IX Научно-техническая конференция «Коррозия и управление рисками в нефтяной и газовой промышленности»
Семинар «Роль металловедения в повышении эксплуатационной надежности оборудования»

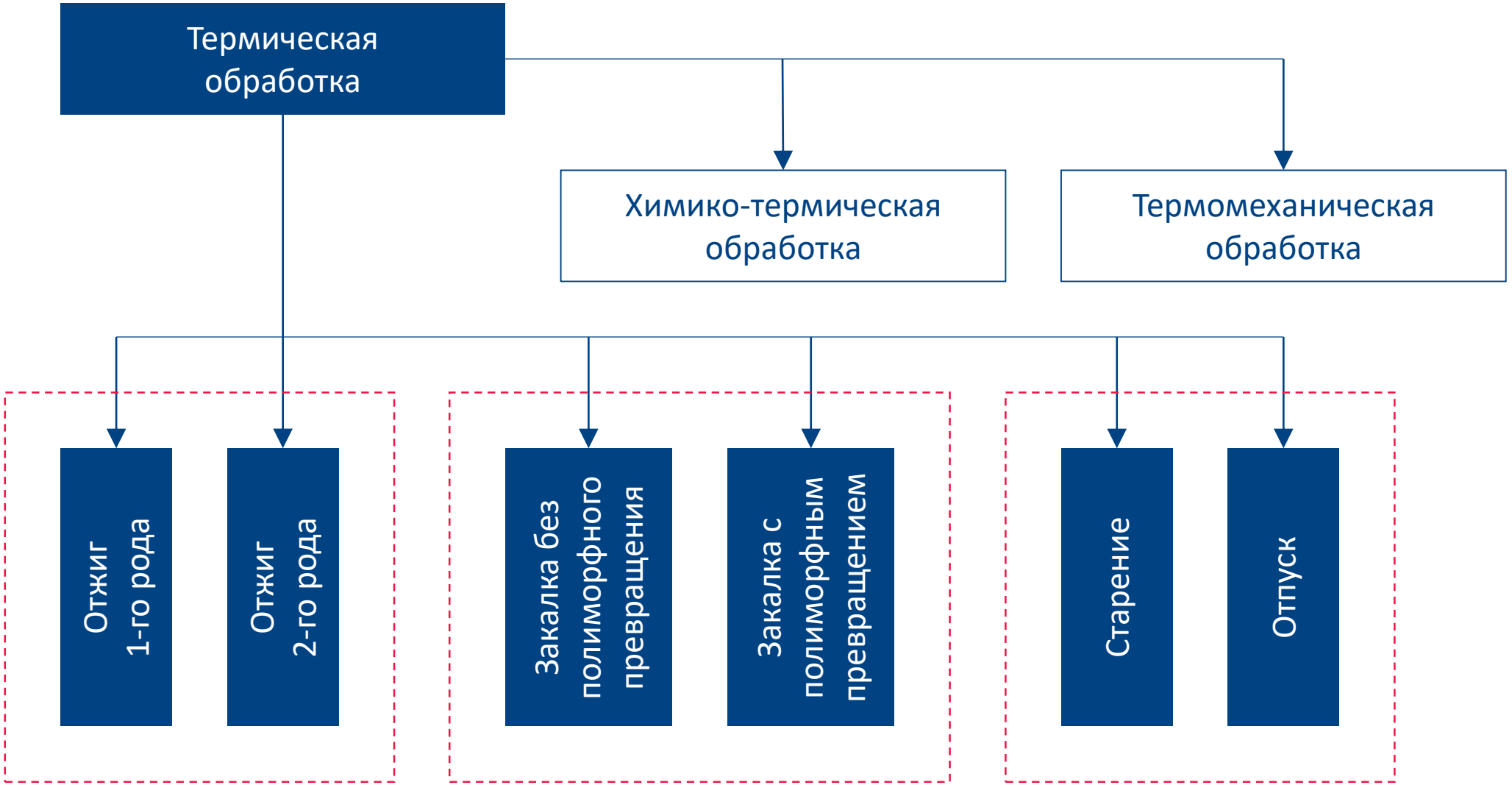
ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Связь между типом структуры и механическими свойствами

САМАРСКИЙ ПОЛИТЕХ
Опорный университет

Докладчик: Майдан Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент,
кафедра «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»
2 сентября 2025 года

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ



ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Отжиг — термическая операция, состоящая в нагреве сплава, имеющего неравновесное состояние, полученное в результате предшествовавшей обработки, и приводящая его в более равновесное состояние.

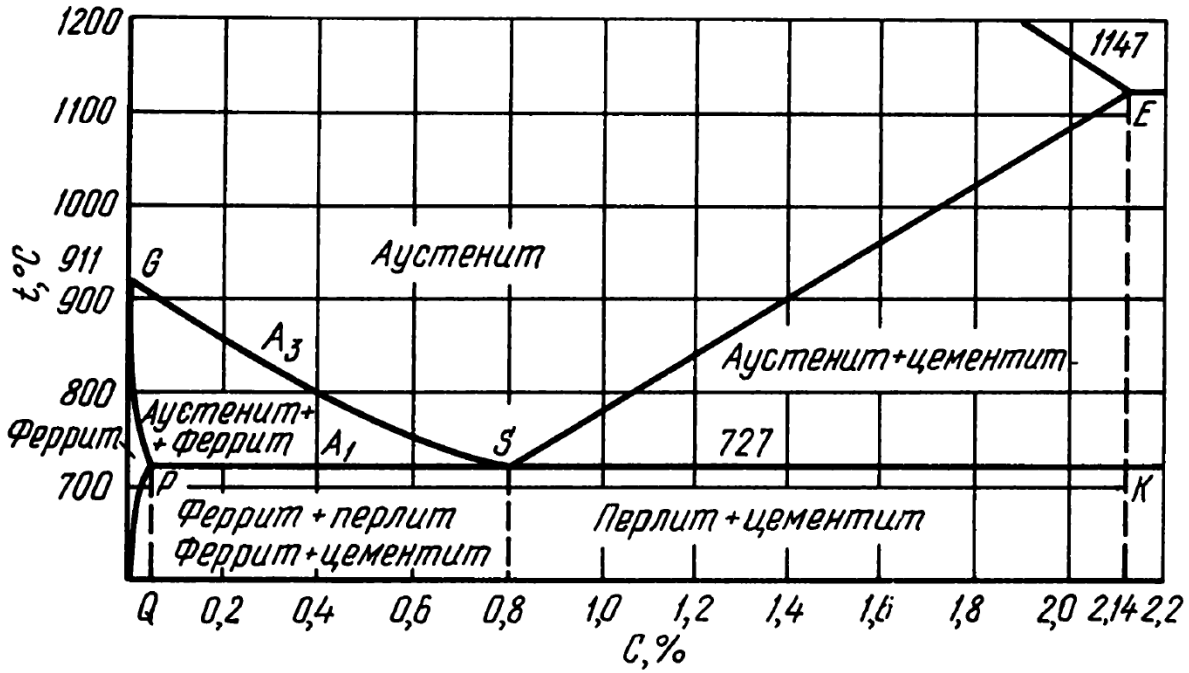
Закалка — термическая операция, состоящая в нагреве сплава выше температуры превращения с последующим быстрым охлаждением для получения структурно неравновесного состояния.

Отпуск — термическая операция, состоящая в нагреве закаленного сплава ниже температуры превращения для получения более равновесного структурного состояния.

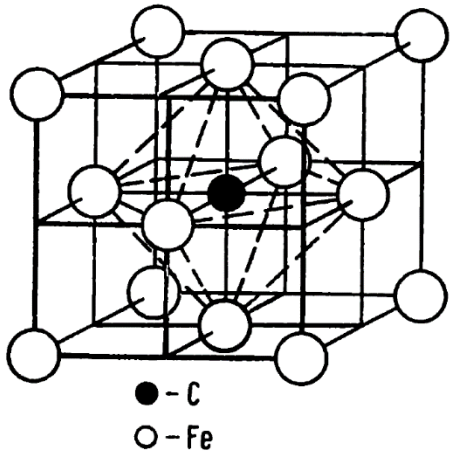
Химико-термическая обработка — нагрев сплава в соответствующих химических реагентах для изменения состава и структуры поверхностных слоев.

