

Tehnici de analiză și caracterizare a materialelor

Suport de curs pentru uzul studenților

Ș.I.dr.ing. Lohan Nicoleta Monica

2022

Curs TACM

Conținut curs

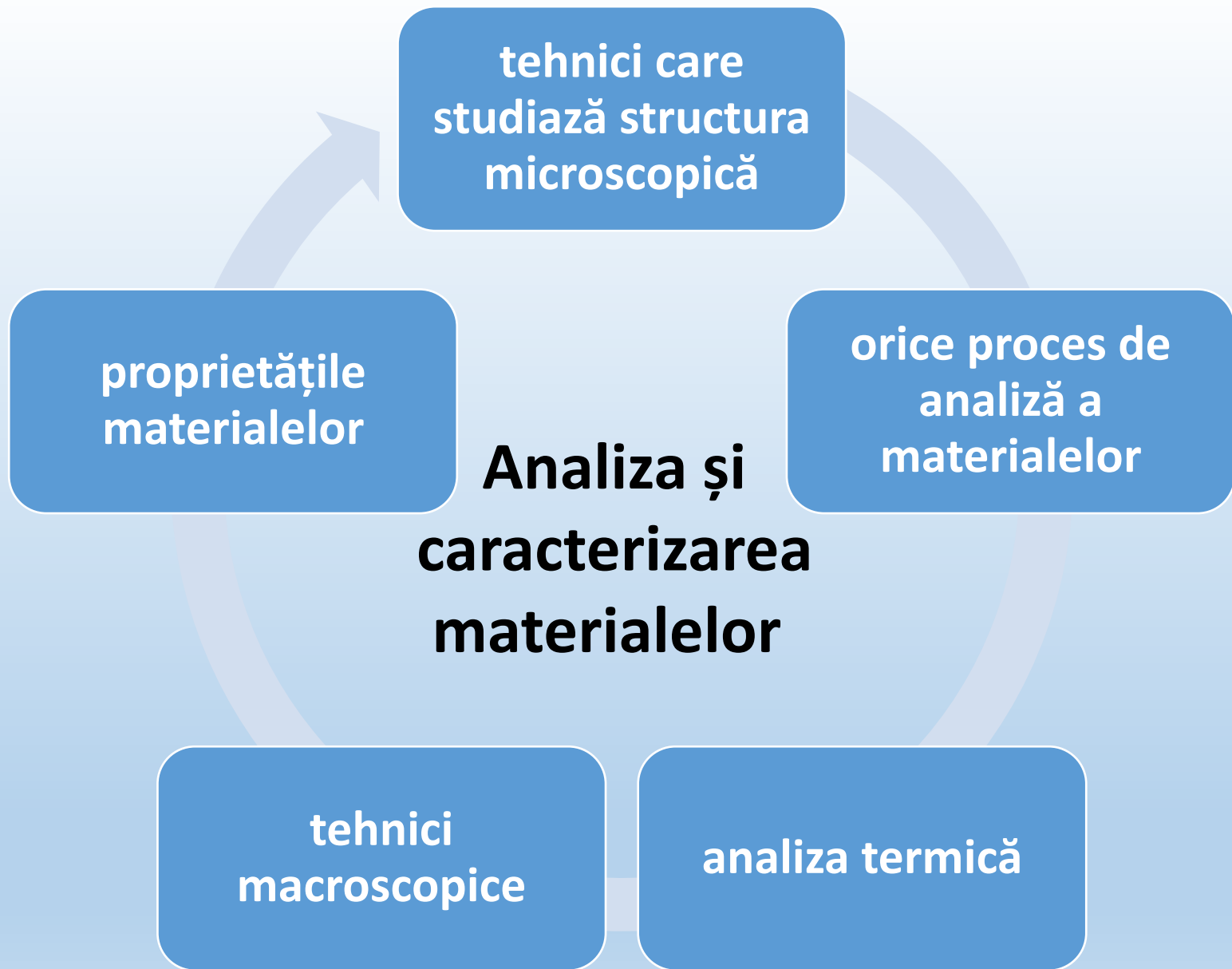
- I. Clasificarea materialelor
- II. Proprietățile materialelor
- II. Metode și echipamente pentru caracterizarea fizică și chimică ale materialelor
- III. Metode și echipamente pentru caracterizarea mecanică și tehnologică a materialelor

Analiza și caracterizarea materialelor

- Analiza și caracterizarea materialelor, atunci când sunt utilizate în știința materialelor, se referă la procesul larg și general prin care se examinează și se măsoară structura și proprietățile unui material
- Este un proces fundamental în domeniul științei materialelor, fără de care nu s-ar putea stabili o înțelegere științifică a ingineriei materialelor

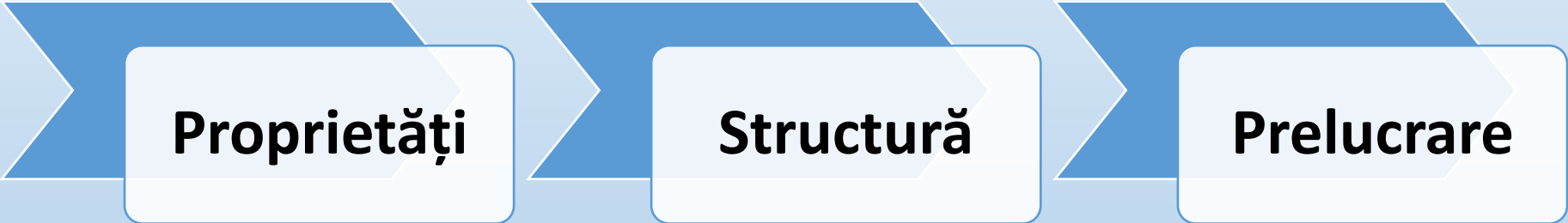
Analiza și caracterizarea materialelor

Domeniul de aplicare al termenului diferă adesea; unele definiții limitează utilizarea termenului la tehnici care studiază structura microscopică și proprietățile materialelor, în timp ce altele folosesc termenul pentru a se referi la orice proces de analiză a materialelor, inclusiv tehnici macroscopice, cum ar fi testarea mecanică sau analiza termică.



Clasificarea materialelor

❖ **Criterii:** proprietăți, aspectul structurii, compoziție chimică.



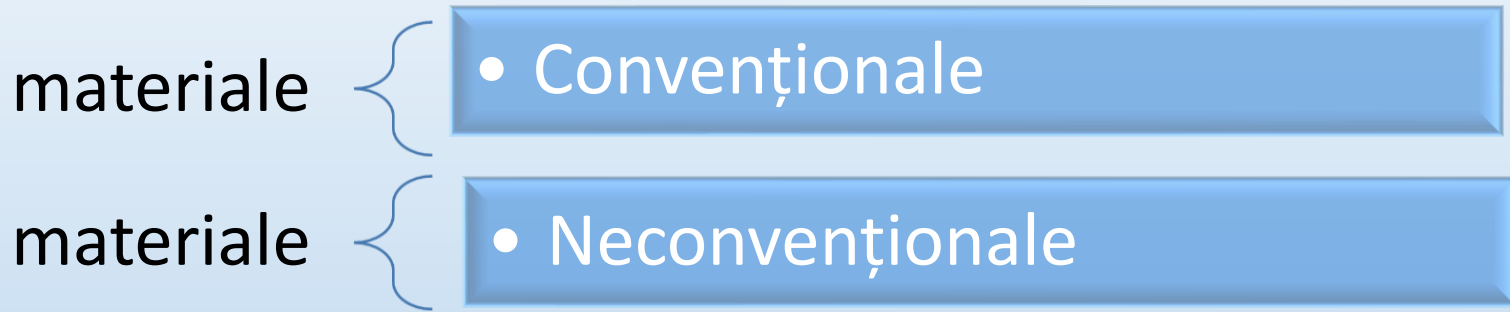
Proprietăți

Structură

Prelucrare

Proprietățile materialelor = aspect structural ce determină comportarea în procesul de prelucrare, respectiv în exploatare.

