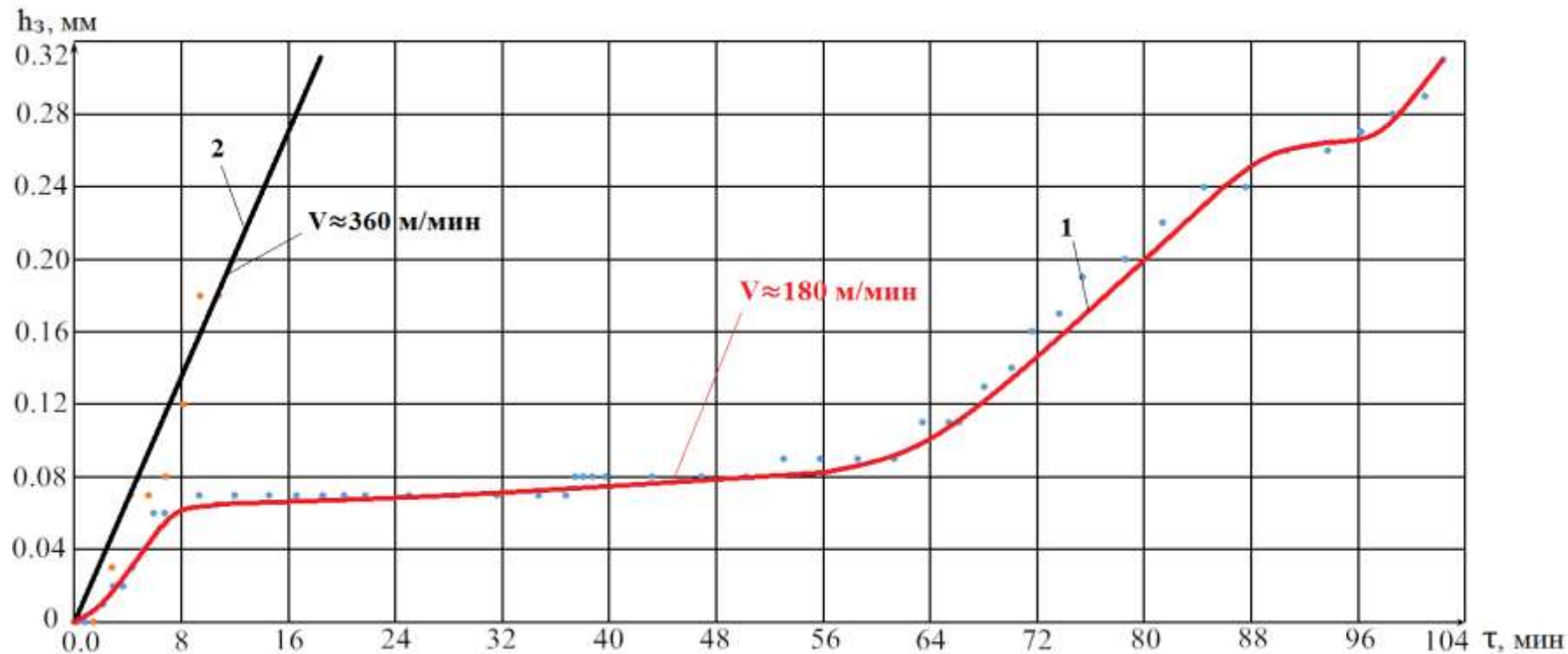
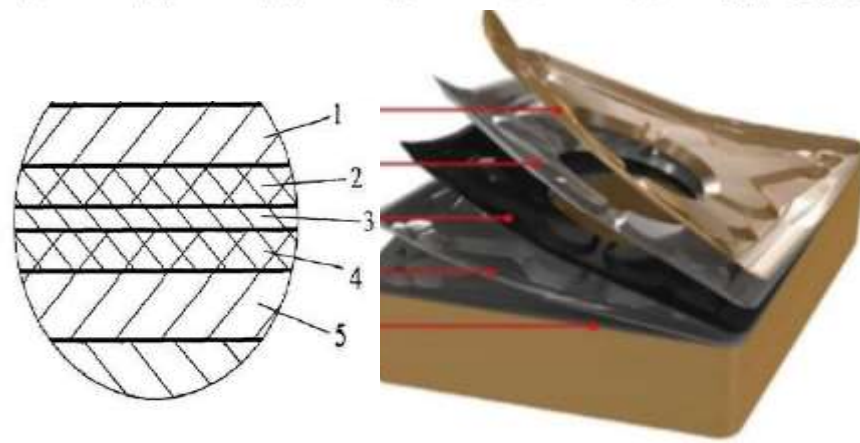


Схема многослойного покрытия на режущей пластине: 1 – износостойкий слой; 2 – верхний промежуточный слой; 3 – барьерный слой; 4 – нижний промежуточный слой; 5 – подложка

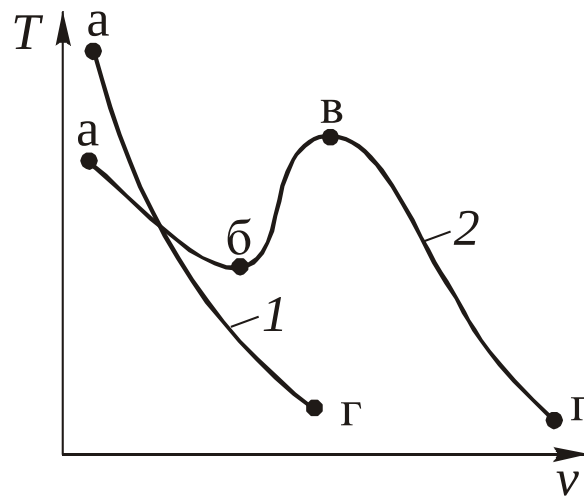


СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (продолжение)

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.



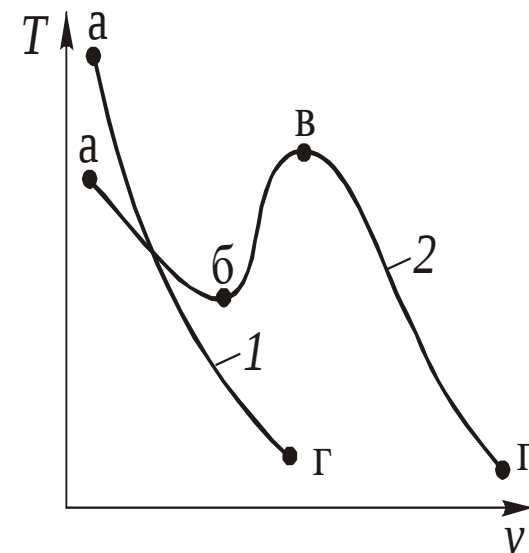
СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (продолжение)

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 ($m=0,1\dots0,75$). 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 ($\lg v = \lg a + m \cdot \lg T = \text{const} + m \cdot \lg T$)**. 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**.



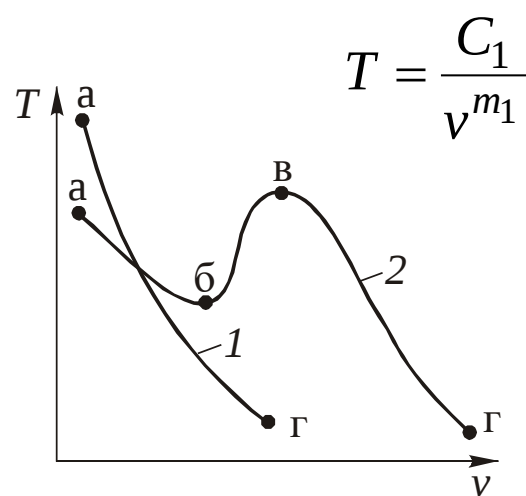
СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (продолжение)

Падение стойкости на участке а-б объясняется влиянием адгезионного износа, который при изменении скорости резания в пределах $v_a \dots v_b$ 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 $800 \dots 900^\circ\text{C}$, в пределах $v_b \dots v_r$ превалирует диффузионный износ. Применение твердосплавных инструментов на скоростях **менее v_b** нецелесообразно.

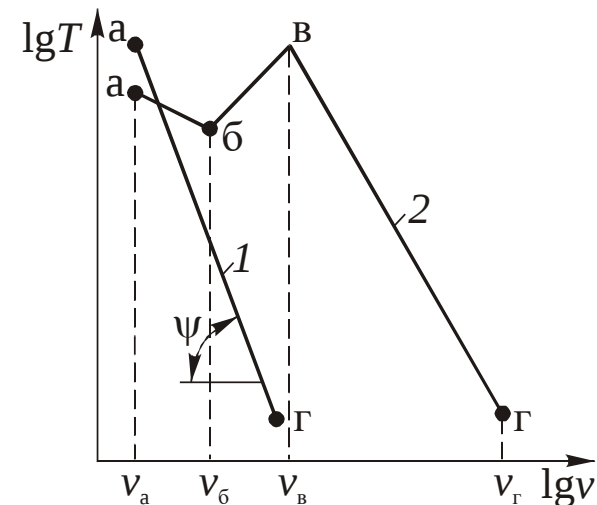
Влияние подачи s и глубины резания t на стойкость инструментов T определяют по той же методике, что и влияние скорости резания. На основании трех частных зависимостей находят общую зависимость

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

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



а)



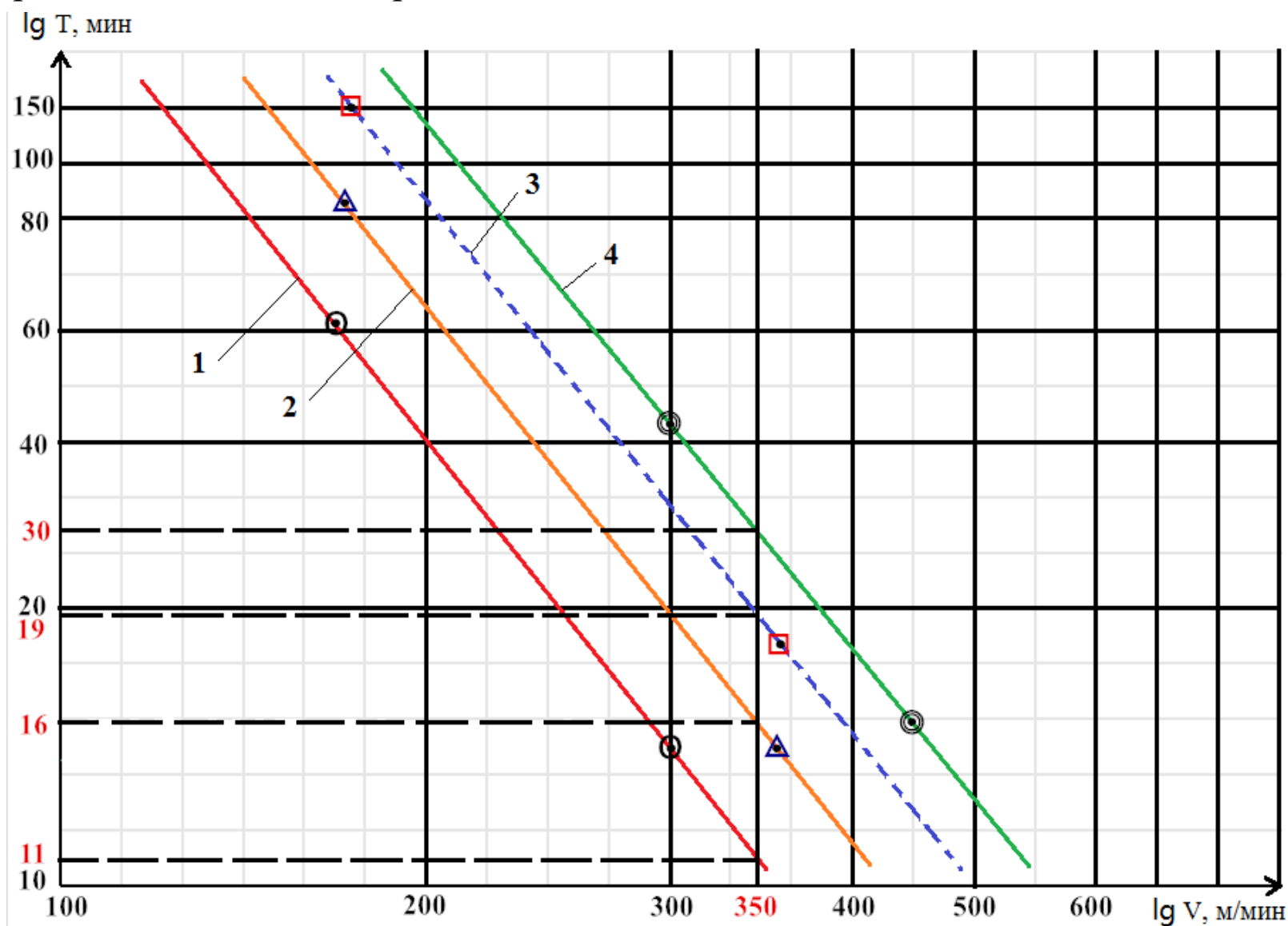
б)

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

СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (продолжение)

Зависимость стойкости T (мин) СМП с износостойкими покрытиями от скорости резания V (м/мин) при обработке стали 40Х и $h_3=0,2$ мм: **1**- без покрытия, **2**- с покрытием TiN, **3**- с покрытием AlTiN, **4**- с покрытием TiCN.