Термомеханическая или деформационно-термическая обработка — деформация и последующая термическая обработка, сохраняющая в той или иной форме результаты наклепа.

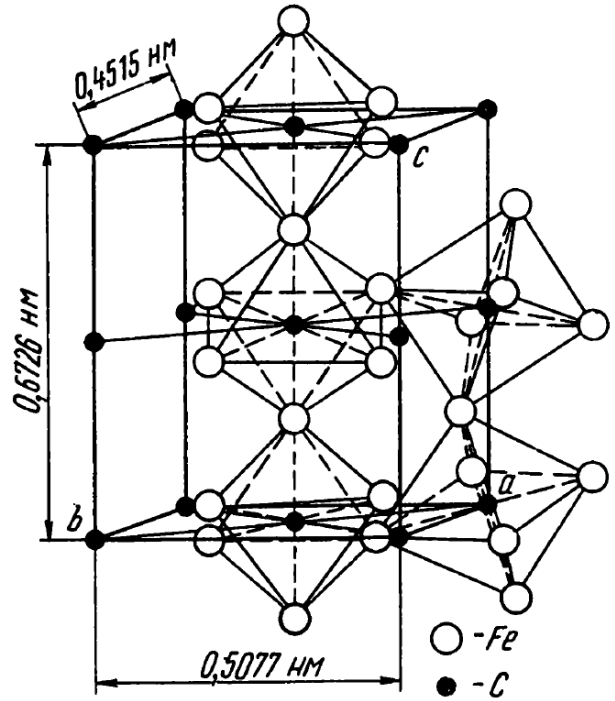
ДИАГРАММА «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»



«Стальной» участок
диаграммы «железо-углерод»



Кристаллическая
решетка аустенита



Кристаллическая
структура цементита

Твердый раствор углерода в α-железе называется ферритом, а в γ-железе — аустенитом.
Цементит — это химическое соединение углерода с железом — карбид железа Fe_3C.
Эвтектоидная смесь феррита и цементита называется перлитом.

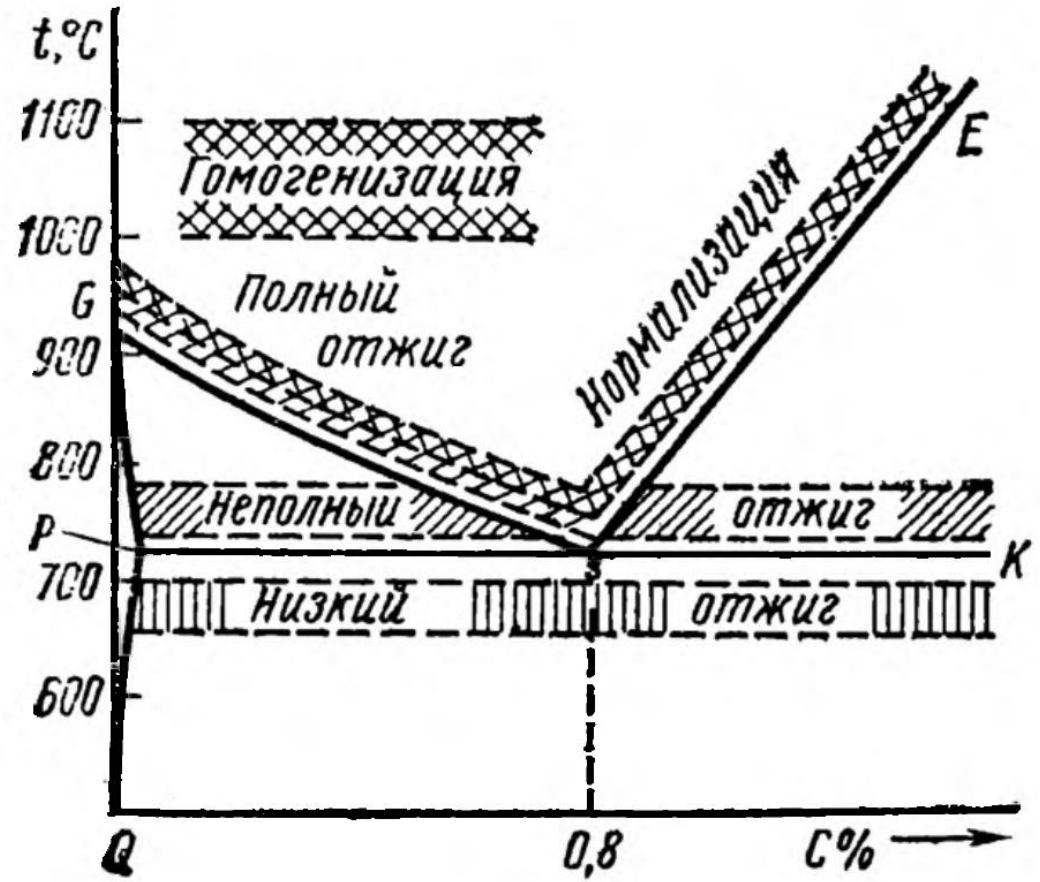
ОТЖИГ

Отжиг — нагрев стали выше температур фазовых превращений с последующим медленным охлаждением.

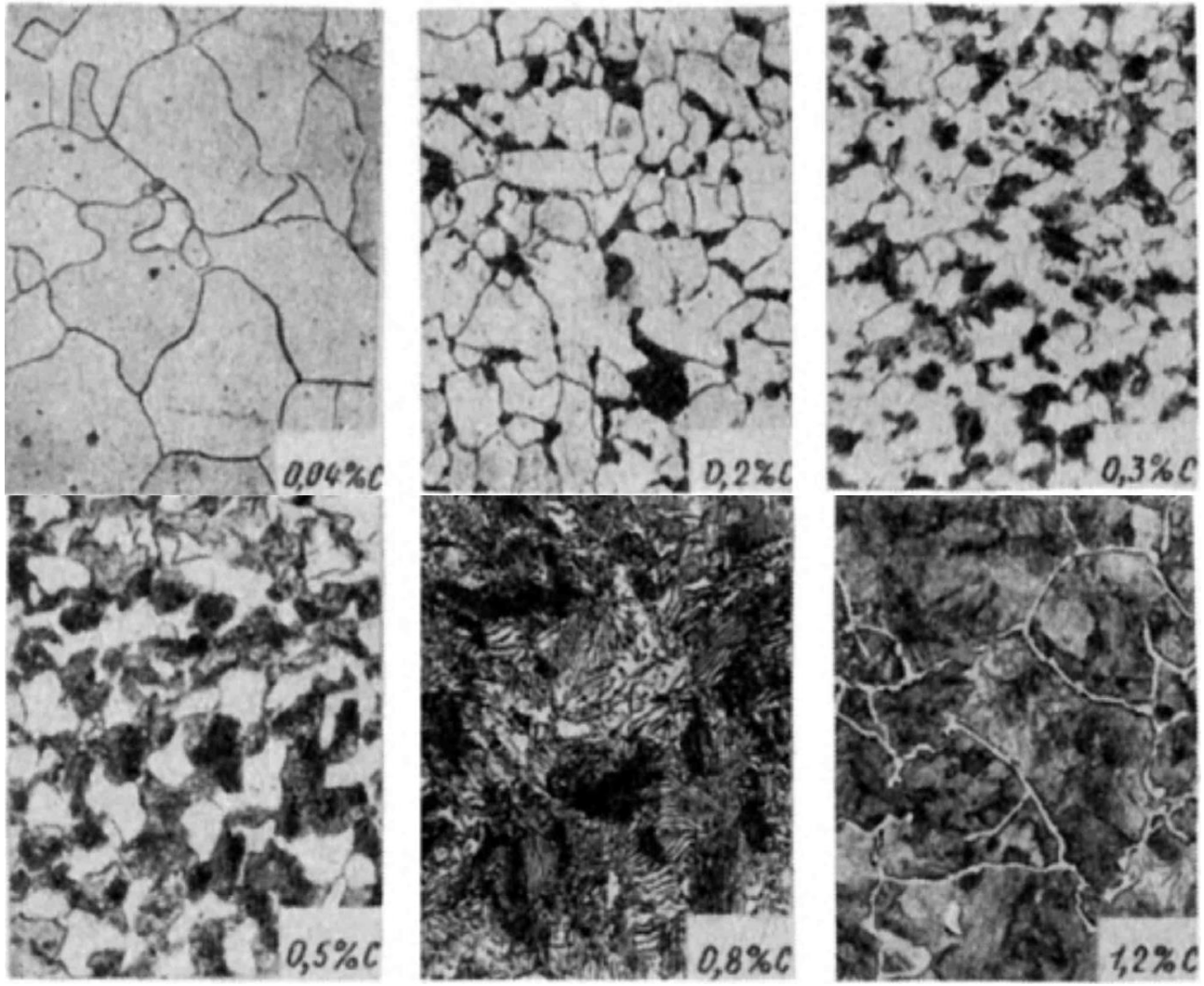
Полный отжиг — нагрев стали выше Ac_3 на 30…50 °С, выдержка при этой температуре и медленное охлаждение. При этом происходит полная перекристаллизация.

