7. TEORIA TRATAMENTELOR TERMICE

7.1. Definirea şi scopul tratamentelor termice (TT)

Definiţie TT: procese tehnologice aplicate pieselor metalice, constând dintr-o succesiune de 3 operaţii:

- încălzire până la o anumită temperatură;
- menţinere la această temperatură;
- răcire în condiţii bine definite, cu viteze diferite.

Scopul TT: obţinerea de proprietăţi cerute de nevoile practice prin modificarea microstructurii materialului la ***încălzire – menţinere – răcire***.

Aliaje tratabile termic: să fie în afară de echilibru sau să prezinte transformări de fază în stare solidă indicate de diagrama de echilibru.

7.2. Reprezentarea grafică şi parametrii TT

Reprezentare grafica **- Fig. 7.1**: în coordonate ***temperatură–timp*** (**t-τ**) – ciclu simplu;

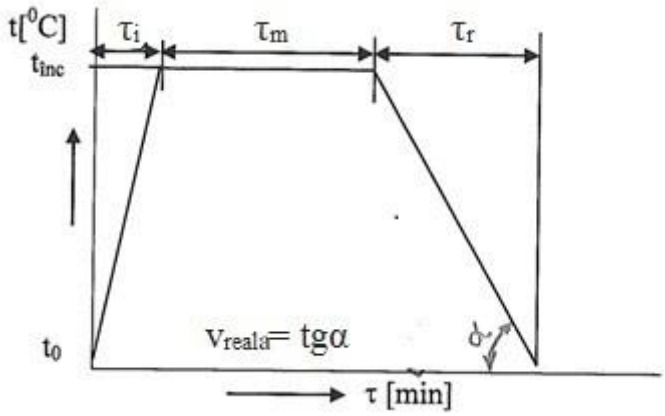


Fig. 7.1

Parametrii TT:

- temperatura iniţială a piesei – $\mathbf{t_0}$;
- temperatura finală de încălzire a piesei – $\mathbf{t_{înc}}$
- durata de încălzire – $\boldsymbol{\tau_i}$;
- durata de menţinere – $\boldsymbol{\tau_m}$;
- durata de răcire – $\boldsymbol{\tau_r}$;
- viteza de încălzire – $\mathbf{v_i = (t_{înc} - t_0)/\tau_i}$;
- viteza de răcire – $\mathbf{v_r = (t_{înc} - t_0)/\tau_r}$; viteza reala de racire - $\mathbf{v_{reala} = tg\alpha}$

TT complex: cicluri simple repetate de ***încălzire – menţinere – răcire***

7.3. Clasificarea TT ale oţelurilor

După natura fizico-chimică:

- TT obişnuite: recoacerea cu şi fără transformări de fază, călirea şi revenirea.

- Tratamente termochimice:
  - cementare (**C**);
  - -nitrurare (**N**);
  - cianurare (**C şi N**);
  - alitare (**Al**);
  - siliciere (**Si**);
  - cromare (**Cr**);
  - nichelare (**N**i);
  - borurare (**B**);
  - sulfizare (**S**) s.a.

- Tratamente termofizice:
  - termomecanice;
  - termomagnetice.

Recoacere fără transformări de fază: încălzire, menţinere şi răcire lentă aliaj

- ***de detensionarea***: urmăreşte eliminarea tensiunilor de natură termică si structurală;
- ***de recristalizare***: se aplică în scopul eliminării efectelor deformării plastice la rece (ecruisării) prin refacerea reţelei cristaline distruse;
- ***de omogenizarea chimică***: urmareste eliminarea segregaţiilor dendritice (uniformizarea compoziţiei chimice) prin încălzire la temperatură ridicată.

Recoacerea cu transformări de fază în stare solidă la încălzire:

- recoacerea de înmuiere (de echilibru) urmăreşte aducerea aliajului la starea de echilibru corespunzătoare diagramei de echilibru;
- recoacerea de globulizare are ca scop obţinerea perlitei globulare mai tenace şi mai puţin dură;
- recoacerea de normalizare urmăreşte fărâmiţarea structurii aliajului sub raportul mărimii şi uniformităţii dispersiei grăunţilor cristalini (cristalitelor);

Călirea: încălzire, menţinere şi răcire rapidă:

- ***totală***, aliajul încălzit la o temperatură deasupra punctului critic de transformare şi răcit foarte rapid. Rezultă la temperatura ambiantă o structură în afară de echilibru, corespunzătoare temperaturii de la care se răceşte;
- ***obişnuit***ă, răcirea se realizează cu o viteză intermediară între cazurile limită: călire totală şi recoacere. La temperatura ambiantă se obţin structuri interemediare între structura de călire totală şi cea de recoacere (echilibru).

Revenirea: se aplică după călire prin încălzire la o temperatură sub punctul critic de transformare; rezulta structuri mai apropiate de starea de echilibru, mai puţin instabile decât structura de călire - ***tipuri de rervenier***:

- ***joasă*** (150-250) ^{0}C;
- ***medie*** (300-450) ^{0}C;
- ***înaltă*** (500-6500) ^{0}C.

Tratamentele termochimice*:** urmarese îmbogăţirea prin difuzie, la temperaturi ridicate, a stratului superficial al pieselor cu atomi activi ai altor elemente chimice: ***C; ***N***; ***C şi N***; ***S***, ***C si N***; ***Al***; ***Si*** ş.a.

Tratamente termofizice: peste efectele temperaturii se suprapun şi efecte mecanice (deformarea plastică), respectiv fizice ale unui câmp magnetic în care este introdusă piesa.

7.4. Aplicarea diagramelor de echilibru la tratamentele termice (TT)

Conditii (v. **DE**): prezenta transformărilor de fază în stare solidă, solubilitatea variabila a componenţilor (ex. - duraluminiul: ***Al – Cu – Mg – Mn***; - avialul: ***Al – Mg – Si***) sau modificări alotropice ale acestora.

7.5. Punctele critice ale oţelurilor

Definire: temperaturile la care se produc transformările de fază în stare solidă în aceste aliaje (**Fig. 7.1**), urmare a modificării alotropice a fierului (**Feγ ⇔ Feα)** şi a descompunerii eutectoide a austenitei (γ) in perlita: **γ ⇔ [α (ferită) + Fe_3C (cementită)]** - ***perlită***.

