

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

**Кафедра металловедения, технологии и термической  
обработки металлов**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**  
**по дисциплине «Термическая обработка металлов»**  
**в таблицах и схемах**

Переутверждено на заседании  
кафедры ТОЛП  
Протокол №2 от 28.08.2012

**2008**

Пособие составлено в соответствии с курсом лекций, который читается студентам специальностей «Литейное производство черных и цветных металлов», как составной раздел курса «Металловедение», а также студентам специальности «Обработка металлов давлением» – как самостоятельная учебная дисциплина. Пособие может быть полезно также студентам всех специальностей, изучающим курс «Материаловедение», особенно студентам заочной формы обучения.

Весь учебный материал представлен в виде схем и таблиц, сопровождается иллюстрациями, которые облегчают понимание учебного материала. Такой подход позволяет студентам легче ориентироваться в сложных процессах структурных изменений, которые протекают при термической обработке, а также представляют большой практический интерес для составления конкретных технологий термической обработки преимущественно крупных поковок и стальных отливок.

Учебное пособие состоит из двух частей: теории термической обработки и технологии термообработки.

В первой приведены теоретические предпосылки превращений при нагреве стали, рассмотрены процессы аустенитизации, изменения размеров зерна и другие явления, сопровождающие процессы нагрева. Представлены также теоретические предпосылки превращений, совершающиеся при охлаждении, уделено внимание таким сложным явлениям как перлитное, бейнитное и мартенситное превращения.

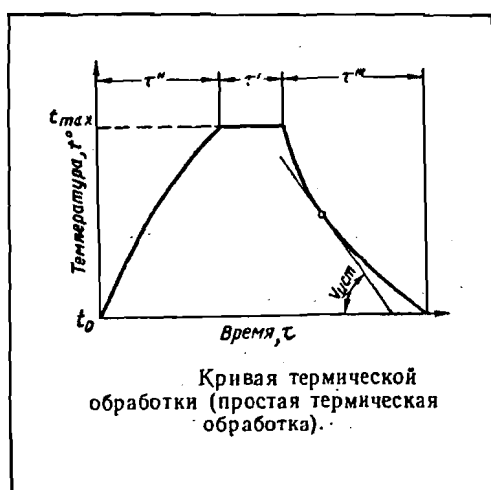
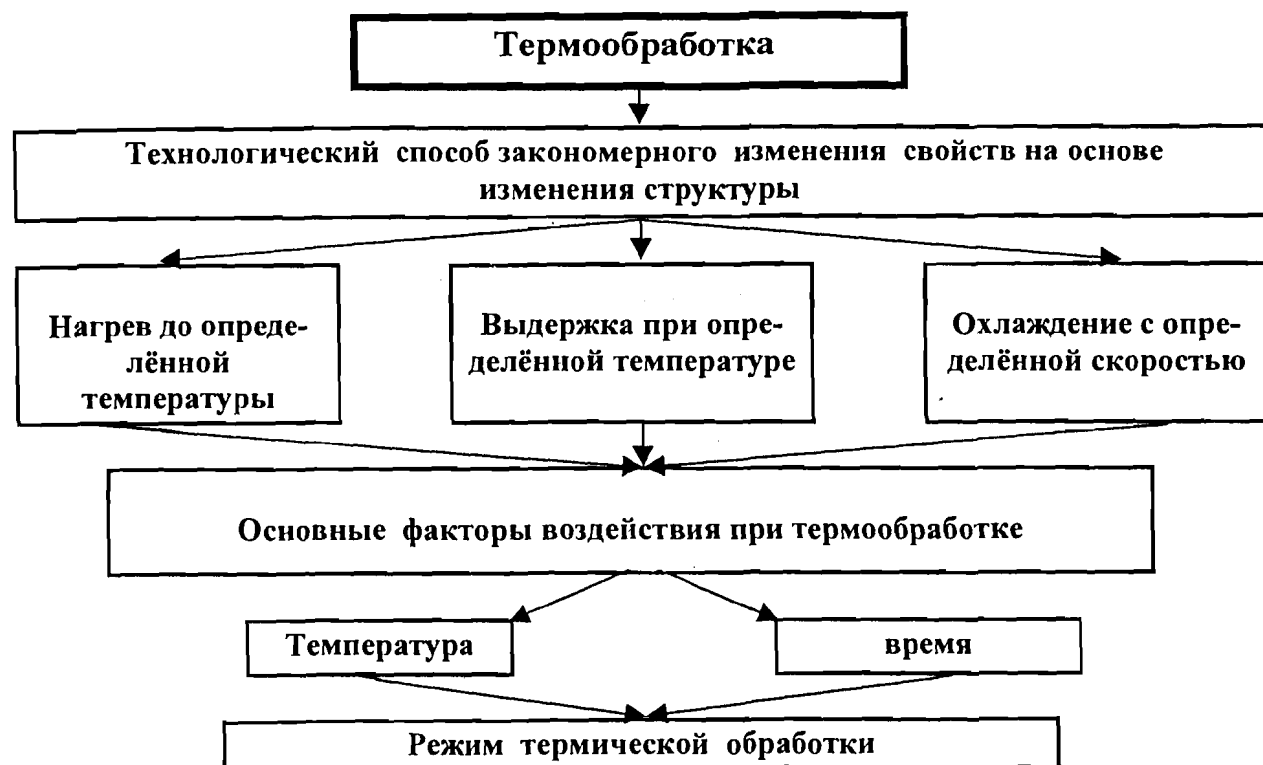
Вторая часть пособия посвящена практическим приемам разработки технологии всех видов термической и химико-термической обработки. Весь представленный учебный материал оформлен в виде графиков термообработки, отражающий опыт термических цехов машиностроительных заводов.

Настоящее пособие предназначено для студентов всех специальностей, изучающих курсы «Металловедение», «Материаловедение» и «Термическая обработка», будет полезно студентам при выполнении расчетно-графических работ, контрольных работ студентами-заочниками, при подготовке к зачетам и экзаменам.

Составитель

М.Я.Белкин,  
проф., докт.техн.наук

# 1 Общие положения

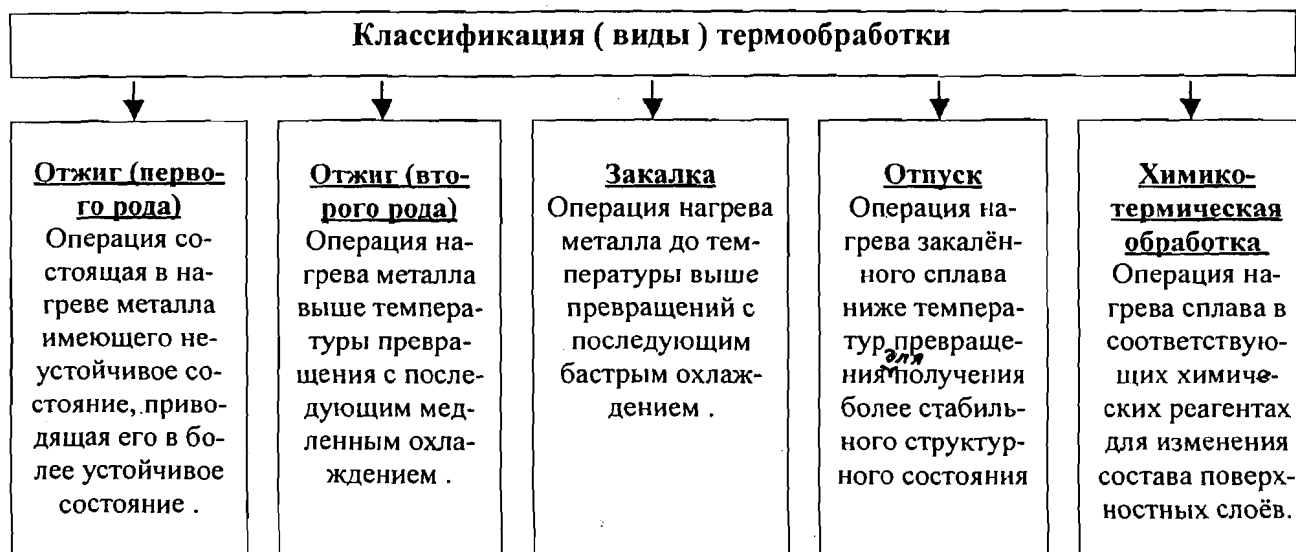


$t_{max}$  – температура нагрева, °C

$\tau'$  – время выдержки, ч

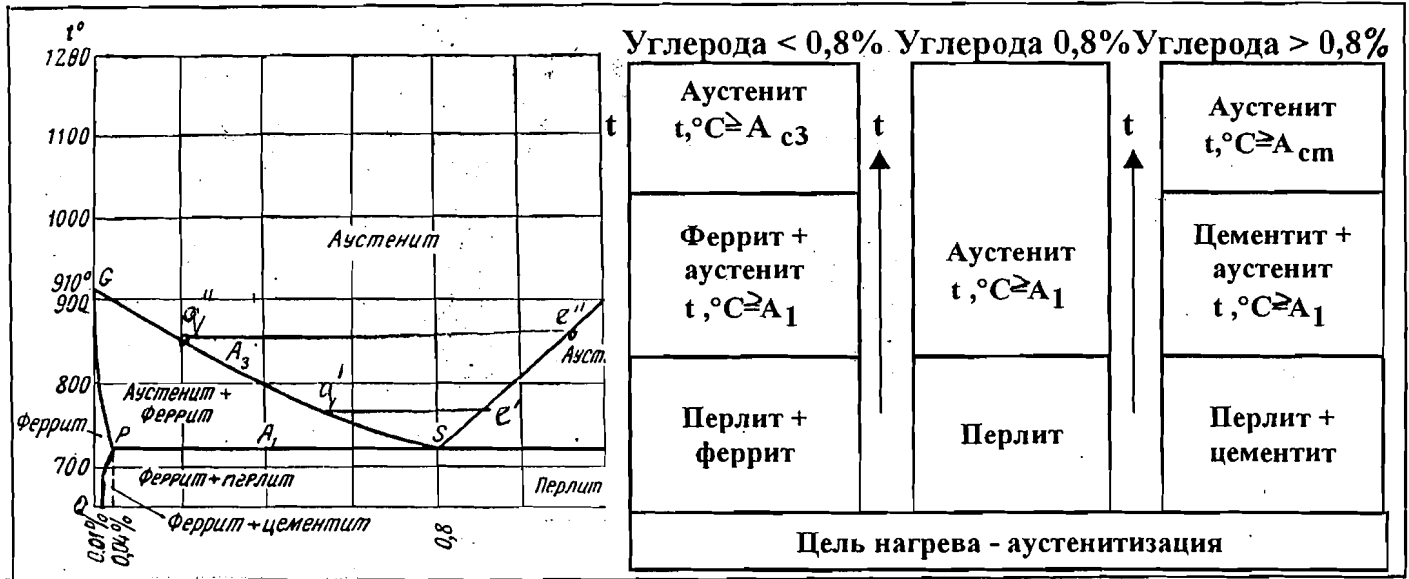
$\tau''$  – время нагрева (скорость нагрева) °C или °C/с

$\tau'''$  – время охлаждения, час ;  
или скорость охлаждения °C/с

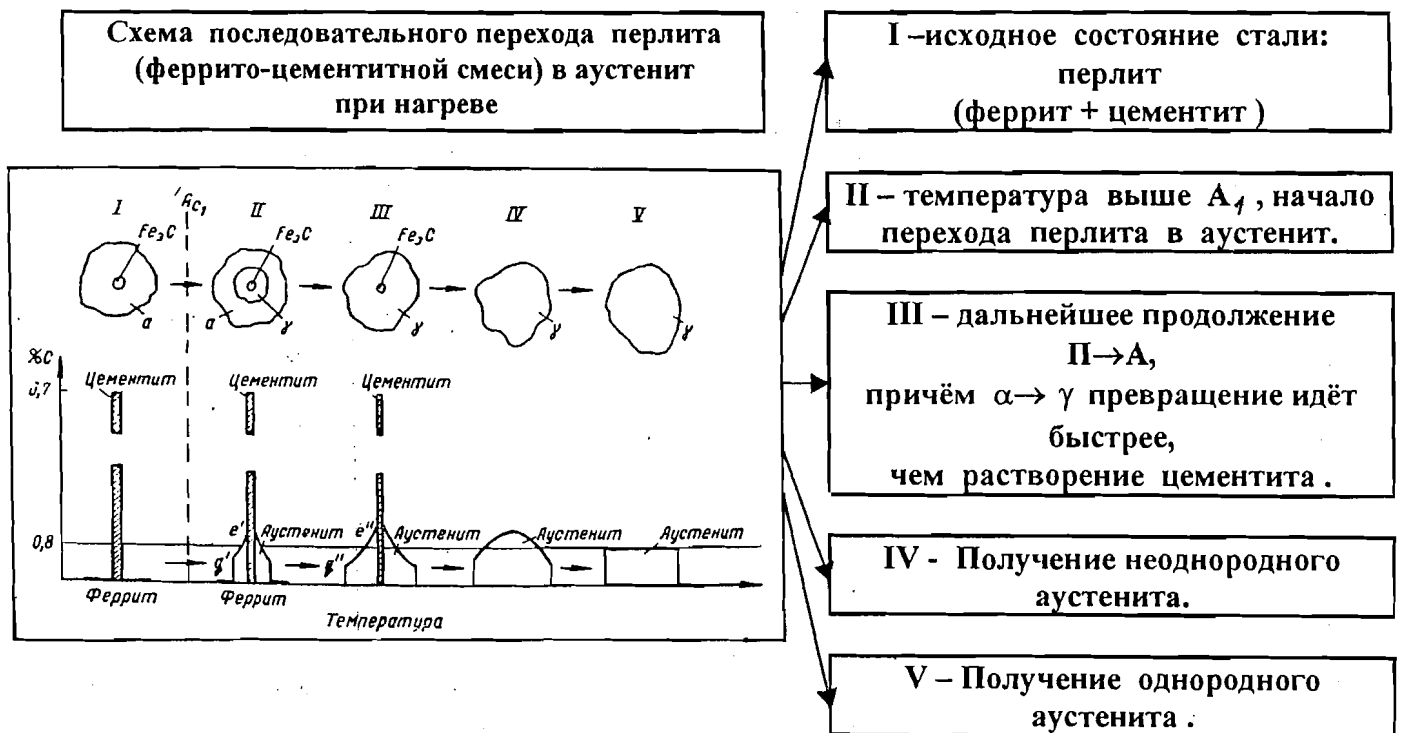


## 2 Превращения в сталях при нагреве

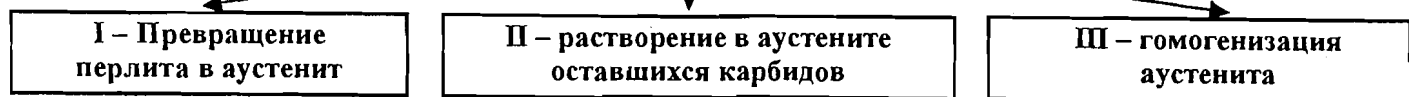
### 2.1 Анализ по диаграмме состояния "Fe-Ц"



### 2.2 Механизм образования аустенита при нагреве



#### Три этапа аустенитизации



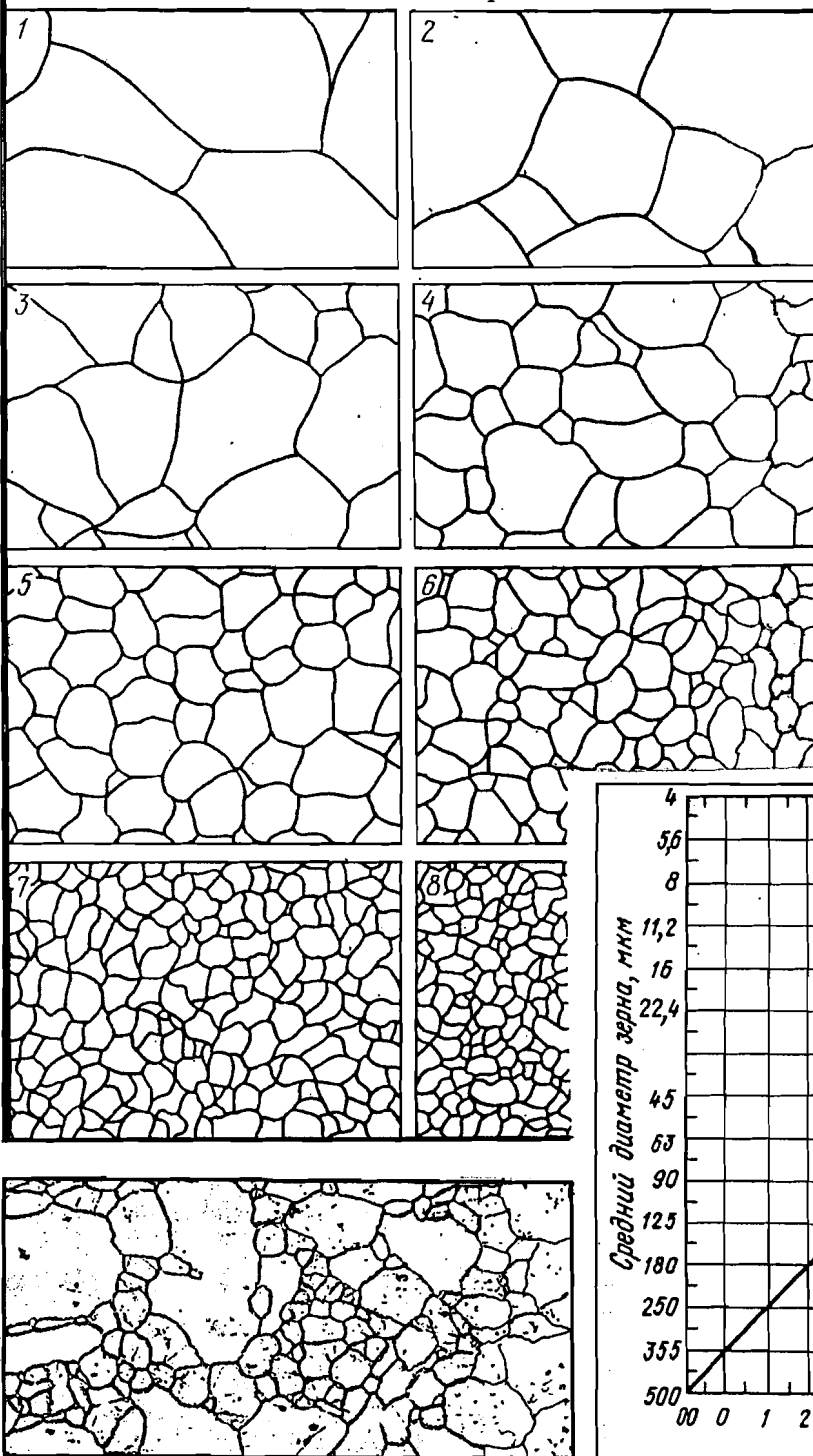
### 4.3 Методы определения величины зерна

Выявленное зерно аустенита оценивают двумя методами

**1 Метод сравнения** – когда наблюдаемую структуру при увеличении 100 сравнивают со стандартной шкалой зернистости.

Баллы 1...5 - крупнозернистые стали

Баллы 6...и более - мелкозернистые стали.



**2 Статистический метод** – метод определения окуляр - микрометром диаметра зерен, попадающих в 25 полей зрения.

Рассчитывают:

а) Средний диаметр зерна

$$D_{cp} = \sum d_i / m$$

$d_i$  – размер зерна в делениях окуляр - микрометра;

$m$  – число зёрен;

б) по цене деления окуляр - микрометра  $E$  рассчитывают истинный средний диаметр зерна

$$d_{cp} = D_{cp} \cdot E$$

в) определяют среднюю площадь зерна, принимая его за шар

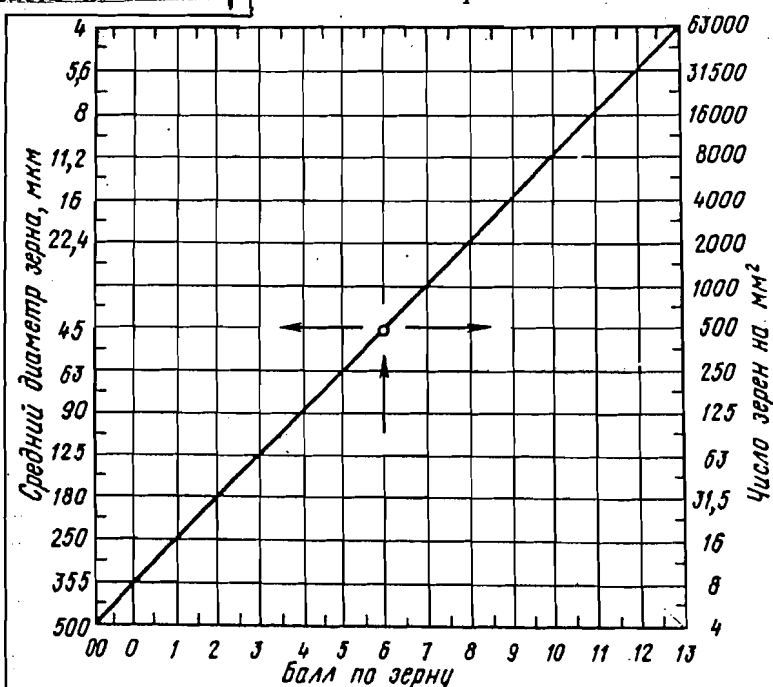
$$F = \pi d_{cp}^2 / 4$$

г) количество зерен на площади

$$1 \text{ мм}^2$$

$$N' = 1 / F$$

Зная  $N'$  по номограмме определяют балл зерна.



### 3 Образование аустенита

3.1

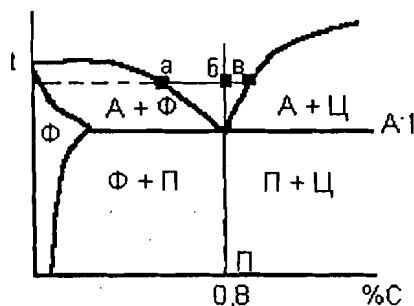
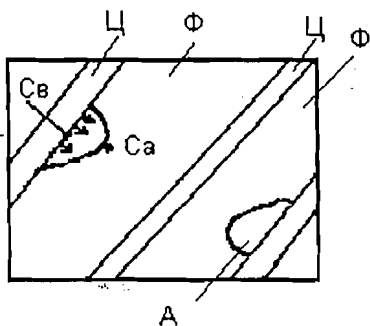
#### МЕХАНИЗМ

Зарождение центров аустенита

Рост образовавшихся центров

На базе фазовых флуктуаций

На основе разной концентрации углерода на границе "феррит-аустенит" и "цементит-аустенит"



Ц – цементит; Ф – феррит; А – аустенит; П – перлит.