Неполный отжиг — нагрев стали выше Ac_1 (но ниже Ac_3) и медленное охлаждение. При этом происходит частичная перекристаллизация перлитной составляющей.

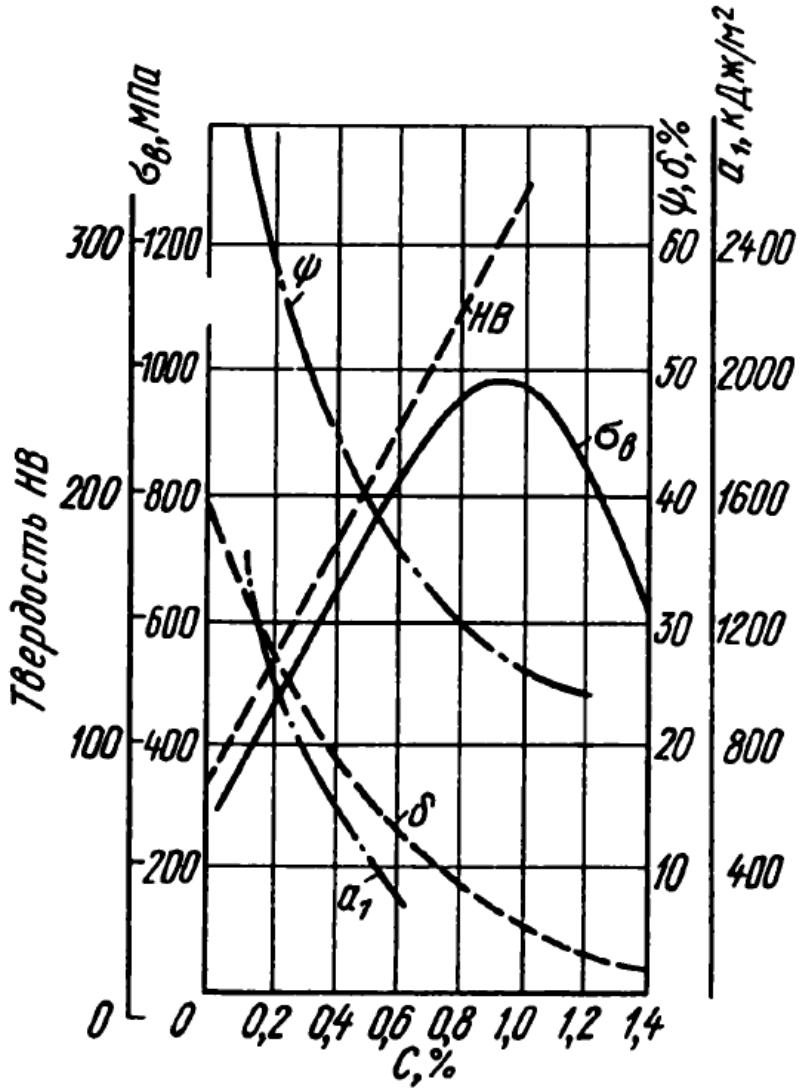
При медленном охлаждении стали приближаются к фазовому и структурному равновесию. После отжига сталь имеет низкую твердость и прочность.



Температурные интервалы различных видов отжига



Микроструктура сталей
с различным содержанием углерода

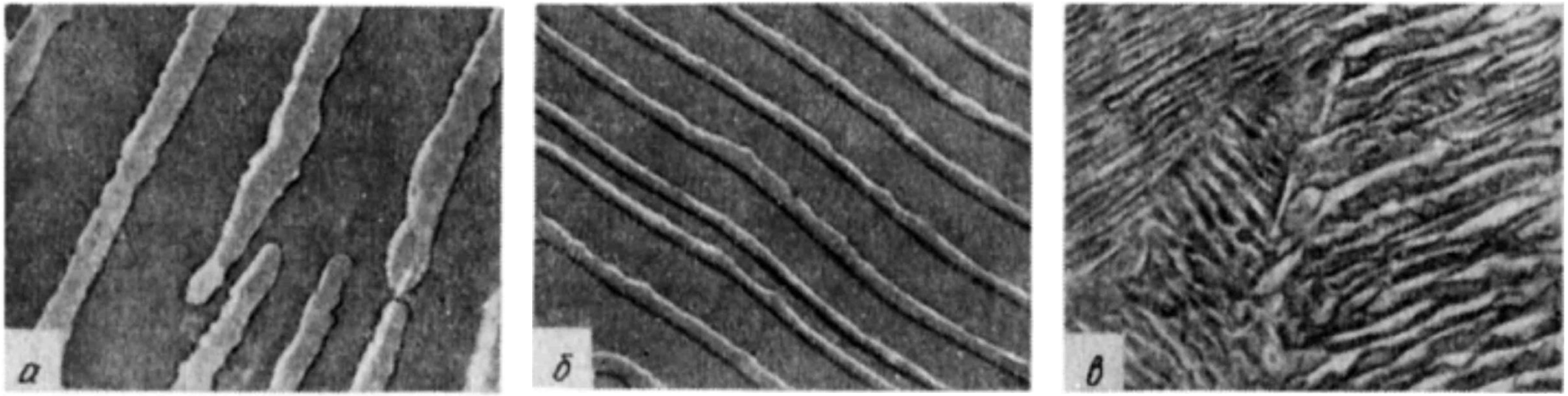


Зависимость механических свойств
от содержания углерода

НОРМАЛИЗАЦИЯ

Нормализация — нагрев доэвтектоидной стали до температуры выше Ac_3, а заэвтектоидной — выше Ac_m на 50…60 °С с последующим охлаждением на воздухе.

В результате охлаждения на воздухе распад аустенита на ферритно-цементитную смесь происходит при более низких температурах, а следовательно, повышается дисперсность смеси.



