



**ОмГТУ**

**кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»**

**Теплофизика процесса резания**

Титов Юрий Владимирович

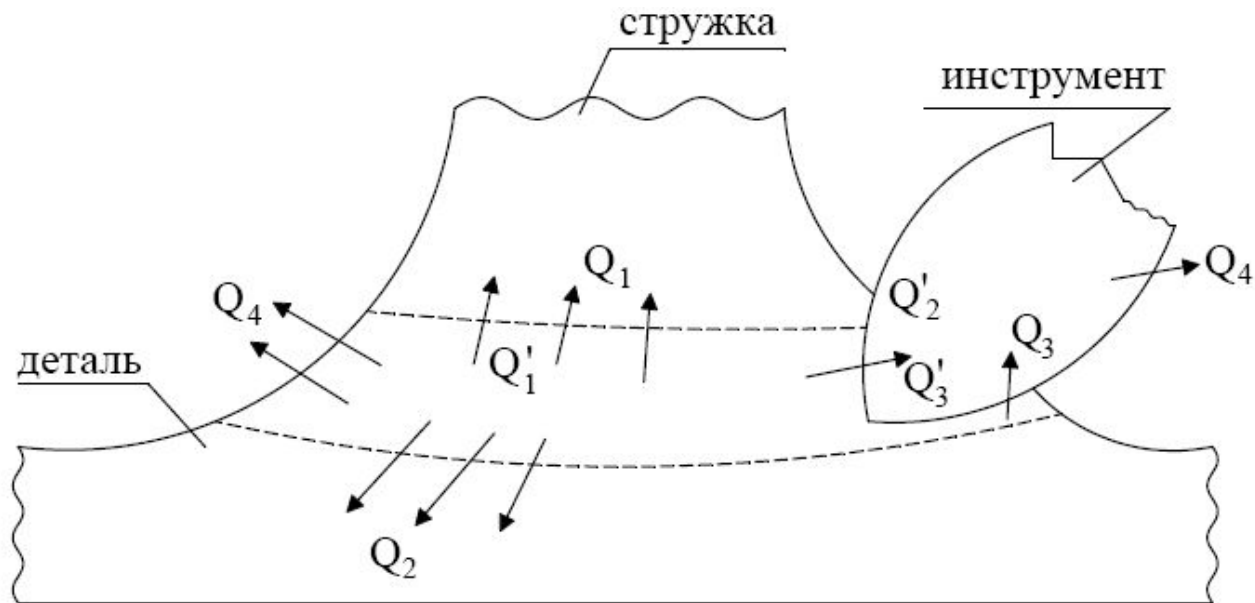
## Физическая модель. Балансовые соотношения



Суть процессов, происходящих в зоне механической обработки детали очень сложна.

- Во-первых, потому, что происходит превращение одних видов энергии в другие (механической в потенциальную энергию кристаллической решетки и тепловую вследствие наличия трения).
- Во-вторых, потому что слишком большое количество факторов оказывает влияние на результирующую картину (теплофизические свойства материала заготовки и инструмента, параметры механической обработки (скорость, подача, глубина и др.), состояние материала в поверхностном слое заготовки, наличие или отсутствие влияния технологических сред или других источников воздействия на зону механической обработки).

## Схема возникновения и распределения тепловых потоков в технологической системе резания



где  $Q_1'$  – количество теплоты, эквивалентное энергии, затраченной на деформирование и разрушение при стружкообразовании поверхностного слоя;  
 $Q_2'$  – количество теплоты, эквивалентное работе сил трения при контакте передней поверхности лезвия и деформированного материала;  
 $Q_3'$  – количество теплоты, эквивалентное работе сил трения на задней поверхности лезвия при переходе деформированного материала в поверхностный слой изделия;  
 $Q_1$  – количество теплоты, уходящее в стружку;  
 $Q_2$  – количество теплоты, уходящее в деталь;  
 $Q_3$  – количество теплоты, уходящее в инструмент;  
 $Q_4$  – количество теплоты, уходящее в окружающую среду.

**Теплоотдача**, под которой понимают конвективный теплообмен между потоком жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс чаще всего описывают уравнением Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_{ж} - t_{т})$$

где  $F$  – поверхность теплоотдачи, м<sup>2</sup>;

$t_{ж}$ ,  $t_{т}$  – температуры жидкости и тела, К или °С;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

$$\alpha = Q / F \cdot (t_{ж} - t_{т}).$$

**Коэффициент теплоотдачи**  $\alpha$  представляет собой количество тепла, отдаваемое или воспринимаемое единицей поверхности теплоотдачи  $F$  при разности температур между жидкостью и стенкой  $1\text{К}$ . Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  зависит от большого числа факторов: формы и размеров тела, режима движения, скорости и температуры жидкости, ее теплофизических свойств и т. п.

## Факторы, влияющие на величину коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta}$$

**Влияние скорости потока  $v$ .** С увеличением скорости потока жидкости или газа толщина пограничного слоя  $\delta$  уменьшается, следовательно,  $\alpha$  возрастает.

**Влияние вязкости  $\mu$ .** Чем выше вязкость, тем больше касательные силы вязкого трения, тем толще оказывается пограничный слой. Это должно приводить к уменьшению  $\alpha$ . Снижение интенсивности теплоотдачи обусловлено также ухудшением перемешивания с ростом вязкости.

**Влияние плотности  $\rho$ .** Уменьшение плотности влечет за собой рост толщины пограничного слоя, следовательно, снижение коэффициента теплоотдачи. К этому следует добавить, что теплота, переносимая единицей объема пропорциональна плотности, что усиливает влияние плотности на интенсивность теплоотдачи.

**Коэффициент теплопроводности  $\lambda$**  находится в прямой связи с коэффициентом теплоотдачи. С ростом  $\lambda$  растет и  $\alpha$ .

**Тепловое излучение** – это процесс распространения тепловой энергии с помощью электромагнитных волн. При тепловом излучении происходит двойное превращение энергии: тепловая энергия излучающего тела переходит в лучистую и, наоборот, лучистая энергия, поглощаясь телом, переходит в тепловую.

При данной температуре наибольший тепловой поток излучает абсолютно черное тело. Величина его плотности определяется законом Стефана-Больцмана:

$$q = \sigma_0 \cdot T^4,$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – константа излучения абсолютно черного тела.

Плотность теплового потока, излучаемого нечерными телами, оценивается формулой:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4,$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты. Ее величина  $0 < \varepsilon < 1$  и определяется экспериментально или из справочника.

При лучистом теплообмене между двумя телами они одновременно облучают друг друга. Результирующая теплота, переданная излучением от тела с более высокой температурой к телу с более низкой, определяется выражением:

$$Q_{12} = \sigma_{пр.} \cdot F \cdot (T_1^4 - T_2^4),$$

где  $F$  – взаимная поверхность облучения,  $m^2$ ;  $\sigma_{пр}$  – приведенная константа излучения,  $Вт/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $T_1, T_2$  – температура тел,  $С$ .

**Тепловой поток** – количество теплоты, которое передается в единицу времени от источника теплоты к какому-либо телу (стоку). Тепловой поток ( $Q$ ) измеряется в Вт, кВт и т.п.

**Плотность (интенсивность) теплового потока** – тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, объема или длины теплового источника. Плотность теплового потока обозначается  $q$ :

$$q = Q/F \cdot (V, L)$$

где  $F$  – площадь передачи теплоты, перпендикулярная направлению теплового потока,  $m^2$ ;  $V$  – объем,  $m^3$ ;  $L$  – длина, м.

**Источником** называется объект, генерирующий теплоту.

Мощность источника оценивается величиной генерируемого теплового потока или его плотностью.

**Стоком** называется объект, поглощающий теплоту.

**Температурное поле** – совокупность значений температуры тела в любой момент времени. Его наиболее общее математическое выражение:

$$t = t \cdot (x, y, z, \tau),$$

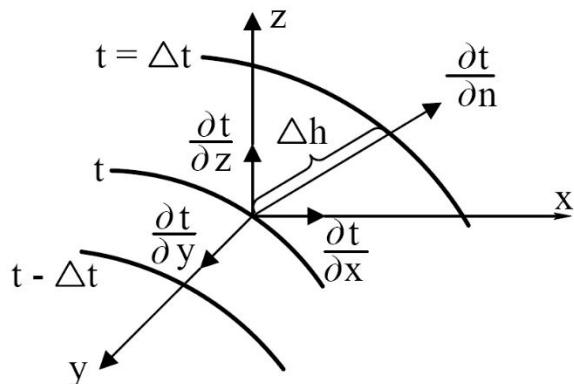
где  $x, y, z$  – координаты отдельной точки тела;  $\tau$  – время.



**Изотермические поверхности** – геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру. Изотермические поверхности не могут пересекаться друг с другом. Они или замыкаются сами на себя, или обрываются на границах тела.

**Изотермические линии (изотермы)** – линии, образованные пересечением изотермических поверхностей с секущей плоскостью. Как и изотермические поверхности, изотермические линии не могут пересекаться друг с другом – они или замыкаются сами на себя, или обрываются на границах тела.

**Температурный градиент** – предел отношения изменения температуры между двумя изотермами к расстоянию между последними, измеренному по нормали.



$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n}.$$

Температурный градиент векторная величина. Его положительное направление совпадает с направлением роста температуры.

## Основной закон теплопроводности

Рассмотрим элемент изотермической поверхности  $dF$ . По нормали  $n$  покажем вектор  $grad\ t$ . Следовательно, поток теплоты, который представим в виде вектора  $dQ$ , направлен в противоположную сторону.

В 1882 году Ж-Б-Фурье высказал гипотезу о том, что количество теплоты  $dQ$ , проходящее через элемент поверхности  $dF$  за время  $d\tau$  пропорционально  $grad\ t$

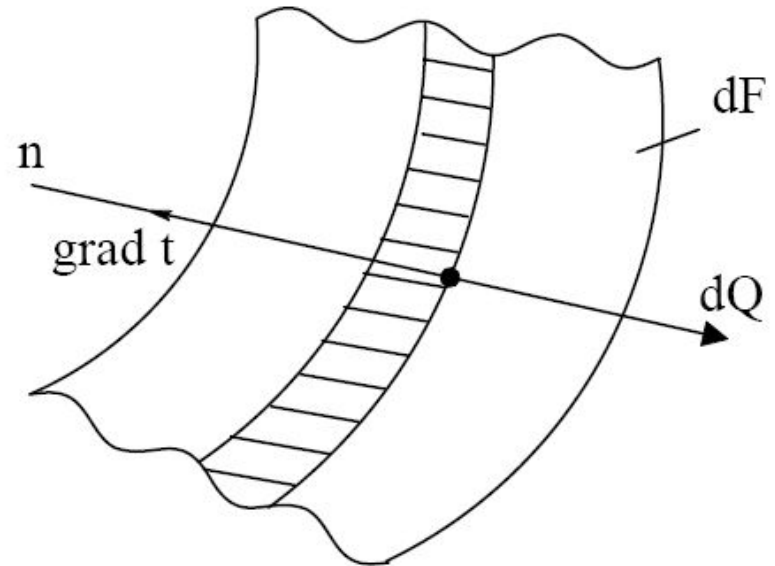
$$dQ = -\lambda \cdot grad\ t \cdot dF \cdot d\tau,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Отношение:

$$q = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau},$$

представляющее собой количество теплоты, проходящее в единицу времени, через единицу площади изотермической поверхности есть не что иное, как плотность теплового потока.



