

# Лекция 9

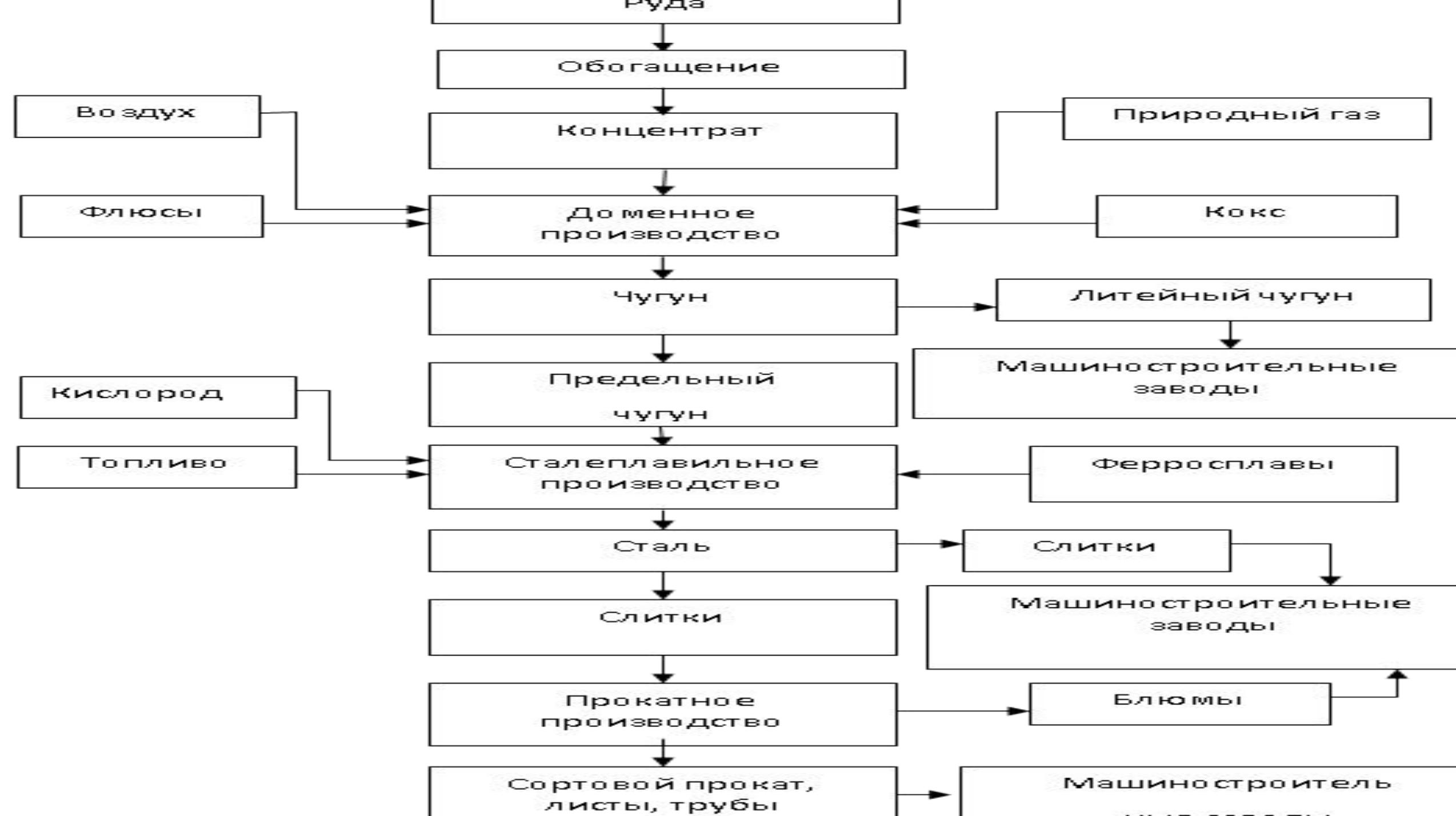
## Технологии повышения конструкционной прочности сталей

### Содержание

1. Производство чистой стали
2. Микролегирование стали.
3. Азотистые легированные стали
4. Термическая обработка стали

# Введение

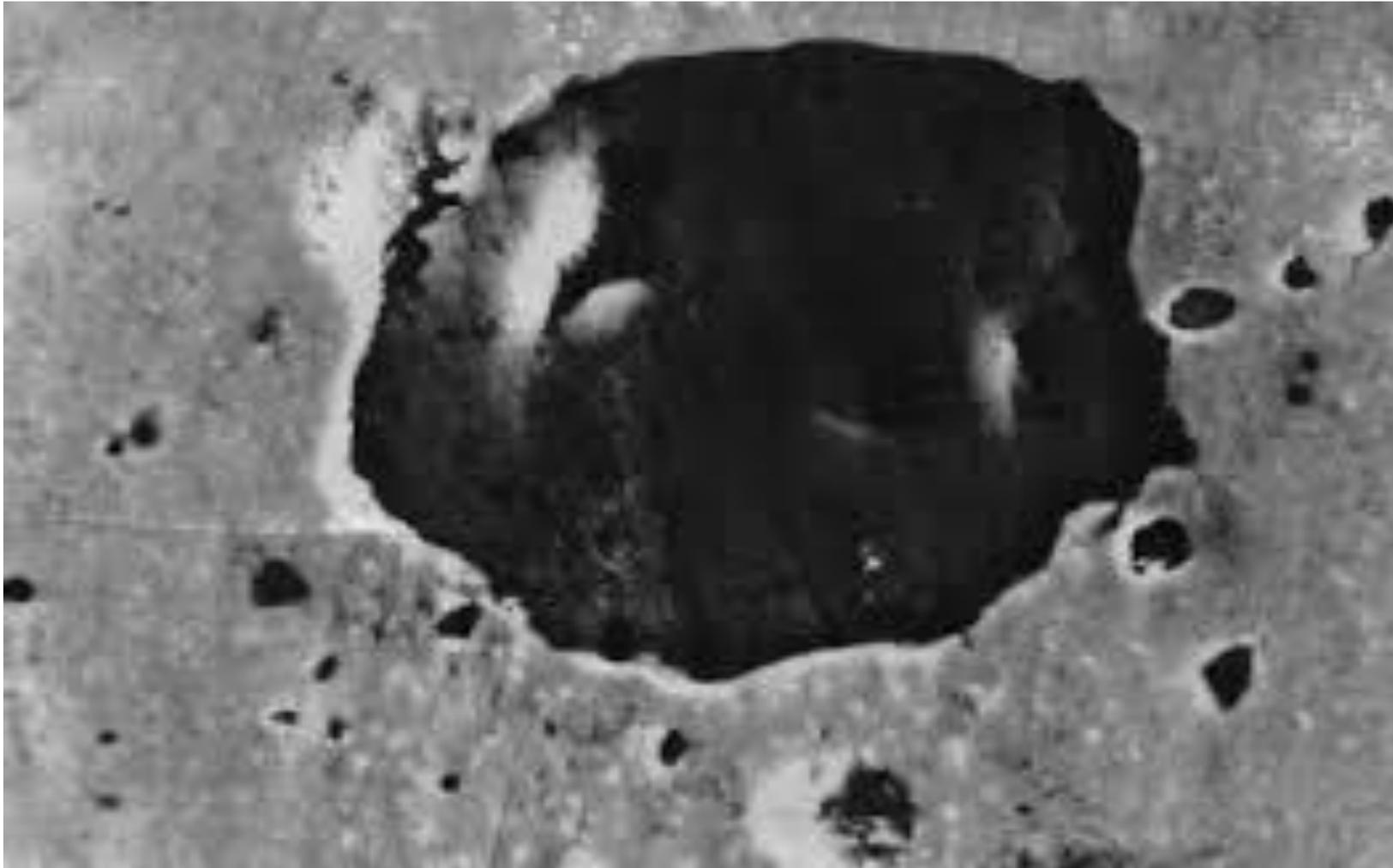
- Необходимым условием создания качественных конструкций при экономном использовании материала является учет дополнительных критериев, влияющих на конструкционную прочность. Этими критериями являются надежность и долговечность.
- Надежность – свойство изделий, выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени или сопротивление материала хрупкому разрушению.
- Развитие хрупкого разрушения происходит при низких температурах, при наличии трещин, при повышенных остаточных напряжениях, а также при развитии усталостных процессов и коррозии.
- Критериями, определяющими надежность, являются температурные пороги хладноломкости, сопротивление распространению трещин, ударная вязкость, характеристики пластичности.
- Долговечность определяется усталостью металла, процессами износа, коррозии и другими, которые вызывают постепенное разрушение и не влекут аварийных последствий, то есть условиями работы.
- Критериями, определяющими долговечность, являются усталостная прочность, износостойкость, сопротивление коррозии, контактная прочность.



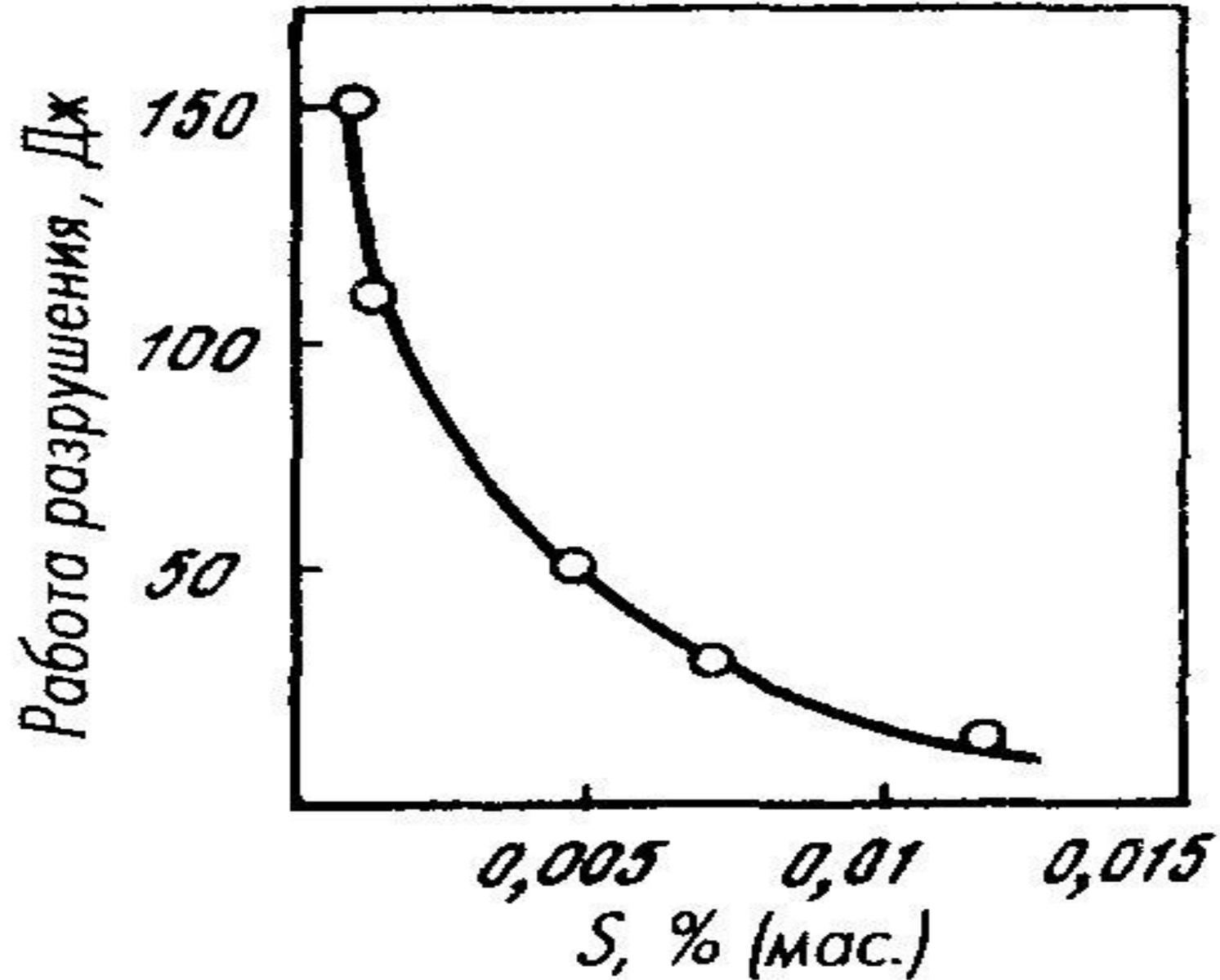
## Содержание атомов примесей (S+P+N+O+N) в сталях, полученных различными способами производства