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



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 $m=1/m_1$, $x_v=q/m_1$, $y_v=p/m_1$, $C_v=C_4^{1/m_1}$ 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, $\sigma_B=735$ МПа	T15K6	1...5	0,3...0,7	350	0,2	0,15	0,35
	P6M5	--	--	22,7	0,3	--	0,5
Серый чугун, HB 186	BK6	1...5	0,4	317	0,2	0,15	0,20

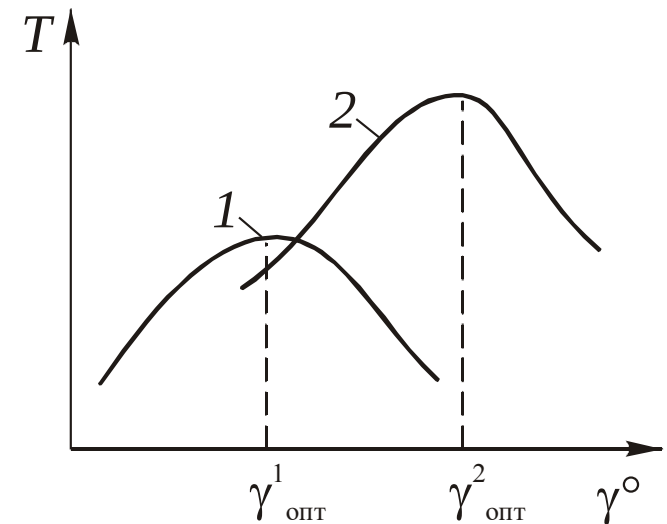
СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (продолжение)

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 $\gamma_{\text{опт}}=18^\circ$, а чугуна - $\gamma_{\text{опт}}=0...5^\circ$. Для **твёрдых сплавов** $\gamma_{\text{опт}}=+10...-10^\circ$, для минералокерамики, эльбора и алмазы $\gamma_{\text{опт}}=0...-15^\circ$.



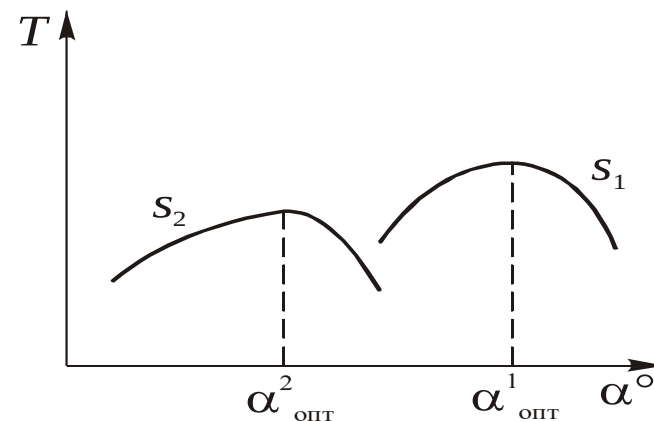
1 - твердый материал;
2 – мягкий материал

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 $\gamma_{\phi}=0\dots-5^{\circ}$ и положительным передним углом γ за этой фаской. Длина (ширина) фаски зависит от толщины среза a и в среднем $f = (1\dots2) \cdot a$, 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 γ_{ϕ} .

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 $\alpha_{\text{опт}}$** . При снижении прочности обрабатываемого материала и повышении прочности и износостойкости инструментального материала угол $\alpha_{\text{опт}}$ увеличивают.



СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (продолжение)

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

Главный угол в плане φ определяет отношение b/a ширины срезаемого слоя к его толщине, которое с увеличением угла непрерывно уменьшается, достигая минимума при $\varphi=90^\circ$. **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 $\varphi=45...60^\circ$, а на операциях, связанных с подрезкой торцев ступенчатых деталей, угол $\varphi=90^\circ$.

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 $\lambda=0...5^\circ$; при точении и строгании с ударами $\lambda=10...15^\circ$; при точении с ударами закаленных сталей $\lambda=30...45^\circ$.

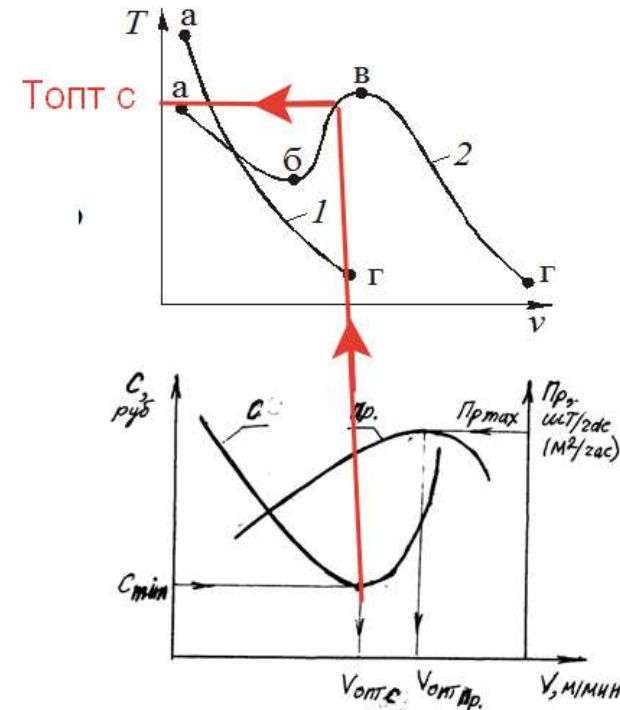
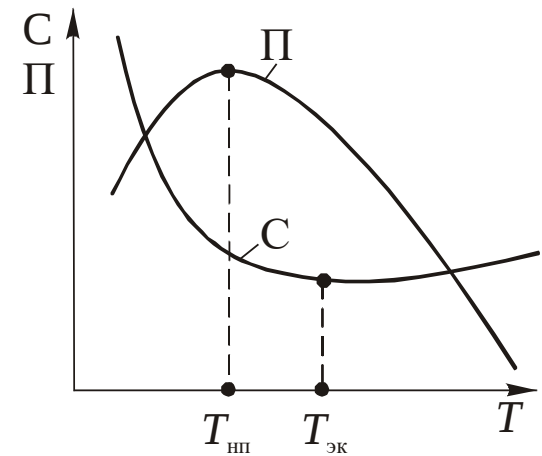
При кинематическом косоугольном резании **круглыми самовращающимися резцами** благодаря значительному **снижению сил трения** и постоянному **обновлению режущей кромки** температура резания и интенсивность износа с **ростом кинематического угла λ_k** снижаются до такого уровня, что позволяет вести обработку 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**.

Расчет 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.

$$v = \frac{C_v}{T^{m_t} s^{y_v}}$$

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



Обрабатываемость

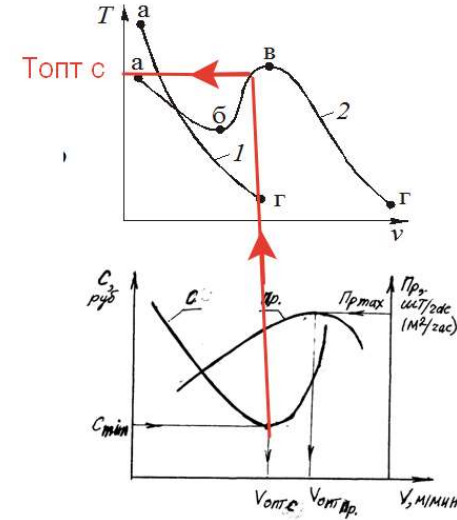
Обрабатываемость материалов резанием - это способность материалов поддаваться обработке резанием или иначе - комплекс свойств материалов, обеспечивающих при их обработке резанием достижение следующих технологических показателей: 1) скорость резания при заданной стойкости (например, скорость резания при 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.

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, $K_{об} = \frac{v_{60}^A}{v_{60}^B}$ где v_{60}^A - скорость резания при $v=60$ мин, характеризующая обрабатываемость **исследуемого** материала **А**; v_{60}^B - скорость резания при $v=60$ мин, характеризующая обрабатываемость **эталонного** материала **Б**.

За эталон обычно принимают сталь 45 ($\sigma_B=650$ МПа, HB 180) и поэтому для нее коэффициент обрабатываемости $K_{об}=1$. При полуставном 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.

$$v = \frac{C_v}{T^{m_t} t^{x_v} S^{y_v}}$$



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 ($C=0,35\ldots 0,55\%$) коэффициент обрабатываемости колеблется в пределах $K_{об}=0,7\ldots 1,0$. Введение в эти стали в небольшом количестве ($1\ldots 2\%$) 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 $C>0,4\%$ - хуже**.

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

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.

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 ($\sigma_{\text{в}} < 600 \text{ Н/мм}^2$); 2) средней прочности ($\sigma_{\text{в}} = 600 \text{ Н/мм}^2$); 3) высокой прочности ($\sigma_{\text{в}} = 1000 \dots 1500 \text{ Н/мм}^2$); 4) жаропрочные ($\sigma_{\text{в}} = 450 \dots 1250 \text{ Н/мм}^2$). 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).

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).

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, промышленного, объемом до 70...85%. Эмульгаторы предотвращают слипание капель масла и играют роль смазочных веществ и ингибиторов (замедлителей) коррозии.

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.

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).

Для уменьшения номенклатуры масел иногда применяют **многофункциональные СОТС**, которые представляют собой масла, используемые 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 защите 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.

При обработке труднообрабатываемых материалов, например, при сверлении хромоникелевой стали 18Х2Н4ВА (HRC 36-40), могут быть использованы **суспензии** – это взвеси мелкодисперсного порошка (5...15%) в водоземulsionной, 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.

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

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

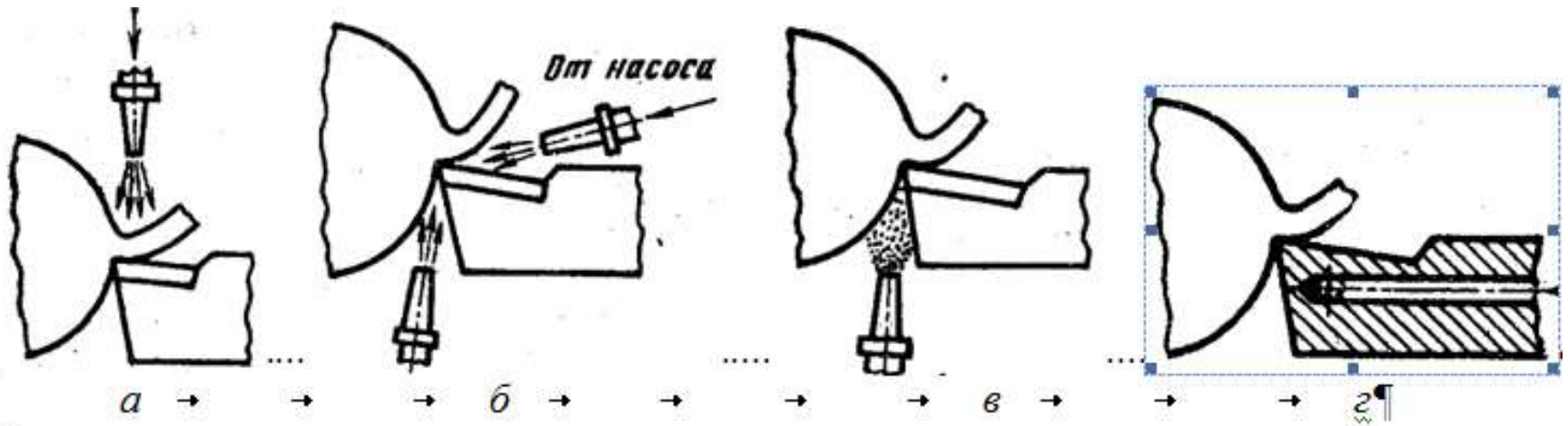


Рис. 1. Способы подвода СОТС в зону резания: *а* - полив свободной струей; *б* - струйное охлаждение; *в* - охлаждение распыленной жидкостью; *г* - внутреннее охлаждение резца.