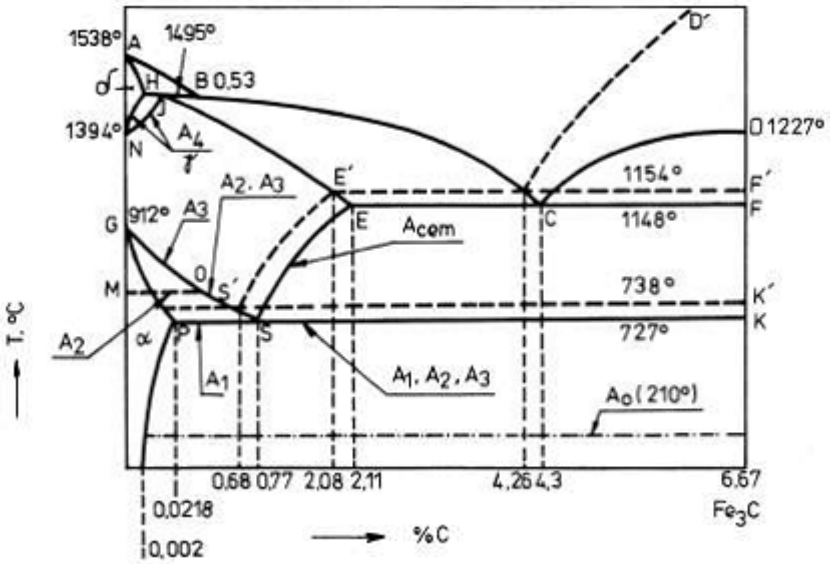


Fig. 7.2

***Reprezentarea si notarea puctelor critice ale* otelurilor (Fig. 7.2):** date de curbe a căror intersecţii cu ordonata de concentraţie a aliajului dau valorile temperaturilor aferente aliajului;

***Notarea punctele* critice:**

- **A_1** – linia **PSK**;
- **A_2** – linia **MOSK**;
- **A_3** – linia **GSK**;
- **A_{cem}** – linia **ES**.

(pe porţiunea ***SK***: **$A_1 = A_2 = A_3$**, pe porţiunea ***OS***: **$A_2 = A_3$**.)

➢ ***la încălzi*re**:

- **Ac_1** – are loc transformarea perlitei în austenită şi începe dizolvarea feritei, respectiv a cementitei secundare în austenită;
- **Ac_3 –** se termină dizolvarea feritei în austenită;

- **Ac_{cem}** – se termină dizolvarea cementitei secundare în austenită.

➢ ***la răcire***:

- **Ar_3** – începe separarea feritei din austenită;
- **Ar_{cem}** – începe separarea cementitei secundare din austenită;
- **Ar_1** – se termină separarea feritei, respectiv a cementitei secundare, din austenită iar austenita rămasă se transformă în perlită.

7.6. Structuri de tratamente termice ale oţelurilor

Austenita **–** soluţie solidă interstiţială a carbonului în fierul **γ** (*CFC*):

- volumul specific cel mai mic dintre toţi constituenţii diagramei **Fe-C**;
- duritate relativ scăzută, rezistenţă, rezilienţă şi proprietăţi plastice ridicate, rezistenţă la coroziune, rezistivitate electrică ridicată, paramagnetică.

Martensita – constituent de călire, soluţie solidă metastabilă suprasaturată de carbon în **Feα,** cu reţea deformată tetragonală (**c/a >1)** – **Fig. 7.3**:

- volumul specific cel mai mare dintre toţi constituenţii digramei **Fe-C**;
- foarte dură şi fragilă (**62-66 HRC)**, magnetică, rezistentă la coroziune, aspect microscopic acicular (vârf de lance) pe fond de austenită.

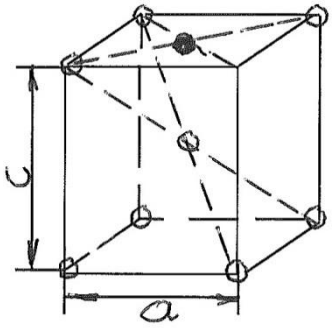


Fig. 7.3.

- • atom de carbon;
- o atom de fier.

Troostita – amestec ferito-cementitic foarte fin dispers, cu aspect de pete negre sferoidale în câmp de martensită; duritate 40 HRC, nu este fragilă.

Sorbita – structură intermediară între perlită şi martensită ca şi troostita, mai puţin fină; se obţine în condiţii de răcire mai lentă decât troostita; aspect lamelar spre deosebire de sorbita de revenire care are aspect globular; rezistenţa şi duritate între troostita şi perlita (**25 HRC**).

Bainita **–** intermediară între martensită şi troostită; amestec fin dispers, aproape molecular, de carburi intermediare **Fe_xC**, care nu au ajuns la forma final a de **Fe_3C** (cementită); rezistenţă mecanică şi duritate ridicată, rezilienţă bună; se obţine prin răcirea izotermă a austenitei; aspect acicular, de paie tocate:– ***bainită inferioară*** (recoacere la 300-350 ^{0}C), de duritate ***55 HRC***; – ***bainită superioară*** (recoacere la 400-450 ^{0}C), de duritate ***45 HRC***.

Perlita – structură de echilibru (recoacere) a diagramei **$Fe-Fe_3C$**, amestec de ferită şi cementiă (eutectoid), aspect lamelar; duritate ***180 HB***; rezistenţă la tracţiune ***80 daN/mm^2***; alungire ***10%.***

7.7. Transformările de fază în stare solidă la oţeluri

Definire: cu ajutorul curbelor de variaţiei a energiei libere (**F**) a structurilor de tratamente termice – ***perlita, austenita şi martensita*** – cu temperatura (**T**) - **Fig. 7.4.**

Sensul transformărilor de fază: de la o structură de energie liberă mai mare spre o structură de energie liberă mai mică.

Constituenţii structurali care participă la transformările din oteluri:

- **Austenita** (***A***)**;**
- **Martensita** (***M***);
- **Perlita** (**P**);
- Structurile intermediare: sorbita (**S**), troostita (**T**) şi bainita (**B**) superioară şi inferioară.

