

„Материалознание и технология на материалите“

Опорни точки от записки по лекции на проф. д.т.н. Й. Генов

Съставили: В. Камбуров, Р. Димитрова, Р. Рангелов, А. Димитрова

При подготовката на този материал са използвани, следните учебници и учебни помагала:

1. Балевски А., „Металознание“, София, ДИ „Техника“, 1988;
2. Калев Л., „Технология на машиностроителните материали“, София, ДИ „Техника“, 1974;
3. Бучков Д., М. Кънев, „Материалознание“, София, Изд. „Техника“, 2007;
4. Желев А., „Материалознание – техника и технологии“, том I „Получаване на машиностроителните материали“, София, 1999;
5. Желев А., „Материалознание – техника и технологии“, том II „Технологични процеси и обработваемост“, София, 1999;
6. Кемилев Н., Н. Тончев, „Материалознание и технология на материалите“, Изд. „Виртуален център“, София, 2006;
7. Цанков Ц., Г. Попов, Г. Пецов, „Обработване на металите чрез пластична деформация“, София, Изд. Техника, 1995;
8. Анчев В., В. Тошков, Л. Василева, Ж. Захаридова, Ж. Калейчева, Й. Николов, Р. Петров, В. Симеонов, „Ръководство за лабораторни упражнения по материалознание“, София, ИК „КИНГ“, 2001;
9. Сторожев М., Е Попов, „Теория обработки металлов давлением“, М., „Машиностроение“, 1977;
10. Kalpakjian S., S. Schmid, „Manufacturing processes for engineering materials“, Prentice-Hall, 2001.

Термична обработка

1. **Отгряване без фазово прекристализиране** – извършва се в температурни интервали, в които няма фазово превръщане на сплавта в твърдо състояние:
- хомогенизиращо (дифузионно) – за премахване на ликвация, фазова неравновесност, заварени съединения, неравномерно охладени отливки и леярски дефекти;
-- рекристализационно - за премахване на деформационно уякчаване (наклеп) след студена пластична деформация;
-- комбинирано - за премахване на неравновесност от кристализационни процеси, големи пластични деформации, вътрешни обемни изменения.

2. **Отгряване с фазова прекристализиране** – само за материали, които имат фазови превръщания в твърдо състояние, състоящо се от:
- нагряване до извършване на неравновесни фазови превръщания;
- контролирано охлаждане за получаване на равновесна структура - изотермично отгряване.

3. **Закаляване** – фиксиране при стайна температура на характерно за високите температури фазово състояние на сплавите.

Закаляването може да бъде повърхностно или обемно и се състои от:

- нагряване до извършване на неравновесни фазови превръщания;
- скоростно (надкритично) охлаждане, целящо запазване на високотемпературната фаза до получаване на преходни / неравновесни (мартензитни) фази.

4. **Стареене и отвяждане** – нагряване на закалени сплави под температурата на фазови превръщания за получаване на по-устойчиво от закаленото, но по-неустойчиво от отгрятото състояние.,

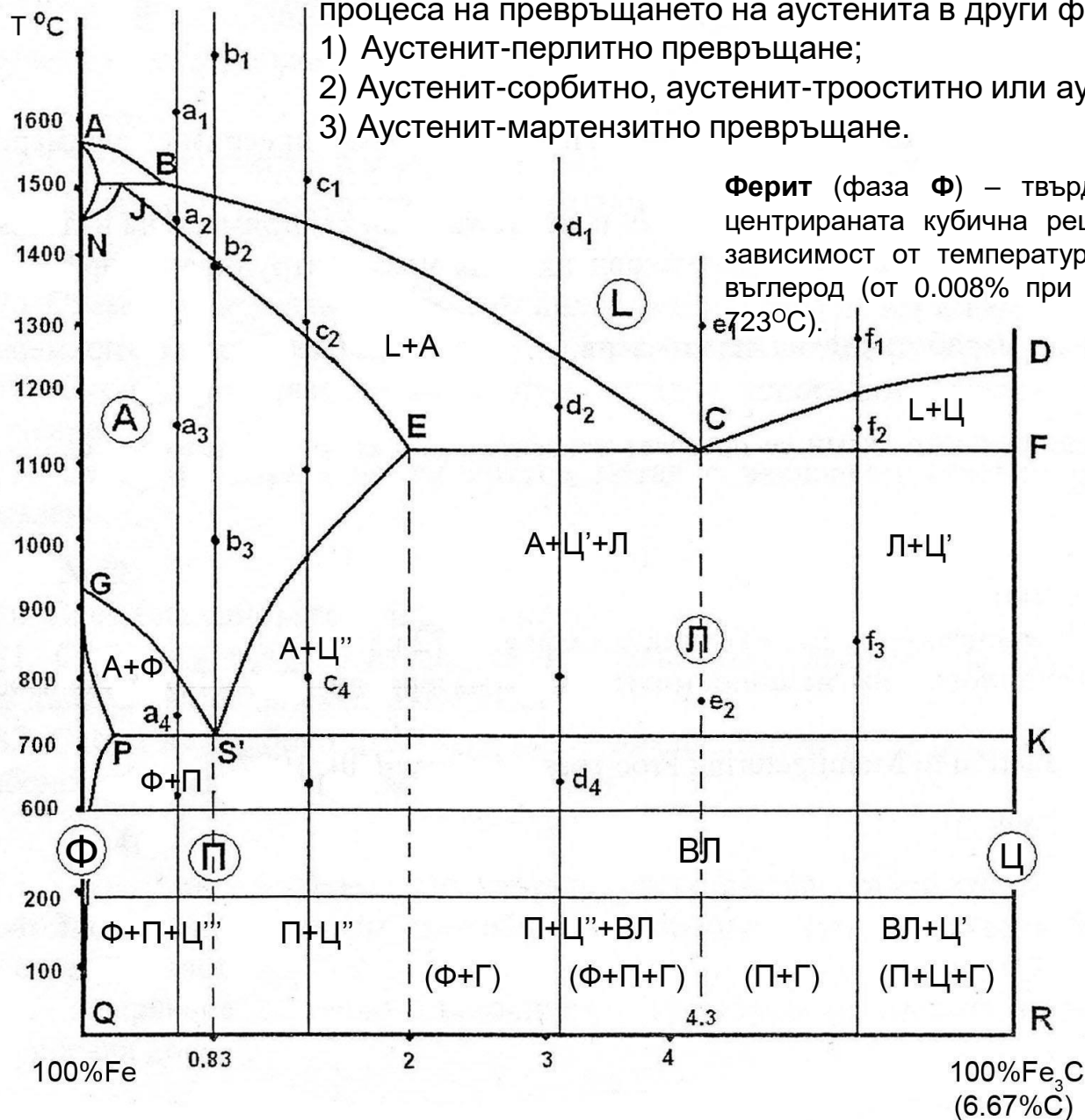
- намаляване на крехкостта, при частично запазване на твърдостта – отвяждане при закалени стомани с мартензитна структура;

- увеличаване на якостта и намаляване на пластичността – стареене при цветни метали (сплави на алуминий, мед, магнезий и пр.).

Желязо-въглеродна диаграма

Процесът на термично обработване (ТО) на стоманата се свежда до регулиране процеса на превръщането на аустенита в други фази:

- 1) Аустенит-перлитно превръщане;
- 2) Аустенит-сорбитно, аустенит-трооститно или аустенит-бейнитно превръщане;
- 3) Аустенит-мартензитно превръщане.



Структура на стомани и чугуни при определените концентрации

Сплав с концентрация b - евтектоидна (перлитна) стомана т. S (0.83% C): – т. b_1 - хомогенна стопилка (L); – т. b_2 - аустенитни кристали (γ - тв.р-р) и стопилка (L+A); – т. b_3 – еднофазно състояние аустенит (A) с концентрация b ; – т. b_4 – ферито-цементитна смес (перлит П) (в т. S евтектоидна реакция при 727°C от аустенитните кристали с концентрация S (0,83% C) се получава П).



Сплав с концентрация $a\%$ C – подевтектоидна (нисковъглеродна) стомана – след т. В от перитектикума и преди т. Е (над 0.04% C и под 0.8% C): – т. a_1 - хомогенна стопилка (L); – т. a_2 - двуфазно състояние аустенитни кристали (γ - тв.р-р) и стопилка (L+A) (концентрацията на γ кристалите се изменя по линията (JE), а на стопилката по (BC)); – т. a_3 – еднофазно състояние аустенит (A) с концентрация a ; – т. a_4 – двуфазно състояние ферит (α - тв.р-р) и аустенит (Φ +A) (концентрацията на ферита се изменя по линията (JP), а на аустенита - по (JS) и приближава евтектоидната); - т. a_5 – две фази ферит и цементит и структурна съставна перлит (ламелки ферит и цементит) (Φ +П+Ц”).