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°C , эмульсии – на 200°C , а масляной СОЖ – на 100°C (рис. 2). За зоной наростообразования (> 60 м/мин) это влияние менее заметно (снижение температуры находится в пределах $50...100^{\circ}\text{C}$). Если СОЖ подается поливом, то даже такая сильная охлаждающая среда, как вода, снижает температуру очень слабо, примерно на $50...80^{\circ}\text{C}$.

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

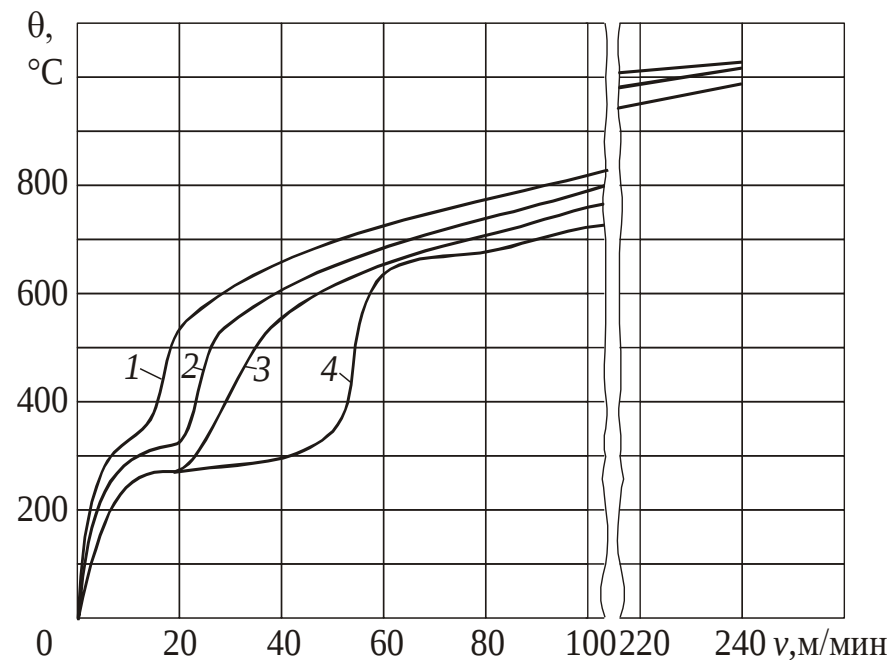


Рис.2. Влияние напорного охлаждения на **температуру резания θ** при точении стали 30 ($s=0,43$ мм/об, $t=2$ мм, $r=0,3$ мм, $\gamma=0^{\circ}$, $\phi=70^{\circ}$): **1 – без СОЖ**; 2 – масляная СОЖ типа МР-7; 3 – эмульсия (5% раствор эмульсола ЭТ-2); **4 – вода** (Б.М. Орлов)

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 ($\varphi, \gamma, r, \lambda, \varphi_1, \alpha$).
- 3) Расчёт и назначение глубины резания $t = (d_1 - d_2)/2 \leq 4 \text{ мм}$ ($t \leq 2 \text{ мм}$ при $d_2 \leq 20 \text{ мм}$).
- 4) Число проходов $i = 2z_{\max}/t$ (округляется до ближайшего большего числа);
- 5) Выбор подачи по таблицам $s_{\text{табл}}$ (мм/об) исходя из:
 - а) диаметра заготовки и сечения державки резца;
 - б) толщины режущей пластины $h_{\text{пл}}$ 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 $s_{\text{пасп}} \leq s_{\text{табл}}$ (мм/об).

7) Расчёт скорости резания $v_{\text{расч}}$ (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 простой 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)

$$K_V = K_{Mv} \times K_{Iv} \times K_{Iv} \times K_{\phi v} \times K_{\phi 1v} \times K_{Rv} \times K_{Qv} \times K_{Ov}$$

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

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

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

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

$K_{\phi 1v} = 1$ - коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (вспомогательный угол в плане $\phi_1 = 10^\circ$) [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.

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

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

116

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

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

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.

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

где K_{Mr} - коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала (прочности) на силу резания. Для стали 45 предел прочности на растяжение $\sigma_{\sigma} = 750 \text{ МПа}$, поэтому $K_{Mr} = 1$ [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

- $P_z = 10 \times 300 \times 1,95^1 \times 0,5^{0,75} \times 178^{-0,15} \times 1,0 = 3478$ 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_{op}	K_{yp}	$K_{\lambda p}$	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:
$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} \quad [\text{кВт}]$$

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: $N_o = \frac{3478 \cdot 164,8}{1020 \cdot 60} = 9,3$ кВт

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

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

В примере: $N_{ct} = N_o \cdot K = 9,3 \times 1,3 = 12,09$ 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.

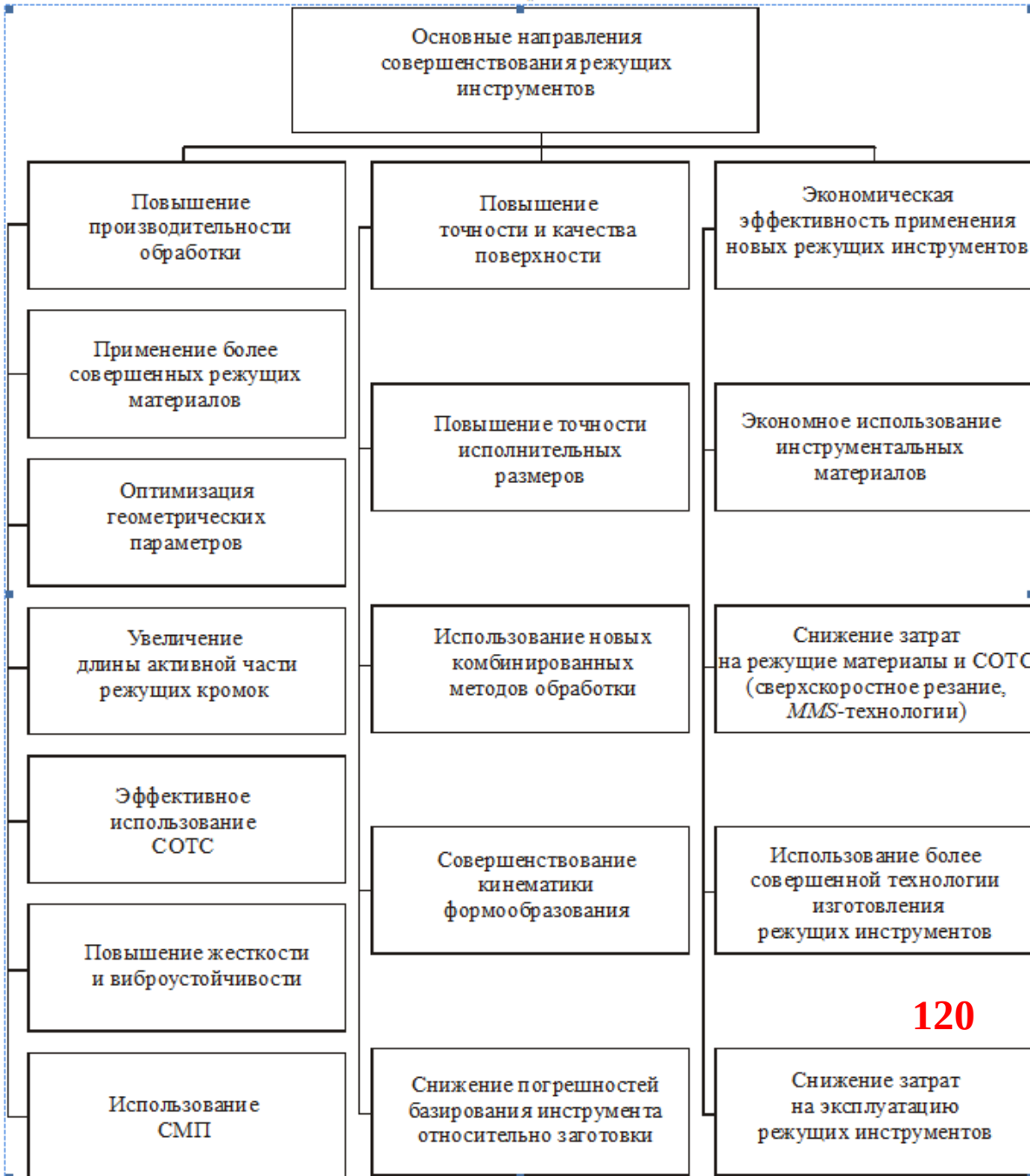
Совершенствование инструментов и способов обработки

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.).



Раздел 2. Токарная обработка. Резцы и мерные режущие инструменты

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.

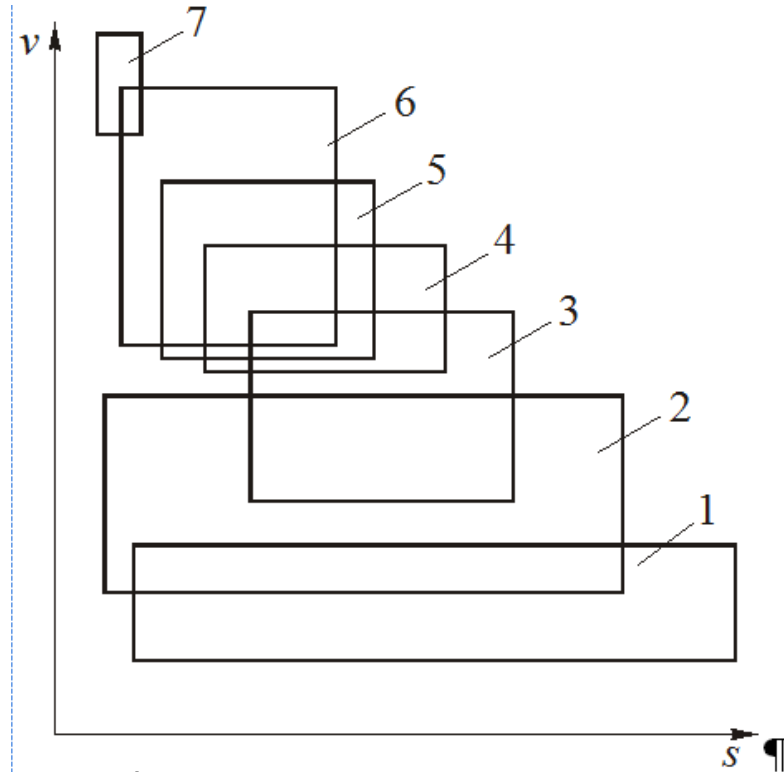


Рис. 1. Области применения режущих материалов по скорости резания v и подаче s :
1 – быстрорежущие стали; 2 – твердые сплавы; 3 – твердые сплавы с покрытиями;
4 – нитридная керамика; 5 – черная керамика (керметы); 6 – оксидная (белая) керамика;
7 – кубический нитрид бора

Рис. 1. Типы резцов:

а – подрезной (проходной отогнутый правый);

б – подрезной (проходной упорный правый);

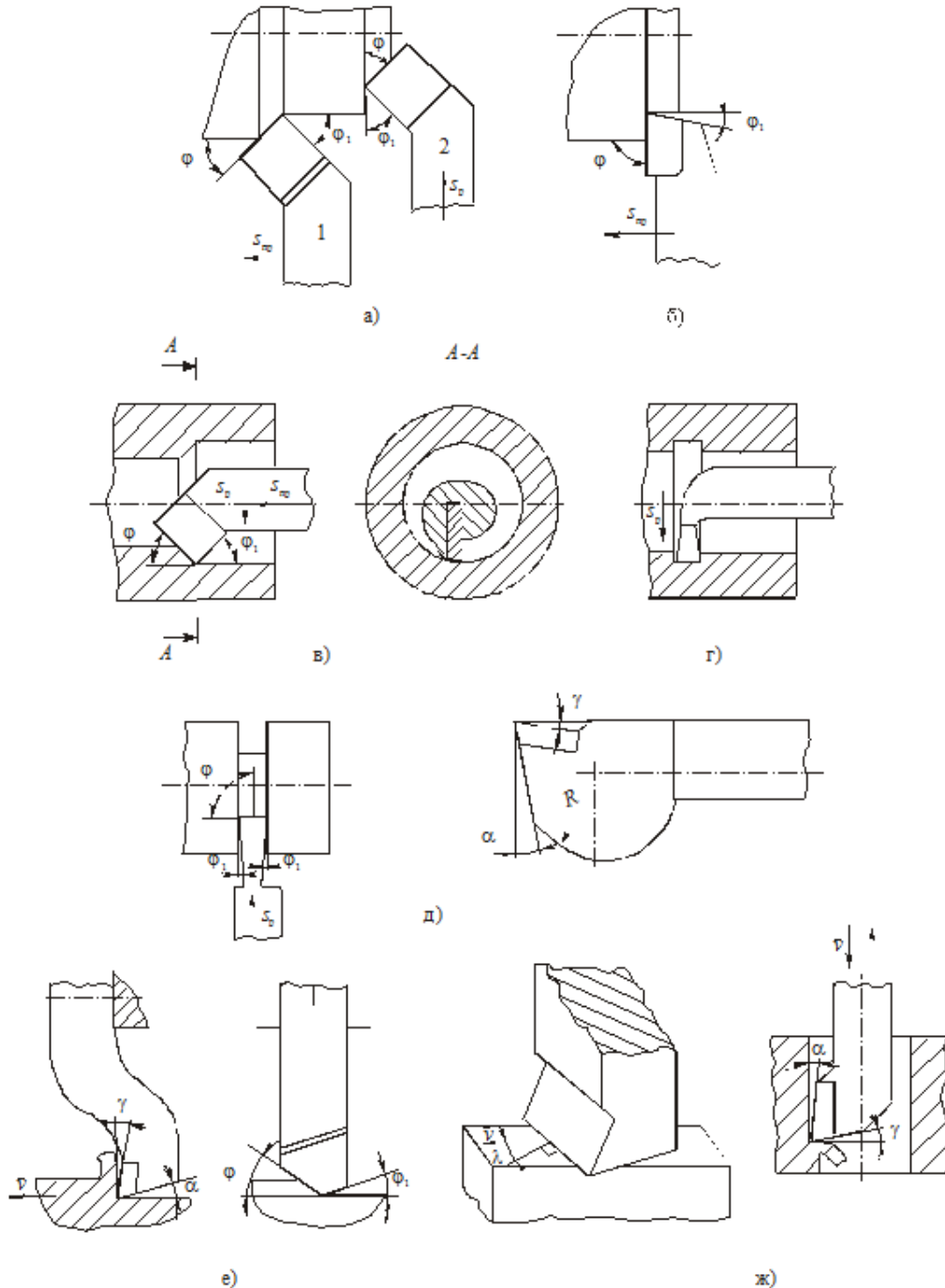
в – расточной для сквозных отверстий;

г – расточной канавочный;

д – отрезной;

е – строгальный;

ж – долбежный.



Сменные многогранные пластины (СМП)

Инструменты, **оснащенные СМП**, по сравнению с напайными имеют следующие **достоинства**:

- 1) более высокая прочность, **надежность** и **стойкость** (при работе **без ударов**);
- 2) меньше **расходы на смену** и утилизацию пластин;
- 3) **меньше простой 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**;
- 6) **мало места занимают СМП** на складе.

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;
- 4) сложность переточки из-за высокой стоимости державки и удаления покрытия;
- 5) используется лишь малая часть пластины, даже при наибольшем допустимом износе **сотые доли процента от веса СМП**.

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

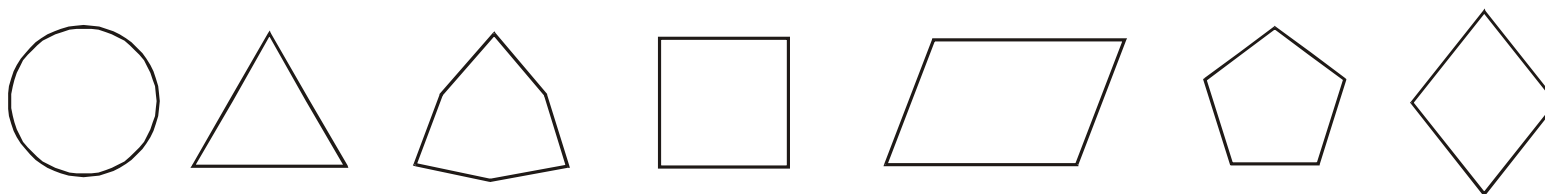
Токарная обработка. Резцы, СМП (продолжение)

СМП по геометрическим параметрам делятся на:

- а) **негативные** ($\gamma=0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) (рис. 2 б *слева*);
- б) **позитивные** ($\gamma=0^\circ$, $\alpha > 0^\circ$) (рис. 2 б *в центре*);
- в) **негативно-позитивные** ($\gamma>0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) (рис. 2 б *справа*).

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.



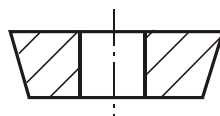
а)

негативные



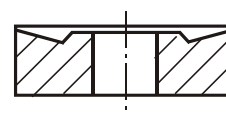
$$\gamma=0^\circ$$
$$\alpha=0^\circ$$

позитивные



$$\gamma=0^\circ$$
$$\alpha>0^\circ$$

негативно-позитивные



$$\gamma>0^\circ$$
$$\alpha=0^\circ$$

б)

Рис. 2. Твердосплавные **сменные многогранные пластины (СМП)**, [также Многогранные Неперетачивые Пластины (МНП)] : 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.

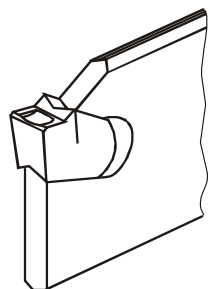
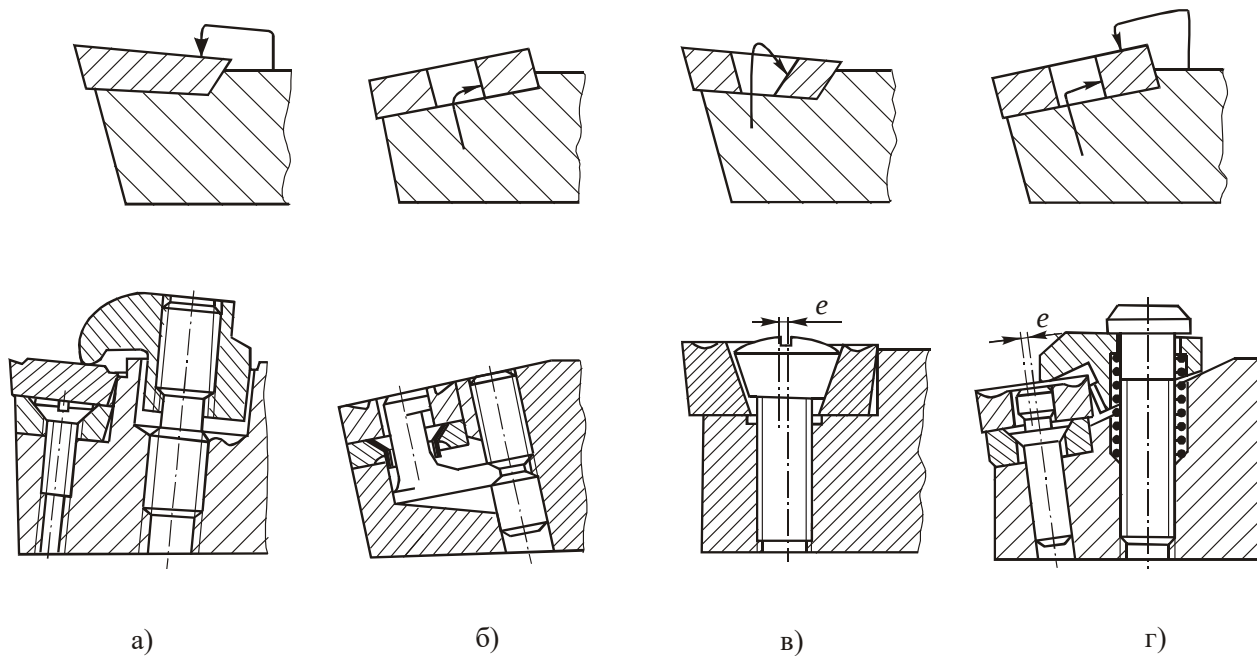
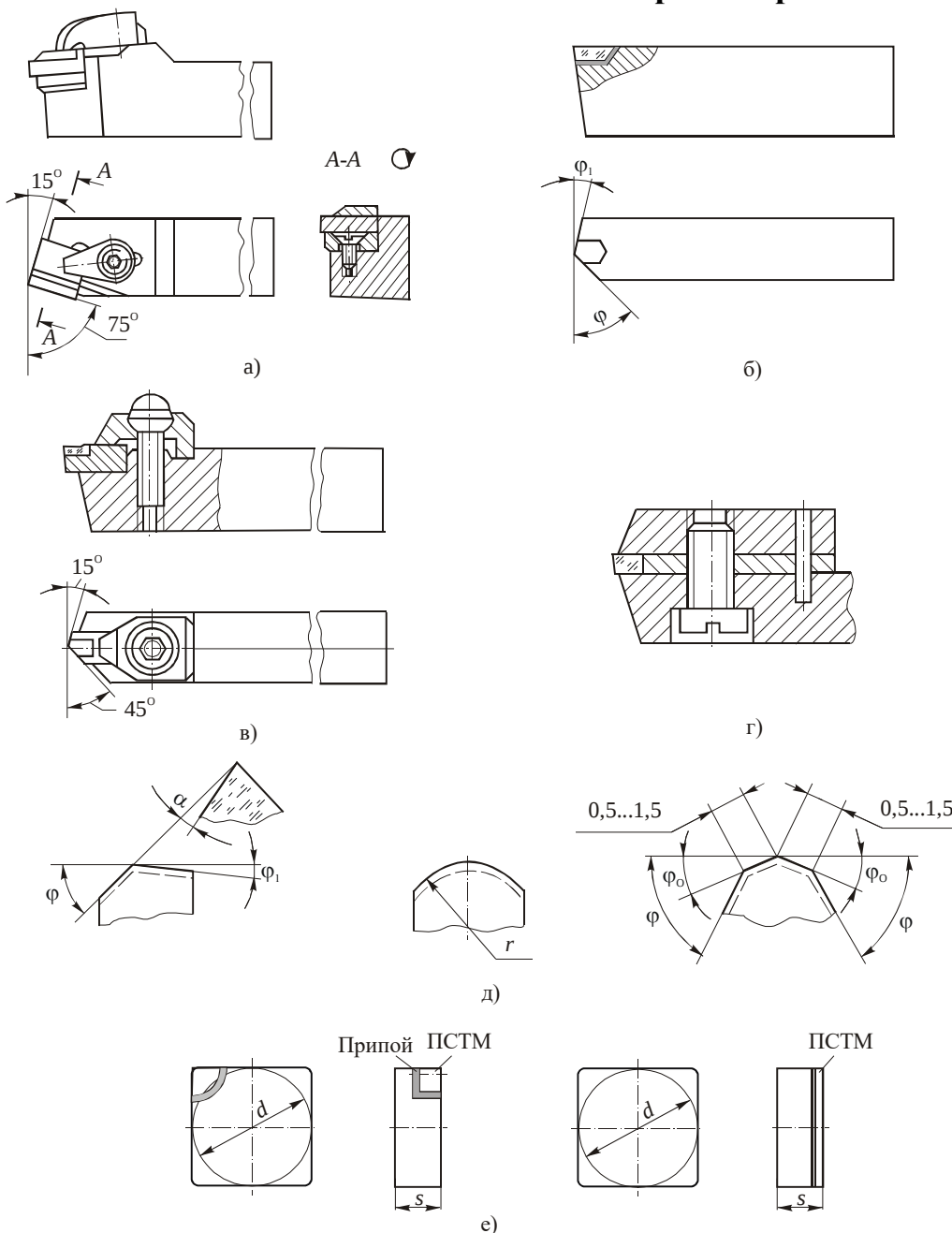


Рис. 3. **Схемы** механического крепления твердосплавных СМП: *а* – прихватом сверху; *б* – рычагом через отверстие; *в* – винтом с конической головкой; *г* – штифтом через отверстие и прихватом сверху; *д* – за счет упругой деформации стенки паза

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.

