4. DEFORMAREA PLASTICA A METALEOR

4.1. Curba conventionala tensiune-deformatie

Sub actiunea fortelor exteioare solidele (metalele) se comporta elasto-plastic.
***Elasticitatea*:** proprietatea solidelor de a suporat modificari de forma si dimensiuni recuperabile/nepermanenete (deformatii elastice) dupa incetarea actiunii fortelor exterioare care le-au produs.
***Plasticitatea*:** proprietatea solidelor de a suferi modificari de forma si dimensiuni nerecuperabile/permanente (deformatii plastice) dupa incetarea actiunii fortelor exerioare.
***Studiul comportarii elasto – plastice*:** cu ajutorul curbei conventionale tensiune – deformatie (**σ–ε**) pentru solicitarea uniaxala la tractiune (intindere) – **Fig. 4.1** – unde:

$$\sigma = F/S_0;\ \varepsilon = \Delta L/\Delta L_0$$

$$S_0 = \pi D_0^2/4;\ \Delta L/\Delta L_0 = (L-Lo)/L_0$$

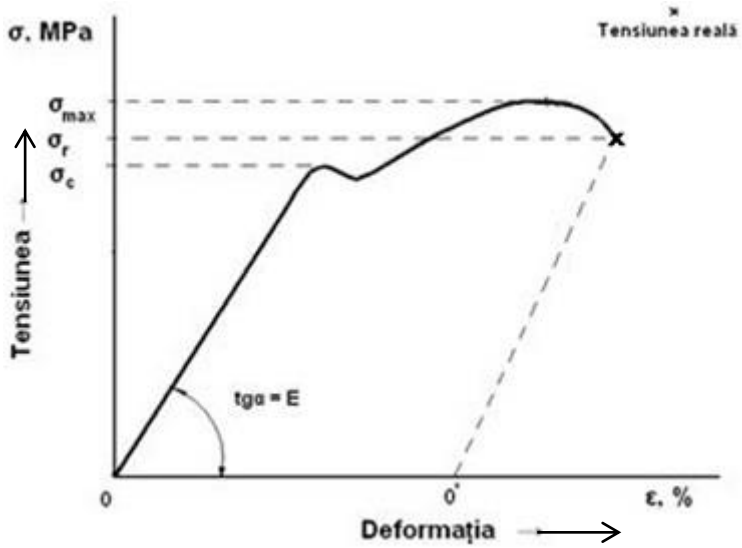


Fig. 4.1

4.2. Deformarea monocristalelor

***Mecanisme*:** prin alunecare si maclare.

4.2.1. Deformarea prin alunecare

***Mecnismul prin alunecare*:** deplasarea reciproca a unei parti din cristal in raport cu restul cristalului dupa anumite plane si directii cristalografice.

- ***Particularitati*:**
  - are loc intotdeauna in plane de densitate atomica maxima (plane de alunecare);
  - deplasarea se produce dupa directii cristalografice de compactitate maxima de atomi (directii de alunecare);
  - are loc dupa mai multe sisteme de alunecare (plane si directii de alunecare), cand tensiunea tangentiala (forfecare) atinge o valoare critica - limita de curgere.

Numarul sistemelor de alunecare la metale (nr. planelor x nr. directii continute):

- **CFC** − ***12 sisteme de alunecare*** (4 plane x 3 directii);
- **CVC** − ***48 de sisteme de alunecare***;
- **HC** − ***3 sisteme de alunecare***.

Aspectul grosier al alunecarii: analoag cu distorsiune produsa intr-un pachet de carti de joc sau fisic de monezi – **Fig. 4.2**.

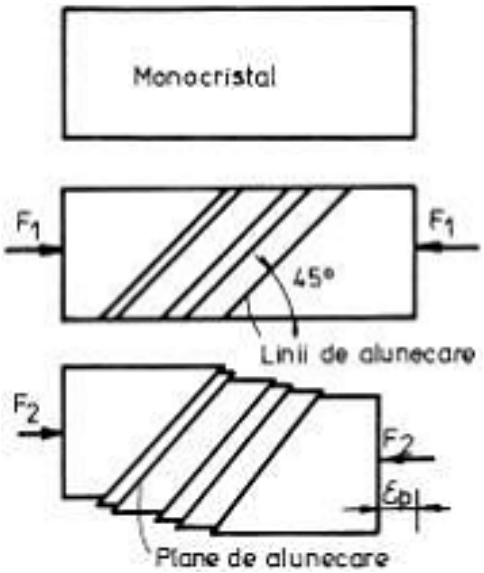


Fig. 4.2

Linii de alunecare (trepte/benzi)**:** intersectiile planelor de alunecare cu suprafata monocristalului, fara distrugerea integritatii acestuai.
Tipuri de alunecari:

- **sincrona** (cristale perfecte, lipsite defecte): deplasarea in intregime a unei portiuni de cristal dupa un plan de alunecare de densitae maxima de atomi (**Fig. 4.3**).