Dezvoltarea tehnologică:



Extinderea domeniilor de utilizare si dezvoltarea tehnologica a dus i la o alta clasificarea a materialelor:

- materiale traditionale (numite si materiale conventionale)
- materiale avansate (numite si materiale neconvenționale).

Materiale convenționale

Cel mai utilizat criteriu de clasificare este cel al naturii materialului și tine cont și de compoziția chimică, microstructura și proprietățile pe care le prezintă:

- ☐ Metale și aliaje metalice
- ☐ Polimeri organici
- ☐ Materiale ceramice

Materiale convenționale

Metale și aliaje metalice

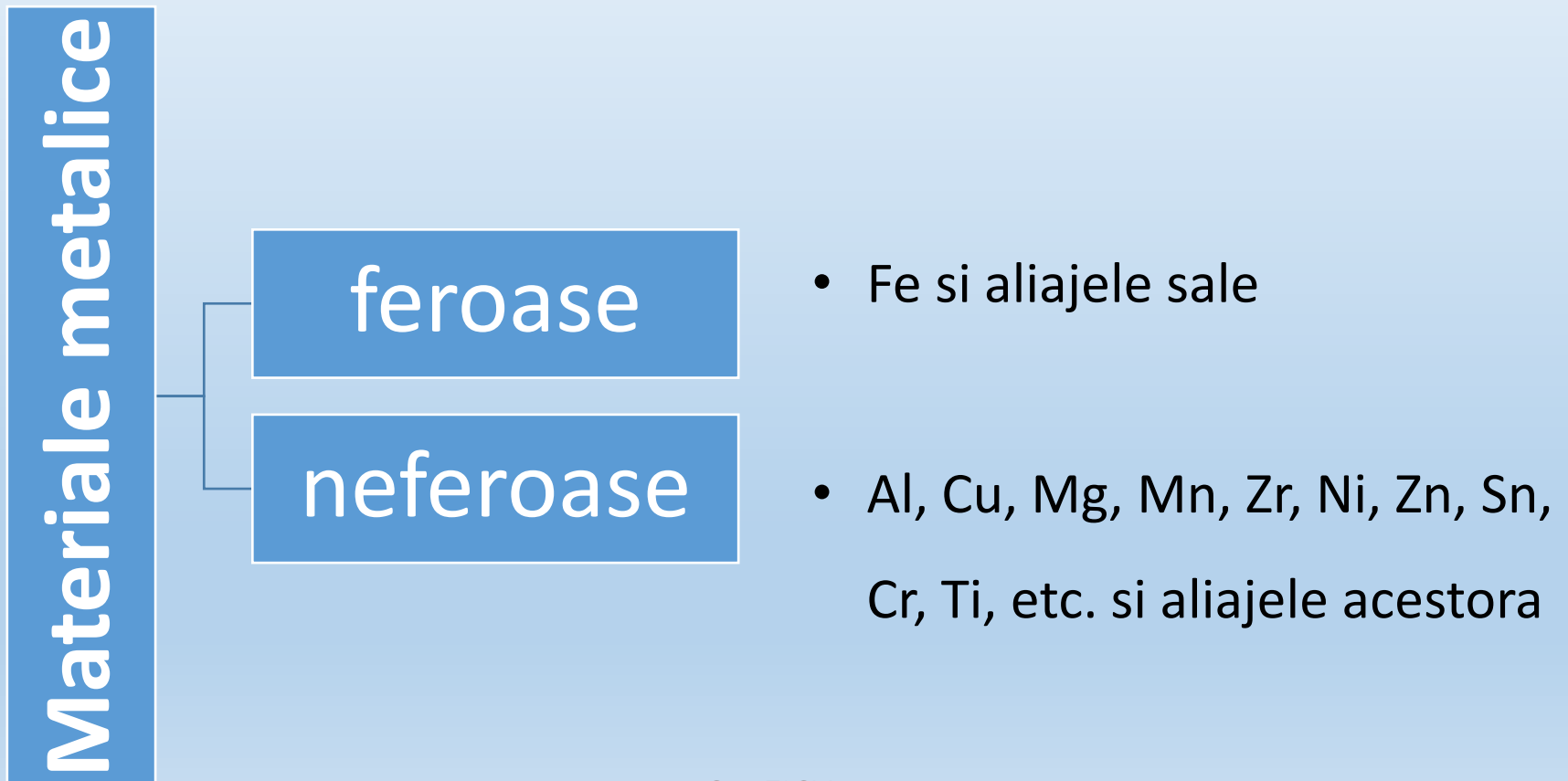
- Materiale care în stare solidă sunt constituite dintr-o singură specie de atomi (metale pure: Fe, Al, Cu) respectiv din combinații de două sau mai multe specii de atomi ai unor elemente metalice (uneori și nemetalice) formând aliaje.

Ex: Metale pure: Fe, Al, Cu etc.

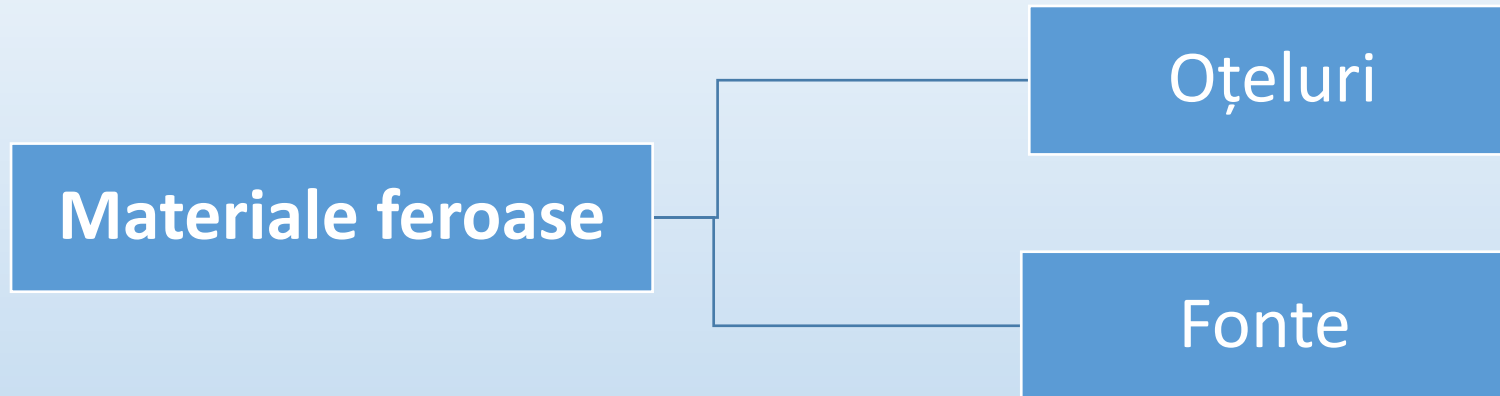
Oțeluri, fonte, alame, bronzuri, siluminuri etc.