Способ производства	Бессемеровский	Кислородно-конверторный	Мартеновский	Электросталеплавильный
PPM	405	160	175	139

# Неметаллическое включение



# Влияние содержания серы на работу разрушения



# Технологии производства чистых сталей

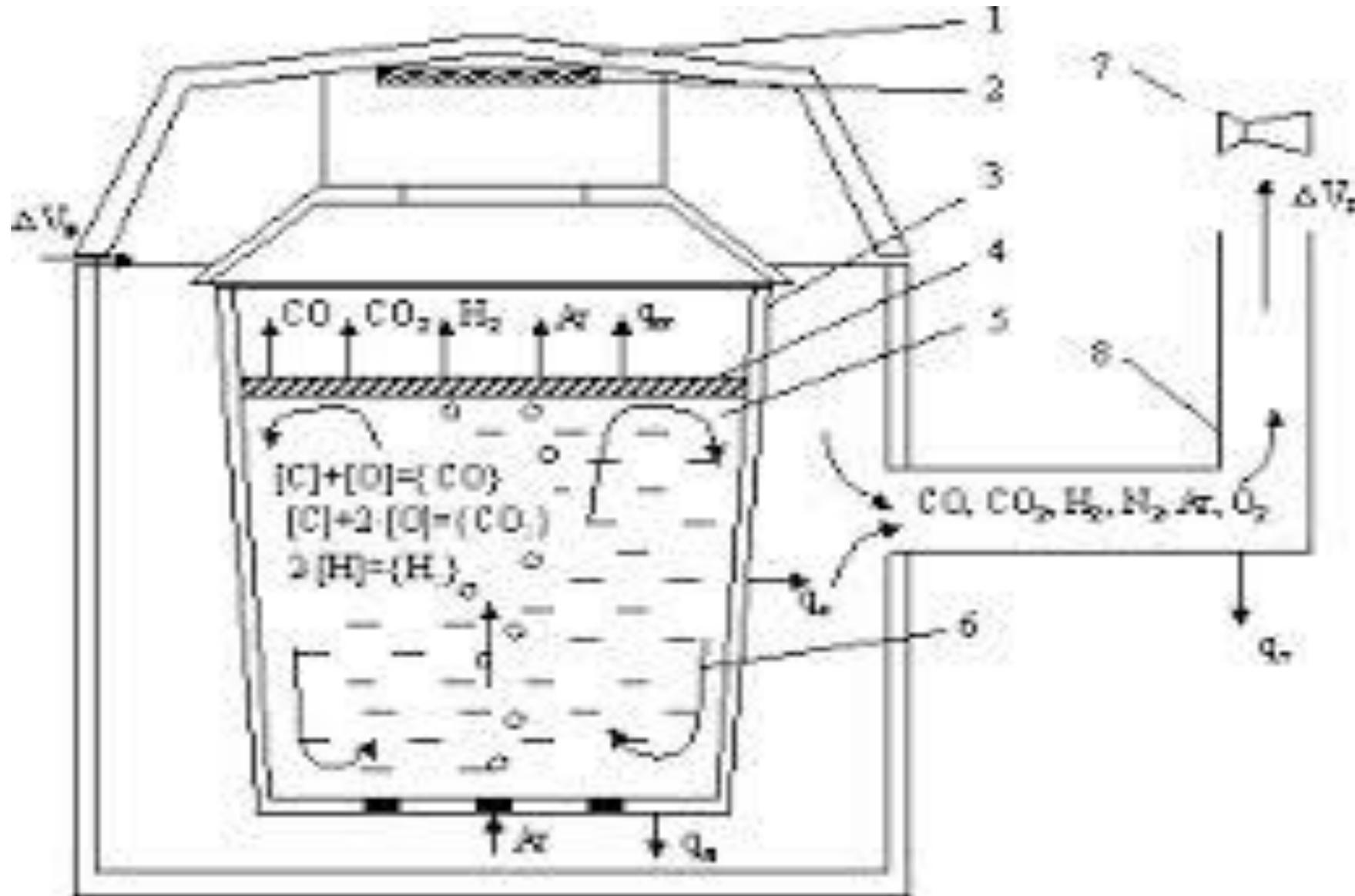
## 1. Внепечная обработка жидкой стали

- вакуумирование жидкой стали
- обработка жидкой стали синтетическими шлаками

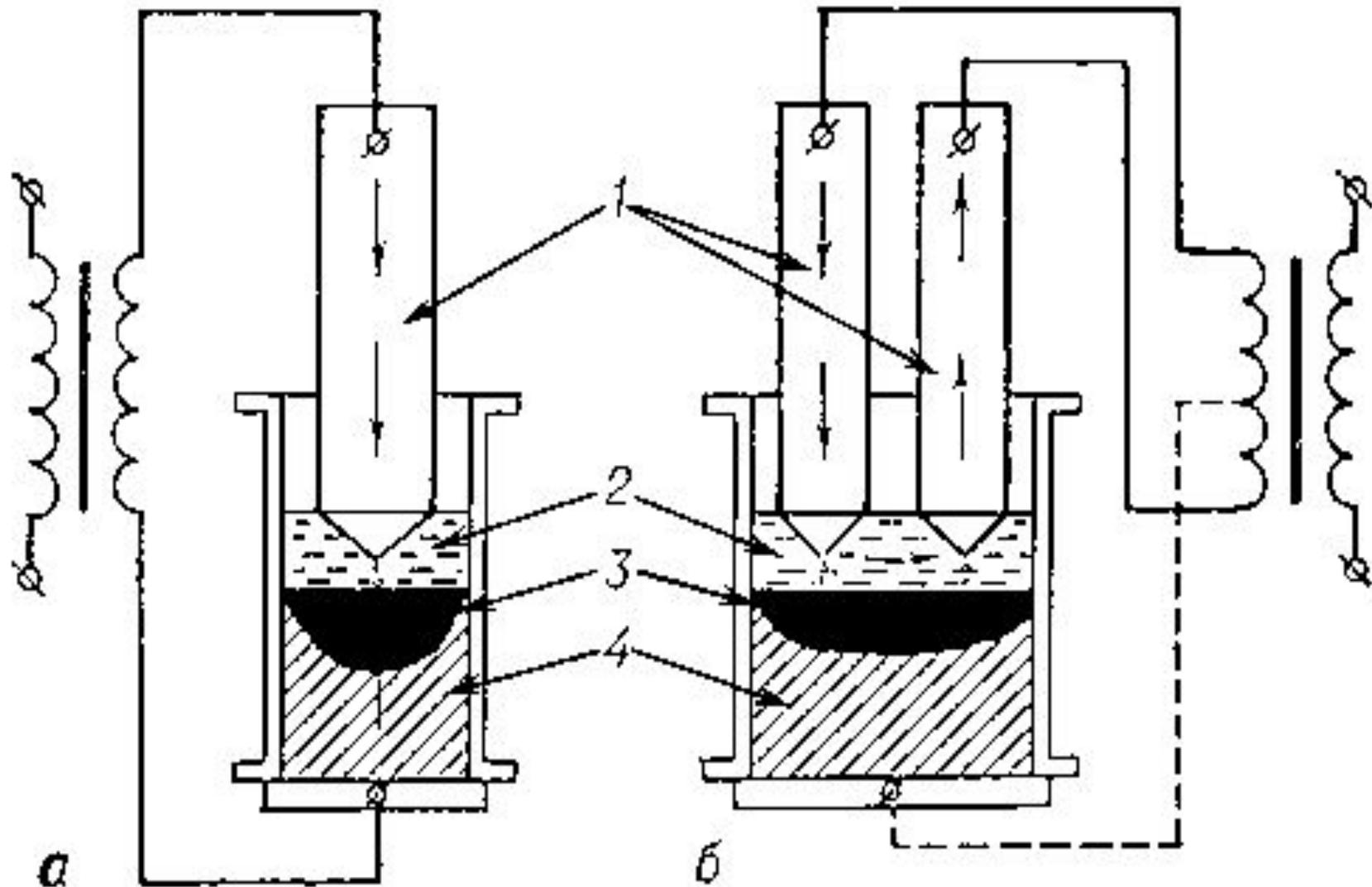
## 2. Вторичное рафинирование стали

- электрошлаковый переплав
- вакуумнодуговой переплав

# Вакуумирование жидкой стали



# Электрошлаковый переплав



# Содержание примесей ppm после вторичного рафинирования стали

Способ	S	P	O	N	H	Sn	Sb	Al	Сумма всех примесей
Электростал е- плавильный	25	30	15	30	25	4	3	7	139
ЭШП	10	30	12	25	20	4	3	7	111
ВДП	25	30	9	20	10	2	3	7	108