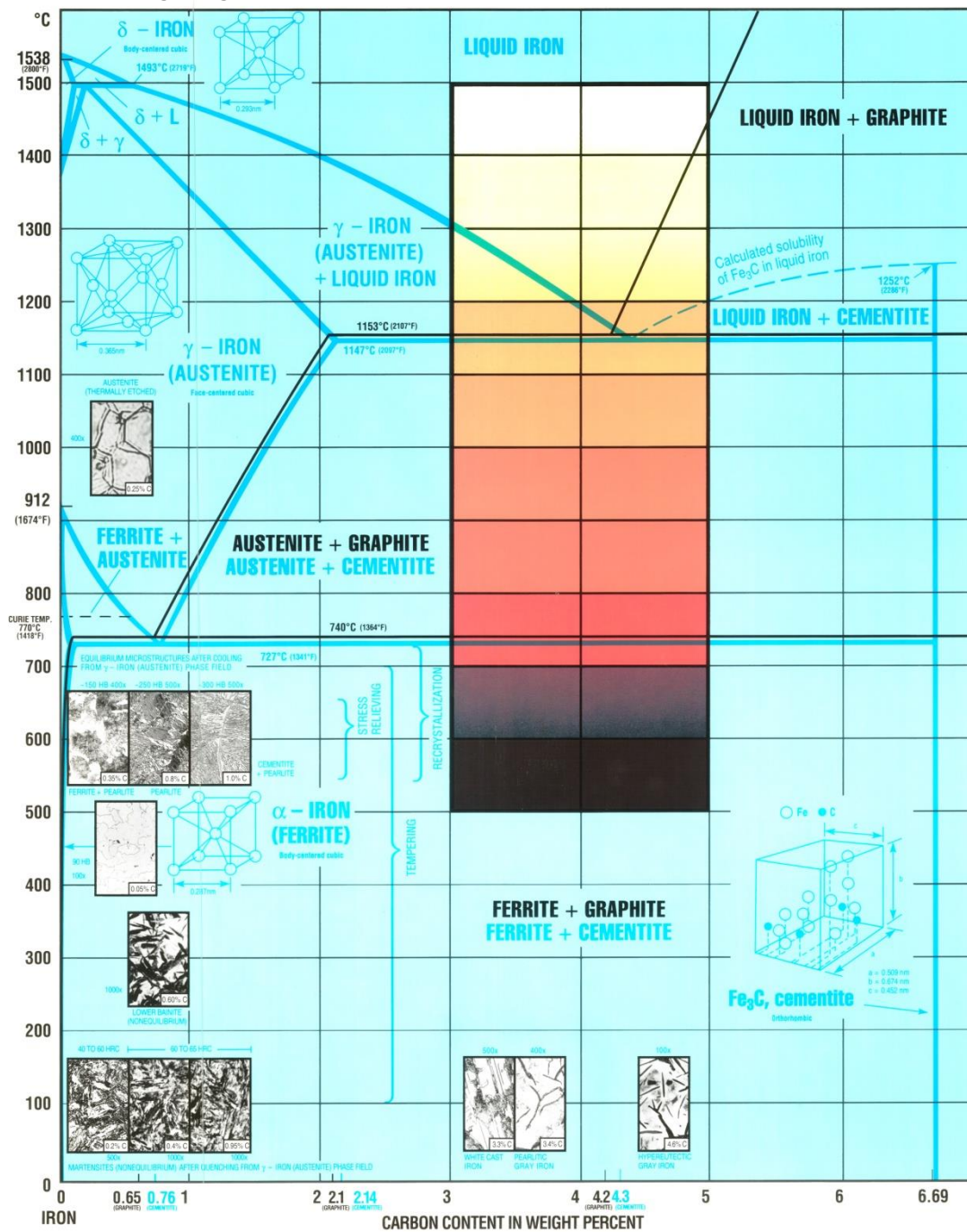
Сплав с концентрация c - надевтектоидна стомана: – т. c_1 - хомогенна стопилка (L); – т. c_2 - аустенитни кристали (γ - тв.р-р) и стопилка (L+A); – т. c_3 – еднофазно състояние аустенит (A) с концентрация c ; – т. c_4 – две фази цементит и аустенит (A+Ц) (концентрацията на въглерод в аустенита е по линията SE и се приближава до евтектоидната); – т. c_5 – цементит и перлит (Ц”+П) (ферито-цементитни ламели) отделя се и третичен цементит.

Сплав с концентрация e - евтектичен чугун т. C (4.3% C): – т. e_1 - хомогенна стопилка (L); – т. e_2 - при евтектичната концентрация се получават кристална смес от аустенит и цементит – т.нар. ледебурит (Л); $L_{4.3\%C} \rightarrow A_{2.06\%C} + \Psi_{6.67\%C}$ - т. e_4 – видоизменен ледебурит, перлит и вторичен цементит (аустенитът се разпада на ферит и перлит) .

Сплав с концентрация d - подевтектичен чугун: – т. d_1 - хомогенна стопилка (L); - т. d_2 - двуфазно състояние - аустенитни кристали и стопилка (L+A) (концентрацията на γ кристалите се изменя по кривата BC, като се приближава до евтектичната, съответстваща на т. C); - т. d_3 - две фази аустенит, ледебурит (евтектичната реакция) и вторичен цементит (отделян от аустенита); - т. d_4 – видоизменен ледебурит, перлит и вторичен цементит (аустенитът се разпада на ферит и перлит) .

Сплав с концентрация f - надевтектичен чугун: – т. d_1 - хомогенна стопилка (L); - т. f_2 - двуфазно състояние – цементит и стопилка (L+Ц); - т. f_3 предварително отделеният първичен цементит и ледебурит, получен при евтектичната реакция; - т. f_4 – видоизменен ледебурит и първичен цементит

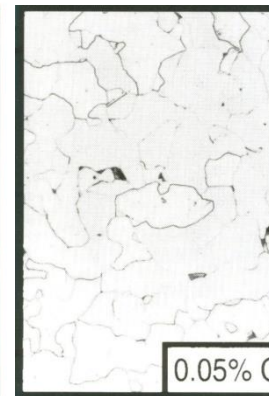
Структурни превръщания в стоманите



Ферит

Аустенит

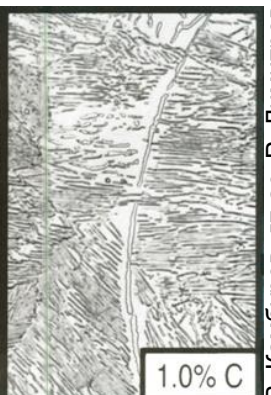
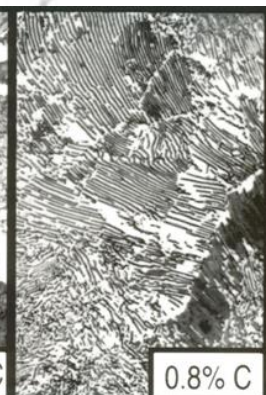
Бейнит



Ферит + Перлит

Перлит

Цементит + Перлит



Мартензит



Материалът е подготвен от: доц. В. Камбуров, гл.ас. Р. Димитрова, доц.

Структурни превръщания в стоманите

Дифузия в металите и сплавите При металите под дифузия се разбира преместването (придвижването) на йони в кристалните решетки на разстояния по-големи от междоатомните. Количеството вещество М, което дифундира (т.е. което се премества от едно място в друго през единица повърхност) е право пропорционално на разликата в концентрацията между двете зони - Δc ; и времето - Δt ; обратно пропорционално на разстоянието между двете зони - Δx

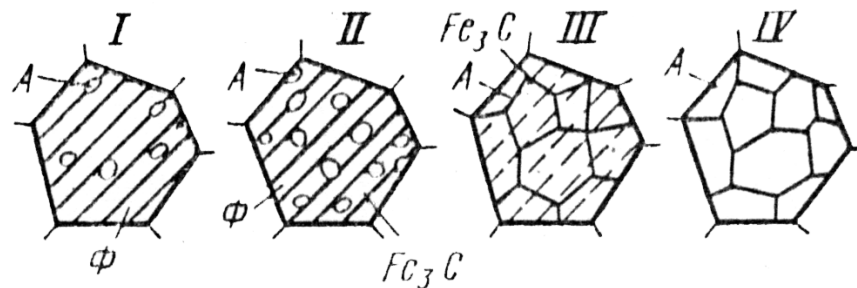
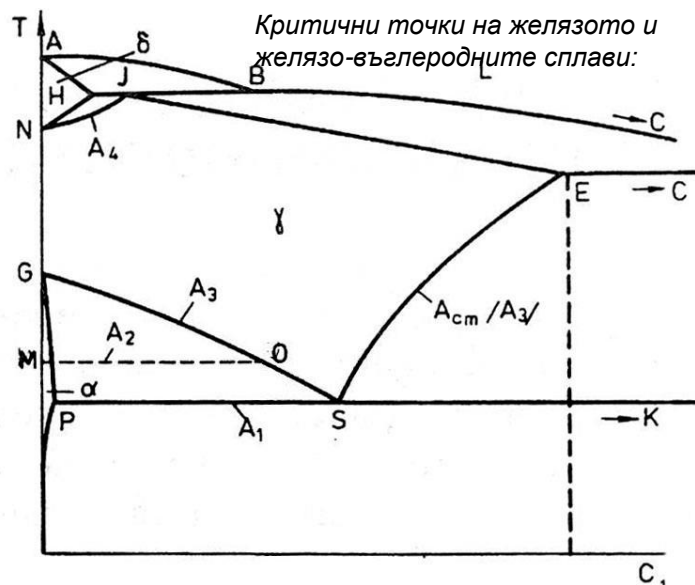
$$M = -D \cdot (\Delta c / \Delta x) \cdot \Delta t, \quad \text{където } D \text{ е коефициент на дифузия } D = D_0 \cdot e^{-Q/RT}$$

Дифузията може да се осъществи по няколко механизма:

- Субституционен (чрез замесване) – когато две съседни разнородни йона (атома) си сменят местата;
- Механизъм на внедряване – един йон (атом) напуска мястото си и мигрира през междувъзлията;
- Ваканционен механизъм – преместването става с най-малка енергия – йоните се преместват в точка, където има ваканция.

Перлит - Аустенитно превръщане

При нагряване на евтектоидни стомани (0.83% C) малко над т. A_1 (723°C) – перлитът се превръща в аустенит – П (Φ (0.02% C) + Fe_3C (6.67% C)) \Rightarrow А (0.83% C)



Зародишите на аустенита се образуват на границата между феритните и цементитните ламелки – границата между Φ и $Ц$. Процесът на полиморфното превръщане е бездифузионен, докато разтварянето на цементита в новия аустенит е дифузионен процес, т.е. за пълното осъществяване на измененията в структурата на стоманите при нагряване, освен температурата е необходимо време .