Структура эвтектоидной стали в зависимости от температуры распада ($t_{распп}$) аустенита:
а — перлит, $t_{распп}$ = 700 °С, ×7500; *б* — сорбит, $t_{распп}$ = 650 °С, ×7500;
в — троостит, $t_{распп}$ = 600 °С, ×15 000

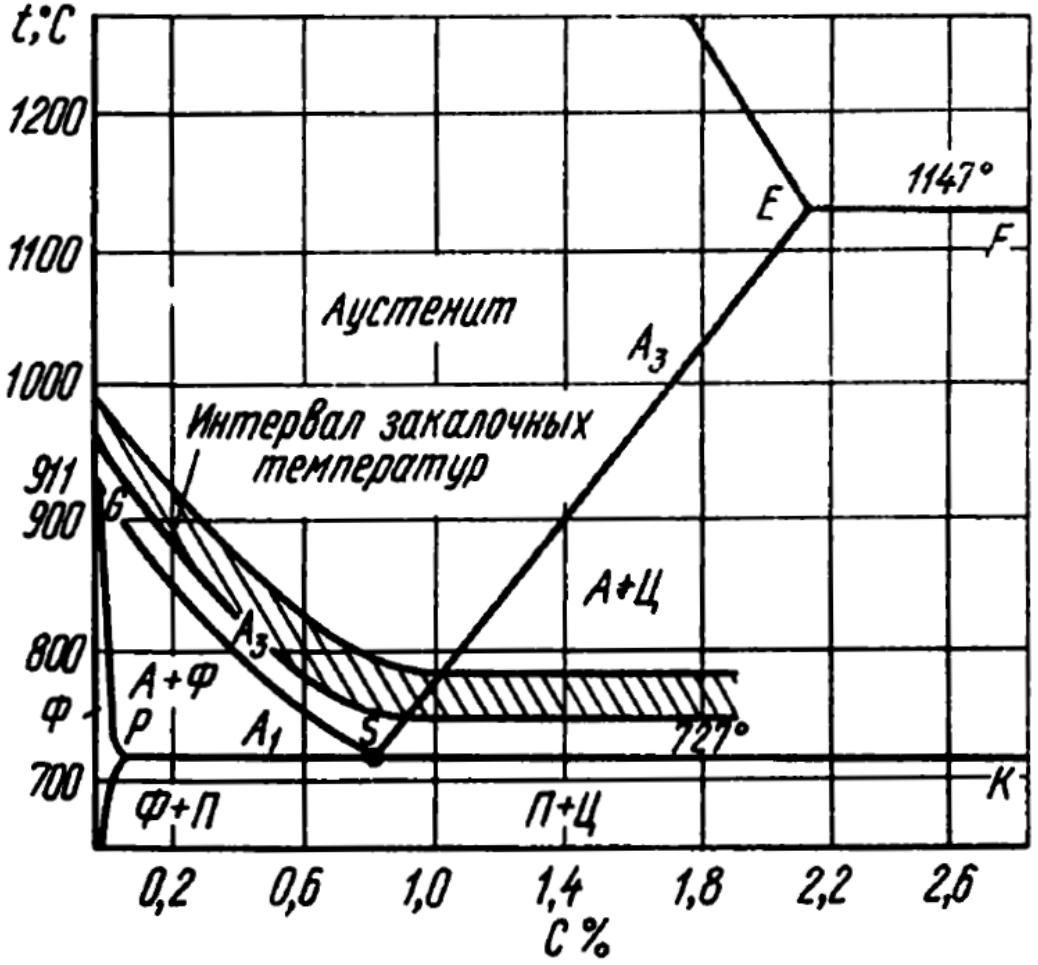
ЗАКАЛКА

Закалка — нагрев стали до температуры выше фазовых превращений, выдержка при этой температуре и быстрое охлаждение со скоростью больше критической. В результате закалки из аустенита образуется неустойчивая, метастабильная структура мартенсит.

Доэвтектоидные стали для закалки следует нагревать до температуры на 30…50 °С выше Ac_3. Такая закалка называется полной.

Если доэвтектоидную сталь нагреть выше Ac_1, но ниже Ac_3, то в ее структуре после закалки наряду с мартенситом будут участки феррита. Присутствие феррита снижает твердость стали после закалки. Такая закалка называется неполной.

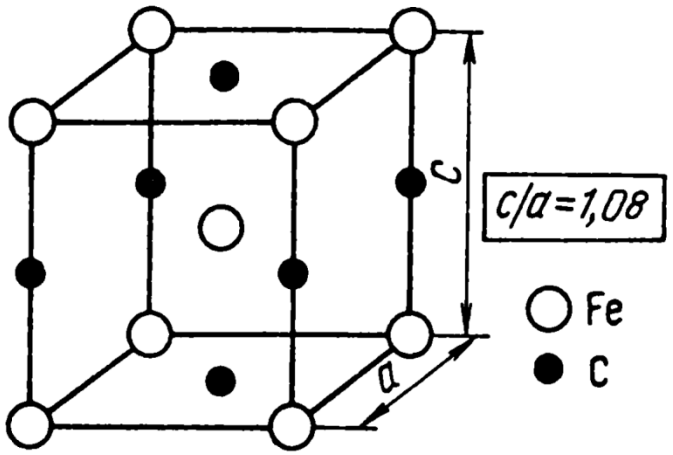
Заэвтектоидные стали нагревают для закалки на 50…70 °С выше Ac_1.



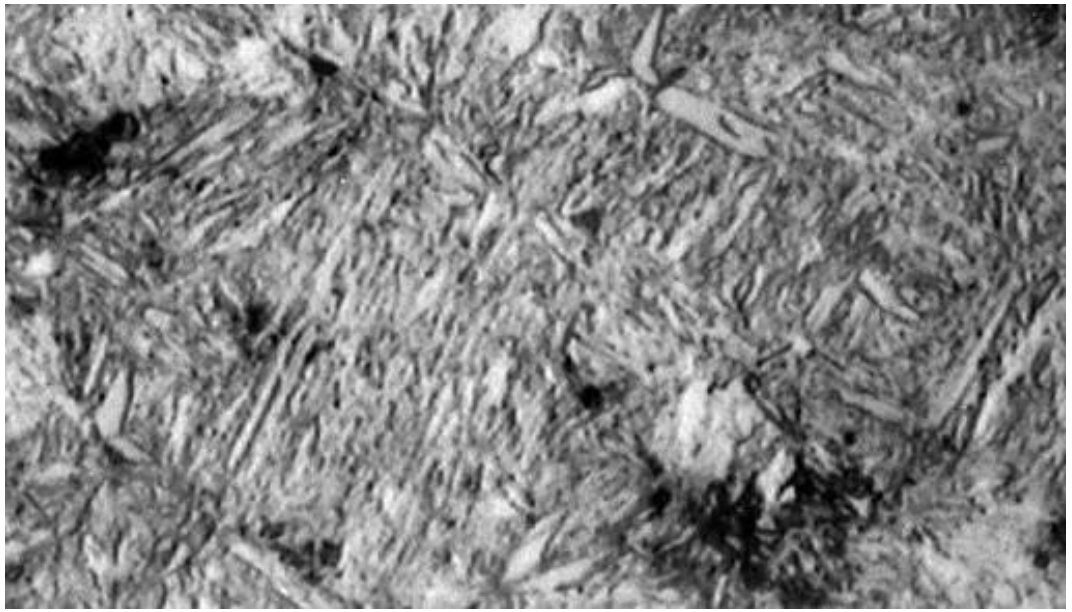
Закалочные температуры углеродистых сталей

МАРТЕНСИТ

Мартенсит — пересыщенный твердый раствор углерода в α-железе.