Подставляя выражения получим:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n},$$

где  $q$  – вектор плотности (интенсивности) теплового потока.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  характеризует физические свойства материала.

$$\lambda = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau \cdot \left(-\frac{\partial t}{\partial n}\right)}.$$

**Коэффициент теплопроводности** – это теплота, передаваемая теплопроводностью в единицу времени через единицу поверхности при перепаде температуры на единицу длины нормали, равном одному градусу, размерность его - Вт/(м · К).

## Дифференциальное уравнение теплопроводности

Математическое описание температурных полей в компонентах технологических систем выполняется с помощью дифференциального уравнения теплопроводности.

Выделим из нагреваемого тела элементарный объем  $\Delta V$ , где  $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ .

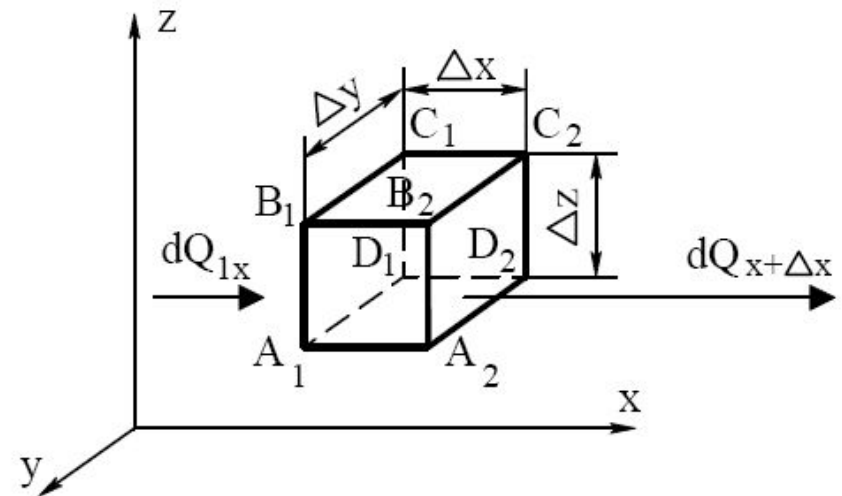
На основании закона изменения внутренней энергии

$$dU = dQ_1 + dQ_2,$$

где  $dU$  – общее изменение внутренней энергии вещества в объеме  $\Delta V$  за время  $\Delta t$ ;

$dQ_1$  – количество теплоты, поступившее в этот объем путем теплопроводности;

$dQ_2$  – количество теплоты, возникшее в объеме  $\Delta V$  в связи с функционированием в нем внутренних источников.



К внутренним относятся источники, тепловыделение которых связано с процессами, происходящими в материале твердого тела, например, с объемными химическими реакциями, действием электрического тока и т. д.

Элементарные количества теплоты  $dQ_1$  и  $dQ_2$  вызовут изменение температуры вещества и величину  $dU$  можно найти из уравнения:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho\Delta V} \cdot \frac{dU}{d\tau},$$

где  $c$  – массовая теплоемкость, Дж/(кг · К),  
 $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, в наиболее простом виде дифференциальное уравнение теплопроводности выглядит так:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t,$$

где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

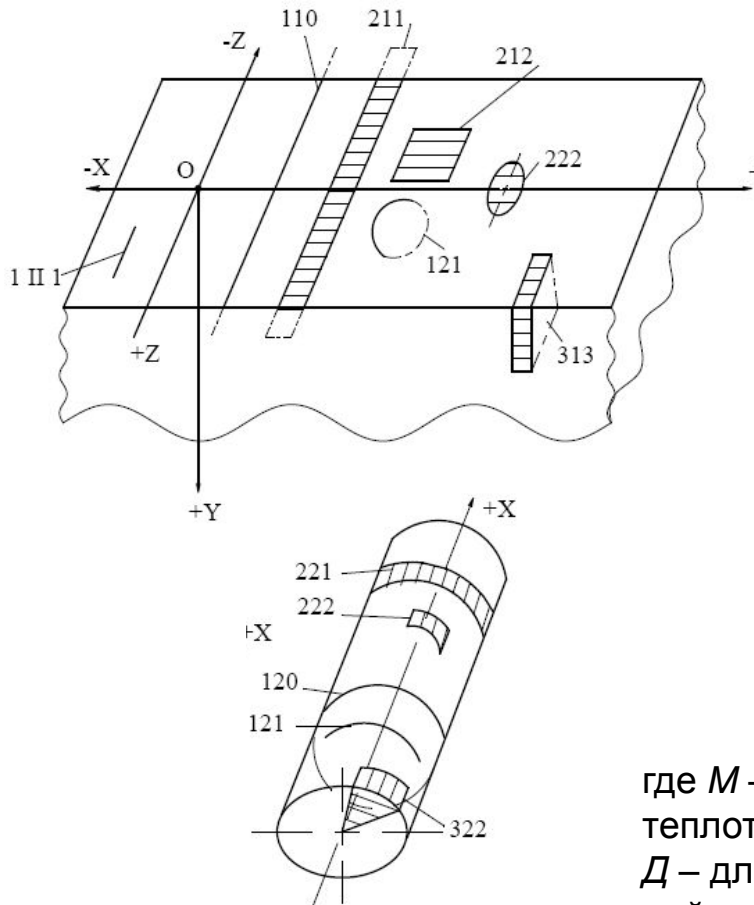
$\lambda/c \cdot \rho = a$  – коэффициент температуропроводности данного вещества.

## Классификация источников



### 1. Расположение и форма источников

По расположению источники теплоты можно разделить на **внешние**, действующие на поверхности тел, и **внутренние**, функционирующие в их массе



Кодирование тепловых задач

Символ	Признак источника и тела	Коды
M	Точечный: одно-, двух- и трехмерный.	0; 1; 2; 3
	Прямой, плоский (полосовой, прямоугольный), призматический.	1
	Кольцевой, круговой, цилиндрический.	2
K	Шаровый	3
O	Неограниченный: ограниченный по направлению одной, двух или трех осей координат	0; 1; 2; 3
P	Распределенный равномерно	1
	Распределенный линейно	2; 3
	Распределенный по экспоненте	4
	Нормально распределенный несимметричный	5; 6
	Нормально распределенный симметричный	7
	Комбинированный	8
C	Неподвижный; движущийся; быстро движущийся	0; 1; 2
D	Мгновенный, действующий некоторое время; действующий длительно (процесс установился)	0; 1; 2
T	Неограниченное тело; полупространство; пластина; параллелепипед.	0; 1; 2; 3
	Стержень неограниченный	4
	Стержень, ограниченный с одной стороны	5
	Стержень конечной длины	6
	Цилиндр, клин, шар	7.8.9
	Граничные условия 1.2.3.4-го рода	1.2.3.4
Y		

где *M* – мерность; *K* – конфигурация; *O* – ограниченность источника теплоты; *P* – закон распределения источника; *C* – его скорость; *D* – длительность функционирования; *T* – форма тела, на котором действует источник; *Y* – род граничных условий.

# Классификация источников

## 2. Закон распределения интенсивности источника

Закон распределения интенсивности (плотности теплового потока) является одной из важнейших характеристик источника.

Чтобы для каждого из них установить тепловую мощность, необходимо:

- 1) определить общую тепловую мощность процесса;
- 2) распределить последнюю между конкретными источниками, возникающими в данной технологической операции, то есть составить приходную часть теплового баланса.

а. Самым простым является равномерное стационарное распределение, когда интенсивность  $q_0$  не зависит от координат и времени.

$$q_0 = \frac{Q}{\int dx} = \frac{Q}{L} \text{ (Дж/(м·с))}.$$

б. Следующую группу представляют источники с линейно распределенной интенсивностью.

$$q(x, y, z) = q_0 - k_1 x - k_2 y.$$

Из условий  $q(\ell, 0, z) = 0$  и  $q(x, \Delta, z) = 0$  получаем:

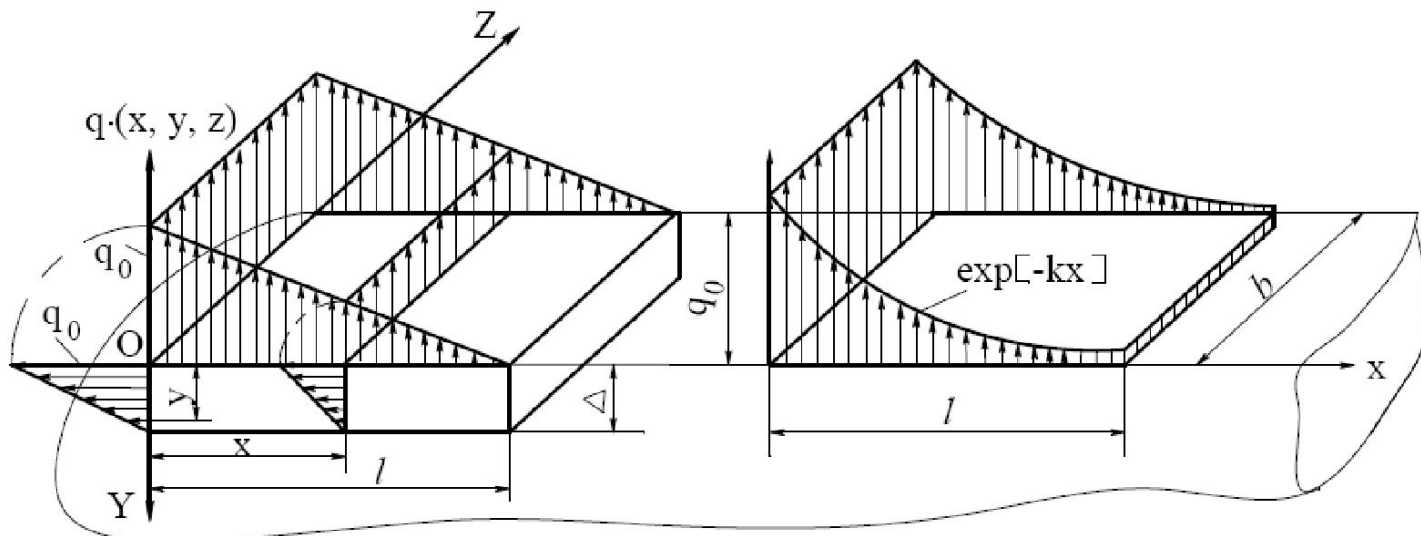
$$q(x, y, z) = q_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{\ell}\right) \left(1 - \frac{y}{\Delta}\right) \quad k_1 = \frac{q_0}{\ell}; \quad k_2 = \frac{q_0}{\Delta} \cdot \left(1 - \frac{x}{\ell}\right).$$

## Классификация источников

3. Большую группу идеализированных источников составляют источники с распределением интенсивности по нормальному закону. К этой группе относятся нормально-линейные, нормально-плоские (полосовые), нормально-круговые и нормально-объемные источники теплоты.

$$q(x) = q_0 \exp[-k \cdot x^2],$$

Коэффициент  $k$ , характеризующий «остроту» кривой нормального распределения, называют коэффициентом сосредоточенности теплового потока.