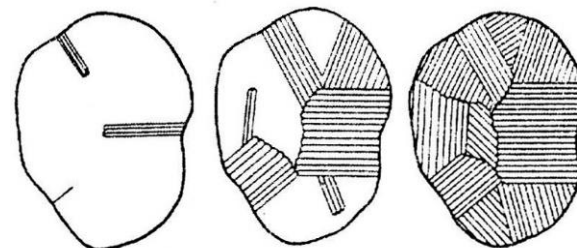


Схема на образуване и нарастване на перлитна структура

Критични точки на желязо-въглеродните сплави:

т. A_1 – температура на трифазовото равновесие (ферит+ цементит + аустенит);

т. A_2 – точка на Кюри 768°C;

т. A_3 – при много бавно охлаждане започва превръщане на аустенита във ферит, а при нагряване завършва образуването на аустенита;

т. A_4 – началото на превръщането на аустенита в δ -ферит при нагряване

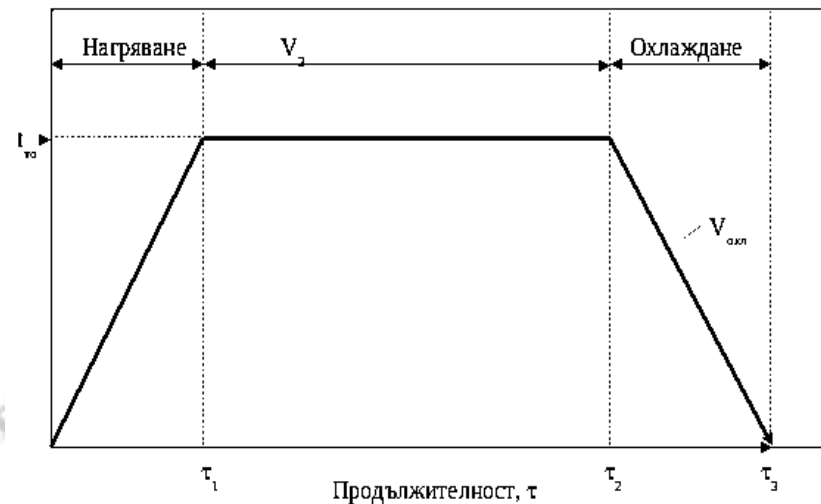
Перлит - Аустенитно превръщане

Основни параметри на режима на ТО

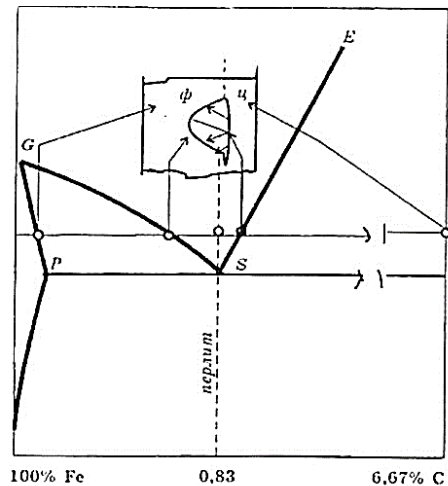
Главни фактори на въздействие при термообработването са температурата и времето, поради което всеки вид термично обработване може да се представи графично в координати **температура — време**.

Основните параметри на режима на ТО са:

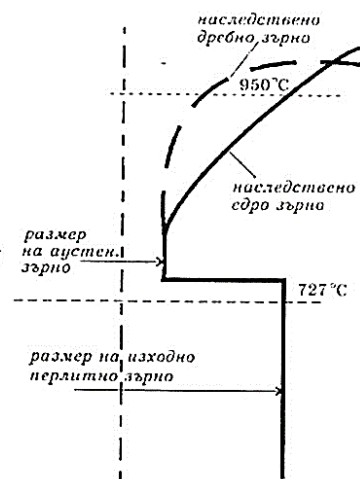
- Температура на нагряване T_{max} (t_{TO});
- Време на задържане (t_3 – от t_1 до t_2);
- Скорост на нагряване ($v_H = dt/dr \approx T_{max}/t_3$);
- Скорост на охлаждане ($v_{охл}$).



Първият етап на всеки вид термично обработване е загряване на стоманата до определена температура, наречена температура на ТО. Нагряването до тази температура се извършва с различна скорост, най-често равновесна. Скоростта на нагряване зависи основно от топлопроводността на стоманата и се съобразява с наличните съоръжения за обработване. Кинетиката на нарастване на размерите на зърната за различните стомани е различна. (едрозърнести и с наследствено дребно зърно. Прегряване на структурата – интензивно нарастване на едрината на зърната. Прегарянето е свързано със стопяване на границата на зърната.



Нарастване на аустенитно зърно при нагряване (а); размер на аустенитно зърно в зависимост от температурата (б)



Температурата на задържане обикновено е над температурната граница на фазово равновесие. Всички стомани съдържат в структурата си перлит и при загряване над 727°C започва зараждане на аустенитни зърна и постепенното им нарастване.

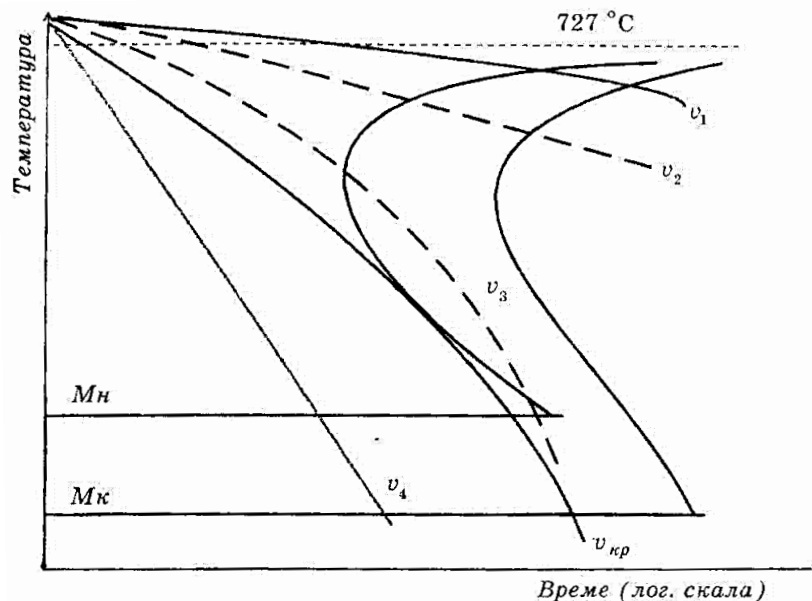
Механизмът на това превръщане е сложен. На границите на ферит-цементитните ламелки се зараждат аустенитни кристалчета с много малка едрина, тъй като в граничните слоеве на феритните зърна енергийното състояние е различно от това в другите обеми на зърната. Постепенно чрез разтваряне на желязо и въглерод аустенитните образувания растат, като обвиват цементитните зърна, докато двуфазната ферито-цементитна структура се превърне в монофазната аустенитна.

Аустенит – Перлитно превръщане

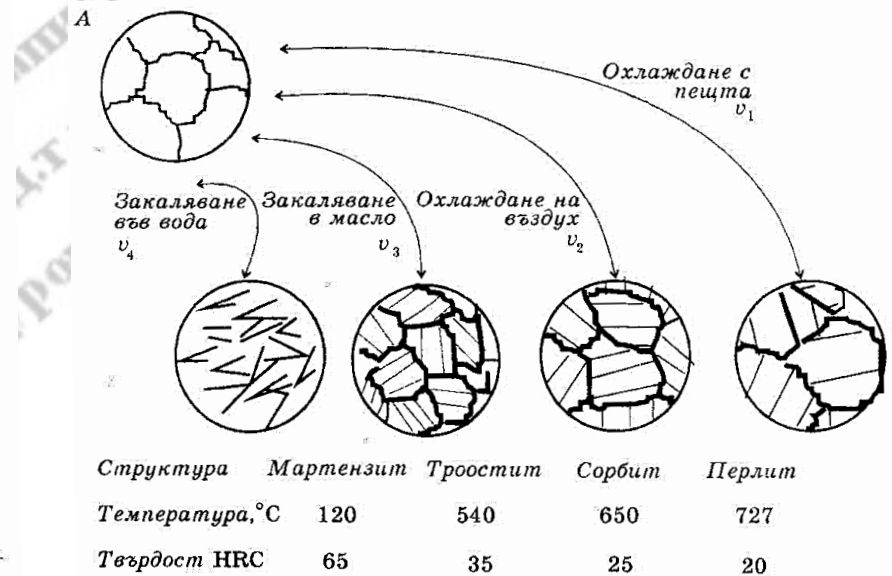
Скорост на охлаждане При достатъчно бавно охлаждане под A_1 (723°C) аустенита се разпада на перлит. Това разлагане се извършва чрез зараждане на цементитни зародиши на границата на аустенитните зърна – образува се перлит ($0.83\%\text{C}$) = ферит Φ ($0.02\%\text{C}$) + цементит Ц ($6.67\%\text{C}$).

При преохлаждане до различни температури се получават структури с различна степен на дисперсност на ферито-цементитните ламели — перлит, сорбит, троостит, бейнит. На фигурата се вижда, че при непрекъснато охлаждане със скорост v_1 , аустенитът при малко преохлаждане под 727°C се разпада на перлит, тъй като линията v_1 , пресича С-кривите при температури, на които отговаря перлитното превръщане.

При малко по-бързо охлаждане — скорост v_2 , аустенитът се превръща в сорбит. С още по-голяма скорост — v_3 , аустенитът се превръща в троостит. Минималната скорост, с която трябва да се охлади аустенитът, за да се получи мартензит, е $v_{\text{кр}}$. Линията, отговаряща на тази скорост, е допирателна към лявата С-крива. Колкото извивката на С-кривата лежи по-близо до ординатната ос, толкова критичната скорост на охлаждане е по-голяма и следователно за да се достигне, трябва да се използва бързо охлаждащо средство.



Диаграма на изотермично превръщане на аустенит (а),



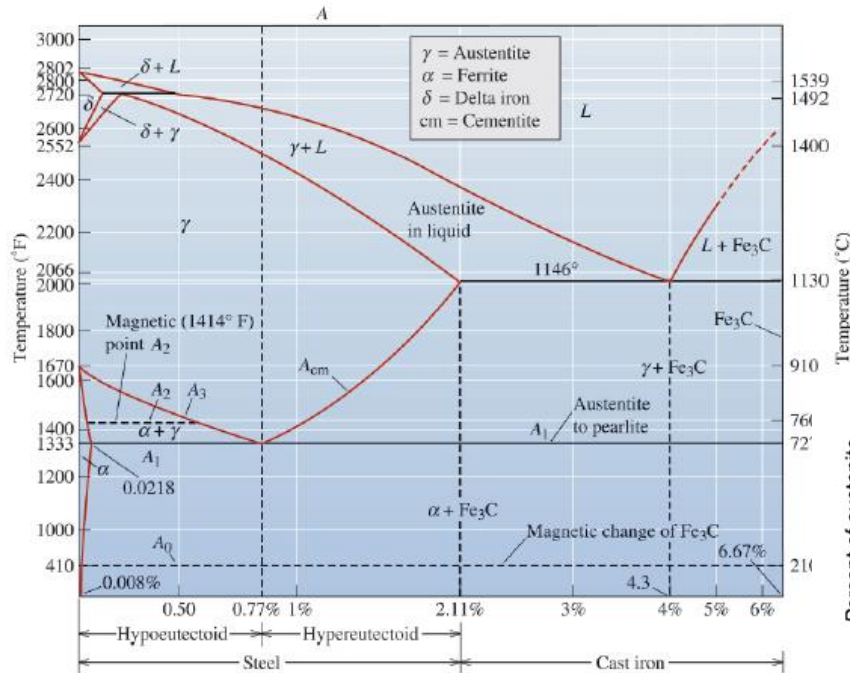
структури (б)

Особености на аустенит-мартензитното превръщане:

- Превръщането е бездуфузионно;
- Кристалната решетка на мартензита е тетрагонална;
- Механичните свойства на мартензита са функция на въглеродното съдържание.

