

# Введение

Термической обработкой называют технологические процессы, состоящие из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств.

Термической обработке подвергают слитки, отливки, полуфабрикаты, сварные соединения, детали машин, инструменты.

## Основные виды термической обработки

Отжиг

Закалка

Отпуск

Старение

# *План*

- Термическая обработка. Общая характеристика
- Виды термической обработки
- Термообработка стали
- Термообработка дуралюмина

# Термическая обработка

Технология металлов включает в себя:

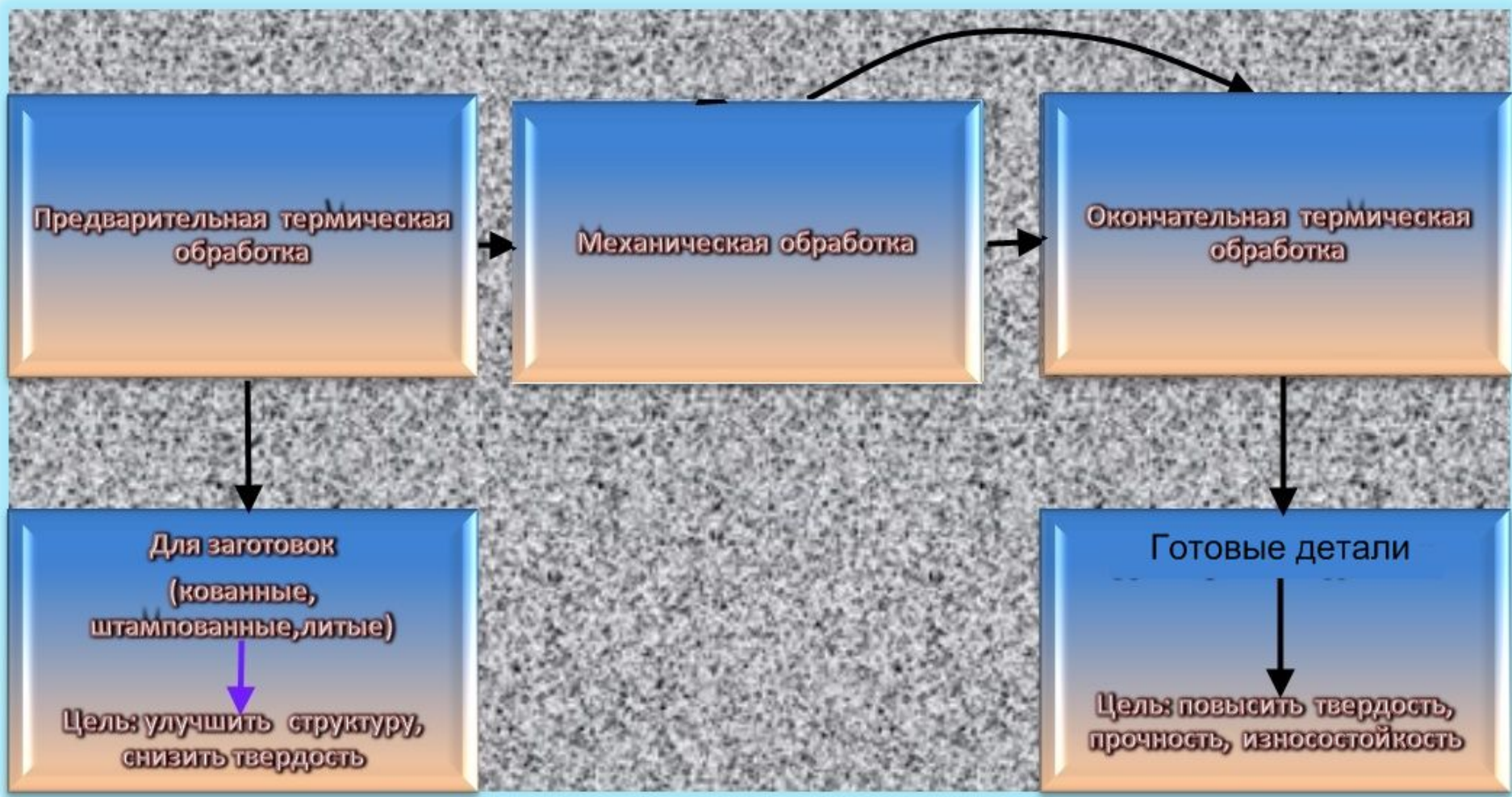
1. Металлургию – получение металла заданного состава.
2. Механическую технологию – получение из металла изделий заданной формы.
3. **Термическую обработку** – получение заданных свойств.

Параметры термической обработки:

1. Максимальная температура нагрева –  $t_{max}$ .
2. Время выдержки сплава при температуре нагрева -  $T_B$ .
3. Скорость нагрева -  $V_{нагр}$ .
4. Скорость охлаждения –  $V_{охл}$ .

Режим термической обработки можно представить в виде график в координатах температура - время





Предварительная термическая обработка

Механическая обработка

Окончательная термическая обработка

Для заготовок  
(кованные,  
штампованные, литые)

Цель: улучшить структуру,  
снизить твердость

Готовые детали

Цель: повысить твердость,  
прочность, износостойкость

Термической обработкой называется совокупность операций нагревания, выдержки и охлаждения, имеющих целью изменение структуры и свойств стали. Основные виды термической обработки – это отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение и химико-термическая обработка поверхности. Любой режим термообработки можно представить графиком в координатах температура – время. Режим термической обработки характеризуется следующими параметрами:

- максимальная температура нагрева;
- время выдержки при заданной температуре;
- скорость нагрева до заданной температуры;
- скорость охлаждения до комнатной температуры.

Параметры термической обработки зависят от химического состава стали и кон



# Термическая обработка сплавов

**Термической обработкой** называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры.

**Цель термообработки** – придание сплавам таких свойств, которые требуются в процессе эксплуатации изделий.

Основные виды термической обработки  
– **отжиг, закалка, отпуск и старение.**

Все операции термообработки разделяются на **разупрочняющие** (отжиг) и **упрочняющие** (закалка с отпуском или старением).



# Виды термической обработки

Термическая

Термомеханическая

Химико-термическая

Отжиг

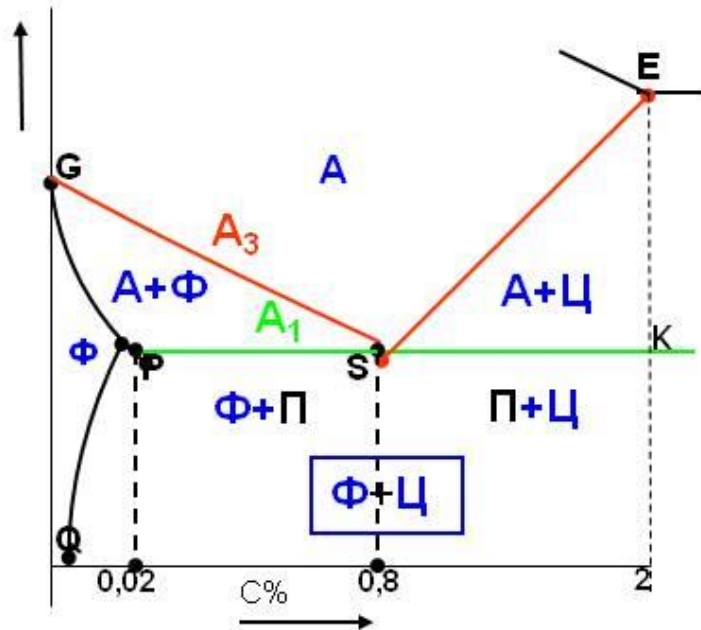
Закалка

Старение

Отпуск

Нормализация (для сталей)

# Виды термической обработки стали



Основа изучения термообработки стали – диаграмма железо – углерод.