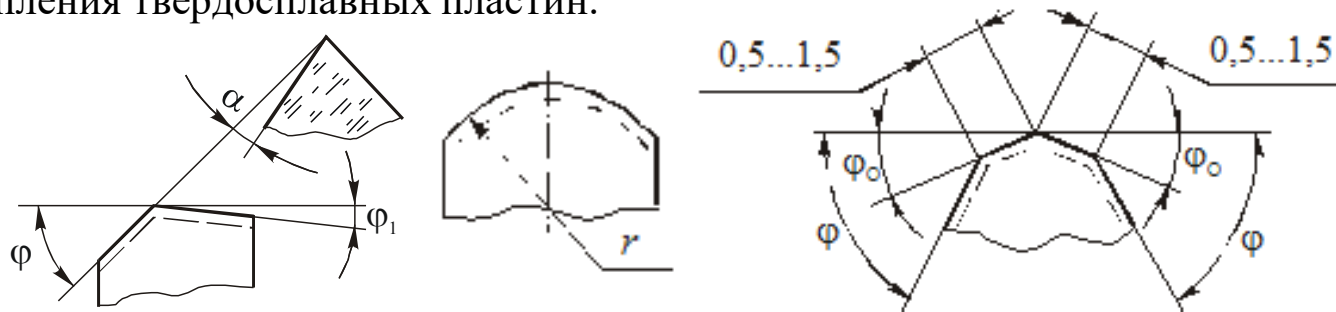
Резцы, оснащенные **керамикой** и **синтетическими сверхтвердыми материалами** обеспечивают значительное повышение производительности и стойкости, высокие точность и качество обработанной поверхности. Их недостатком является **низкая прочность** режущего клина, которая ограничивает область их применения. 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 **$\rho < 1$ мкм**. Благодаря этому алмазное точение позволяет **снизить шероховатость** обработанной поверхности до $Ra\ 0,08...0,32$ мкм и **повысить точность обработки** до $IT\ 5...7$. 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 сверхтвёрдыми 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 ($\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 0...11^\circ$).

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 углам при $\varphi=45^\circ$ (рис.4, е). Такие пластины имеют более крупные размеры и их можно крепить механическим путем в державках, применяемых для крепления твердосплавных пластин.



Токарная обработка. Резцы (продолжение)

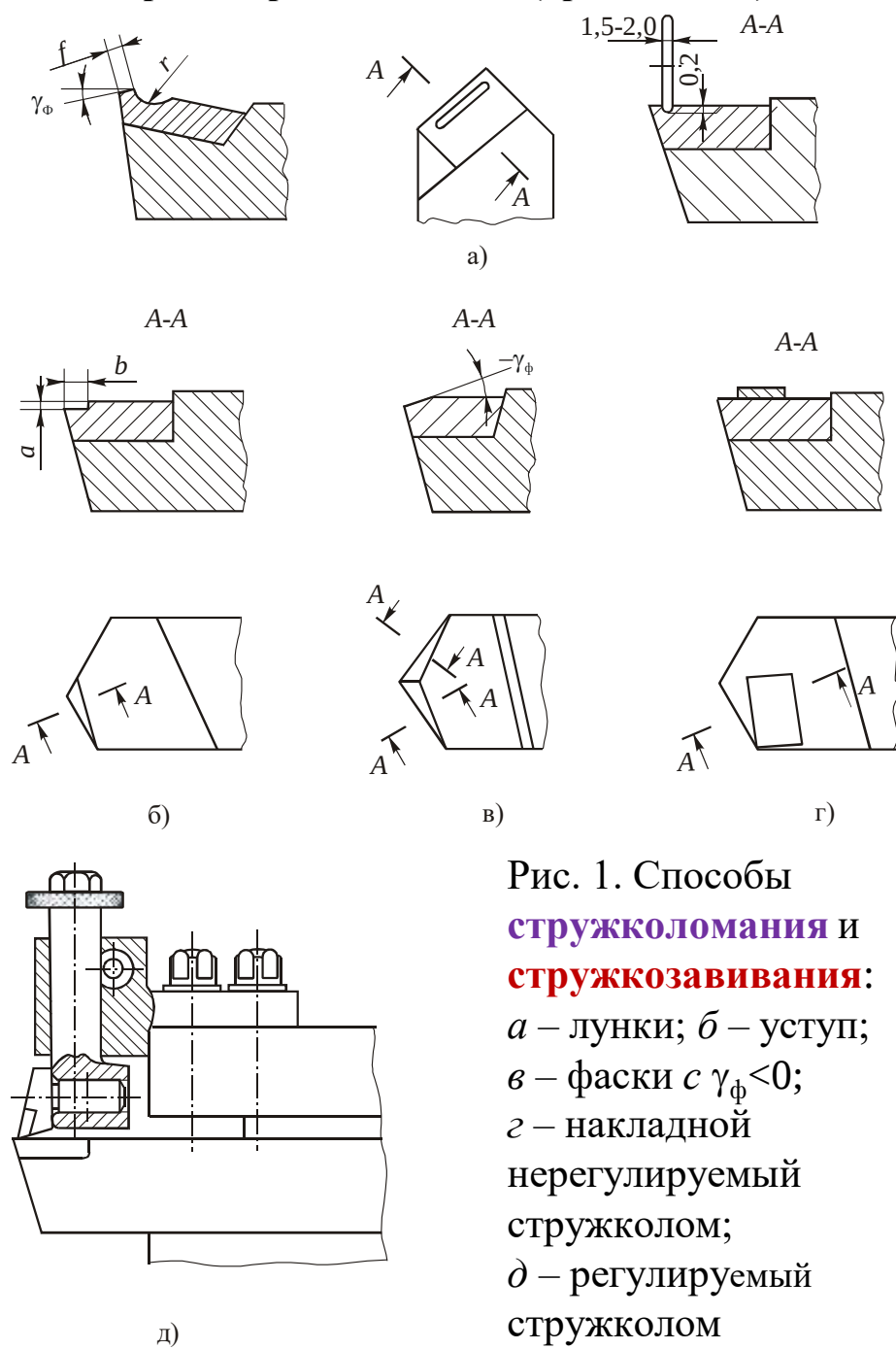
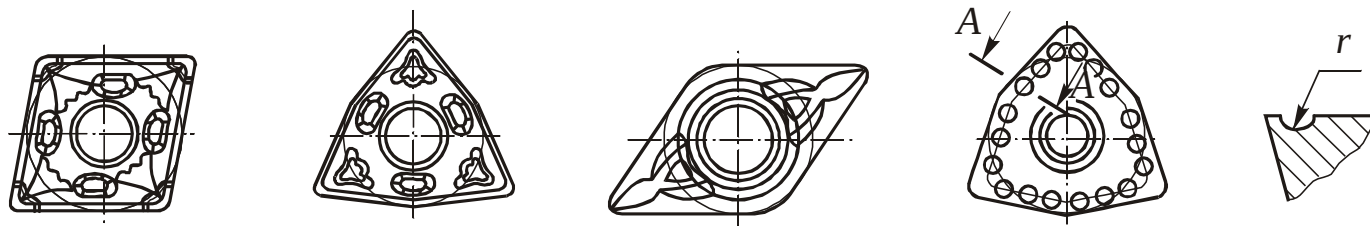


Рис. 1. Способы
стружколомания и
стружкозавивания:
а – лунки; *б* – уступ;
в – фаски с $\gamma_{\phi} < 0$;
г – накладной
нерегулируемый
стружколом;
д – регулируемый
стружколом

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 сходящуюся 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.

A-A



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.

Для обработки коротких (до 50 мм), но **сложных поверхностей** используются **фасонные резцы**, позволяющие использовать станки с простой кинематикой: на станках-автоматах и revolverных 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.

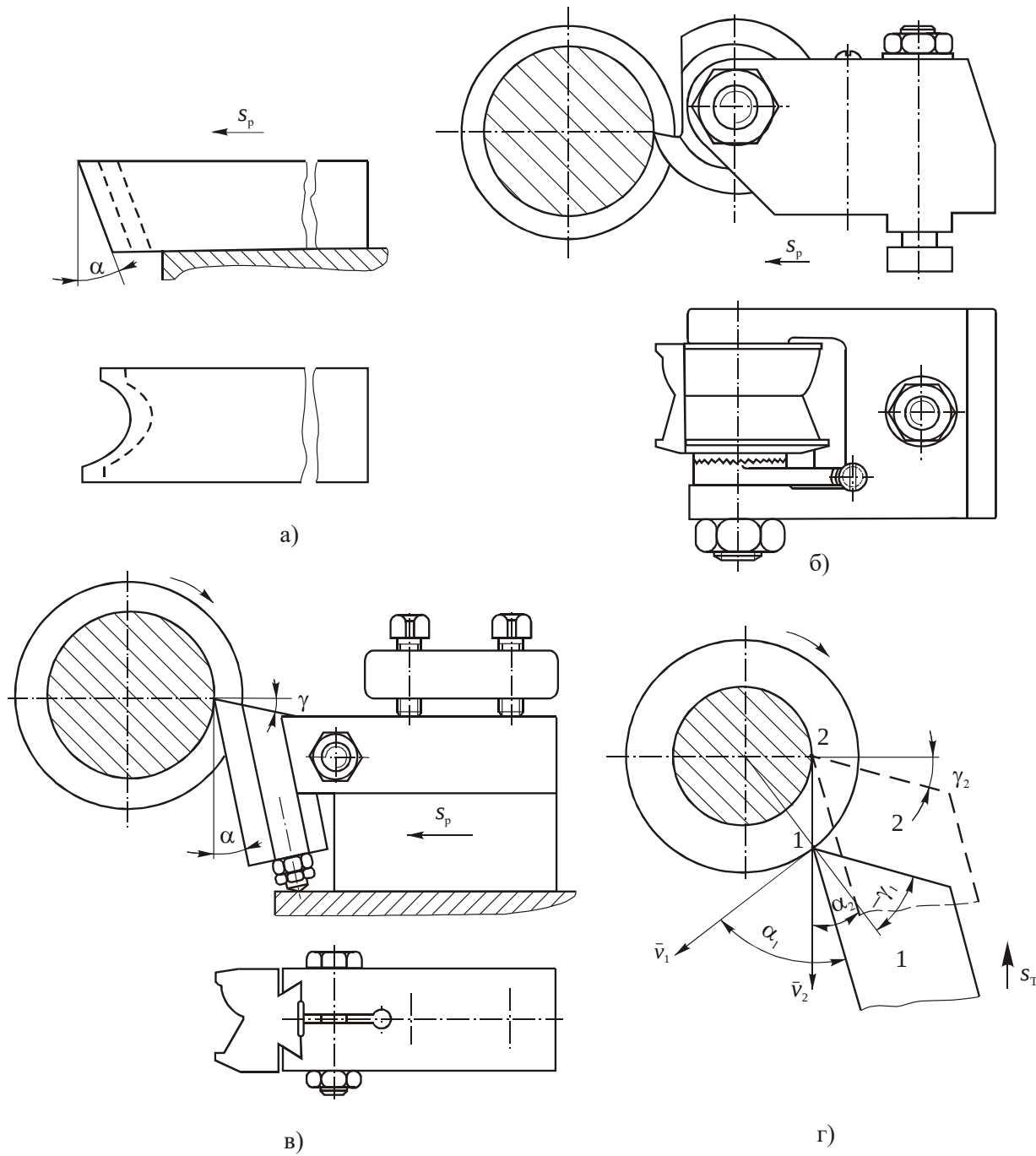


Рис. 2. Типы
фасонных резцов:
а – стержневой;
б – круглый;
в – призматический;
г – призматический
тангенциальный

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_p над центром детали O_d 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.