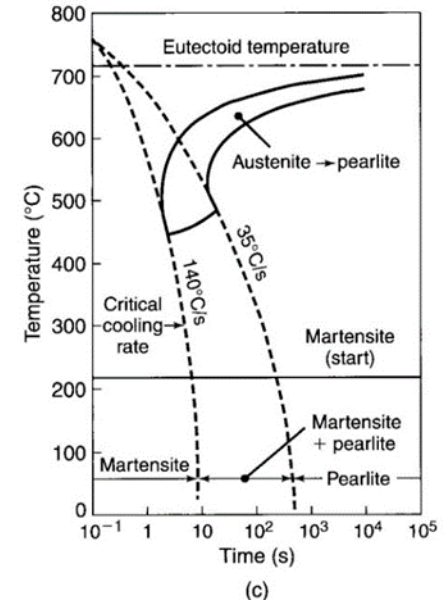
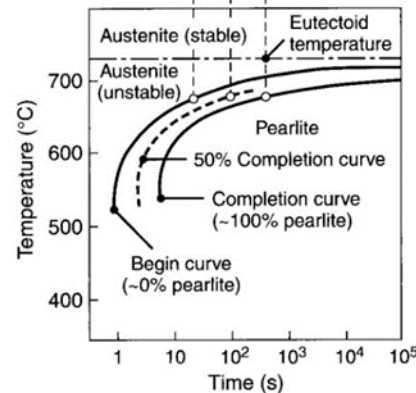
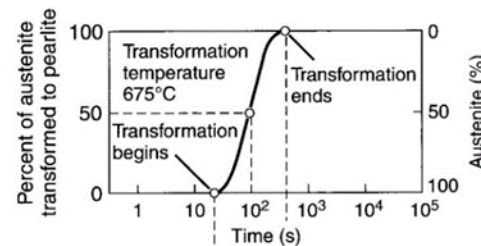
Time-Temperature-Transformation Diagrams

The percentage of austenite transformed into pearlite as a function of temperature and time. The transformation from austenite to pearlite (among other structures) is best illustrated by so called **isothermal transformation (IT) diagrams**, or **time-temperature-transformation (TTT) diagrams**. The higher the temperature or the longer the time, the more austenite that transforms into pearlite.



Fine pearlite is harder and less ductile than coarse pearlite. This makes the differences in hardness and toughness of the various structures obtained by the heat treatment and quench.

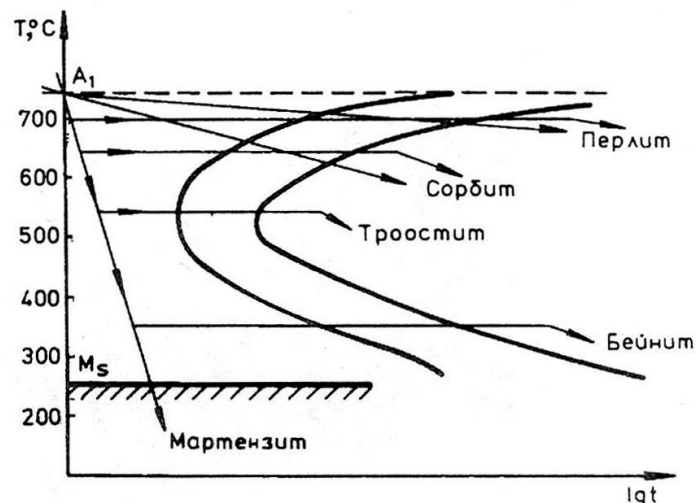
Austenite-to-pearlite transformation of iron-carbon alloy as a function of time and temperature



The steel can be raised to a very high temperature (above the eutectic temperature) to start with a state of austenite. If the material is cooled very quickly, it can follow the 140°C/s cooling rate trajectory shown that results in complete martensite. It can be more slowly cooled in a molten salt bath to develop pearlite- or bainite-containing steels. If tempered martensite is desired, the heat treatment and quench stages will be followed by a tempering process.

Структурни превръщания в стоманите

Ако преохлаждането е минимално ($650 - 720^{\circ}\text{C}$) в рамките на едно аустенитно зърно могат да се образуват няколко едри $\Phi / \text{Ц}$ пластини – пластинчат **перлит** (евтектоидните стомани под 25 HRC).



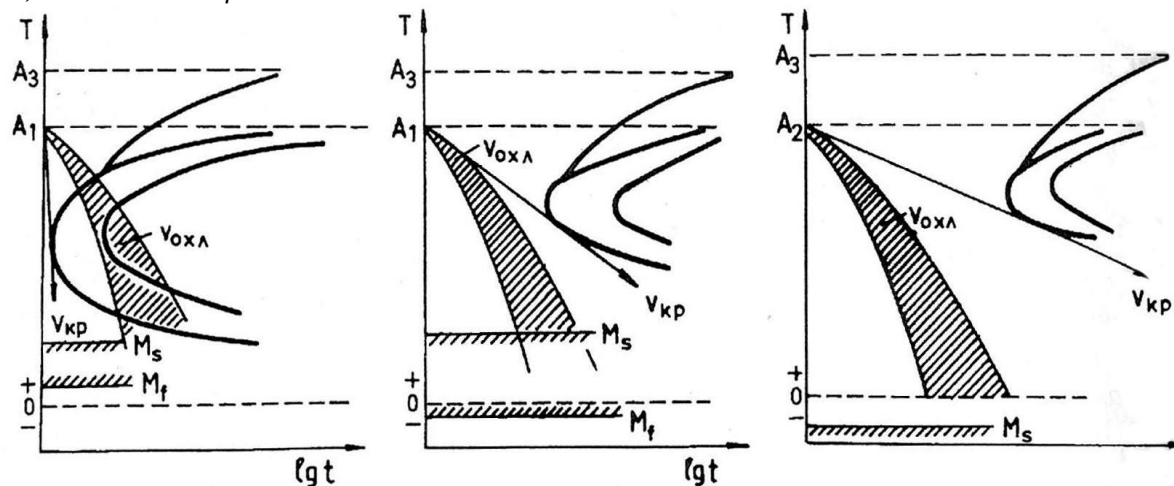
Образуване на перлит, сорбит, троостит, бейнит и мартензит в зависимост от скоростта на охлаждане

Закаляване – вид термично обработване на метални сплави с цел фиксиране при стайна температура на характерно (с минимална свободна енергия) за високите температури състояние на сплавите. На закаляване се подлагат бинарни сплави с ограничена разтворимост или с полиморфни модификации със структурни превръщания в твърдо състояние.

При по-висока скорост на охлаждане, превръщането става при по-ниска температура със значително по-дребни пластинки. При температура $600 - 650^{\circ}\text{C}$ в резултат се формира фина ферито-цементитна смес с разстояние между ламелките $0.4 - 0.2 \mu\text{m}$, HRC 30 – 40 – тази структура се нарича **сорбит**.

При още по-голяма скорост на охлаждане – превръщането става при още по-ниска температура $500 - 600^{\circ}\text{C}$, а разстоянието между ламелките е $0.1 \mu\text{m}$. Тази структура се нарича **троостит**.

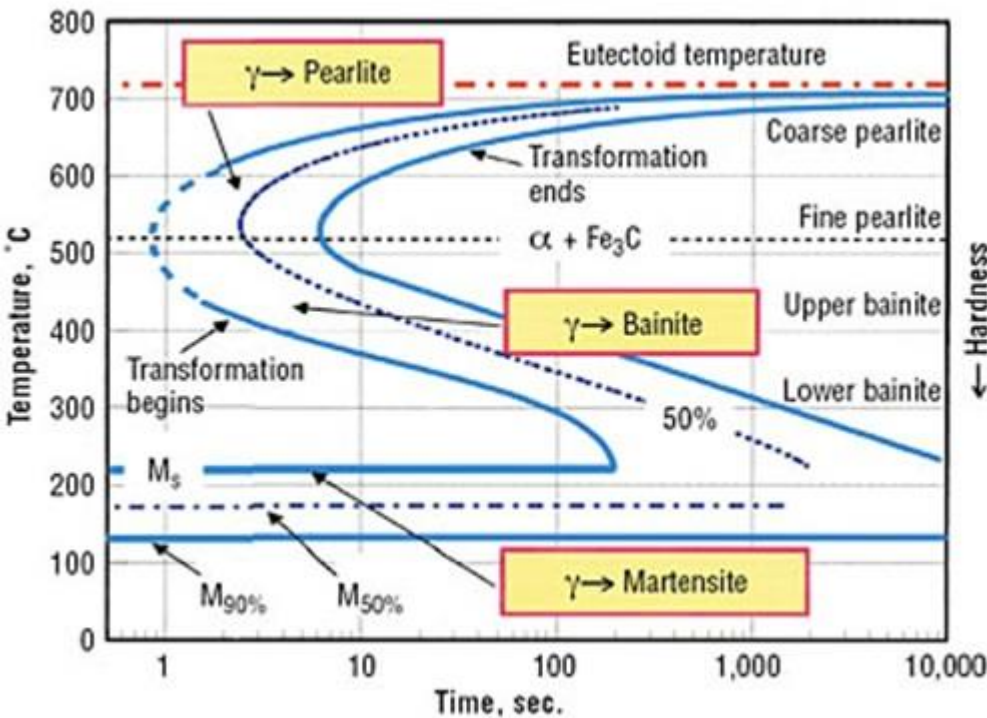
При още по-ниска температури изотермично се получава особена иглообразна структура, наречена **бейнит** (иглест троостит).