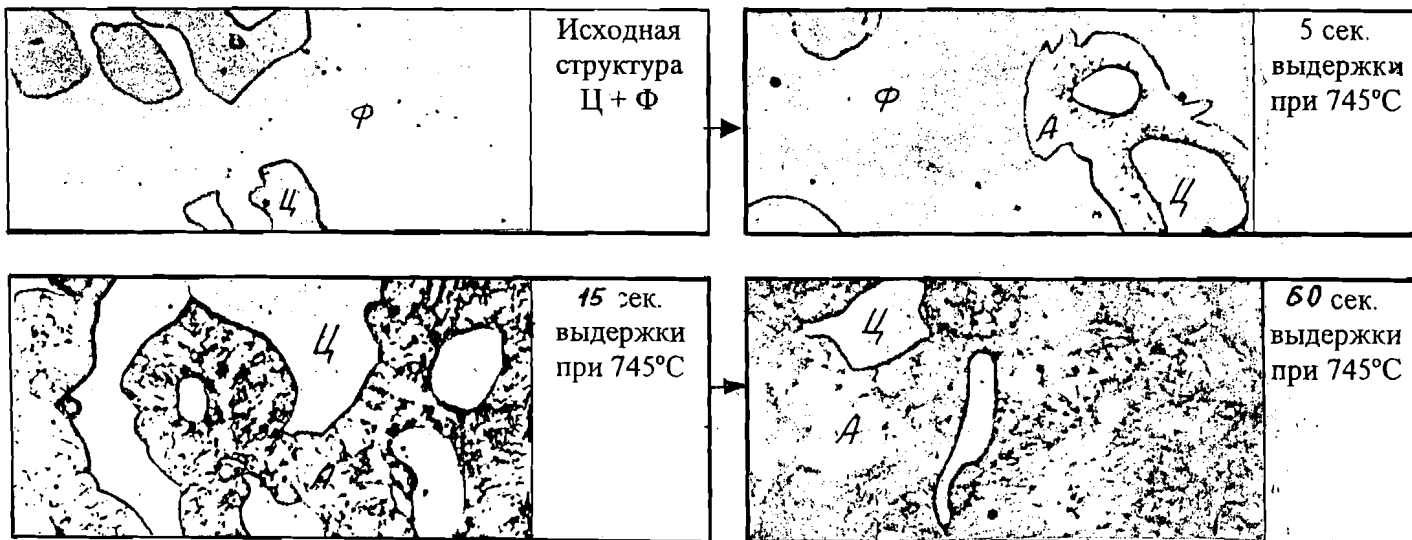
При  $t > A_1$

$C_a$  – концентрация углерода на границе раздела "А – Ф"

$C_n$  – концентрация углерода на границе раздела "А – Ц"

Т.к.  $C_b > C_a$  происходит диффузионный перенос углерода от границы "А-Ц" (показано стрелками) к границе "А-Ф". В результате нарушается равновесие, и для восполнения отведенных атомов углерода цементит растворяется, а  $\alpha \rightarrow \gamma$ , при этом углерод растворяется в образующемся аустените. Процесс образования аустенита закончится растворением цементита

Микрофотографии, характеризующие процесс образования аустенита.  $\times 2000$



## 3.2 Кинетика образования аустенита

Она изучается в изотермических условиях, т.е. после быстрого нагрева до несколько более высокой температуры, чем температура фазового равновесия, выдержки при этой температуре с фиксацией во времени количества образующегося аустенита. Кривая, характеризующая изменение количества образующегося аустенита при данной температуре выше критической во времени называется кинетической кривой.

Кинетические кривые превращения перлита в аустенит при разных температурах. Сталь У8.

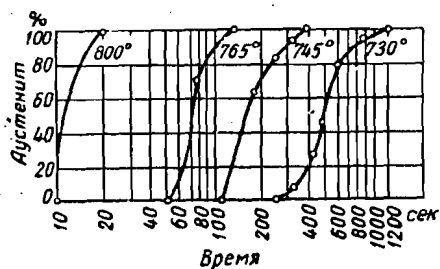
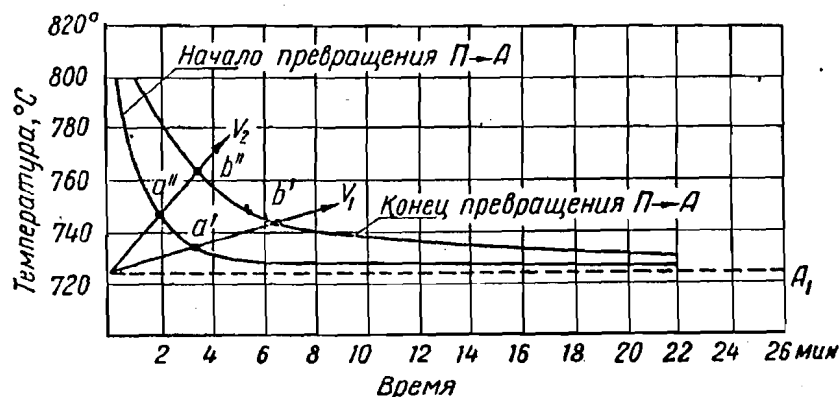
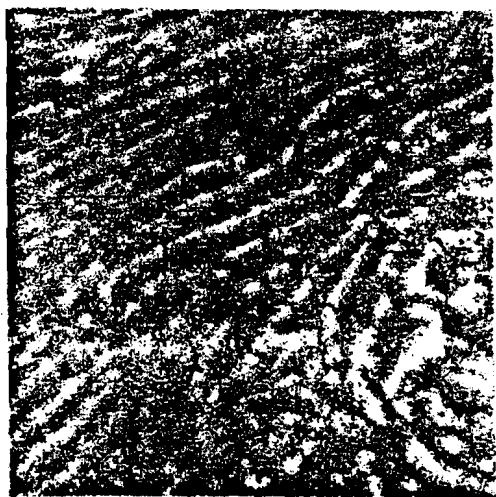


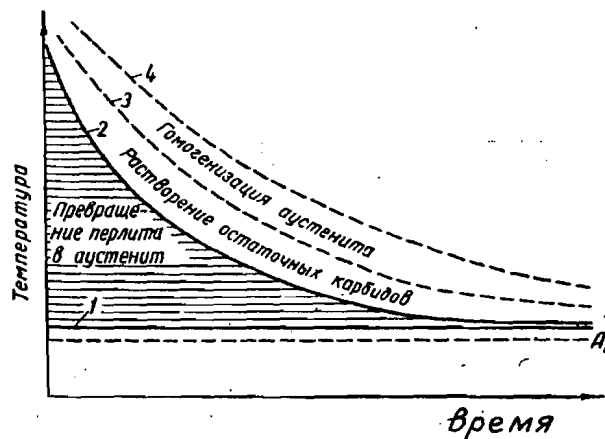
Диаграмма изотермического образования аустенита, построенная по кинетическим кривым.



Фактически после завершения превращения перлита в аустенит в последнем остаются частицы нерастворившихся карбидов и требуется дополнительное время для полного их исчезновения. Образующийся аустенит химически неоднороден. Для его гомогенизации (выравнивания состава) требуется также дополнительное время. С учетом отмеченного полная диаграмма изотермического образования аустенита имеет следующий вид.



Неравномерное распределение углерода в аустените (специальное травление).  $\times 2500$



- 1 – начало превращения  $\text{П} \rightarrow \text{А}$ ;
- 2 – конец превращения  $\text{П} \rightarrow \text{А}$ ;
- 3 – конец растворения цементита;
- 4 – конец гомогенизации аустенита;

## 4 Зерно в стали

Зерно – объем металла с данным направлением кристаллической решетки

### 4.1 Рост зерна аустенита при нагреве

Основные определения

**Исходное** – зерно перлита до начала нагрева

**Начальное** – зерно аустенита в момент его образования

**Наследственное** – зерно аустенита, полученное в результате определенной техн. пробы

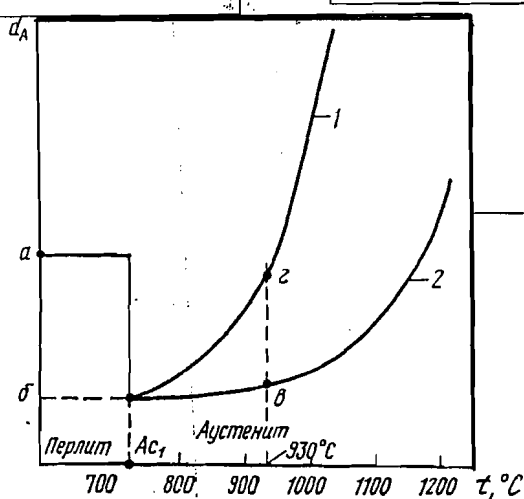
**Действительное** – зерно, полученное в результате конкретного нагрева

Влияние температуры на размер зерна

Всегда мелкое

Наследственно крупнозернистая сталь

Наследственно мелкозернистая сталь



$d$  – диаметр зерна ;  
 $a$  – исходное зерно перлита ;  
 $b$  – начальное зерно аустенита ;  
 $z$  – размер зерна, полученный в стандартных условиях технологической пробы (нагрев до температуры  $930^{\circ}\text{C}$ ).

Кривая 1 – наследственно крупнозернистая сталь ;

Кривая 2 – наследственно мелкозернистая сталь ;

### 4.2. Методы выявления склонности зерна аустенита к росту

Способы выявления наследственности роста зерна аустенита

**Метод науглероживания:** насыщение углеродом в углеродсодержащей среде при  $930^{\circ}\text{C}$ , 8 час.

**Метод окисления:** металлографический шлиф нагревают в окислительной среде при  $930^{\circ}\text{C}$ , 8 час.

**Метод нагрева:** нагревают до  $930^{\circ}\text{C}$  с выдержкой 8 час.

**Непосредственное наблюдение** за ростом зерна в вакуумной камере

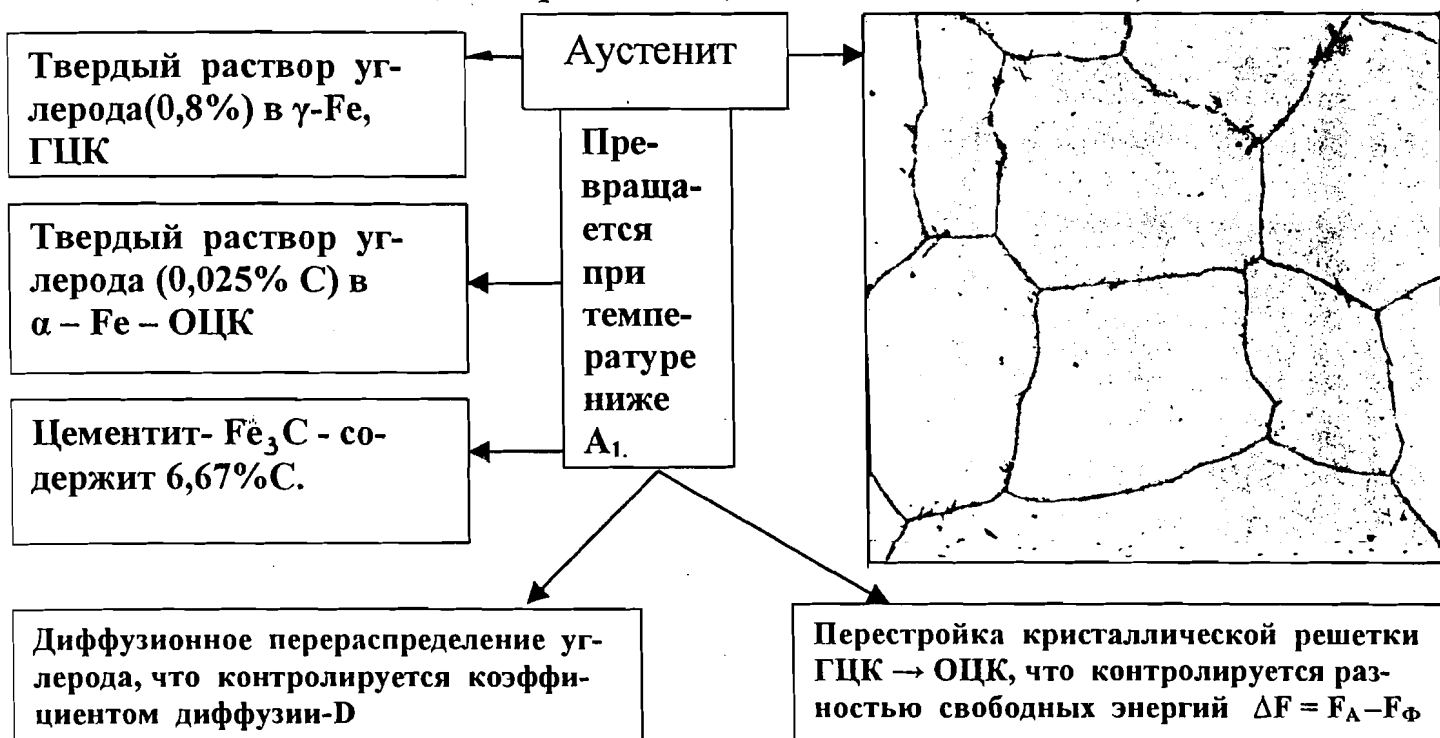


Выявленное зерно аустенита

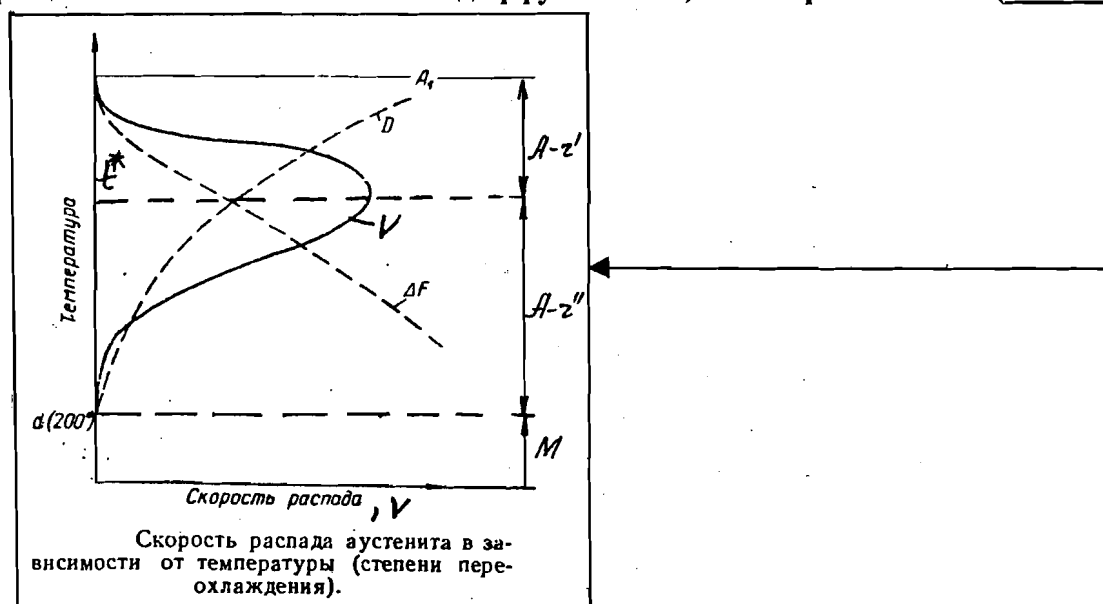


## 5 Превращения в сталях при охлаждении аустенита.

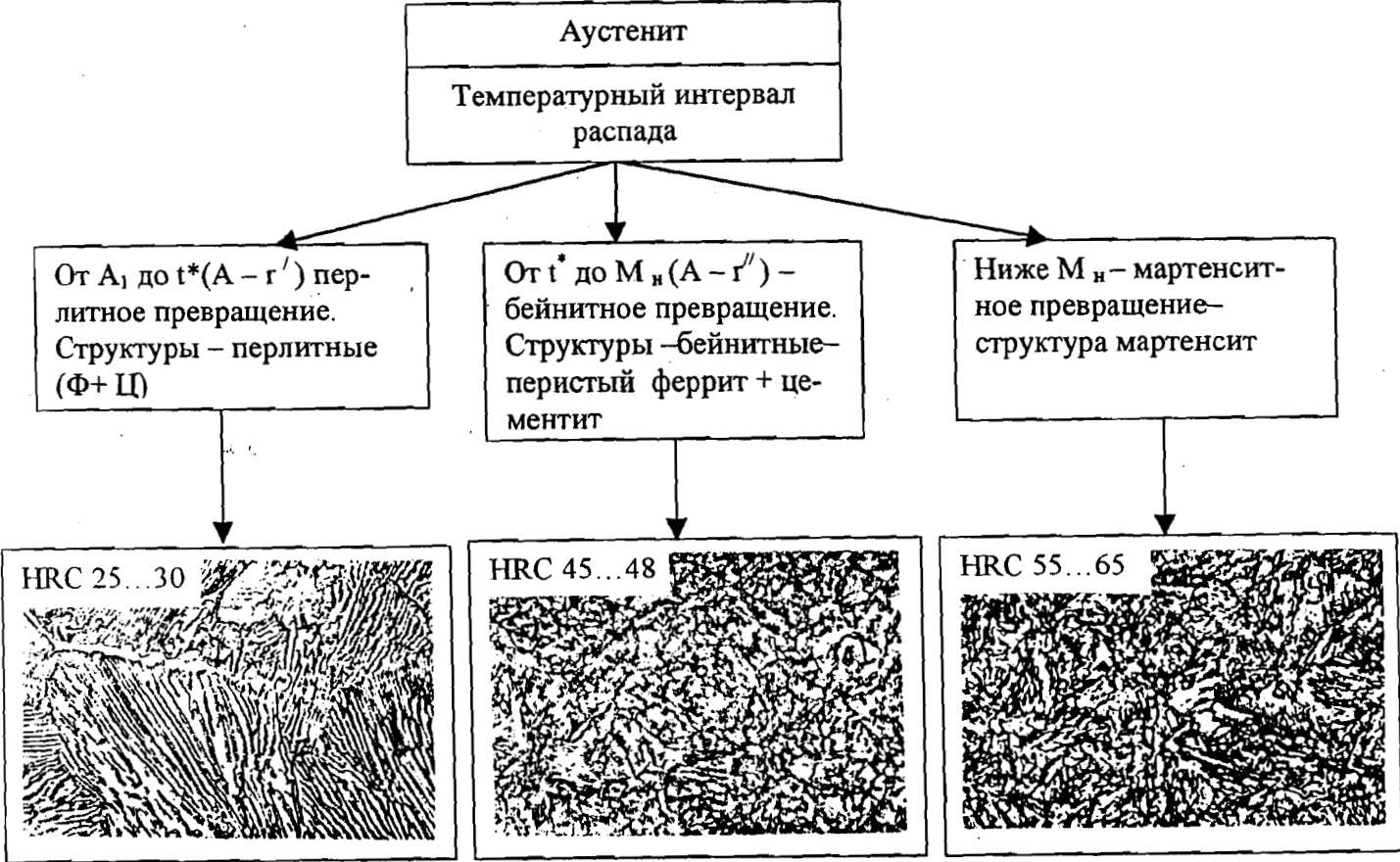
### 5.1 Общая теория превращения (применительно к стали, содержащей 0,8 % С-эвтектоидной).



С понижением температуры ниже  $A_1$  скорость диффузии снижается, т.е. при увеличении переохлаждения (снижении температуры превращения), вступают в борьбу два фактора, прямо противоположно влияющие на скорость превращения. С одной стороны, снижение температуры увеличивает  $\Delta F$ , что ускоряет превращение, с другой – снижает  $D$ , а это замедляет превращение. В итоге, вначале до некоторой температуры  $t^*$  увеличение переохлаждения ускоряет превращение (этот интервал называется перлитным превращением и обозначается  $A - r'$ ), а ниже  $t^*$  – скорость превращения убывает (этот диапазон  $t^* - d$  называется бейнитным и обозначается  $A - r''$ ). При температурах ниже  $d$  ( $\approx 200^\circ C$ ) диффузионное превращение исключается ( $D = 0$ ). Диапазон превращения ниже  $d$  называется бездиффузионным, или мартенситным (см. схему).

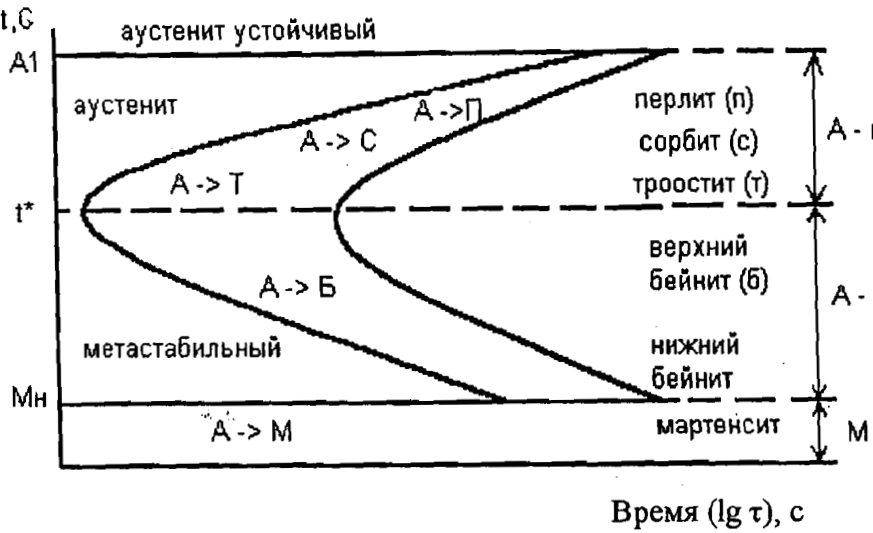


## 5.2 Основные структуры стали, возникающие в результате распада переохлажденного аустенита



## 5.3 Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита

Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита строится экспериментально в координатах "температура,  $^{\circ}\text{C}$  – время ( $\lg$ ) в сек" и служит для теоретического анализа особенностей структурообразования и оценки свойств стали.