Общепринятые обозначения критических точек (A):

- A<sub>1</sub> – линия PSK – соответствует превращению A ↔ П;
- A<sub>3</sub> – линия GSE – соответствует началу выпадения или концу растворения Ф (в доэвтектоидных сталях) или Ц (в заэвтектоидных сталях);
- Ac<sub>1</sub> и Ac<sub>3</sub> – обозначение критических точек при нагреве;
- Ar<sub>1</sub> и Ar<sub>3</sub> – обозначение критических точек при охлаждении.

1. **Отжиг** – нагрев выше Ac<sub>3</sub> с последующим медленным охлаждением (если охлаждение происходит на воздухе то такой вид термообработки называют **нормализацией**); при охлаждении из межкритического интервала термообработку называют **неполным отжигом**.
2. **Закалка** нагрев выше Ac<sub>3</sub> с последующим быстрым охлаждением; при охлаждении из межкритического интервала термообработку называют **неполной закалкой**.
3. **Отпуск** – нагрев закаленной стали ниже Ac<sub>3</sub>.



# Виды термической обработки стали

- ▣ Отжиг
- ▣ Закалка
- ▣ Отпуск
- ▣ Нормализация
- ▣ Криогенная Обработка
- ▣ Старение

Термическая обработка металлов и сплавов производится с целью улучшения их служебных свойств.

## Виды термической обработки:

- Отжиг

- Диффузионный
- Полный
- Специальный
- Рекристаллизационный

- Нормализация

- Закалка

- С полиморфным превращением
- Без полиморфного превращения

- Отпуск

- Низкий
- Средний
- Высокий

# Отжиг

Процесс отжига заключается в нагреве стальных изделий, последующей их выдержке при температуре нагрева в течение заданного времени и медленном охлаждении.

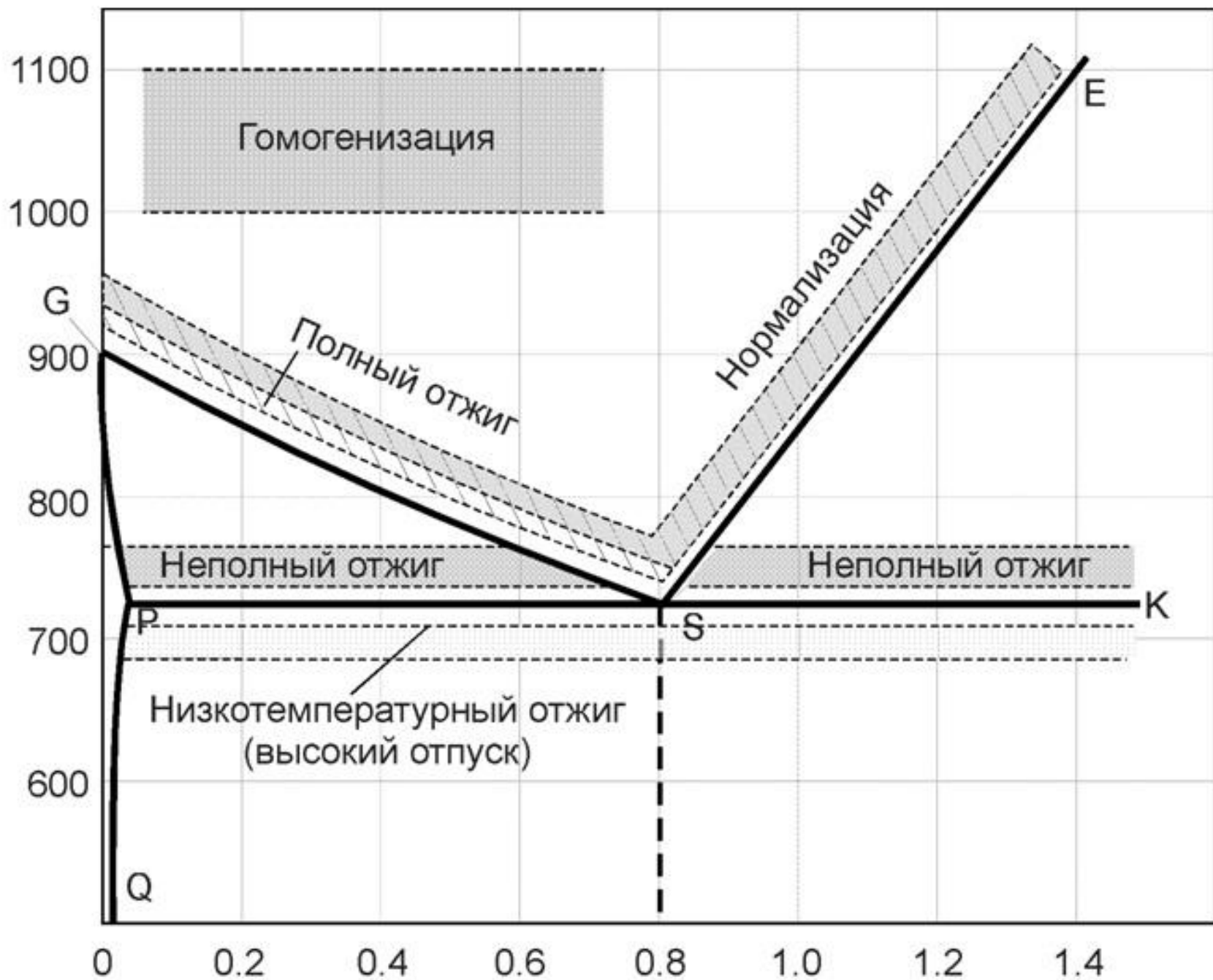
Продолжительность данных операций зависит от величины отжигаемых изделий и марки стали.

Отжиг стали применяют для устранения хрупкости и повышения вязкости металла после волочения или вальцевания; снятия внутренних напряжений в металле (например, послековки) и снижения его способности к образованию трещин при последующей обработке.





Температура, °С



# Гомогенизирующий (диффузионный) отжиг

*Диффузионный отжиг* применяется в основном для слитков и крупных отливок из легированной стали для выравнивания химической неоднородности и уменьшения ликвации. Отжиг осуществляется путем нагрева на  $150\text{—}250^\circ\text{C}$  выше точки  $A_{c3}$ , длительной выдержки при этой температуре и последующего охлаждения с заданной скоростью.

При *диффузионном отжиге* получается крупнозернистая структура. Для получения мелкозернистой структуры после диффузионного отжига приходится производить обычный полный отжиг.

Недостаток: крупное зерно аустенита которое приводит к повышению хрупкости.

# Рекристаллизационный отжиг

**Рекристаллизация** заключается в том, что, начиная с некоторой температуры, при нагреве происходит интенсивное перемещение атомов в металле, что влечет за собой изменение формы и величины деформированных кристаллических зерен.