Materiale convenționale

Materialele metalice se impart in doua mari categorii si anume in materiale feroase (fierul si aliajele sale: oțelurile si fontele) si neferoase.



Materiale convenționale



- Oțelul - aliaj care contine ca elemente principale fierul si carbonul, avand un continut de carbon sub 2,11 %.
- Fonta – aliaj al fierului cu carbonul care contine mai mult de 2,08 respectiv 2,11%C.

Materiale convenționale

- Consumatorii majori de oțel includ industria construcțiilor, industria automobilelor și a construcțiilor navale, producătorii de cutii alimentare și producătorii de aparate electrice.
- Peste două treimi (aproximativ 70 la sută) sunt folosite numai pentru construcții și transporturi (în principal fabricarea de mașini).
- În fiecare an se fabrică aproximativ 1,8 miliarde de tone de oțel iar jumătate din acesta provine din China.

Clasificare oțeluri

conținutul in elemente de aliere	oteluri nealiate (numite si oteluri carbon)
	oteluri aliate, care pe lângă fier si carbon conțin si alte elemente: nichel, crom, molibden, vanadiu etc.
stare	deformabile (la cald sau la rece) si
	turnate
destinatie	oteluri pentru constructii metalice;
	oteluri pentru constructii de masini;
	oteluri pentru scule aschietoare;
	oteluri cu destinatie speciala (pile, arcuri, rulmenti, etc.).

Clasificare fonte

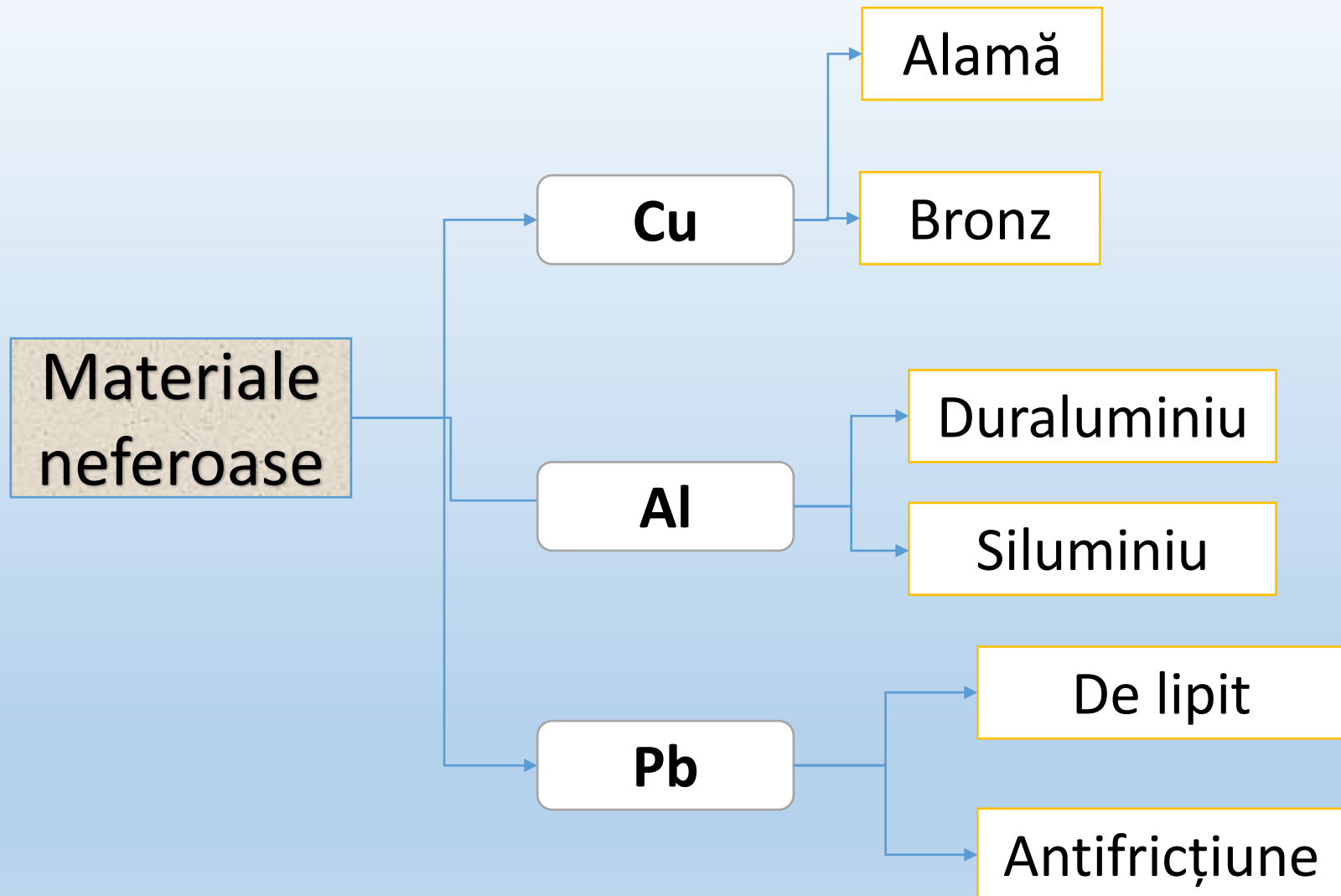
conținutul in elemente de aliere	fonte nealiate (numite si fonte obișnuite)
	fonte aliate, care pe langa fier si carbon contin si alte elemente: nichel, molibden, mangan, wolfram, titan, vanadiu etc.
destinație	fonte rezistente la uzare abrazivă
	fonte antifricțiune
	fonte anticorozive
	fonte refractare
	fonte nemagnetice

Materiale convenționale

Metalele neferoase → greutatea specifică:

- neferoase mai ușoare ca apa: (Li, K, Na);
- neferoase ultraușoare (Ca, Cs, Mg, Be);
- neferoase ușoare (Sr, Ba, Al);
- neferoase semiușoare (Ti, Ge, V);
- neferoaselor grele (Zr, Sb, Zn, Sn, Cr, In, Mn, Nb, Co, Ni, Cu și Bi);
- foarte grele (Mo, Ag, Pb, Tl, Rh, Pd, Hf, Hg);

Materiale convenționale



Materiale convenționale

In tehnica moderna pentru constructii de masini si in special pentru aviatie si rachete se impune folosirea unor aliaje cu greutate specifice mici si in acelasi timp cu rezistente apreciabile, cum ar fi aliajele usoare sau ultrausoare (cu Al, Mg, Be) sau semiuusoare (Ti). In functie de temperaturile de topire foarte diferite metalele si aliajele neferoase isi gasesc multiple aplicatii. De exemplu wolframul are temperatura de topire ridicata si ca urmare se utilizeaza la confectionarea becurilor/lampilor cu incandescenta si a tuburilor electronice.

Materiale convenționale

Polimeri organici

După proveniența ei pot fi clasificați în:

- polimeri naturali (proteine, acizi nucleici, polizaharide, polihidrocarburi);
- polimeri artificiali: obținuți prin modificarea celor naturali (viscoză, celofan);
- polimeri sintetici: obținuți prin reacții chimice pornind de la monomeri.