Tensiunea tangentiala teoretica de alunecare sincrona **(τ)** ***cu o distanta interatomica***:

$$\tau = G/2\pi$$

unde: **G** - modulul de elasticitat transversal al mterialului.

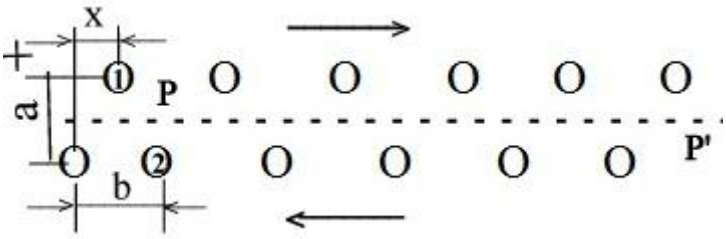


Fig. 4.3

- **asincrona**/**treptata**: cristale reale cu defecte liniare (dislocatii);

Mecanismul de baza al alunecarii asincrone**:** deplasarea relativ usoara a dislocatiilor in planele lor de alunecare sub actiunea unei tensiuni tangentiale exterioare convenabile;

Tensiunea necesara deplasarii unei dislocatii prin cristal (**Nabarro**):

$$\tau_a = 2G/(1-\upsilon)\cdot\exp(-2w/b)$$

unde: υ – coeficientul lui Poisson (cca 0,33 pentru metale); **w** – latimea dislocatiei.

Imaginea alunecarii asincrone la nivelul retelei cristaline plane – **Fig. 4.4.**

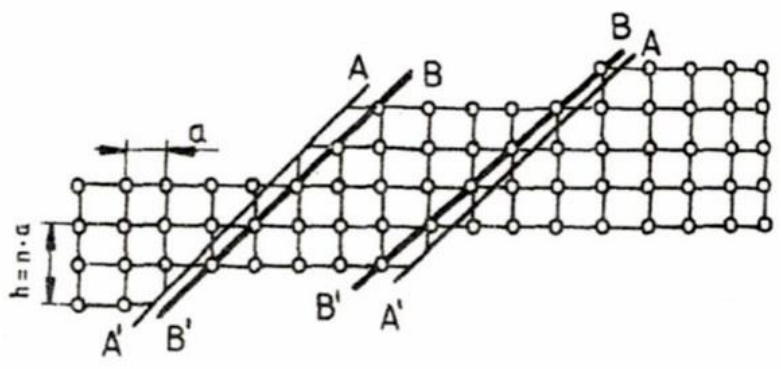


Fig. 4.4

4.2.2. Deformarea prin maclare

***Mecanisms*:** rotirea unei parti din cristal in raport cu restul cristalului in jurul unui plan (**A-A'**) numit paln de maclare (**Fig.4.5**) – cazul deformatiilor mici.

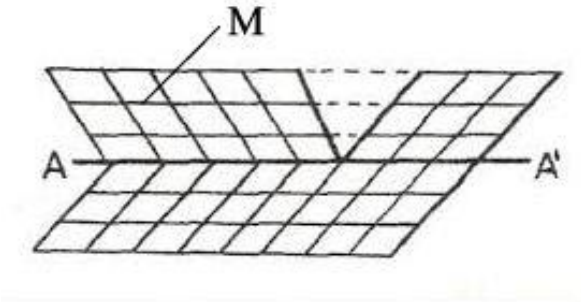


Fig. 4.5

***Consecinte*:** se obtin doua parti simetrice ale cristalului in raport cu planul de maclare (imagine in oglinda); partea de cristal rotita (**M**) - macla de deformare (exista si macle de recoacere).
***Contributie la procesul deformarii*:** are un efect favorabil de reorientare a sistemuelor de alunecare ale cristalelor reale, creand posibilitatea producerii unor noi deformatii prin alunecare.
***Tipuri de macle* - Fig. 4.6.a, b** si **c:**

a. macle mecanice (de deformare), specifice deformarii la rece in sistemul **HC** (***Ca, Zn, Mg, Cd***);
b. macle de recoacere, dupa recoacerea metalelor deformate anterior la rece; specifice metalelor **CFC** (***Cu, Ni, Al, alama α, bronz α,*** Fe_{γ});
c. macle de crestere: apar imediat dupa cristalizare, in metalele cu retea cristalina CFC.