(Отжиг осуществляется путем нагрева до  $600^{\circ}\text{C}$ )

В процессе рекристаллизации происходят превращения, аналогичные тем, которые происходят при первичной кристаллизации и вторичной перекристаллизации, т. е. зарождаются новые центры кристаллов и происходит одновременно их рост. Взамен вытянутых, расплюснутых зерен, образуются мелкие, сфероидальные зерна, повышаются пластические свойства, металлу возвращаются исходные свойства.



# Полный отжиг

*Полный отжиг* производят путем нагрева стали на 30—50° С выше критической точки  $A_{c3}$ , выдержкой при этой температуре и медленным охлаждением до 400—500° С со скоростью 200° С в час углеродистых сталей, 100° С в час для низколегированных сталей и 50° С в час для высоколегированных сталей.

Структура стали после отжига равновесная, устойчивая.

Доэвтектоидная сталь имеет структуру: феррит и перлит. Эвтектоидная сталь имеет структуру перлит, а заэвтектоидная — перлит и цементит.

На конечную структуру стали оказывает большое влияние скорость охлаждения. Чем больше скорость охлаждения, тем мельче будут зерна перлита и тем меньше будет выделяться избыточного феррита или цементита.

*Полному отжигу* подвергают горячедеформируемую сталь — поковки, штампованные детали, прокат, а также слитки и фасонные отливки из простой и легированной стали.

# Дефекты отжига железоуглеродистых сплавов:

## **Обезуглероживание.**

Обезуглероживание, т.е. выгорание углерода с поверхности деталей, происходит при окислении стали. Обезуглероживание резко снижает прочностные свойства конструкционной стали. Кроме того, обезуглероживание поверхности может вызвать образование закалочных трещин и коробление

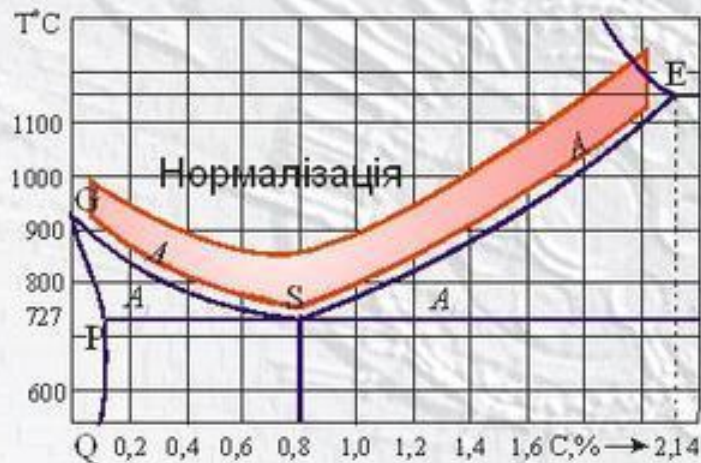
# Нормализация

**Нормализация** - термообработка, при которой сталь охлаждается не в печи, как при отжиге, а на воздухе в цехе. Нагрев ведется до полной перекристаллизации (на 30-50 °C выше точек  $A_{c3}$  и  $A_{cm}$ ), в результате сталь приобретает мелкозернистую, однородную структуру. Твердость, прочность стали после нормализации выше, чем после отжига.

Структура низкоуглеродистой стали после нормализации феррито-перлитная, такая же, как и после отжига, а у средне- и высокоуглеродистой стали – сорбитная; нормализация может заменить для первой – отжиг, а для второй – закалку с высоким отпуском. Часто нормализацией подготавливают сталь для закалки. Термообработку некоторых марок углеродистой, легированных сталей заканчивают нормализацией.



# Нормализация стали



**Нормализация** от отжига отличается тем, что охлаждение стальных изделий после выдержки в печи осуществляют ускоренно - в спокойном воздухе или в его струе (от вентилятора). Для нормализации сталь нагревают до полной перекристаллизации, т.е. на 30 ... 50 °С выше критической точки

После охлаждения на спокойном воздухе сталь приобретает мелкозернистую однородную структуру, уменьшаются внутренние напряжения в изделиях, устраняется много недостатков, возникших при предварительной обработке стальных изделий

## Закалка-

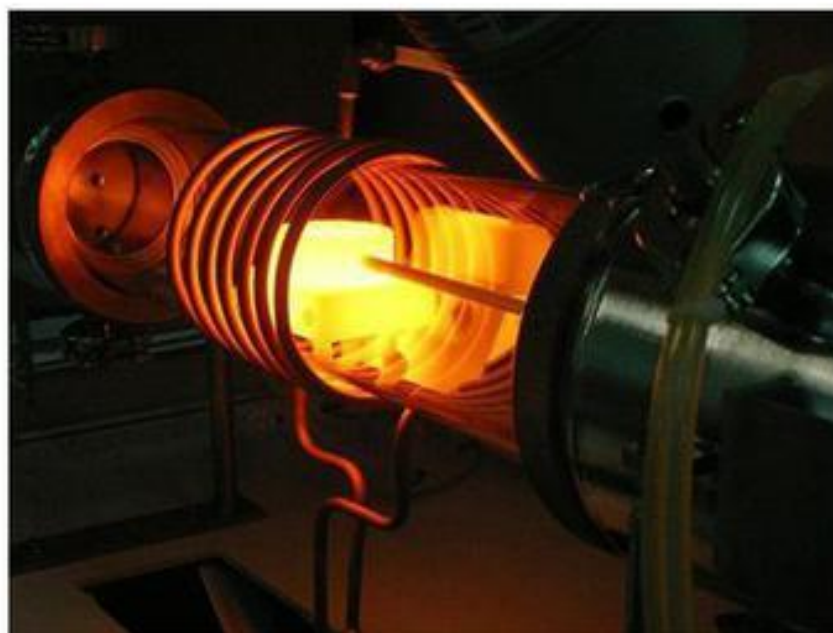
-это нагрев металла до определенной температуры, выдержка при этой температуре и быстрое охлаждение в воде, масле или специальных растворах. Закалка повышает твердость, прочность металла, но в то же время повышает его хрупкость.



# Закалка

**Закалка** — вид термической обработки изделий из металлов и сплавов, заключающийся в их нагреве выше *критической температуры*, с последующим быстрым охлаждением, как правило, в жидкости (воде или масле).

Материал, подвергшийся закалке приобретает большую твердость, но становится хрупким, менее пластичным и вязким, если сделать большее количество повторов нагревание-охлаждение. Для снижения хрупкости и увеличения пластичности и вязкости, после закалки с полиморфным превращением применяют отпуск. После закалки без полиморфного превращения применяют старение. При отпуске имеет место некоторое снижение твердости и прочности материала.