Materiale convenționale

Polimeri organici cei mai cunoscuți:

- Policlorura de vinil (PVC)
- Polietilena (PE)
- Polistiren (PN)

Materialle convenționale

Polietilena (PE)

- polimer termoplastic semicristalin de culoare albă sau semitransparentă;
- Este materialul plastic cel mai răspândit. Peste 80 de milioane de tone de polietilenă este fabricată în fiecare an. Aceasta reprezintă peste 60% din etena fabricată în fiecare an.

În funcție de construcție și densitate:

- HD-PE – polietilena de înaltă densitate
- LD-PE – polietilena de densitate scăzută

Polietilenele de înaltă densitate - sunt denumite *polietilene tehnice*.

Materiale convenționale

Datorită rezistență bună la impact, HDPE este utilizată pentru:

- ambalare (tăvi, sticle pentru lapte și sucuri de fructe, capace pentru ambalarea produselor alimentare, cutii etc).
- realizarea de bunuri de uz casnic / de consum (containere de gunoi, articole de uz casnic, cutii de gheață, jucării etc.)

LDPE se utilizează în mod special pentru:

- fabricarea recipientelor, sticle, tuburi, pungi de plastic, piese;
- componentele computerului;
- diverse echipamente de laborator turnate.

Materiale convenționale

Policlorura de vinil (PVC)

- material termoplastic de înaltă rezistență;
- aplicații în construcții (profile de construcții, conducte, lambriu etc.), electronice, automobile și alte sectoare.

Materialle convenționale

Polistiren (PN) - polimer sintetic

- polistiren extrudat (spumă XPS) - proprietăți excelente cum ar fi: o bună izolație termică, proprietăți bune de amortizare și greutate scăzută. XPS este utilizat ca material de construcție;
- și polistiren expandat (spumă EPS) - durabilă, puternică și ușoară și poate fi utilizată ca sisteme de panouri izolate pentru fațade, pereți, acoperișuri și pardoseli în clădiri.

Materialle convenționale

Materialle ceramice

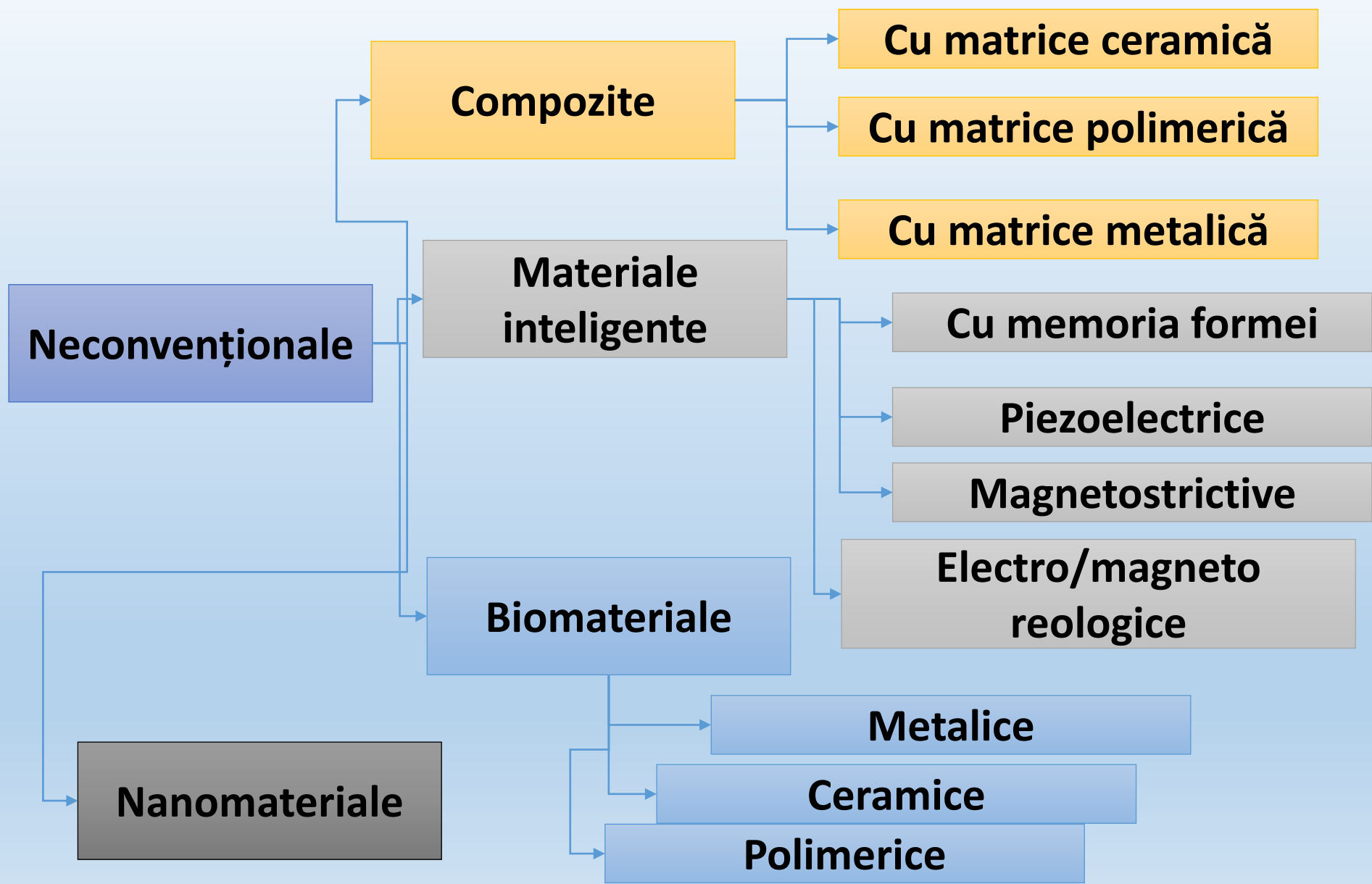
Termenul de ceramică cuprinde o varietate de materiale anorganice nemetalice, în principal policristaline, care sunt în mod obișnuit formate din pulberi. Proprietățile fizice caracteristice sunt obținute printr-un proces de ardere la înaltă temperatură (sinterizare). Pot fi cristaline sau amorse. Prezintă rezistența mecanică și termică mare.

- Materiale izolatoare electrice și termice
- Conductoare termice (diamant, grafit...)
- Sticle minerale.

Materiale convenționale

- Ceramice tradiționale - fabricate din silicat natural și aluminosilicat, minerale compuse din Al, Si și O₂, plus alte elemente (Ca, Mg, Na, K etc.).
- Ceramice avansate - realizate din substanțe chimice sintetice de înaltă calitate și puritate (oxizi, nitriți și carburi). Aplicații: piese rezistente la uzură, produse pentru transport, energie și mediu, sănătate, produse utilizate la temperatură înaltă și aplicații electronice.

Materialie neconvenționale



Materiale neconvenționale

Materiale compozite:

- amestecarea si consolidarea amestecului dintre două sau mai multe tipuri de materiale distincte obținând un material nou cu proprietăți distincte de cele ale fiecărui component in parte.

Materiale neconvenționale

În funcție de natura materialului compozite cu matrice (ce reprezintă materialul de bază):

- metalică;
- ceramica
- polimerică.

Domeniul principal de aplicare a fost inițial industria aerospațială.