сталь У8

$A - \gamma'$  – температурный интервал перлитного превращения.

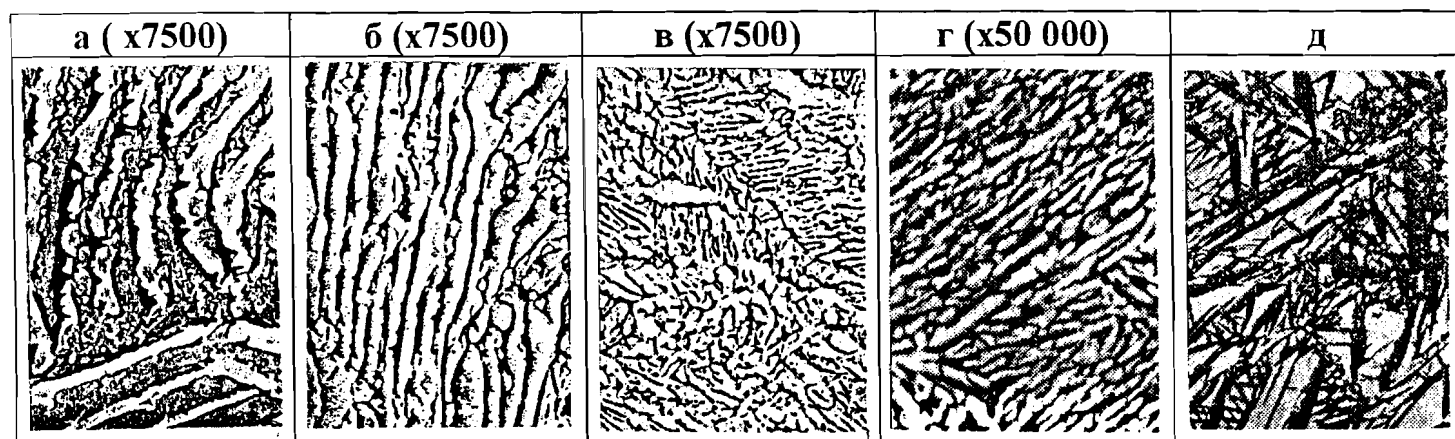
$A - \gamma''$  – температурный интервал промежуточного (бейнитного) превращения.

$M$  – температурный интервал образования мартенсита.

## 5.4 Структура и свойства стали в зависимости от температурного интервала распада переохлажденного аустенита.

Продукты распада переохлажденного аустенита

Температурный интервал распада аустенита, °C	Время распада, сек.	Твердость продуктов распада, HRC	Характер образующихся структур.	Толщина пластин, мкм	Наименование структур	№ рис.
A <sub>1</sub> ...650	1000	18...25	грубопластинчатая	0,6...1,0	перлит	а
650...600	10	25...35	среднепластинчатая	0,25...0,30	сорбит	б
600...t*	2	35...45	тонкопластинчатая	0,10...0,15	троостит	в
t*...200	1500	45...55	перистый	иглы	бейнит	г
Ниже 200	0,5	55...63	игольчатый	иглы	мартенсит	д



Таким образом, структура и свойства стали определяются той температурой при которой эта структура образовалась.

## 5.5 Перлитное превращение (A – r')

Носит кристаллизационный характер, состоит в зарождении центров цементита и в чередующемся росте колонии “цементит – феррит”.

I – аустенит;

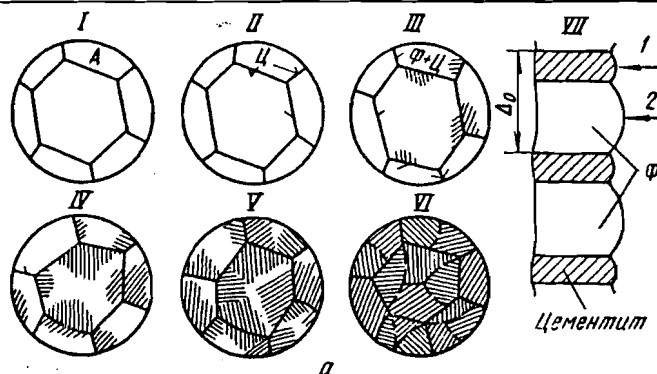
II – образование зародыша цементита;

III – образование пластины феррита;

IV...VI – рост цементита и феррита.

1 – цементит (6,67%C);

2 – феррит (0,025%C).



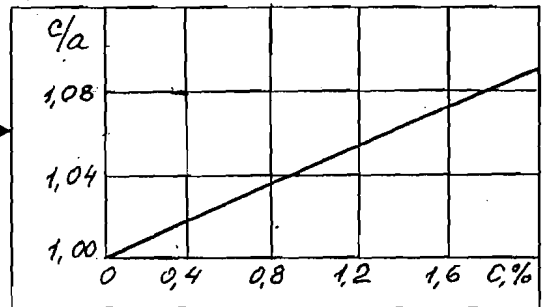
## 5.6. Мартенситное превращение

Мартенсит

→ пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе.

Тетрагональная кристаллическая решетка в которой один период "с" больше другого "а"

С увеличением содержания углерода отношение  $c/a$  увеличивается



Отличительные особенности мартенситного превращения

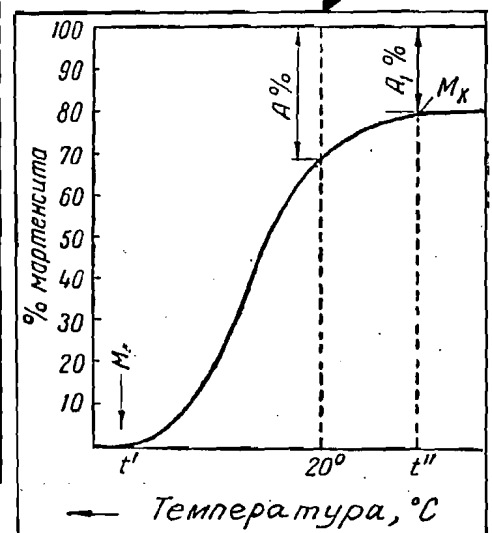
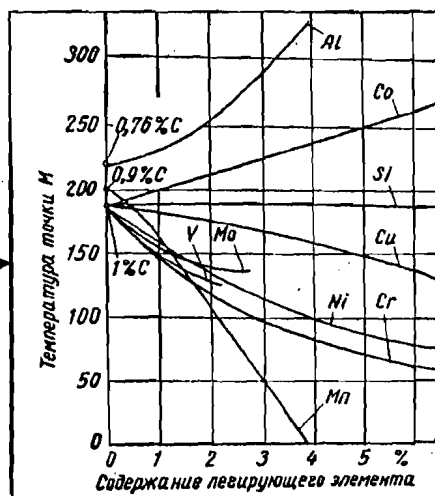
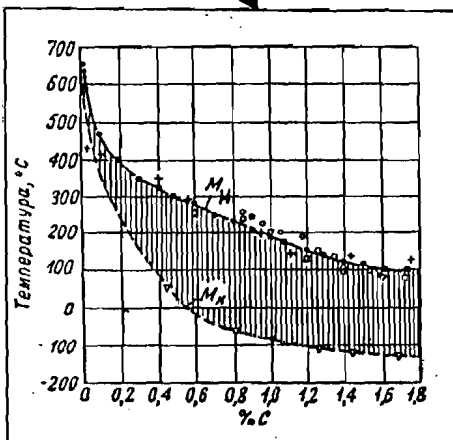
Протекает в определенном интервале температур, ограниченном верхней  $M_n$  и нижней  $M_k$  мартенситными точками

Изотермически мартенситное превращение не идет. Мартенсит образуется при непрерывном охлаждении

Протекает в условиях отсутствия диффузии. Для этого сталь из аустенита должна охлаждаться со скоростью больше критической

По мере развития превращения кристаллы мартенсита все уменьшаются. Скорость роста мартенсита чрезвычайно велика

Не идет до конца. При фактическом окончании остается аустенит, который называется остаточным.



Свойства мартенсита

Высокая твердость:  
HRC 64...65

Высокая прочность:  
 $\sigma_b = 2000...2300$  МПа

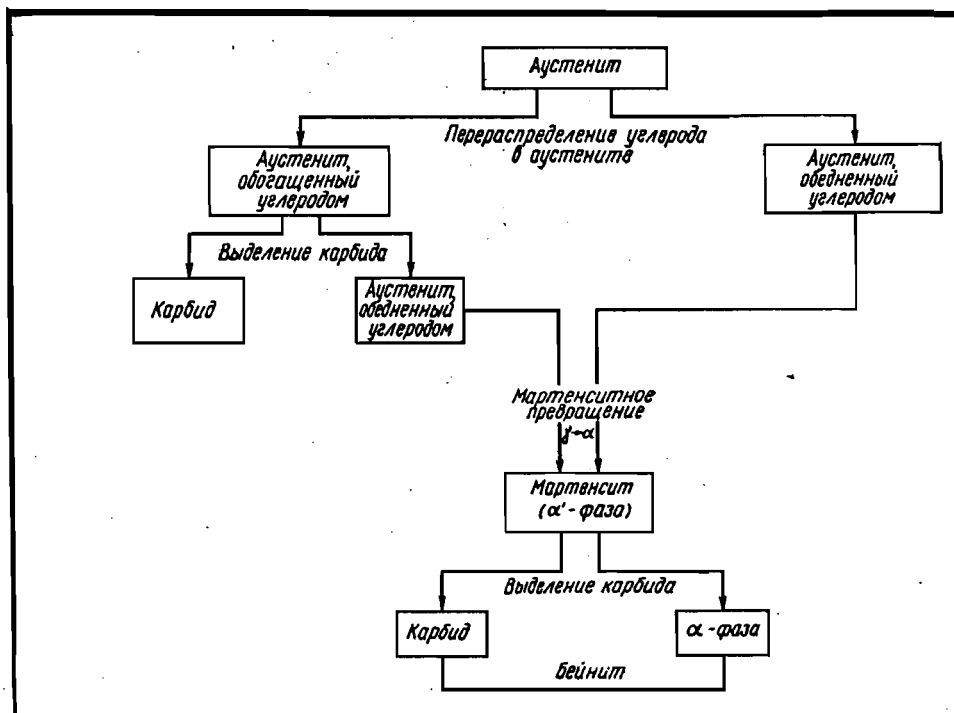
Высокая плотность дислокаций и как следствие – высокая хрупкость

Высокая коэрцитивная сила и электросопротивление

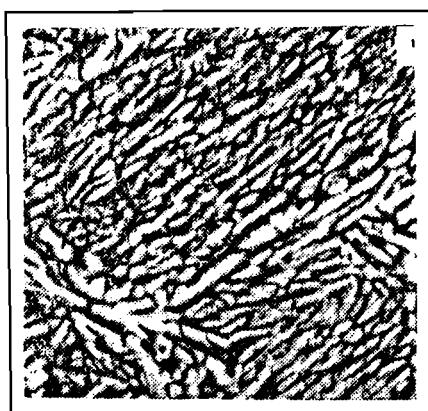
Большой уд. объем и вследствие этого – внутренние напряжения.

## 5.7 ПРОМЕЖУТОЧНОЕ (БЕЙНИТНОЕ) ПРЕВРАЩЕНИЕ –А-Г''

Протекает в диапазоне от температуры минимальной устойчивости переохлажденного аустенита до начала мартенситного превращения и в условиях затрудненной диффузии атомов углерода. Образуется бейнит- структура, состоящая из  $\alpha$ - твердого раствора, претерпевшего превращения типа мартенситного и несколько пересыщенного углеродом и мелкодисперсных частиц карбидов.



Бейнит обеспечивает высокий уровень механических свойств: прочности, пластичности, вязкости.



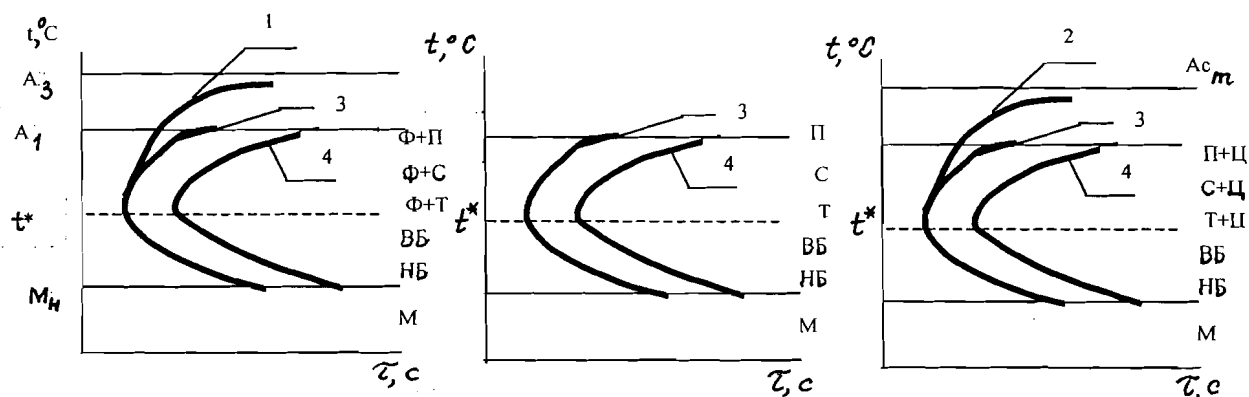
Верхний бейнит  $\times 5000$



Нижний бейнит  $\times 5000$

## 6 ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ДИАГРАММ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА.

### 6.1 УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ.



Доэвтектоидные стали

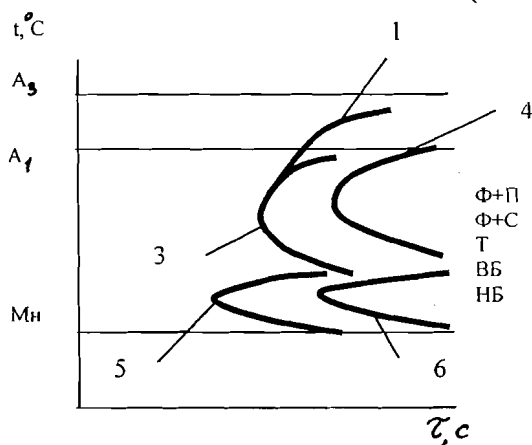
Эвтектоидные стали

Заэвтектоидные стали

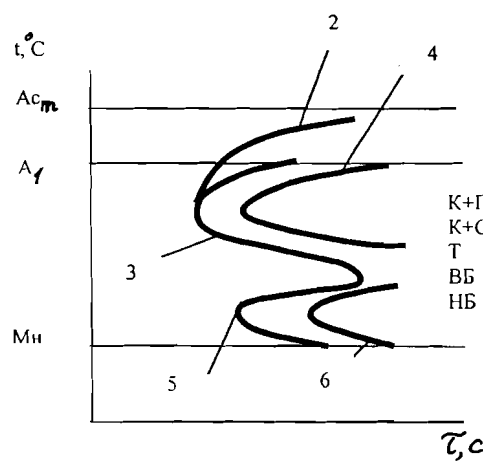
ЛИНИЯ 1-начало выделения из аустенита избыточного феррита;  
ЛИНИЯ 2-начало выделения избыточного цементита;  
ЛИНИЯ 3-начало диффузионного распада аустенита;  
ЛИНИЯ 4-конец диффузионного распада аустенита.

Ф- феррит; Ц- цементит; П- перлит; С- сорбит; Т- тростит; М- мартенсит;  
ВБ- верхний бейнит; НБ- нижний бейнит; К- карбиды.

### 6.2 ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ, СОДЕРЖАЩИЕ КАРБИДООБРАЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (СХЕМЫ)



Малоуглеродистые стали



Высокоуглеродистые стали

ЛИНИЯ 1-начало выделения избыточного феррита;  
ЛИНИЯ 2- начало выделения карбидов;  
ЛИНИЯ 3- начало перлитного превращения;  
ЛИНИЯ 4-конец перлитного превращения;  
ЛИНИЯ 5-начало бейнитного превращения;  
ЛИНИЯ 6-конец бейнитного превращения

## 7 ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

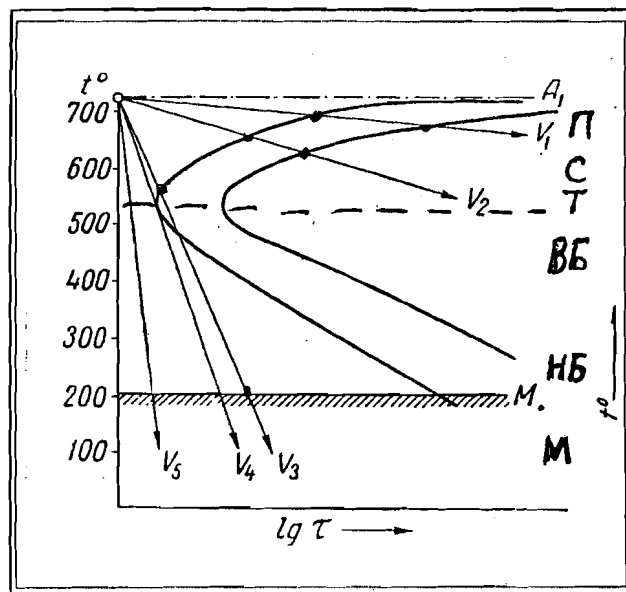
Если на диаграмму изотермического распада переохлажденного аустенита нанести линии, характеризующие скорость непрерывного охлаждения стали, то точки пересечения этих линий с линиями диаграммы определяют температуры соответствующих превращений.

На схеме линии непрерывного охлаждения условно нанесены в виде прямых.

СКОРОСТИ охлаждения:  
 $V_1 < V_2 < V_3 < V_4 < V_5$

Обозначения на схеме:

П – перлит; С – сорбит; Т – троостит;  
 ВБ – верхний бейнит; НБ – нижний бейнит.



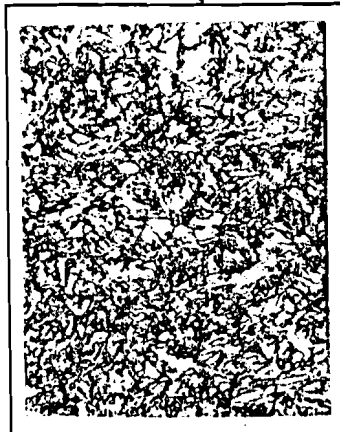
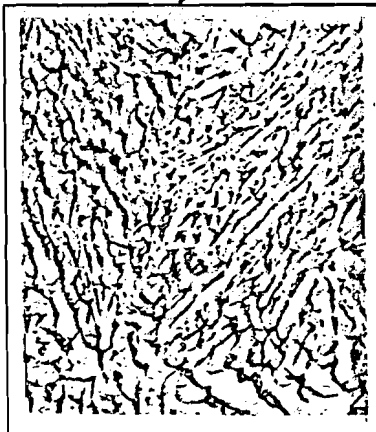
Чтобы получить мартенсит сталь следует охладить со скоростью большей критической

Скорость  $V_1$  –  
 структура перлит

Скорость  $V_2$  –  
 структура сорбит

Скорость  $V_3$  – структура  
 троостит+ мартенсит

Скорость  $V_5 > V_{кр}$  –  
 структура мартенсит



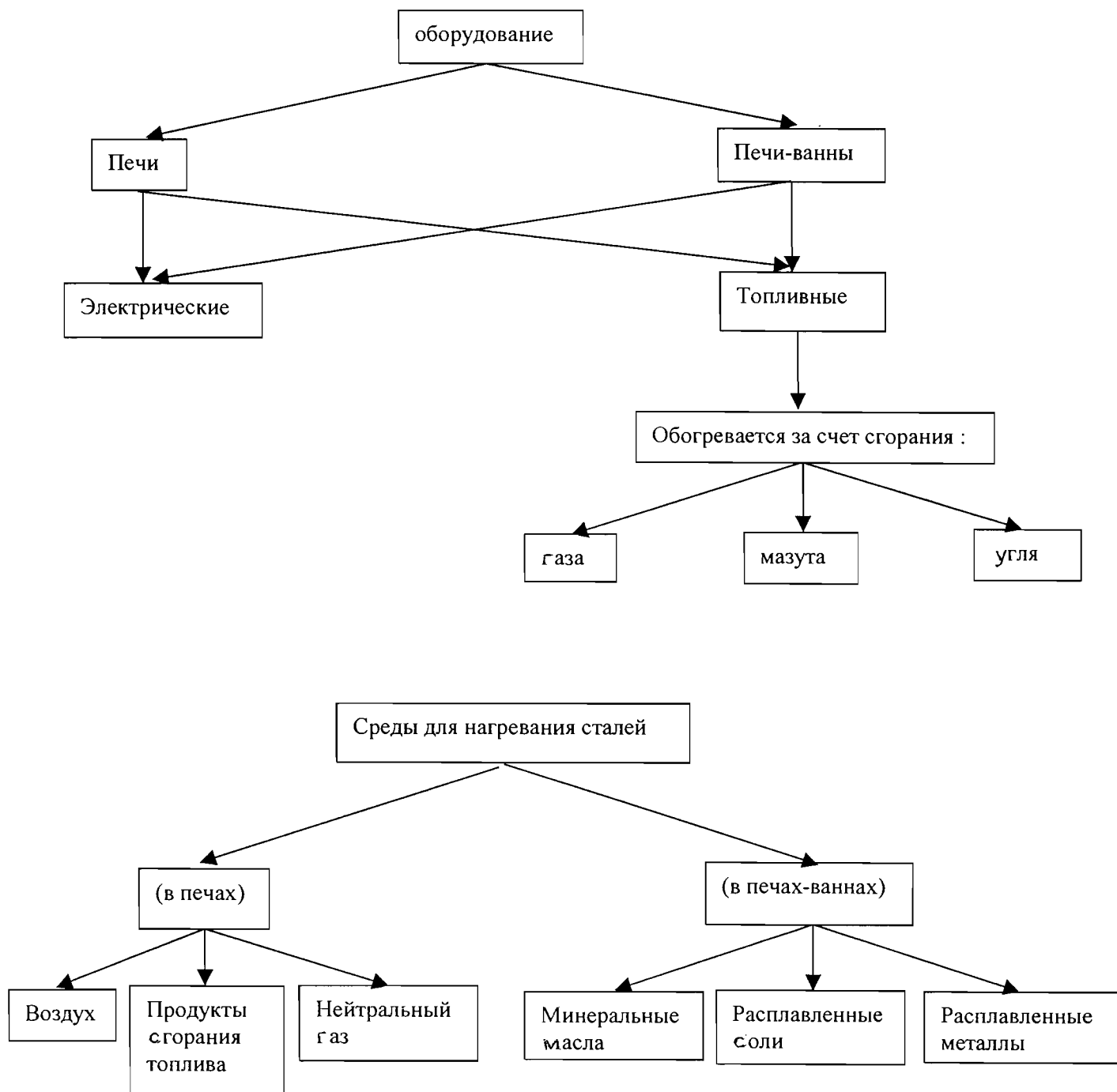
**Вывод:** увеличение скорости непрерывного охлаждения ведет к снижению температур распада аустенита, и повышению дисперсности продуктов превращений и к повышению твердости и прочности стали.

