ОмГТУ

кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

Теплофизика процесса резания

Титов Юрий Владимирович

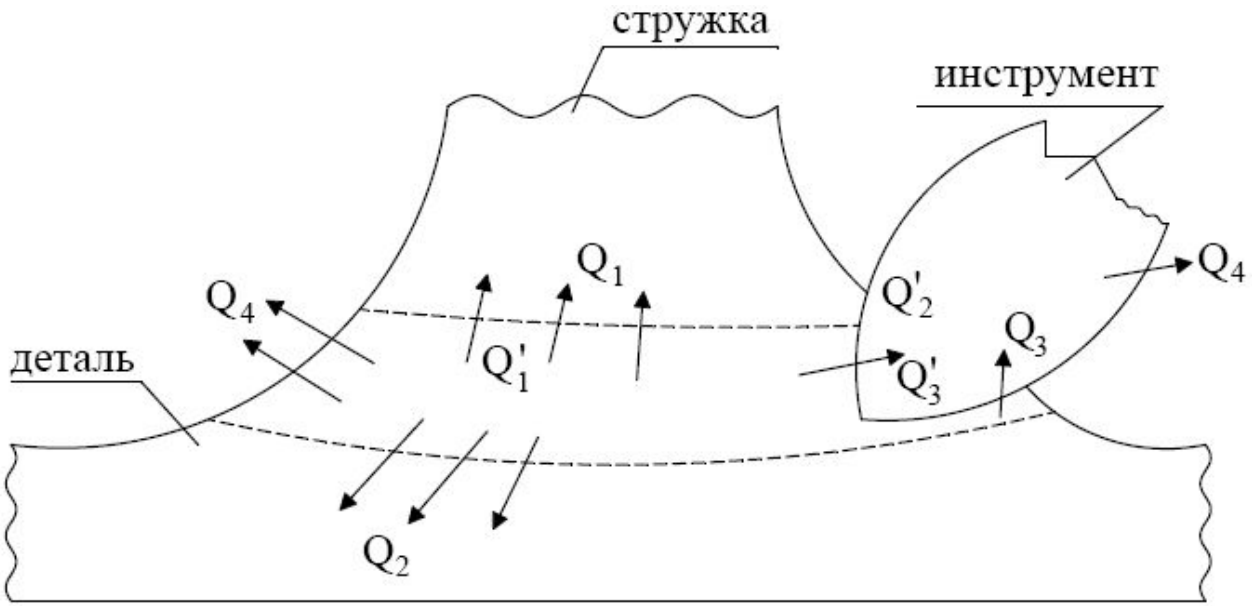
Физическая модель. Балансовые соотношения

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 *Q1'* – количество теплоты, эквивалентное энергии, затраченной на деформирование и разрушение при стружкообразовании поверхностного слоя;
Q2' – количество теплоты, эквивалентное работе сил трения при контакте передней поверхности лезвия и деформированного материала;
Q3' – количество теплоты, эквивалентное работе сил трения на задней поверхности лезвия при переходе деформированного материала в поверхностный слой изделия;
Q1 – количество теплоты, уходящее в стружку;
Q2 – количество теплоты, уходящее в деталь;
Q3 – количество теплоты, уходящее в инструмент;
Q4 – 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:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (tж - tm)$$

где F – поверхность теплоотдачи, м2;

$tж$, tm – температуры жидкости и тела, К или °С;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м2 · К).

$\alpha = Q / F \cdot (tж - tm)$.

Коэффициент теплоотдачи α представляет собой количество тепла, отдаваемое или воспринимаемое единицей поверхности теплоотдачи F при разности температур между жидкостью и стенкой *1К*. Коэффициент теплоотдачи α 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 δ уменьшается, следовательно, α. возрастает.

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

Влияние плотности ρ. 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 λ находится в прямой связи с коэффициентом теплоотдачи. С ростом λ растет и α.

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

Плотность теплового потока, излучаемого нечерными телами, оценивается формулой:

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

где ε – 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:

$$Q_{12} = \sigma_{пр.} \cdot F \cdot (T1^{4} - T2^{4}),$$

где *F* – взаимная поверхность облучения, $м^2$; $\sigma_{пр}$ – приведенная константа излучения, $Вт/(м^2 \cdot К^4)$; *T1*, *T2 – 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, $м^2$; V – объем, $м^3$; 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:

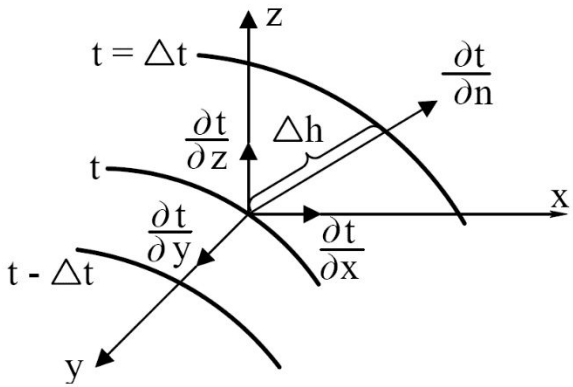
$$t = t \cdot (x, y, z, \text{т}),$$

где x, y, z – координаты отдельной точки тела; т – 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.



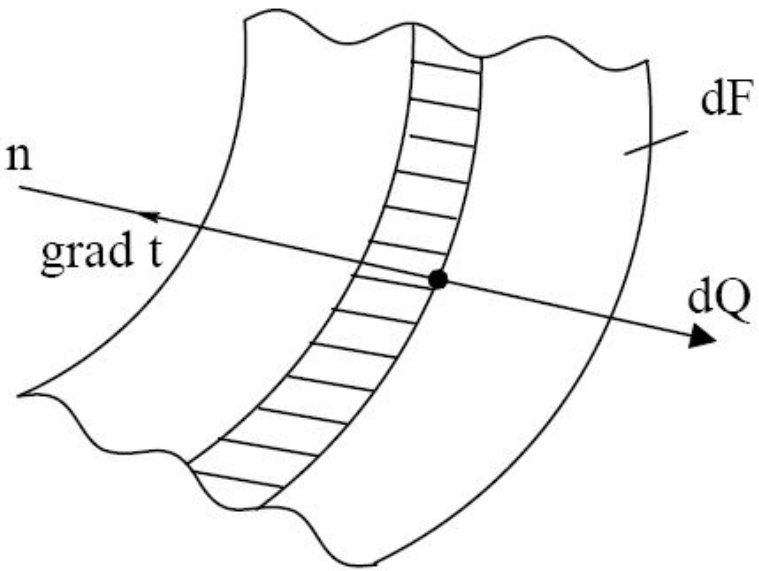
$$grad\ t = \lim_{\Delta n \to 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n}.$$

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*т пропорционально *grad t*



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

где λ – 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:

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

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

Коэффициент теплопроводности λ характеризует физические свойства материала.

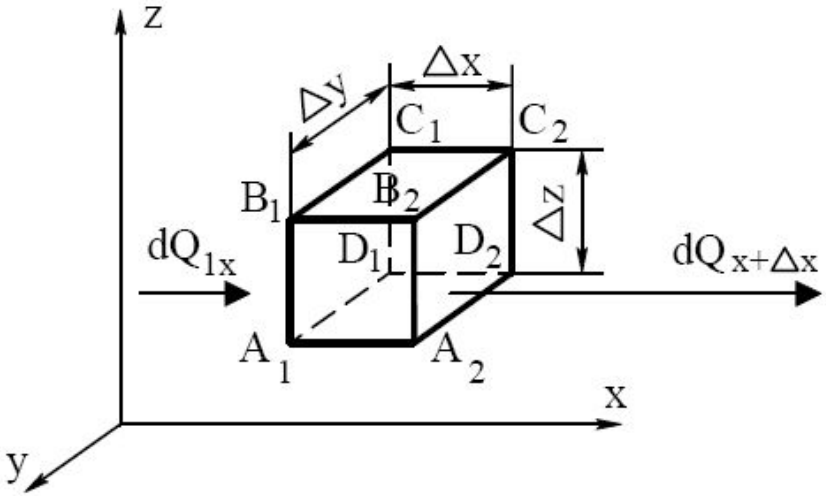
$$\lambda = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau \cdot \left(-\frac{\partial t}{\partial n}\right)}.$$

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 ΔV, где $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$.