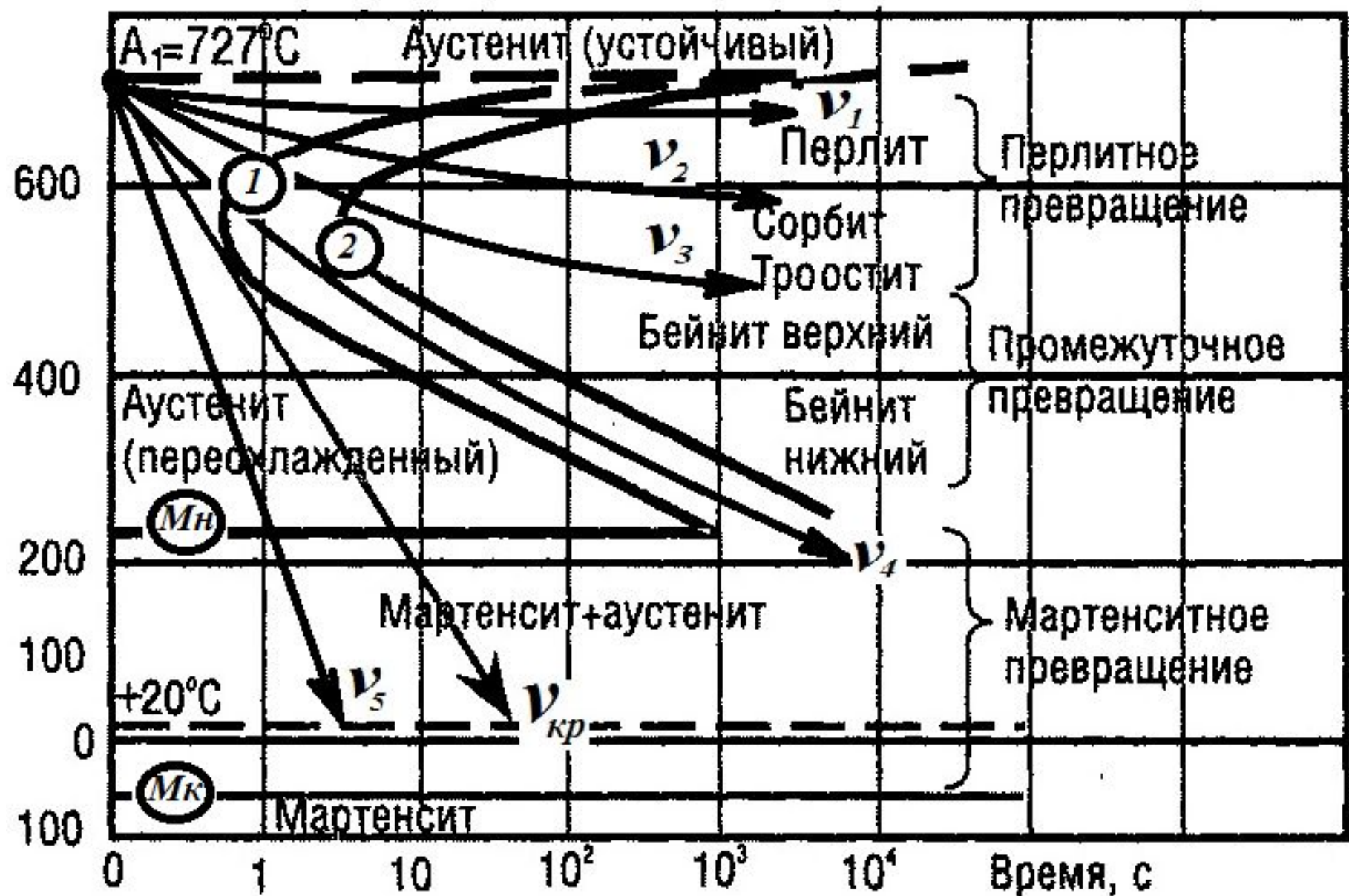


Марка стали	Отжиг	Закалка		Отпуск	
	Температура нагрева, °C	Температура нагрева, °C	Твердость HRC	Температура нагрева, °C	Твердость HRC
У7, У7А	740—760	800—830	61—63	160—200	63—60
				200—300	60—54
				300—400	54—43
				400—500	43—35
				500—600	35—27
У8, У8А, У8Г, У8ГА	740—760	790—820	62—64	160—200	64—60
				200—300	60—55
				300—400	55—45
				400—500	45—35
				500—600	35—27
У9, У9А	740—760	780—810	62—65	160—200	64—62
				200—300	62—56
				300—400	56—47
				400—500	47—37
				500—600	37—28
У10, У10А	750—770	770—800	62—66	160—200	64—62
				200—300	62—56
				300—400	56—47
				400—500	47—38

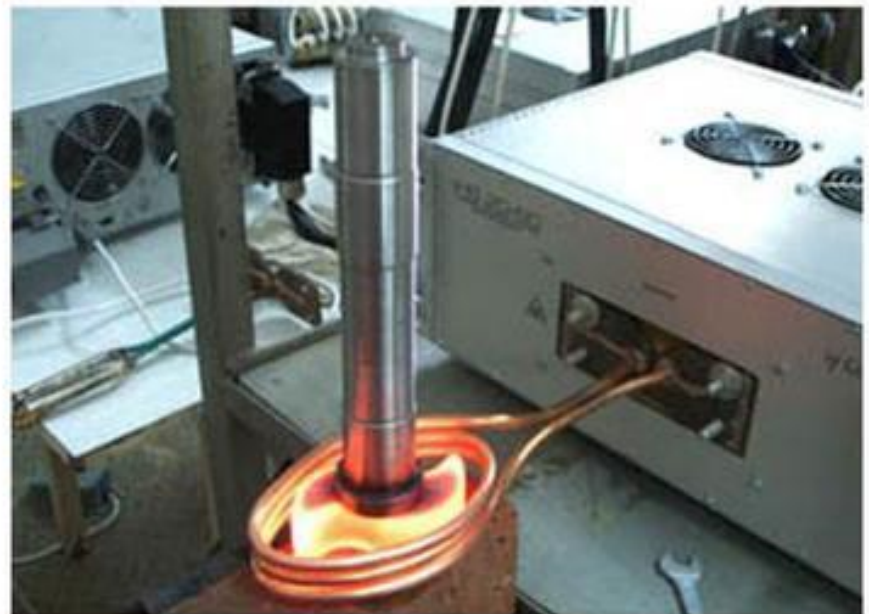
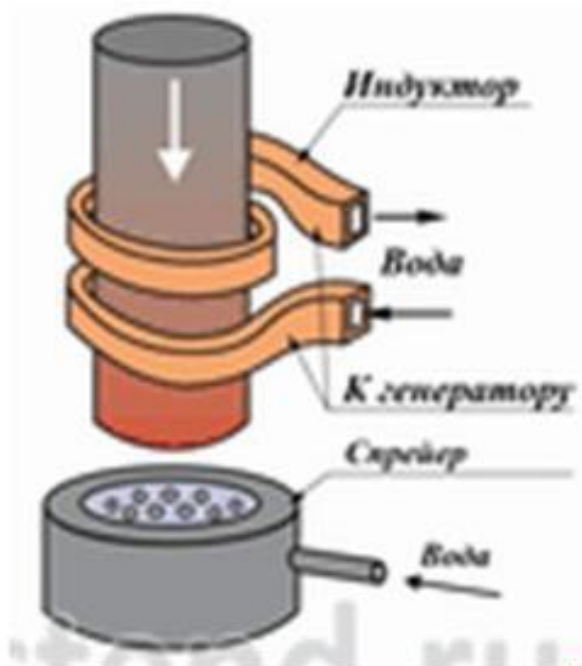
Место нагрева	Продолжительность нагрева (в сек) на 1 мм диаметра или толщины изделия, для сечения		
	круглого	квадратного	прямоугольного
В электропечи	40—50	50—60	60—75
В пламенной печи	35—40	45—50	55—60
В соляной ванне	12—15	15—18	18—22
В свинцовой ванне	6—8	8—10	10—12