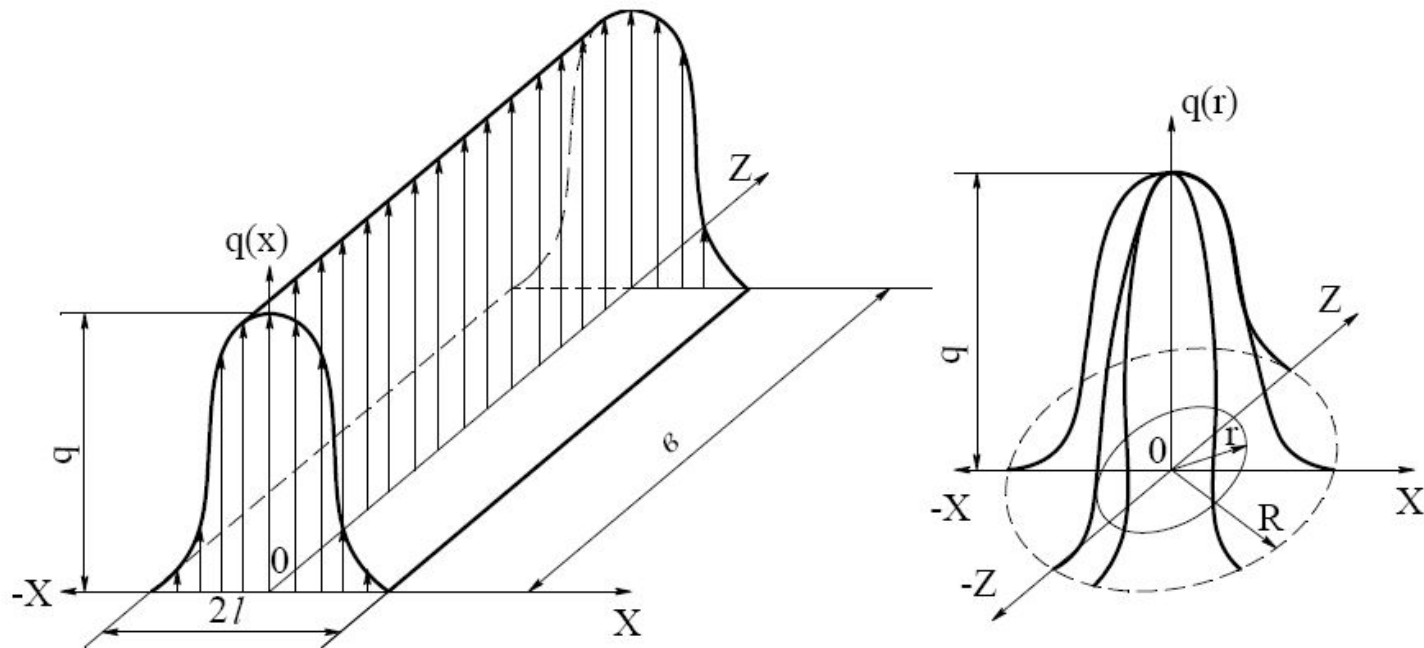
Источники с распределением интенсивности по **линейному** и **экспоненциальному** законам



Нормально-круговой двумерный источник описывается уравнением

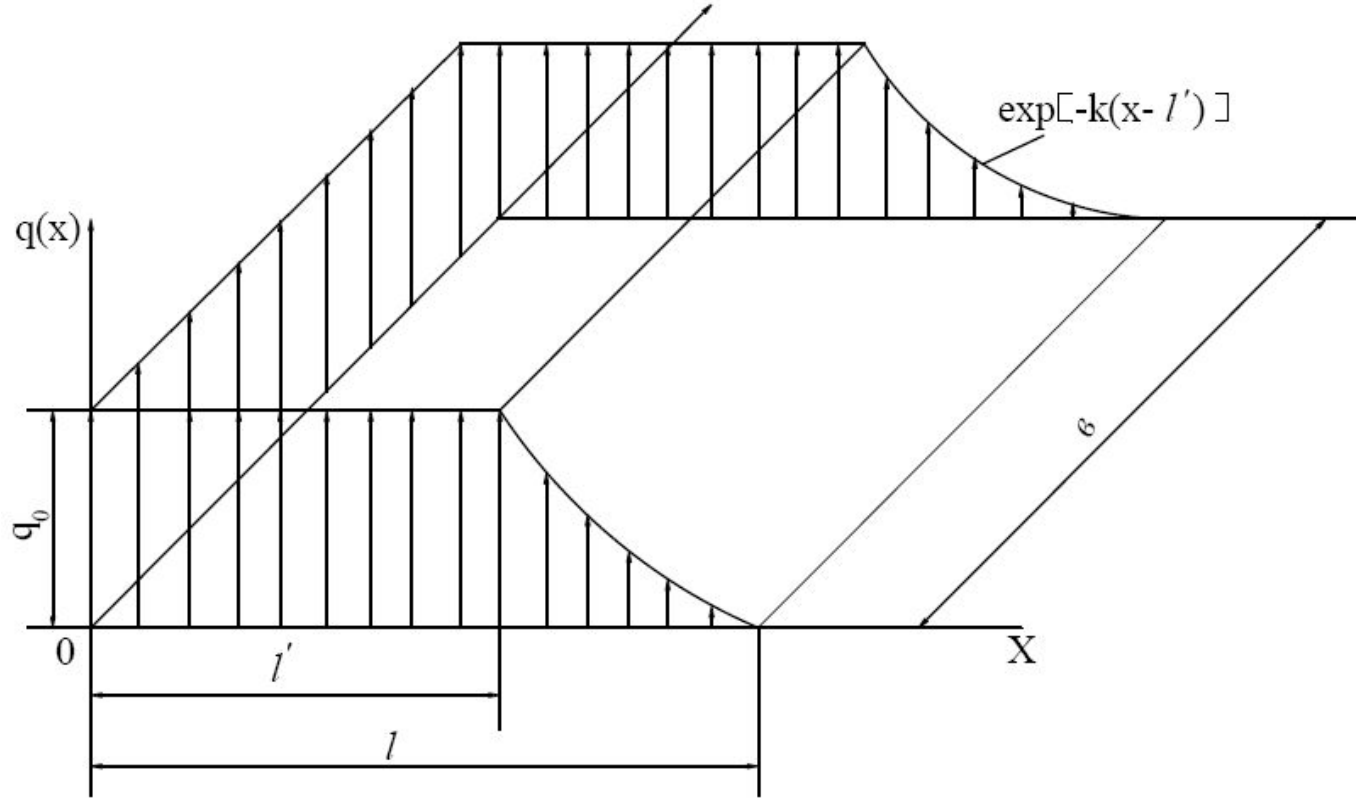
$$q(r) = \frac{3Q}{\pi R^2} \cdot \exp \cdot [-3\rho^2]$$

Где  $\rho = r/R$  – безразмерный текущий радиус.



Нормально распределенные источники: полосовой и круговой

# Источник с комбинированным законом распределения



$$q = \frac{3Q}{\epsilon \cdot l \cdot (2\epsilon + 1)} \cdot \exp \left[ -3 \cdot \frac{\psi - \epsilon}{1 - \epsilon} \right],$$

$$\text{где } \psi = \frac{x}{l}; \quad \epsilon = \frac{l'}{l}.$$

## Классификация источников

### Скорость перемещения и длительность функционирования источника

Скорость перемещения источников в теплофизических расчетах обычно характеризуют безразмерным критерием Пекле

$$Pe = \frac{v \cdot \ell}{a},$$

где  $v$  – скорость движения источника;  $\ell$  – характерный линейный размер;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Если  $Pe = 0$  – источник – неподвижный, если  $Pe \geq 10$ , то источник быстро движущийся; при  $0 < Pe < 10$  – источник движется с любой скоростью.

По времени функционирования источники можно разделить на:

- 1) мгновенные ( $Fo \rightarrow 0$ );
- 2) действующие в течение конечного промежутка времени;
- 3) действующие периодически;
- 4) действующие столь длительное время, что процесс теплообмена можно считать стационарным.

### Общие принципы схематизации тел и источников, участвующих в теплообмене при механической обработке материалов

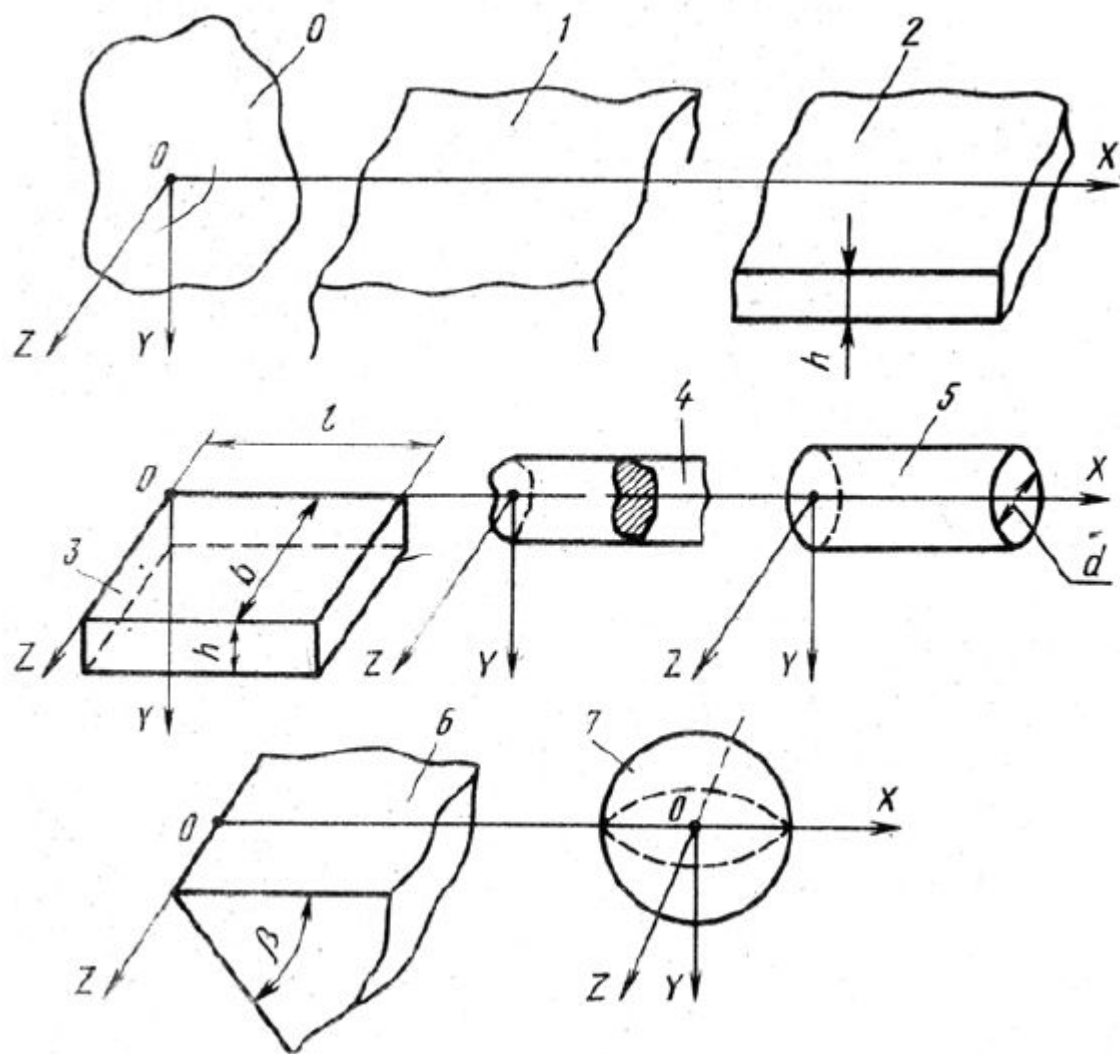


Допустимость той или иной идеализации формы реальных тел определяется:

- 1) соотношением между размерами площадок, занимаемых источниками теплоты, и размерами нагреваемого тела;
- 2) временем от начала процесса теплообмена до момента времени, для которого рассчитывают температуры;
- 3) наличием пассивных граничных поверхностей;
- 4) требуемой точностью расчета.