În prezent sunt utilizate în toate domeniile ingineriei (spațiu, aeronautică, feroviară, rutieră, navală, mașini-unelte, sport, turbine eoliene, inginerie civilă).

Materiale neconvenționale

Materiale inteligente

- sunt materiale capabile sa-si modifice comportarea, forma, rigiditatea sau frecventa de vibrații sub acțiunea unor stimuli externi.
- Fortele externe ce produc modificarile pot fi generate de variatia temperaturii sau de variatia campului electric sau magnetic care actioneaza asupra lor.

Materiale neconvenționale

- **Materiale cu memoria formei**

Sunt materiale care au capacitatea de a-și schimba forma, revenind chiar la forma inițială, atunci când sunt expuse la o sursă de căldură, de exemplu.

Sunt sub forma materialelor solide, filme sau spume.

Aplicații :

- bioinginerie (ex: implanturi, stenturi, fire pentru aparate dentare etc),
- sisteme de securitate și protecție împotriva incendiilor,
- industria aerospațială (ex: lamelele elicopterelor)

Materiale neconvenționale

- **Materiale piezoelectrice**

- produc o sarcină electrică atunci când este aplicată o tensiune.

Aplicații:

- senzori piezoelectrice în aplicații industriale (senzori de lovire ai motorului, senzori de presiune etc.),
- aplicații medicale (ex: echipamente pentru obținerea imaginilor cu ajutorul ultrasunetelor),
- dispozitive de acționare piezoelectrice utilizate în realizarea echipamentelor electronice etc.

Materiale neconvenționale

- **Materiale magnetostrictive**

- au proprietatea de a transforma energia magnetică în energie mecanică și reciproc. Efectul magnetostrictiv direct reprezintă alungirea sau contracția ce însoțesc magnetizarea spontană a unui material magnetostrictiv.

Aplicații:

- traductoare de mare putere, motoare și actuatori hidraulici, amortizoare pentru a preveni vibrațiile seismice în poduri sau zgârie-nori.

Materiale neconvenționale

- **Materiale electro-reologice si magneto-reologice**

Suspensii coloidale sintetice care, sub efectul câmpurilor electrice, respectiv magnetice, își măresc vâscozitatea, de mai multe ori, în interval de timp de ordinul milisecundelor.

Aplicații:

- industria automobilelor (ex. frâne, ambreiaje, amortizoare etc.);
- producție;
- robotică.

Materiale neconvenționale

Biomateriale - susțin, îmbunătățesc sau înlocuiesc țesuturile deteriorate sau o funcție biologică.

Știința care se ocupă cu studiul materialelor folosite în medicină se numește bioinginerie.

- metalele;
- ceramica;
- plasticul;
- sticla;
- celulele și țesuturile vii.

Materiale neconvenționale

Aplicații:

- Implanturi medicale
- Țesuturi umane regenerate
- Sonde moleculare și nanoparticule
- Biosenzori

Materiale neconvenționale

Nanomateriale

- sunt materiale care sunt fabricate și utilizate la o scară foarte mică (până la 10.000 de ori mai mică decât diametrul unui fir de păr uman).
- sunt dezvoltate pentru a prezenta caracteristici noi (cum ar fi rezistența crescută, reactivitatea chimică sau conductivitatea) comparativ cu același material fără caracteristici la scară nanometrică.

Aplicații:

- electronică, medicină și alte domenii.

Materiale neconvenționale

- **Nanotuburile de carbon** sunt nanostructuri cilindrice formate din alotropi ai carbonului.
- constau din foi laminate de atomi de carbon cu un singur strat (grafen). Pot fi:
- cu pereți unici cu un diametru mai mic de 1 nm;
- cu pereți multipli, constând din mai multe folii de nanotuburi, cu diametre care depășesc 100 nm.

Materiale neconvenționale

- Dezvolta materiale cu rezistență foarte ridicată, cu greutate redusă, care posedă proprietăți electrice și termice foarte bune;

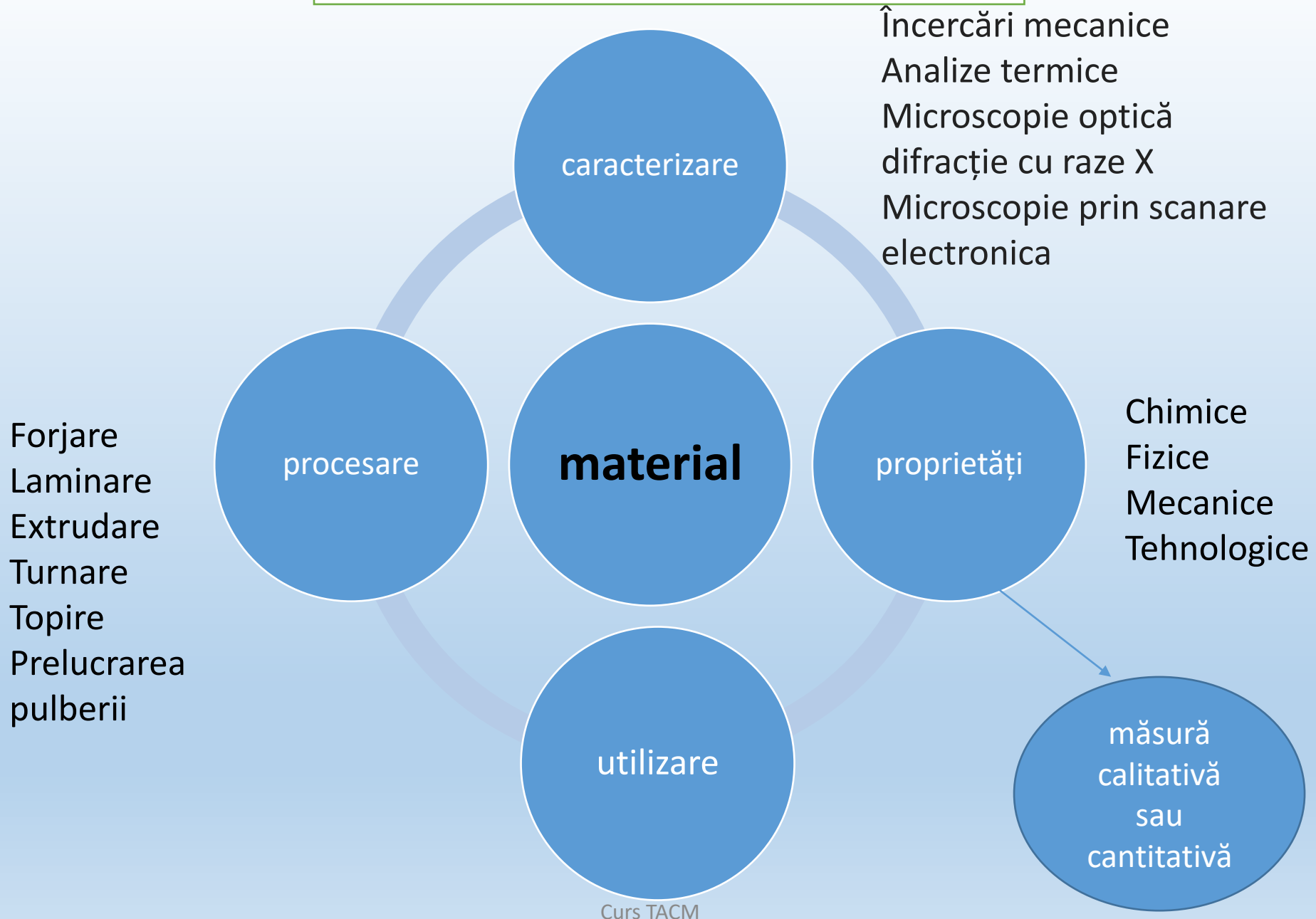
Aplicații ale nanotuburilor:

- Dispozitive electronice;
- Aplicații biomedicale;
- Purificarea aerului și a apei;
- Construcții aerospațiale și transport;
- Bunuri de consum și industriale

Proprietățile materialelor

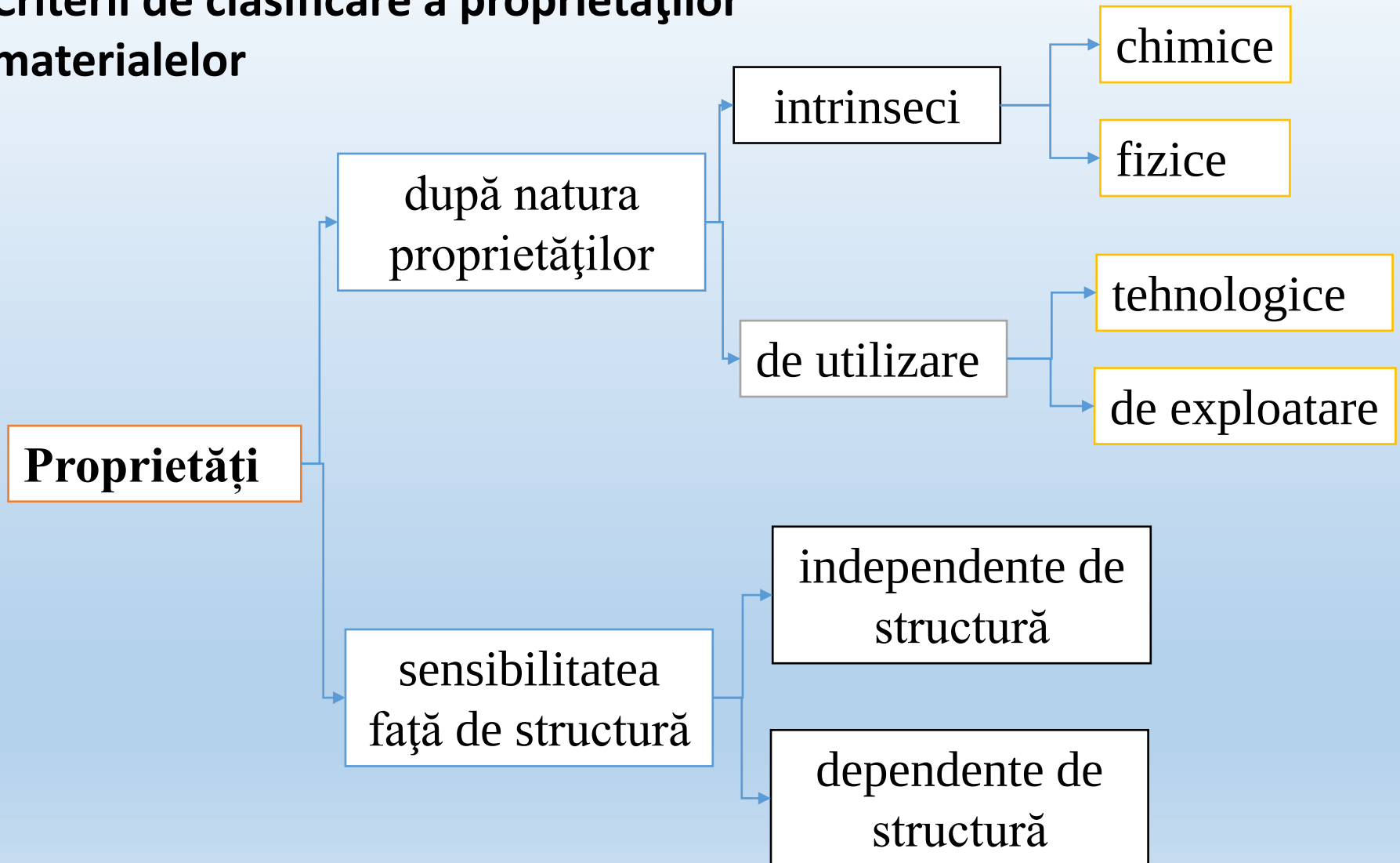
- Materialele se deosebesc între ele prin proprietățile pe care le posedă.
- **elemente principale: proprietățile materialelor, caracterizarea, procesarea și alegerea materialelor.** Aceste elemente sunt corelate, iar schimbările în unul din aceste elemente sunt inseparabil legate de schimbările din celelalte.
- Corelații între structură, proprietăți și performanță, precum și modificarea lor prin sinteză și procesare, constituie tema centrală a ***științei și ingineriei materialelor***.