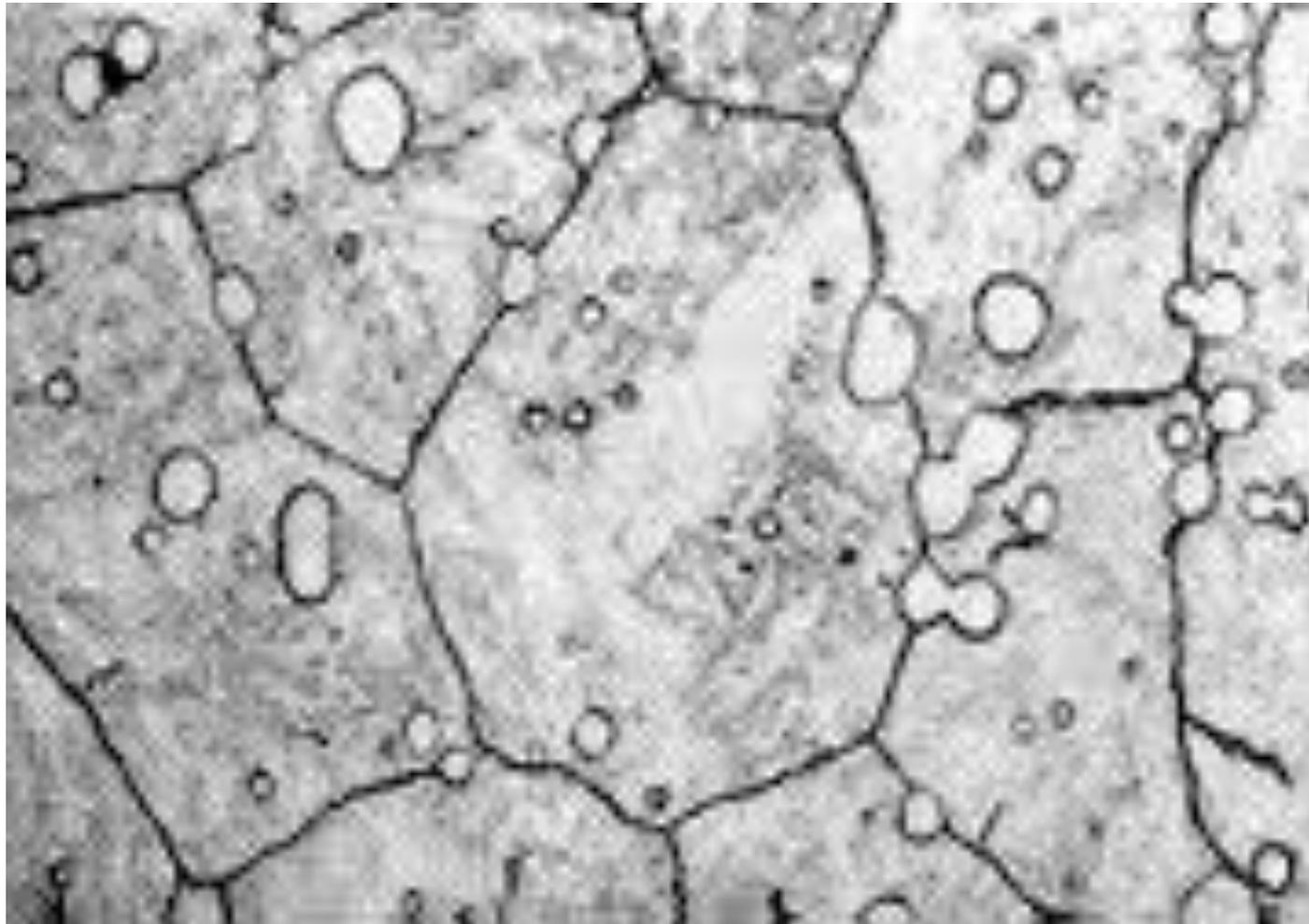
## Микролегированные стали

Микролегированием стали называется введение в состав различных веществ, остаточное содержание которых в сплаве не превышает 0,1%. Микролегирование влияет на фазовый состав, размеры аустениты зерен, строение границ и приграничных областей. Соответственно, улучшаются механические и технологические характеристики сплава.

Микролегирование отличается от легирования тем, что вводимые легирующие элементы имеют очень низкую концентрацию. По сути, их количество должно быть таким, чтобы локально легировать границы субзерен и зерен и обеспечивать формирование упрочняющих фаз.

Легирующими элементами в микролегировании выступают бор, алюминий, кальций, магний, азот, цирконий, титан, ниобий и ванадий. Этот процесс усовершенствования сталей сравнительно молодой и в производстве используется лишь небольшим количеством предприятий, поскольку требует высокой точности исполнения. Примерами являются стали Hardox Weldox Raex

## Карбиды в легированной стали



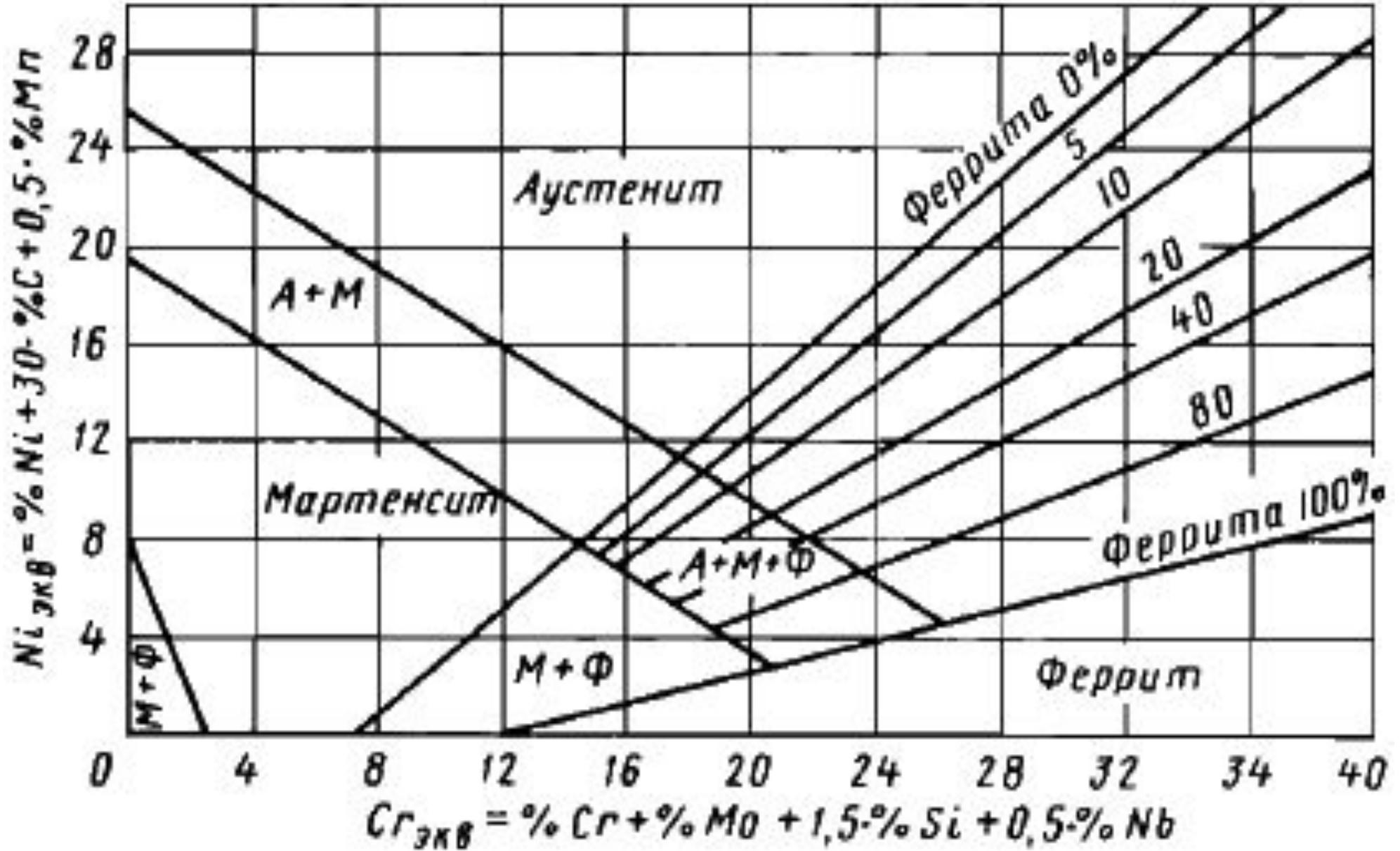
## Конструкционная легированная сталь **HARDOX**

- **HARDOX** — семейство марок сверхтвердых сталей, обладающих высокой стойкостью к износу, одинаковой по всей толщине листа. В настоящее время выпускаются марки — **HARDOX 400, 450, 500 и 600**. Индекс показывает величину твердости данной марки стали по Бринелю (НВмик).
- **HARDOX** представляет собой низколегированную сталь. Типичный химический состав, например, для марки **HARDOX 400** (толщина листа - 30 мм): C = 0.47%, Si = 0.7%, Mn = 1.0%, S = 0,01, P = 0,015, Cr = 1,2%, Ni = 2,5%, Mo = 0,8%, B = 0.002%.
- Механические свойства:  $\sigma_T = 1000-1600$  Мпа,  $\sigma_B = 1250-2000$  Мпа.

# Влияние микролегирования на прочность стали

Класс прочности	Базовый химический состав, массовая доля, %	Дополнительное легирование
265, 295	С до 0,14 Si » 0,5 Mn » 1,6	Al до 0,03 Ti » 0,03
315	С до 0,18 Si » 0,7 Mn » 1,6	Al до 0,03 Ti » 0,03
325	С до 0,20 Si » 0,9 Mn » 1,6	Al до 0,03 Ti » 0,05 V » 0,10
345, 355, 375	С до 0,22 Si » 0,9 Mn » 1,6	Al до 0,03 Ti » 0,05 V » 0,10 Nb » 0,02 N » 0,03
375, 390	С до 0,22 Si » 1,1 Mn » 1,8	Al до 0,03 Ti » 0,05 V » 0,10 Nb » 0,03 N » 0,03
440	С до 0,22 Si » 1,1 Mn » 1,8	Al до 0,03 Ti » 0,05 V » 0,15 Nb » 0,05 N » 0,03

# Хромо-никелевые стали (диаграмма Шеффлера)



# Примеры марок хромоникелевых сталей

Марки стали	Класс стали	Свойства
08X17H13M2T 10X18H12T	Аустенитный Аустенитный	
08X13 12X17	Ферритный Ферритный	
40X13 95X18	Мартенситный Мартенситный	
03X23H6 12X21H5T	Ферритно-аустенитный Ферритно-аустенитный	
25X13H2 20X17H2	Мартенситно-ферритный Мартенситно-ферритный	
08X17H6M3 07X16H6	Мартенситно-аустенитный Мартенситно-аустенитный	

# Азотистые легированные стали

Стали, легированные азотом, принято подразделять на две категории: стали с содержанием азота ниже равновесного ( $<0,001\%$ ) и стали с содержанием азота выше равновесного ("сверхравновесные").