Чем меньше размеры источника по отношению к размерам нагреваемого тела, тем меньше влияние конкретной формы тела на температурное поле в области, прилежащей к источнику.

## Идеализированные формы твердых тел:



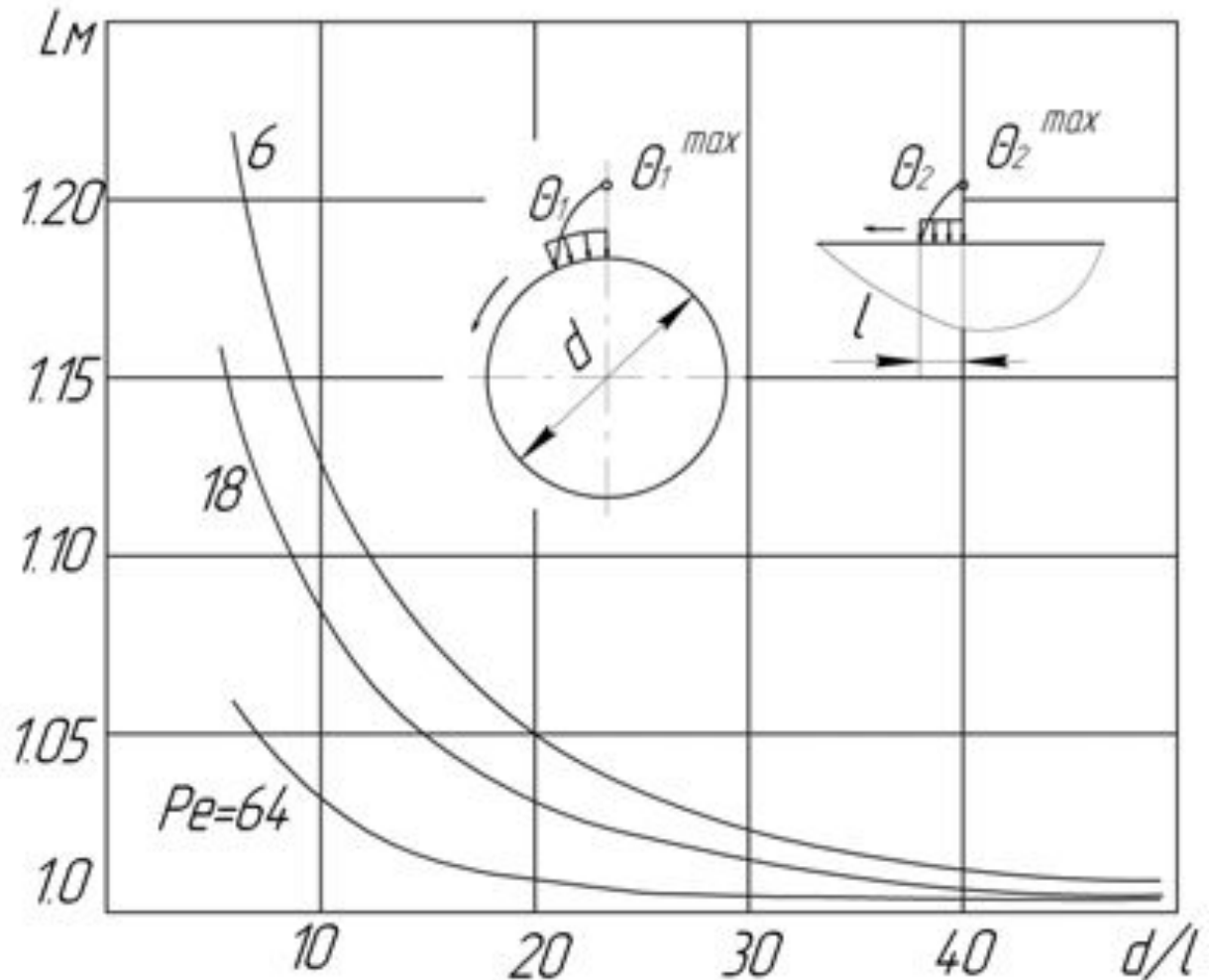
- 0 – неограниченное пространство;
- 1 – полупространство;
- 2- пластина;
- 3 – параллелепипед;
- 4 – неограниченный стержень;
- 5 – стержень (цилиндр) конечной длины;
- 6 – неограниченный клин с углом  $\beta$ ;
- 7 – шар

## Коэффициент формы одного тела по отношению к другому.

$$L_M = \frac{\theta_1^{max}}{\theta_2^{max}},$$

Для идеализации формы тел широко пользуются понятием пассивных поверхностей. **Пассивными** называют такие поверхности, температура которых и ее градиент в течение теплового процесса изменяются незначительно и этим изменением можно пренебречь. Пассивная граничная поверхность может быть отодвинута или придвинута на любое расстояние, также можно изменять и ее форму.

## Коэффициент формы тела



## Расчет температуры в зоне резания



Теплота в процессе резания определяется:

- внутренним трением между частицами обрабатываемого металла в процессе деформации;
- внешним трением стружки о переднюю поверхность резца;
- внешним трением обработанной поверхности о заднюю поверхность резца;
- смазочно-охлаждающей жидкостью.

$$T = T_o + T_\varepsilon + T_{n.n} + T_{з.п} + T_{СОЖ} + T_{стр}$$

где  $T_o$  – начальная температура (температура окружающей среды),  $T_o = 20 - 28 \text{ C}^\circ$ ;

$T_\varepsilon$  – температура в плоскости сдвига,  $\text{C}^\circ$ ;

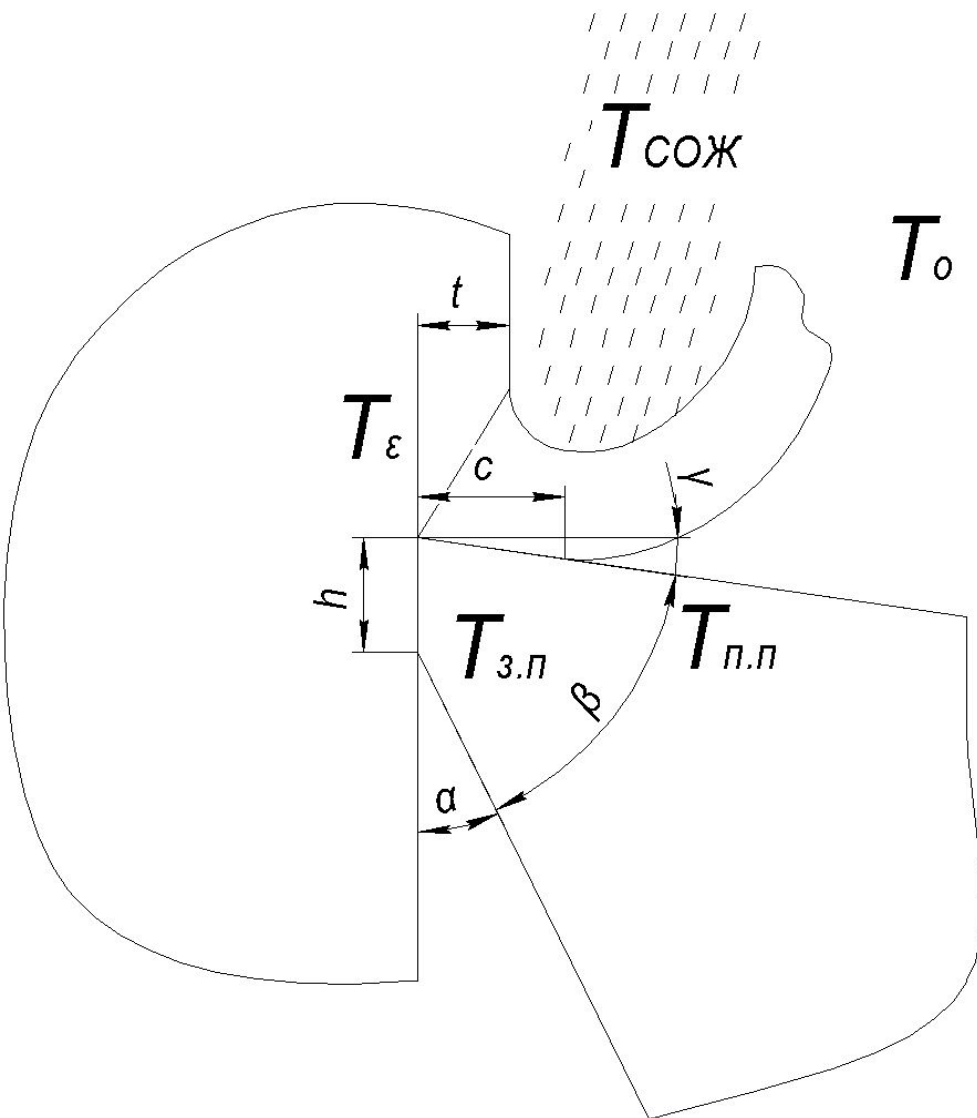
$T_{п.п}$  – температура на передней поверхности,  $\text{C}^\circ$ ;

$T_{з.п}$  – температура на задней поверхности,  $\text{C}^\circ$ ;

$T_{СОЖ}$  – температура от смазочно-охлаждающей жидкости,  $\text{C}^\circ$ ;

$T_{стр}$  – температура стружки,  $\text{C}^\circ$ .

## Расчетная схема резания



## Температура в плоскости сдвига

$$T_{\epsilon} = 0,8 \cdot \frac{S_B}{C_V} \cdot \epsilon$$

где  $S_B$  – действительный предел прочности обрабатываемого материала при растяжении –  $S_B = 0,95 \cdot (1 + \delta)$ ,  
 где  $\delta$  – относительное удлинение;  
 $C_V$  – удельная объемная теплопроводность, Дж/м<sup>3</sup>·С°;  
 $\epsilon$  – относительный сдвиг,  
 $\epsilon = (1 + 1/K - 2 \cdot \sin\gamma) / \cos\gamma$ ,  
 где  $\gamma$  – передний угол резца;  
 $K$  – коэффициент усадки стружки,  
 $K = \cos(\beta - \gamma) / \sin\beta$ ,  
 где  $\beta$  – угол режущего клина резца;  
 $\beta = 90^\circ - (\gamma + \alpha)$ , где  $\alpha$  – задний угол резца.



## Температура на передней поверхности

$$T_{n.n} = 0,45 \cdot \frac{c}{c+h} \cdot \frac{S_B}{C_V} \cdot \sqrt{\frac{V \cdot a}{\omega}}$$

где  $c$  – длина контакта стружки по передней поверхности резца, в общем случае  $c = (1 - 2) \cdot a$ ;  $V$  – скорость резания, с/м;  $a$  – толщина срезаемого слоя, мм;  
 $h$  – износ по задней поверхности, мм;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности, мм<sup>2</sup>/с.