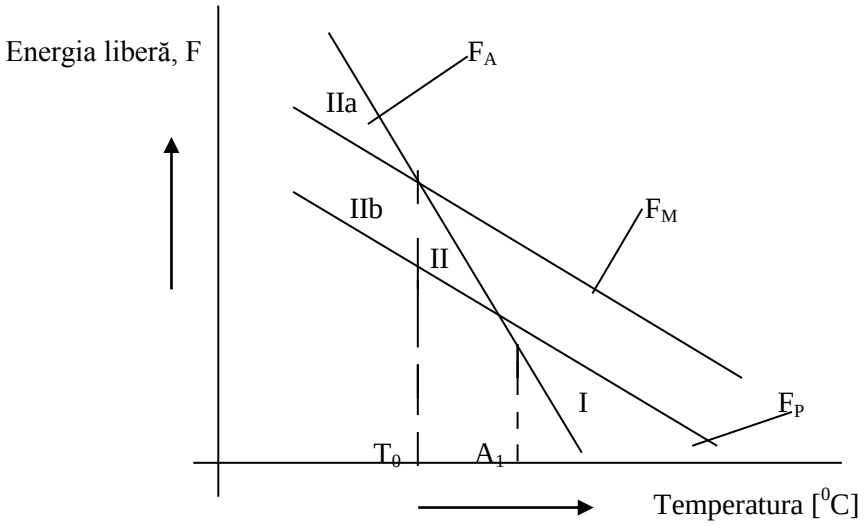


Fig. 7.4

$\mathbf{T_0}$ – temperatura de echilibru metastabil dintre austenită şi martensită;
$\mathbf{A_1}$ – temperatura de echilibru stabil dintre austenită şi perlită.

Tipuri de transformari **- (Fig. 7.4*):***

➢ ***transformarea perlitei în austenită*** la încălzire (**I**), la temperaturi superioare punctului critic $\mathbf{Ac_1}$: $\mathbf{F_A < F_P}$; ***TT*** de recoacere şi călire a oţelurilor.

➢ ***transformarea austenitei în perlită*** la racire (**II**), *numită şi transformarea perlitică*; are loc la temperaturi inferioare punctului critic $\mathbf{Ar_1}$: $\mathbf{F_P < F_A}$; ***TT*** de recoacere şi călire, aplicate oţelurilor.

➢ ***transformarea austenitei în martensită*** la racier (**II.a**), *numită şi transformare martensitică*; are loc la temperaturi inferioare lui $\mathbf{T_0}$: $\mathbf{F_P < F_M < F_A}$.

Este o transformare intermediară a transformării austenitei în perlită. Corespunde ***TT*** de călire a oţelurilor.

➢ ***transformarea martensitei în perlită*** la încălzire (**II.b**), la temperaturi inferioare punctului critic $\mathbf{Ac_1}$: $\mathbf{F_P < F}$; ***TT*** de revenire a oţelurilor; se obţin structuri intermediare ferito-cementitice (sorbită, troostită) sau martensită de revenire, în funcţie de temperatura de încălzire, după călire.

***Difuzia si tipul transformarilor* – Fig. 7.4:**

- transformări cu difuzie:
  - transformarea perlitei în austenită la încălzire (**I**);
  - transformarea austenitei în perlită la răcire (**II**);
  - transformarea de tip revenire înaltă, la încălzire (**II-b**).
- transformări fără difuzie:
  - transformarea austenitei în martensită, la răcire (**II-a**);
  - transformarea intermediară bainitică la răcire;
  - transformarea de tip revenire joasă la încălzire.

7.8. Recoacerea oţelurilor

Definire: încălzire deasupra punctului critic $\mathbf{Ac_3}$ pentru oţelurile hipoeutectoide, respectiv peste $\mathbf{Ac_{cem}}$ pentru oţelurile hipereutectoide, răcire lentă - stare de echilibru fizico-chimic şi structural; valori maxime de plasticitate şi minime de rezistenţă mecanică.

Clasificare:

- recoacere completă, unde: $\mathbf{t_{înc} > Ac_3\ (Ac_{cem})}$**;**
- recoacere intermediară, la care: $\mathbf{Ac_1 < t_{înc} < Ac_3\ (Ac_{cem})}$**.**
- in functie de scopul ***TT*** - **Fig. 7.5 a** si **b:**

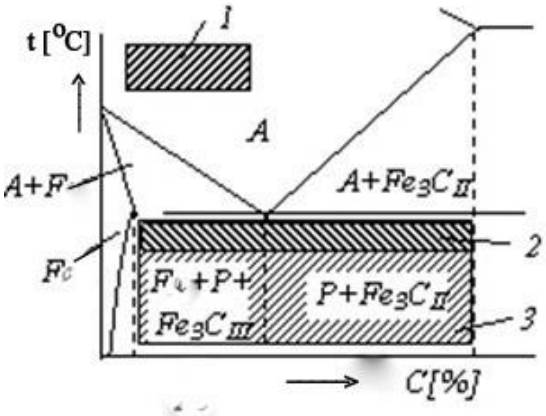


Fig 7.5.a. Recoaceri de**: 1.** omogenizare chimica; **2.** recristalizare; **3.** detensionare.

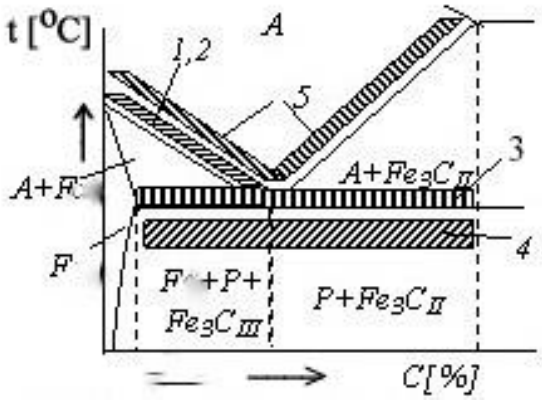


Fig. 7.5.b. Recoaceri: **1.** completa; **2**. izoterma (perlita globulara); **3.** incompleta; **4.** inmuiere (oteluri aliate dupa deformare la cald sau normalizare); **5**. normalizare.

Fig. 7.5. a si **b**

- ***Recoaceri care necesită transformări de fază în stare solidă***:
  - recoacere de înmuire (de echilibru);

- recoacere de globulizare a perlitei lamelare;
- recoacere de normalizare:
  - **a.** oţel cu reţea de cementită;
  - **b.** oţel fără reţea de cementită;

➢ ***Recoaceri care nu necesită transformări de fază în stare solidă***:

- recoacere de detensionare;
- recoacere de recristalizare;
- recoacere de omogenizare.