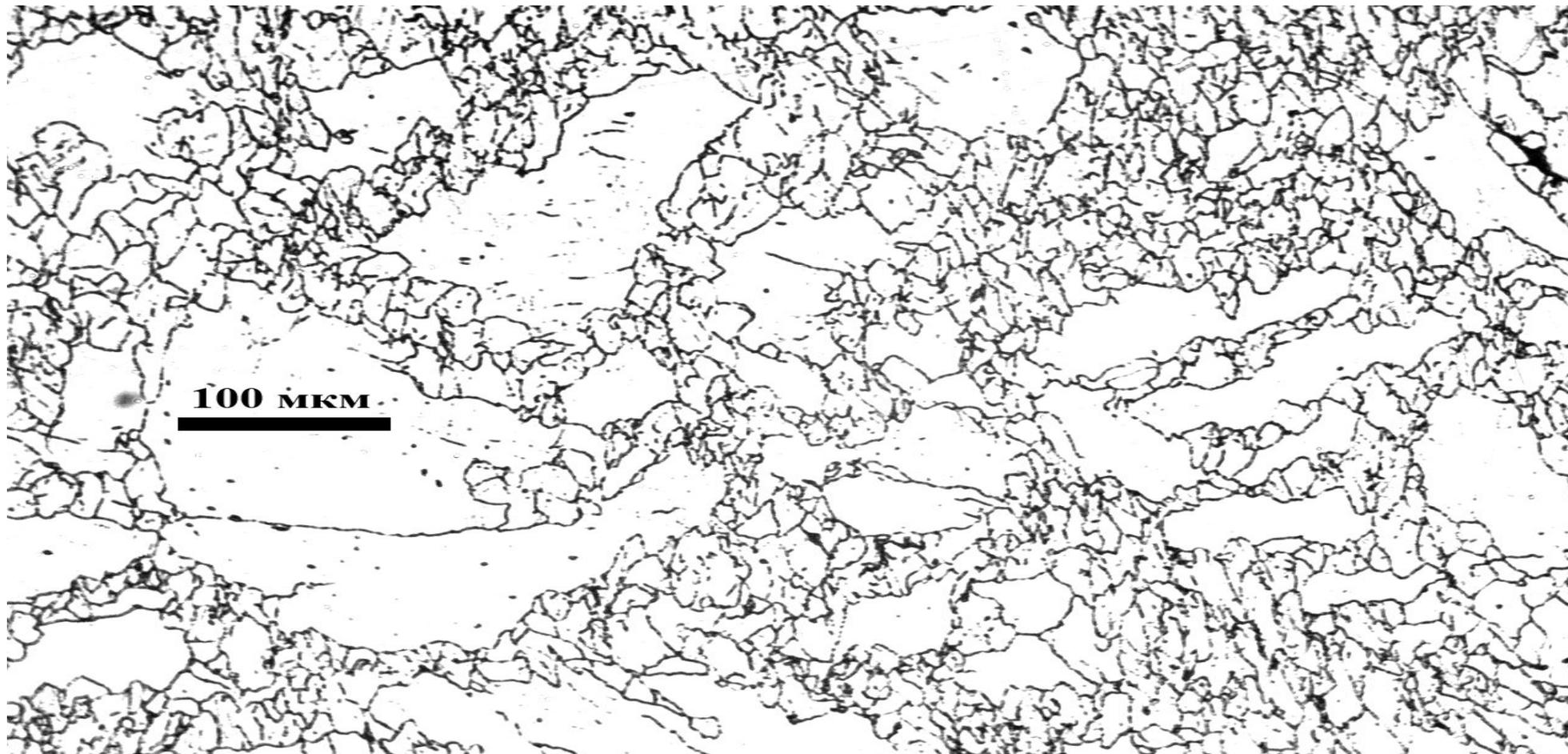
Первые получают в условиях выплавки и кристаллизации при атмосферном давлении азота. Вторые - при повышенном давлении азота, позволяющем сохранить большее его содержание в металле, чем при открытой выплавке.

В качестве перспективных сталей с различным уровнем легирования азотом для разнообразных сфер применения можно отметить.

1. Дисперсионно-твердеющие стали, легированные ванадием, ниобием (40X2АФБ);
2. Высокопрочные коррозионно-стойкие, аустенитные стали (05X20АГ11Н6МФБ);
3. Стали со структурой азотистого феррита (06X16АБ).

- Легирование азотом дисперсионно-твердеющих сталей приводит к образованию мелкодисперсных нитридов по границам зерен, препятствующих их росту, позволяет повысить предел текучести и ударную вязкость металла .
- Легирование азотом нержавеющей сталей, позволяет уменьшить в них содержание никеля в полтора – два раза. Нержавеющие стали, легированные азотом, превосходят по прочности, вязкости и коррозионной стойкости традиционные нержавеющей стали.

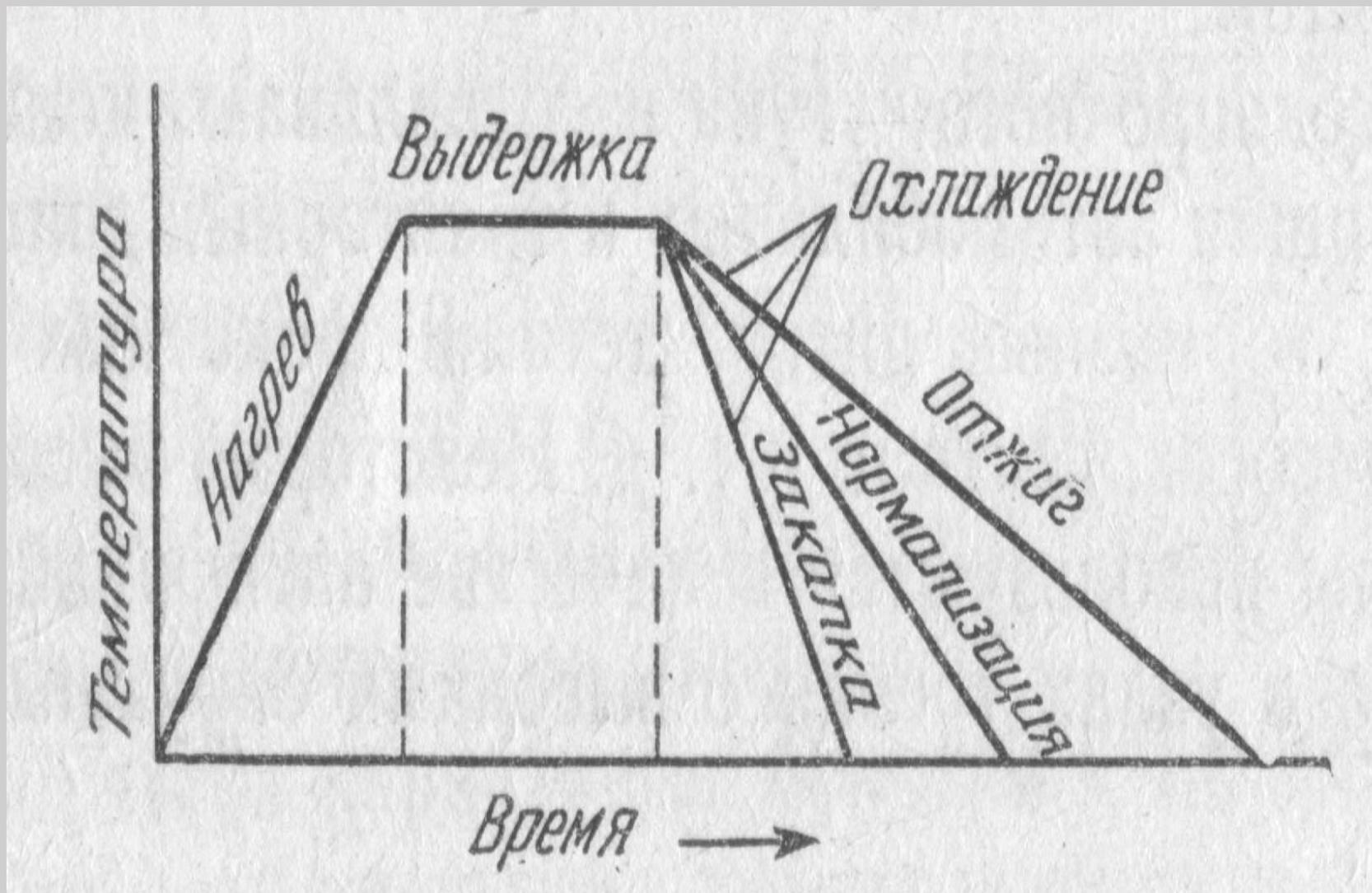
# Микроструктура аустенитной азотистой стали 04X20H5Г11АМ2БФ



# Термическая обработка стали

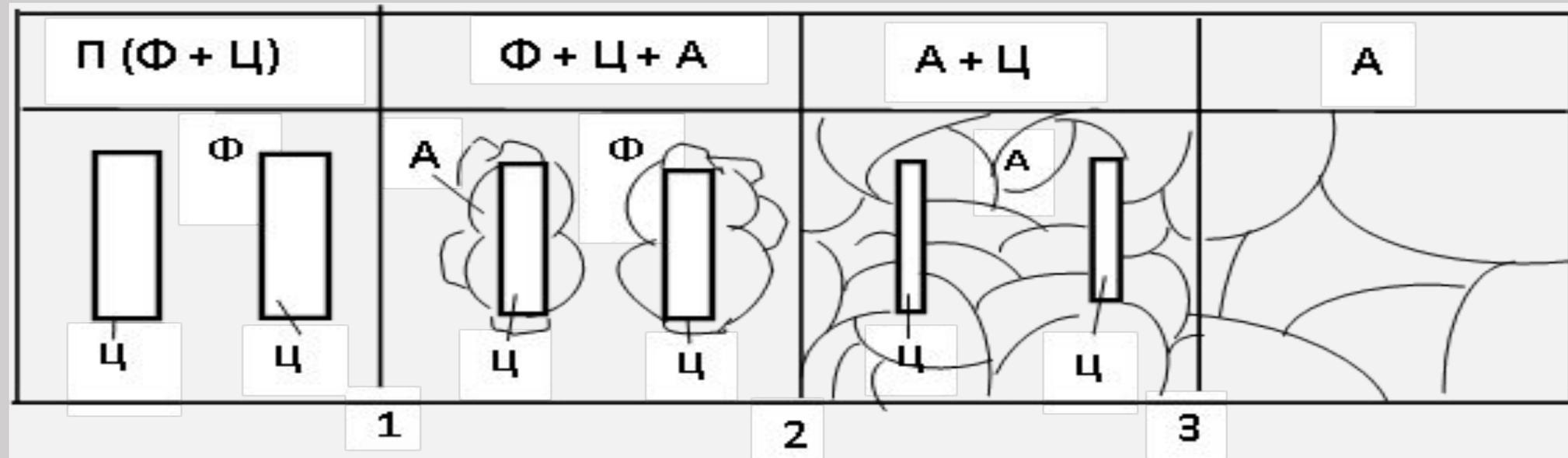
- **Термической обработкой** называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения сталей с целью получения заданных свойств за счет изменения структуры. Термическая обработка используется либо в качестве промежуточной операции для улучшения обрабатываемости давлением, резанием, либо как окончательная операция технологического процесса, обеспечивающая заданный уровень свойств детали.
- Общая длительность нагрева металла при термической обработке складывается из времени собственно нагрева до заданной температуры и времени выдержки при этой температуре. Время нагрева зависит от типа печи, размеров деталей, их укладки в печи; время выдержки зависит от скорости протекания фазовых превращений.
- Нагрев может сопровождаться взаимодействием поверхности металла с газовой фазой и приводить к обезуглероживанию поверхностного слоя и образованию окалины. Обезуглероживание приводит к тому, что поверхность деталей становится менее прочной.
- При нагреве и охлаждении стали происходят фазовые превращения, которые характеризуются температурными критическими точками. Принято обозначать критические точки стали буквой А. Для обозначения критических точек при нагреве и охлаждении вводят дополнительные индексы: букву «с» в случае нагрева и «r» в случае охлаждения, например Ac1, Ac3, Ar1, Ar3.