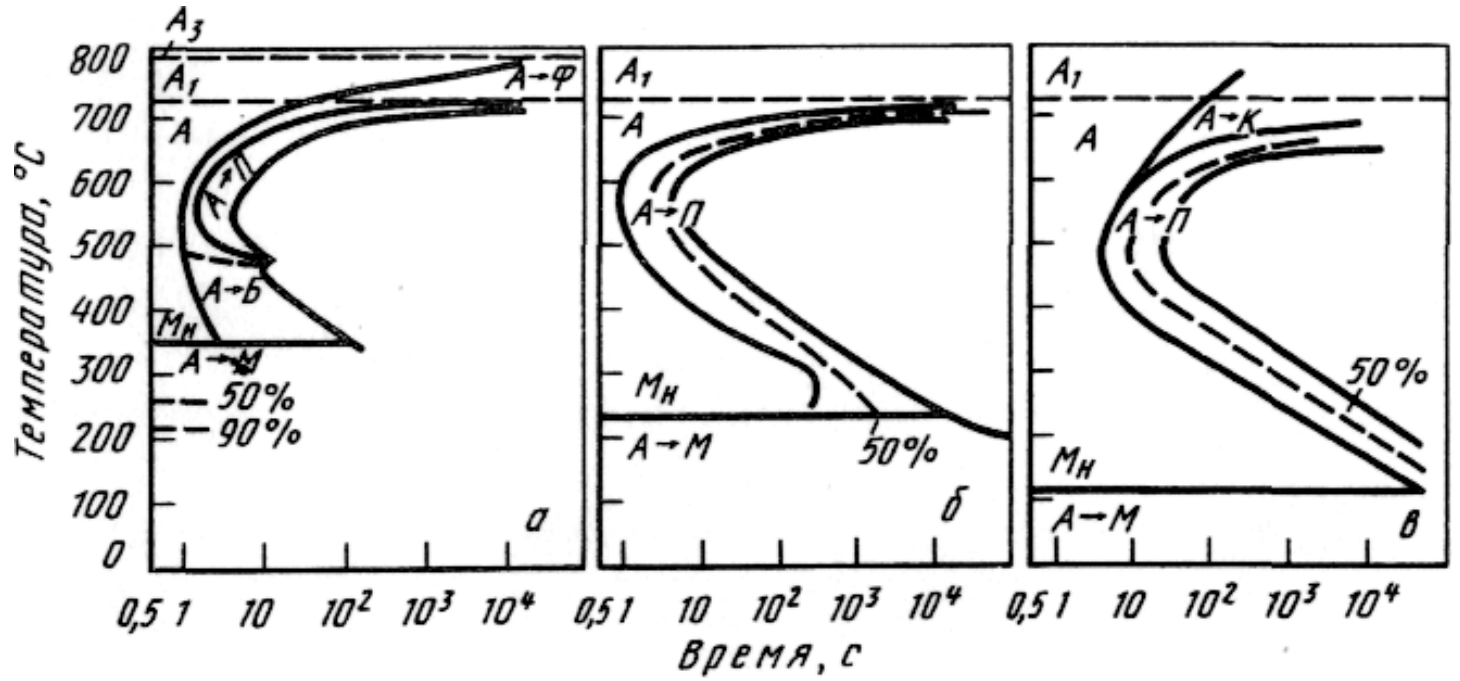


Объёмноцентрированная тетрагональная (о.ц.т.) решетка мартенсита. В реальности, даже при максимальном содержании углерода в мартенсите (около 2 %), один атом углерода приходится на четыре элементарные ячейки мартенсита.

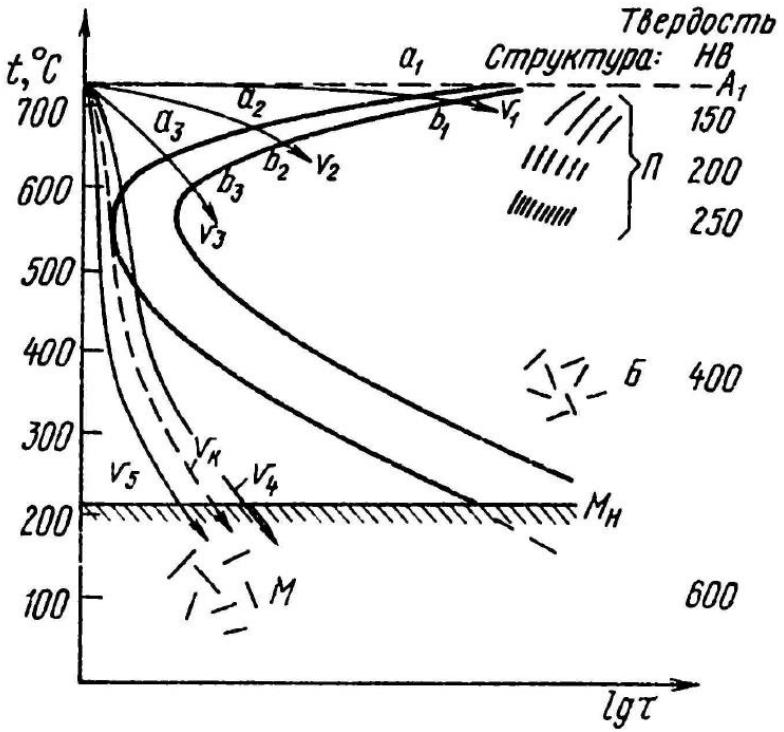


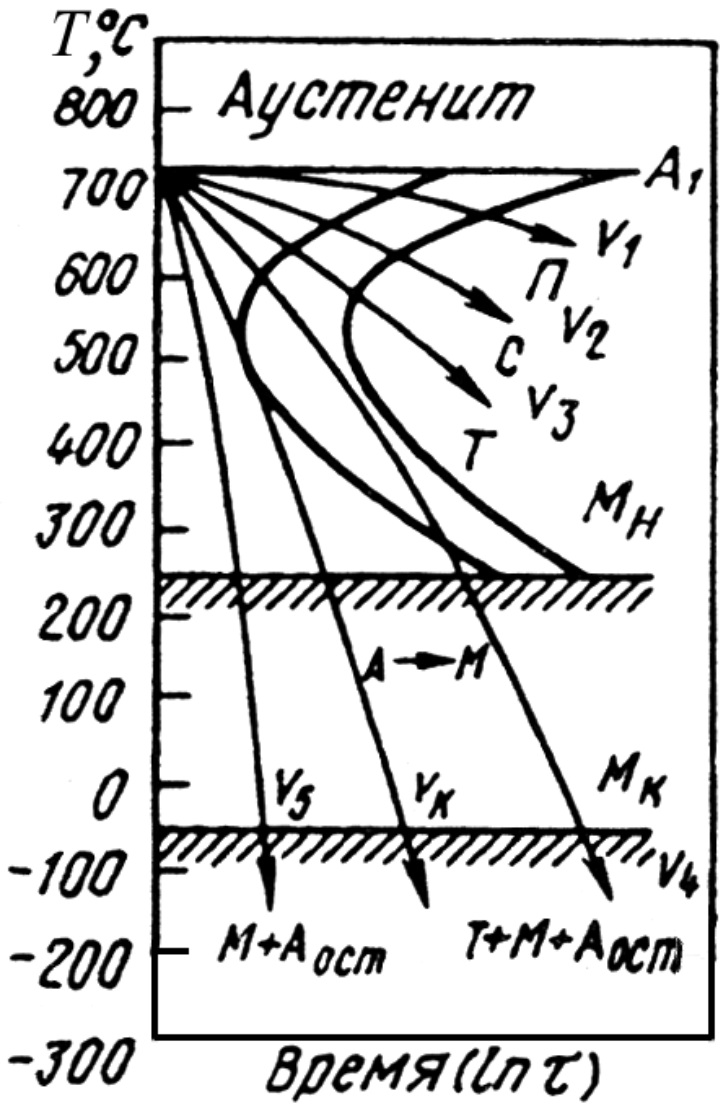
Микроструктура мартенсита

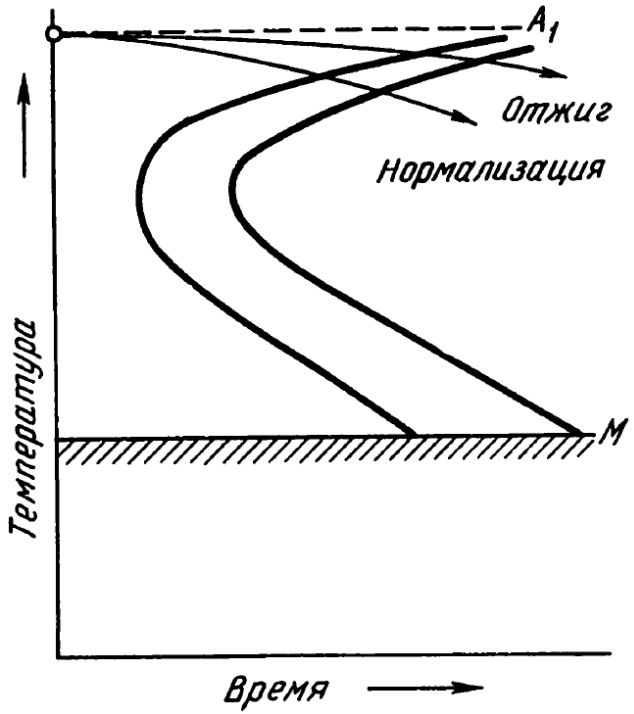
ДИАГРАММЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА АУСТЕНИТА



Диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита:
а — доэвтектоидная сталь 45; *б* — эвтектоидная сталь У8;
в — заэвтектоидная сталь У12

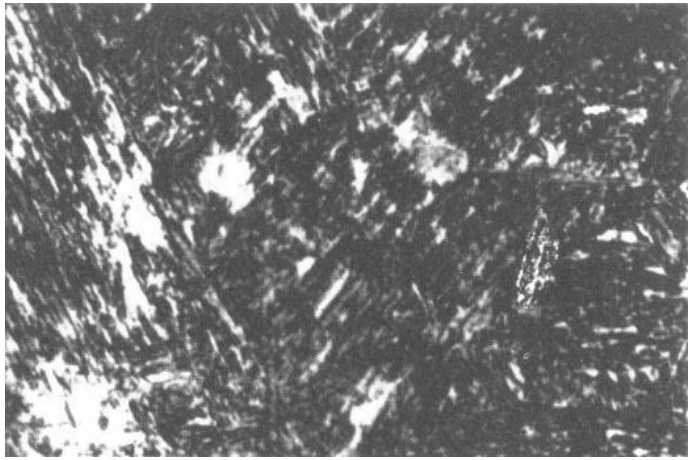




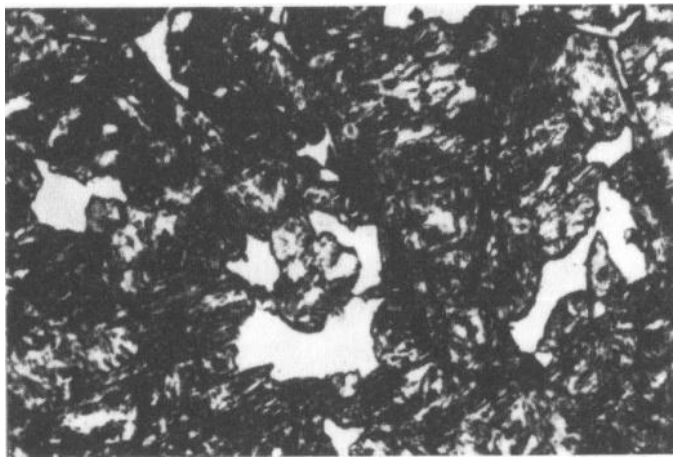


Кривые охлаждения, наложенные на диаграмму изотермического распада аустенита (0,8 % С)

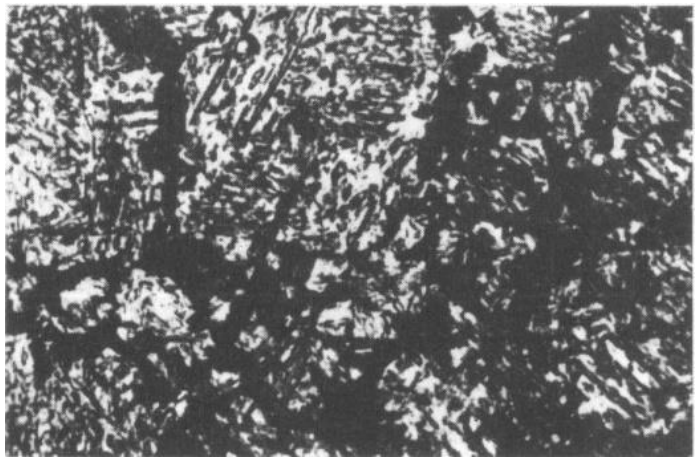
ОСНОВНЫЕ ВИДЫ БРАКА ПРИ ЗАКАЛКЕ



Перегрев. Крупноигольчатый мартенсит после закалки с завышением температуры нагрева (на 100…150°С выше температуры Ac_3). Твёрдость 650…670 НВ для стали У8 вместо 630…650 НВ. Резкое снижение ударной вязкости и пластичности.



Недогрев. Мартенсит и феррит после закалки с занижением температуры нагрева (выше температуры Ac_1, но ниже Ac_3 — неполная закалка). Твердость сильно понижена и неравномерна: 250…500 НВ в зависимости от количества феррита.



Недостаточная скорость охлаждения. Мартенсит и троостит после закалки со скоростью охлаждения ниже критической. Твердость понижена: 400...550 НВ для стали У8 вместо 630...650 НВ.

ОТПУСК

Отпуск — нагрев стали до температуры ниже Ac_1, выдержка при заданной температуре и последующее охлаждение (обычно на воздухе).

Отпуск является конечной операцией термической обработки, проводится после закалки. В результате отпуска понижается твердость закаленной стали, но значительно увеличиваются пластичность и ударная вязкость.