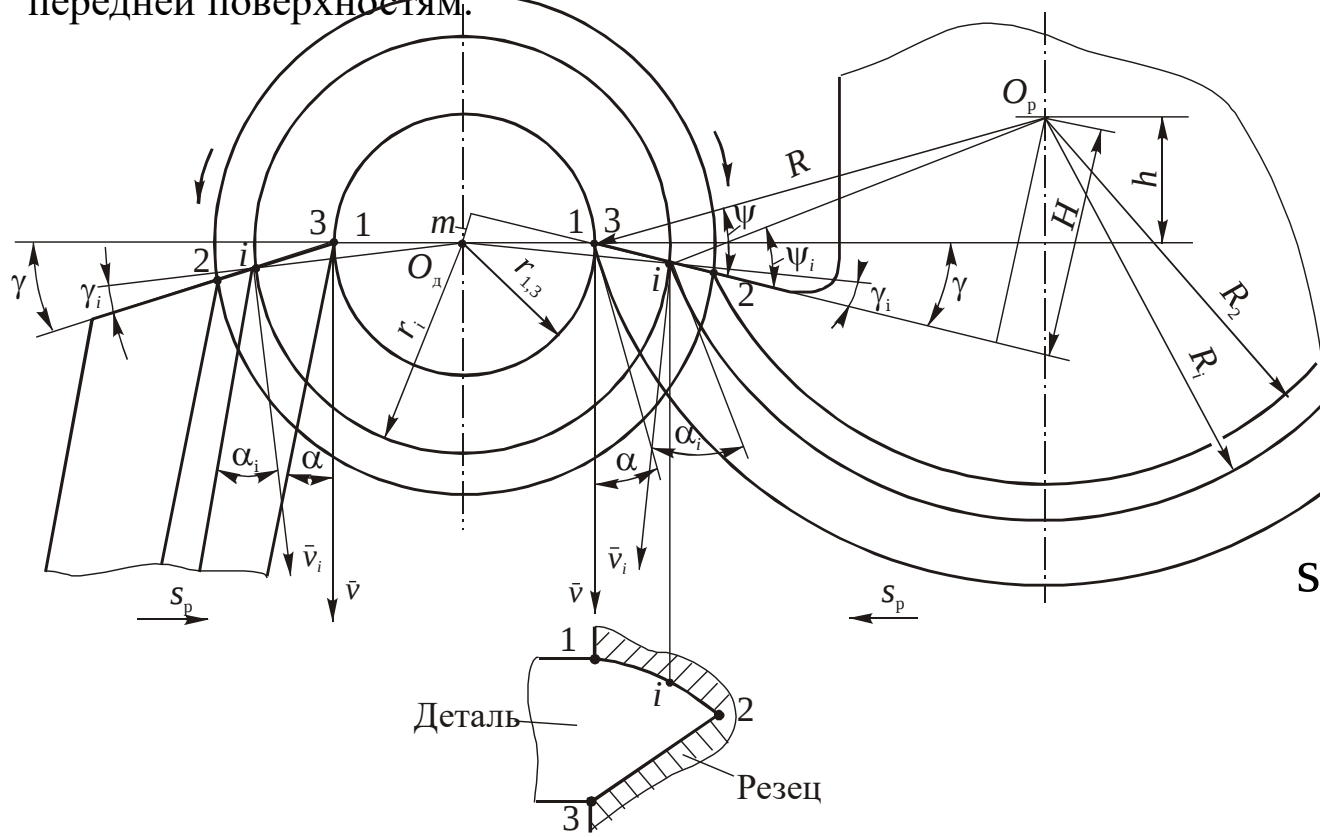


Рис. 3. Геометрические параметры **круглых** (справа) и **призматических** (слева) фасонных резцов с радиальной подачей

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

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

Исходные данные для **расчета профиля резца**: обрабатываемый материал и профиль детали, задаваемый радиусами окружностей, проходящих через **узловые точки** $r_1, r_2, \dots, r_i$, и осевыми размерами $a_1, a_2, \dots, a_i$. 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 точке 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:

$$\sin \gamma_i = m / r_i;$$

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

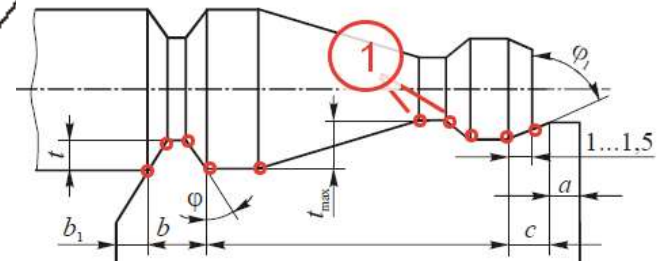
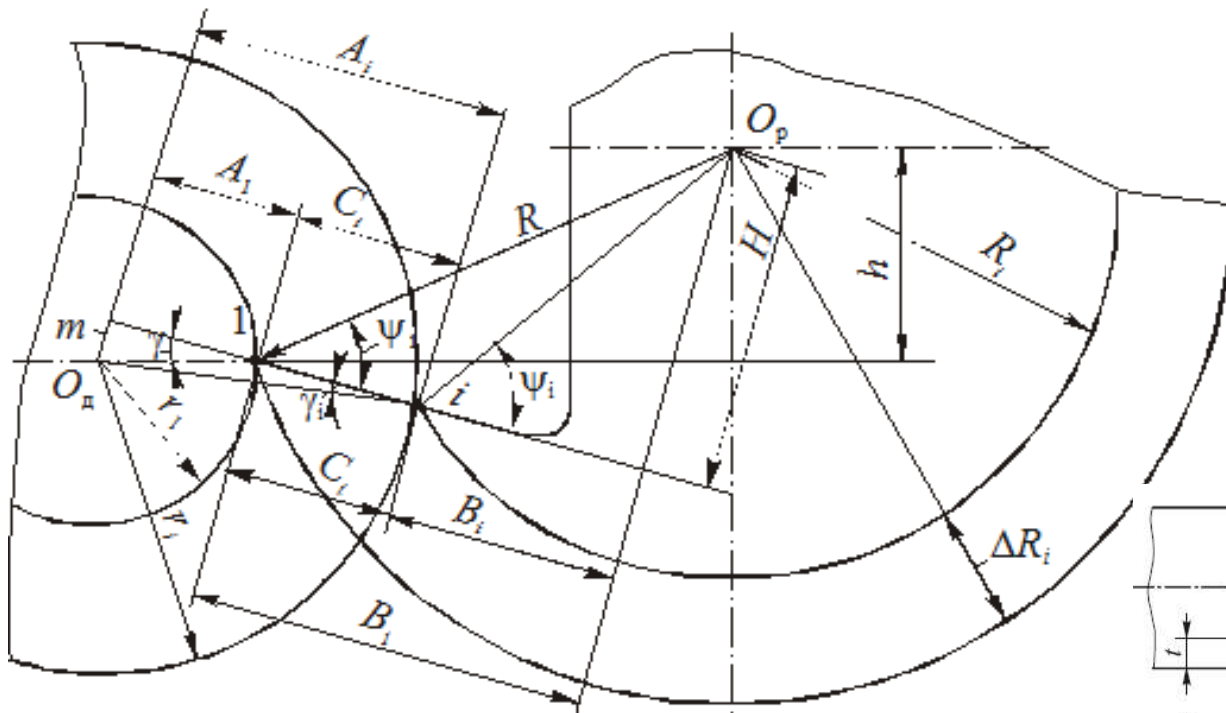
$$B_i = B_1 - C_i;$$

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

$$R_i = H / \sin \psi_i;$$

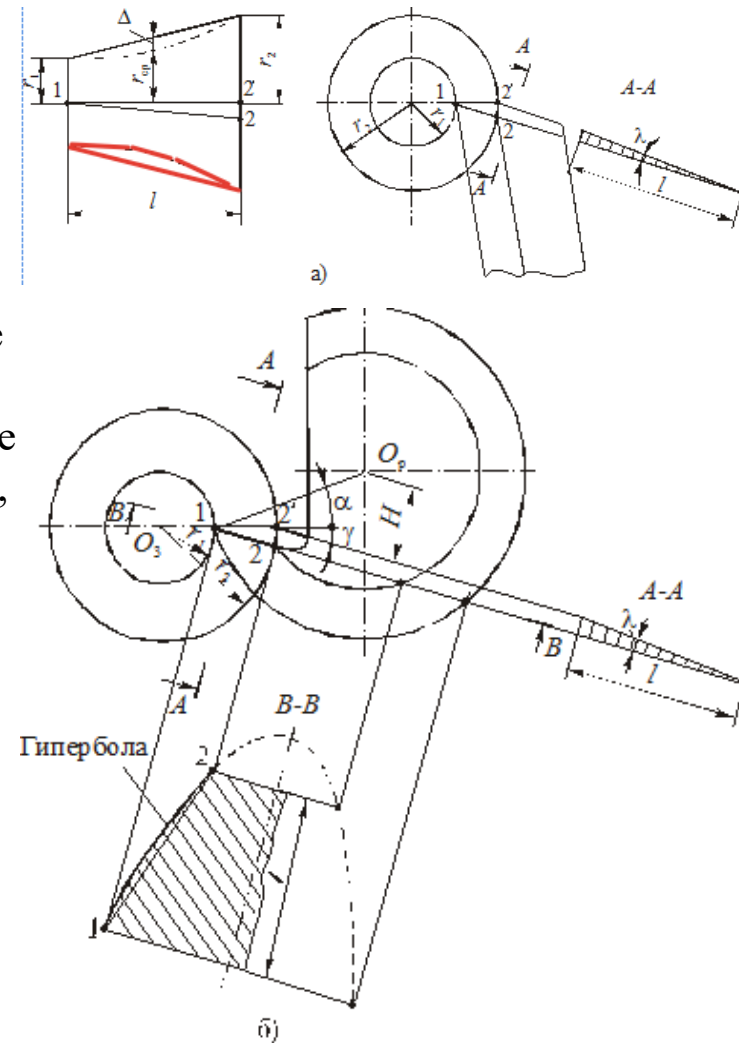
$$\Delta R_i = R - R_i.$$

$$\psi_i = \alpha_i + \gamma_i$$



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–четырёх точек**.

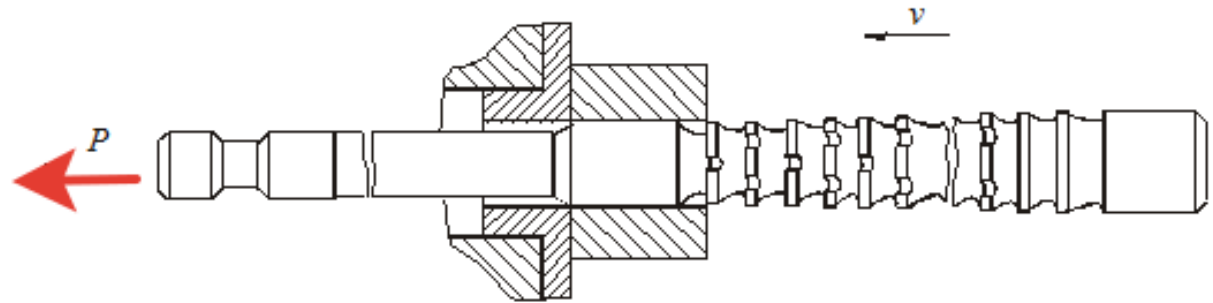
Погрешности возникают **при обработке конических участков** детали из-за несовпадения режущей кромки с образующей конуса. При обточке усеченного конуса призматическим резцом режущая кромка $1...2$ скрещивается в пространстве с осью конуса и при вращении ее относительно оси детали образуется не конус, а **однополостный гиперболоид**, показанный штриховыми линиями. Наибольшее отклонение фактического профиля от конического Δ приходится на точку профиля с радиусом $r_{cp} = (r_1 + r_2)/2$. 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 (IT 7... IT8)** 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.