## Температура на задней поверхности

$$T_{з.н} = 0,45 \cdot \frac{h}{c+h} \cdot \frac{\sigma_B}{C_V} \cdot \sqrt{\frac{V \cdot h}{\omega}}$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности обрабатываемого материала на разрыв, МПа;  $h$  – износ по задней поверхности, мм.

## Температура от СОЖ

$$T_{\text{СОЖ}} = \frac{t \cdot S \cdot G \cdot (T_1 - T_2) \cdot C_{\text{СОЖ}} \cdot \rho_{\text{СОЖ}}}{F_{\text{соп}} \cdot 3600}$$

где  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $G$  – расход СОЖ, л/мин;  
 $T_1$  – начальная температура СОЖ, С°; в общем случае  $T_1 = T_0$ ;  
 $T_2$  – конечная температура СОЖ, С°; в общем случае  $T_2 = T_0 + T_{\varepsilon} + T_{п.п} + T_{з.п}$ ;  
 $C_{\text{СОЖ}}$  – удельная теплоёмкость СОЖ, кДж/кг·С°;  $\rho_{\text{СОЖ}}$  – плотность СОЖ, кг/м<sup>3</sup>;  
 $F_{\text{соп}}$  – площадь сопла, мм<sup>2</sup>.

$$T_{\text{стр}} = \frac{\alpha_0 [(1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cdot \cos \gamma)]}{E \cdot c \cdot \rho_{\text{стр}} \cdot \xi} \cdot \frac{P_z}{a \cdot b}$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент, учитывающий потерю теплоты на скрытую энергию деформации (принимается  $\alpha_0 = 0,95$ );  $\beta_0$  – коэффициент, учитывающий переход части тепла в изделие (по Вейнеру:  $\beta_0 = 0,1$  при  $V = 100$  м/мин,  $\beta_0 = 0,05$  при  $V = 300$  м/мин);  $\mu_0$  – коэффициент трения стружки;  $\xi$  – коэффициент усадки стружки;  $c$  – теплоёмкость нагретой стружки, ккал/кгс·°С;  $\rho_{\text{стр}}$  – плотность стружки, кгс/мм<sup>3</sup>;  $a$  – толщина среза, мм;  $b$  – ширина среза, мм;  $E$  – модуль упругости материала стружки, кгс/мм<sup>2</sup>;  $P = P_z/a \cdot b$  – удельная сила резания, кгс/мм<sup>2</sup>;

При расчете температуры в зоне резания при обработке ст. 45 ( $\sigma_B = 600$  МПа;  $\delta = 0,3$ ;  $CV = 6,11$  Дж/м<sup>3</sup>·С°;  $\omega = 31$  мм<sup>2</sup>/с), резцом ( $\gamma = 10^\circ$ ;  $\beta = 70^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ), при режимах  $V = 400$  м/мин;  $t = 2$  мм;  $S = 0,25$  мм/об; с применением СОЖ  $G = 50$  л/мин;  $T_1 = T_0 = 20^\circ$ ;  $ССОЖ = 4,184$  Дж/кг·С°;  $\rho_{СОЖ} = 998$  кг/м<sup>3</sup>;  $F_{сop} = 78,5$  мм<sup>2</sup>;  $h = 0,1$  мм получено значение – 185,8 °С, реально полученные значения находятся в диапазоне – 170-200 °С. Рассчитанная температура в зоне резания ст. 45 без применения СОЖ имеет значение 590,1 °С, реально полученные значения находятся в диапазоне – 570-610 °С.

## Эмпирические зависимости расчет температуры



### Тепловые явления

#### Виды температур

1. **Мгновенная контактная температура** непосредственно в зоне контакта рабочей части режущего инструмента и обрабатываемой поверхности. Эта температура наиболее высокая и может достигать температуры плавления материала детали, о чем свидетельствуют исследования. 1000 – 1300 °С
2. **Контактная температура** образуется непосредственно в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой. Данная температура является результатом суммарного теплового воздействия режущего клина и теплоотвода в тело детали и окружающую среду. 600 – 800 °С
3. **Средняя температура** нагрева всей обрабатываемой поверхности заготовки обычно составляет 50 – 150 °С. Эта температура определяет тепловые деформации и, таким образом, влияет на геометрическую точность обрабатываемой детали.

## Уравнение теплового баланса

$$P_z \cdot V_{рез} / 60 \cdot 75 = Q_d + Q_{p.u.} + Q_c + Q_{o.c.}$$

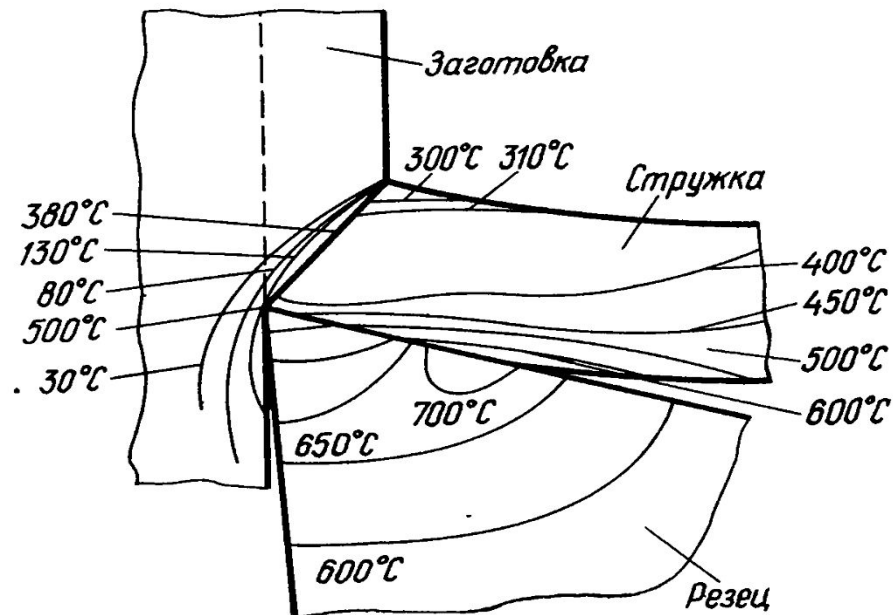
где  $Q_d$  – теплота, переходящая в обрабатываемую деталь;

$Q_{p.u.}$  – теплота, переходящая в режущий инструмент;

$Q_c$  – теплота, переходящая в стружку;

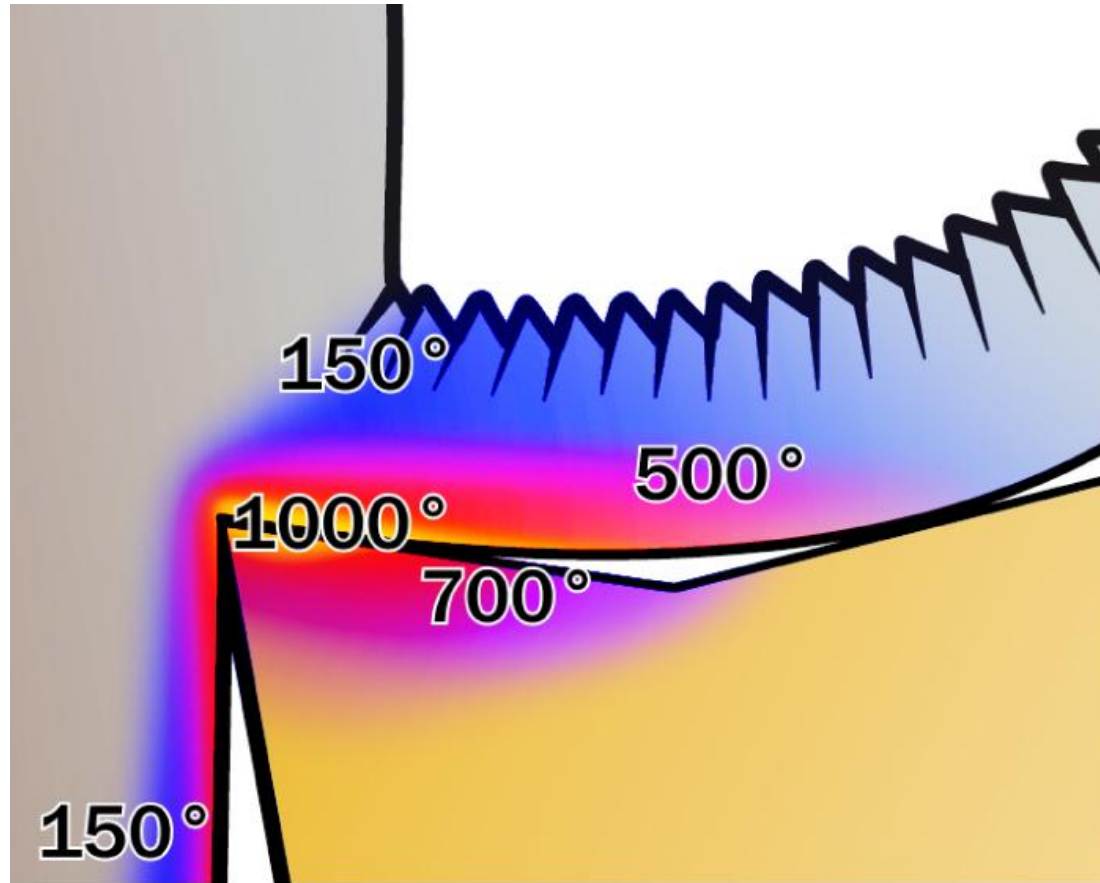
$Q_{o.c.}$  – теплота, уносимая окружающей средой, например СОЖ.