На основании закона изменения внутренней энергии

$$dU = dQ1 + dQ2 ,$$

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

$dQ1$ – количество теплоты, поступившее в этот объем путем теплопроводности;

$dQ2$ – количество теплоты, возникшее в объеме ΔV 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 *dQ1* и *dQ2* 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),*
ρ – плотность вещества, *кг/ м*^{3}*.*

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

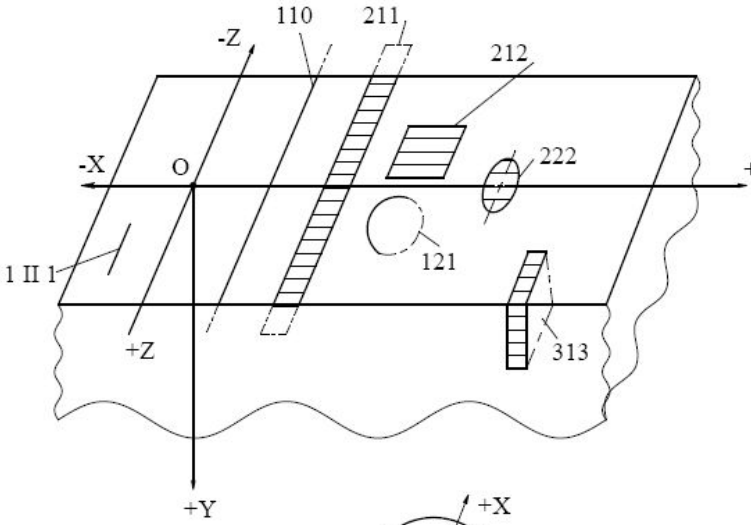
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t,$$

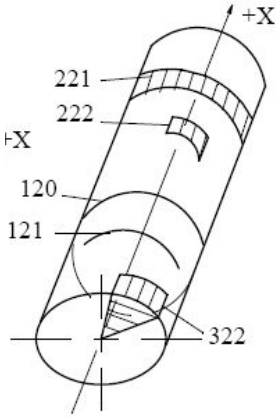
где ∇^3 – оператор Лапласа.
λ/c · ρ = *a* – коэффициент температуропроводности данного вещества.

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
М	Точечный: одно-, двух- и трехмерный.	0; 1; 2; 3
К	Прямой, плоский (полосовой, прямоугольный), призматический.	1
	Кольцевой, круговой, цилиндрический.	2
	Шаровый	3
О	Неограниченный: ограниченный по направлению одной, двух или трех осей координат	0; 1; 2; 3
Р	Распределенный равномерно	1
	Распределенный линейно	2; 3
	Распределенный по экспоненте	4
	Нормально распределенный несимметричный	5; 6
	Нормально распределенный симметричный	7
	Комбинированный	8
С	Неподвижный; движущийся; быстродвижущийся	0; 1; 2
Д	Мгновенный, действующий некоторое время; действующий длительно (процесс установился)	0; 1; 2
Т	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
У	Граничные условия 1.2.3.4- го рода	1.2.3.4

где *М* – мерность: *К* – конфигурация: *О* – ограниченность источника теплоты; *Р* – закон распределения источника; *С* – его скорость; *Д* – длительность функционирования; *Т* – форма тела, на котором действует источник; *У* – 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.

$$q_O = \frac{Q}{\int_L dx} = \frac{Q}{L} (Дж/(м \cdot с)).$$

б. Следующую группу представляют источники с линейно распределенной интенсивностью.

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

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

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

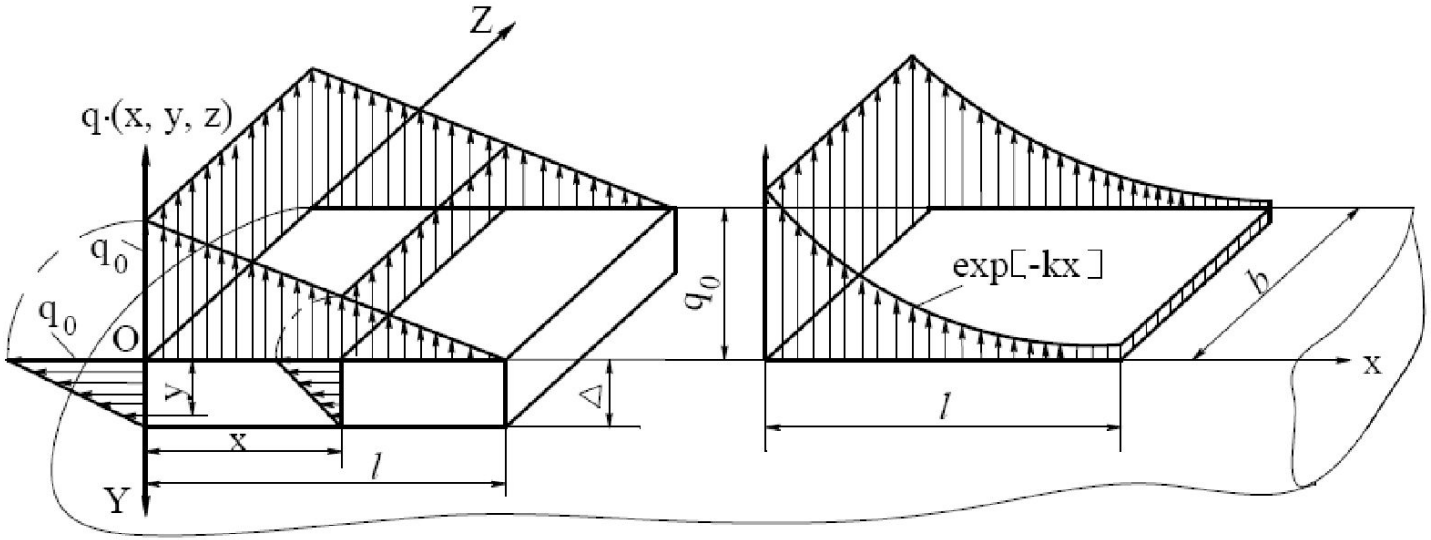
$$q \cdot (x, y, z) = q_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{\ell}\right)\left(1 - \frac{y}{\Delta}\right)$$

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.

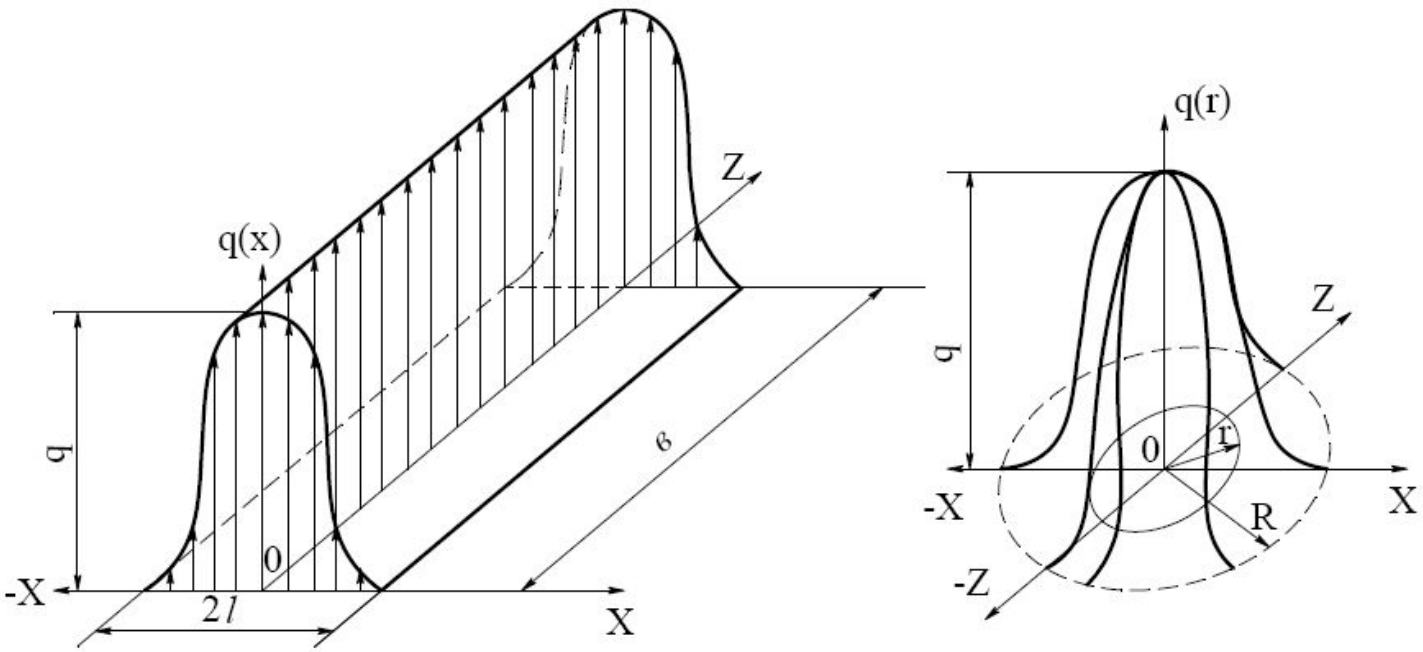


Источники с распределением интенсивности по **линейному** и **экспоненциальному** законам