Диаграми за изотермично разпадане на аустенита при различни скорости на охлаждане за стомани от перлитен, мартензитен и аустенитен клас

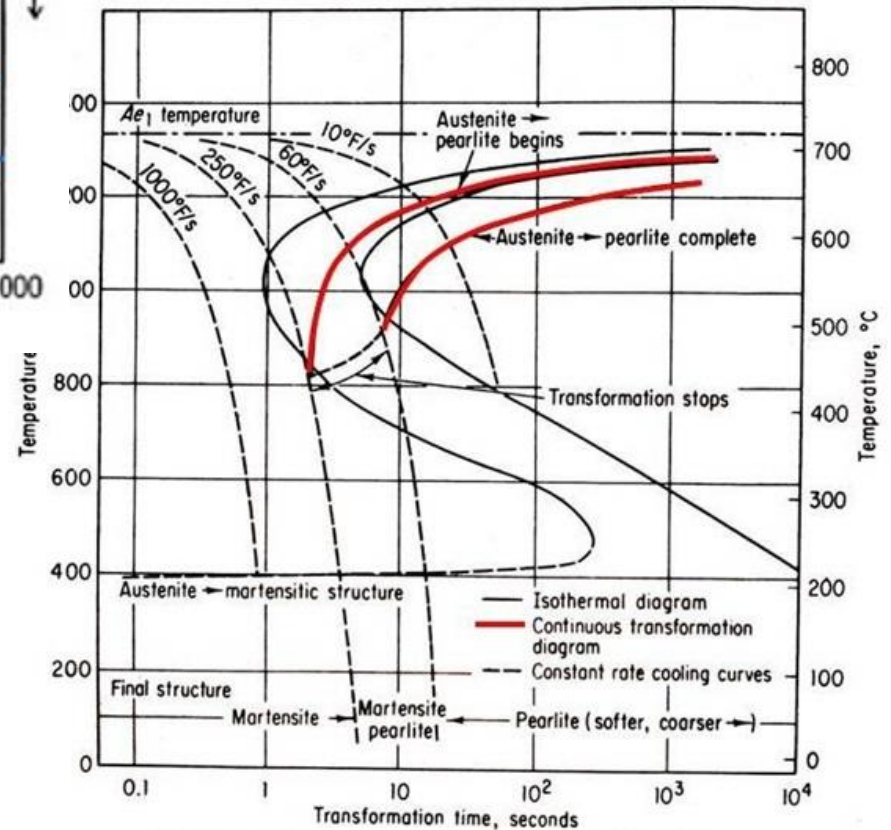
Скоростта на охлаждане, при която се получава мартензит се нарича **критична скорост на охлаждане**.

Continuous cooling transformation (CCT) diagrams



Continuous cooling transformation (CCT) diagrams measure the extent of transformation as a function of time for a **continuously decreasing temperature**. In other words a sample is austenitised and then cooled at a predetermined rate and the degree of transformation is measured, for example by dilatometry.

Time-temperature transformation (TTT) diagrams measure the rate of transformation at a **constant temperature**. In other words a sample is austenitised and then cooled rapidly to a lower temperature and held at that temperature whilst the rate of transformation is measured, by dilatometry.



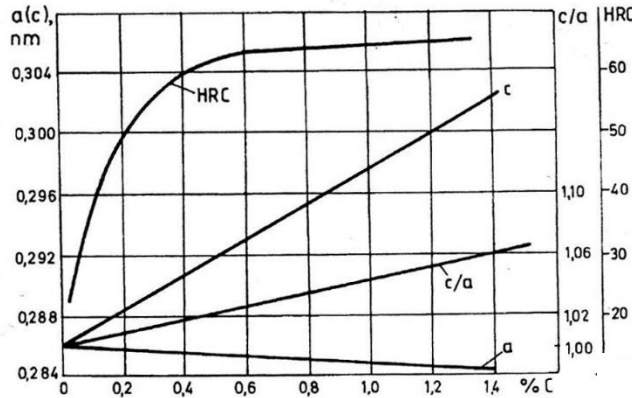
Continuous Cooling-Transformation (C-T) Diagram

(Derived from the isothermal-transformation diagram for a plain-carbon eutectoid steel)

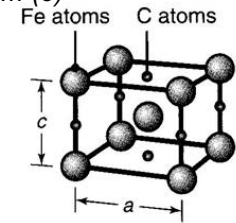
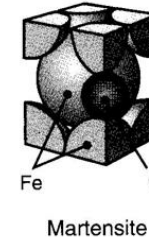
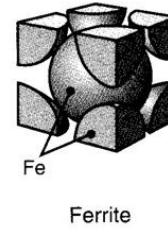
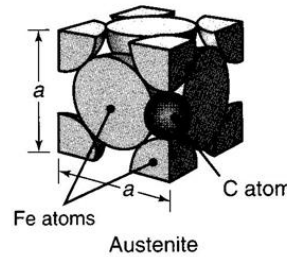
Мартензитно превръщане в стоманите

Бездифузионното превръщане на аустенита се състои в прегрупиране на желязните йони като се образува ОЦКР, но за разлика от решетката на α -Fe – въглеродните атоми остават вътре в нея. При обикновена α -Fe решетка въглеродните атоми остават по стените. В резултат се получава **нова фаза** – преситен α -твърд разтвор, наречен **мартензит** с тетрагонална еластично деформирана кристална решетка (достига се 60 HRC).

Параметри, твърдост и степен на терагоналност на мартензит в зависимост от въглеродното съдържание



Кристални решетки на: аустенит (a), ферит (b) и мартензит (c)



Carbon (%)	c (nm)	a (nm)
0	0.286	0.286
0.20	0.288	0.2858
0.40	0.291	0.2856

(a)

(b)

(c)

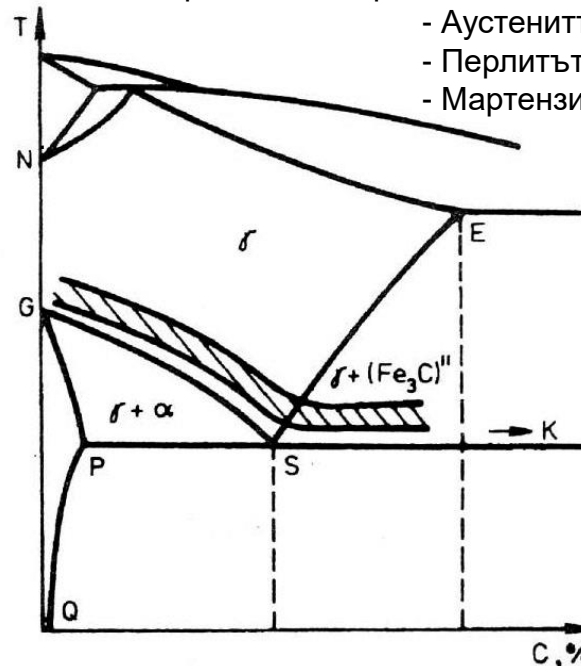
(d)

Структурни напрежения са предизвикани от разликите в специфичните обеми на различните фазови състояния:

- Аустенитът е с най-малък специфичен обем;
- Перлитът е с по-голям специфичен обем;
- Мартензитът е с най-голям специфичен обем.

Закаляване – вид термично обработване на метални сплави с цел фиксиране при стайна температура на характерна (с минимална свободна енергия) за високите температури фазово състояние на сплавите, наречени неравновесни структури.

На закаляване се подлагат бинарни сплави с ограничена разтворимост или с полиморфни модификации със структурни превръщания в твърдо състояние.



Подевтектоидните стомани се закаляват 30 – 50°C над точка A_3 (GS) и стоманата придобива структура аустенит A. Охлажда се с подкритична скорост и се превръща в мартензит $A \Rightarrow M$.

Надевтектоидните стомани се закаляват от температура 15–20°C над т. A_1 (723°C) т.е. тези стомани се закаляват от структурно състояние $A + \text{Ц} \Rightarrow M + \text{Ц}$.

Температури на закаляване на въглеродни стомани

Закаляемост на стоманите

Под закаляемост (hardenability) се разбира способността на стоманите да повишават твърдостта си (да образуват мартензит с висока твърдост) при закаляване. Колкото по-голямо е въглеродното съдържание в мартензита, толкова по-преситен е α тв. разтвор и толкова по-твърд е мартензита. При $C < 0.3\%$ твърдостта на мартензита е сравнително ниска и се счита, че тези стомани са *незакаляеми*.

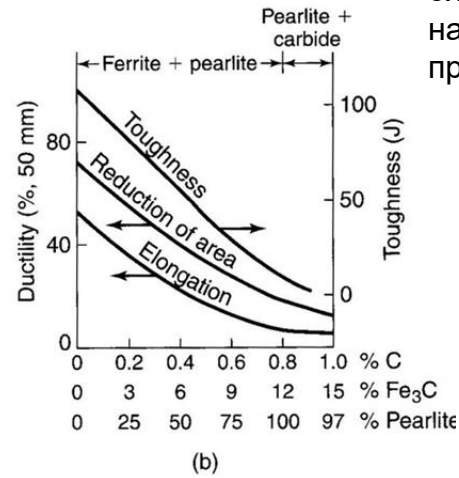
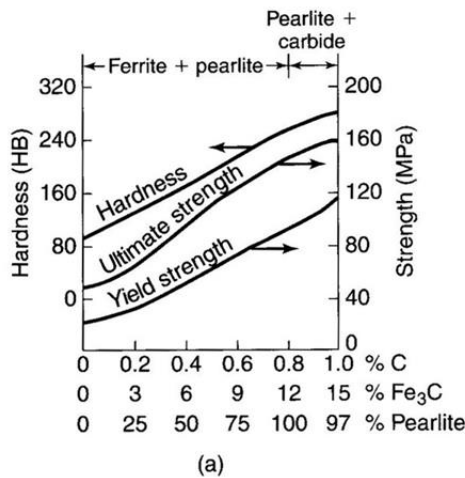
Прокаляемост способността на стоманите да се получава закален слой с мартензитна или бейнитна структура и висока твърдост на една или друга дълбочина от повърхността.

Закаляването може да бъде повърхностно или обемно и се състои от: - нагряване до извършване на неравновесни фазови превръщания; - скоростно (надкритично) охлаждане, целящо запазване на високотемпературната фаза до получаване на преходни/неравновесни (мартензитни) структури / фази.