➢ ***Recoacerea de înmuiere***:

- obţinerea structurii de echilibru;
- încălzire cu (30-50) ^{0}C peste Ac_3 (Ac_{cem});
- menţinerea pentru omogenizare austenit a(γ) si răcire lentă, cu cuptorul;
- importantă viteza de răcire – (10-20) ^{0}C/oră;
- se aplică în următoarele cazurile: nu se cunoaşte tratamentul termic aplicat anterior; tratamentul anterior a fost greşit aplicat sau se urmăreşte un maxim de prelucrabilitate prin aşchiere, adică reducerea durităţii.

➢ ***Recoacerea de globulizare a perlitei***:

- realizarea perlitei globulare, mai moale şi mai tenace decât perlita lamelară;
- conferă structurii o prelucrabilitate mai bună prin deformare plastică, rezistentă mai bună la şocuri mecanice;
- se aplica oţelurilor eutectoide sau hipereutectoide;
- încălzire cu ceva peste $\mathbf{Ac_1}$ (cu ***10-20 ^{0}C***), răcire foarte lentă, cu o menţinere scurtă sub $\mathbf{Ac_1}$ (cu ***10-20 ^{0}C***); se repetă de mai multe ori (recoacere pendulară), urmata de răcire în aer de la ***600 ^{0}C*** (**Fig.7.6**);
- se aplică oţelurilor carbon de scule (**OSC**-uri), pentru mărirea tenacităţii miezului structurii rămas necălit;

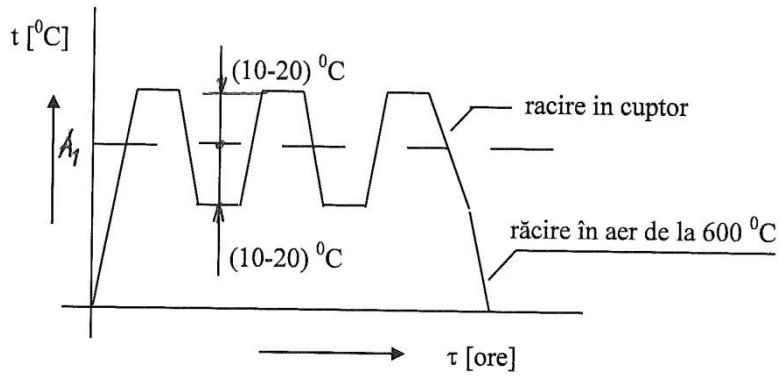


Fig. 7.6

➢ ***Recoacere de normalizare***:

- urmăreşte omogenizarea structurii din punctul de vedere al mărimii grăunţilor cristalini; se aplica în urma unei supraîncălzirii sau turnării când rezultă o structură grosolană şi inegală;

- încălzirea se realizează în domeniul austenitic, cu (**30-50**) ^{0}**C** peste punctele critice **Ac$_3$** (**Ac$_{cem}$**), urmată de o menţinere pentru omogenizarea austenitei şi o răcire lentă în aer, cu [**100-200**] ^{0}**C/oră**; nu este atât de importantă exactitatea vitezei de răcire, cât temperatura de încălzire;
- în cazul oţelurilor hipereuetectoide, la care cementita se găseşte în reţea, încălzirea se realizează peste **Ac$_{cem}$** pentru dizolvarea reţelei de cementită, urmată de o călire în apă, reîncălzire peste **Ac$_1$** şi răcire în aer;
- în cazul oţelurilor hipereuetectoide, la care cementita nu se găseşte în reţea încălzirea, se realizează peste **Ac$_1$**, urmată de o răcire în aer;
- este un tratament termic intermediar, între recoacerea propriu-zisă şi călirea oţelurilor.

➢ ***Recoacerea de detensionare***:

- se aplică pentru îndepărtarea tensiunilor interne de natură termică (generate de răciri rapide şi neuniforme) şi structurală (volume specifice diferite ale austenitei şi martensitei, care participă la transformarea martensitică);
- temperatura de încălzire sub **Ac**$_1$ (> ***600 ^{0}C***);
- tensiunile de călire se îndepărtează prin revenire joasă.

➢ ***Recoacerea de recristalizare*:**

- urmăreşte eliminare efectelor deformării plastice la rece (ecruisării), redând materialului proprietăţile iniţiale de plasticitate;
- încălzire la o temperatură superioara pragului de recristalizare (**~ 0,4·T$_{top}$**) cu cca. (**200-300**) ^{0}**C**, adică la ~ (**600-700**) ^{0}**C**, urmata de o răcire lentă.

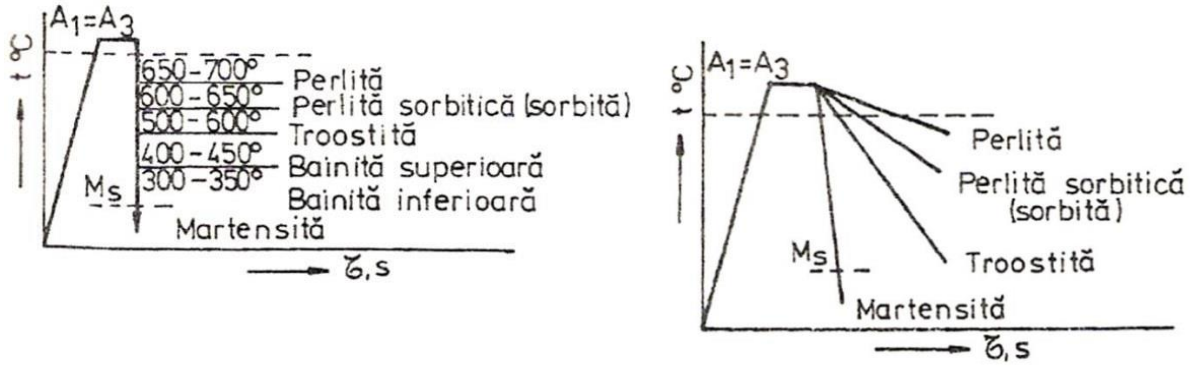
➢ ***Recoacerea de omogenizare***:

- uniformizarea compoziţiei chimice prin eliminarea segregaţiilor dendritice intracristaline ce rezultă la solidificărea lingourilor/pieselor turnate din oţel; are la bază procese de difuzie;
- se practică la temperaturi înalte, sub linia solidus cu circa **200 ^{0}C**, practic (**1100-1150**) ^{0}**C**;
- menţinere îndelungată la temperatură (**cca 15 ore**), urmata de o răcire lentă;
- structura cu grăunţi grosolani (de supraîncălzire); impune o recoacere de normalizare pentru fărâmiţarea grăunţilor cristalini (la piese turnate); lingourilor se prelucreaza direct prin deformare plastică, cu efect similar normalizării.