Нормально-круговой двумерный источник описывается уравнением

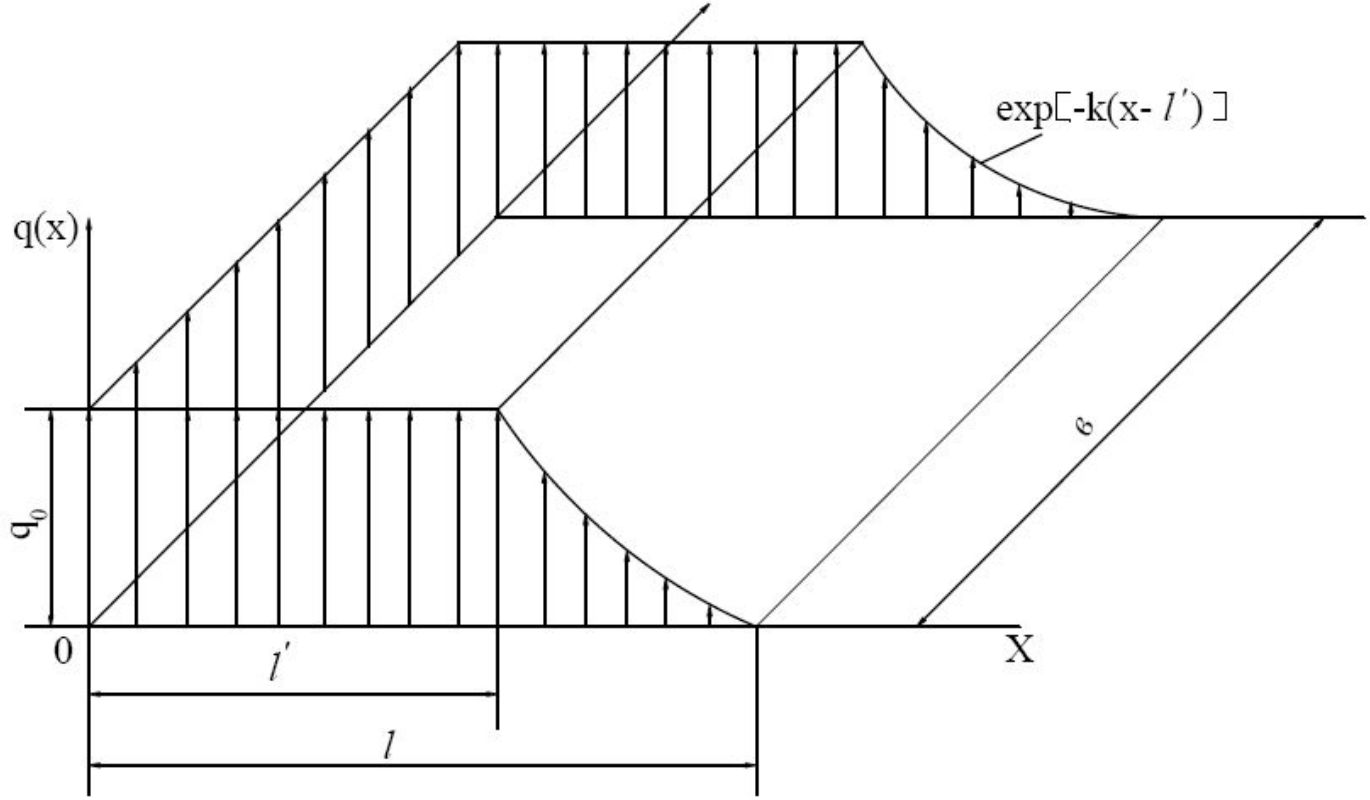
$$q(r) = \frac{3Q}{\pi R^2} \cdot exp \cdot \left[-3\rho^2 \right]$$

Где ρ = *r/ R* – безразмерный текущий радиус.



Нормально распределенные источники: полосовой и круговой

Источник с комбинированным законом распределения



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

где $\psi = \frac{x}{\ell}$; $\varepsilon = \frac{\ell'}{\ell}$.

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; ℓ – характерный линейный размер; a – коэффициент температуропроводности.

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

По времени функционирования источники можно разделить на:
1) мгновенные (Fo → 0);
2) действующие в течение конечного промежутка времени;
3) действующие периодически;
4) действующие столь длительное время, что процесс теплообмена можно считать стационарным.

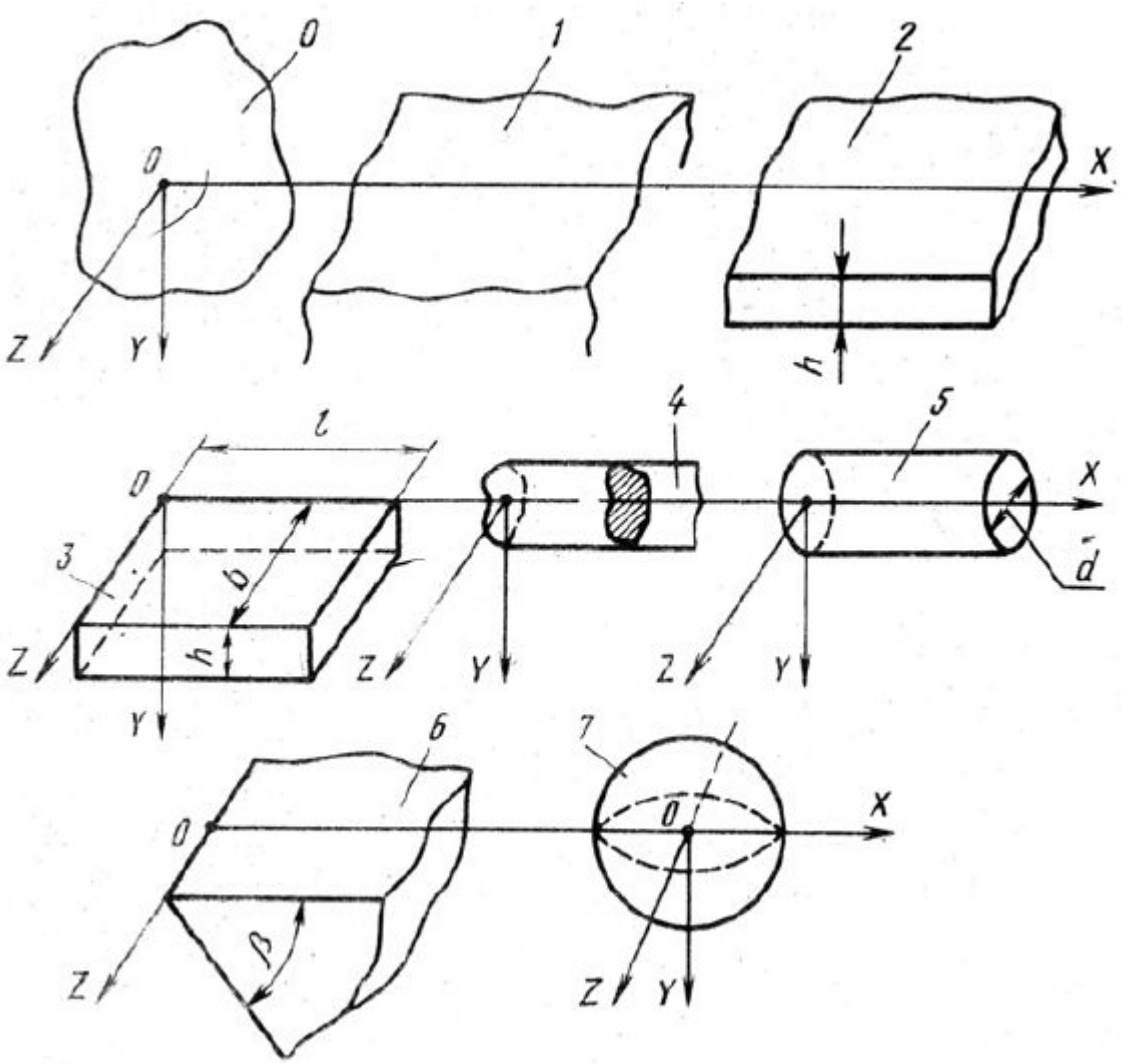
Общие принципы схематизации тел и источников, участвующих в теплообмене при механической обработке материалов

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, том меньше влияние конкретной формы тела на температурное поле в области, прилежащей к источнику.

Идеализированные формы твердых тел:

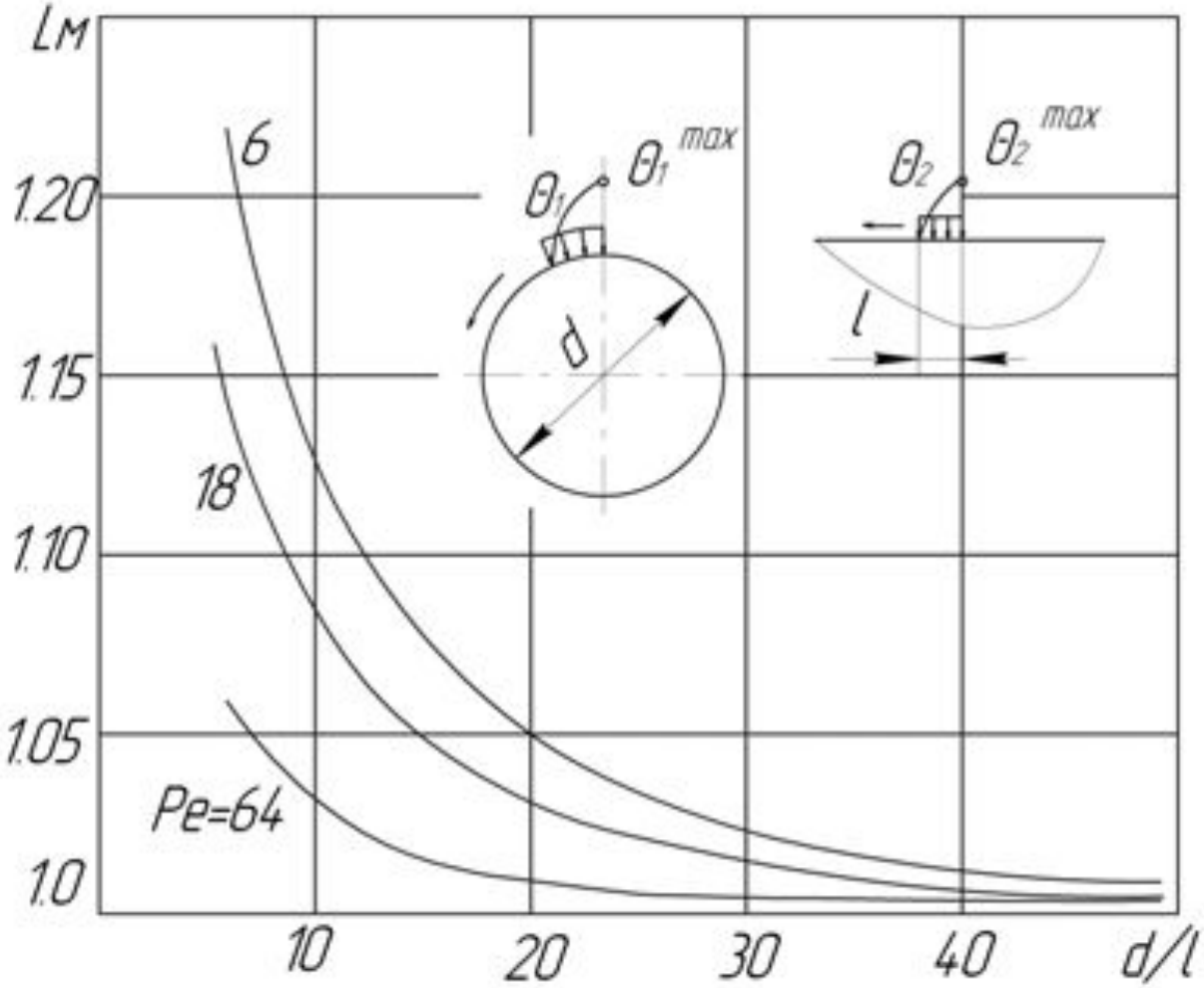


0 – неограниченное пространство;
1 – полупространство;
2- пластина;
3 – параллелепипед;
4 – неограниченный стержень;
5 – стержень (цилиндр) конечной длины;
6 – неограниченный клин с углом β;
7 – шар

Коэффициент формы одного тела по отношению к другому.

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

Коэффициент формы тела



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.

Расчет температуры в зоне резания

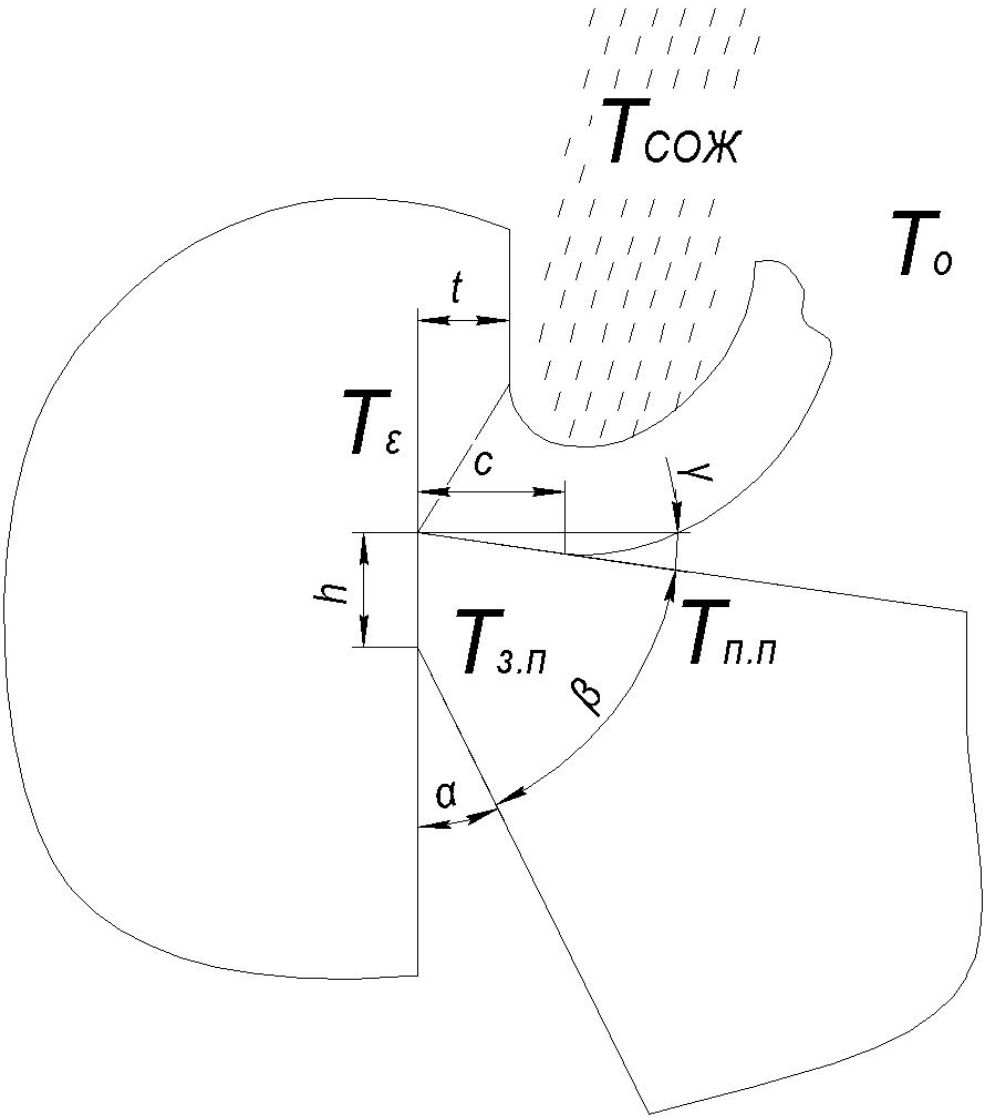
Теплота в процессе резания определяется:

- 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.

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

где *Т*о – начальная температура (температура окружающей среды), *То* = 20 – 28 С°;
Тε – температура в плоскости сдвига, С°;
Тп.п – температура на передней поверхности, С°;
Тз.п – температура на задней поверхности, С°;
ТСОЖ – температура от смазочно-охлаждающей жидкости, С°;
Тстр – температура стружки, С°.

Расчетная схема резания



Температура в плоскости сдвига

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

где *SB* – действительный предел прочности обрабатываемого материала при растяжении –
SB = 0,95 · (1 + *δ*),
где *δ* – относительное удлинение;
CV – удельная объемная теплопроводность, Дж/м3·С°;
ε – относительный сдвиг,
ε = (1 + 1/*K* – 2 · *sinγ*) / *cosγ*,
где *γ* – передний угол резца;
K – коэффициент усадки стружки,
K = *cos(β – γ) / sinβ*,
где *β* – угол режущего клина резца;
β = 90° - (*γ + α*), где *α* – задний угол резца.

Температура на передней поверхности

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

где *c* – длина контакта стружки по передней поверхности резца, в общем случае *c* = (1 - 2) · *a*; *V* – скорость резания, с/м; *a* – толщина срезаемого слоя, мм; *h* – износ по задней поверхности, мм; *ω* – коэффициент температуропроводности, мм2/с.

Температура на задней поверхности

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

где *σB* – предел прочности обрабатываемого материала на разрыв, МПа; *h* – износ по задней поверхности, мм.

Температура от СОЖ

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

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*о;
*T*2 – конечная температура СОЖ, С°; в общем случае *T*2 = *T*о + *Tε* + *Tп.п* + *Tз.п*;
CСОЖ – удельная теплоёмкость СОЖ, кДж/кг·С°; *ρСОЖ* – плотность СОЖ, кг/м3;
Fсоп – площадь сопла, мм2.

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

где *α0* – коэффициент, учитывающий потерю теплоты на скрытую энергию деформации (принимаем *α0* = 0,95); *β0* – коэффициент, учитывающий переход части тепла в изделие (по Вейнеру: *β0* = 0,1 при *V* = 100 м/мин, *β0* = 0,05 при *V* = 300 м/мин); *μ0* – коэффициент трения стружки; *ξ* – коэффициент усадки стружки; *c* – теплоёмкость нагретой стружки, ккал/кгс·°С; *ρстр* – плотность стружки, кгс/мм3; *a* – толщина среза, мм; *b* – ширина среза, мм; *E* – модуль упругости материала стружки, кгс/мм2; *P* = *Pz/a·b* – удельная сила резания, кгс/мм2;

При расчете температуры в зоне резания при обработке ст. 45 (σB = 600 МПа; δ = 0,3; CV = 6,11 Дж/м3·С°; ω = 31 мм2/с), резцом (γ = 10°; β = 70°; α = 10°), при режимах V = 400 м/мин; t = 2 мм; S = 0,25 мм/об; с применением СОЖ G = 50 л/мин; $T1$ = To = 20°; $CCOЖ$ = 4,184 Дж/кг·С°; $\rho COЖ$ = 998 кг/м3; $Fсоп$ = 78,5 мм2; 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