Fig. 4.6.a, b si c

4.2.3. Deformarea agregatelor policristaline

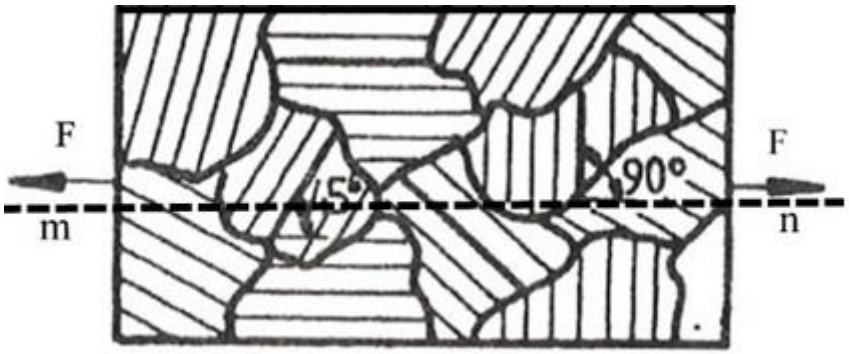
Agregat policristalin (policristal)**:** ansamblu de graunti cristalini (cristalite) separati prin limete de graunti, cu orientare difera de la graunte la graunte, considerat izotrop sub aspectul orientarii cristalografice si proprietatilor (in stare recoapta).
Factorii de influenta asupra deformarii plastice: caracterisiticile grauntilor luati individual (cristale unice) si a limitelor de graunti (deformare itracristalina si intercristalina)

4.2.3.1. Deformarea intracristalina

Mecanisme de producere**:** prin alunecare si maclare
Consecinte**:** modificarea formei si a dimesiunilor semifaricatului supus deformarii.
Factori de influenta**:** marimea grauntilor cristalini (finetea structurii) in conformitate cu relatia lui **Petch** de dependenta a limitei de curger (σ_c) de marimea garuntelui cristalin (**D**):

$$\sigma_c = \sigma_i + k_c \cdot D^{-1/2}$$

unde: σ_c - limita de curgere; σ_i – frecarile interne ce se opun miscarii dislocatiilor; k_c – constanta de curgere.
Contributii la deformare**:** concura atat la o parte din gradul total de deformare a ploicristalului cat si la orientntarea mai favorabilaa anumitor zone ale acestuia in raport cu directia principal de deformare.
Deforrmarea intracristalina la nivel de microstructura **(**mecanism**) - Fig. 4.7:** la inceput se deformeaza grauntii cu orintarea cristalografica cea mai favorabiala in raport cu directia de deformare (**F–F**), adica aceia care fac cu aceasta un unghi de 45^0 (tensiune tangentiala critica de alunecare minima), iar la urma garuntii cu orientarea cristalografica cea mai defavorabila in raport cu tensiune de deformare aplicata din exterior (planele de densitae maxima de atomi la 90^0).



mn - plan teoretic de alunecare;

Fig. 4.7.

Aparitia curgerii plastice**:** cand toti garuntiii sunt in stare de deformare, marcata macroscopic prin modificarea formei si dimesiunilor semifaricatului supus deformarii.
Nu apar modificari de volum, fiecare graunte cristalin suferind o deformatie diferita, procesul fiind ingreunat in mare masura de prezenta limitelor de graunti (obstacole in cale deplasarii libere a dioslocatiilor).

4.2.3.2. Deformare intercristalina

Mecanism: prin alunecarea si rotirea reciproca a grauntilor cristalini pe un asa zis strat de **"fluid"** de o anumita vascozitate, dependent de temperatura si nu atata de marimea gradului de

deformare; ea concura atat la o parte din gradul total de deformare a ploicristalului cat si la orientntarea mai favorabilaa anumitor zone ale acestuia in raport cu directia principal de deformare.

4.3. Ecruisarea metalelor

Definire: fenomenul de crestere a tensiunii tangentiale necesara producerii alunecarii intr-un metal, odata cu cresterea gardului de deformare plastica la rece - **Fig. 4.8.**
***Consecinte*:** cresterea limitei de curgere τ_c (σ_c), rezistentei la rupre (R_m) si duritatii (HB), concomitent cu scaderea proprietailor de plasticitate (alungire, gatuire) si a tenacitatii, scaderea densitatii cu cateva zecimi de procent, inrautatirea conductivitatii electrice, o usoara crestere a coeficientului de dilatare termica, cresterea reactivitatii chimice si scaderea rezistentei la coroziune – **Fig. 4.9**.