Proprietățile materialelor

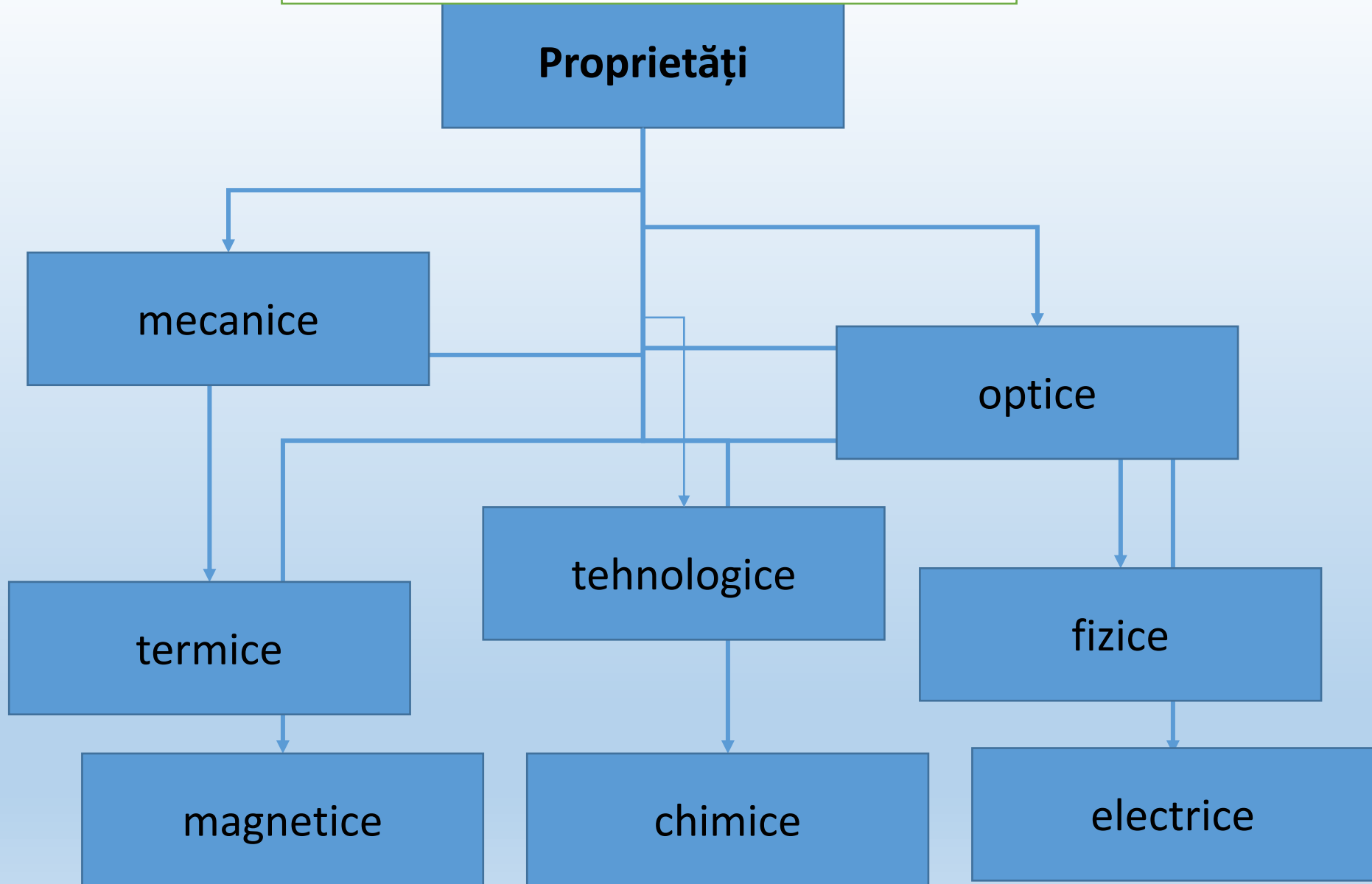


Proprietățile materialelor

Criterii de clasificare a proprietăților materialelor



Proprietățile materialelor



Proprietățile materialelor

fizico-
chimice

mecanice

**Proprietăți
materiale**

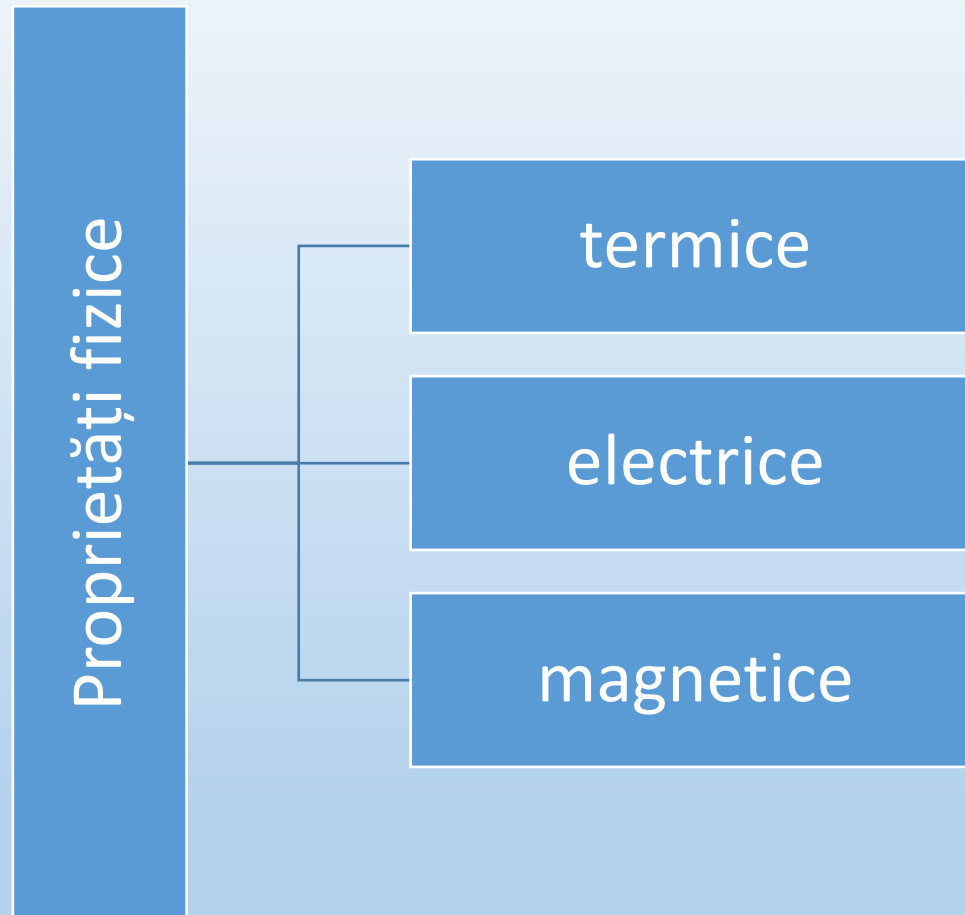
tehnologice

Proprietățile materialelor

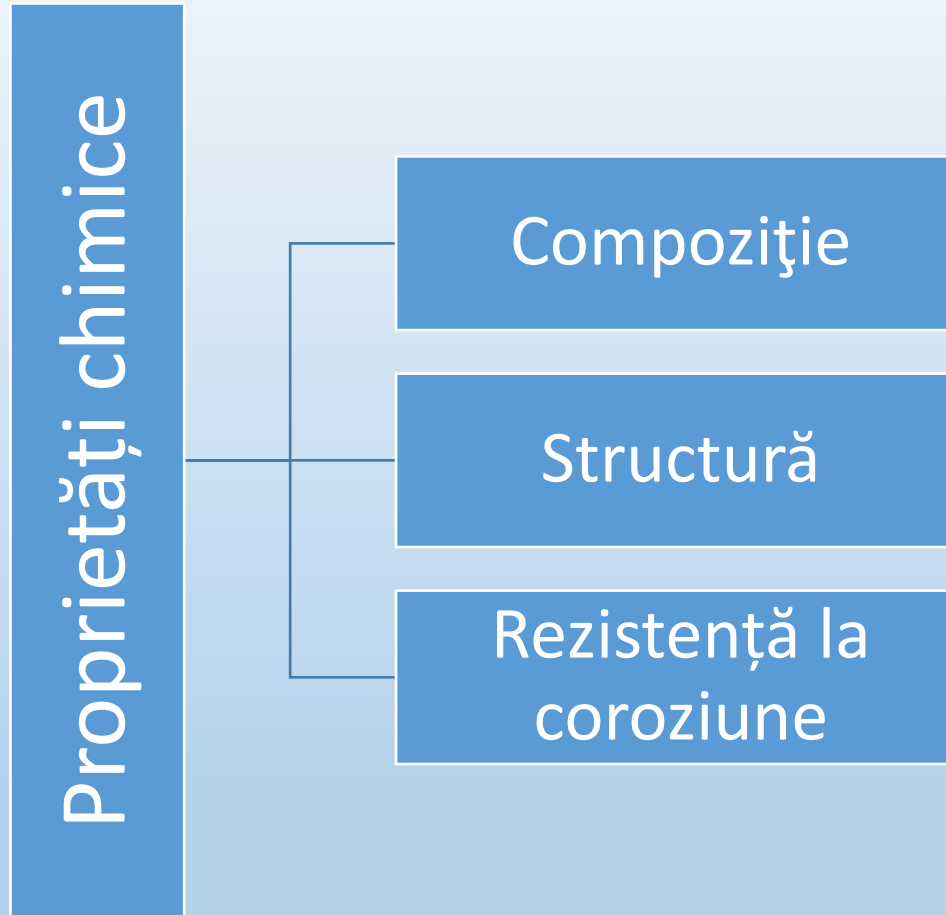
Proprietăți fizico-chimice

- Greutate specifică
- Căldură latentă de topire
- Căldură specifică
- Dilatare termică
- Conductibilitate electrică și termică
- Opacitatea
- Proprietăți magnetice
- Refractaritate
- Rezistență la coroziune

Proprietățile materialelor



Proprietățile materialelor



Proprietățile materialelor

Proprietăți mecanice

- Rezistență la tracțiune
- Reziliență
- Elasticitate
- Plasticitate
- Duritate
- Ecruisare
- Rezistență la oboseală
- Rezistență la uzare

Proprietăți tehnologice

- Maleabilitate
- Ductilitate
- Forjabilitate
- Turnabilitate
- Sudabilitate
- Așchiabilitate
- Călibilitate

Proprietăți fizico-chimice ale materialelor

• **Greutatea specifică** a unui corp este greutatea unității sale de volum. Se măsoară în $[g/cm^3]$ sau $[Kg/m^3]$.