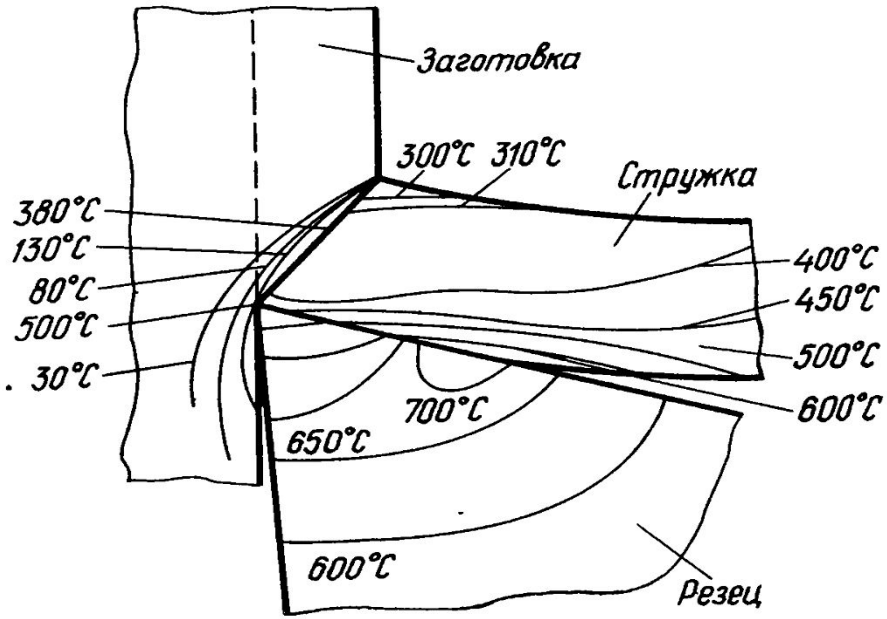
3. ***Средняя температура*** нагрева всей обрабатываемой поверхности заготовки обычно составляет 50 – 150 °С. Эта температура определяет тепловые деформации и, таким образом, влияет на геометрическую точность обрабатываемой детали.

Уравнение теплового баланса

$$P_z \cdot V_{рез} / 60 \cdot 75 = Q_д + Q_{р.и.} + Q_с + Q_{о.с.}$$

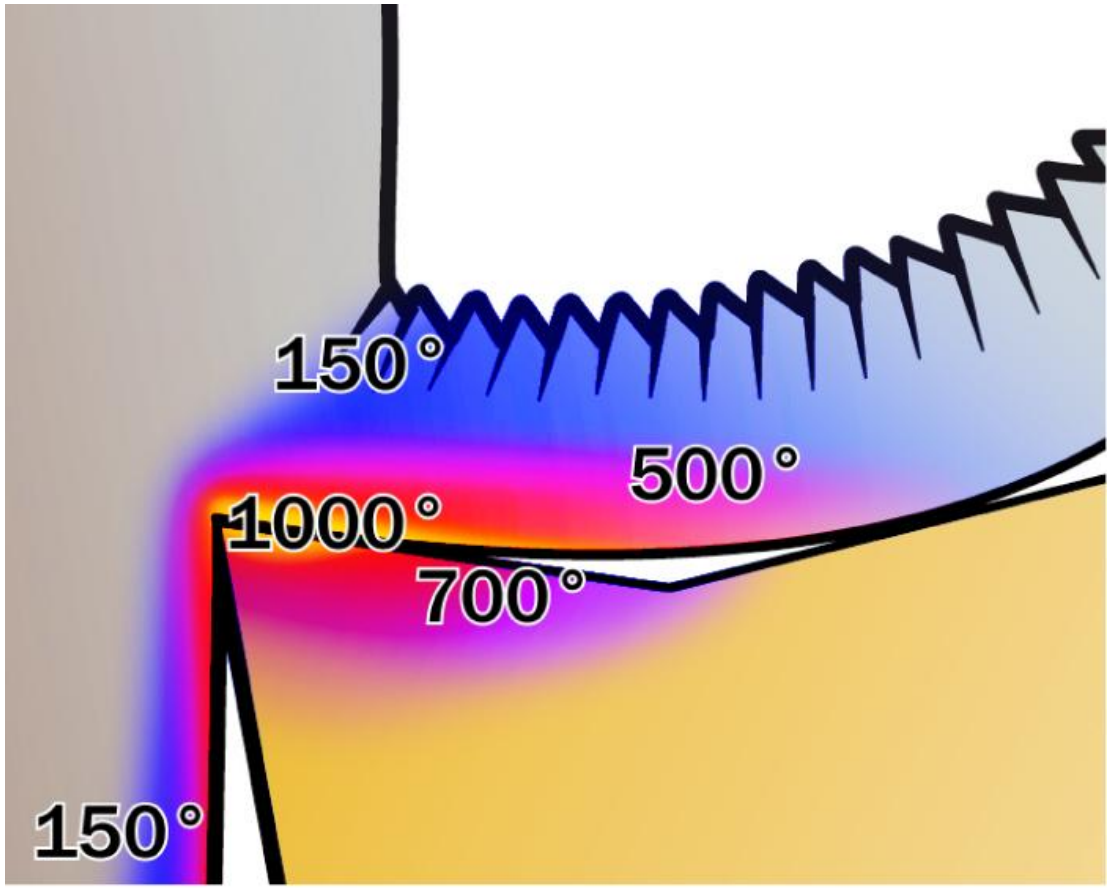
где $Q_д$ – теплота, переходящая в обрабатываемую деталь;
$Q_{р.и.}$ – теплота, переходящая в режщий инструмент;
$Q_с$ – теплота, переходящая в стружку;
$Q_{о.с.}$ – теплота, уносимая окружающей средой, например СОЖ.