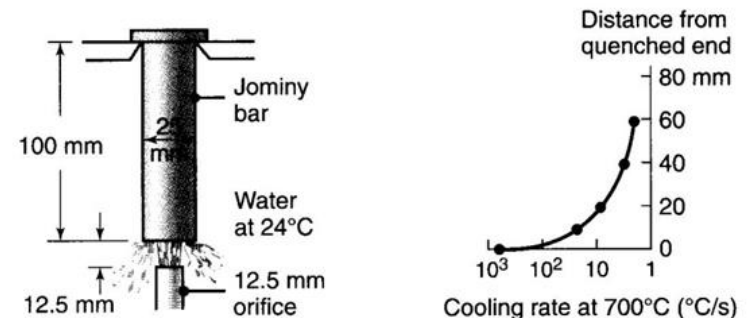
За да се закали дадена сплав тя трябва да отговаря на задължителното условие да претърпява фазови и структурни изменения в твърдо състояние при нагряване. Тези изменения при нагряване могат да бъдат:

- изменения в разтворимостта;
- изменения в количественото съотношение на изходните фази;
- - радикално полиморфно превръщане.

Второто условие за осъществяване на закаляването е достатъчно високата скорост на охлаждане – достатъчна за да затрудни или направи невъзможно протичането на дифузионни процеси.



Крива на закаляемостта на стомана (a), Jominy test (b)



(a)

Механични свойства на стоманите в зависимост от въглеродното им съдържание

Основни видове термично обработване

Закаляване

- Обикновено закаляване
- Закаляване с прехвърляне
- Степенно закаляване

Отвързване

- Нискотемпературно
- Среднотемпературно
- Високотемпературно

Подобряване

Стареене

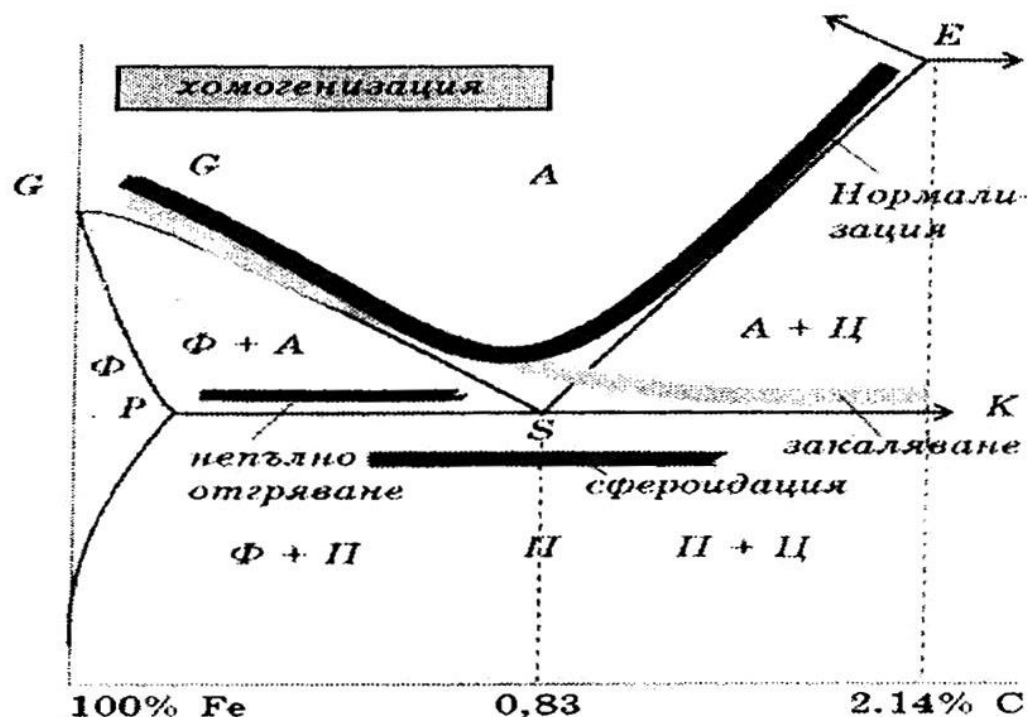
- Естествено стареене
- Изкуствено стареене

Отгряване

- С фазова прекристализация
- Без фазова прекристализация

Отгряване с фазова прекристализация

- Пълно отгряване;
- Непълно отгряване;
- Нормализация;
- Хомогенизация.



Отгряване без фазова прекристализация

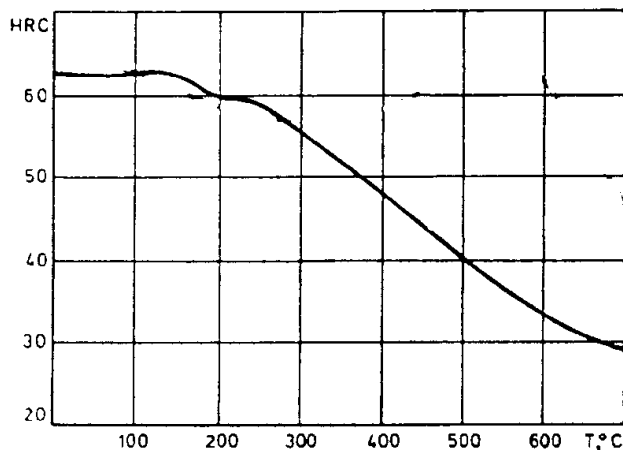
- Отгряване за намаляване на остатъчните напрежения;
- Рекристализационно отгряване.

Химико-термично обработване

- Цементация (навъглеродяване) - твърда, течна или газообразна;

Отвързване на стоманите

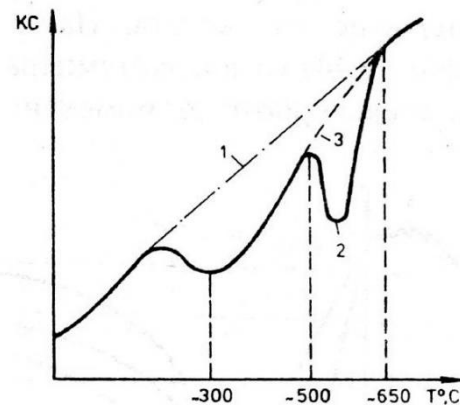
Отвързване (tempering) – вид термично обработване на метални сплави с цел намаляване на вътрешните напрежения, получени при закаляване и увеличаване якостта на удар (за сметка на „компромисно“ намаляване на твърдостта). Прилага се основно за стомани и рядко за чугуни. При отвързването, което се осъществява чрез нагряване, металната сплав, която се намира в следствие на закаляването в нестабилно състояние с неравновесни структури/фази, преминава в по-устойчиво състояние.



Влияние на температурата на отвързване върху твърдостта на стоманата

Martensite is tempered in order to improve its mechanical properties. **Tempering** is a heating process by which hardness is reduced and toughness is improved. The body-centered tetragonal martensite is heated to an intermediate temperature, typically 150°-650°C, where it decomposes to a two-phase microstructure consisting of body-centered cubic alpha ferrite and small particles of cementite. With increasing tempering time and temperature, the hardness of tempered martensite decreases.

Tempering. If steels are hardened by heat treatment, then **tempering** or drawing is used in order to reduce brittleness, increase ductility and toughness, and reduce residual stresses.



Влияние на температурата на отвързване върху ударната жилавост на стоманата

Нискотемпературно отвързване – при 150 – 200°C за нисковъглеродни стомани и при 200 – 240°C за средно въглеродни стомани - вътрешните напрежения намаляват частично и се увеличава (слабо) якостта на удар, а твърдостта почти не се променя.

Средно температурно отвързване - при 420 – 520°C – увеличава се якостта на удар и още се намалява твърдостта.

Високо температурно отвързване - при 550 – 650°C – увеличава се якостта на удар и увеличението на твърдостта от закаляването се отстранява напълно, но структурата е по-качествена поради което се нарича още **подобряване** на стоманите.

Като резултат на трите вида отвързване се получава изменение и на механичните свойства на стоманата.

Закаляемите стомани най-често се подлагат на термично обработване – **подобряване**.

То се състои от закаляване и високотемпературно отвързване, при което се подобряват всички механични свойства (якост и пластичност) на механично натоварени машинни детайли – валове, оси, щанги, колела и др.

Преситените твърди разтвори (закалените стомани) „работят“ при обикновена температура (най-често стайна). В тях протича процес, който се състои в групиране на атомите на разтворимото вещество, отделяне на нова фаза и накрая коагулация на отделените частици. Явлението се нарича **естествено стареене**.

Отгряване и нормализиране на стомани

Стоманите имат фазови превръщания в твърдо състояние, поради което отгряването и нормализирането на стомани включва:

1. Отгряване без фазова кристализация;

1. Отгряване без фазова кристализация;
2. Непълно отгряване (частична фазова прекристализация);
3. Пълно отгряване (с фазова прекристализация);
4. Хомогенизационно отгряване.

Отгряване с фазова прекристализация

Термична обработка, при която се извършва:

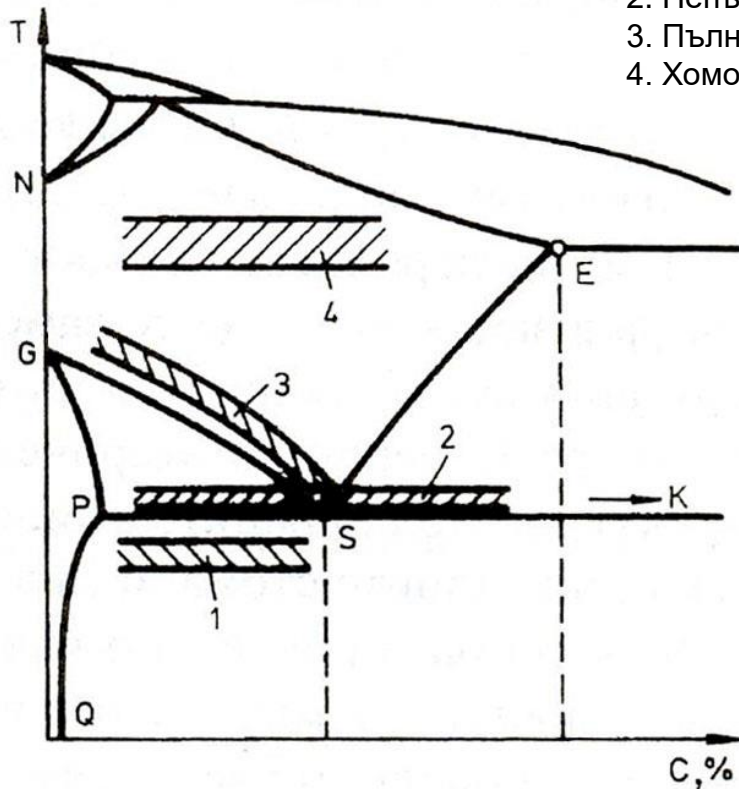
- нагряване над температурата на фазово превръщане;
- задържане за хомогенизация на структурата;
- „бавно“ охлаждане за да се получи необходимата равновесна структура.