# Технологический режим термической обработки

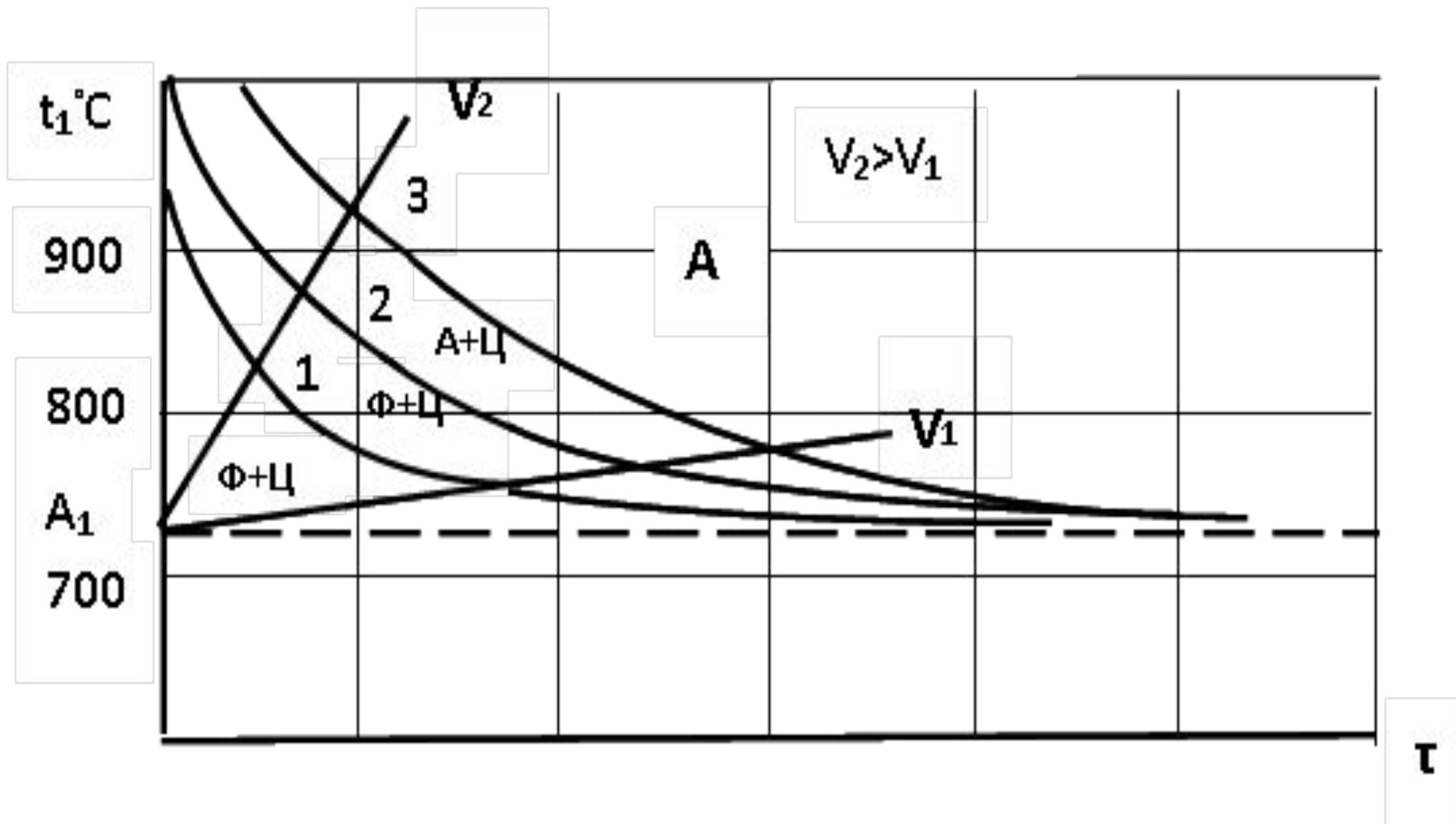


# Схема превращения перлита в аустенит при нагреве

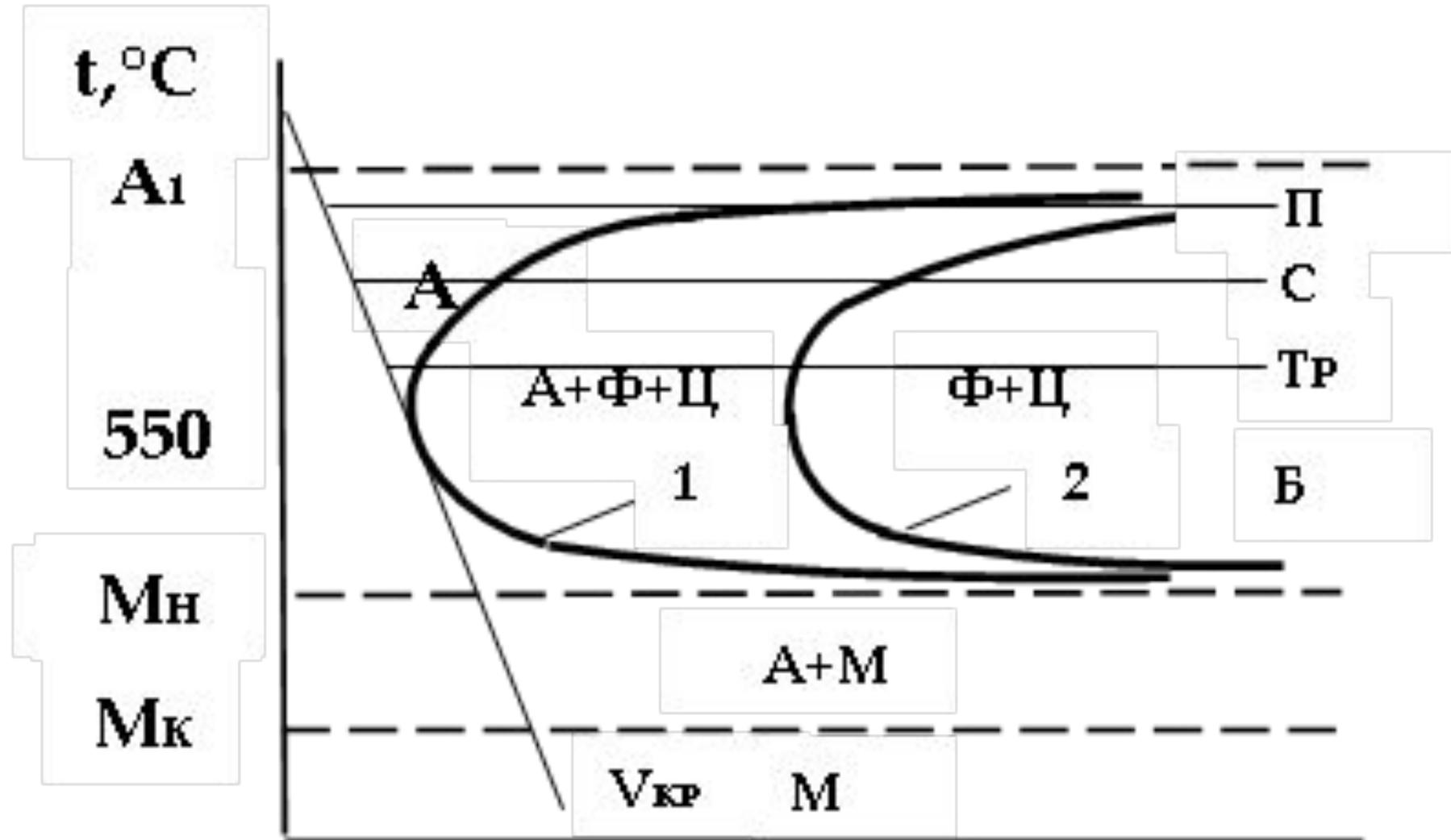
Превращение перлита в аустенит состоит из двух параллельно идущих процессов: полиморфного  $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$  превращения и растворения цементита в  $\gamma\text{-Fe}$ . Скорость процесса превращения в целом будет контролировать скорость диффузии углерода через межфазную границу. Во-вторых, превращение перлита в аустенит происходит с изменением объема, что приводит к пластической деформации и фазовому наклепу аустенита.