Температурное поле в зоне резания

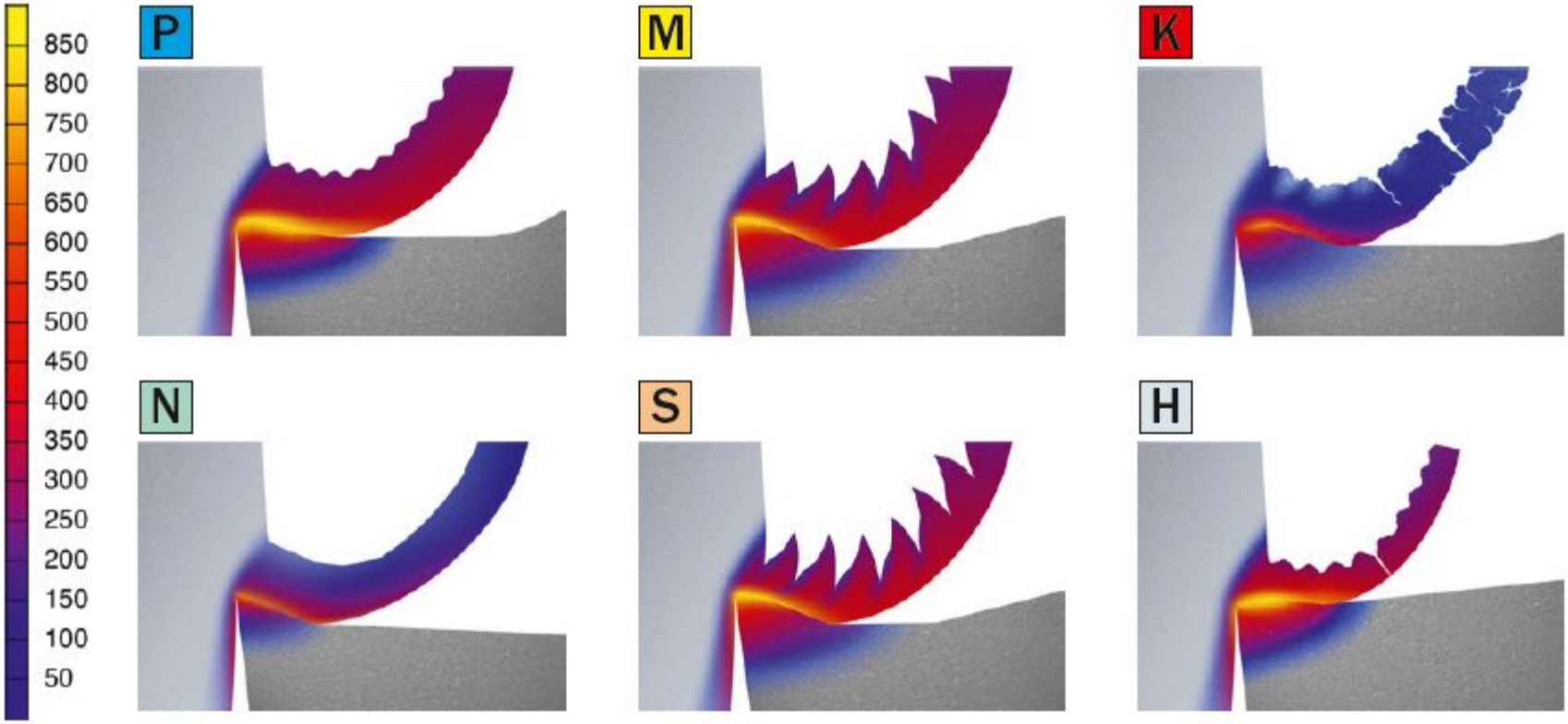


Формирование стружки под влиянием высокой температуры и давления

Выбор инструментального материала

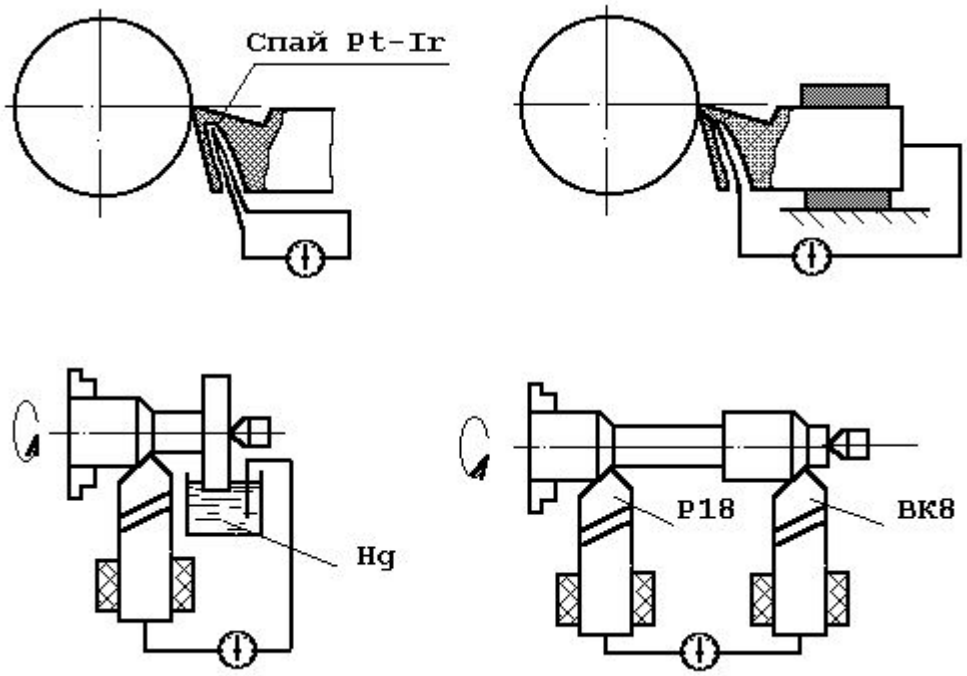


Формирование стружки для различных групп материалов

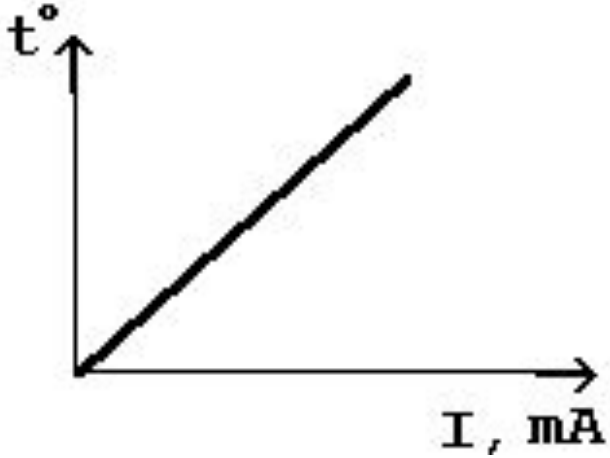


Методы измерения температуры

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



Тонировочный график



Экспериментальные методы определения температуры

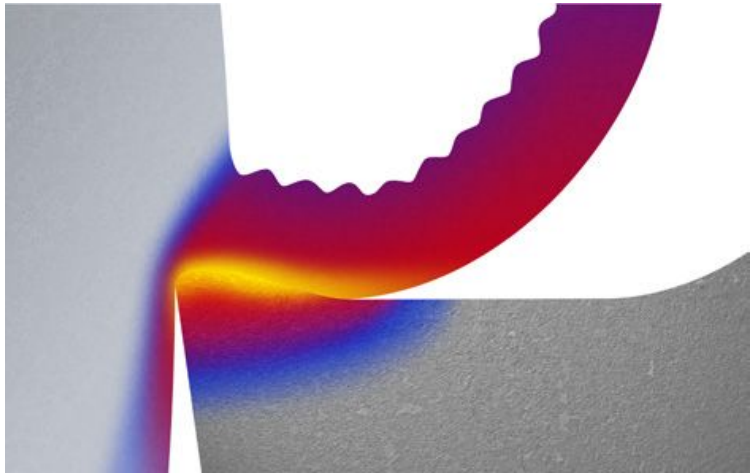
$$Q = C_Q \cdot t^{X_Q} \cdot S^{Y_Q} \cdot V^{Z_Q}$$

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…0,2
Y_Q = 0,2…0,25
Z_Q = 0,4…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.

Сталь



Определение

• Сталь - самая крупная по составу группа обрабатываемых материалов.

• Сталь может быть незакалённой, закалённой или отпущенной и иметь твёрдость до 400 HB. 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%.

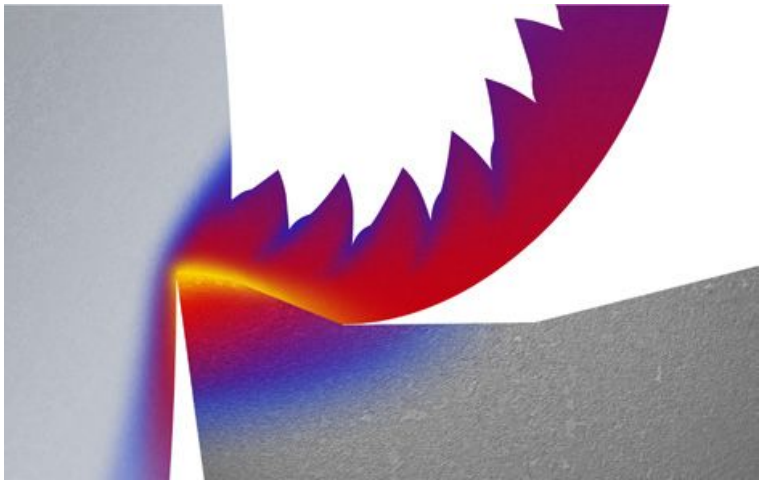
• Удельная сила резания *k*c1 = 1400-3100 Н/мм.

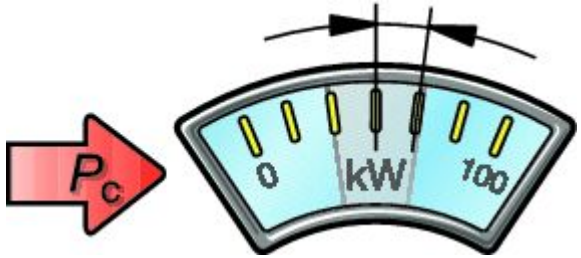
• Сила резания и, соответственно, необходимая для обработки мощность находятся в пределах ограниченного диапазона.

Нержавеющая сталь

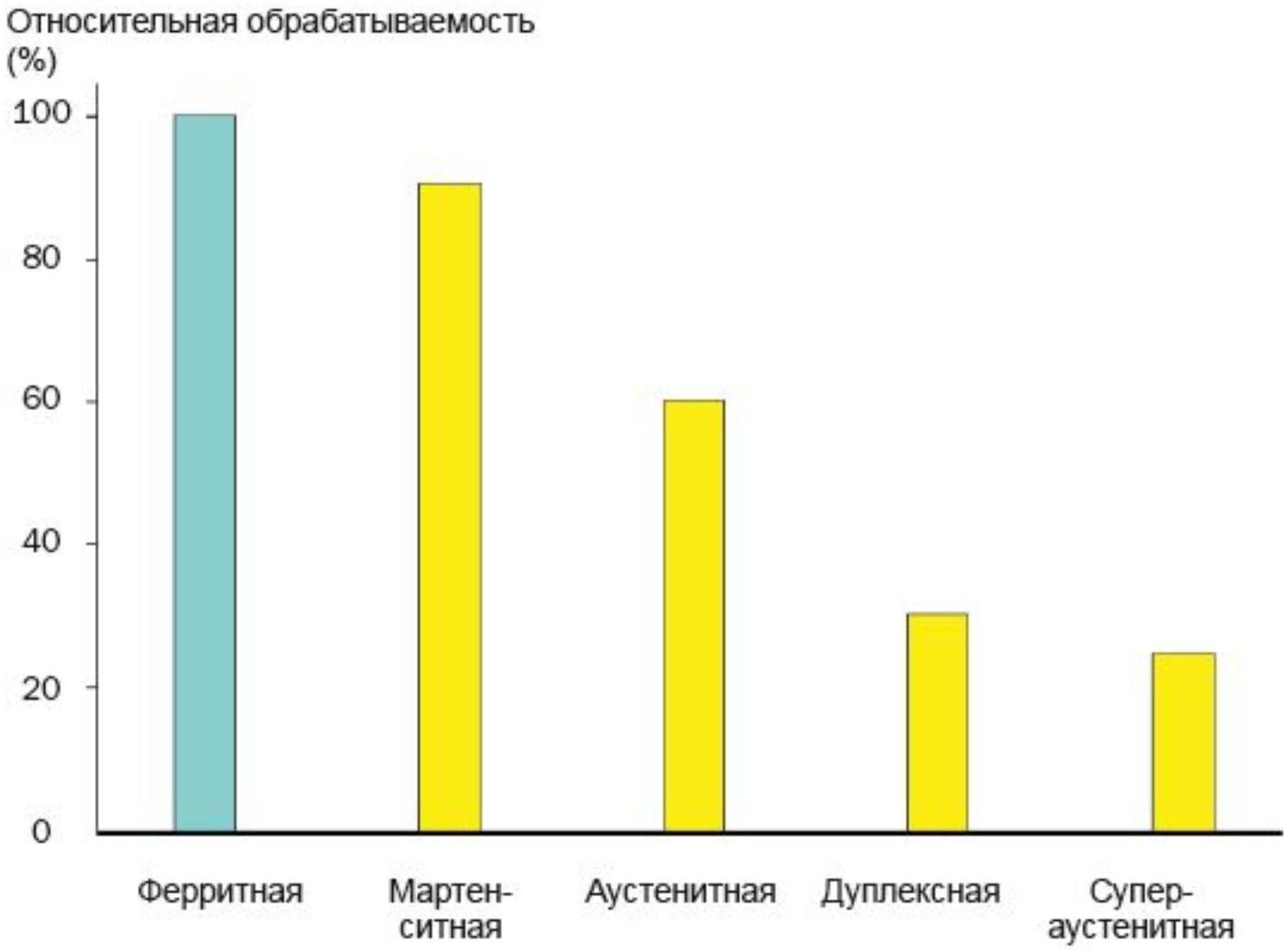
Определение

- Сплав на основе железа как основного компонента (Fe).
- Содержание хрома превышает 12%.
- Как правило, с низким содержанием углерода (C ≤ 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 Cr2O3 на поверхности стали, что придает ей стойкость к коррозии.