П – перлит; С – сорбит; Т – троостит; М – мартенсит



Влияние скорости охлаждения на положение критической точки.

## ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ

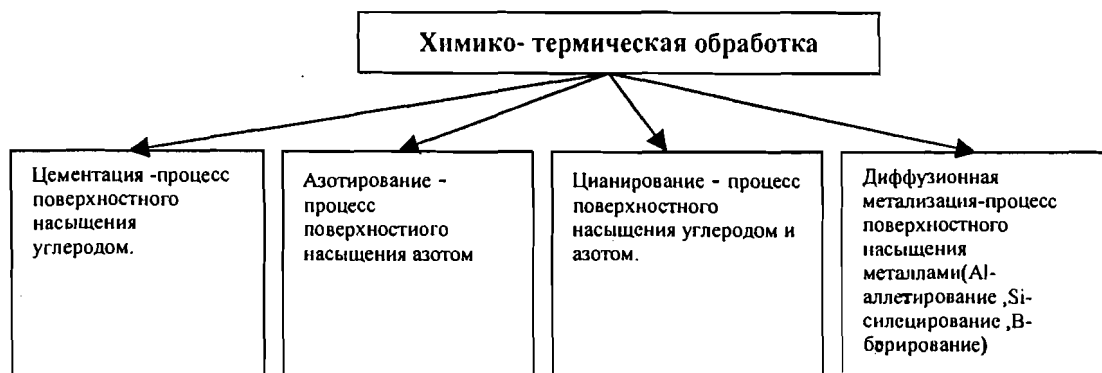




# ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

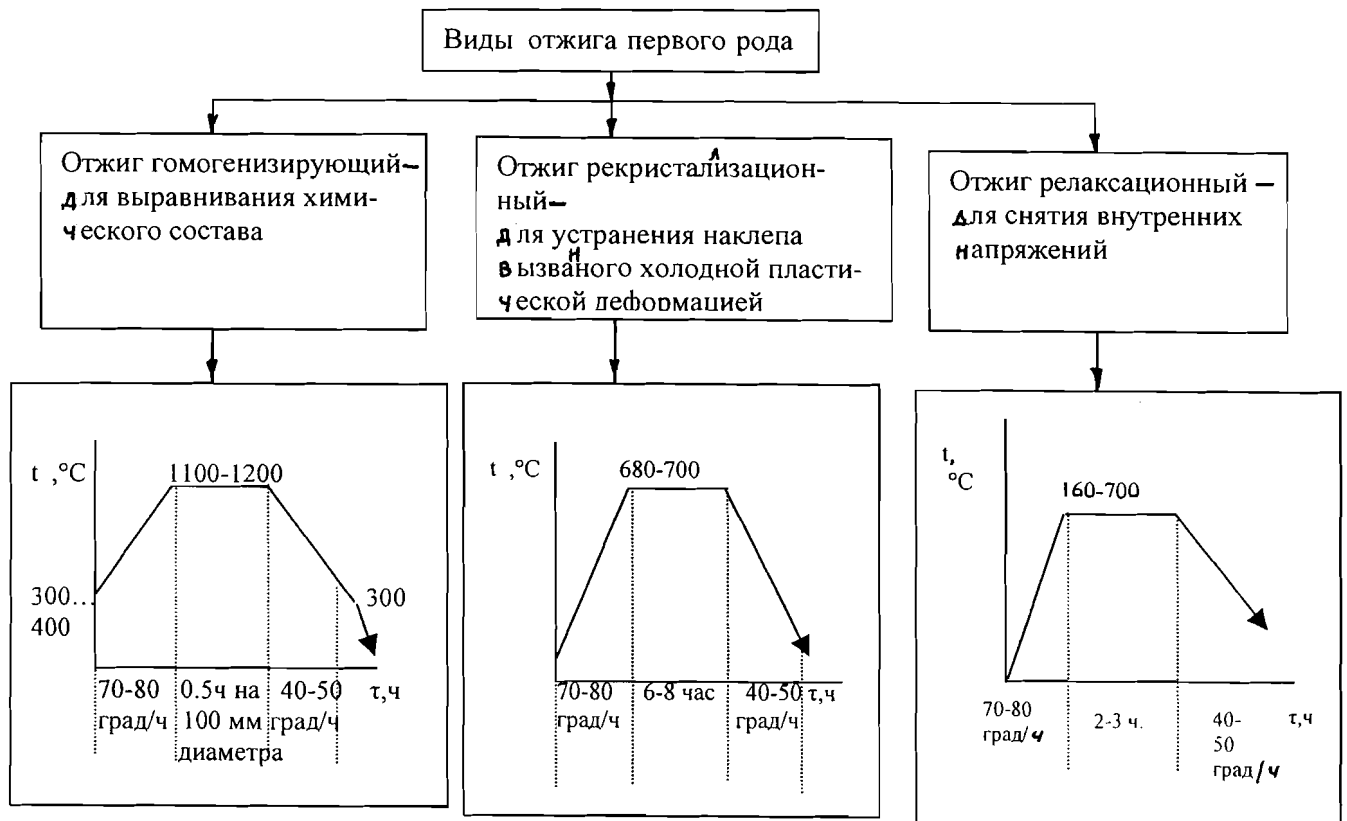
Основные виды термической обработки						
Отжиг	Нормализация	Закалка	Отпуск	Старение	Обработка холодом	Термомеханическая обработка (ТМО)
Процесс термической обработки, заключающийся в нагреве сплава до определенной температуры с последующим медленным охлаждением. Различают отжиг I рода - сопровождается без фазовых переходов и II рода - с фазовыми переходами	Аналогичен отжигу и отличается лишь скоростью охлаждения. Охлаждение на спокойном воздухе.	Процесс термической обработки, при которой сталь нагревают до температуры выше критической линии на 30-50°C, и быстрого охлаждения со скоростью больше критической скорости закалки.	Является заключительной операцией термообработки, при которой закаленный сплав нагревают до определенной температуры, выдерживают и охлаждают.	При низкотемпературном отпуске большая часть внутренних напряжений в закаленной стали остается. С течением времени они исчезают и наступает полное структурное равновесие. Этот процесс называется старением.	Холодом (-60°C и ниже) обрабатывают стали, содержащие свыше 0,5% углерода, и специальные стали.	Метод упрочнения сплавов, заключающийся в совместном пластическом деформировании и термической обработке
Цель отжига - подготовка структуры сплава к обработке резанием, закалке и отпуску.	Цель нормализации - частичное разупрочнение сплавов и снятие остаточных внутренних напряжений, измельчение зерна.	Цель закалки - получение неравновесных структур, в результате повышается твердость	Цель отпуска - повышение пластичности, снижение или устранение внутренних напряжений.	Цель старения - исчезновение внутренних напряжений.	Цель обработки холодом - повышение твердости, износостойкости, особенно цементованных деталей, усиление магнитных свойств.	Цель ТМО - получение особого структурного состояния, обеспечивающего повышение прочности сплава.

Кроме указанных видов термообработки, также применяется химико-термическая обработка (ХТО).

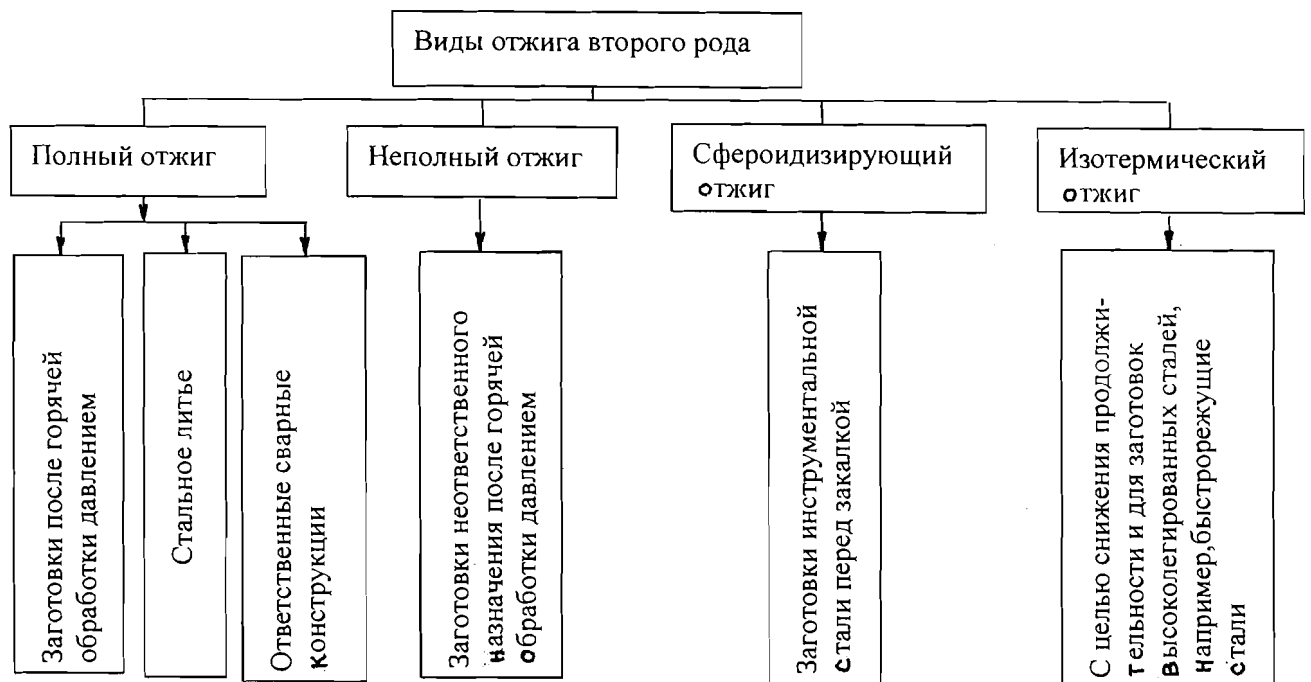


### 8.3 Технология отжига

#### 8.3.1 Отжиг первого рода

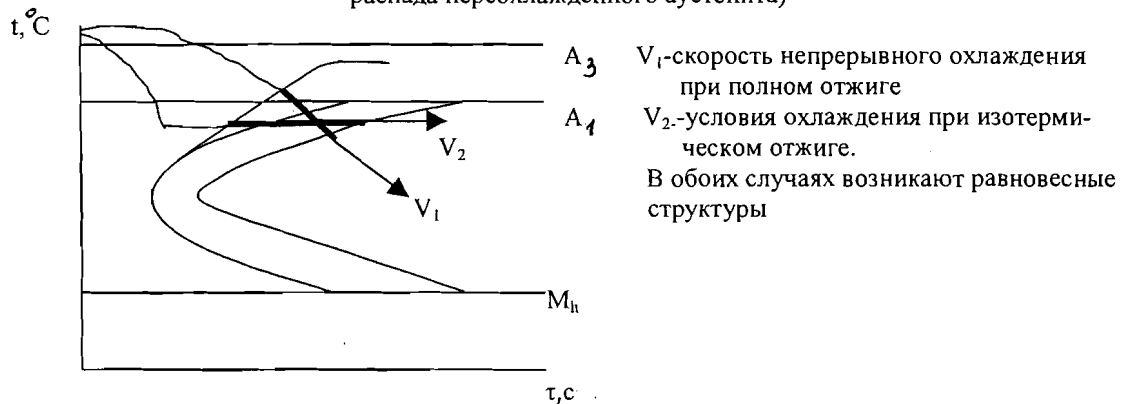


#### 8.3.2 Отжиг второго рода (фазовая перекристаллизация)



### 8.3.3 Технология отжига второго рода.

#### 8.3.3.1 Теоретические аспекты (совмещение графика охлаждения с диаграммой изотермического распада переохлажденного аустенита)



#### 8.3.3.2 Практические режимы отжига крупных заготовок.

ГРАФИК  
ТЕХНОЛОГИИ ОТЖИГА СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ

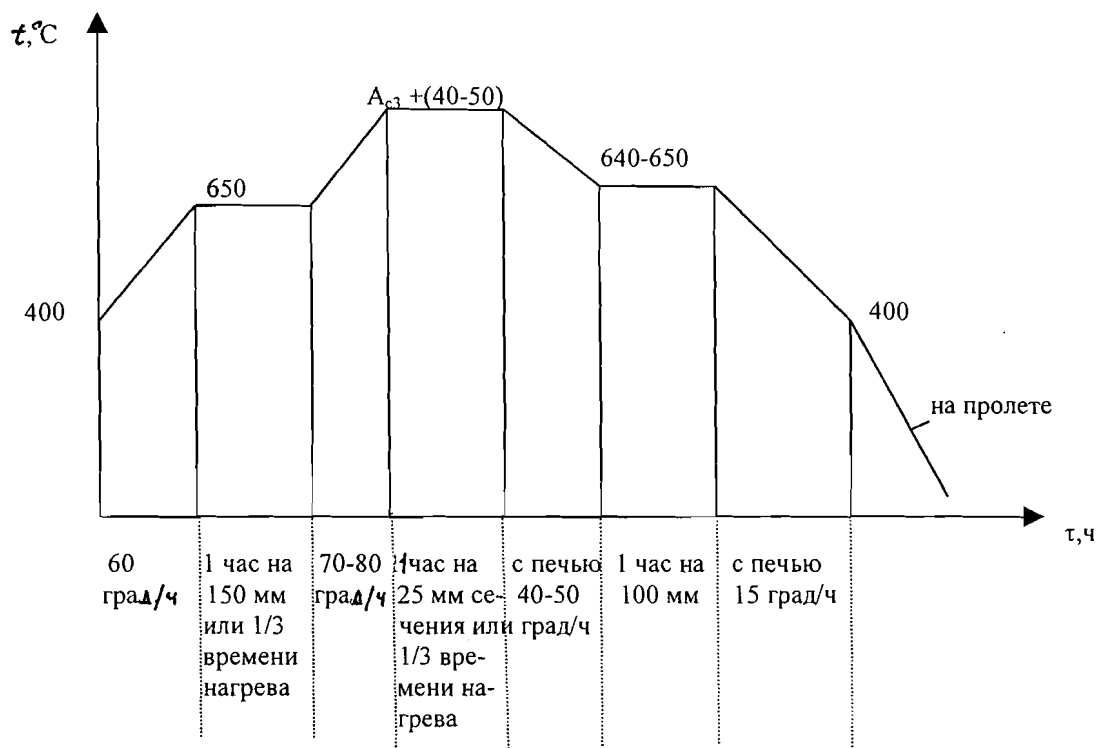


ГРАФИК  
ТЕХНОЛОГИИ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА СТАЛЕЙ  
ТИПА 90Х и 90ХФ