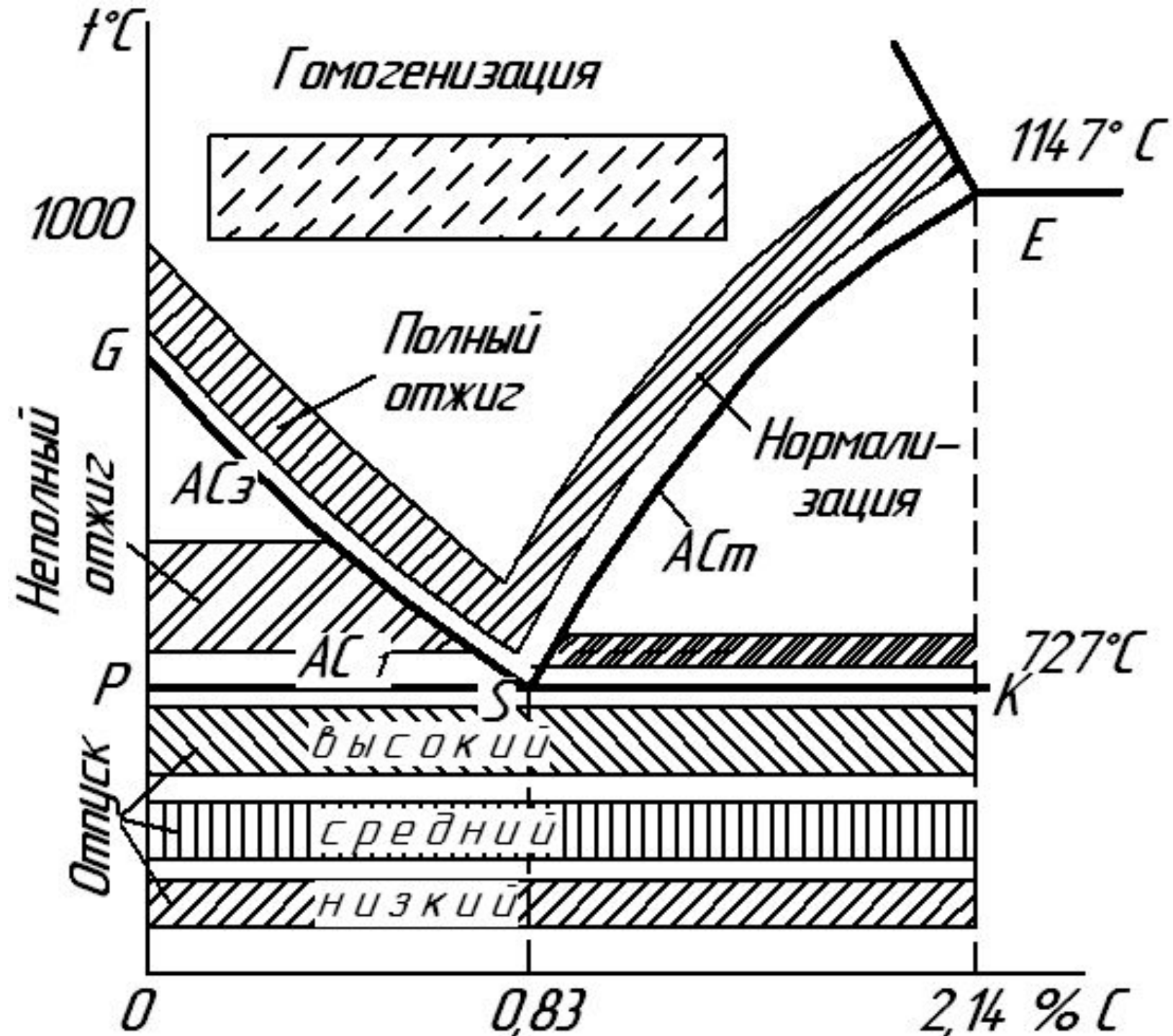
Состав солевой, нагревающей среды (массовая доля, %)	Температура плавления, °С	Температура практического применения, °С
Калиевая селитра	55	137
Нитрат натрия	45	150—500
Хлористый натрий	28	500
» кальций	72	540—870
» натрий	44	663
» калий	56	700—870
» натрий	100	808
» барий	100	850—1100
		960
		1100—1350





# Закалка стали токами высокой частоты

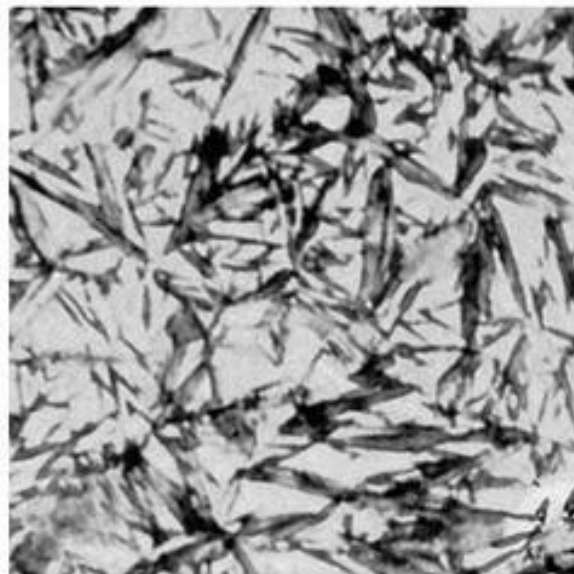




# Низкий отпуск

**Низкий отпуск** — отпуск мартенсита на низких температурах (180—250°С). Применяется после закалки для инструментальных, подшипниковых сталей, малоуглеродистых сталей после цементации для изготовления деталей и инструментов, работающих на износ, от которых требуется высокая твёрдость. Цель низкого отпуска — уменьшение остаточных закалочных напряжений. Температуру низкого отпуска выбирают такой, чтобы твёрдость и износостойкость практически не снижалась. Выдержка при температуре низкого отпуска обычно превышает 1...3 часа.

Структура мартенсита.  
(60-70 HRC)





# Средний отпуск стали

При **среднем отпуске** производится нагрев до 350-450 °С. Из мартенсита полностью выделяется углерод и образуется мелкоигольчатая смесь феррита и цементита. Такая структура стали полученная при среднем отпуске называется **тростит отпуска**.

При среднем отпуске происходит некоторое снижение твердости при значительном **увеличении предела упругости** и улучшении сопротивляемости действию ударных нагрузок.



Применяется для **пружин, рессор, ударного инструмента**.

# Высокий отпуск стали

**Высокий отпуск** проводится при **550-650°C**. При нагреве до таких температур происходит коагуляция и сфероидизация частиц цементита в механической смеси феррита и цементита. Структура с округлыми зернами основных фаз называется **сорбит отпуска**.

В результате высокого отпуска твердость и прочность снижаются значительно, но сильно возрастают вязкость и пластичность и получается **оптимальное** для конструкционных сталей **сочетание механических свойств**.