7.9. Formarea structurilor de tratamente termice ale otelurilor la racire

Conditii de formare:

- racire si menţinere izotermă – **Fig. 7.7.a**;
- răcire continuă – **Fig. 7.b,;**
- obţinerea structurilor prin revenire – **Fig. 7.8.**



a. **b.**

Fig. 7.7. (a; b)

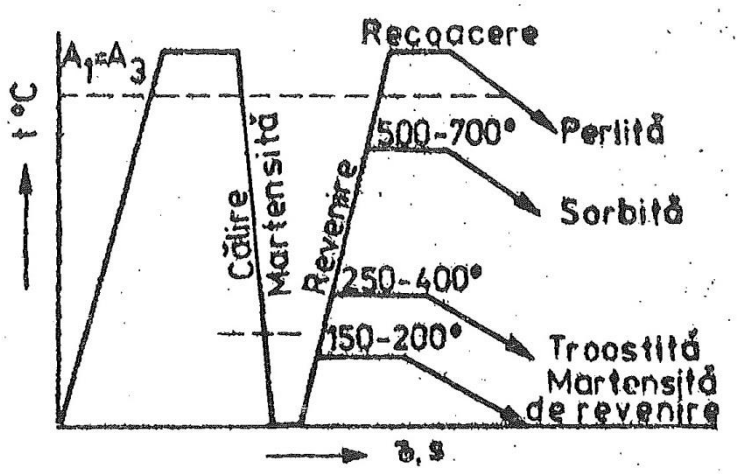


Fig. 7.8

7.10. Transformarea perlitică (austenita în perlită)

Conditii si cinetica transformarii: răcirea lenta a austeniei sub punctul critic $\mathbf{Ar_1}$ (transformare completă):

$$\mathbf{Fe_\gamma\,(C)} \xrightarrow[\text{la răcire}]{\mathbf{t = Ar_1 = Ar_3}} \mathbf{[Fe_\alpha\,(C) + Fe_3C]} \text{ – perlită (amestec ferito-cementitic)}$$

(austenită) (ferită + cementită)

{0,77% C ⟶ 0,02% C + 6,67% C} − dintr-o fază cu un conţinut de **0,77% C** (austenită) se obţine un amestec mecanic de două faze cu conţinuturi diferite de carbon: ferită (**0,02% C**) şi cementită (**6,67% C**).

Specificitate si stadii: **TT** de recoacere; decurge in **3 stadii** (otel eutectoid):

- ***Stadiul I*:** transformarea alotropică $\mathbf{Fe_\gamma\,(CFC) \rightarrow Fe_\alpha\,(CVC)}$; atomii de carbon ai austenitei părăsesc centrul volumului celulei **CFC** şi ocupă locuri interstiţiale, în centrul feţelor celulei **CVC**;

- ***Stadiul II*:** germinarea (nucleaţia) fazei noi de perlită; apar centre de cristalizare cementitice prin separarea carbonului din soluţia solidă martensitică sub formă de carburi;

- ***Stadiul* III:** creşterea noilor grăunţi de perlită prin difuziune. Fineţea perlitei depinde de gradul de suprarăcire a austenitei sub punctul critic $\mathbf{Ar_1}$ (**727 ^{0}C**).

Studiul transformarii perlitice: în condiţii de răcire continuă, respectiv izoterma (suprarăcirea austenitei şi menţinerea acesteia la temperatura de suprarăcire); se obtin structuri ferito-cementitice intermediare între **perlită** şi **martensită**, cu grade de dispersie diferite: **perlită** – *perlită sorbitică, troostită, bainită superioară şi bainită inferioar*ă – **martensită**.

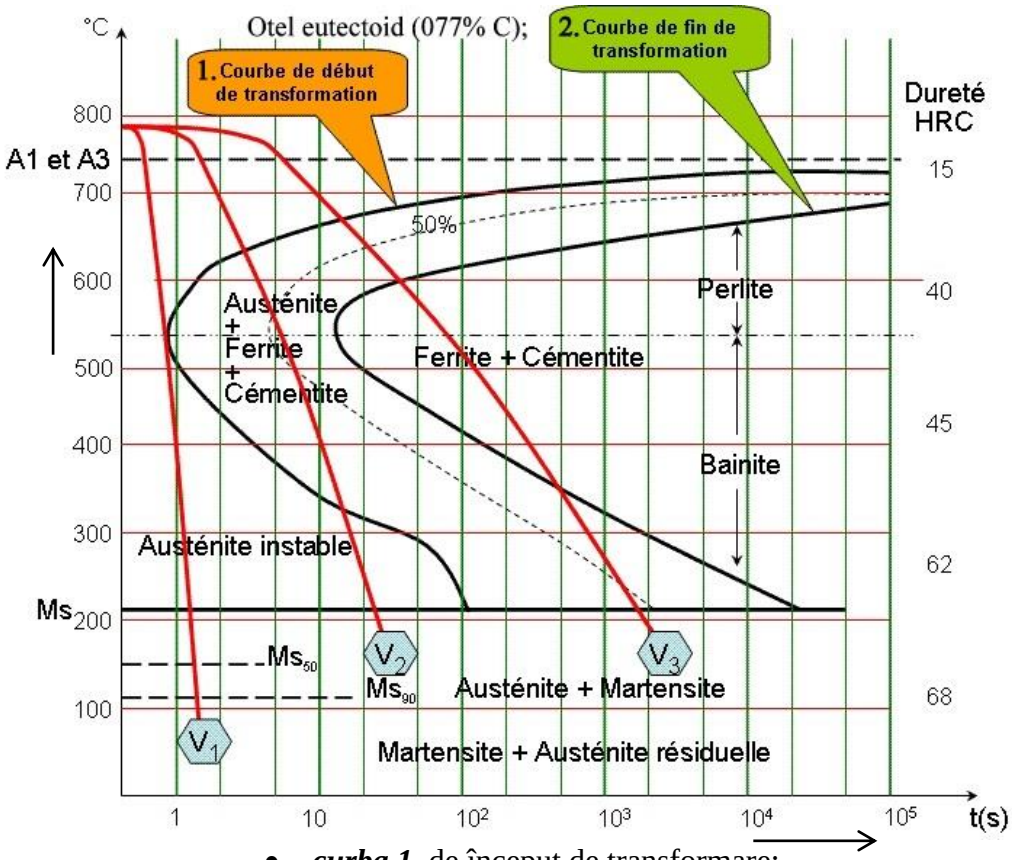
7.11. Transformarea (descompunerea) izotermă a austenitei. Diagrama TTT