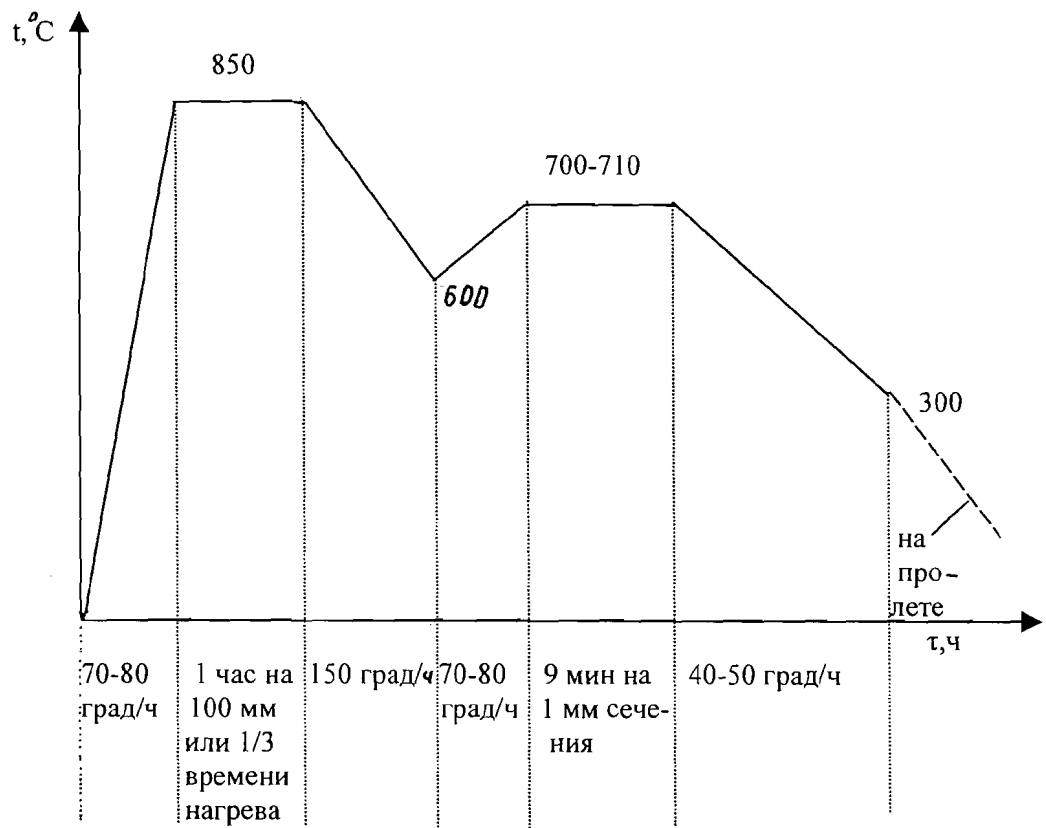


ГРАФИК  
ТЕХНОЛОГИИ ОТЖИГА ПОКОВОК ИЗ ФЛОКЕНОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

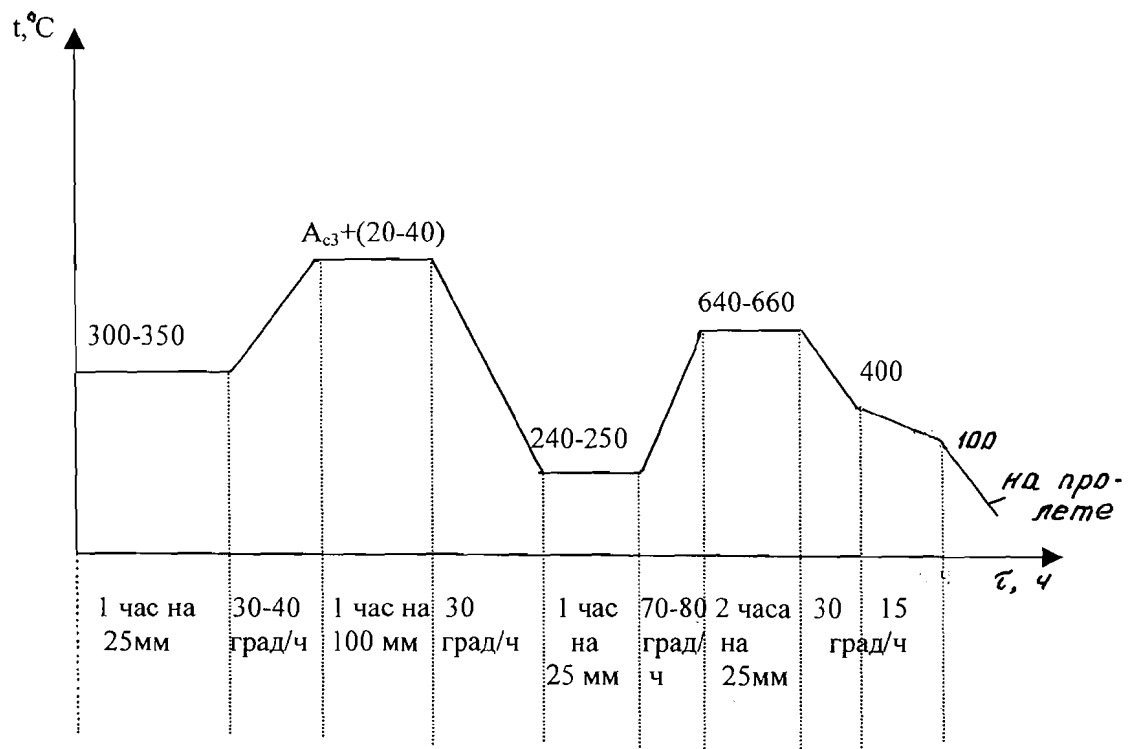


ГРАФИК  
ТЕХНОЛОГИИ ОТЖИГА ПОКОВОК ИЗ НЕФЛОКЕНОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

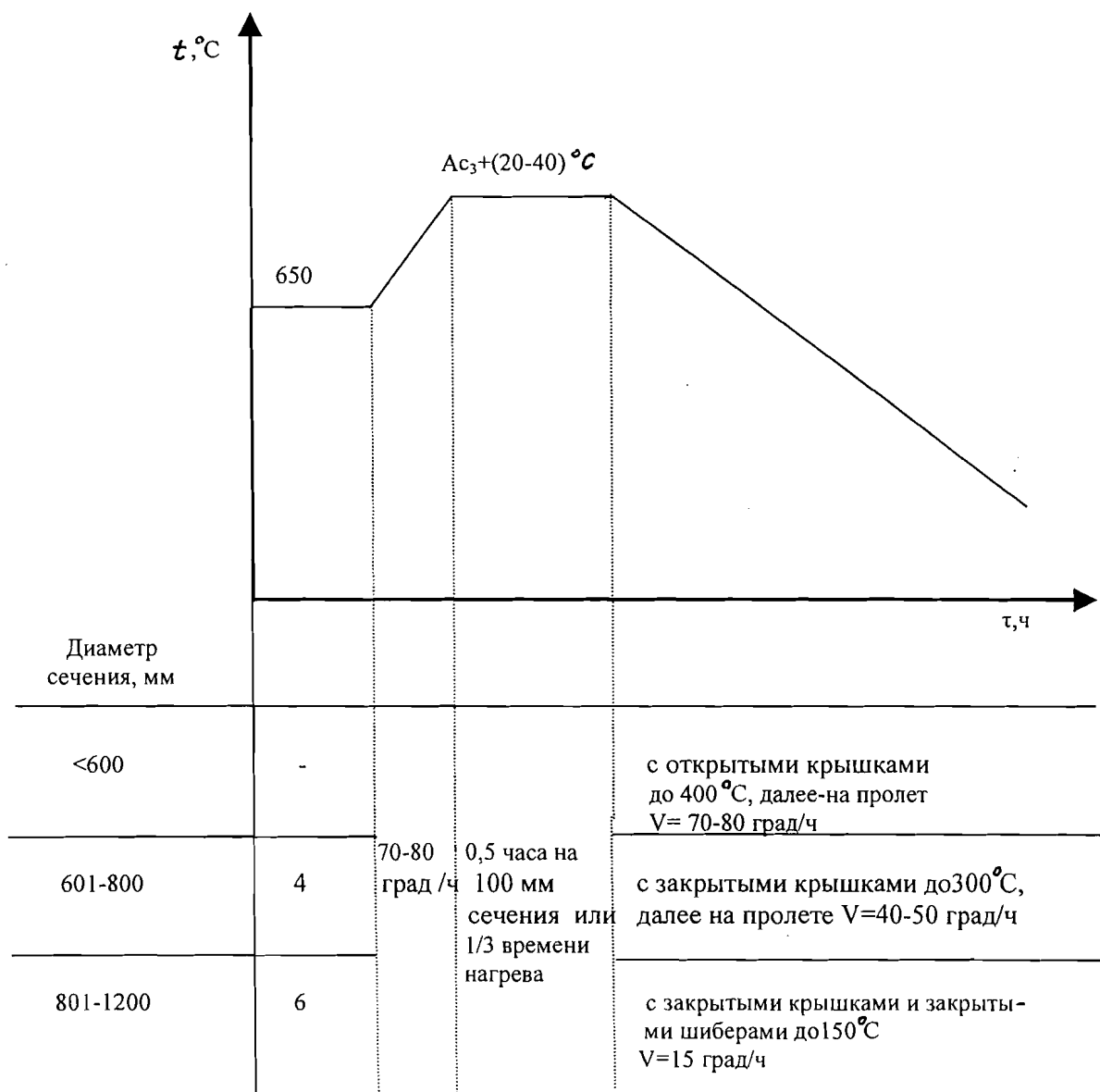
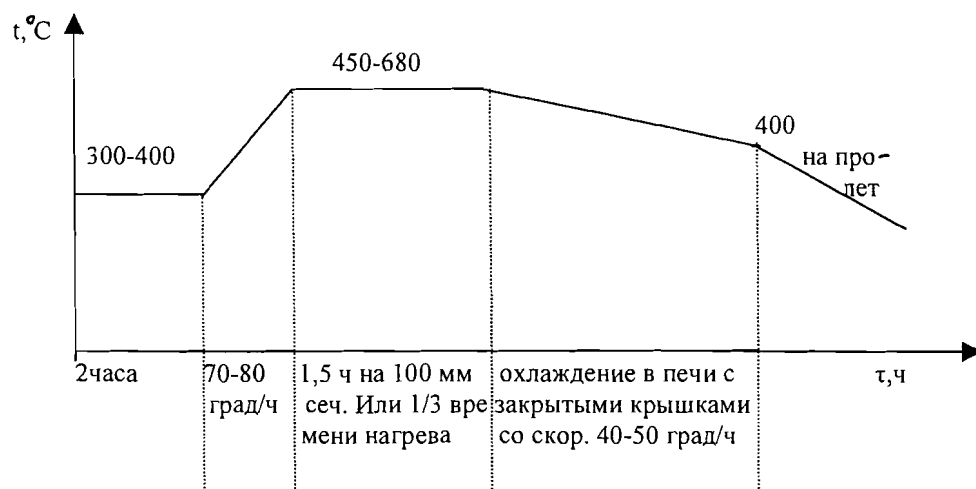


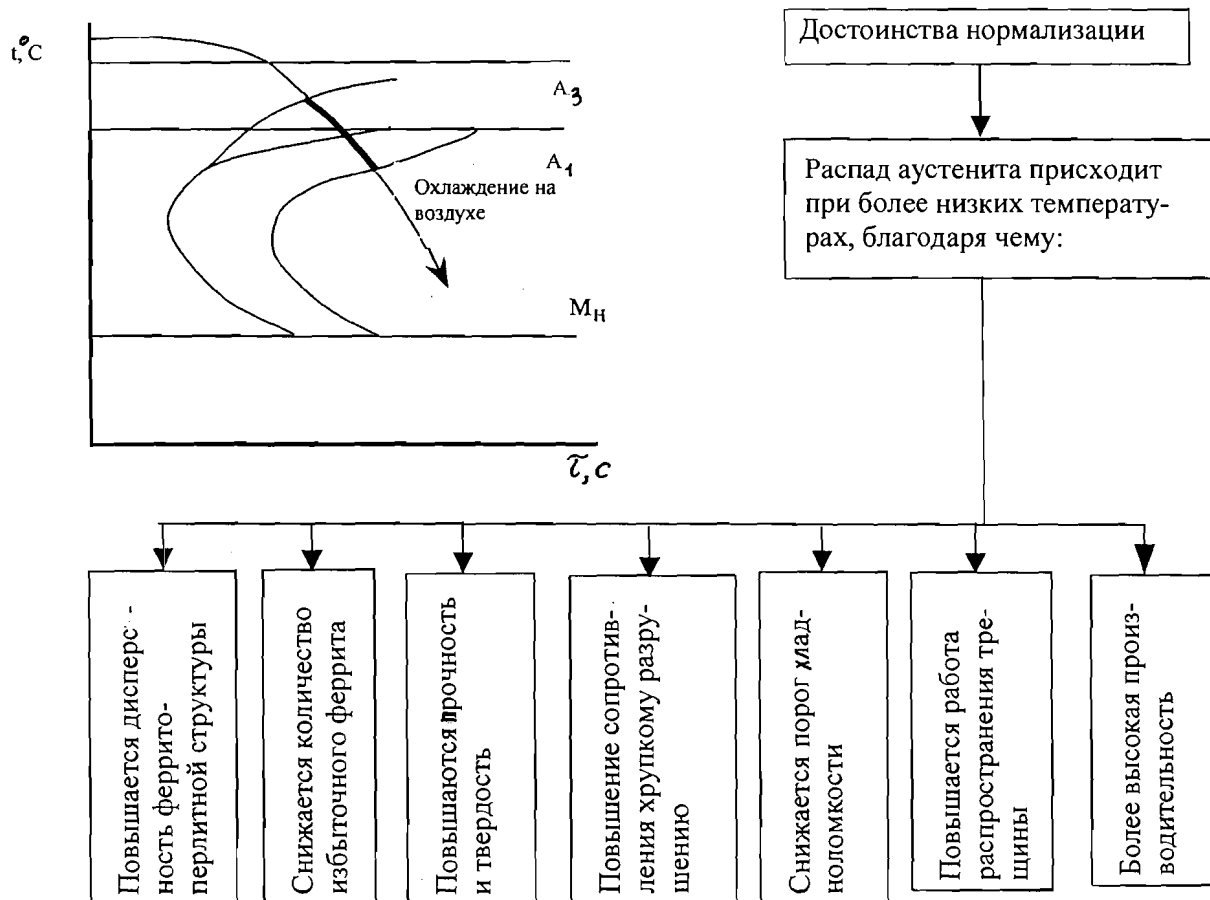
ГРАФИК  
ТЕХНОЛОГИИ ОТЖИГА ДЛЯ СНЯТИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ НОРМАЛИЗАЦИИ



## 8.4 НОРМАЛИЗАЦИЯ

### 8.4.1 Теоретические аспекты.

Отличие от отжига состоит в охлаждении заготовок на спокойном воздухе (при отжиге – охлаждение производят вместе с печью)

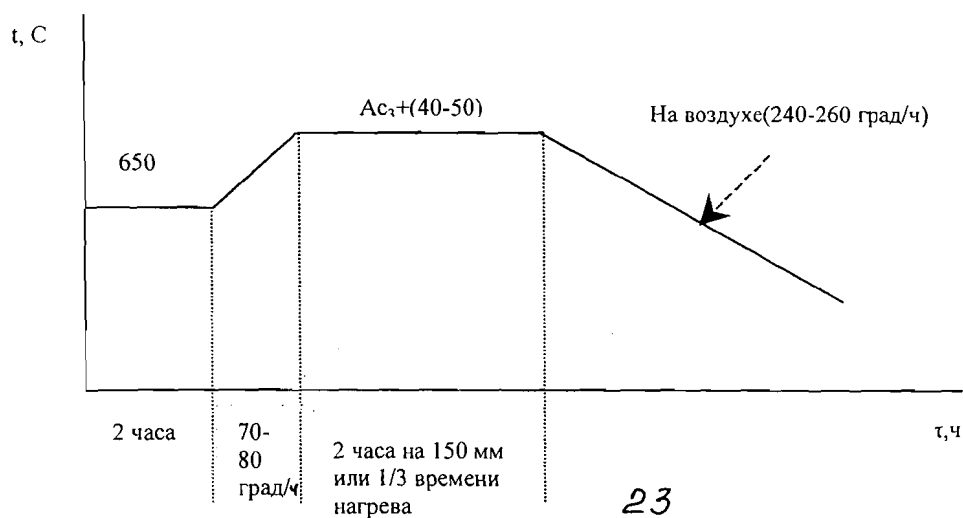


После нормализации, как правило, производится релаксационный отжиг при температуре  $600-650^\circ\text{C}$

### 8.4.2 Технология нормализации

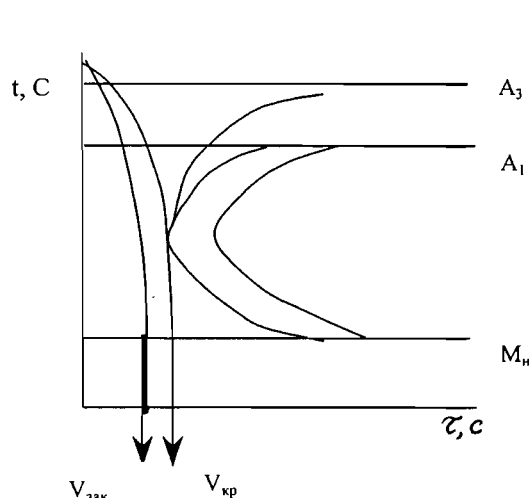
(исходные данные для расчета параметров технологического процесса)

ГРАФИК  
ТЕХНОЛОГИИ НОРМАЛИЗАЦИИ ПОКОВОК И СТАЛЬНОГО ЛИТЯ



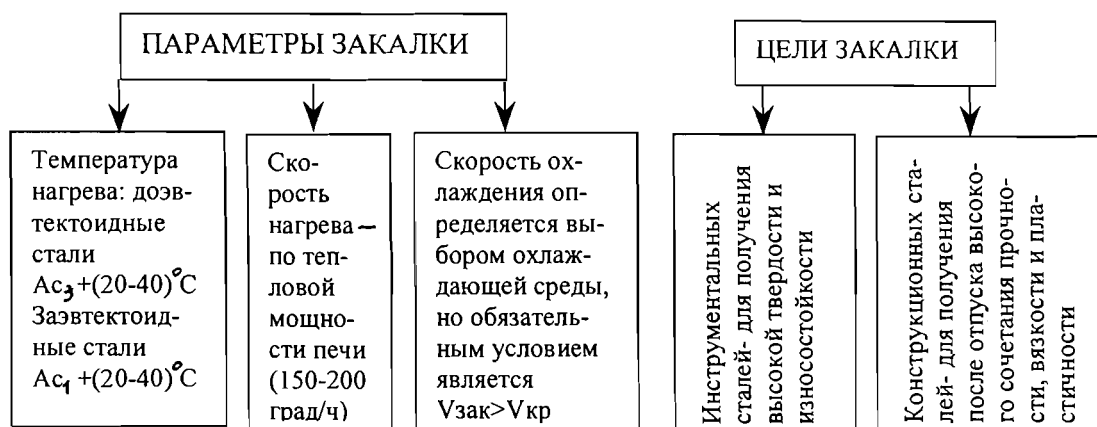
## 8.5 ЗАКАЛКА СТАЛИ

### 8.5.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ



Закалка заключается в нагреве стали до температуры выше критической, выдержке для завершения фазовых превращений с последующим охлаждением со скоростью выше критической

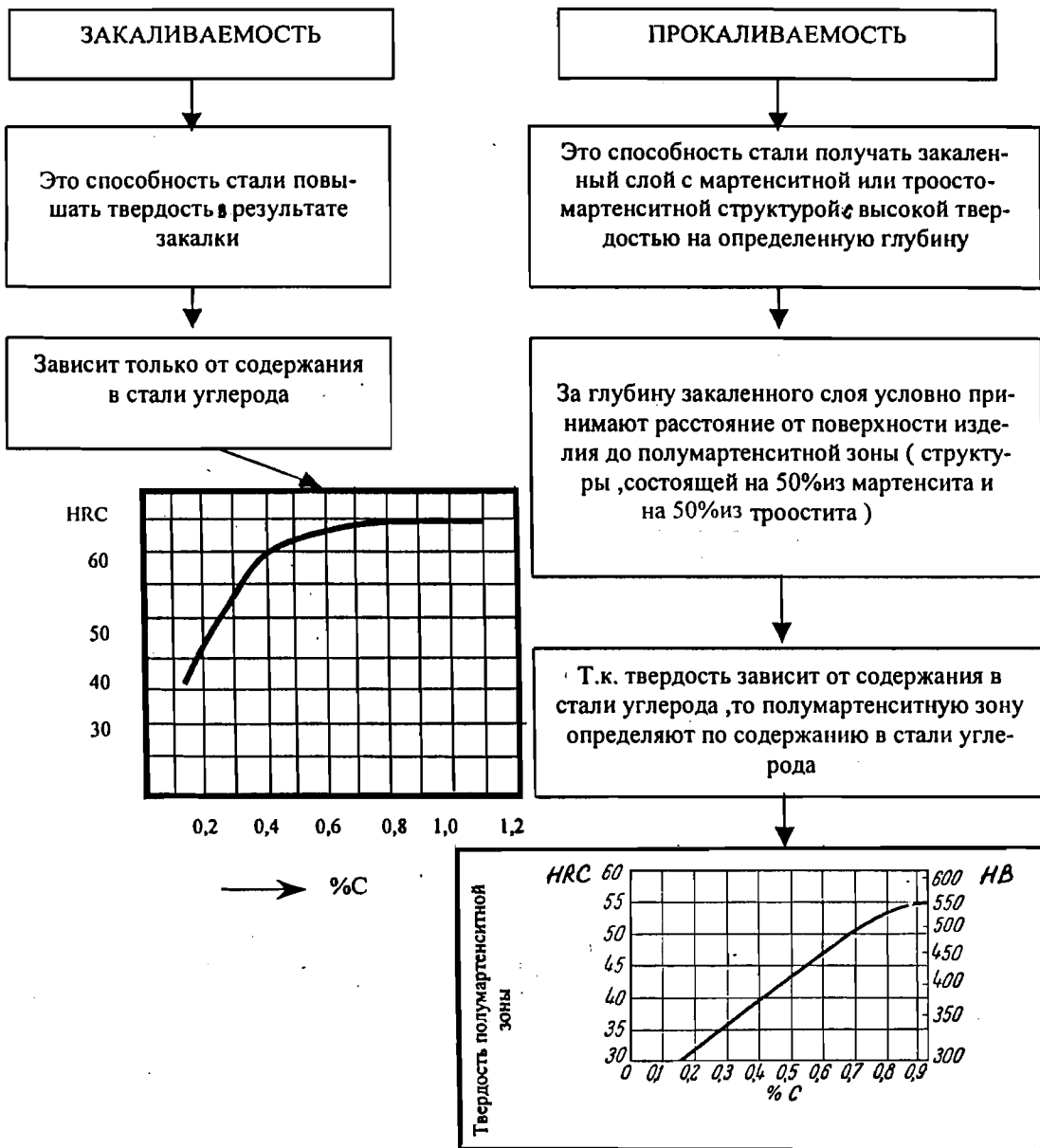
— Диапазоны фазовых превращений.



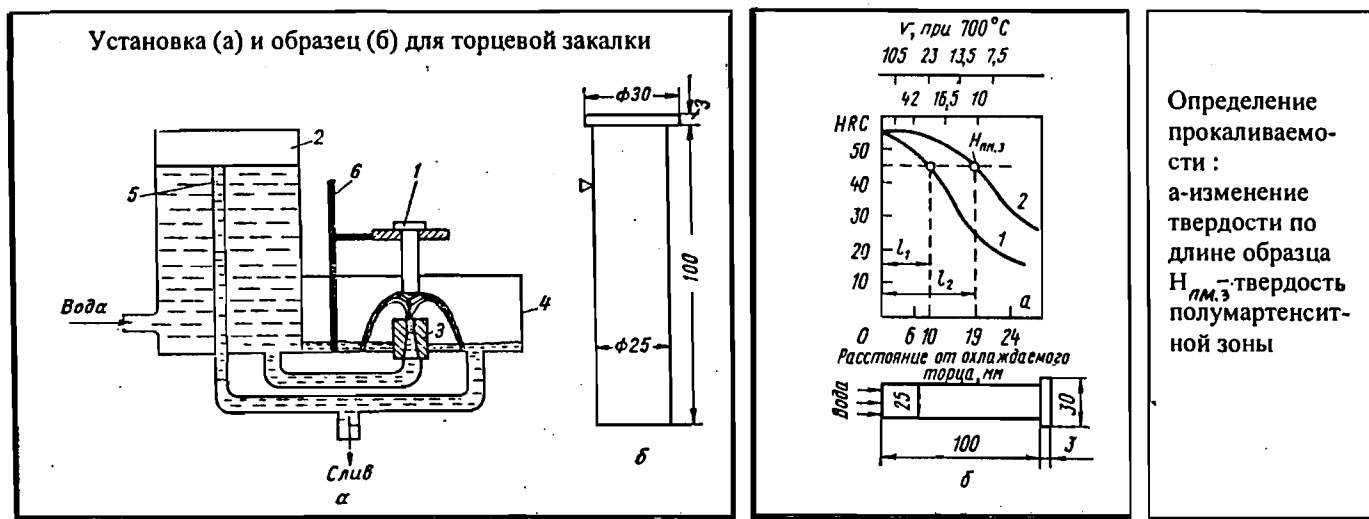
### 8.5.2 ЗАКАЛОЧНЫЕ СРЕДЫ

Закаливающая среда	Скорость охлаждения в °C/с в интервалах	
	550-600 °C	200-300 °C
1 Вода при 18 °C	600	270
26 °C	500	270
50 °C	100	270
75 °C	30	200
2 Раствор в воде 18 °C 10% NaCl	1200	300
18 °C 10% NaOH	1100	300
18 °C 10% соды	800	270
3 Эмульсия масла в воде	70	200
4 Минеральное машинное масло	100	20
5 Медные плиты	60	30
6 Железные плиты	35	15
7 Растворы полимеров	110	30

### 8.5.3 ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ И ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

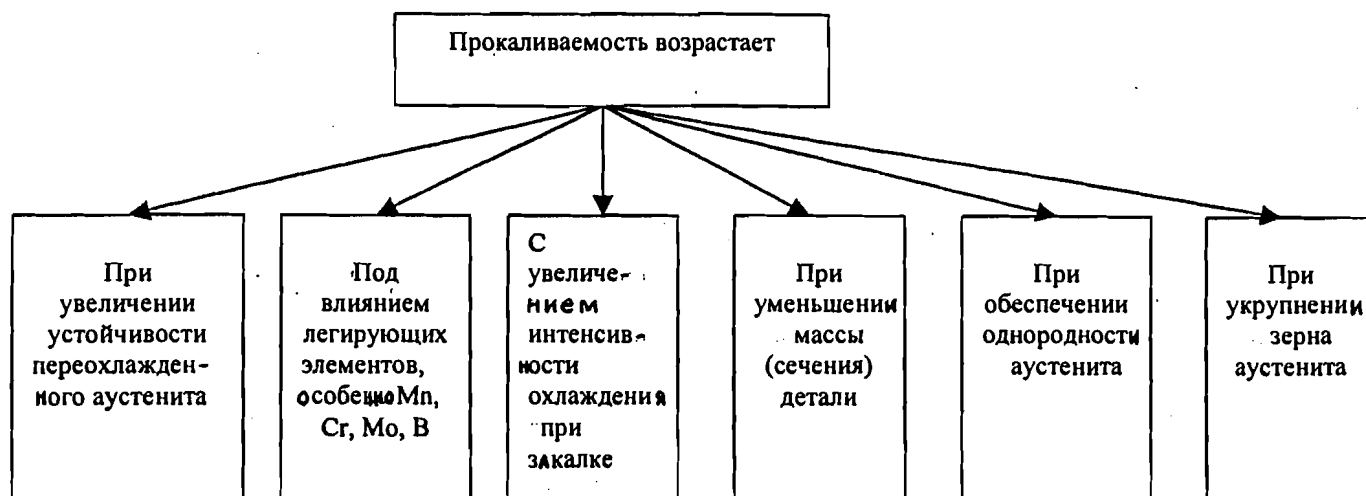


Диаметр заготовки, в центре которой после закалки в данной охлаждающей среде, образуется полумартенситная структура, называется *критическим диаметром*. Его устанавливают методом торцевой закалки.





## 8.5.4 ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ



Прокаливаемость - важная технологическая характеристика стали: чем ниже прокаливаемость, тем при более высоких температурах начинается охрупчивание стали, тем ниже ее надежность, тем неоднороднее механические свойства изделия по сечению. С увеличением размеров (главным образом поперечного сечения) детали, ее массы, тем в большей степени проявляется роль прокаливаемости.