# Диаграмма превращения перлита в аустенит при нагреве



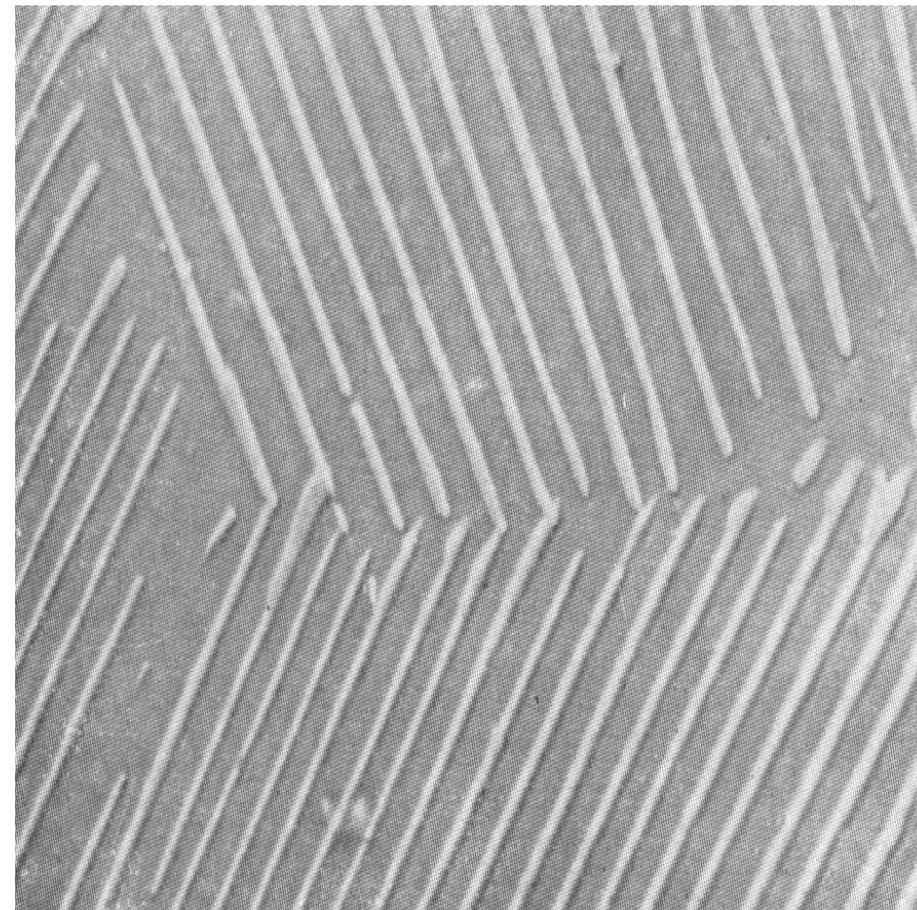
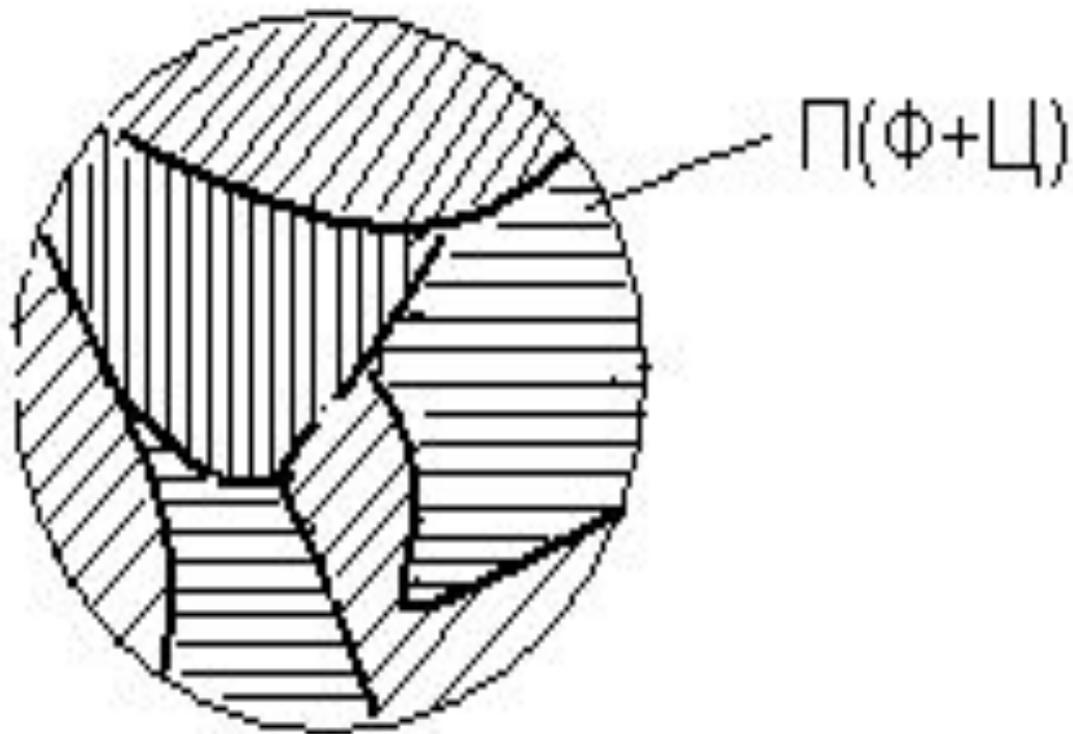
# Схема диаграммы изотермического превращения аустенита при охлаждении (TTT diagram)



# Перлитное превращение

Для **перлитного превращения** характерно одновременное формирование смеси чередующихся пластин феррита и цементита — перлитной структуры. При этом по границам аустенитных зерен может выделяться свободный феррит и цементит. Формирование и рост обеих фаз контролируются в основном диффузией углерода — поэтому этот процесс называют диффузионной кристаллизацией. Диффузия железа и легирующих элементов также играют значительную роль. Со снижением температуры и увеличением переохлаждения  $\Delta T$  происходит увеличение дисперсности структуры ( $S$ ), а время, необходимое для завершения диффузионной кристаллизации феррита и карбида увеличивается. Перлитная структура ( $S \approx 0,2 - 0,15$  мкм) формируется при изотермической выдержке  $650 - 600$  °С.

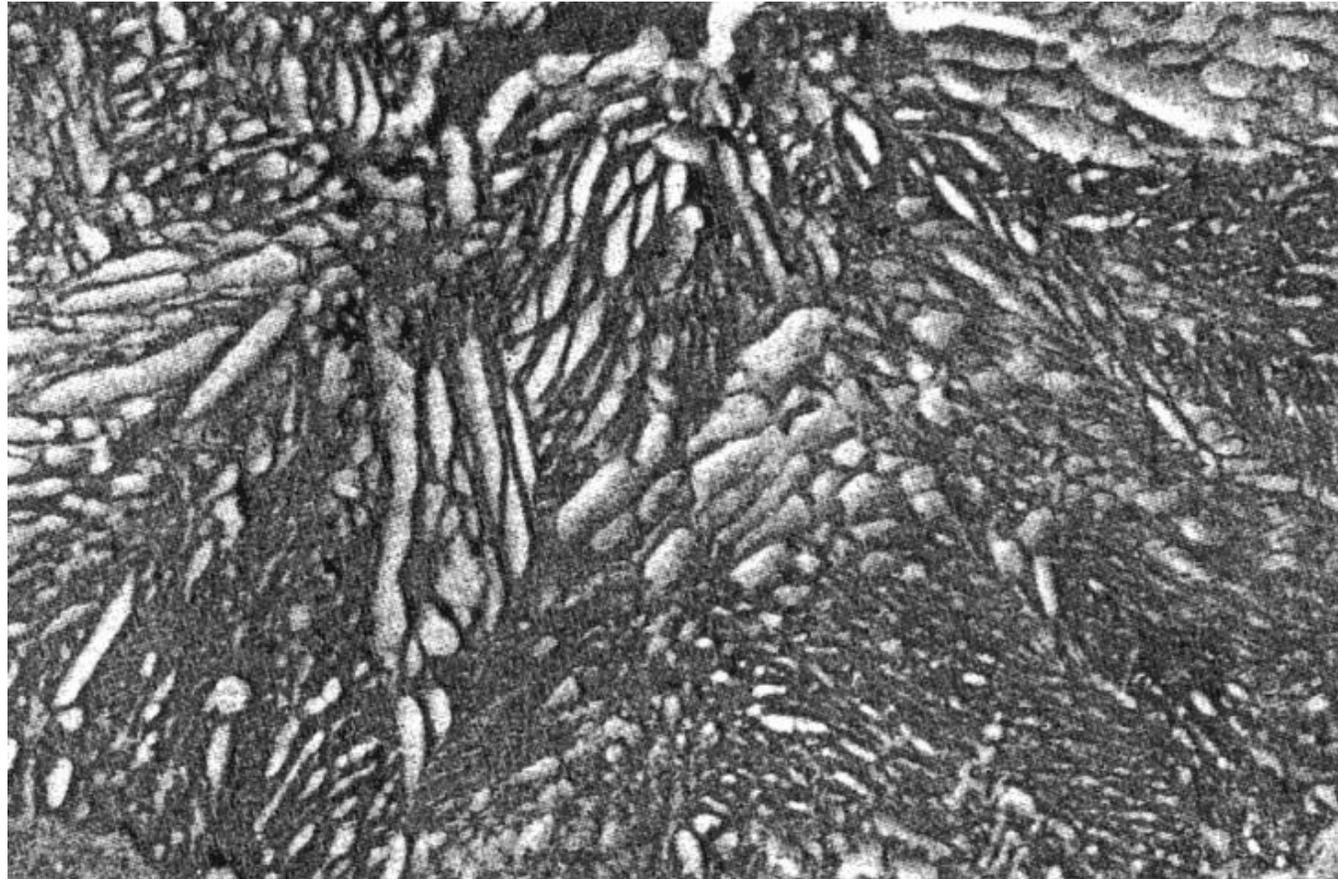
Пластинчатый перлит.  
Межпластинчатое расстояние  $S = 0,35$  мкм.  
Твердость  $\approx 200$ НВ



Сорбит

Межпластинчатое расстояние  $S = 0,15$  мкм.

Твердость  $\approx 250$ НВ



Троостит  
Межпластинчатое расстояние  $S = 0,07$  мкм.  
Твердость  $\approx 300$ НВ



# Мартенситное превращение

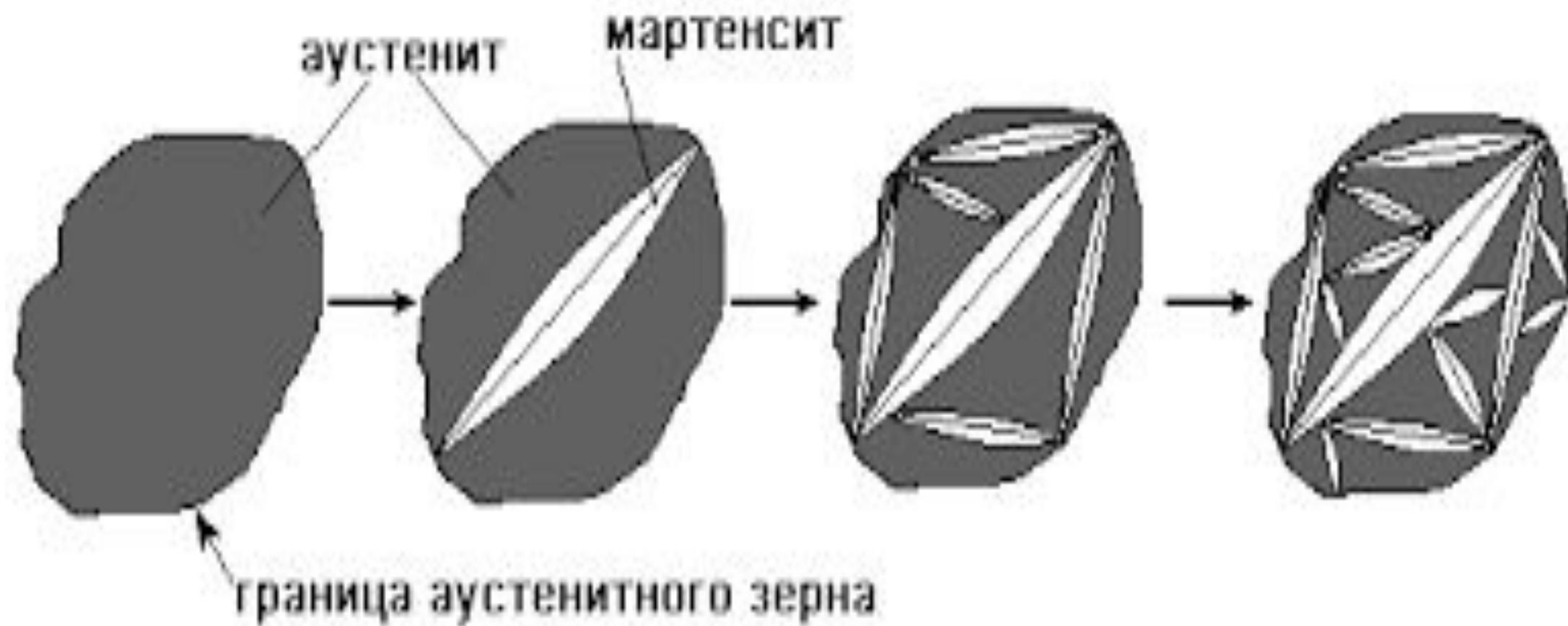
## **Можно выделить несколько особенностей механизма мартенситного превращения.**

Во-первых, происходит сдвиговое превращение решетки, при котором атомы смещаются на расстояния, не превышающие межатомные. Растущие кристаллы мартенсита когерентно связаны с исходными кристаллами аустенита, т.е. они имеют общую для их кристаллических решеток атомную плоскость. При нарушении когерентности решеток сдвиговый переход атомов из аустенита в мартенсит становится невозможным, и рост кристалла мартенсита прекращается.