Протяжки (продолжение)

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.

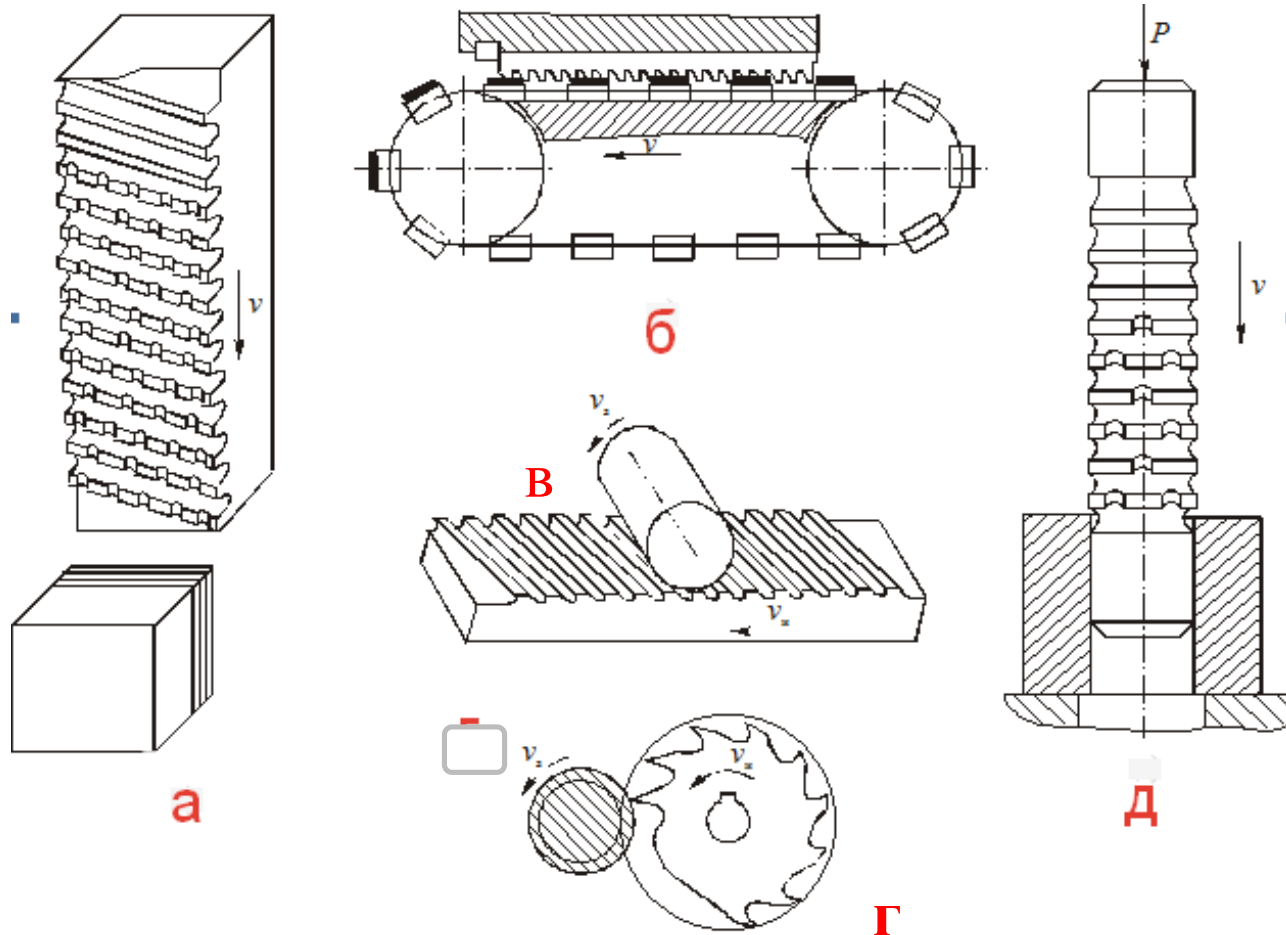
Например, при протягивании многошлицевых отверстий экономически оправдано применение протяжек даже при партии 50 деталей в год, а круглых отверстий – не менее 200 деталей.

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)

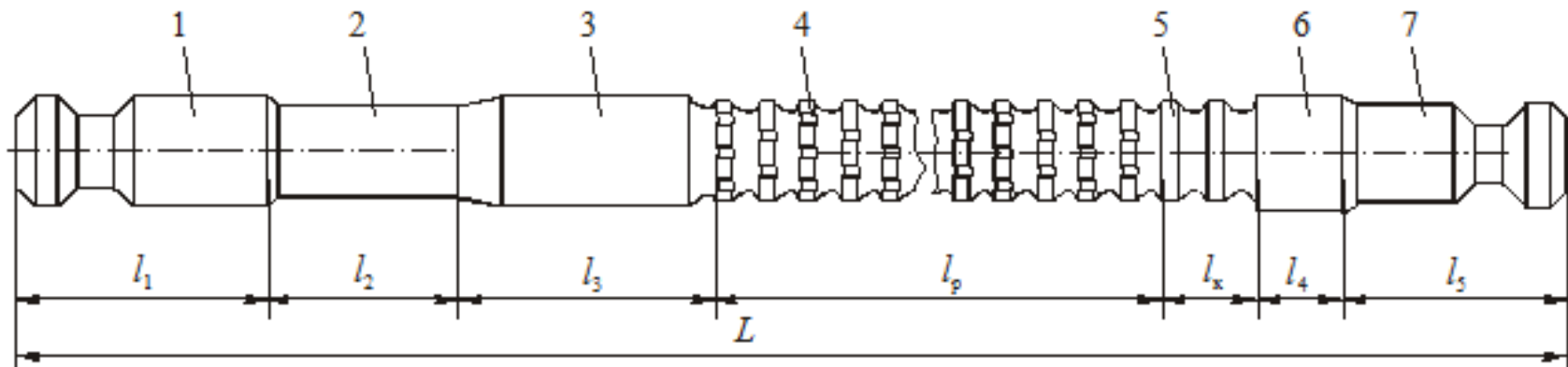
При обработке отверстий **прошивками** (рис. **д**) сила приложена к торцу инструмента и прошивки работают на сжатие. Для обеспечения продольной устойчивости прошивок их **длина не должна превышать 15 диаметров**. По конструкции прошивки подобны протяжкам.



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 **е8**. **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 **f7**. 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

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.

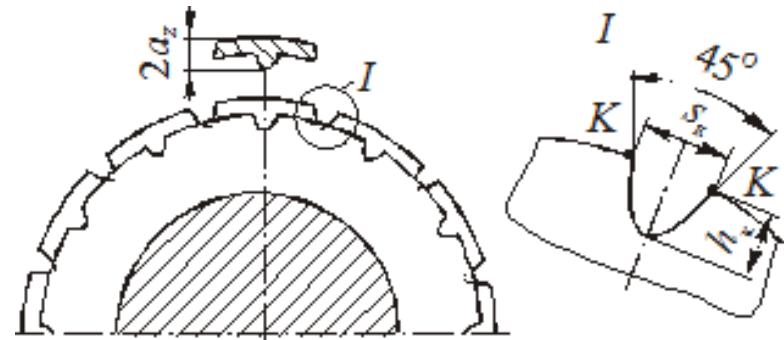
Калибрующая часть 5 содержит 4...10 зубьев одинакового диаметра, равного диаметру последнего чистового зуба, и служит для калибровки отверстия, уменьшения рассеивания его размеров, а также является запасом на переточку: по мере износа чистовых зубьев калибрующие зубья заточкой могут быть переведены в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

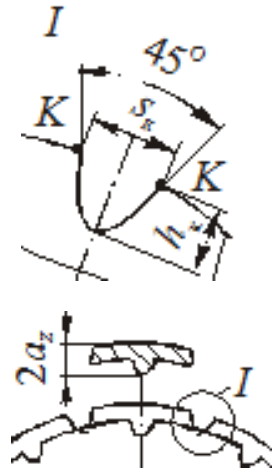
Одинарная схема резания характерна тем, что каждый зуб протяжки срезает припуск определенной толщины **по всему периметру** обрабатываемого отверстия за счет того, что **диаметр каждого последующего зуба больше диаметра предыдущего** на величину $2a_z$, где a_z – **подъем** или **подача на зуб** ($a_z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



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.

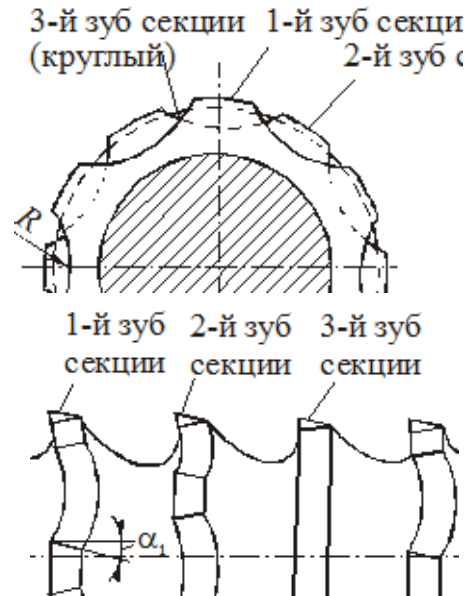
Протяжки (продолжение)

Стружкоделительные канавки имеют глубину $h_k = 0,4 \dots 1,0$ мм и ширину $s_k = 0,6 \dots 1,2$ мм в зависимости от диаметра протяжки. Снимаемые каждым зубом стружки получают 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 – $a_z = 0,02 \dots 0,04$ мм; чугуна – $a_z = 0,03 \dots 1,0$ мм; алюминия – $a_z = 0,02 \dots 0,05$ мм; бронзы и латуни – $a_z = 0,05 \dots 0,12$ 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 ($2 \dots 3^\circ$) *поднятии заднего центра* протяжки для *создания заднего угла по дну канавки*. При этом ослабляются режущие кромки зубьев в точках **K** 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 $2 \dots 5$ 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 $130...150^\circ$. Это в сочетании с задними углами $\alpha_1 = 4...6^\circ$ 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.

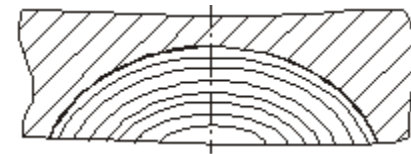
Форма режущих кромок зубьев определяется схемой формирования обработанной поверхности. При **профильной схеме** **контур всех режущих кромок** подобен профилю протягиваемого отверстия.

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).

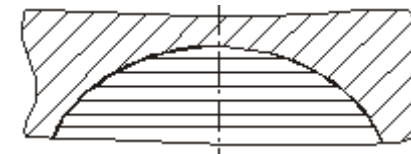
При **генераторной схеме** форма режущих кромок не совпадает с формой обработанной поверхности, которая формируется последовательно всеми зубьями. В этом случае **упрощается изготовление** протяжки путем **шлифования напроход** всех зубьев абразивным **кругом одного профиля**.

Однако при этом на обработанной поверхности возможно **появление рисок** (ступенек) вследствие погрешностей заточки зубьев, что ухудшает качество обработанной поверхности.

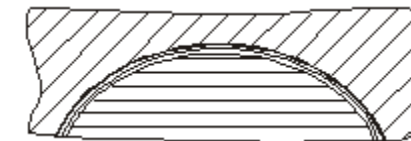
При **комбинированной схеме** **два–три последних режущих зуба и все калибрующие зубья** работают **по профильной**, а остальные – по генераторной.