### Температурное поле в зоне резания

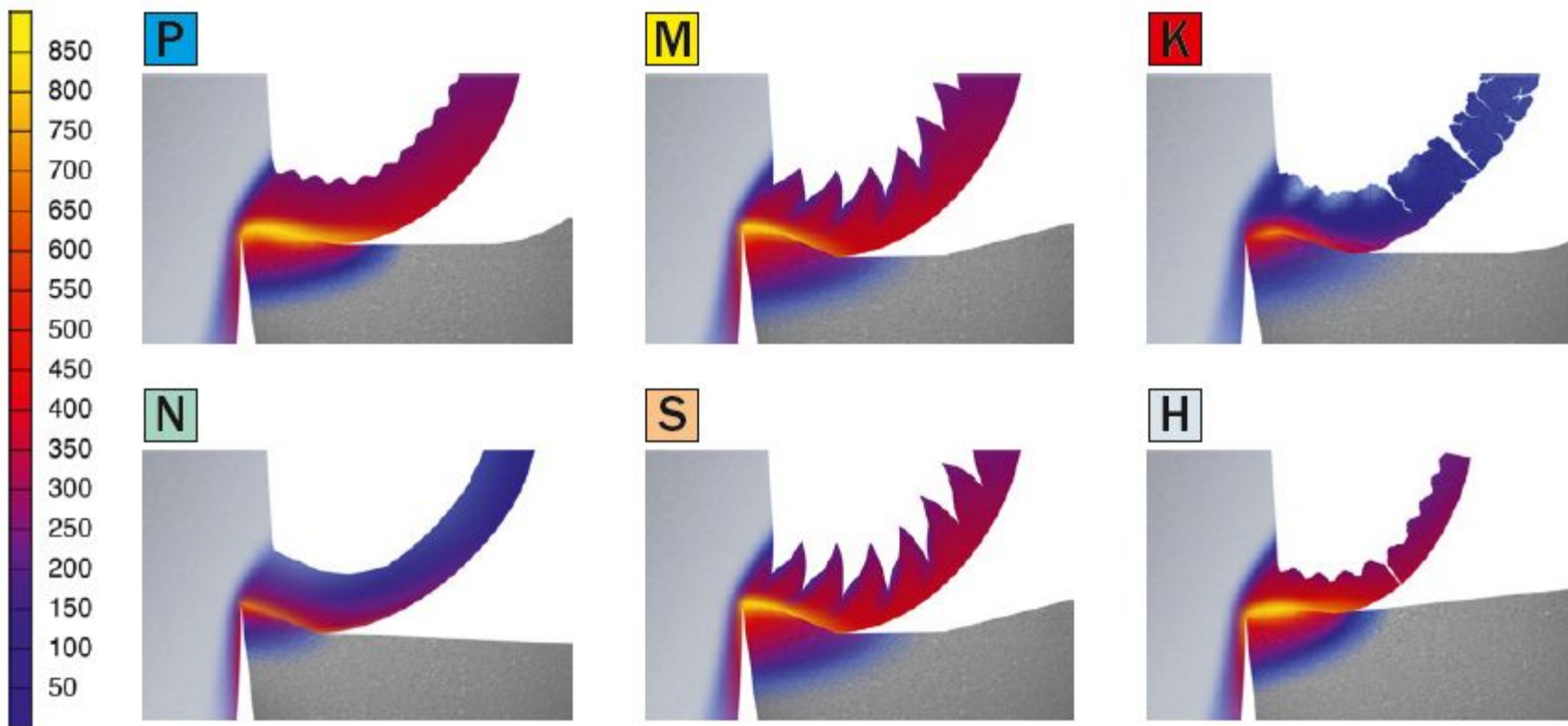


# Формирование стружки под влиянием высокой температуры и давления

## Выбор инструментального материала

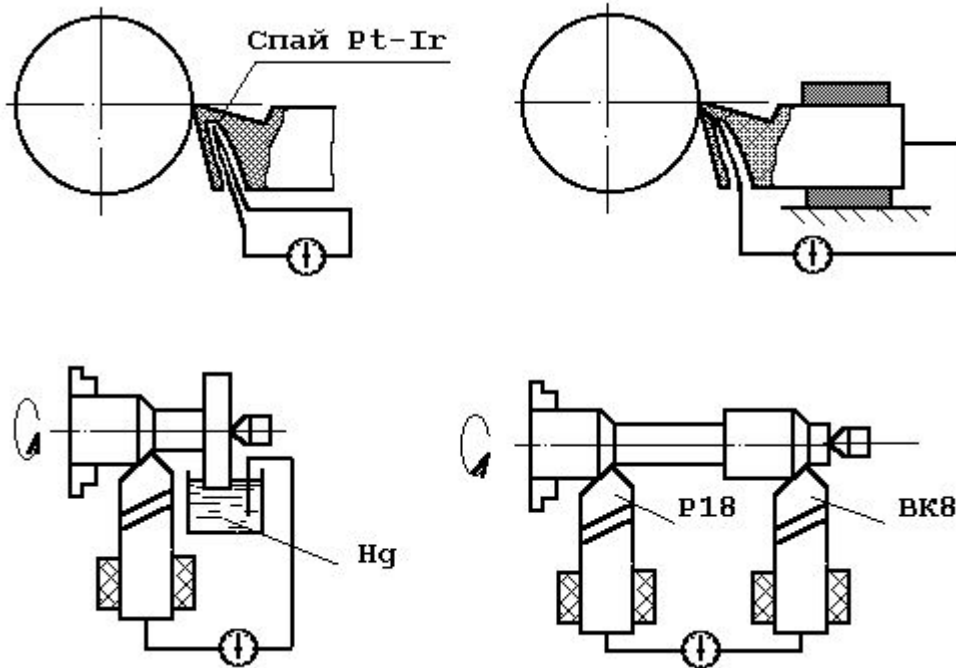


# Формирование стружки для различных групп материалов

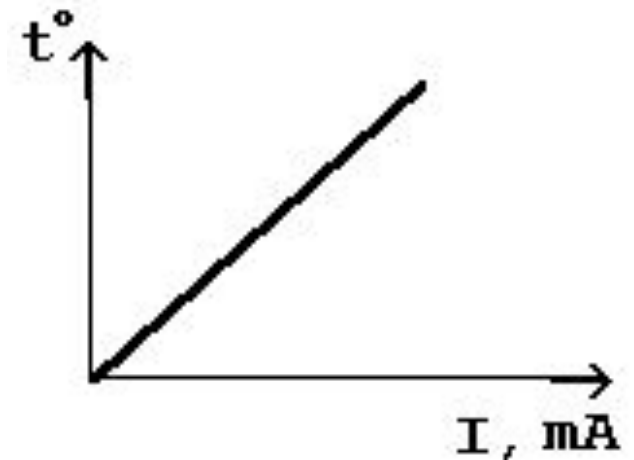


# Методы измерения температуры

1. Метод искусственной термопары
2. Метод полуискусственной термопары
3. Метод естественной термопары
4. Метод двух резцов.



## Тонировочный график





## Экспериментальные методы определения температуры

$$Q = C_Q \cdot t^{X_Q} \cdot S^{Y_Q} \cdot V^{Z_Q}$$

где  $Q$  – теплота при резании, С;

$C_Q$  – константа для условий резания;

$t$  – глубина резания, мм;

$S$  – подача, мм/об;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$X_Q$ ,  $Y_Q$ ,  $Z_Q$  – показатели степени.

$$X_Q = 0,1 \dots 0,2$$

$$Y_Q = 0,2 \dots 0,25$$

$$Z_Q = 0,4 \dots 0,6$$

## Обрабатываемость

На обрабатываемость материала влияет три основных фактора.

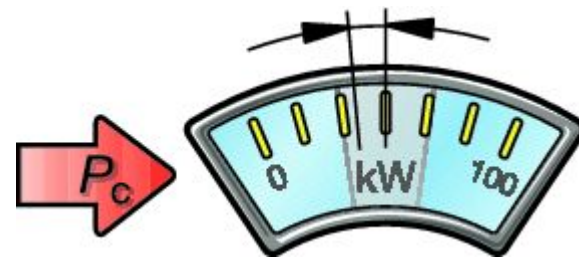
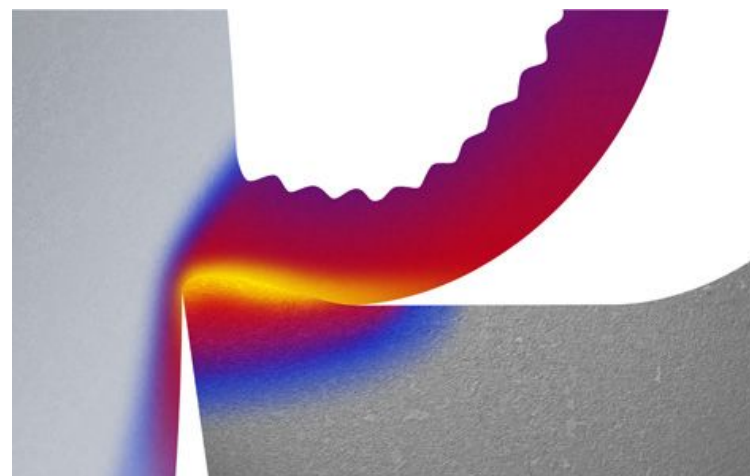
1. Классификация обрабатываемого материала с точки зрения металлургии/механики.
2. Микро- и макро геометрия режущей кромки.
3. Материал режущего инструмента (марка сплава), например, твёрдый сплав с покрытием, керамика, CBN, PCD и пр.

# Р

## Сталь

### Определение

- Сталь - самая крупная по составу группа обрабатываемых материалов.
- Сталь может быть незакалённой, закалённой или отпущенной и иметь твёрдость до 400 НВ. Стали твёрдостью в пределах от 48 до 65 HRC относятся к группе ISO H.
- Сталь - это сплав, основным компонентом которого является железо (Fe).
- Нелегированные стали содержат менее 0,8% углерода, остальную часть составляет железо без добавления легирующих элементов.
- Легированные стали содержат до 1,7% углерода, а также в их состав входят такие элементы как Ni, Cr, Mo, V и W.
- В низколегированных сталях содержание легирующих элементов составляет менее 5%.
- В высоколегированных сталях содержание легирующих элементов превышает 5%.

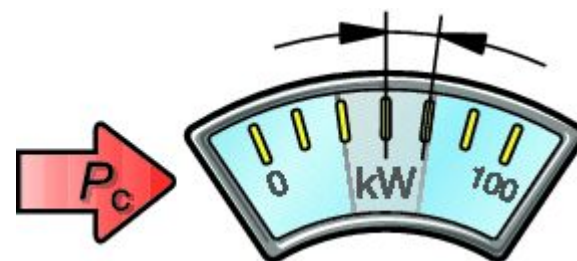
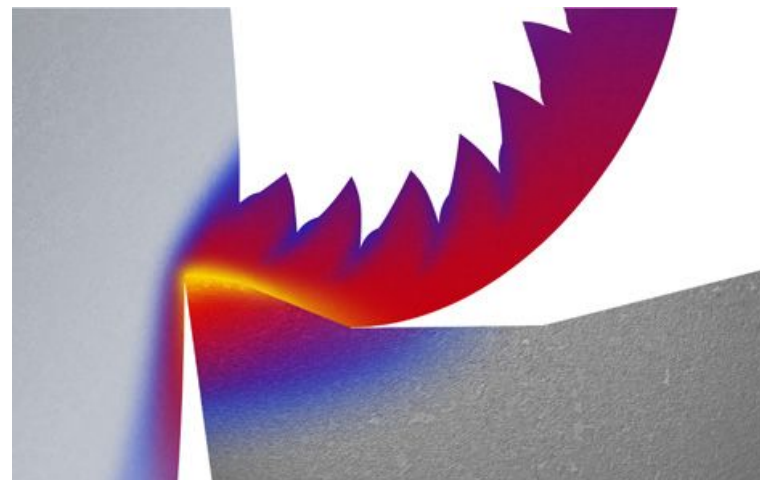


- Удельная сила резания  $kc_1 = 1400-3100$  Н/мм.
- Сила резания и, соответственно, необходимая для обработки мощность находятся в пределах ограниченного диапазона.