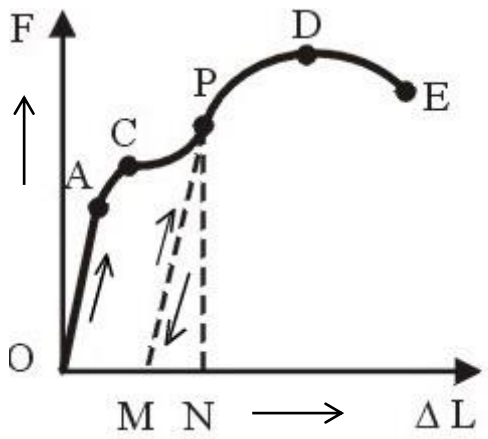


Fig. 4.8

Aplicabilitate in practica*:**. cresterea rezistentei si duritatii materialelor metalice care nu pot fi tratate termic (Cu, alama, oteluri carbon pentru corzi de pian*** s.a.).

4.4. Recristalizarea metalelor

4.4.1. Procesul de recristalizare

***Definire*:** readucerea metalelor si aliajelor acestora la starea initiala de echilibru, necruisata, cu ajutorul tepmperaturii.
Viteza cu care se ajunge la echilibru (a unui proces neechilibrtet termodinamic): guvernata de o lege exponentiala de tip **Arhenius**:

$$v = v_o \cdot \exp(-Q/kT)$$

unde: v_o – consatanta de material; **Q** – energia de activare, dependenta de natura procesului avut in vedere, de natura materialului, marimea gradului de deformare anterior si temperatura; **T** – temperature absoluta [**K**] si **k** – cst. lui **Boltzmann**.
Temperature de inceput de recristalizare (prag de recristalizare), dupa **Bocivar**:

$$T_{rec} \approx 0{,}4T_{top}\ [K]$$

Factorii de influenta asupra temperaturii de recristalizare: marimea gradului de deformare anterior.

4.4.2. Etapele procesului de recristalizare

Etapele rectistalizarii (**Fig. 4.9**):

- **Restaurarea**: restabilirea proprietatilor fizice fara modificarea microstructurii; se reduce substantial deformarea retelei cristaline;
- **Recristalizarea propriu-zisa:** inlocuirea structurii ecruisate prin noi graunti, nedeformati, echiaxiali; dispar toate efectele ecruisarii asupra structurii si proprietatilor.

Temperatur practica de recristalizare: cu cca 200-300^{0}C mai mare decat pragul de recristalizare; ex. – pentru fier (**t_{rec} = cca 450 ^{0}C**) temperatura practica de recristalizare este cuprinsa intre **600-700^{0}C.**

- **Cresterea grauntilor cristalini:** cresterea progresiva si uniforma a grauntilor nou foarmati; sistemul tinde spre starea de echilibru, de energie interna minima, pe seama cresterii grauntilor (micsorarea suprafetei lor specifice).

Modificari structurale la rescristalizare **– Fig. 4.9:**

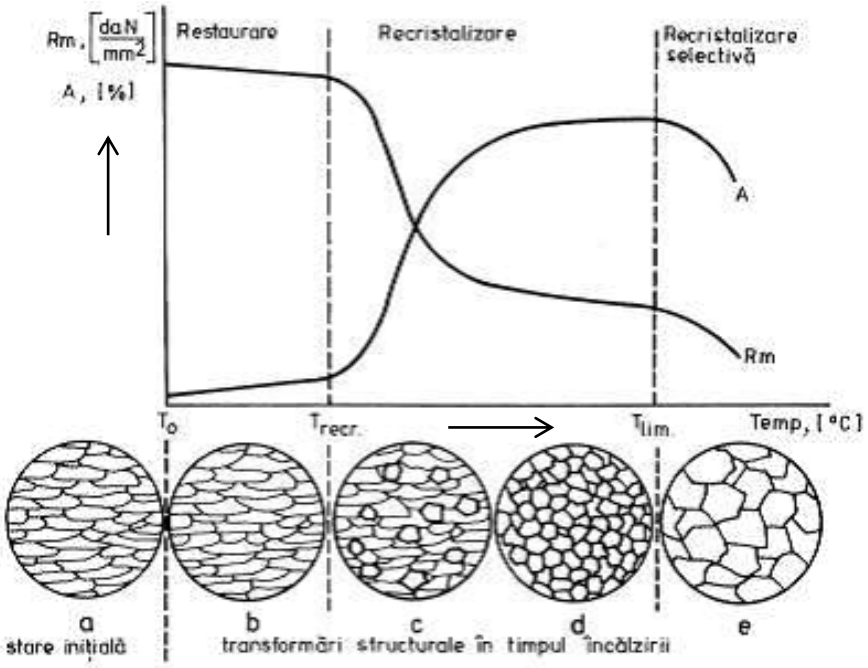


Fig. 4.9

4.4.3. Recristalizarea si factorii de influenta

Factori de influenta si efecte**:** structura initiala, durata si temperature de mentinere, marimea gradului de deformare anterior; influenta lor se manifesta asupra dimensiunii finale a grauntilor recristalizati - **Fig. 4. 11**.