Conditii: suprarăcire austenita sub punctul critic $\mathbf{Ar_1}$ (**727 ^{0}C**), urmata de menţinere la diferite temperaturi sub această temperatură.

Particularităţi:

- în timpul transformării apar faze noi: ferita şi cementita (**Fe_3C**);
- stabilitatea austenitei şi durata transformării se reduc cu scăderea temperaturii de menţinere izotermă, până la atingerea unui minim la temperatura de 550-600 0C, numită temperatură de stabilitate minimă a austenitei (în dreptul cotului diagramei **TTT – Fig. 7.9**);
- transformarea începe cu formarea centrelor de cristalizare secundară cementitice, ajungându-se în final la structuri ferito-cementitice de fineţe diferită;
- fineţea structurii finale depinde de gradul de suprarăcire a austenitei sub punctul critic de transformare Ar_1.

Studiul transformării izoterme a austenitei: cu ajutorul diagramelor **TTT**: temperatură-timp-transformare – **Fig. 7.19** (otel eutectoid**)**.



- ***curba 1***, de început de transformare;
- ***curba 2***, de sfârşit de transformare.

Fig. 7.9. Diagrama **TTT** pentru un oţel eutectoid in conditii de racire izoterma a austenitei.
Obs.: V_1, V_2, V_3 – curbe de racire continua cu diferite viteze; ***orizontale rosii*** - **izoterme**.

În succesiunea temperaturilor de menţinere a austenitei suprarăcite (sau racire continua) se obţin următoarele structuri (**Fig. 7.9**): ***perlită, perlită sorbitică, troostită, bainită*** **(superioară şi inferior) şi** ***martensită.***

Cotul curbei de început de transformare din diagrama **TTT** corespunde temperaturii de stabilitate minimă a austenitei (**t_m = 550-600 ^{0}C**), pentru o durată minimă de menţinere (**τ_m**) la temperatura respectivă, după care începe descompunerea austenitei în structuri ferito-cementitice.

7.12. Legătura dintre diagrama izotermă TTT şi vitezele de răcire continuă ale austenitei – curbele 1 la 7 - Fig. 7.10

Conduc şi ele la obţinerea diferitelor tipuri de structuri ferito-cementice.

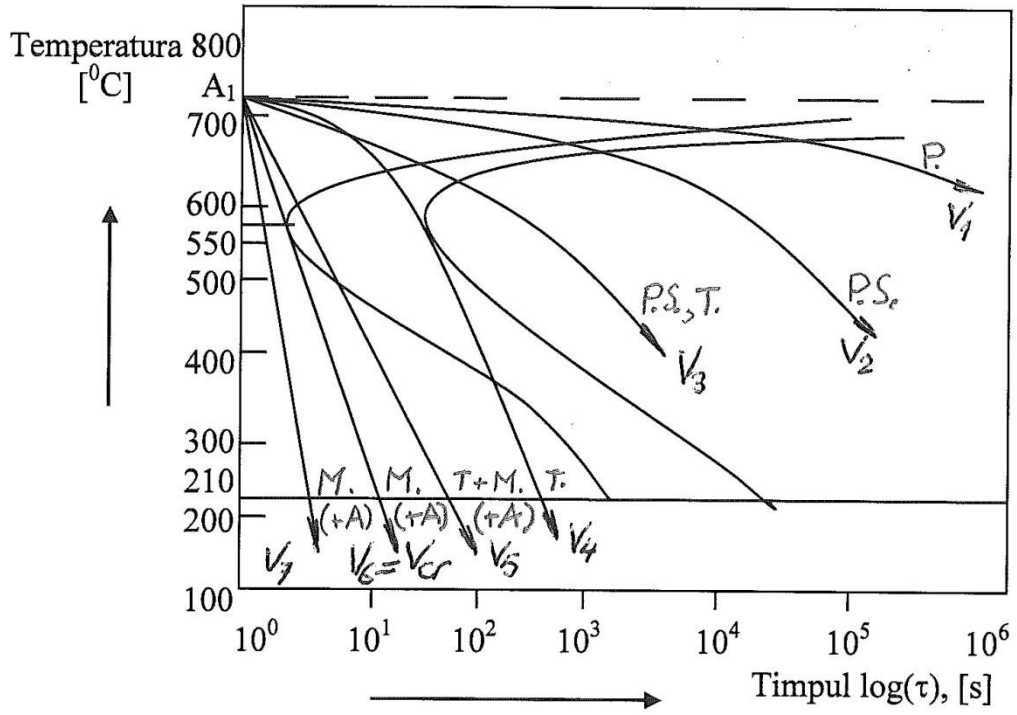


Fig. 7.10. Curbe de răcire (**1** la **7**) si diagrama izotermă **TTT**

Legendă:

- ***curba 4***, tangentă la curba de sfârşit de transformare izotermă a austenitei – ***viteza critică superioară de răcire***;
- ***curba 6***, tangentă la curba de început de transformare izotermă a austenitei – ***viteza critică inferioară răcire***, numită şi **viteză critică de călire** (**v_{cr}**).