Применяется **для деталей, подвергающихся действию высоких нагрузок**

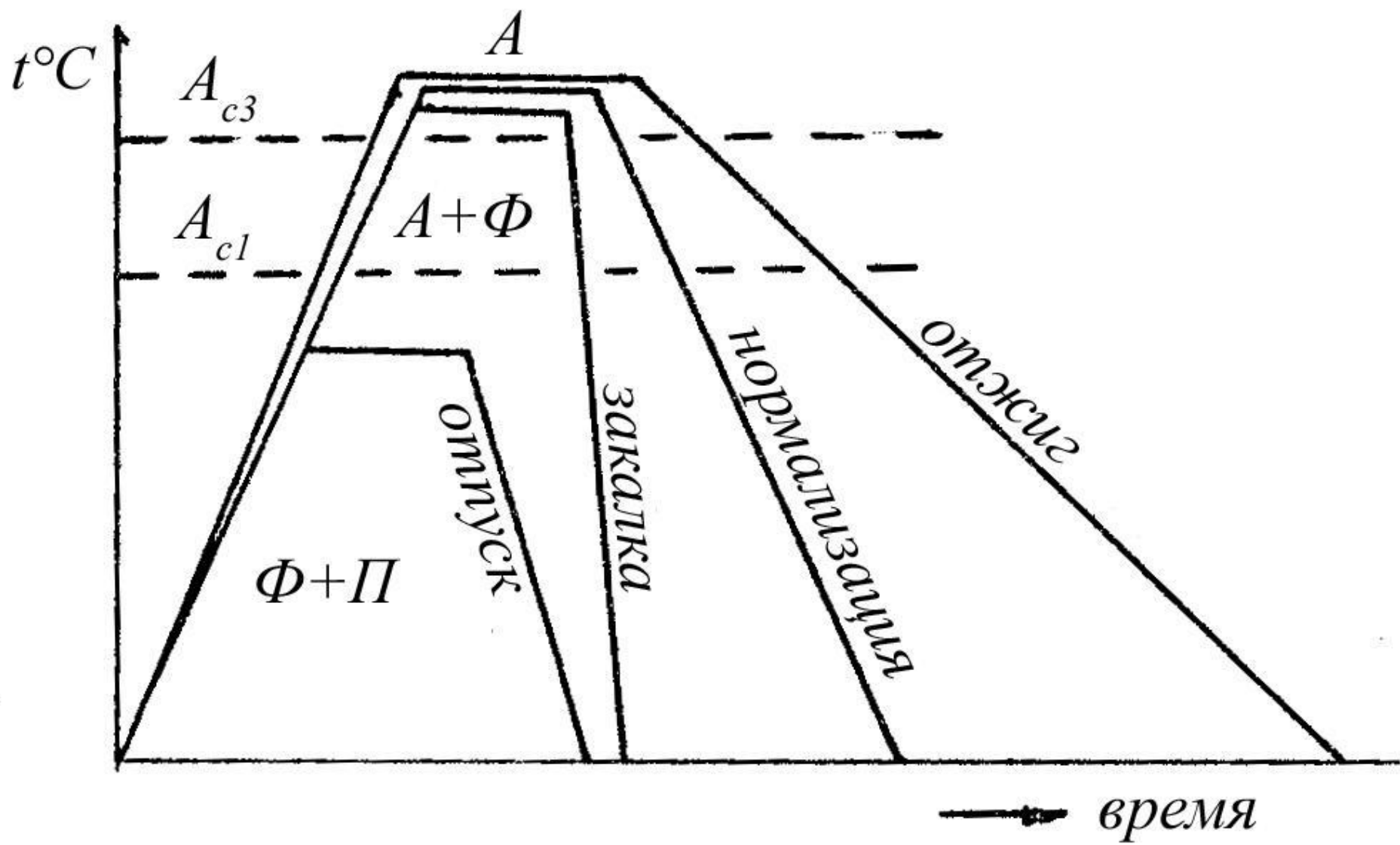
**ОТПУСК** - операция ТО, связанная с нагревом закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержке и последующем охлаждении с определенной скоростью. Он является окончательной операцией термической обработки, т.к. обеспечивает требуемые механические свойства стали и полностью или частично устраняет внутренние напряжения (температурные и структурные), возникающие при закалке.

**ВИДЫ ОТПУСКА:** 1) **Низкий отпуск.** Нагрев – 150 – 200°C, выдержка – 1 – 1,5 часа. Снижаются внутренние напряжения. Мартенсит закалки переходит в мартенсит отпуска. Твердость (60 – 64 HRC).

2) **Средний отпуск.** Нагрев – 350 – 500°C), выдержка – 1 – 8 ч. мартенсит закалки переходит в троостит отпуска – 40 – 45 HRC. Обеспечивается наилучшее сочетание предела упругости с пределом выносливости.

3) **Высокий отпуск.** Нагрев – 500 – 680°C, выдержка – 1 – 8 ч. Полностью снимаются внутренние напряжения. Структура – сорбит отпуска – 25 – 35 HRC. Наилучшее соотношение прочности, пластичности и ударной вязкости стали.







# Приборы для измерения температуры нагрева

- Правильное определение температуры нагрева стали при термической обработке имеет очень большое значение.
- При нагревании стали необходимо помнить, что разные марки ее имеют различную температуру нагрева.
- Для измерения и контроля температуры до 400°С пользуются ртутными и спиртовыми термометрами.
- В печах с рабочей температурой до 1250°С и выше - термоэлектрическими и оптическими пирометрами.

Для контроля используются также электронные автоматические потенциометры типа ЭПД.

Температура в них записывается на дисковой диаграмме, которая совершает полный оборот за 24 ч.

Для наблюдения за показаниями прибор имеет также показывающую стрелку. Контроль температур при термической обработке осуществляют также приближенными способами, дающими ориентировочное значение температур нагретого металла по оттенкам, которые принимает раскаленная сталь. К таким способам относятся определение температуры металла **по цветам каления**, при нагреве под закалку или отжиг, а также определение температуры металла при отпуске **по цветам побежалости**, появляющимся на поверхности изделия. **Наблюдаемая поверхность металла в этом случае должна быть чистой, без окалины.**