## **М** Нержавеющая сталь

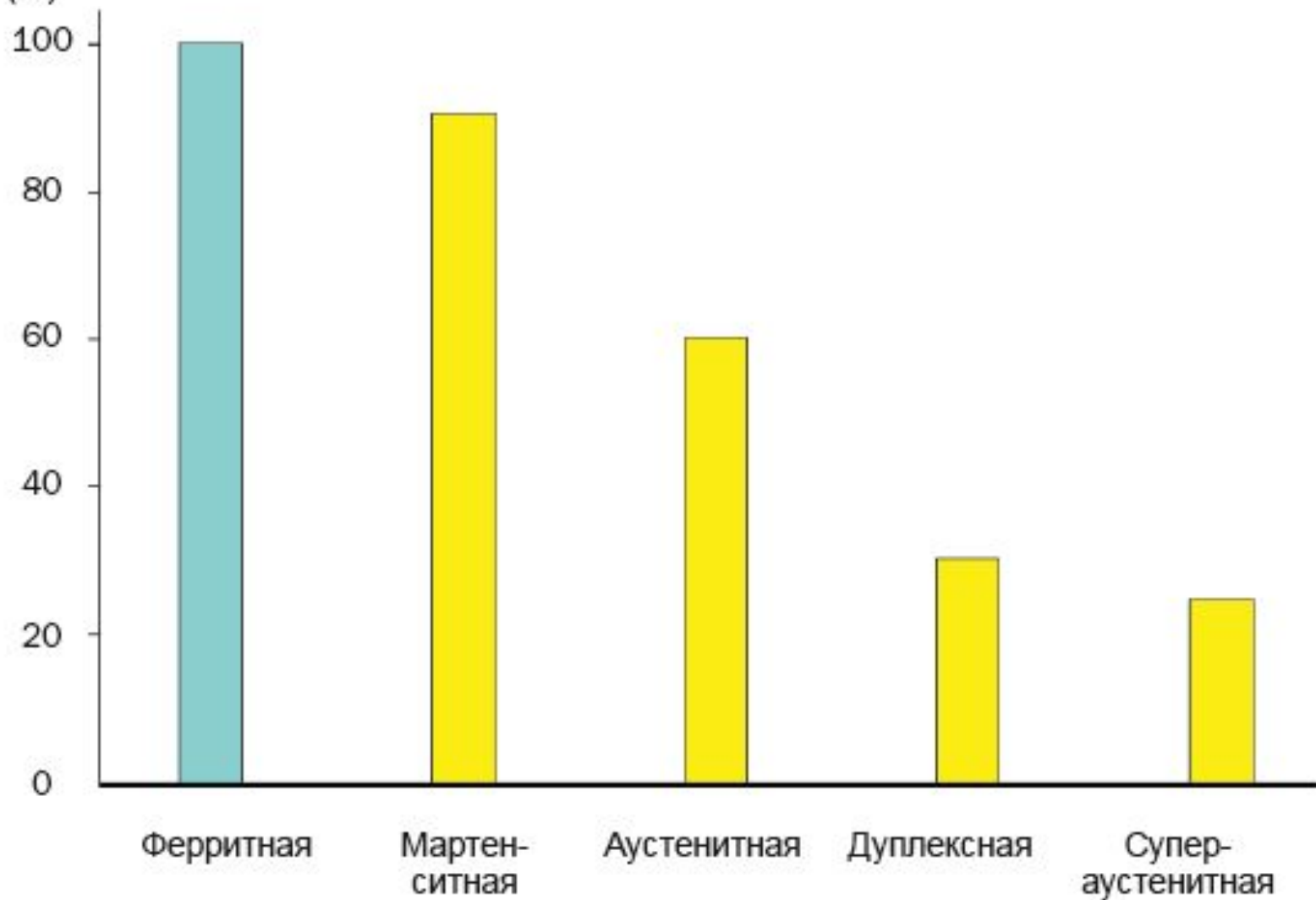
### Определение

- Сплав на основе железа как основного компонента (Fe).
- Содержание хрома превышает 12%.
- Как правило, с низким содержанием углерода ( $C \leq 0,05 \%$ ).
- Добавление элементов, таких как никель (Ni), хром (Cr), молибден (Mo), ниобий (Nb) и титан (Ti) определяет разные эксплуатационные свойства сплава, например, стойкость к коррозии или прочность при высоких температурах.
- Хром при взаимодействии с кислородом (O) образует пассивирующий слой  $Cr_2O_3$  на поверхности стали, что придает ей стойкость к коррозии.

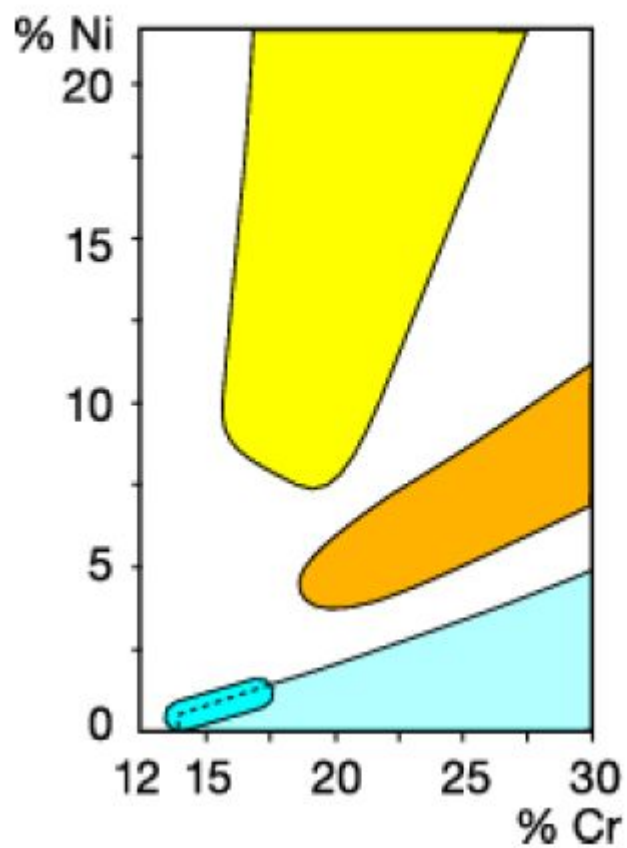






- Материал, дающий сливную стружку.
- Удельная сила резания: 1800-2850 Н/мм<sup>2</sup>.
- Механическая обработка нержавеющей сталей характеризуется значительными усилиями резания, наростообразованием на кромке, а также наблюдается упрочнение поверхностного слоя.
- Сера (S) повышает обрабатываемость нержавеющей стали.

Относительная обрабатываемость  
(%)



## Определение группы материалов



-  Аустенитная сталь
-  Аустенитно-ферритная (дуплексная) сталь
-  Ферритно-хромистая сталь
-  Мартенситно-хромистая сталь

# К Чугун

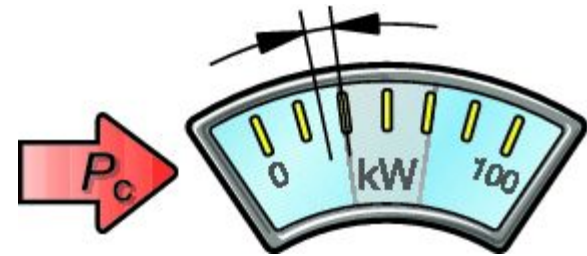
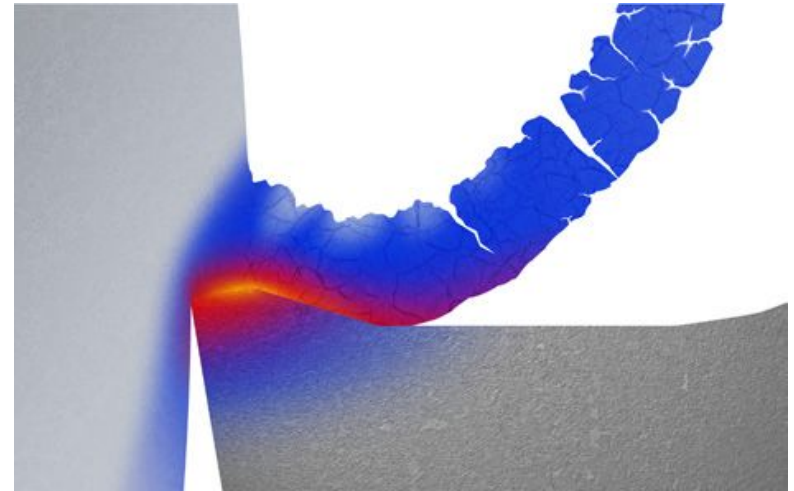
## Определение

Существует 5 основных типов чугуна:

- Серый чугун (GCI),
- Ковкий чугун (MCI),
- Чугун с шаровидным графитом (NCI),
- Чугун с вермикулярным графитом (CGI)
- Отпущенный ковкий чугун (ADI).

Чугун - это сплав железа с углеродом и относительновысоким содержанием кремния (1-3%). Содержание углерода в чугуне превышает 2%, что является максимальной растворимостью углерода в аустенитной фазе. Хром (Cr), молибден (Mo) и ванадий (V) образуют карбиды, придающие прочность и твёрдость, но ухудшающие обрабатываемость чугуна.

- При обработке чугуна не возникает трудностей со стружкодроблением, так как образуется короткая сыпучая стружка. Удельная сила резания: 790 – 1350 Н/мм<sup>2</sup>.
- При обработке на высокой скорости, особенно чугунов с включениями песка, происходит абразивный износ инструмента.
- Чугуны NCI, CGI и ADI требуют особого внимания из-за разных механических свойств и наличия графита в матрице в отличие от обычного чугуна GCI.
- Чугуны часто обрабатывают пластинами без задних углов, имеющими прочные кромки и надёжными в применении.



# N

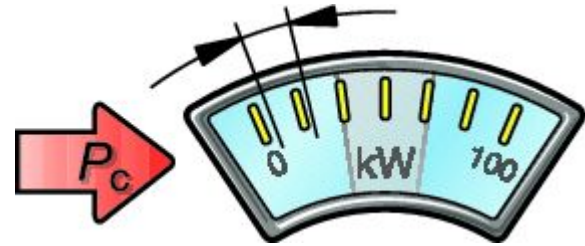
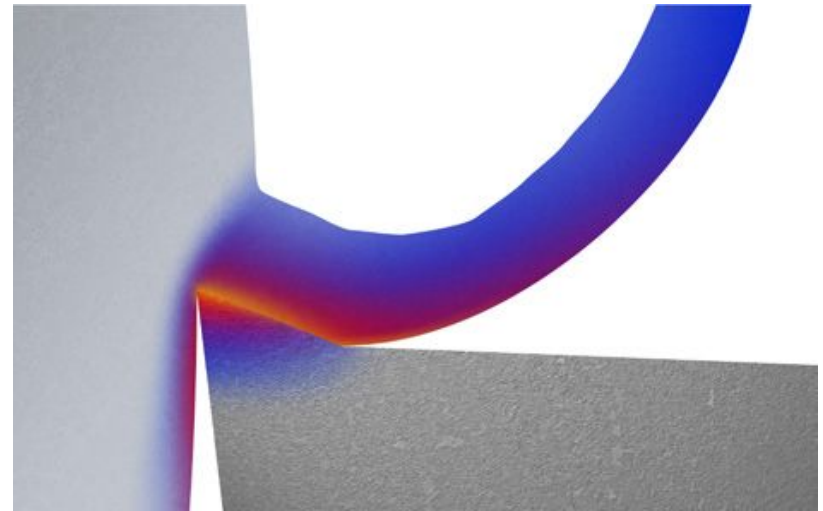
## Цветные металлы

Определение:

- В эту группу входят цветные, мягкие металлы твёрдостью до 130 НВ, кроме высокопрочной бронзы (>225НВ).
- Сплавы алюминия (Al) с содержанием кремния (Si) до 12-13% - самая крупная подгруппа.
- MMC: композитный материал с металлической матрицей, Al + SiC (20-30%).
- Сплавы на основе магния
- Медь, электролитическая медь (99,95% Cu).
- Бронза: сплав меди с оловом (Sn) (10-14%) и/или алюминием (3-10%).
- Латунь: сплав меди (60-85%) с цинком (Zn) (15-40%).