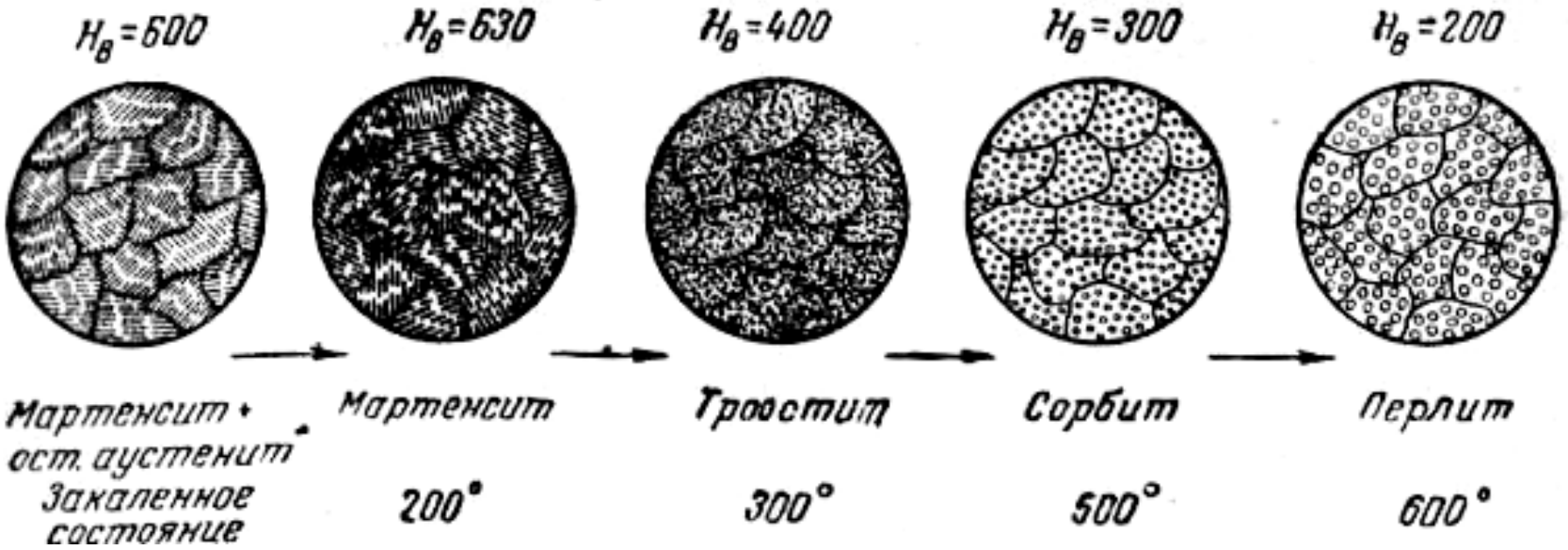
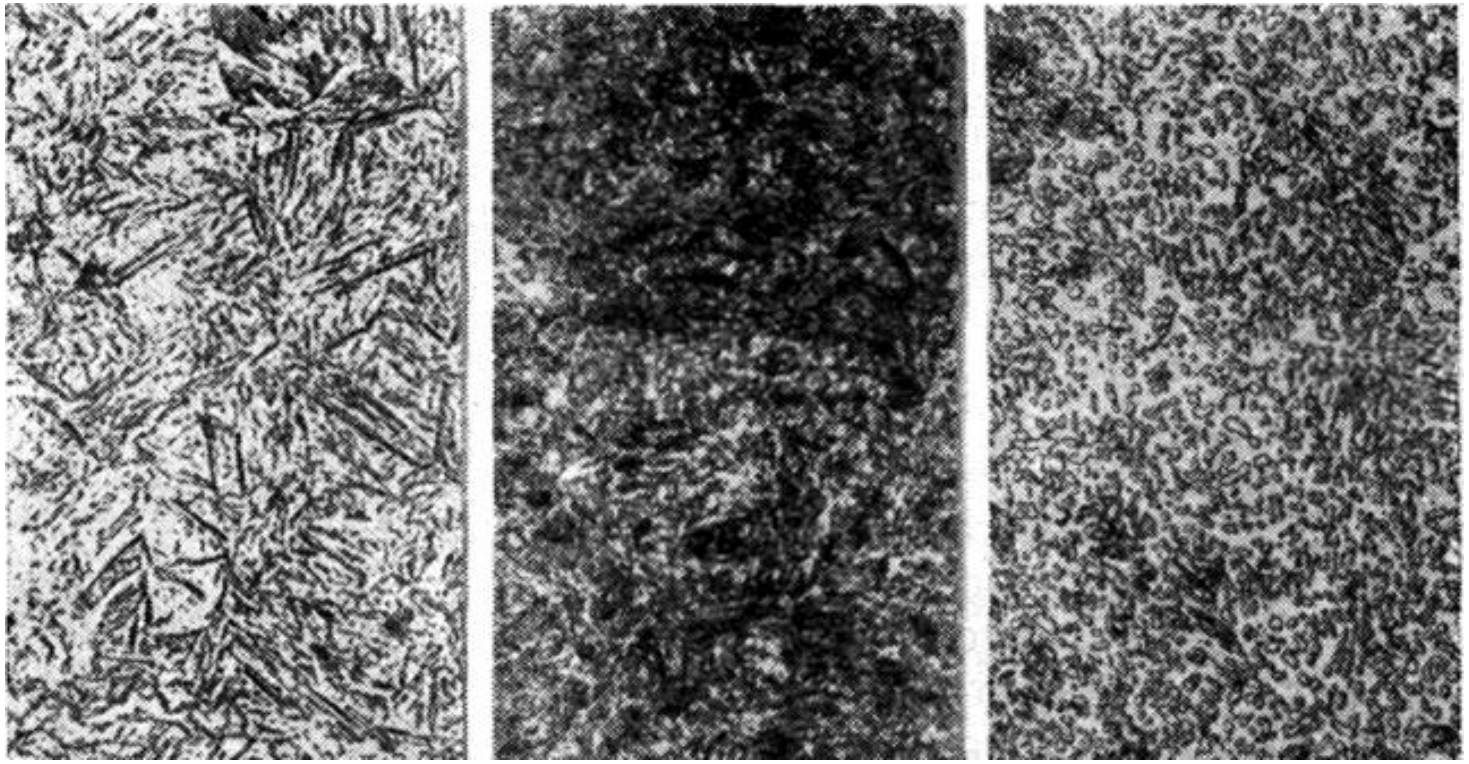
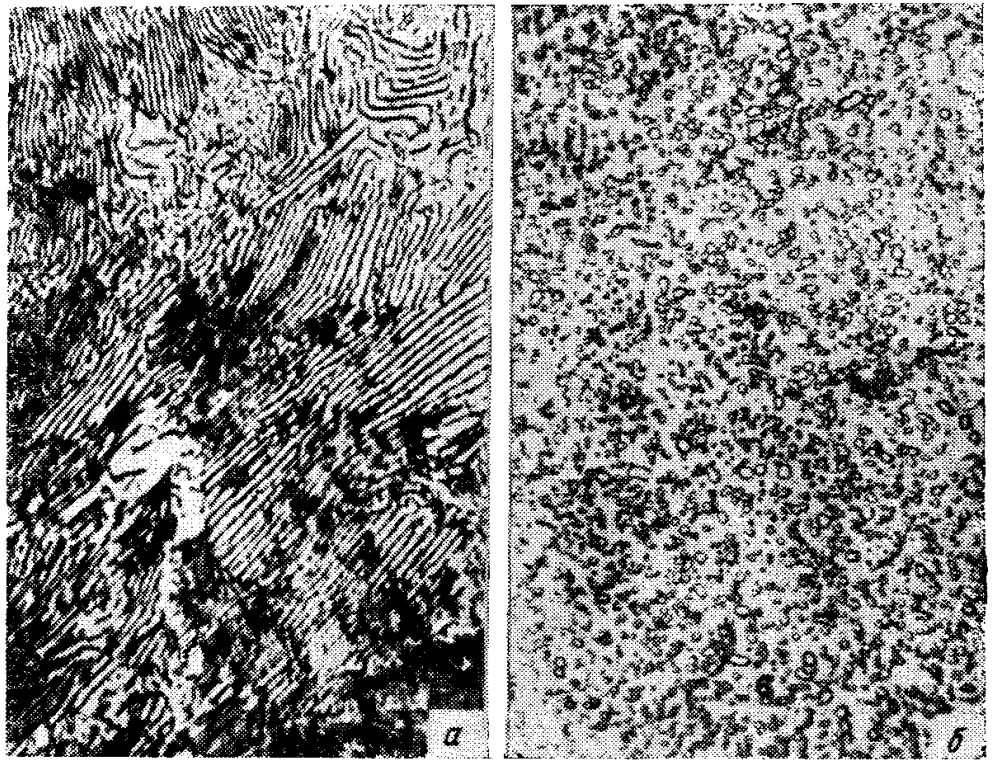


Схема структурных превращений мартенсита в стали У8 при нагреве при отпуске



Микроструктура отпущенной стали (0,6 % С), ×500:
а — мартенсит отпуска; *б* — троостит отпуска;
в — сорбит отпуска