## Цвета каления

Оранжевый 950-1000°C

Красно-оранжевый  
900-950°C

Красный 830-900°C

Темновато-красный  
780-830°C

Красно-бордовый  
720-780°C

Бордовый 650-720°C

Коричнево-красный  
580-650°C

Красновато-коричневый  
530-580°C

## Цвета побежалости

Серый 330-350°C

Голубой 325°C

Синий 300°C

Фиолетовый 280°C

Красно-коричневый  
265°C

Жёлто-коричневый  
255°C

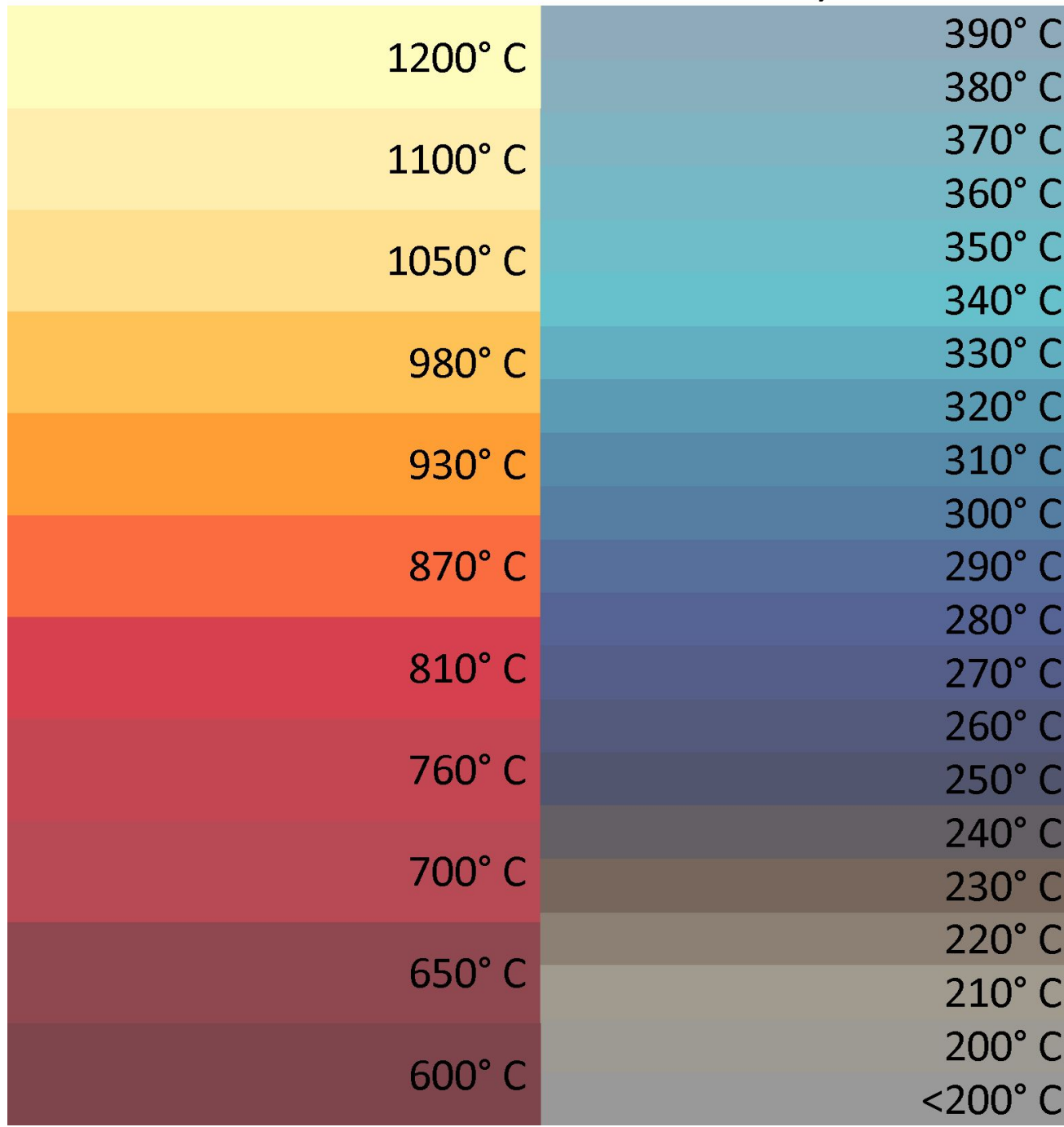
Соломенно-жёлтый  
240°C

Светло-жёлтый  
220°C



# Закалка

# Отпуск



**Температуру отпуска можно контролировать по цветам побежалости.**

**Цвета побежалости** - радужная окраска, возникающая на чистой поверхности нагретой стали. Например, если при нагреве поверхность заготовки приобрела темно-синий оттенок, значит, она нагрета до температуры примерно 300°C.

На предприятиях термическую обработку материалов выполняют рабочие-термисты. Термист должен разбираться в свойствах металлов, хорошо знать режимы термообработки различных сплавов, умело пользоваться термическими печами, строго соблюдать правила безопасной работы.