Во-вторых, при аустенито-мартенситном превращении происходит перестройка решетки без изменения концентрации углерода, т.е. превращение является бездиффузионным. Если содержание углерода в стали превышает равновесную концентрацию (0,01%), то образующийся мартенсит будет пересыщенным твердым раствором углерода в  $\alpha$ -железе. Из-за пересыщенности углеродом кубическая решетка искажается и становится тетрагональной, в которой отношение периодов решетки (степень тетрагональности)  $c/a > 1$ . С увеличением содержания углерода в стали степень тетрагональности решетки мартенсита возрастает.

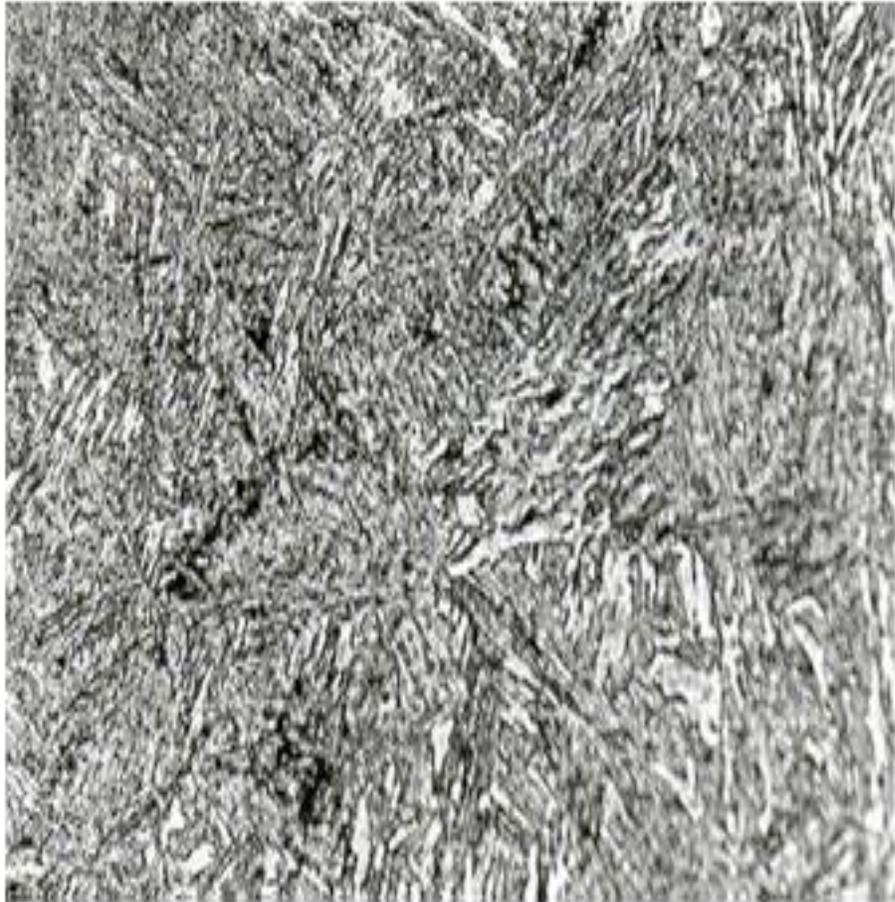
В-третьих, мартенситное превращение в сталях сопровождается заметным увеличением объема, что приводит к пластической деформации, фазовому наклепу и увеличению плотности дислокаций до  $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Увеличение объема при мартенситном превращении является одной из основных причин возникновения при закалке больших внутренних напряжений, которые вызывают деформацию изделия и часто появление закалочных трещин.

## Схема мартенситного превращения



# Мартенсит

Твердость  $\approx 600\text{HV}$



# Бейнитное превращение

Механизм бейнитного превращения имеет как черты мартенситного, так и перлитного. Поэтому его часто называют промежуточным.

Установлено, что превращение аустенита в бейнит в некотором объеме начинается с перераспределения атомов углерода, в результате которого одни участки зерен аустенита обогащаются, а другие обедняются углеродом. В участках аустенита, обогащенных углеродом, происходит выделение мелких ( $\sim 0,01\text{мкм}$ ) кристаллов цементита. По мере снижения концентрации углерода в этих участках аустенита начинается мартенситное превращение.

Полиморфное  $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$  при бейнитном превращении происходит по мартенситному типу, но оно подготавливается диффузией углерода в аустените, и этот диффузионный процесс контролирует скорость бейнитного превращения.

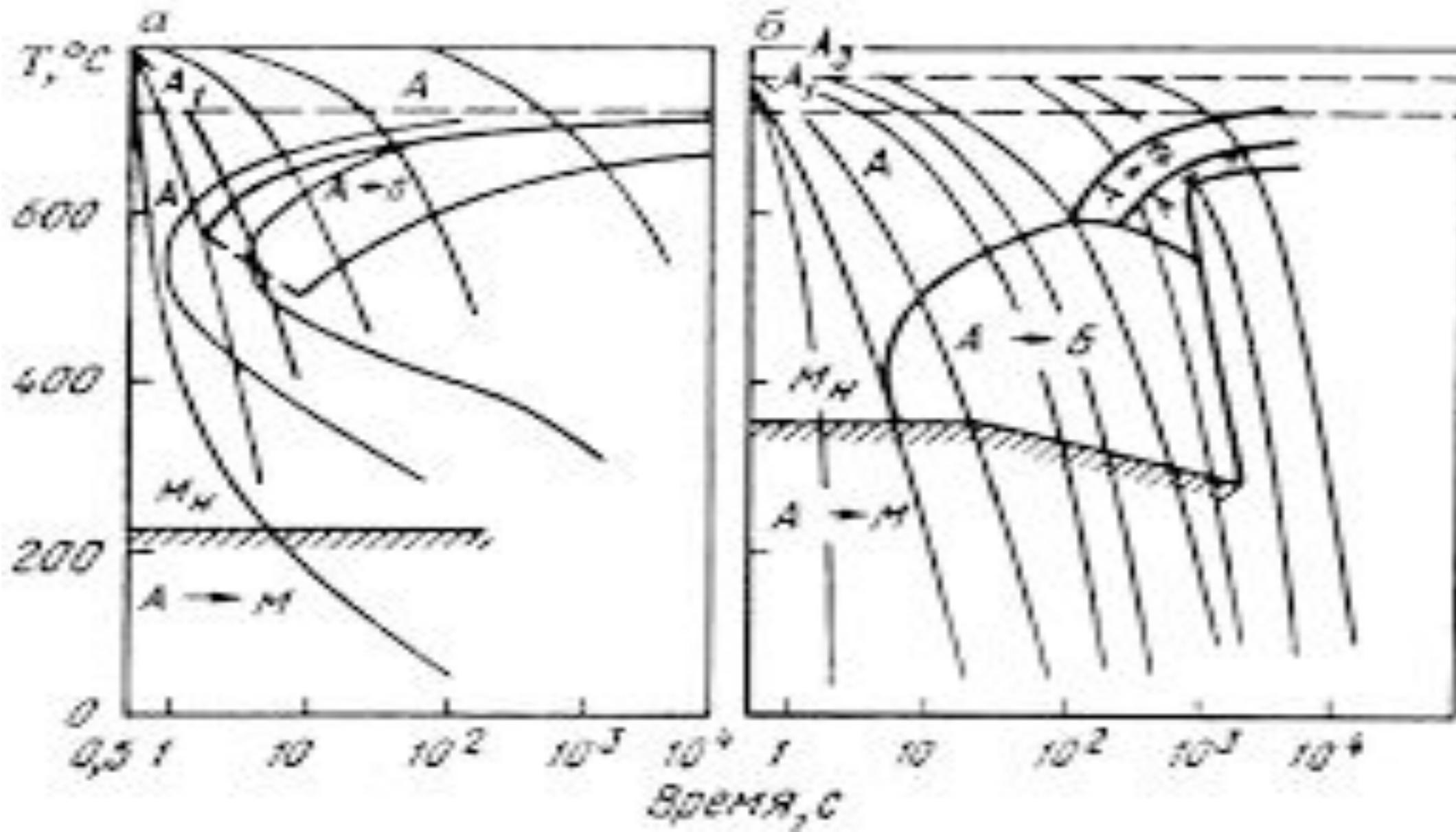
Бейнит, образовавшийся при температуре  $400 - 550^\circ\text{C}$ , называют верхним. Бейнит, образовавшийся при более низких температурах, называют нижним. Характерно, что бейнитное превращение, так же как и мартенситное, не доходит до конца. Часть аустенита остается непревращенной, и при дальнейшем охлаждении он либо сохраняется, либо превращается в мартенсит.

Влияние бейнита на комплекс механических свойств неоднозначно. Если верхний бейнит имеет неблагоприятное сочетание механических свойств: пониженная прочность в сочетании с низкой пластичностью и вязкостью, то нижний бейнит обеспечивает высокую прочность и одновременно достаточно высокие показатели пластичности и вязкости.