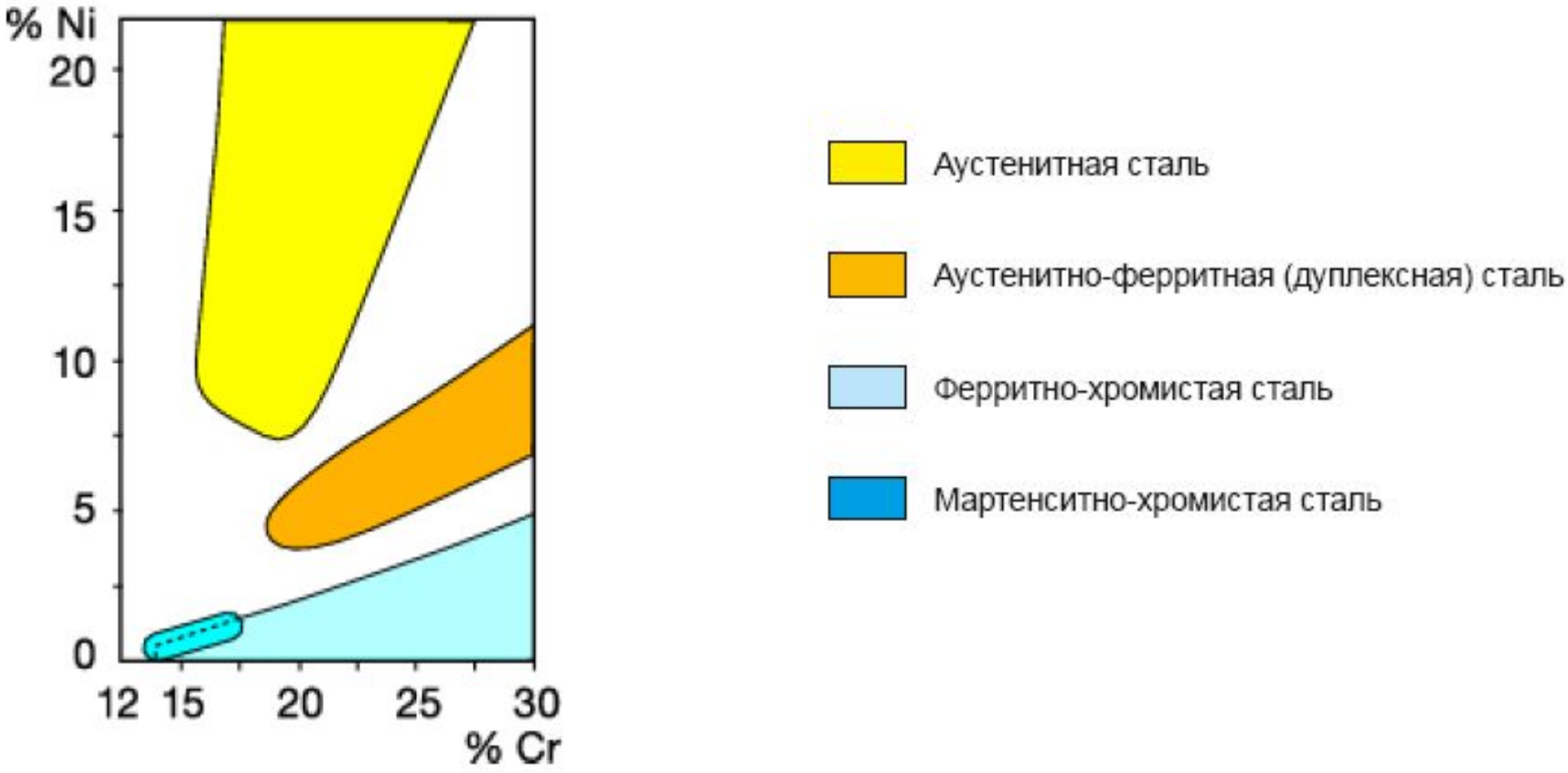




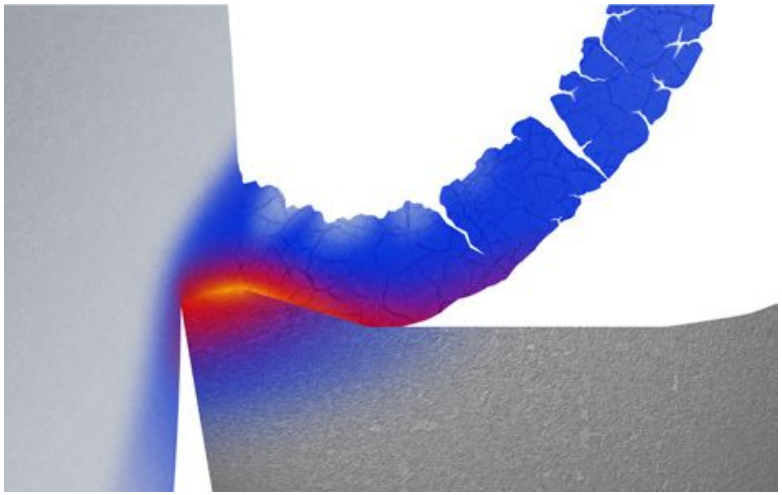
- Материал, дающий сливную стружку.
- Удельная сила резания: 1800-2850 Н/мм².
- Механическая обработка нержавеющих сталей характеризуется значительными усилиями резания, наростообразованием на кромке, а также наблюдается упрочнение поверхностного слоя.
- Сера (S) повышает обрабатываемость нержавеющей стали.


Относительная обрабатываемость (%)
100
80
60
40
20
0
Ферритная
Мартен-ситная
Аустенитная
Дуплексная
Супер-аустенитная

Определение группы материалов



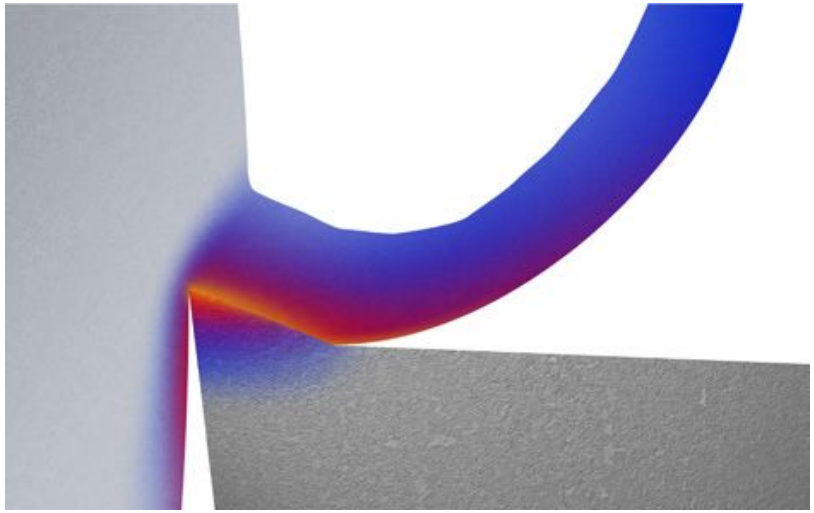
Чугун



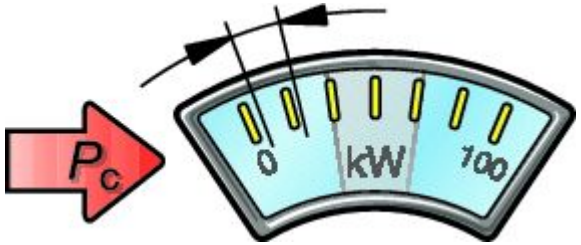
Определение
Существует 5 основных типов чугуна:
• Серый чугун (GCI),
• Ковкий чугун (MCI),
• Чугун с шаровидным графитом (NCI),
• Чугун с вермикулярным графитом (CGI)
• Отпущенный ковкий чугун (ADI).
Чугун - это сплав железа с углеродом и относительновысоким содержанием кремния (1-3%). Содержание углерода 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/мм².
• 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 HB, кроме высокопрочной бронзы (>225HB).
• 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%).