## 8.5.5 Внутренние напряжения в закаленной стали

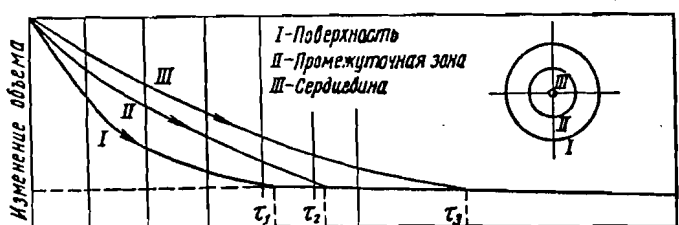
Причины возникновения внутренних напряжений

Неравномерное охлаждение поверхности и сердцевины

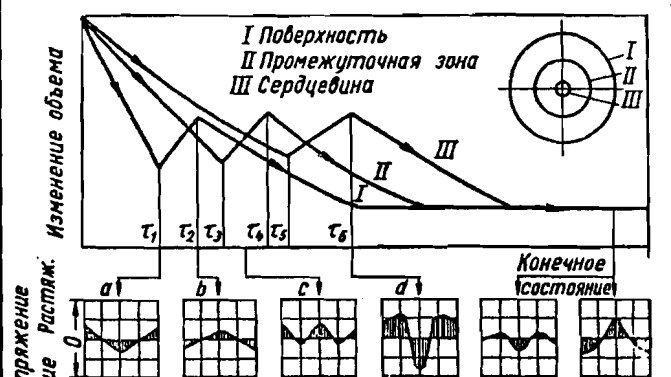
Увеличение объема и неоднородность протекания мартенситного превращения

Тепловые напряжения

Структурные (фазовые) напряжения



Распределение тепловых напряжений по сечению во время охлаждения



Распределение тепловых и структурных напряжений по сечению во время охлаждения

## 8.5.6 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЗАКАЛКИ

### ГРАФИК ТЕХНОЛОГИИ ЗАКАЛКИ

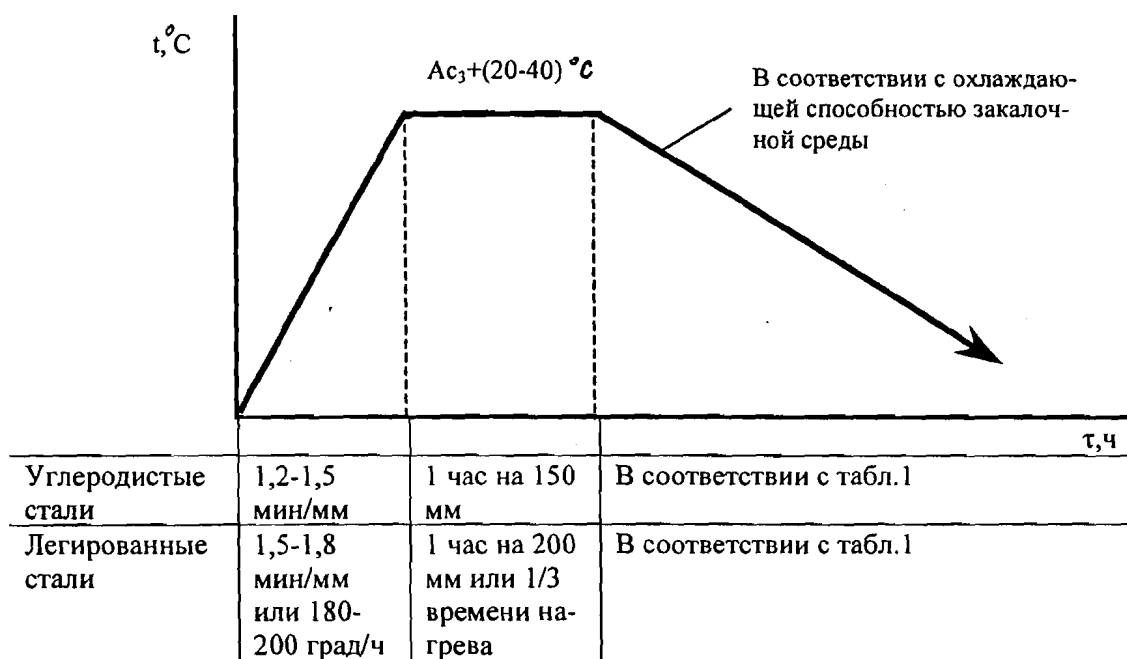
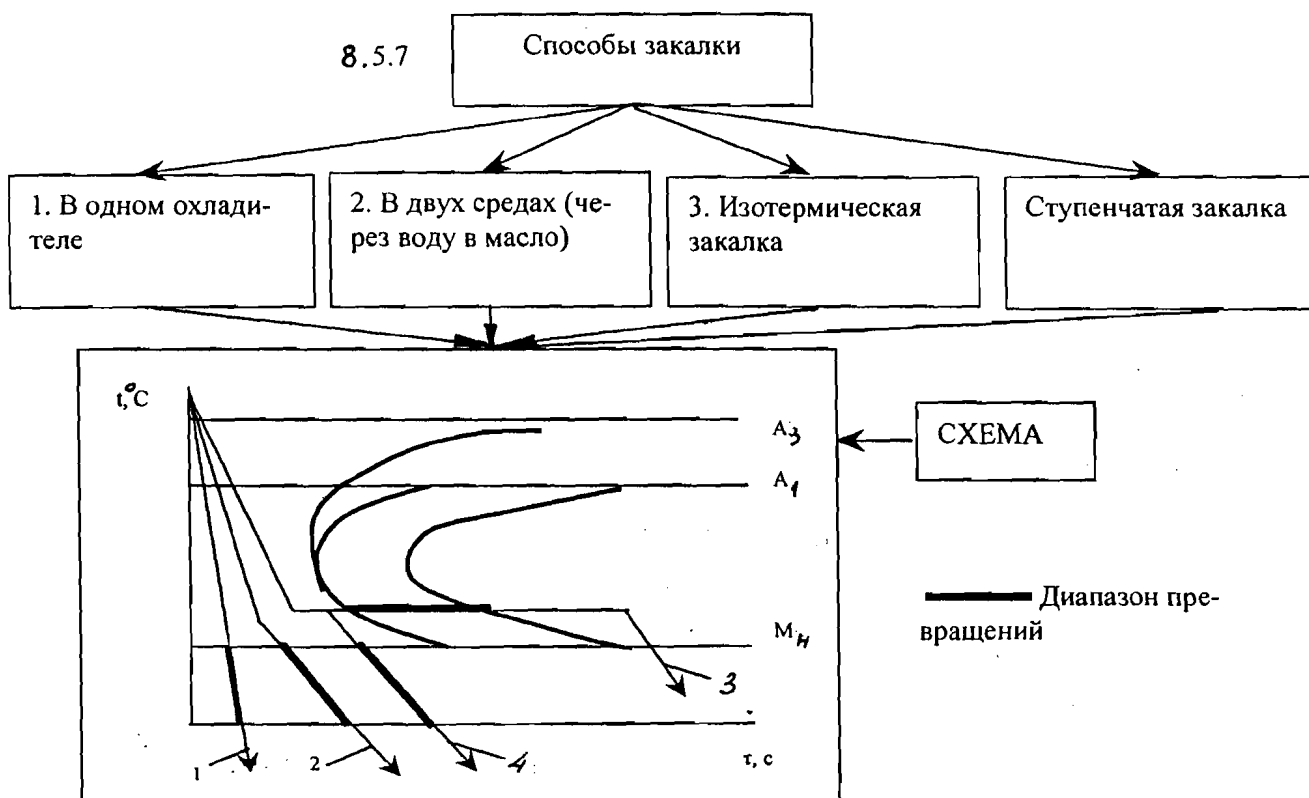


Таблица 1

Охлаждающая среда	Время выдержки в мин для сечения, мм				
	<=200	201-400	401-600	601-800	801-1000
Масло	60	100	140	180	260
Вода через масло : том числе —					
в воде	1,5	2,5	3,5	4,0	4,0
в масле	50	100	130	180	220

### 8.5.7

#### Способы закали

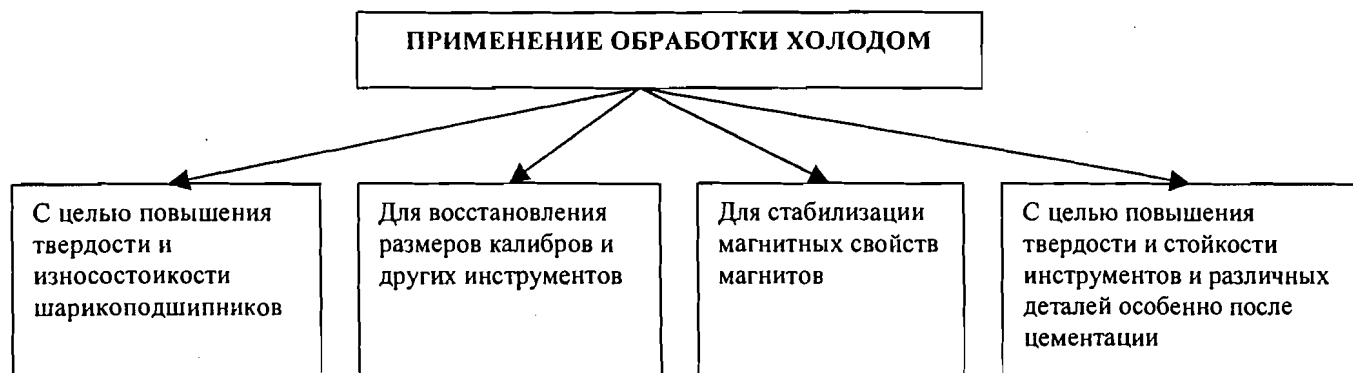


## 8.5.8 КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЗАКАЛКЕ СТАЛИ

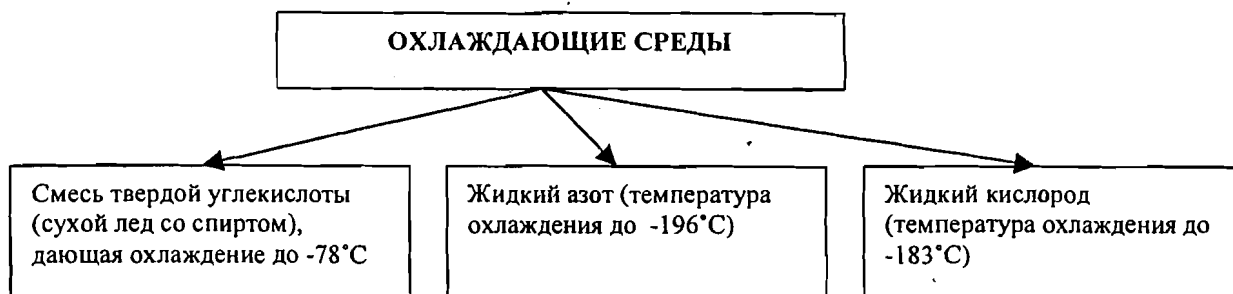


## 8.5.9 Термическая обработка холодом

Холодом ( $-60^{\circ}\text{C}$  и ниже) обрабатывают закаленные стали, содержащие выше 0,5% углерода, и специальные стали. После воздействия на стальные детали холодом повышается твердость, износостойкость, особенно цементированных деталей, *усиливаются магнитные свойства*



Технологический процесс обработки деталей холодом заключается в том, что деталь сразу после закалки и остывания ее до комнатной температуры помещают в специальные охлаждающие устройства с охлаждающей средой не выше  $-60^{\circ}\text{C}$ .



## 8.6 ОТПУСК ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

### 6.1 ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОТПУСКЕ

Термическую обработку, заключающуюся в нагреве закаленной стали до температуры ниже точки  $A_1$ , называют *отпуском*. Эта операция является обязательной после закалки.

Типичная структура закаленной стали *мартенсит* и *остаточный аустенит*, которые являются фазами неравновесными. При отпуске происходит распад этих фаз с образованием структуры, состоящей из феррито-карбидной смеси. Ее образование протекает в 4 последовательные стадии.

#### Четыре превращения при отпуске закаленной стали

**Первое** - протекает в диапазоне температур  $80 \dots 350^\circ\text{C}$ . Состоит в распаде тетрагонального мартенсита, в выделении карбида, в уменьшении содержания углерода в  $\alpha$ -растворе, образуется структура под названием *отпущенный мартенсит*.

**Второе** - протекает в диапазоне температур  $200 \dots 300^\circ\text{C}$ . Состоит в распаде остаточного аустенита и образовании структуры, аналогичной отпущенному мартенситу.

**Третье** - протекает в диапазоне температур  $350 \dots 450^\circ\text{C}$ . Состоит в устранении напряжений, завершении выделения углерода из  $\alpha$ -раствора, обособлении решетки феррита и карбида, карбидное превращение  $\text{Fe}_x\text{C} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ . Образуется структура - *троостит отпуска*.

**Четвертое** - протекает в диапазоне температур  $500 \dots 680^\circ\text{C}$ . Состоит в коагуляции (укрупнении) карбидов и их сфероидизации. Образуется структура - *сорбит отпуска*.



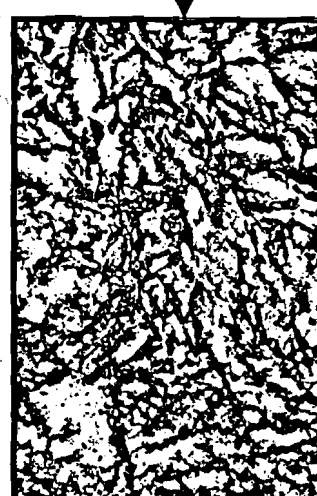
x500



x30000



x15000

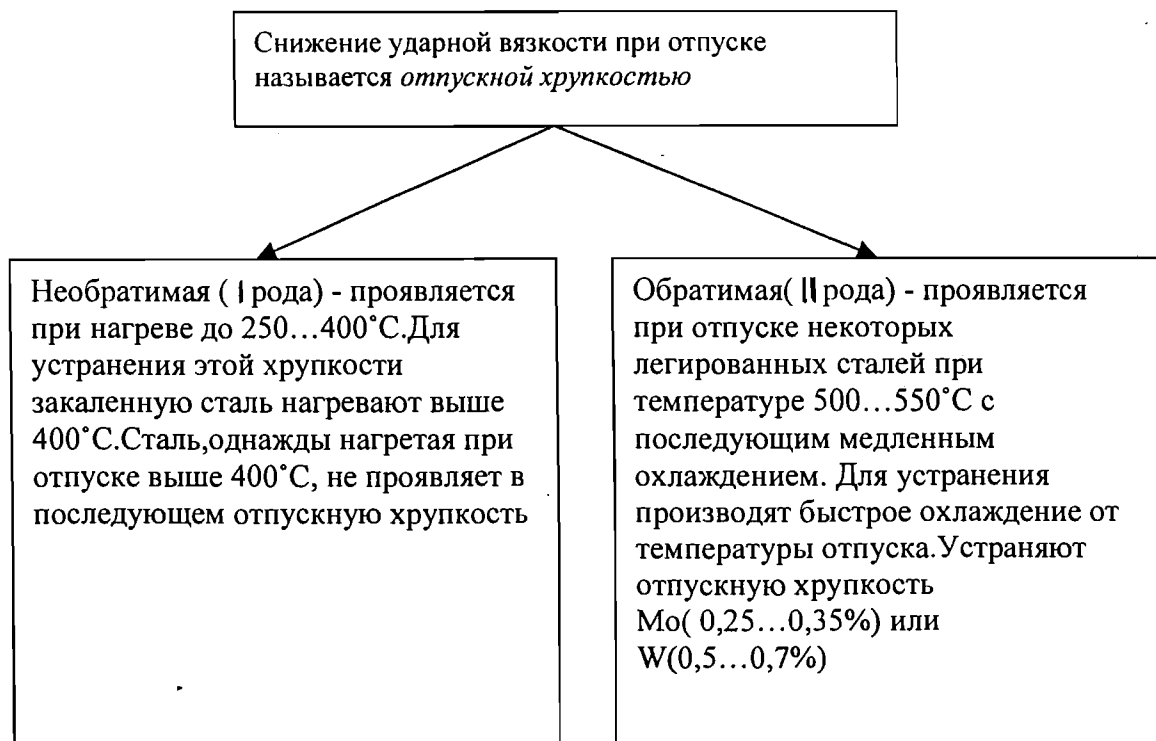


x5000

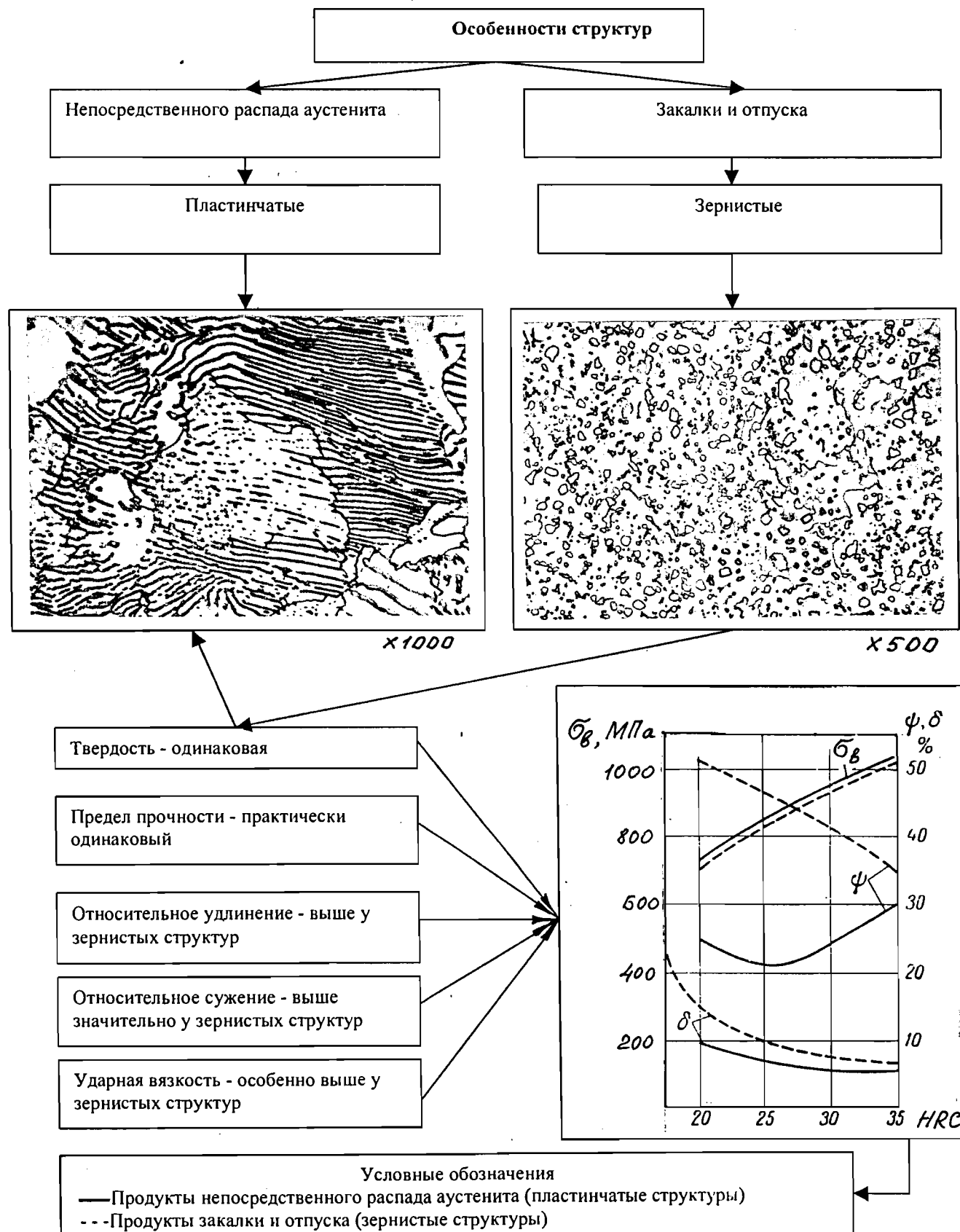
## 8.6.2 Влияние отпуска закаленной стали на ее механические свойства