профильная схема

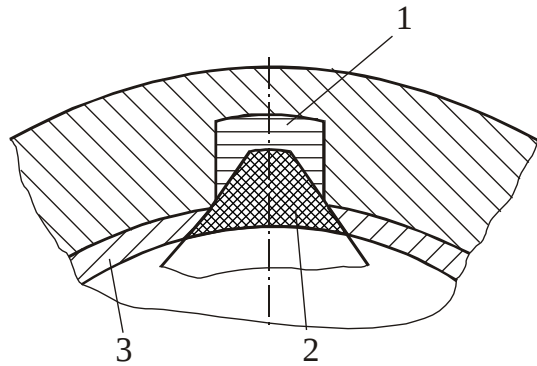


генераторная схема

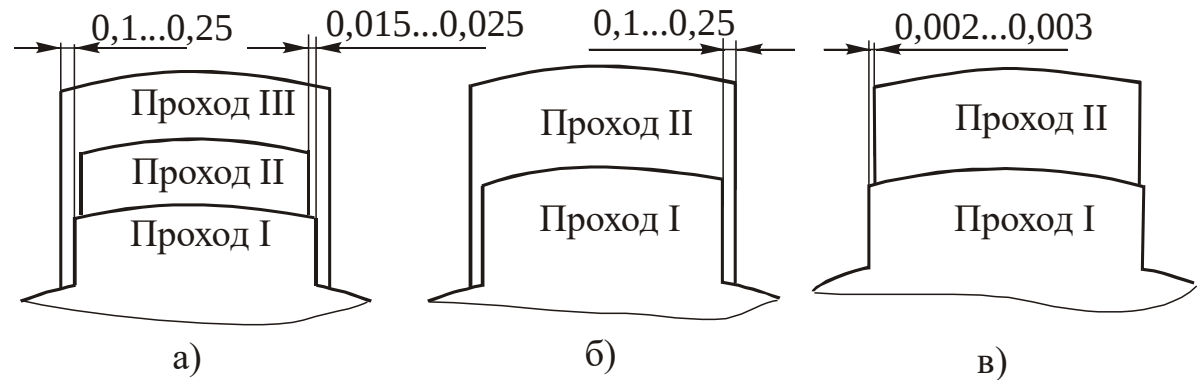


комбинированная схема

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 $a_z = 0,12 \dots 0,30$ мм.



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

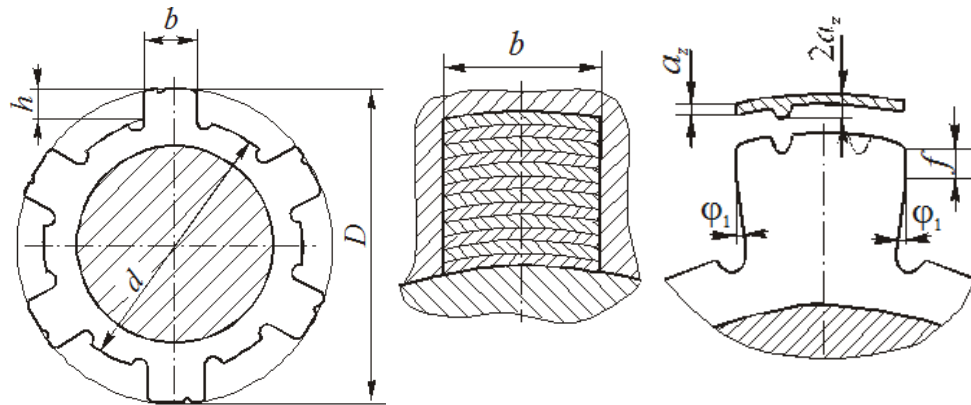


Распределение припуска между шлицевыми протяжками **комплекта** из: а – трех протяжек; б – двух протяжек; в – двух протяжек ($\Delta b > 0,06$ мм)

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 $\phi_1 = 1^\circ 30' \dots 2^\circ$** с оставлением **фаски шириной $f = 0,8 \dots 1,0$ мм** для лучшего направления протяжки в отверстие. 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.

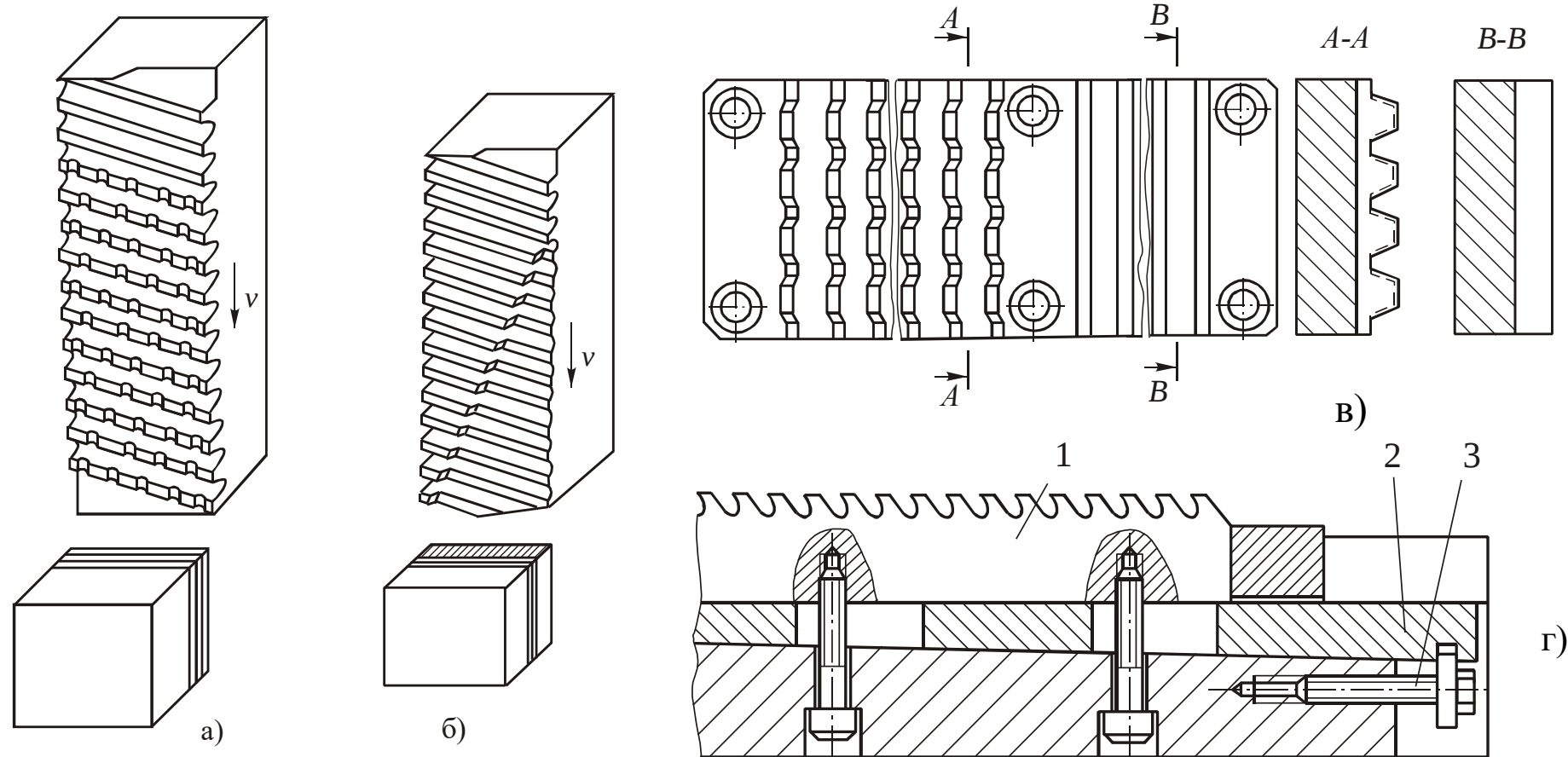
Наружным протягиванием обрабатывают различные поверхности с незамкнутым, открытым контуром: плоскости, уступы, пазы, **вогнутые и выпуклые цилиндрические и сложные фасонные поверхности**, например впадины зубчатых колес и т.п. Чаще всего используется одинарная схема резания, но при протягивании широких 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**.



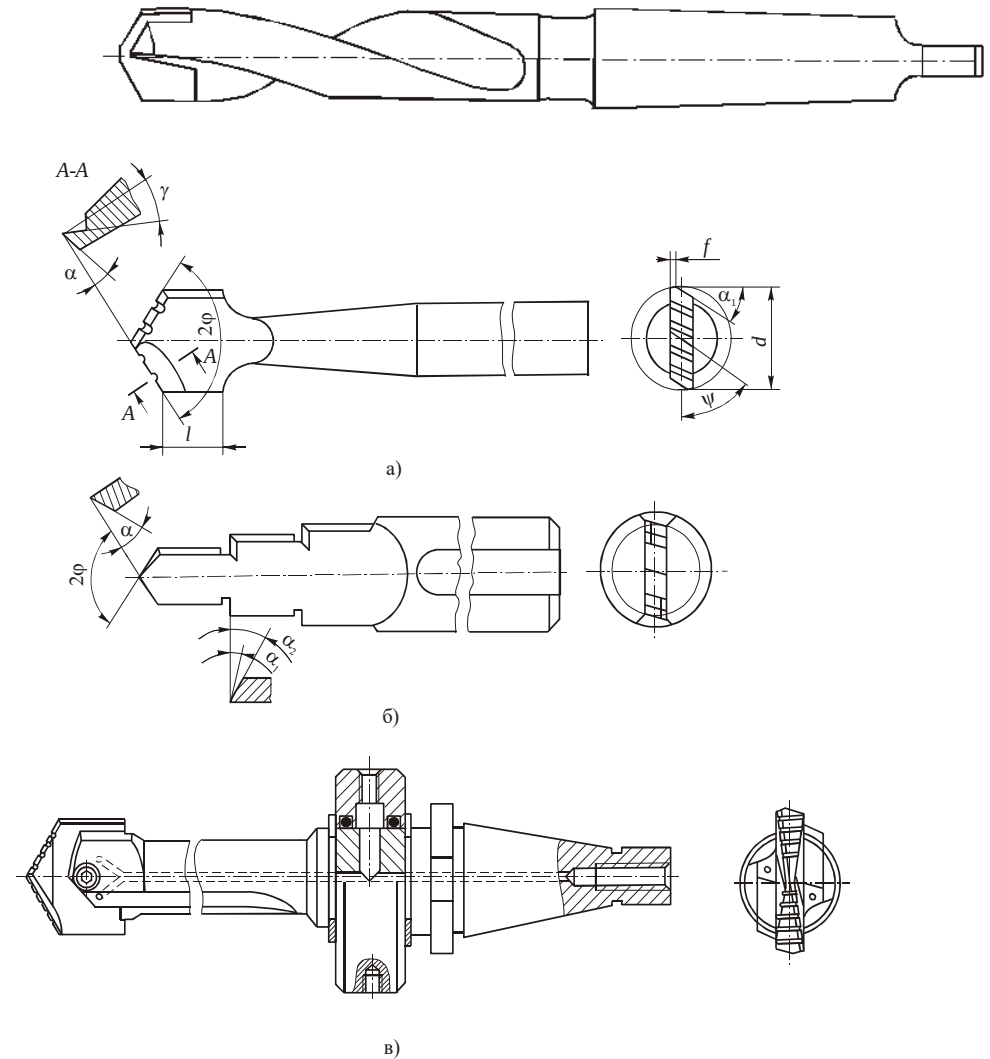
Схемы резания, применяемые при протягивании наружных поверхностей: *а* – профильная; *б* – генераторная с чистовыми зубьями, выполненными по профильной схеме; *в* – трапецеидальная схема; *г* – регулирование по высоте секции сборной наружной протяжки с помощью клина

Мерные режущие инструменты – 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.).

Мерные режущие инструменты. Свёрла



Продолжение «Мерные режущие инструменты» см. в части 1-2.