Пълното отгряване се състои в нагряване на стоманите до температури с 30-50°C по-високи от A_{C3} с цел пълна прекристализация. Охлаждането е бавно (150 – 200°C/час), за да се получи равновесна перлито-феритна структура.

Нормализацията е разновидност на пълното отгряване, при която охлаждането се извършва на въздух.

Непълно отгряване се прилага като стоманата се нагрява в интервала $A_{C1}-A_{C3}$. Тогава измененията засягат само перлитната част от структурата, която преминава в аустенит при нагряване и след това при охлаждането отново преминава в перлит.

Хомогенизация се прилага за стомани, при които се наблюдава силна дендритна ликвация. Избира се висока температура – 1050 – 1200°C, за да се реализират дифузионните процеси и да се изравни химичният състав в целия обем на тялото.



Температури на отгряване на въглеродни стомани

Отгряването без фазова прекристализация е:

- отгряване за намаляване на остатъчните напрежения (отливки, заварени съединения и пр.); и
- рекристализационното отгряване (след студена пластична деформация).

Механизмът на премахване на остатъчните напрежения се състои в премахване на дефектите от пластични деформации чрез нагряване. При температура 450°C в стоманените и чугунени изделия значително се понижават остатъчните напрежения, а при температура 600°C те практически се премахват.

Рекристализационно отгряване се нарича нагряването на студенодеформирани изделия над температурата на рекристализация. Целта е да се намали твърдостта и възстанови пластичността им.

Рекристализационно отгряване (без фазова прекристализация)

Рекристализационно отгряване се нарича нагряването на студенодеформирани изделия над температурата на рекристализация за премахване на деформационното уякчаване и възстановяване на пластичността им. Отгряването се прилага като междинна операция при студено валцоване, изтегляне и др. Може да бъде и окончателна обработка за някои полуфабрикати. Обикновено температурата на отгряване се избира с $100-200^{\circ}\text{C}$ по-висока от тази на рекристализация. След завършване на процеса детайлите се охлаждат на въздух.

Структурните превръщания при нагряване на студено деформирани (уякчени) метали и сплави могат да се разделят на възвръщане (вътре в зърното) и рекристализация (промяна на самите зърна).

Възвръщането от I-ви род (отдых) - при сравнително ниски температури (под $0.2 T_t$). Характеризира се с отстраняване на част от вътрешните напрежения и намаляване на количеството на точковите дефекти, основно ваканциите.

Възвръщането от II-ри род (полигонизация) - протича при по-продължително нагряване или по-висока температура (под $0.3 T_t$) и се изразява в намаляване на плътността на дефектите, не само точкови, но и дислокации. Дислокациите се подреждат в т.нар. блокове (полигони) с почти бездефектна структура.

Първична рекристализация – (над $0.4 T_t$) се нарича процеса на образуване на нови равноосни зърна от кристализационни центрове в деформирания метал или сплав. Зародишите на новите зърна възникват в местата с най-голяма плътност на несъвършенствата.

Събирателна рекристализация - (над $0.7 T_t$) самопроизволното нарастване на едни зърна, поглъщащи съседите си, чрез миграция (придвижване) на границите си.

Вторична рекристализация - значително нарастване на някои от зърната, като се получава разноразмерност, която влошава механичните свойства.

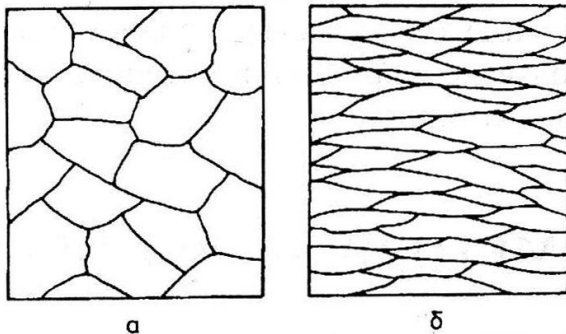
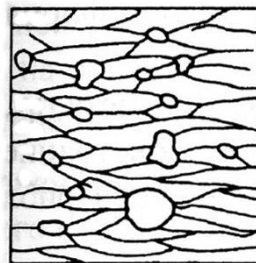
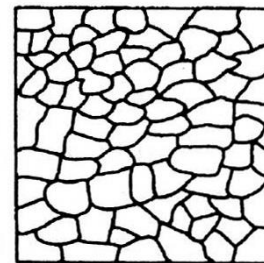


Схема на микроструктурата на метал/сплав: преди (а) и след деформиране (б)

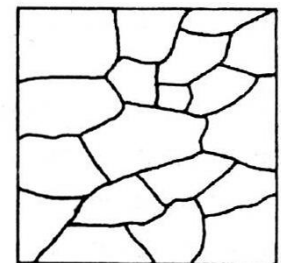
Микроструктура след започване (а), след завършване (б) на първичната кристализация и след завършване на събирателна рекристализация (в)



а



б



в

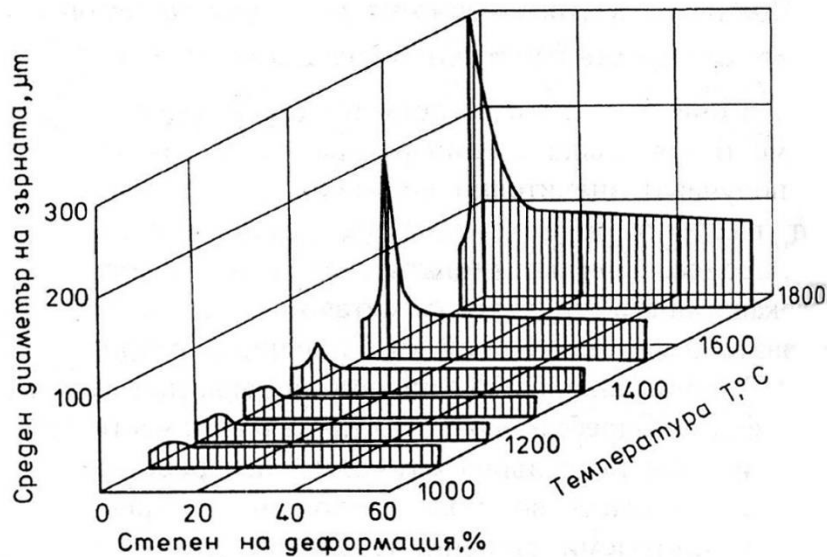
Студена и гореща пластична деформация

Студената пластична деформация се провежда при температури под рекристализационната и с деформационно уякчаване на метала. Промяната на физико-механичните свойства на металите (увеличаването на якостта) в резултат на студена пластична деформация се нарича механично уякчаване (наклепване). Нараства съпротивлението срещу деформация, повишава се твърдостта и износоустойчивостта. Пластично деформираните метали (на студено) са с променена форма / размери и ориентация на кристалите, но и с повишена концентрация на несъвършенства (дефекти) т.е. - с променени физико-механични свойства.

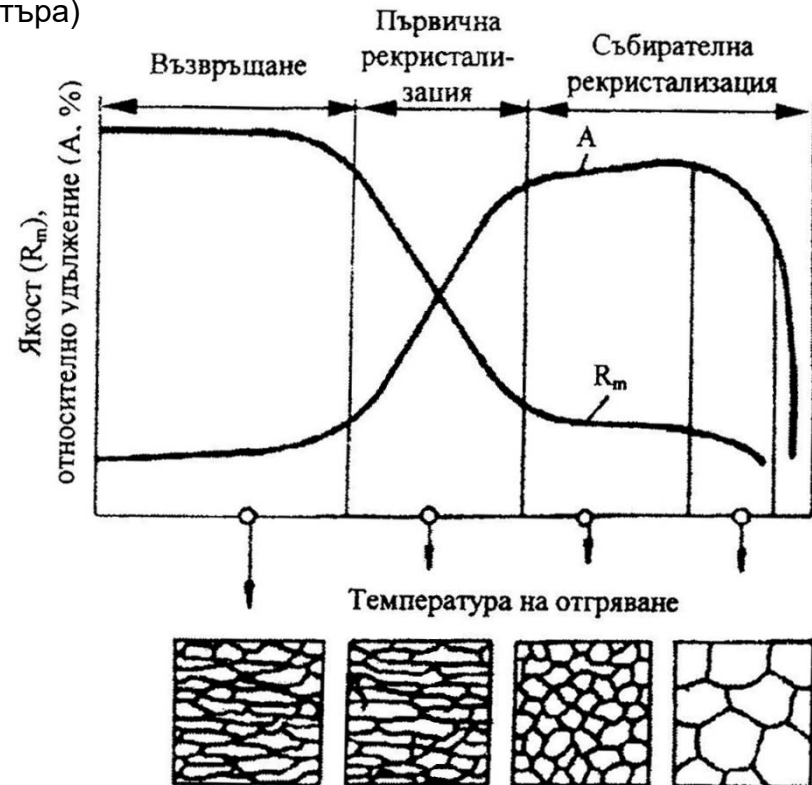
Горещата пластична деформация се провежда над температурата на вторична рекристализация. Дефектите от деформационното уякчаване се премахват частично или изцяло от рекристализационните процеси.

Рекристализационните диаграми дават връзката между двата основни фактора, влияещи върху размера (диаметъра) на зърната [μm]:

- степента на деформация [%]; и
- температурата [$^{\circ}\text{C}$].