### 8.6.2.1 Отпускная хрупкость легированных сталей

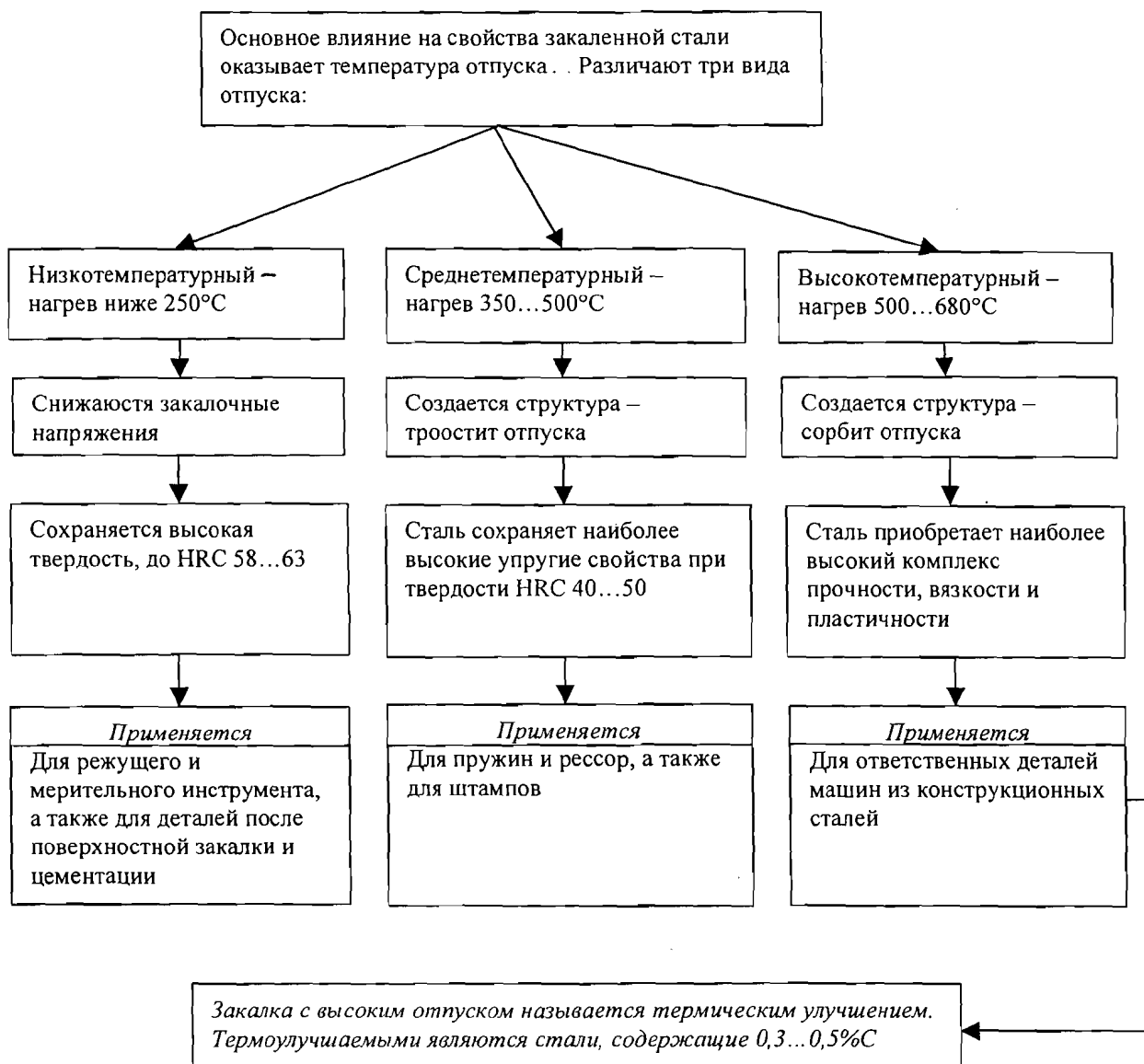


8.6.2.2 Сопоставление механических свойств продуктов непосредственного распада аустенита и продуктов закалки и отпуска (при одинаковой твердости)



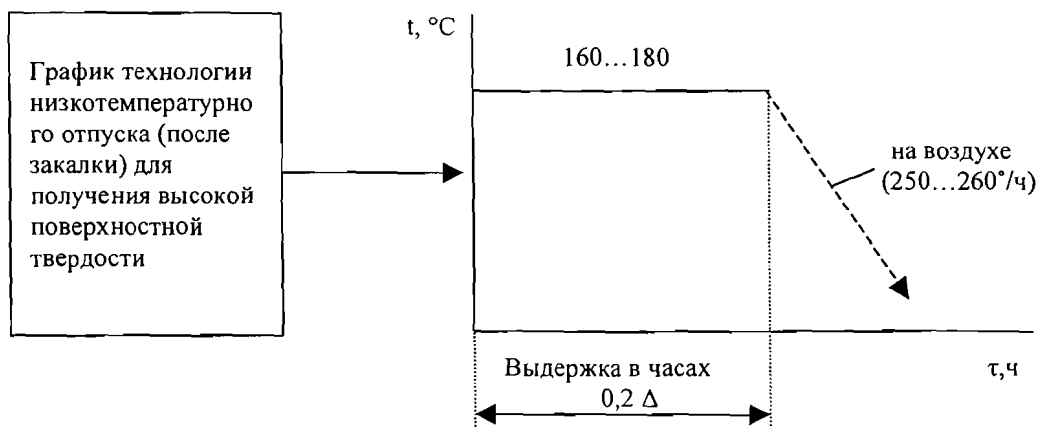
При одинаковой твердости стали после закалки и отпуска обладают более высоким комплексом механических свойств, чем после одинарной обработки (непосредственный распад аустенита).

### 8.6.3 Виды отпуска



### 8.6.4 Практические режимы технологии отпуска

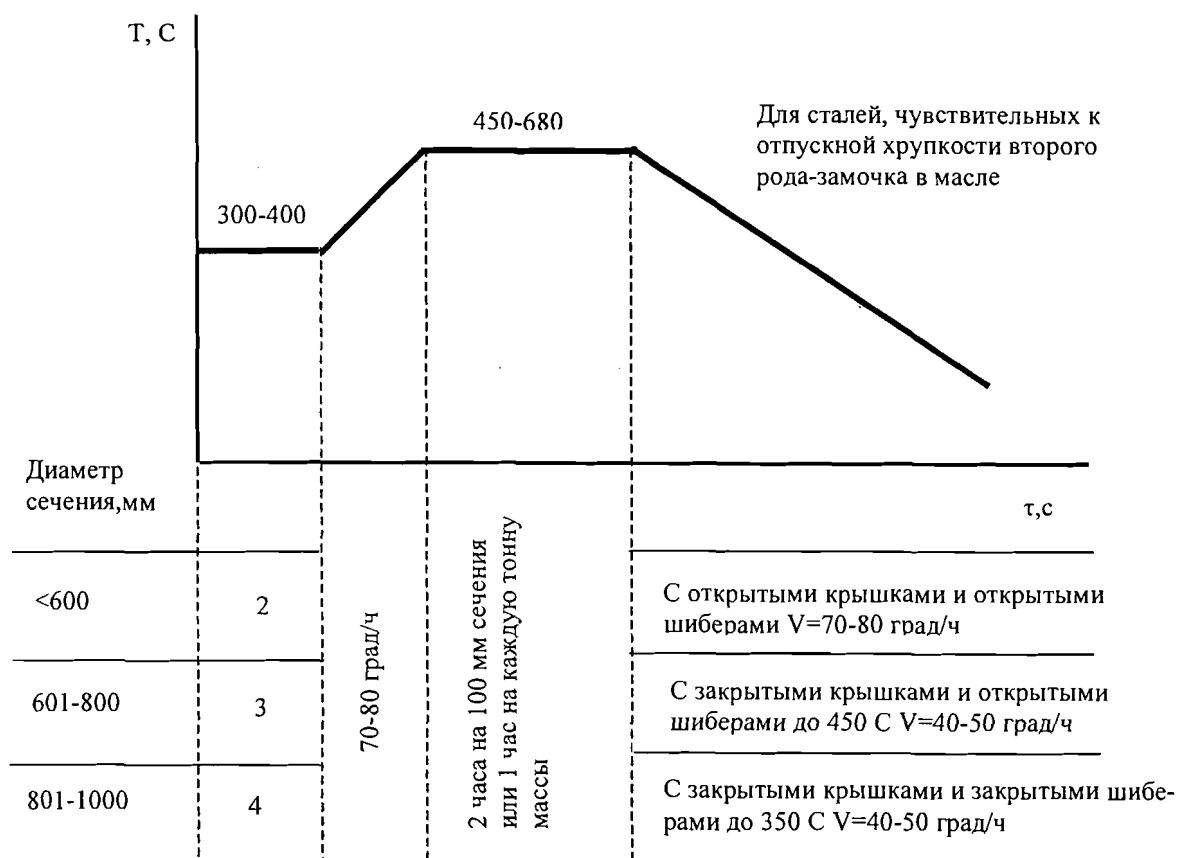
#### 8.6.4.1



Δ – наибольшая толщина стенки (диаметр).

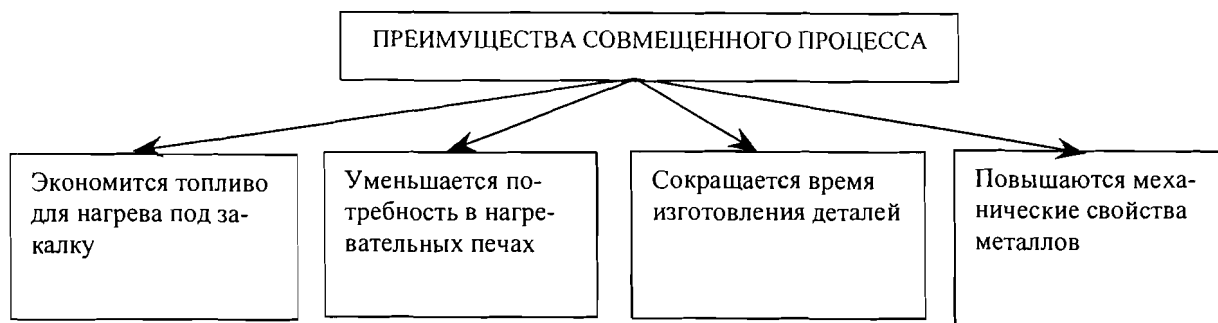
Если известна масса садки, выдержка составляет 1 час на каждую тонну массы

### 8.6.4.2 ГРАФИК ТЕХНОЛОГИИ ОТПУСКА ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ



### 8.7 ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (ТМО)

Термомеханическая обработка является новым направлением в технологии горячей механической и термической обработки. Она совмещает механическую деформацию металла в горячем состоянии и термическую обработку. Основная особенность совмещенного процесса состоит в том, что заготовки закалывают сразу после окончания горячей обработки давлением (ковки, проката). Для закалки не производят специального нагрева, а используют остаточное тепло после горячего деформирования, а сталь в аустенитном состоянии.



**ПРИМЕЧАНИЕ.** На ряде заводов внедрен в производство совмещенный технологический процессковки и закалки при изготовлении поковок массой до 20 кг из стали марок 35, 40, 45, 40Х. Внедрение нового способа значительно снизило стоимость изготовления деталей. Термомеханическая обработка является прогрессивным процессом, который может коренным образом изменить технологию производства.



### 8.7.2 Виды термомеханической обработки (НТМО)

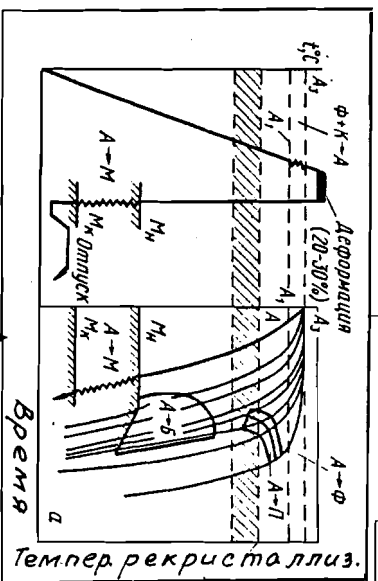
ТМО заключается в сочетании пластической деформации в аустенитном состоянии с закалкой

#### Два вида ТМО

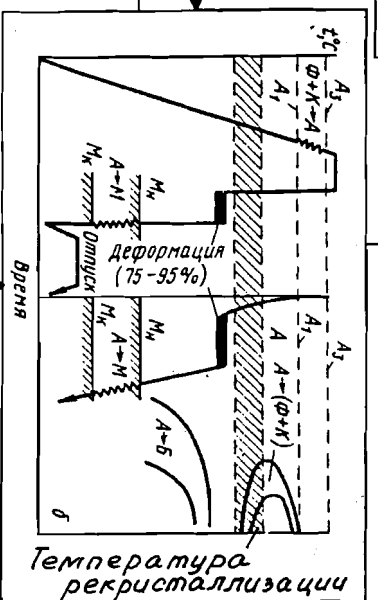
высокотемпературная термо-механическая обработка - ВТМО

низкотемпературная термомеханическая обработка - НТМО

схемы



степень деформации 30...50%



Степень деформации 75...95%

В результате ВТМО достигается

В результате НТМО достигается

высокая прочность, $\sigma_B=2200...2400$ МПа	большой запас пластичности	наиболее высокая конструктивная прочность	повышенная ударная вязкость	повышенная вязкость разрушения (надежность)	пониженный порог хладноломкости	пониженная чувствительность к отпускной хрупкости
--	----------------------------	---	-----------------------------	---	---------------------------------	---

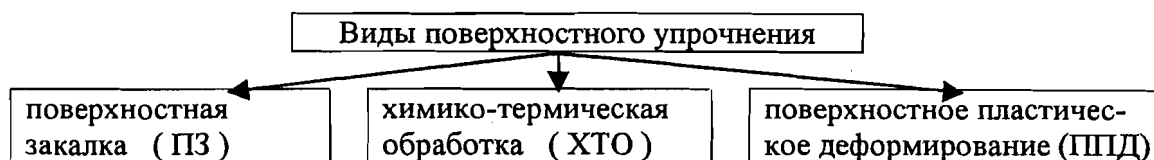
особо высокая прочность, $\sigma_B=2600...3000$ МПа	одновременно высокая прочность и пластичность	повышение сопротивления разрушению
--	---	------------------------------------

прочность ниже, чем при НТМО, но процесс более технологичный

прочность выше, но процесс менее технологичный

После ВТМО и НТМО производится низкотемпературный отпуск.

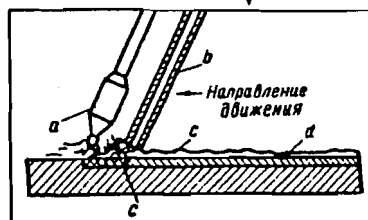
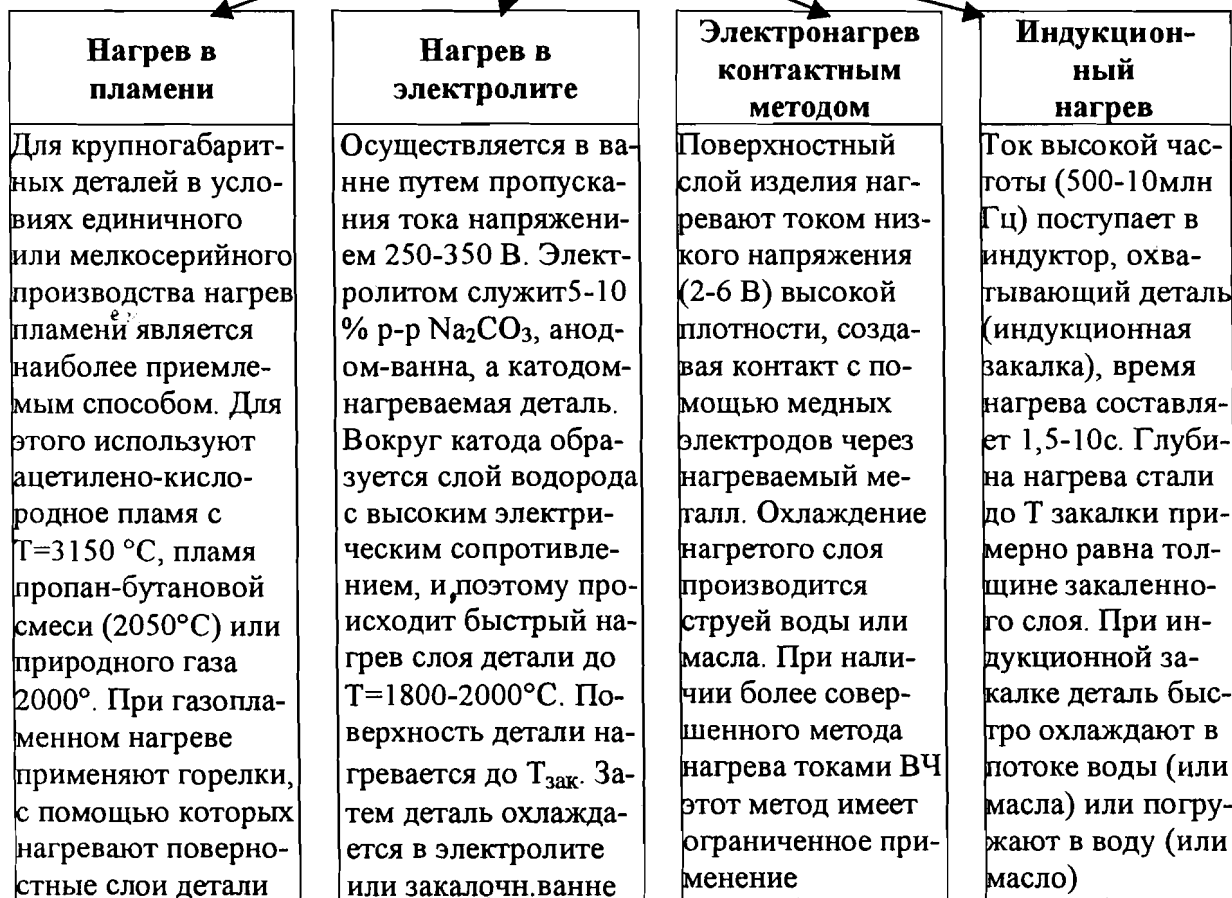
## 8.8 Поверхностное упрочнение



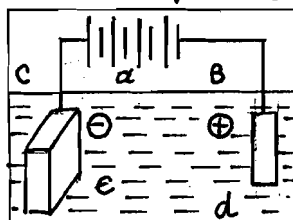
### 8.8.1

#### методы поверхностной закалки

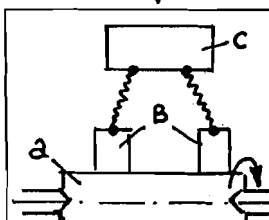
Применяются закаливающиеся стали, содержащие более 0,35 %С



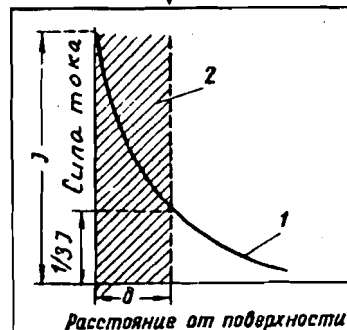
а-горелка;  
в-душирующее устройство;  
с-нагретый слой;  
d-закаленный слой.



а-источник постоянного тока;  
в-электролит;  
с-закаливаемая деталь (катод);  
d-анод;  
е-ванна с электрол.



а-закаливаемая деталь;  
в-медные электроды (калящие ролики);  
с-трансформатор.



Метод основан на двух основных эффектах:  
1. Ток ВЧ распространяется в поверхностном слое, глубиной  $\delta = 5030 \sqrt{\rho/\mu f}$  мм  
2. При прохождении тока выделяется тепло  $Q = 0,24 I^2 R t$

## 8.8.2 Особенности поверхностной закалки с индукционным нагревом

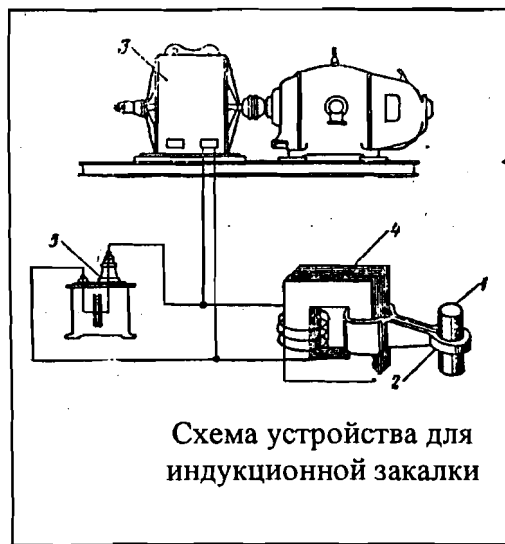
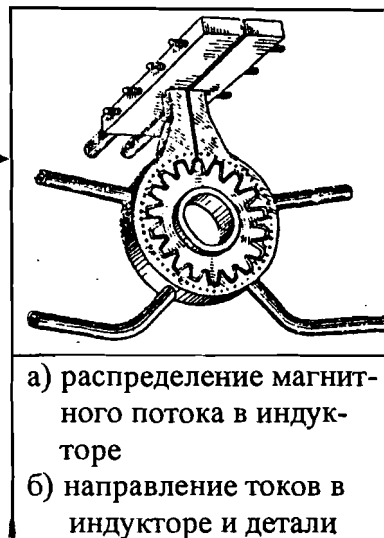
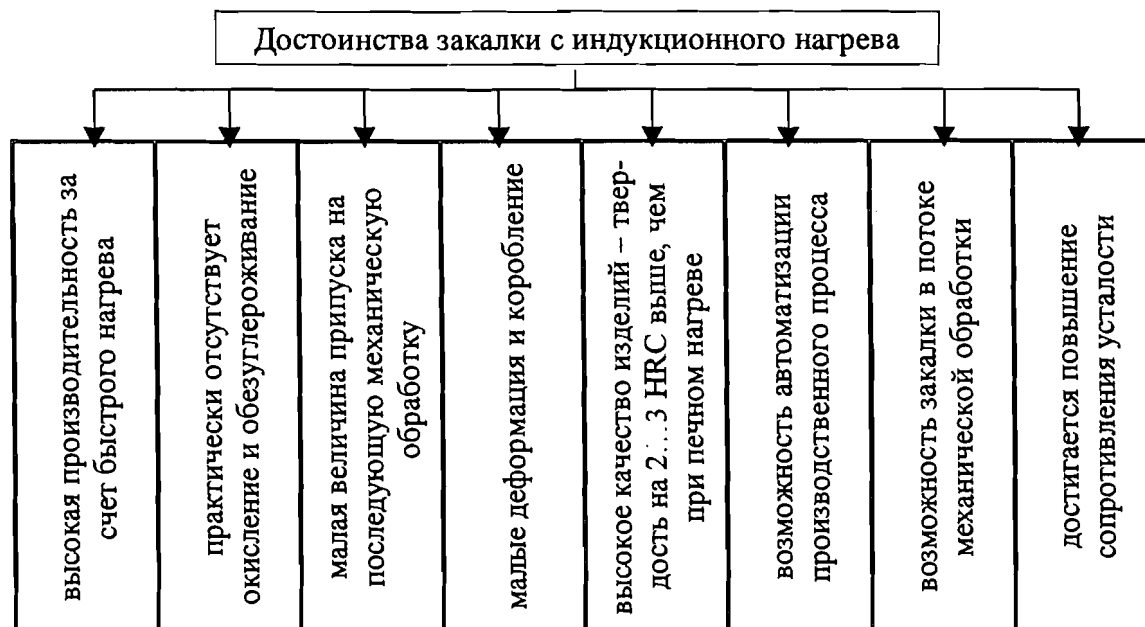
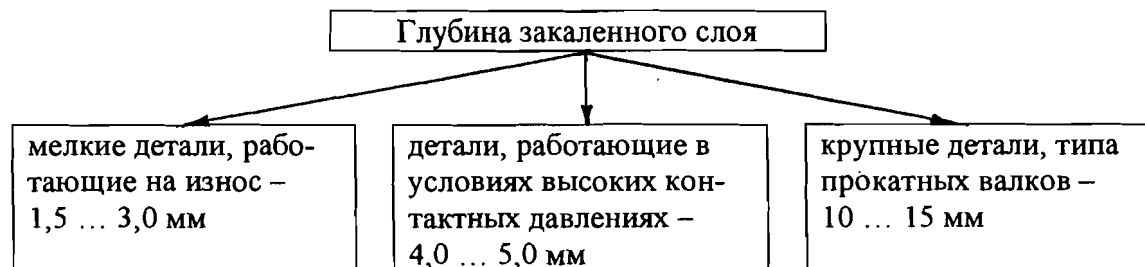


Схема индукционной закалки  
1-закаливаемое изделие;  
2-индуктор;  
3-генератор, создающий ток ВЧ;  
4-трансформатор;  
5-конденсатор.