7.13. Transformarea martensitică (*austenitei în martensită*)

Conditii: **are loc la răcirea rapidă a austenitei** *(calire)*; transformarea soluţiei solide de austenită **[Fe_γ(C)]** într-o soluţie solidă de **Fe_α** suprasaturată în carbon de aceiaşi compoziţie, numită martensită [**Fe'_α(C)]:**

$$Fe_\gamma(C) \xrightarrow{\text{răcire rapidă}} Fe'_\alpha(C)$$

0,77% C $\longrightarrow$ **0,77% C** – pentru un ***oţel eutectoid***

Caracteristicile transformarii:

- nu depinde de timp ci de temperatura la care este răcită rapid austenita;
- are loc la grade mari de suprarăcire a austenitei, la viteze de răcire mai mari decât viteza critică de transformare (**călire**) – $\mathbf{V_{cr}}$;
- se produce într-un interval de temperatură $\mathbf{M_S - M_F}$, caracteristic fiecărui oţel:
  - $\mathbf{M_S}$ – temperatura de început de transformare, când apar cca. **1%** lamele sau ace de martensită (**v. Fig. 7.10**);
  - $\mathbf{M_F}$ – temperatura de sfârşit de transformare.
- atât $\mathbf{M_S}$ cât şi $\mathbf{M_F}$ depind de compoziţia oţelului şi nu de viteza de răcire; creşterea conţinutului de carbon şi a elementelor de aliere (mai puţin **Al** şi **Co**) coboară valoarea acestor temperaturi;
- este un proces fara difuzie datorită vitezei mari cu care se desfăşoară (**0,002 secunde** pentru fotmarea unui ac martensita);
- transformare incompletă; rămânâne austenită ne transformată - **austenită reziduală** ($\mathbf{A_{rez}}$); pentru un oţel-carbon la **20 ^{0}C - $\mathbf{A_{rez}} \approx$ 20%**.
- cantitatea de $\mathbf{A_{rez}}$ se reduce prin **TT de revenire** după **călire**.

7.14. Transformarea martensitei la încălzire. Revenirea

Scop TT de revenire: se aplica dupa calire pentru inlaturarea structurii in afara de echilibru ($\mathbf{M_c + A_{rez}}$), foarte dura (**62-65 HRC**) şi fragilă, cu tensiuni interne, ce face inutilizabile produsele finite.

Tratamentul de revenire: *încălzire* la o temperatură sub punctul critic $\mathbf{Ac_1}$ ($t_{rev} < 727\ ^0$C), urmata de o *menţinere* suficient de lungă la temperatura si apoi *răcire* în aer liniştit.

Studiul cineticii transformării martensitei la încălzire (**revenire**): prin ridicarea curbei dilatometrice la revenire, care are la baza modificările de volum ce însoţesc transformarea austenitei (**A**) si a martensitei (**M**) – (**A**-volum specific minim; **M**-volum specific maxim):

- creşteri de volum: transformarea austenitei reziduale;
- scăderi de volum: transformarea martensitei tetragonale de călire.

***Structurile de rvenire*: ferito-cementitice** cu grade de dispersie (fineţe) diferite, în funcţie de temperatura de revenire.

Tipuri practice de revenire:

- **Revenire înaltă** (**500-650**) **^{0}C**: martensita de revenire (dura, rezistenta); pentru piese puternic solicitate la uzare, scule, etc
- **Revenire medie** (**300-450**) **^{0}C**: troostita de revenire (rezistenta, elasticitate ridicata); pentru arcuri
- **Revenire joasa (150-450) ^{0}C**: sorbita; pentru piese solicitate in regim *dinamic (roti dintate, arbori, axe s.a.)*

TT de îmbunătăţire (dublu tratament): **[*călire* + *revenire înaltă*]** pentru oţeluri-carbon de calitate (**OLC-uri**) cu ***(0,35-0,65)% C.***

7.15. Călibilitatea oţelurilor

Definire: proprietatea tehnologică care caracterizează comportarea oţelurilor la călire.

Mod de evaluare: prin adâncimea de pătrundere **h** (secţiuni dreptunghiulare) sau raportul $\mathbf{D_n/D}$ (secţiuni circulare) al călirii – **Fig. 7.11 (a si b):**

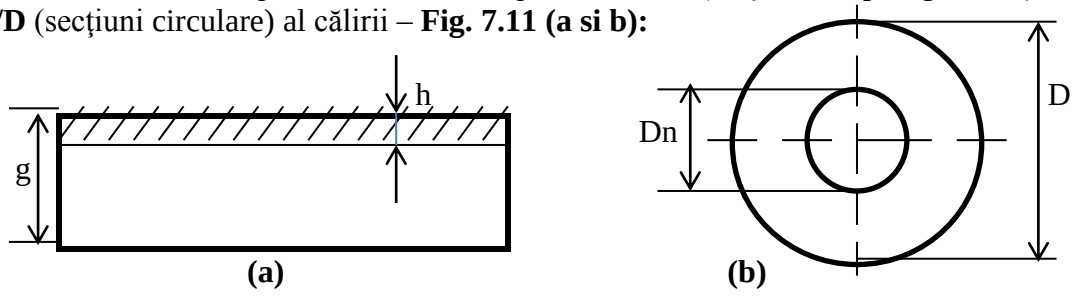


Fig. 7.11

Capacitatea de călire: duritatea maximă ce se realizează în stratul călit, dependenta de conţinutul de carbon al oţelului.

Adâncime practica de călire: distanţa de la suprafaţa piesei până la stratul interior unde structura este cel puţin **50% martensită** şi **50% troostită** - zonă semimartensitică, cu duritatea egală cu media durităţilor celor doi constituenţi structurali: **50 HRC** (duritate semimartensitică).

Parametrii calibilitatii:

- diametrul critic real $\mathbf{D_0}$ - diametrul secţiunii maxime care se călеşte complet într-un anumit mediu.
- diametrul critic ideal $\mathbf{D_\infty}$ - diametrul secţiunii maxime care se călеşte complet într-un mediu de călire ideal
    - intensitatea de răcire a mediului $\mathbf{H} = \alpha/\lambda$ [m^{-1}], unde α - coeficientul de transmitere a căldurii [$w/(m^2 \cdot grd)$], iar λ - conductivitatea termică a mediului de răcire [$w/(m \cdot grd)$].

Domeniul de încălzire în vederea călirii pentru oţelurile carbon − Fig. 7.12: cu 30-50 ^{0}C deasupra punctului critic $\mathbf{Ac_3}$ pentru oţelurile hipoeutectoide, respectiv peste $\mathbf{Ac_1=Ac_3}$ pentru oţelurile hipereutectoide.