Обрабатываемость алюминия

- Материал, дающий длинную стружку.
- Относительно хорошее стружкодробление при условии легирования.
- Чистый алюминий вязок и требует острых режущих кромок и высокой скорости резания  $v_c$ .
- Удельная сила резания: 350–700 Н/мм<sup>2</sup>.
- Усилия резания и, соответственно, мощность, необходимая для резания, небольшие.
- При содержании кремния до 7-8% можно обрабатывать мелкозернистыми твёрдыми сплавами без покрытия, а при большем содержании кремния - сплавами с вставками из PCD для алюминия.
- Алюминий с содержанием кремния >12% очень абразивен.

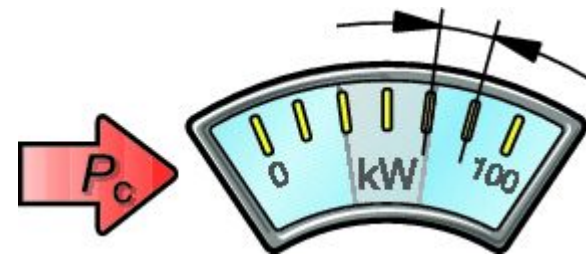
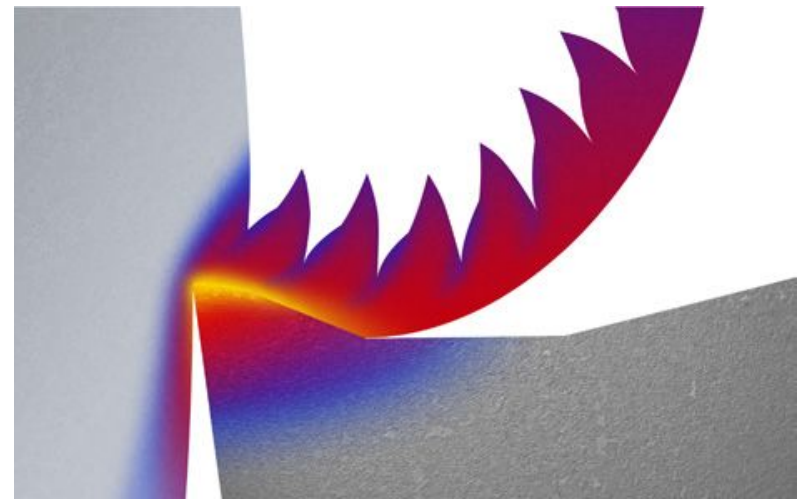




## S Жаропрочные сплавы (HRSA) и титан

### Определение

- Группу ISO S можно разделить на жаропрочные сплавы (HRSA) и титан.
- Жаропрочные сплавы HRSA можно подразделить на 3 категории: сплавы на основе никеля, железа и кобальта.
- Условия обработки: отжиг, химико-термическая обработка, старение, прокатка,ковка, литьё.
- Свойства: повышенное содержание легирующих элементов (кобальта больше, чем никеля) обеспечивает повышенную жаропрочность, прочность на растяжение и стойкость к коррозии.

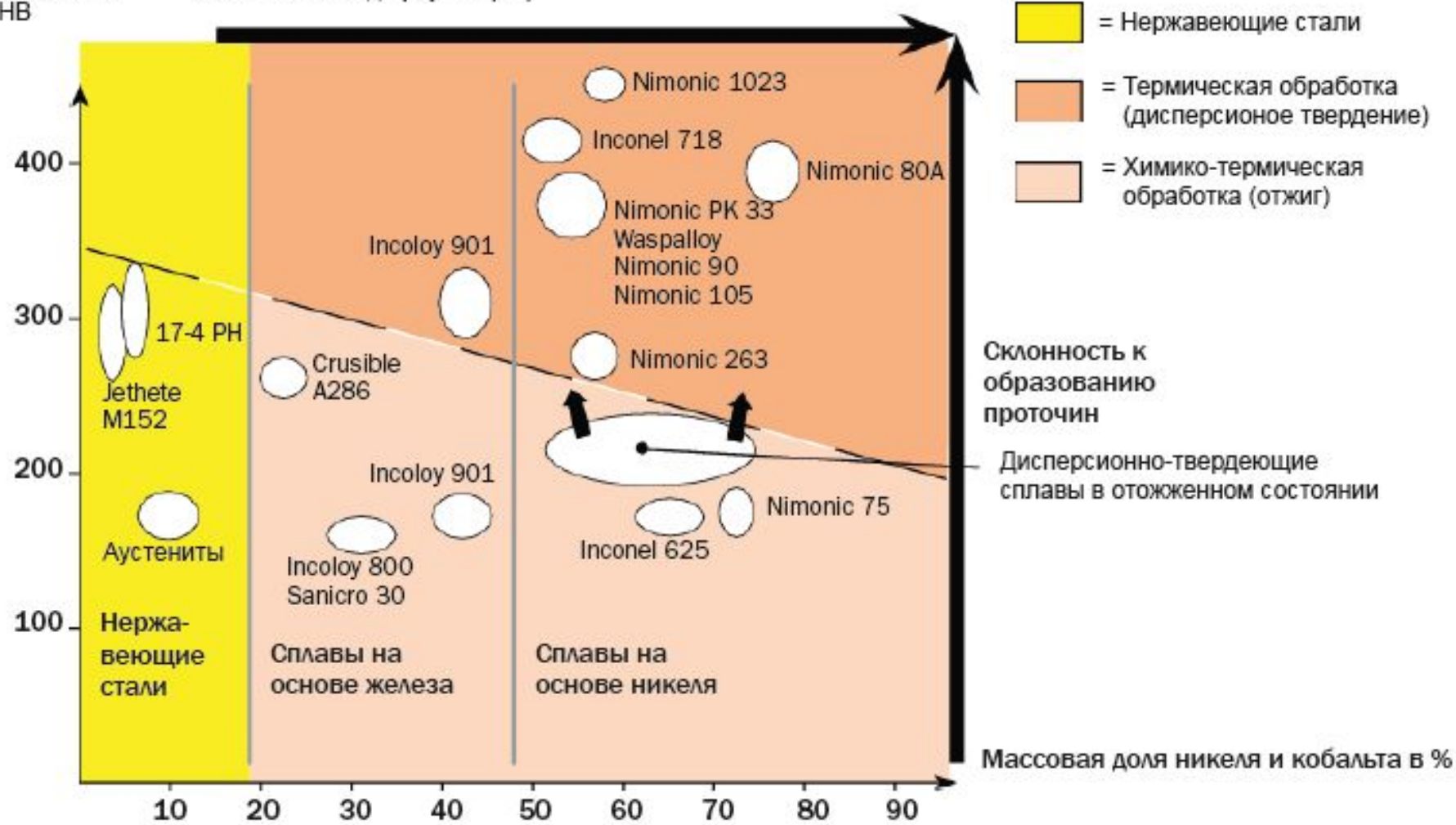


### Обрабатываемость в целом

- Физические свойства и поведение при обработке отдельных сплавов значительно отличаются, как в силу химических свойств сплава, так и конкретной металлургической обработки в процессе изготовления.
- Особенно большое влияние на обрабатываемость оказывают отжиг и старение.
- Затруднённый стружкоотвод (сегментная стружка).
- Удельная сила резания: 2400-3100 Н/мм<sup>2</sup> у жаропрочных сплавов и 1300-1400 Н/мм<sup>2</sup> у титана.
- Усилия резания и требуемая мощность довольно высокие.

Выделение тепла во время резания (склонность к пластической деформации)

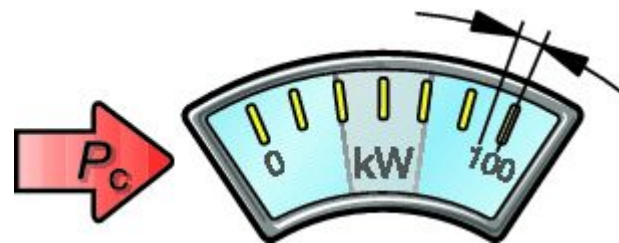
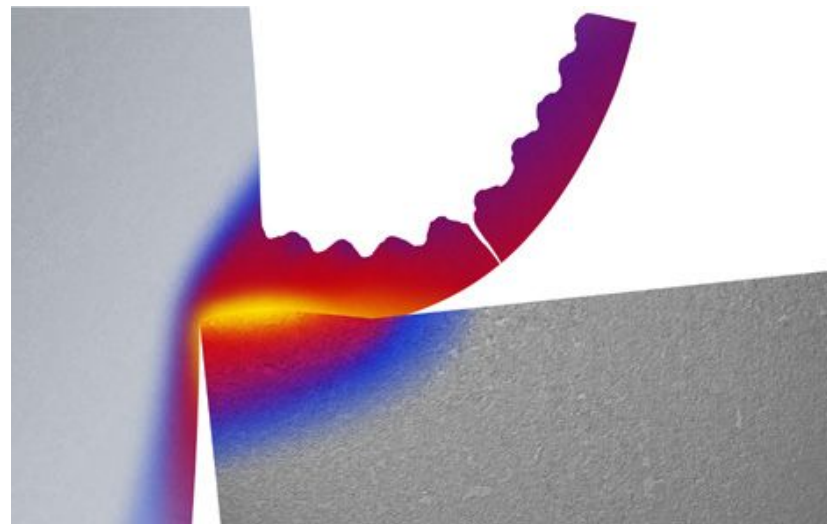
Твёрдость, НВ



## Н Закалённая сталь

### Определение

- К этой группе материалов относятся закалённые сорта стали твёрдостью  $>45 - 68$  HRC.
- Наиболее распространены цементованная сталь ( $\sim 60$  HRC), подшипниковая сталь ( $\sim 60$  HRC) и инструментальная сталь ( $\sim 68$  HRC). Также к этой группе относятся высокопрочные чугуны - белый ( $\sim 50$  HRC) и ADI/Куменит ( $\sim 40$  HRC). В эту группу входят также конструкционная сталь ( $40-45$  HRC), марганцевая сталь, стеллит, сталь, полученная порошковой металлургией.
- Обычно токарная обработка твёрдых деталей попадает в диапазон  $55 - 68$  HRC.



### Обрабатываемость

- Закалённые стали реже других подвергаются механообработке и наиболее распространенным её видом являются чистовые операции. Удельная сила резания:  $2550 - 4870$  Н/мм<sup>2</sup>. Обработка, как правило, сопровождается удовлетворительным отводом стружки. Силы резания и мощность, затрачиваемая на резание, довольно высоки.
- Материал режущего инструмента должен иметь высокую стойкость к пластической деформации (сохранять твёрдость при высокой температуре), высокую химическую стойкость (при высокой температуре), механическую прочность и стойкость к абразивному износу. Всеми вышеперечисленными свойствами обладает кубический нитрид бора, применение которого позволяет заменить шлифование токарной обработкой.

**Спасибо  
за внимание!**