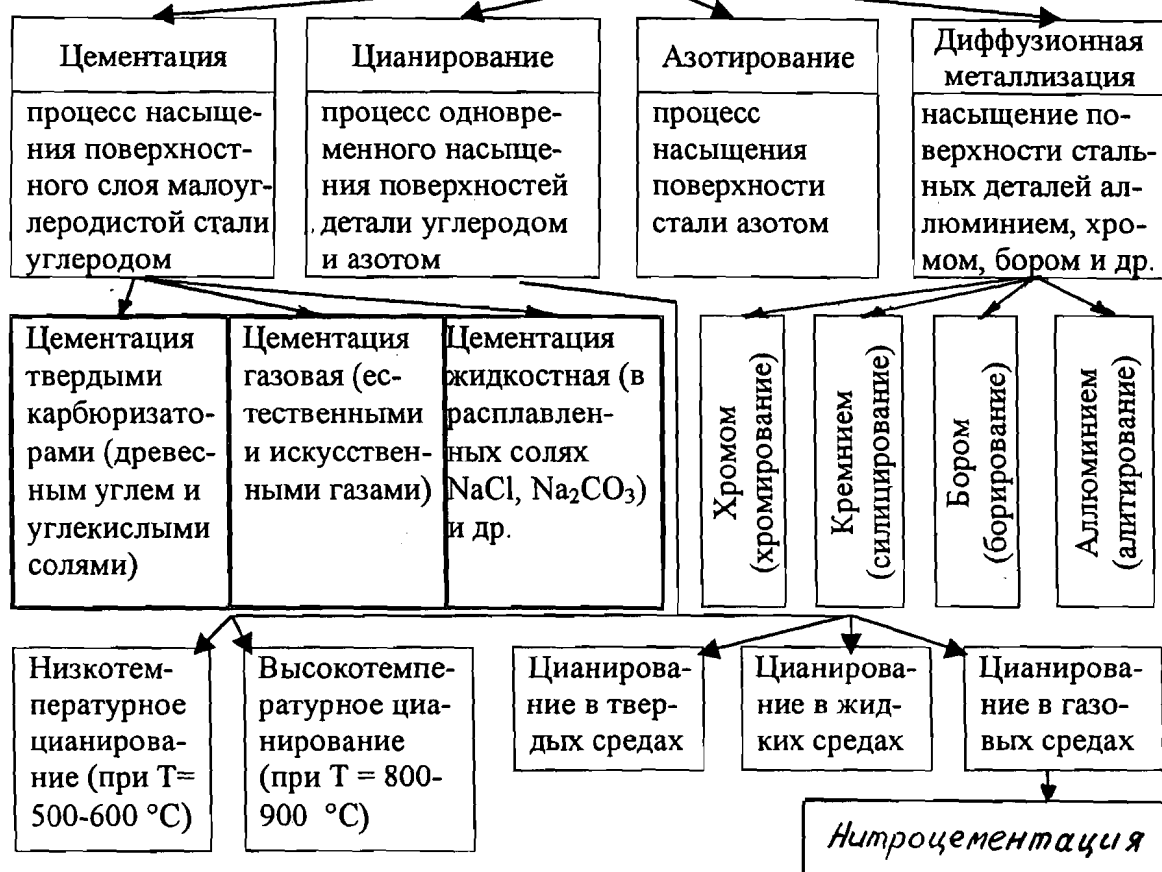


**Условия нагрева :** удельная мощность (энергия, приходящаяся на один кв. сантиметр закаливаемой поверхности)  $0,35 \dots 0,50 \text{ кВт/см}^2$ , время нагрева от 2 до 10 сек.

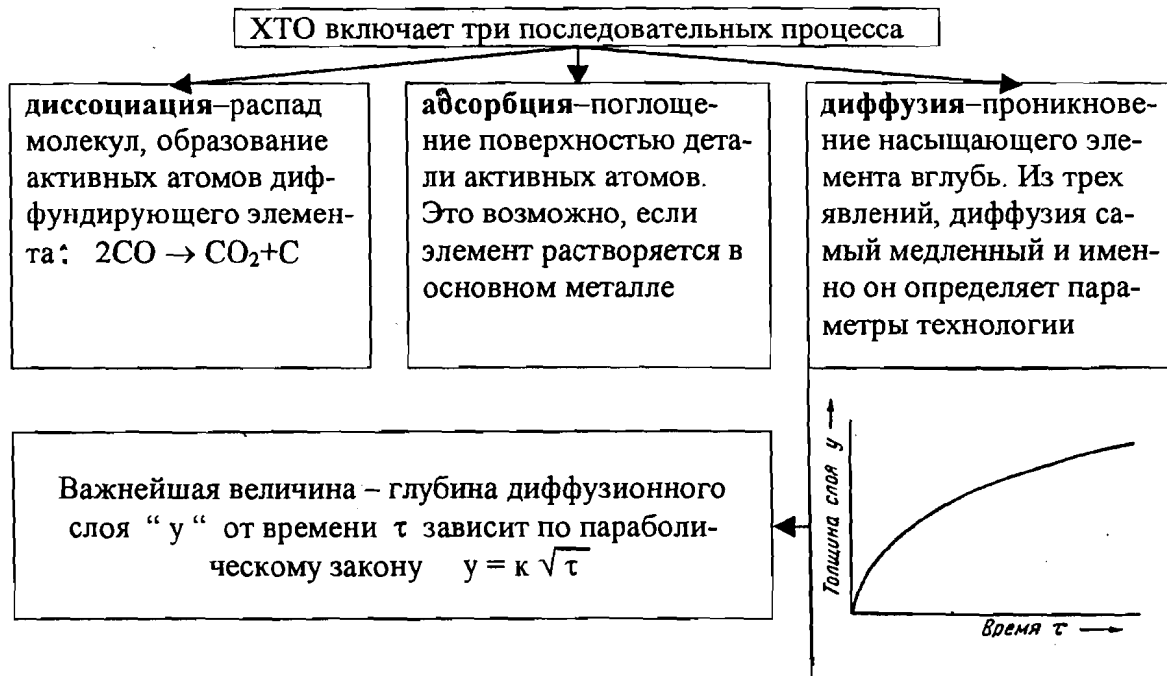


## 8.8.2

## виды химико-термической обработки стали - ХТО



## 8.8.2.1 Стадии химико - термической обработки



## Цементация

стали-для цементации низкоуглеродистые (0,1-0,2 %C) чаще легированные типа: 15X, 18ХГТ, 12ХН2ФА

температура-обеспечивает аустенитную фазу и составляет 930-950 °C

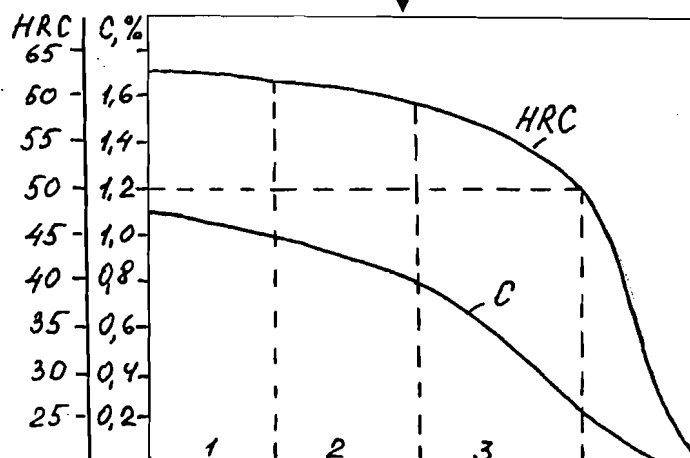
продолжительность-определяется требуемой глубиной. Расчет продолжительности ведут исходя из скорости науглероживания: твердая-0,12мм/ч, газовая-0,15мм/ч

строение слоя-по структуре состоит из : заэвтектоидной, эвтектоидной и доэвтектоидной зон Глубина составляет 15...20% сечения детали

Термообработка после цементации проводится с целью :

1. Измельчить зерно сердцевины и цементованного слоя;
2. Получить высокую твердость поверхности при вязкой сердцевине;
3. Устранить карбидную сетку.

Технология определяется требованиями, предъявляемыми к деталям.



Изменение концентрации углерода и твердости цементованного слоя (после закалки) и микроструктура непосредственно после цементации.

Зоны:

1-заэвтектоидная; 2-эвтектоидная; 3-доэвтектоидная.

Закалка с цементационного нагрева (непосредственно с цементационной печи) после предварительного подстуживания до 840...860 °C. Применяется при газовой цементации и применении наследственно мелкозернистых сталей

Нормализация от температуры выше  $A_{c3}$  на 20...40 °C сердцевины с последующей закалкой от температуры выше на 20...40 °C  $A_{c1}$  поверхностного слоя

Закалка двойная: первая - от температуры на 20...40 °C выше  $A_{c3}$  сердцевины, вторая - от температуры на 20...40 °C выше  $A_{c1}$  поверхностного слоя

Всегда низкотемпературный отпуск

# Азотирование

Природа (строение) азотированного слоя

слой состоит из 3-х фаз

ε - нитрид железа  $Fe_2N$   
 γ' - нитрид железа  $Fe_4N$   
 α - азотистый феррит

Свойства азотированного слоя

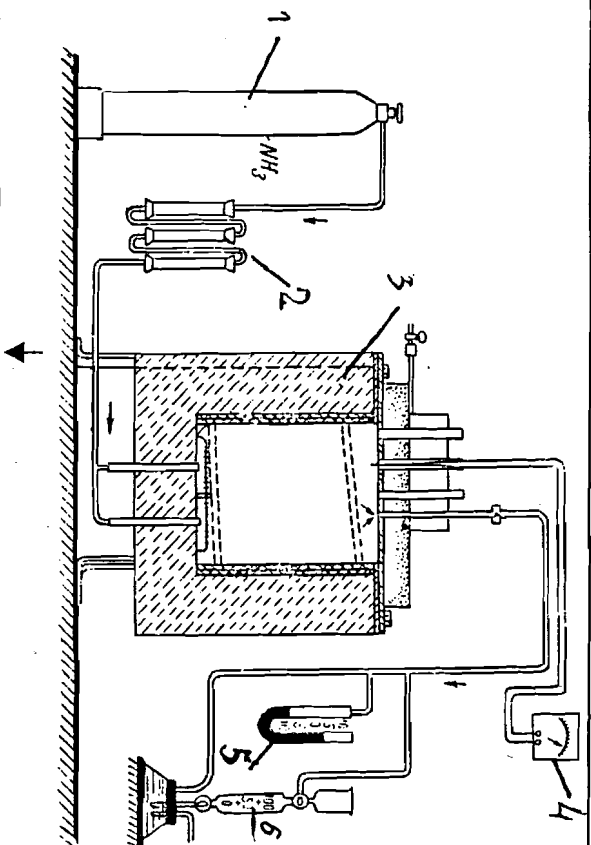
высокая твердость за счет мелкодисперсных частиц  
 особо высокая твердость при наличии Al, Mo, V, Cr : до 1200 HV  
 коррозионная стойкость в воде, морской воде, воздухе  
 высокое сопротивление усталости  
 кавитационная стойкость  
 стали : 38ХМЮА, 38Х2МЮА

Цели азотирования

повышение твердость и износостойкость  
 повышение сопротивления усталости  
 повышение коррозионной и кавитационной стойкости

Технология азотирования

Температура процесса 530...540 ° С.  
 Продолжительность выдержки в среде диссоциированного аммиака (30%) – из расчета 0,01 мм/час глубины. Обычно глубина азотированного слоя 0,25-0,3мм



Применяются термоупрочщаемые конструкционные стали типа 38ХМЮА. Перед азотированием производится термическое улучшение. После азотирования никакая обработка не производится.

- 1 - баллон с аммиаком
- 2 - осушитель аммиака
- 3 - печь
- 4 - прибор для измерения температуры

- 5 - манометр (прибор для измерения избыточного давления)

- 6 - диссоциометр (прибор для измерения степени диссоциации)

### 8.8.5 Технология цианирования

Процесс цианирования (насыщение поверхностного слоя и углеродом и азотом) – как метод поверхностного упрочнения по сравнению с цементацией и азотированием требует меньшего времени для получения слоя данной толщины, характеризуется значительно меньшими деформациями и короблением деталей сложной формы и более высокими сопротивлениями износу, коррозии и усталости

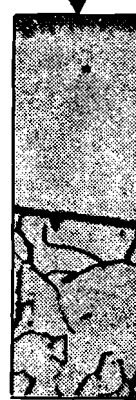


структура  
цианированного  
слоя x 100

## 8.8.6 Технология диффузионной металлизации

### Диффузионное насыщение металлами

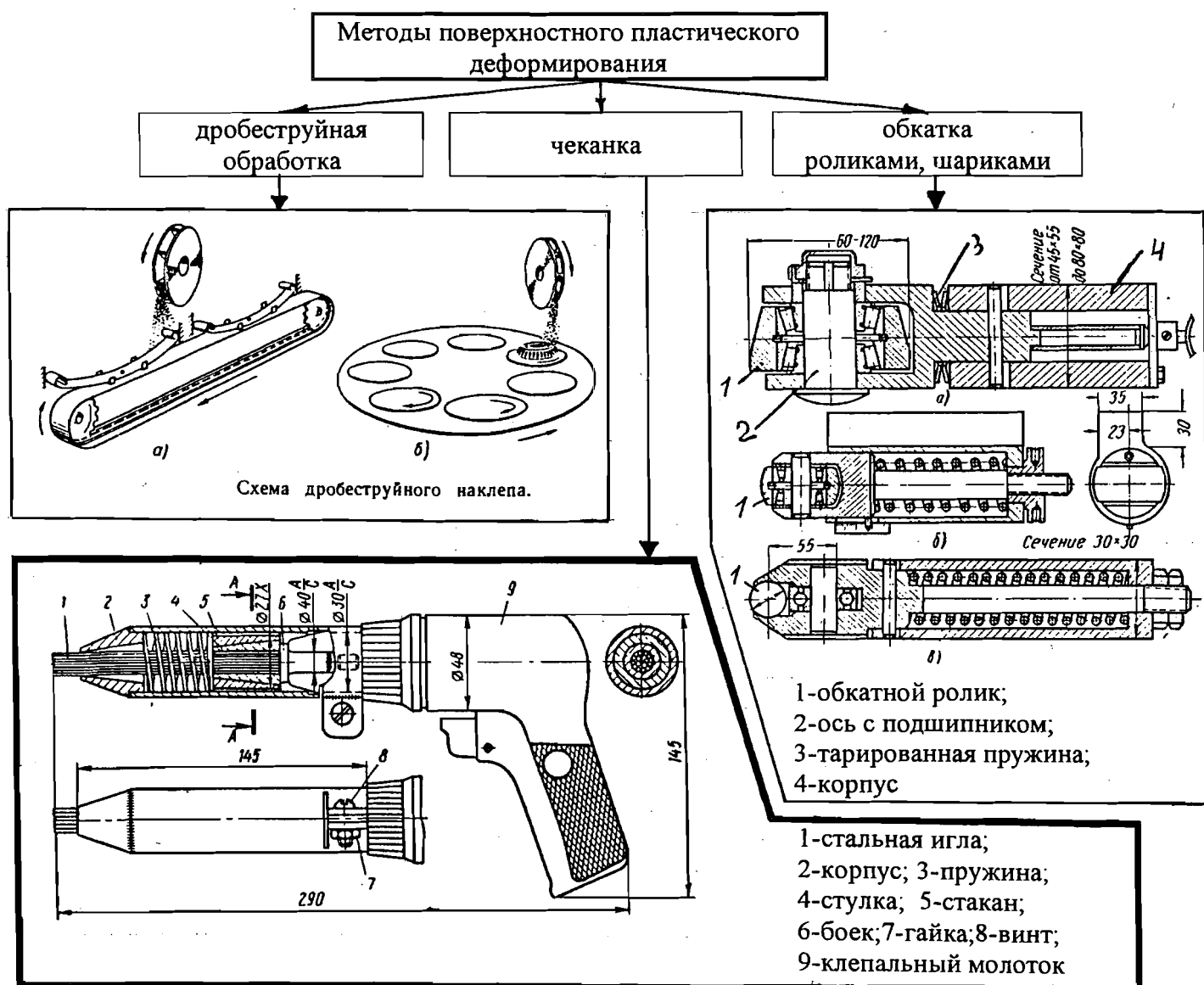
борирование - методы	силицирование - методы	алитирование - методы	хромирование - методы	цинкование - методы
<p>Электролиз расплавленной буры <math>\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7</math> при <math>t = 930 \dots 950^\circ\text{C}</math></p> <p>Расплавленные соли <math>\text{NaCl}</math> с добавкой ферробора. <math>t = 930 \dots 950^\circ\text{C}</math></p> <p>Газовое борирование в среде дибора <math>\text{B}_2\text{H}_6</math> при <math>850 \dots 900^\circ\text{C}</math></p>	<p>Разложение соединения <math>\text{SiCl}_4</math> при температуре <math>900 \dots 1000^\circ\text{C}</math></p> <p>Твердое силицирование- нагрев изделий в кусковом ферросилиции, <math>t = 1100^\circ\text{C}</math></p> <p>Газовое: пропускание хлора через ферросилиций и направление летучих <math>\text{SiCl}_4</math> на изделия при <math>t = 1000^\circ\text{C}</math></p>	<p>В порошкообразной ферроалюминия и хлористого аммония температура <math>1050 \dots 1100^\circ\text{C}</math></p> <p>В ванне расплавленного алюминия с добавками железной стружки температура <math>660 \dots 675^\circ\text{C}</math></p> <p>Металлизация с последующим диффузионным отжигом при температуре <math>900^\circ\text{C}</math></p>	<p>В порошках смеси феррохрома, глинозема, хлористого аммония при <math>1050^\circ\text{C}</math></p> <p>В газовой среде: через ферробор пропускают газообразный хлористый водород при <math>980^\circ\text{C}</math>, газы направляют на деталь</p> <p>Вакуумный метод в среде металлического хрома при <math>950^\circ\text{C}</math></p>	<p>В расплавленном цинке при <math>300 \dots 500^\circ\text{C}</math> - погружением детали</p> <p>В расплавленном цинке при <math>700 \dots 1000^\circ\text{C}</math> - погружением детали</p> <p>В порошке или парах цинка</p>
<p>достигается:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-высокая твердость (до <math>200\text{HV}</math>);</li> <li>-износостойкость;</li> <li>-коррозионная стойкость</li> <li>-жаро- и теплостойкость</li> </ul>	<p>достигается:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-несмотря на невысокую твердость (<math>200 \dots 300\text{HV}</math>) слой обеспечивает высокую износостойкость благодаря пористости и удержания смазки</li> </ul>	<p>достигается:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-высокая окалиностойкость (до <math>900^\circ\text{C}</math>) благодаря пленки <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>;</li> <li>-хорошее сопротивление коррозии в атмосфере и морской воде</li> </ul>	<p>достигается:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-окалиностойкость до <math>800^\circ\text{C}</math></li> <li>-коррозионная стойкость в морской воде;</li> <li>-высокая твердость и износостойкость</li> </ul>	<p>достигается:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-повышается коррозионная стойкость в атмосфере, масле, бензине;</li> <li>-антифрикционные свойства</li> </ul>





## 8.9 Поверхностное пластическое деформирование ( ППД )

Заключается в деформировании поверхностных слоев деталей машин определенным инструментом, в результате чего в поверхностном слое возникают, на определенной глубине, сжимающие остаточные напряжения, что приводит к значительному повышению сопротивления усталости, снижению чувствительности к концентрации напряжений, а в ряде случаев – к полной нейтрализации концентраторов напряжений.



## 8.10 Термическая обработка чугуна

Механические свойства серого и высокопрочного чугунов улучшают термической обработкой. При литье в чугунах создается внутреннее напряжение, поэтому нагревать чугунные отливки при термообработке следует медленно, чтобы избежать образования трещин.

виды термообработки				
Низкотемпературный отжиг	Графитизирующий отжиг	Нормализация	Закалка	Отпуск
Применяют с целью снятия внутренних напряжений и стабилизации размеров чугунных отливок. Для этого отливки после полного затвердевания укладывают в холодную печь (или с $T=100-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а вместе с ней медленно ( $75-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в час) нагревают до $500-550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдерживают 2-5 ч и медленно охлаждают	Применяется с тем, чтобы устранить отбел и улучшить обрабатываемость чугуна. Отжиг производится при температуре $900-950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1-4 ч с охлаждением изделий до $250-300\text{ }^{\circ}\text{C}$ вместе с печью, а затем на воздухе. При этом в отбеленных участках цементит распадается на феррит и графит	Ей подвергают отливки простой формы. Нагрев производится при $850-900\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 1-3 ч с последующим охлаждением на воздухе. При этом нагреве часть углерода, графита растворяется в аустените. После охлаждения на воздухе сплав получает структуру с более высокой твердостью и лучшей сопротивляемостью износу	Производится с нагревом до $850-900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После закалки твердость чугуна достигает $450-500\text{ HВ}$ . Эффективным методом повышения прочности серого чугуна является изотермическая закалка, аналогичная закалке стали. Высокопрочные чугуны можно подвергать пламенной или высокочастотной поверхностной закалке	Применяется с целью снятия закалочных напряжений после закалки. Чугунные детали, предназначенные для работы на истирание проходят низкий отпуск при $200-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чугунные отливки, не работающие на истирание подвергаются высокому отпуску при $500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$

К термообработке чугуна относится также и отжиг для получения ковкого чугуна.