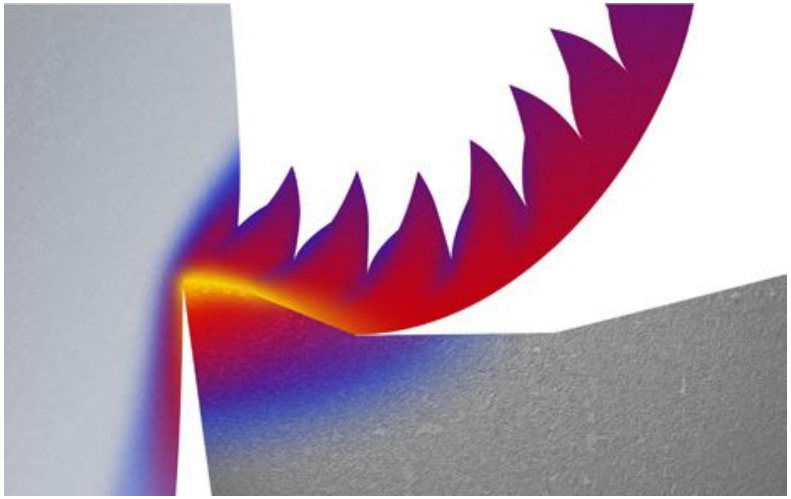


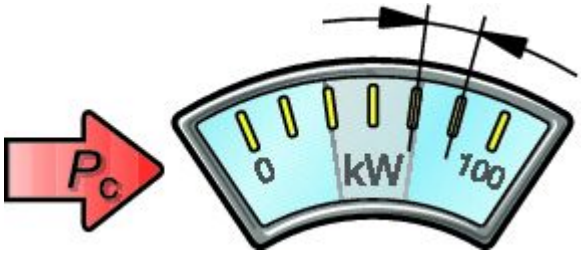
Обрабатываемость алюминия
• Материал, дающий длинную стружку.
• Относительно хорошее стружкодробление при условии легирования.
• Чистый алюминий вязок и требует острых режущих кромок и высокой скорости резания *vc*.
• Удельная сила резания: 350–700 Н/мм².
• Усилия резания и, соответственно, мощность, 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

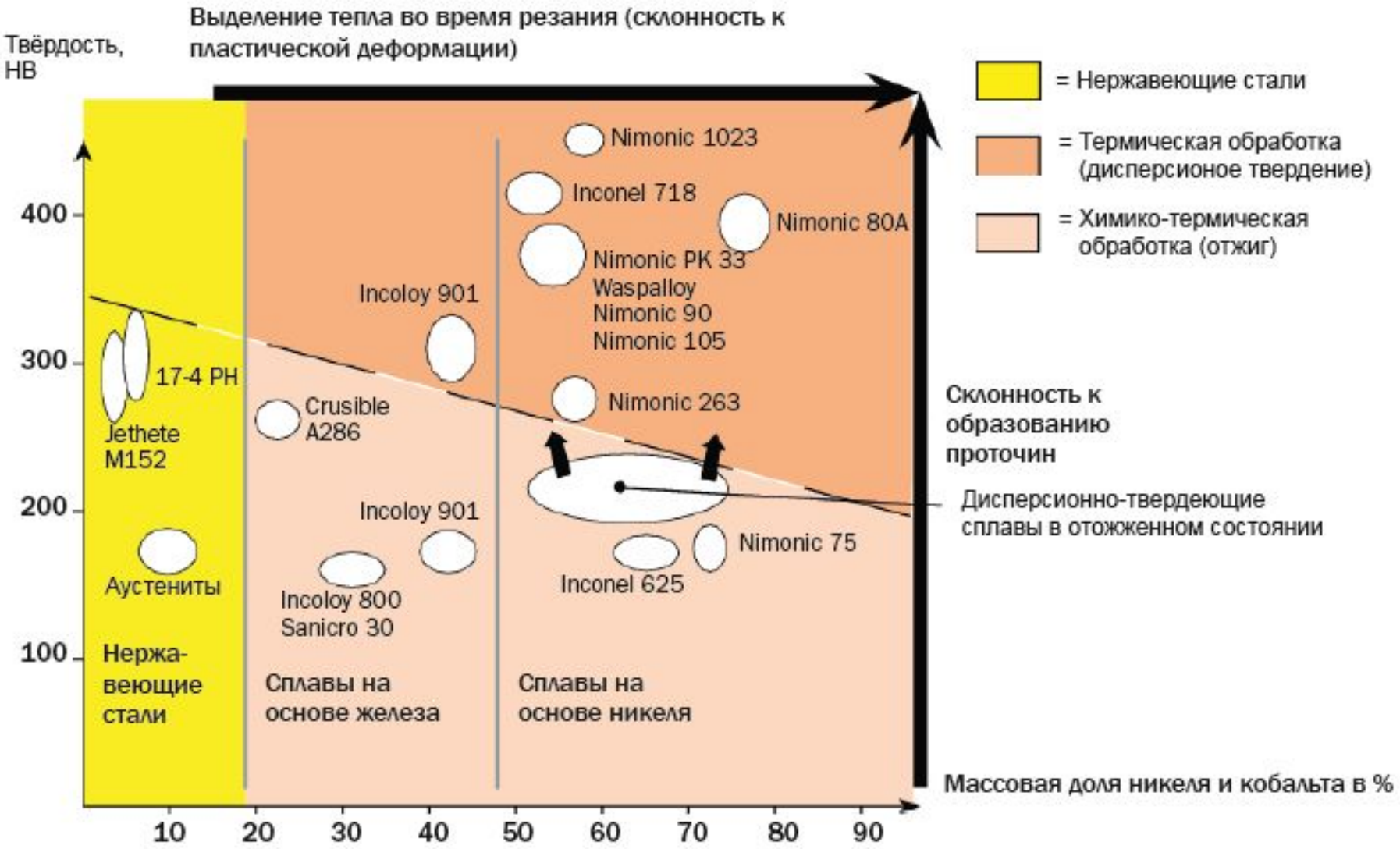
• Группу ISO S можно разделить на жаропрочные сплавы (HRSA) и титан.
• Жаропрочные сплавы HRSA можно подразделить на 3 категории: сплавы на основе никеля, железа и кобальта.
• Условия обработки: отжиг, химико-термическая обработка, старение, прокатка, ковка, литьё.
• Свойства: повышенное содержание легирующих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



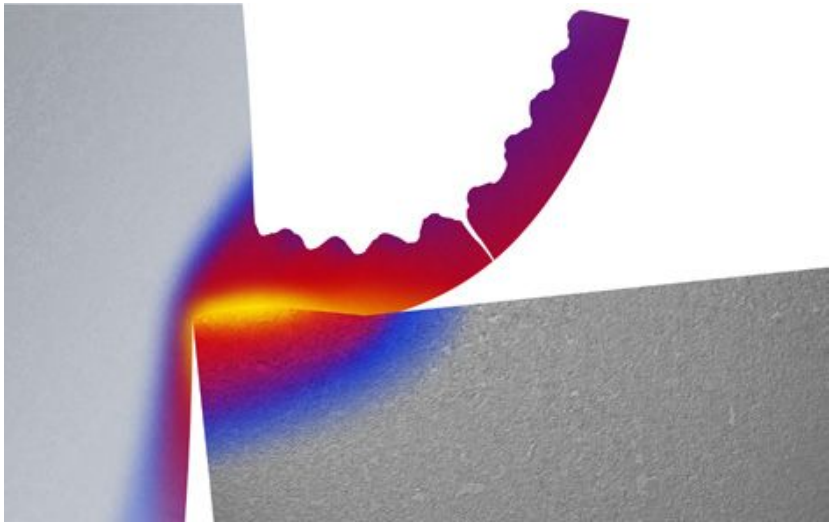


Обрабатываемость в целом

• 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 влияение на обрабатываемость оказывают отжиг и старение.
• Затруднённый стружкоотвод (сегментная стружка).
• Удельная сила резания: 2400-3100 Н/мм² у жаропрочных сплавов и 1300-1400 Н/мм² у титана.
• Усилия резания и требуемая мощность довольно высокие.


Выделение тепла во время резания (склонность к пластической деформации)
Твёрдость, HB
400
300
200
100
10
20
30
40
50
60
70
80
90
= Нержавеющие стали
= Термическая обработка (дисперсионое твердение)
= Химико-термическая обработка (отжиг)
Nimonic 1023
Inconel 718
Nimonic 80A
Nimonic PK 33
Waspalloy
Nimonic 90
Nimonic 105
Incoloy 901
17-4 PH
Jethete M152
Crusible A286
Nimonic 263
Склонность к образованию проточин
Дисперсионно-твердеющие сплавы в отожженном состоянии
Incoloy 901
Nimonic 75
Аустениты
Inconel 625
Incoloy 800
Sanicro 30
Нержа-веющие стали
Сплавы на основе железа
Сплавы на основе никеля
Массовая доля никеля и кобальта в %

H Закалённая сталь



Определение

• К этой группе материалов относятся закалённые сорта стали твёрдостью >45 – 68 HRC.

• Наиболее распространены цементированная сталь (~60 HRC), подшипниковая сталь (~60 HRC) и инструментальная сталь (~68 HRC). Также к этой группе относятся высокопрочные чугуны - белый (~50 HRC) и ADI/Kymenite (~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/мм². 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!