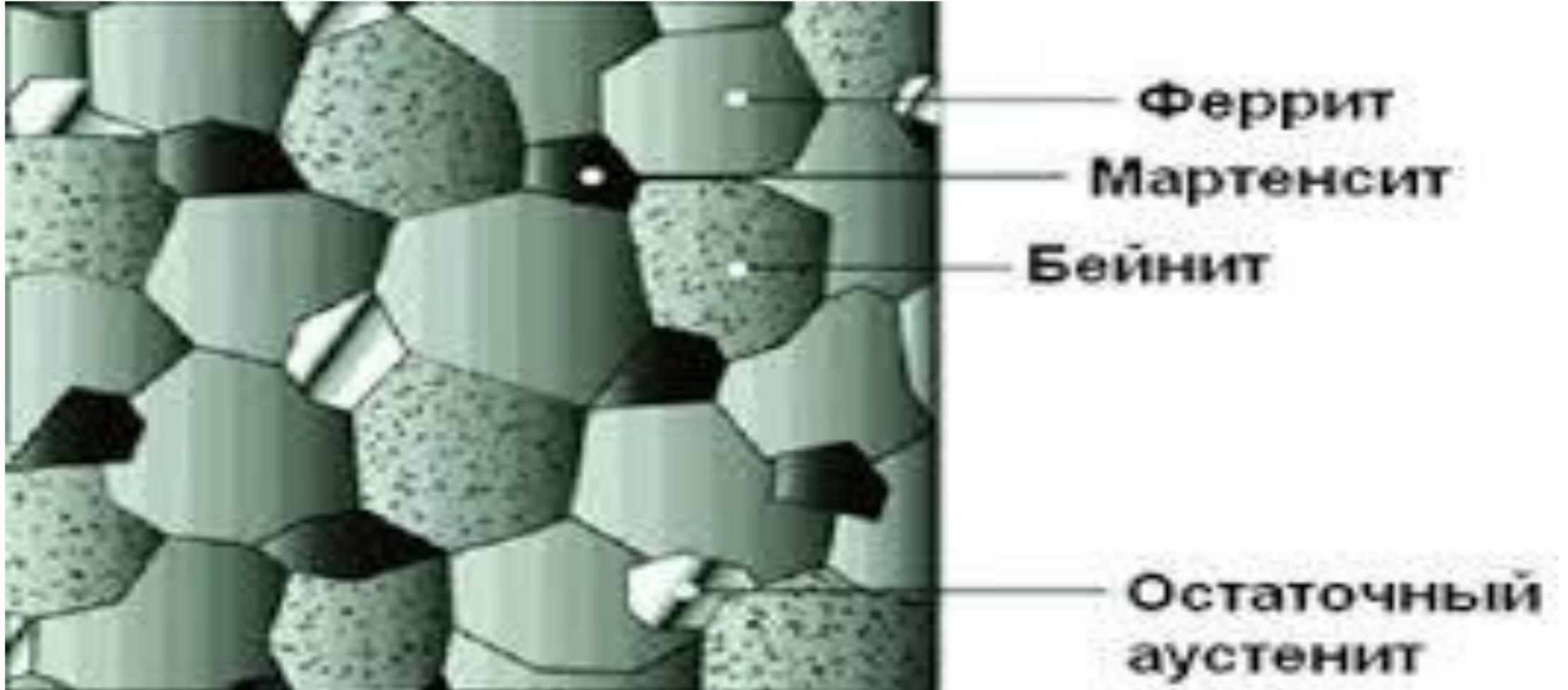
Нижний бейнит. Твердость  $\approx 400\text{HV}$



# Термокинетические диаграммы превращения аустенита



## Модель реальной структуры



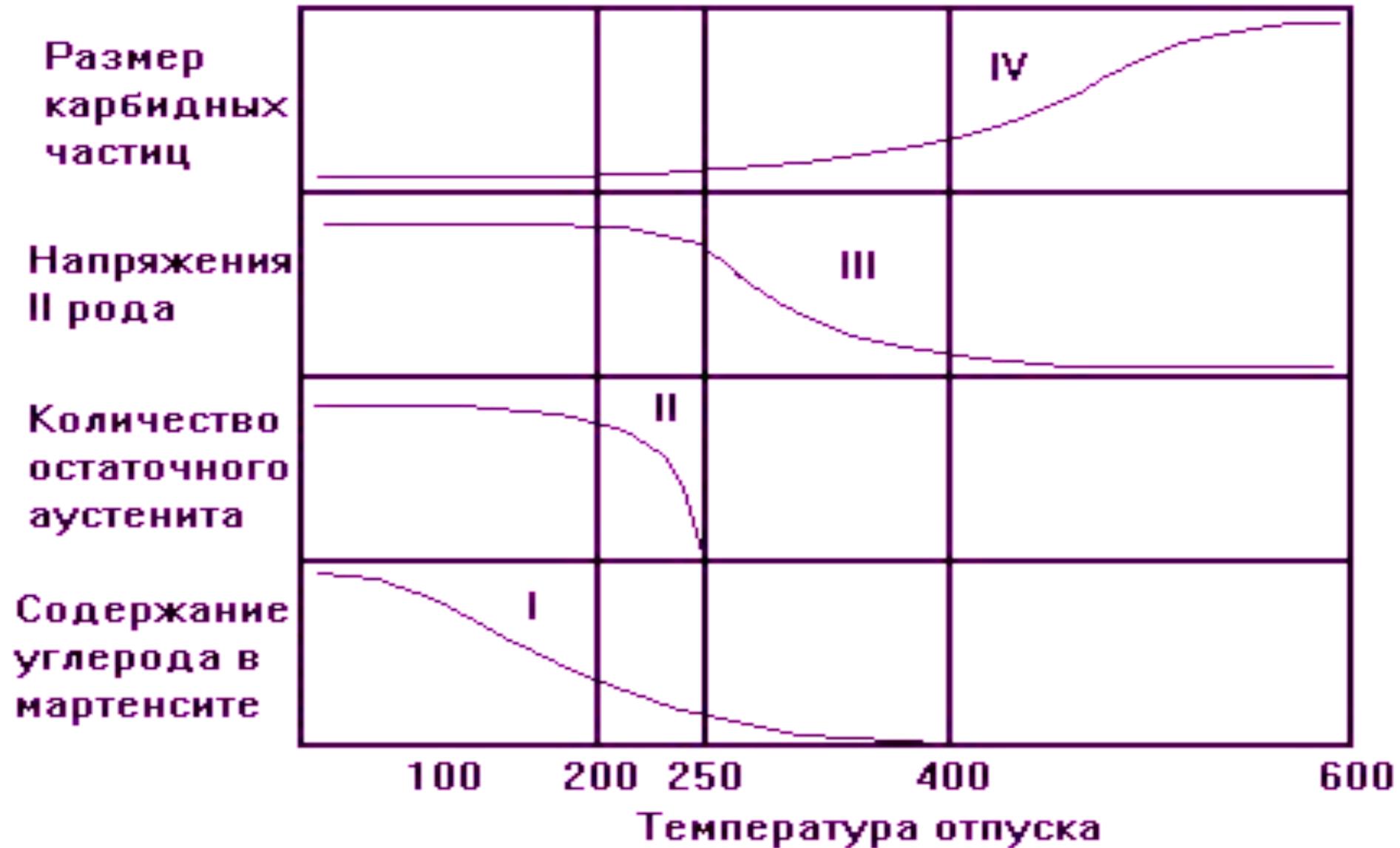
## Преобразование мартенсита при нагреве

Структура закаленной стали метастабильна. При нагреве после закалки вследствие увеличивающейся подвижности атомов создаются условия для процессов, изменяющих структуру стали в направлении к более равновесному состоянию.

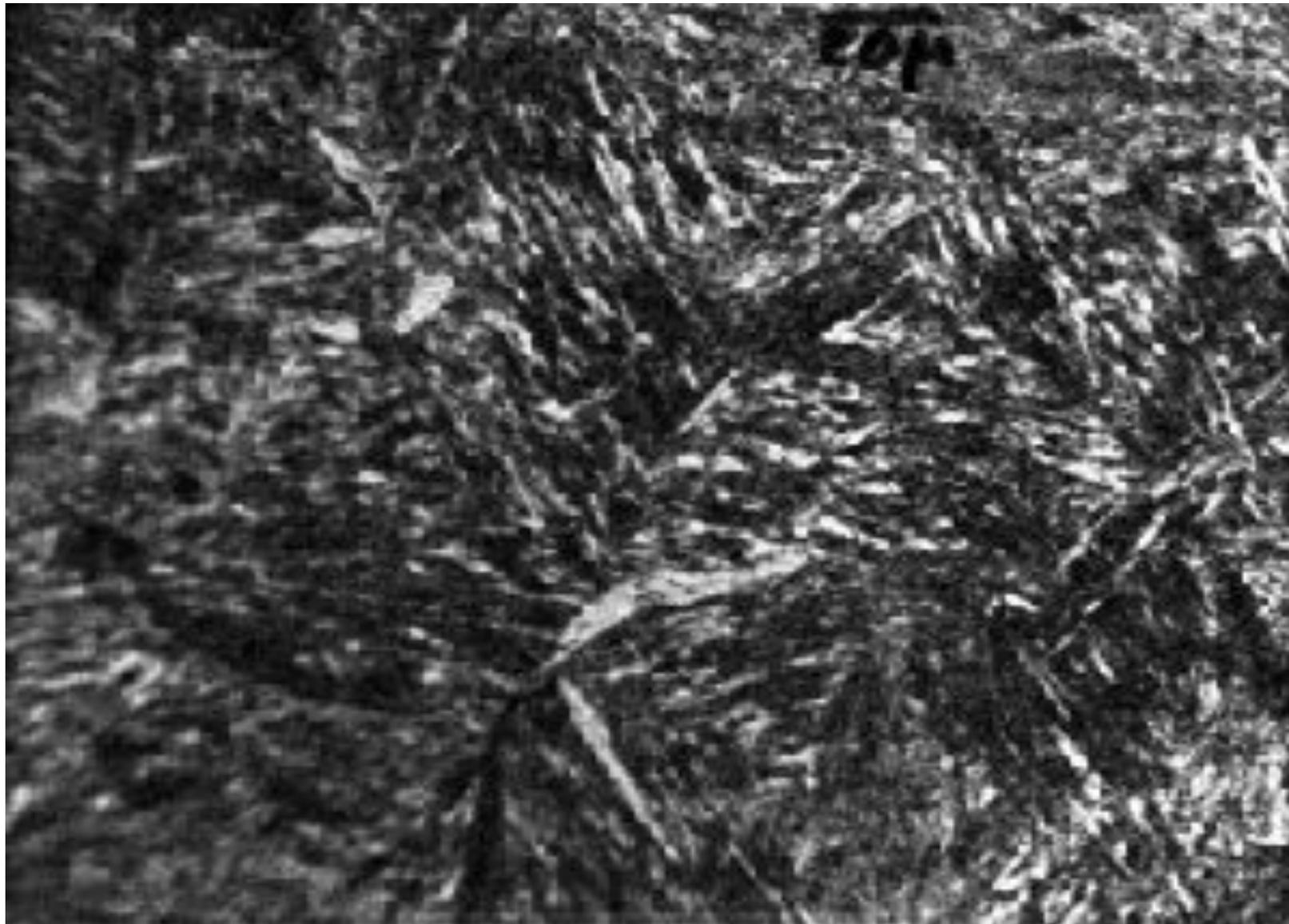
Характер этих процессов определяется тремя важнейшими особенностями строения закаленной стали: сильной пересыщенностью углеродом мартенсита, повышенной плотностью в нем дефектов — дислокаций, границ и присутствием во многих сталях остаточного аустенита.

Распад мартенсита с уменьшением степени тетрагональности решетки и выделением карбидов и распад

# Структурные превращения мартенсита при нагреве



# Мартенсит отпуска



# Троостит отпуска



# Сорбит отпуска