Cu cat structura initiala este mai neuniforma sub aspectul marimii garuntilor cristalini, cu atata noii graunti recristalizati vor fi mai mari; garuntii mai mari vor acapara mai usor grauntii mai mici, rezultatul fiind o structura grosolana, cu proprietati de rezistenta mai scazute, plasticitate mai mare.

Grad criric de deformare (pentru metale **ϵ_{cr} = 3-10% - Fig. 4.10**):, corespunde unei stari energetice apreciabil diferita intre diferitele zone din interiorul materialului deformat; sunt

deformati numai garuntii care au orientarea cea mai favorabiala in raport cu directia principala de deformare.

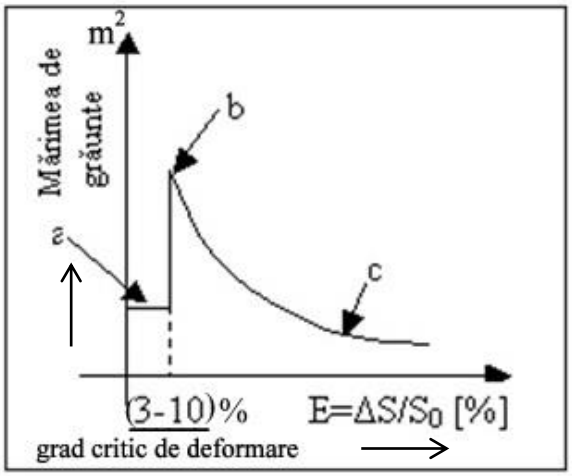


Fig. 4. 10

Pentru scopuri practice se utilizeaza diagramele de recristalizare ridicate intr-un sistem de axe tridimensional – diametru mediu (**D_{med}**), temperatura (**T**) si timp (**t**) **— Fig. 4.11.**

$$D_{med} = f(T, t)$$

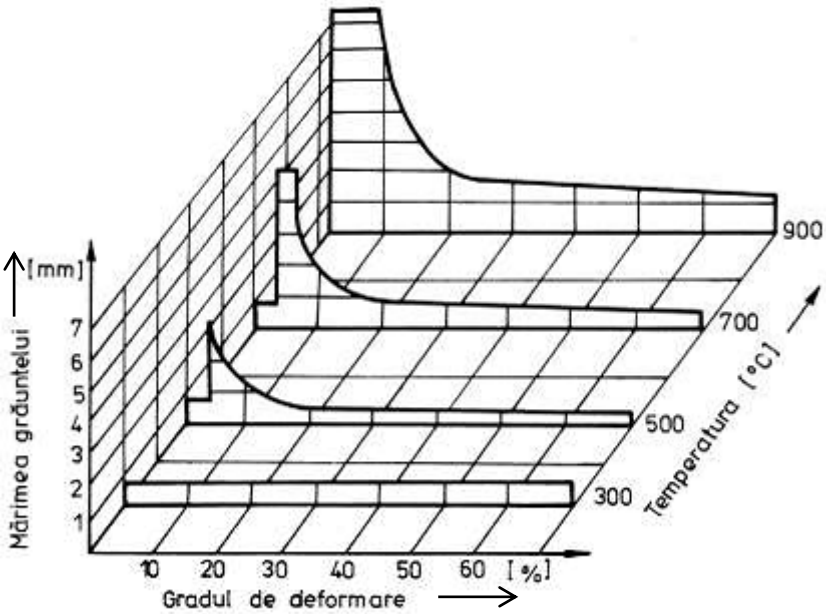


Fig. 4.11

4.4.4. Aplicatiile recristalizarii

In practica, principalele aplicatii ale recristalizarese se refera la urmatoarele procese:

- detensionarea pieselor (cusaturilor) sudate;
- deforamarea la cald (stabilire intervalului temperaturilor de deformare);
- obtinerea monocristalelor (deformari la rece cu grad critic si recristalizari successive si repetate)