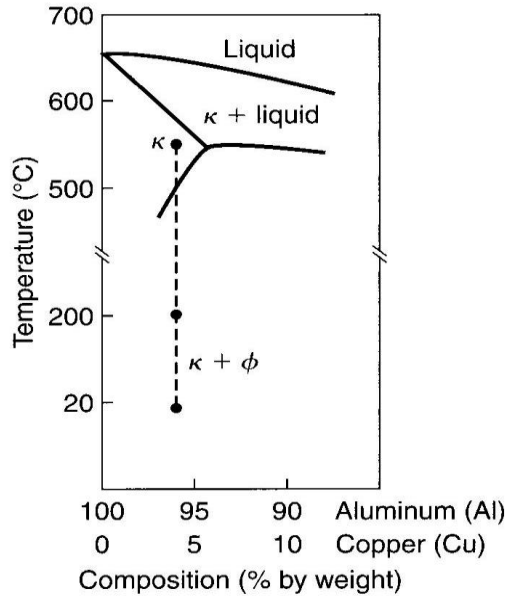


Рекристализационна диаграма на молибден

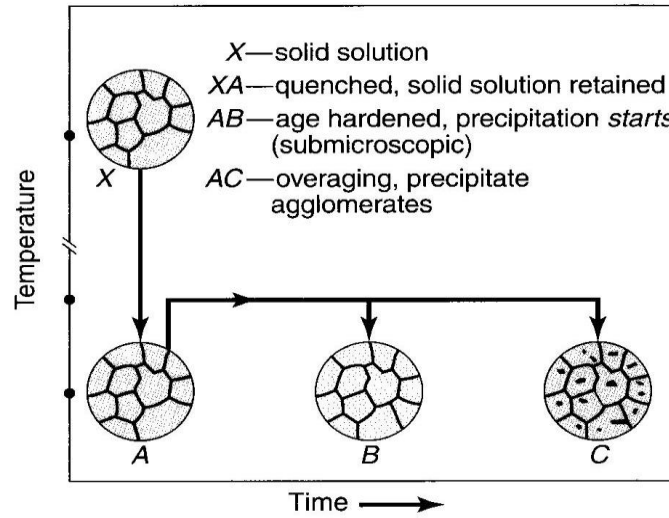


Heat Treatment of Nonferrous Alloys and Stainless Steels

Nonferrous alloys and some stainless steels cannot be heat treated by the techniques used for ferrous alloys. The reason is that **nonferrous alloys do not undergo phase transformations** like those in steels; the hardening and strengthening mechanisms for these alloys are fundamentally different. Heat-treatable aluminum alloys, copper alloys, martensitic stainless steels, and some other stainless steels are hardened and strengthened by a process called **precipitation hardening**. This heat treatment is a technique in which small particles of a different phase, called precipitates, are uniformly dispersed in the matrix of the original phase.



(a)



(b)

The precipitates form because the solid solubility of one element (one component of the alloy) in the other is exceeded. This alloy can be heat treated, using: **solution treatment** and **precipitation hardening**.

In **solution treatment**, the alloy is heated to within the solid-solution kappa phase say, 540°C - and then cooled rapidly (quenching it in water). The structure obtained soon after quenching (A) consists only of the single old phase; this alloy has moderate strength and considerable ductility.

Phase diagram for the aluminium – copper alloy system and various microstructure obtained during age- hardening process

The structure obtained in A can be made stronger by **precipitation hardening**. In this process, the alloy is **reheated to an intermediate temperature and then held there for a period of time**, during which precipitation takes place. This process produces the new phase, which forms as submicroscopic precipitates (shown in B by the small dots within the grains of the old phase). This structure is stronger than that in A, although it is less ductile. The increase in strength is due to increased resistance to dislocation movement.

Aging. Because the precipitation process is one of time and temperature, it is also called aging, and the property improvement is known as **age hardening**.

Химико-термично обработване на стомани

Освен описаните основни видове ТО съществува обработване, при което се съчетава термообработването с обогатяване на повърхностния слой на стоманите с допълнителни елементи — т.нар. химико-термично обработване, и с механична технология — термо-механично обработване.

При химико-термичното обработване се използва способността на металите да разтварят различни химични елементи и да изграждат с тях различни химични съединения при високи температури. В резултат се получават повърхностни слоеве с различен от сърцевината състав и свойства. Насищането може да бъде с един химичен елемент (еднокомпонентно) или повече от един – многокомпонентно.

Наименованието на отделните технологии за химикотермично-обработване се определя от елемента, с който се насища изделието: навъглеродяване (цементация) – въглерод, азотиране – азот, алитиране – алуминий и др.

Химико–термичното обработване на стоманите се състои от три етапа:

- нагряване в твърда, течна (парна) или газова среда, отделяща насищания елемент в активно (атомно) състояние;
- адсорбиране на атомите на насищания елемент от повърхността и образуване на покритие върху материала;
- дифундиране (разтваряне, химично взаимодействие и придвижване) на елемента в дълбочина за формиране на повърхностен слой във материала.

Навъглеродяване на стомани

Цементацията, наричана още навъглеродяване, е най-древният вид химико-термично обработване. Състои се в обогатяване повърхността на нисковъглеродни стомани (под 0.3% C) с въглерод при нагряване на изделието във въглеродосъдържаща среда. Температурите на нагряване са до около 900°C и зависят от начина на цементация — твърда, течна или газообразна.

На навъглеродяване се подлагат нисковъглеродни (незакаляеми) стомани, включително легирани стомани. Температурата на процеса е над 900°C, при която стоманата е в аустенитно състояние. Обикновено се достига ниво от 1.0 – 2.0% въглерод в повърхностния слой.

Този метод цели да увеличи съдържанието на въглерод в повърхностните слоеве, които след закаляване да се превърнат в тетрагонален мартензит.

Карбонатите ускоряват процесите, тъй като се разлагат и отделят CO, който в контакт с повърхността дава активен въглерод и CO₂, а от своя страна CO₂ в контакт с въглищата се редуцира до CO.

Процесът е изисква дълго време за контакт, защото 0.1 mm слой се получава след 1 час насищане.

Детайлите след цементация се подлагат на закаляване и отвързване или обработване със студ и следващо отвързване за получаване на твърдост в повърхностния слой.

Вследствие на продължителното нагряване при навъглеродяването структурата на някои стомани се уедрява значително. В такъв случай се прилага двойно закаляване.

Азотиране на стомани

Друг вид химико-термично обработка е азотирането на стоманите. При азотирането повърхността на стоманата се обогатява с азот, като се образуват нитридни съединения на желязото – Fe_{2-3}N , Fe_4N . На азотиране се подлагат специални стомани, съдържащи хром, алуминий, молибден и др., с цел получаване на висока твърдост, корозионна и износоустойчивост, висока уморна якост.

Азотирането се провежда при по-ниски от навъглеродяването температури – 500 до 600°C, в различни азотосъдържащи среди.

Провежда се като окончателна обработка. За разлика от навъглеродяването стоманата е предварително закалена и отвърната високотемпературно (подобрена). Целта на метода е получаване на износоустойчиви фази на $\alpha\text{-Fe}$ с азота. На практика температурата на азотиране се подбира в интервала 450 – 600°C.

Познати са методи за йонно азотиране, за азотиране в течни или газови среди.

Течното азотиране се провежда при 570°C за време от 0.5 до 3 часа в разтопени цианови соли, през които се пропуска сух въздух. При разлагане на солите се образува атомен азот, който дифундира в детайлите. В резултат от това на повърхността им се образува тънък (7-15 μm) карбонитриден слой.

Газовото азотиране се провежда в пещи в среда от амоняк при температура 500 – 580°C, при която амонякът се разлагана азот и водород. Процесът е продължителен. За около 30-40 часа се получава слой с дебелина 0.6 mm.

Йонното азотиране (вакуум) се провежда при условията на тлеещ разряд в азотосъдържаща (азот и водород или амоняк) разреждана атмосфера при температура – 470 – 580°C. Йонното азотиране се състои от два етапа: катодно разпрашаване и насищане. Използват се вакуумни инсталации, в които газовата смес се йонизира чрез запалване на тлеещ разряд. Разрядът ускорява насищането и нагрява изделието до необходимото температура.

Двукомпонентно насищане с азот и въглерод

Азотонавъглеродяването представлява едновременно насищане на повърхността на стоманите с азот и въглерод. Този процес се използва за повишаване на твърдостта и износоустойчивостта на повърхностния слой. В зависимост от температурите на процеса са известни различни наименования. Ако насищането е при температури – 850 -900°C се нарича нитроцементация, а ако е при 600-700°C – цианиране.

Разтворимостта на двата елемента азот и водород не е еднаква при различни температури. Ако се насища стоманата при по-ниски температури – 550-580°C, преобладава насищането с азот, а при по-високи – (над Ac_3) – въглерод.

Дифузионна метализация е процес на насищане на повърхността с различни метали. Различава се процес на обогатяване с алуминий при високи температури. На алитиране се подлагат арматури, дюзи, части на електронагревателни уреди и др. В резултат детайлите имат висока корозионна и топлоустойчивост. При насищане с хром детайлите придобиват изключителна корозионна устойчивост и твърдост.

Термо-механично обработване на стомани

Термо-механичното обработване на стомани представлява съчетание от термично и механично въздействие (пластично деформиране), което има за цел допълнително увеличаване на якостта от съвместяването на двата процеса.

Прилагат се два основни варианта – високотемпературно термомеханично обработване (ВТМО) и нискотемпературно термомеханично обработване (НТМО).

При високотемпературното термомеханично обработване аустенитът се деформира при температури, аналогични на тези за закаляване и веднага се закалява. Така той се превръща в мартензит с подобрени свойства.

При нискотемпературното термомеханично обработване ефектът на уякчаване на аустенита е по-голям, тъй като деформирането е под температурата на рекристализация.

Термично обработване на чугун

Термичното обработване на чугуна е малко по-специфично от това на стоманата. Белите чугуни се подлагат на ТО с цел графитизация (нагряване и продължително задържане при 950-1000°C) или получаване на чугун със специфична форма на графита. Най-често срещаното термично обработване на сивия чугун е стареенето.

Чугуните се подлагат на термично обработване, както и стоманите: закаляване, отвярзване. С цел отстраняване на структурните и термични вътрешни напрежения сивите чугуни се подлагат на „отлежаване“ на открито (изложени на атмосферно влияние и температурни промени) или на отгряване до 500°C в продължение на 4-5 часа и следващо бавно охлаждане.

На термично обработване се подлагат и много цветни метали (мед, алуминий и сплавите им) с цел подобряване на свойствата им. Например, в резултат на отгряване на медта се повишава електро- и топлопроводимостта ѝ. Термичното обработване на алуминиевите сплави довежда до повишаване на якостта и твърдостта им. Много сплави, подложени на стареене, уякчават структурата си и т. н.