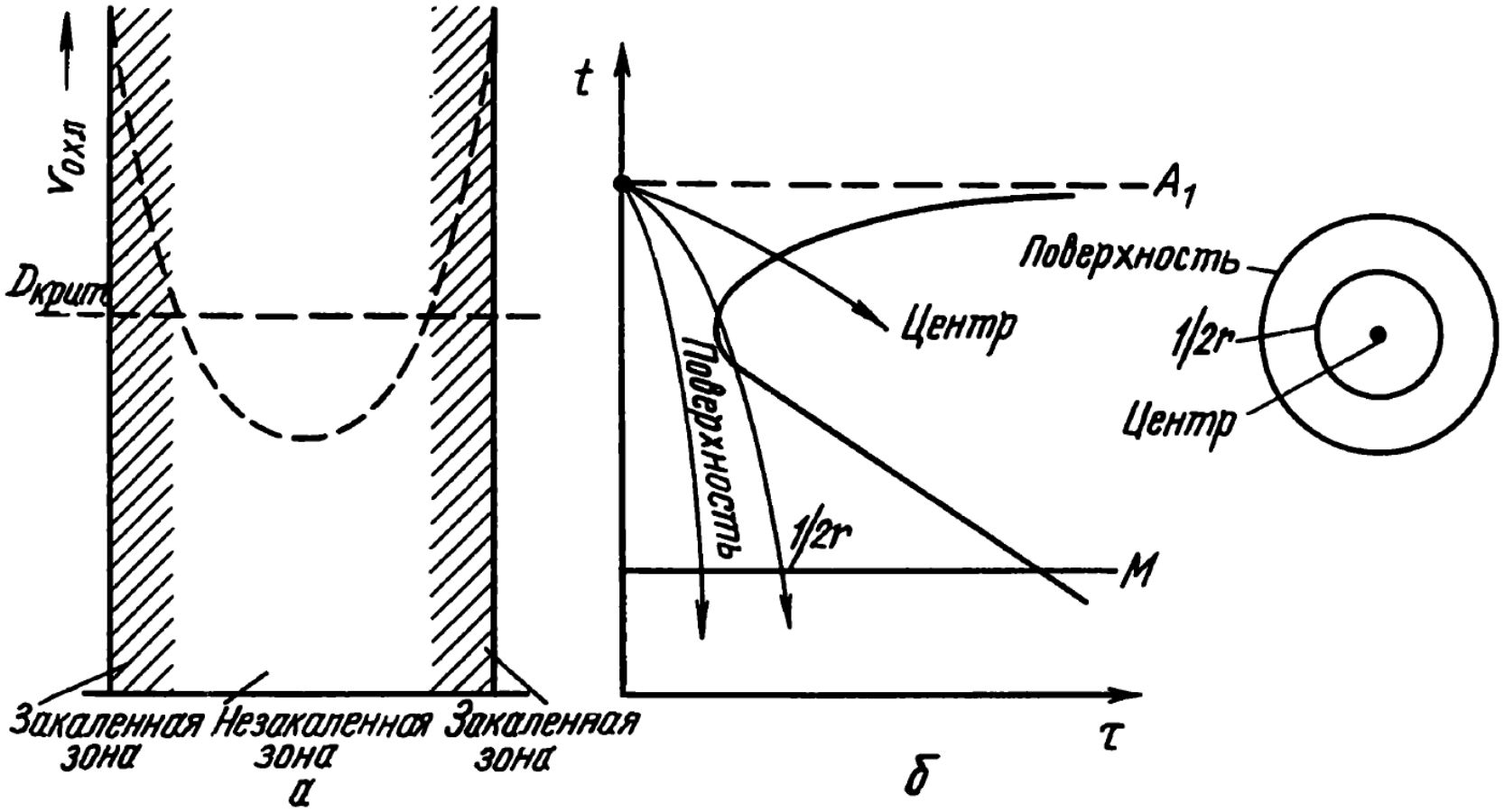
Эвтектоидная сталь (0,8 % С), ×600:
а — пластинчатый перлит;
б — зернистый перлит

ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

Прокаливаемость — глубина проникновения закаленной зоны.

Несквозная прокаливаемость объясняется тем, что при закалке деталь охлаждается быстрее на поверхности и медленнее в сердцевине.

Критический диаметр ($D_{кр}$) — это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в данном охладителе.



Несквозная прокаливаемость (*а*) и различные скорости охлаждения по сечению цилиндрической детали (*б*)

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КИНЕТИКУ РАСПАДА АУСТЕНИТА И ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

Все легирующие элементы, кроме кобальта, сдвигают диаграмму изотермического распада аустенита вправо, т.е. они увеличивают время распада аустенита.

Прокаливаемость стали находится в прямой зависимости от устойчивости переохлажденного аустенита. Чем больше сдвинута диаграмма изотермического распада аустенита вправо, тем больше прокаливаемость стали. Следовательно, все легирующие элементы, за исключением кобальта, увеличивают прокаливаемость.

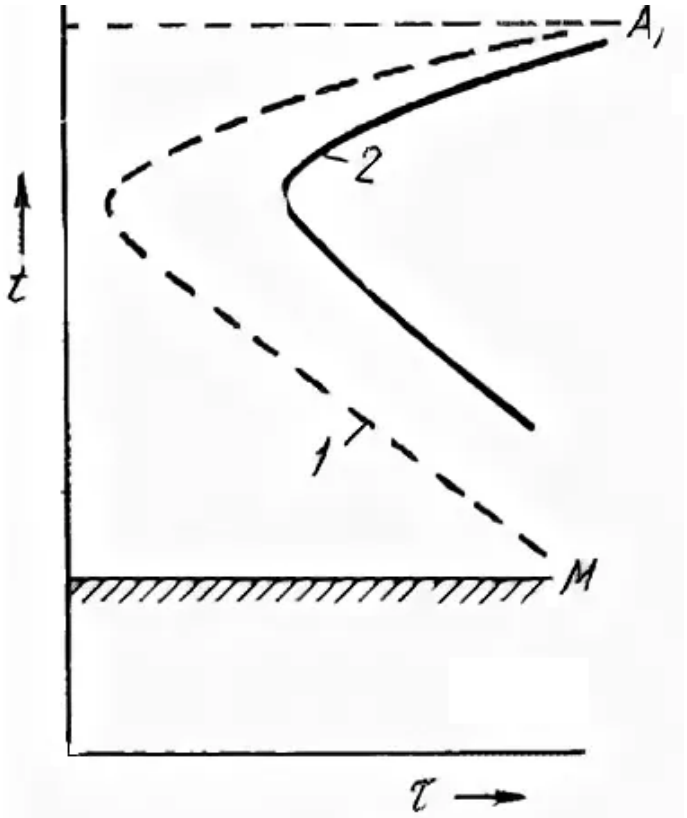


Диаграмма изотермического распада аустенита:
1 — углеродистая сталь;
2 — легированная сталь

КЛАССИФИКАЦИЯ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Нержавеющие стали в зависимости от структуры подразделяют на классы:

- Мартенситный — стали с основной структурой мартенсита;
- Мартенсито-ферритный — стали, содержащие в структуре кроме мартенсита не менее 10 % феррита;
- Ферритный — стали, имеющие структуру феррита (без α↔γ превращений);
- Аустенито-мартенситный — стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах;
- Аустенито-ферритный — стали, имеющие структуру аустенита и феррита (феррита более 10 %);
- Аустенитный — стали, имеющие структуру устойчивого аустенита.

Подразделение сталей на классы по структурным признакам является условным, так как предполагает только одну термическую обработку, а именно — охлаждение на воздухе после высокотемпературного нагрева (свыше 900 °С) образцов небольших размеров.

ГОСТ 5632-2014 Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные

СТП 26.260.484-2004 Термическая обработка коррозионно-стойких сталей и сплавов на железоникелевой основе в химическом машиностроении

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

Основной режим — закалка (аустенизация):

— нагрев до 1050…1100 °С;
— выдержка 20…30 мин на 25 мм сечения (до прогрева по всему объёму);
— охлаждение быстрое, на воздухе или в воде (медленное охлаждение недопустимо, т.к. приводит к выпадению карбидов).

Результат: однородный аустенит, максимальная коррозионная стойкость, снятие напряжений.

Цель: Растворение карбидов хрома для предотвращения межкристаллитной коррозии (МКК) и снятие напряжений.

Стабилизирующий отжиг для стабилизированных сталей с титаном или ниобием:

— нагрев до 850…900 °С;
— выдержка 2…5 часов;
— охлаждение на воздухе.

Цель: Перевод углерода в стабильные карбиды титана или ниобия, защита от МКК при длительной работе при 450…800 °С.

Спасибо за внимание!

© Майдан Д.А., 2025
Электронная почта: mtm@samgtu.ru