**Зависимость цвета заготовки от температуры нагрева:**

**а** – цвета каления;

**б** – цвета побежалости

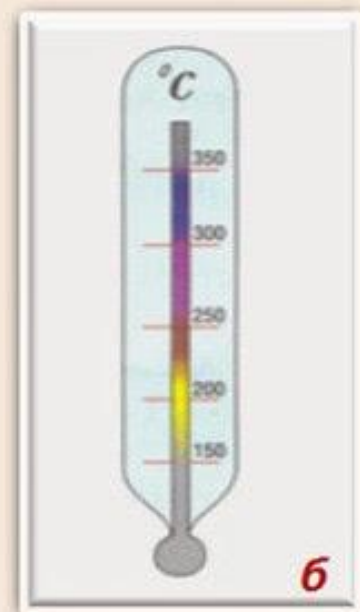


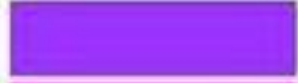






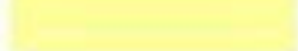






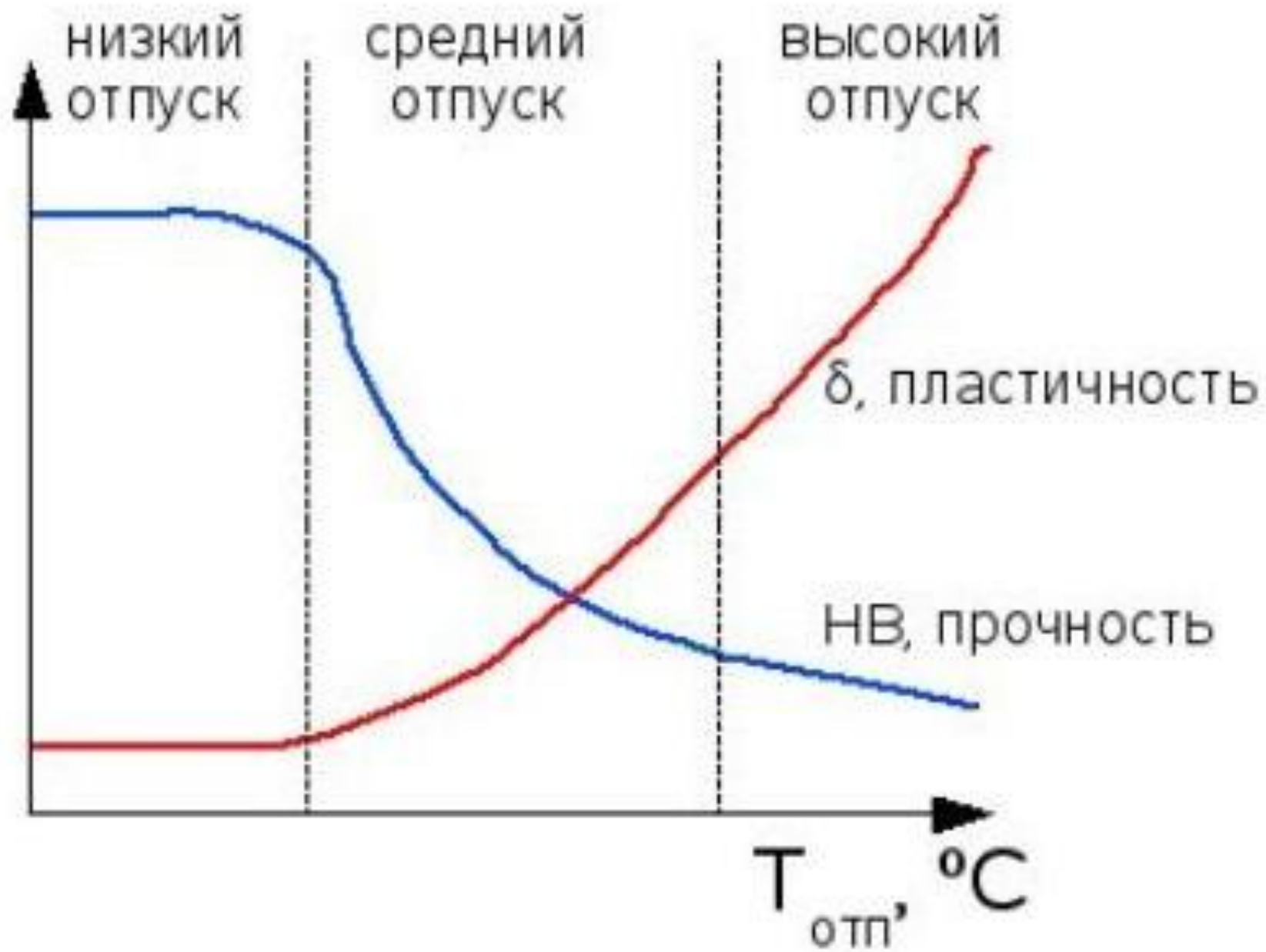


Таблица "Цвета побежалости стали"

Цвет	Наименование	t° C
	Серый	325
	Светло-синий	310
	Ярко-синий	295
	Фиолетовый	285
	Пурпурно-красный	275
	Красно-коричневый	265
	Коричнево-желтый	255
	Соломенно-желтый	240
	Светло-желтый	225
	Светло-соломенный	200

Т а б л и ц а 3. Режимы закалки и отпуска стали

Марка стали	Температура нагрева при закалке, °С	Среда охлаждения	Температура среды охлаждения, °С	Температура нагрева при отпуске, °С
У9, У9А	780—810	Вода, масло	20—30	160—200
У10, У10А	770—800	« «	20—30	160—200
85ХФ	800—840	Масло	50—60	320—350
9ХС	860—870	«	50—60	260—285
Х12	800—840	«	50—60	150—200
ХВТ	820—830	«	50—60	200—240
9Х5ВФ	1000—1050	«	50—60	300—350
ХВ5	900—1000	«	50—60	280—330
Р9	1230—1250	Селитра	400—450	500—550
Р18	1250—1300	«	400—450	500—550

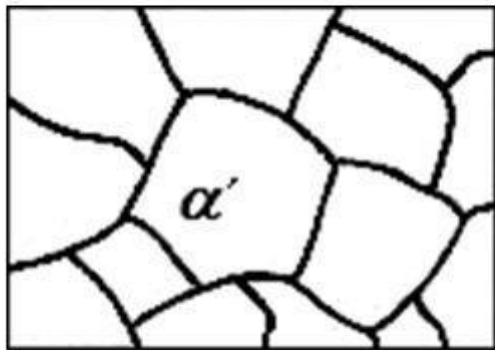




# Термообработка дуралюмина

## Закалка

**Закалка** дуралюмина заключается в нагреве сплава до 550 °С, выдержке и быстром охлаждении в воду.



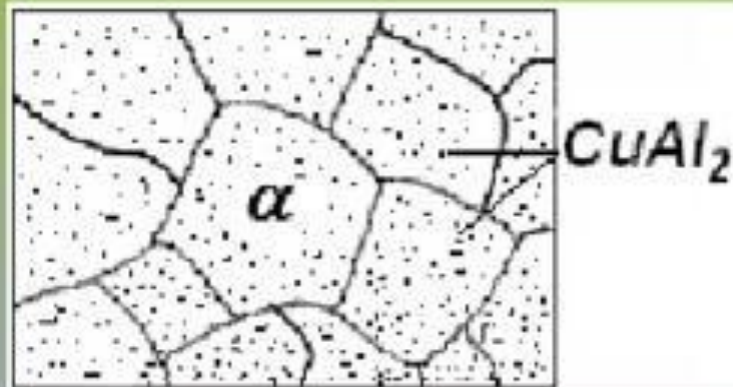
При нагреве в печи частицы  $\text{CuAl}_2$  растворяются в твердом растворе  $\alpha$  - структура станет однофазной. Затем при быстром охлаждении в воду – медь не успевает выделиться из твердого раствора и сохранится в нем после охлаждения. В результате сформируется пересыщенный твердый раствор замещения меди в алюминии –  $\alpha'$ .

После закалки значительного упрочнения дуралюмина не происходит – его твердость составляет 90 НВ, однако пластичность возрастает до  $\delta = 20-24\%$ , что позволяет пластически деформировать сплав в этом состоянии.

# Термообработка дуралюмина

## Старение

**Старение** дуралюмина заключается в длительной выдержке несколько суток при комнатной температуре (*естественное старение*) или короткой выдержке в несколько десятков минут при повышенной температуре 100-180 °С (*искусственное старение*).



При выдержке закаленного сплава, в пересыщенном  $\alpha'$  - твердом растворе происходит диффузионное перераспределение атомов меди с формированием мелкодисперсных (30 нм) частиц  $CuAl_2$ .

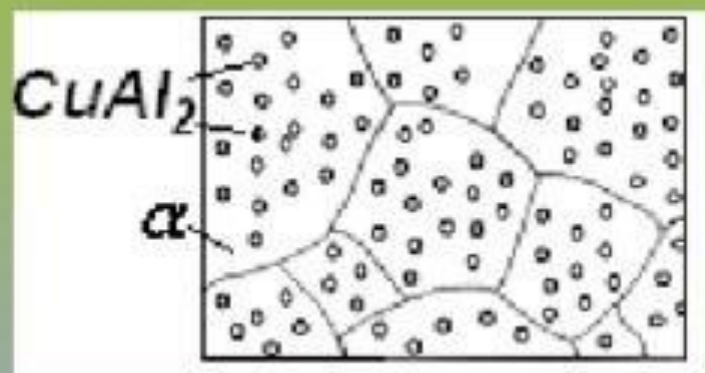
Формирование в структуре сплава дисперсных частиц  $CuAl_2$  включает механизм дисперсионного упрочнения и приводит к значительному повышению значений прочности и твердости (120 НВ), при незначительном снижении пластичности ( $\delta = 10-18\%$ ).



# Термообработка дуралюмина

## Отжиг

**Отжиг** (разупрочняющая термообработка) дуралюмина заключается в нагреве сплава до 550 °С выдержке и охлаждении вместе с печью.



В отожженном – равновесном состоянии структура дуралюмина состоит из зерен твердого раствора меди в алюминии и частиц соединения  $CuAl_2$ . При этом частицы  $CuAl_2$  крупные.

Такая структура обеспечивает сплаву хорошую пластичность ( $\delta = 18-20\%$ ) при относительно невысоких значениях прочности и твердости (49 НВ).



## T-состояния алюминиевых деформируемых сплавов

Состояние сплава	Технологические операции
T1	Охлаждение с температуры горячего процесса изготовления и естественное старение
T2	Охлаждение с температуры горячего процесса изготовления, холодная деформация и естественное старение
T3	Закалка, холодная деформация и естественное старение
T4	Закалка и естественное старение
T5	Охлаждение с температуры горячего процесса изготовления и искусственное старение
T6	Закалка и искусственное старение
T7	Закалка и искусственное перестаривание
T8	Закалка, холодная деформация и искусственное старение
T9	Закалка, искусственное старение и холодная деформация