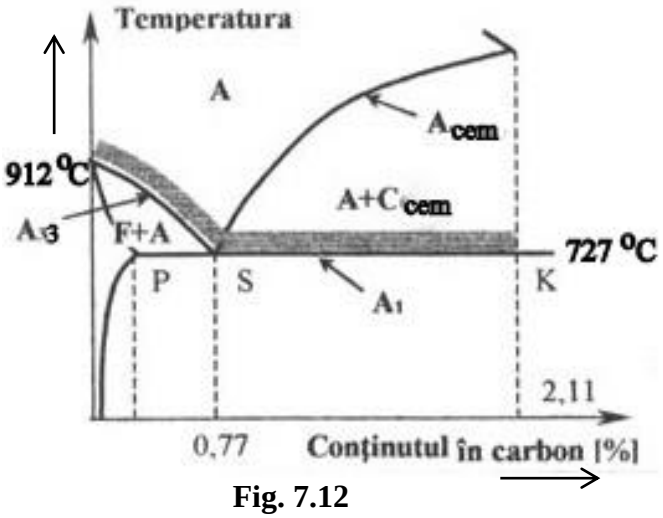


Fig. 7.12

Detereminarea practica a călibilităţii: prin răcirea frontală a unei probe de oţel si ridicarea **curbei de calibilitaete:** ***dutitatea (HRC)*** functie de ***distanta*** de la captul racit al probei **(**metoda **Jominy) - Fig. 7.13.**

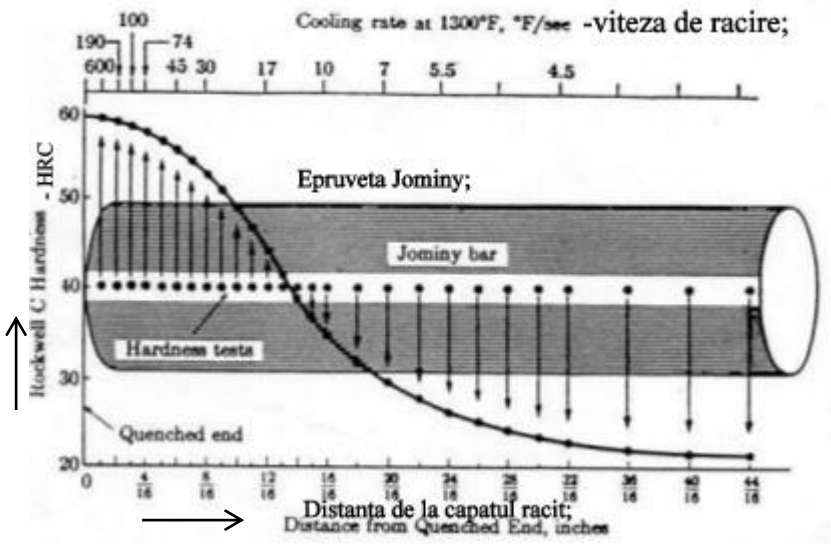


Fig. 7.13

7.16. Tratamente termochimice (TTch)

Definire: tratamente termice complexe, de imbogatire a stratului sperficial al pieselor din otel-carbon cu alte elemente decat fierul, in scopul cresterii duritaii superficiale a produselor tratae.

7.16.1. Cementarea

Definire: imbogatire in carbon (**C**) a stratului superfcial al otelurilor cu continut redus de carbon prin difuze de suprafata.

Procedeul de cementare: [carburare superficială + calire simpla sau un tratament dublu (călire + revenire joasă)]; piesele de importanta mai mica doar se calesc, in timp ce cele mai pretentiose se supun tratamentului dublu (calire si revenire joasa).

Gradul de carburare: optim **0,8% C**, max. **1% C**.

Materiale tratate: oţeluri-carbon cu (**0,1-0,2**)**% C**; oţeluri aliate cu elemente care favorizează procesul, îmbunătăţind călibilitatea şi rezistenţa miezului piesei (**Cr, Ni, Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-Mn).**

Medii de carburare:

- ***solid:*** (mangal, cocs, cărbune animal) + o substanţă activantă (**$BaCO_3$, BaO, CaO, NaCl**) - piese mici şi unicate (roţi dinţate, arbori cu came, came, bolţuri, role);
- ***lichid***: băi de săruri topite încălzite la temperatura de carburare - piese mici, piese de mecanică fină; rezultă suprafeţe foarte curate;
- ***gazos:*** **CH_4**, gaz de sondă, de cocserie, de iluminat, petrol lampant, benzol, metanol, atmosfere controlate; tehnologie modernă, de serie, care se pretează la automatizare.

7.16.2. Nitrurarea

Definire: imbogatirea stratului superfcial al pieselor din otelurilor aliate de imbunatatire cu azot prin difuzie de suprafata.

Efectul de durificare (***68-72 HRC***): formarea de nitruri în timpul menţinerii la temperatură în amoniac (**NH_3**) disociat.

Materiale tratate: oţeluri aliate de îmbunătăţire (călire + revenire înaltă) cu elemente care formează nitruri: ***Cr, Mo, Al, Ni, W, V, Ti, Cr-Al, Cr-Mo- Al***.

Medii de nitrurare: amoniac disociat (**$2NH3 \rightarrow 2N + 3H_2$**) in curent.

Avantajele nitrurării: necesită temperaturi mai scăzute, stratul nitrurat este mai dur (**68-72 HRC**), dar mai puţin fragil; tratate suprafeţe mari, rezistenţă crescută la uzare la cald, la coroziune şi la oboseală.

Dezavantajele nitrurării: necesită instalaţii complexe, durată mare (**zile**), aplicabilă numai oţelurilor aliate cu elemente care formează nitruri.

Se practica si imbogatirea simultana a stratului superficial al pieselor din otel cu **C** si **N**, respectiv cu **C, N** si **S**:

- **cianurare (C** si **N)** − in mediu solid sau lichuid;
- **carbonitrurare** (**C** si **N**) **–** in mediu gazos;
- **sulfocianurare** (**S, N** si **C**) in bai de saruri topite – imbunatairea proprietatilor de suprafata la uzare la cald (antifrictiune) ale otelurilor si fontelor.