Temperatura de fuziune -

temperatura la care un metal pur trece din starea de agregare solidă în cea lichidă și invers.

✧ ușor fuzibile
(ex.: potasiu – 63,2 °C)



✧ foarte greu fuzibile (ex.: wolfram - 3422° C)



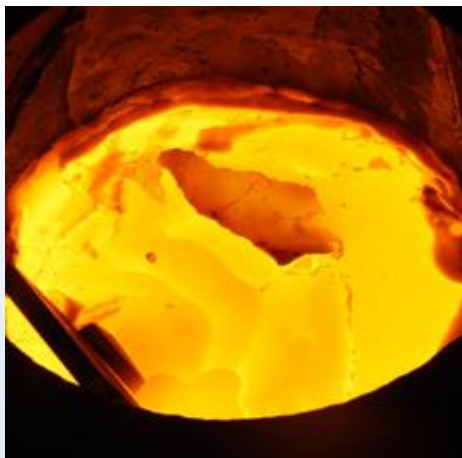
- **OPACITATEA** capacitatea materialelor de a absorbi complet radiația luminoasă datorită electronilor din benzile de energie



LUCIUL METALIC proprietatea unor metale de a reflecta în întregime toate lungimile de undă din spectrul luminos

- **CULOARE.** Marea majoritate a metalelor în stare compactă reflectă aproape în întregime toate radiațiile din domeniul vizibil și din această cauză sunt albe-argintii. Datorită proprietății de absorbție selectivă, câteva metale sunt însă colorate





Căldura latentă de topire (solidificare) -
cantitatea de căldură necesară topirii
(solidificării) unui kg de metal (J/kg).

Dilatarea termică - proprietatea
metalelor de a-și modifica
dimensiunile la variația temperaturii.

Căldura specifică - cantitatea de căldură
necesară varierii cu un grad a temperaturii
unui kg de metal (J/kg grad).



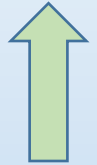
Ag, Cu



Conductibilitatea termică -
proprietatea metalelor de a
transmite căldura termică
[J/m x sec x grad]

Pb, Mg

Ag, Cu, Au



Conductibilitatea electrică
- proprietatea metalelor de a
transmite curentul electric

Hg, Ti

Supraconductibilitatea -
proprietatea unor materiale de a
nu mai opune rezistență la
deplasarea sarcinilor electrice.

Magnetismul - proprietatea materialelor de a prezenta însușiri magnetice.



DIAMAGNETICE

slab respinse de câmpul magnetic

Cr

Bi

Mn

Cu

PARAMAGNETICE

slab atrase de câmpul magnetic

Al

K

Mg

Pt

Zn

Au

Ag

FEROMAGNETICE

puternic atrase de câmpul magnetic

Fe

Co

Ni

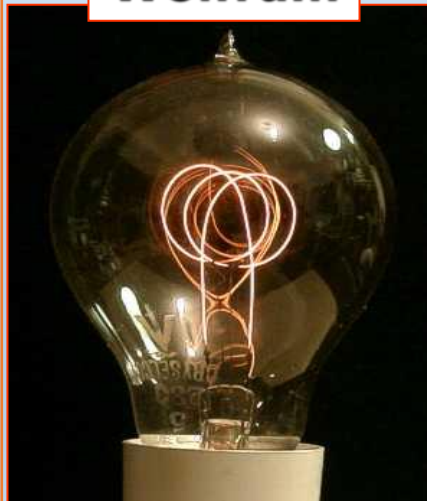
Gd

Rezistena la coroziune – proprietatea metalelor de a rezista la acțiunea distructivă a agenților chimici și atmosferici.



Refractaritatea – proprietatea unor materiale de a-și păstra rezistența mecanică și de a nu oxida la temperaturi ridicate.

Wolfram



Reniu



Molibden

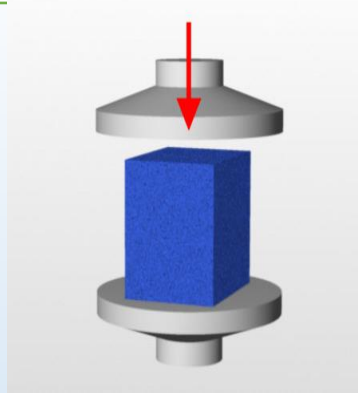


Proprietăți mecanice ale materialelor

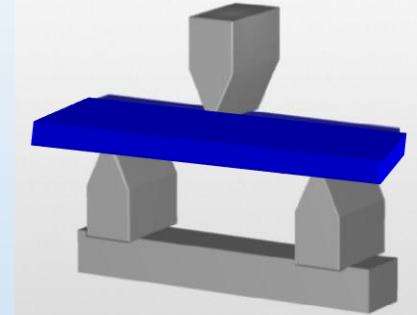
**Rezistența
la tracțiune**



**Rezistența
la compresiune**

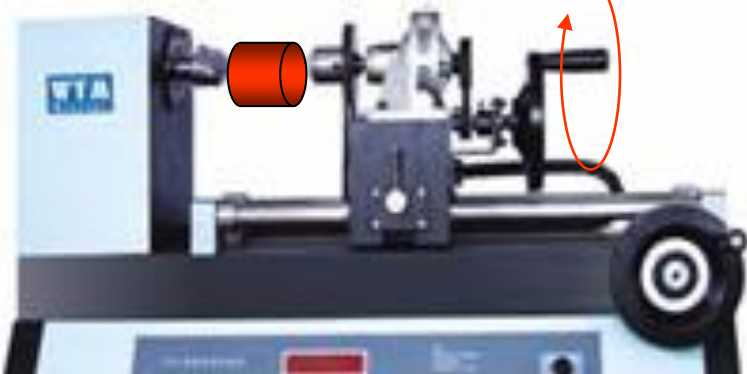


**Rezistența
la încovoiere**

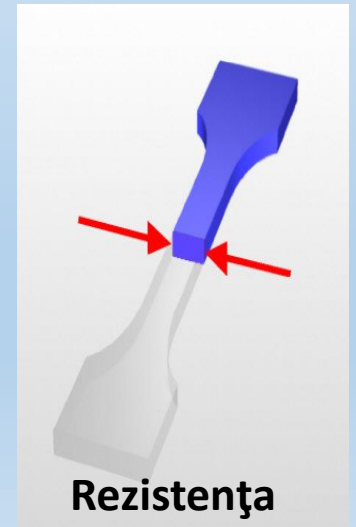


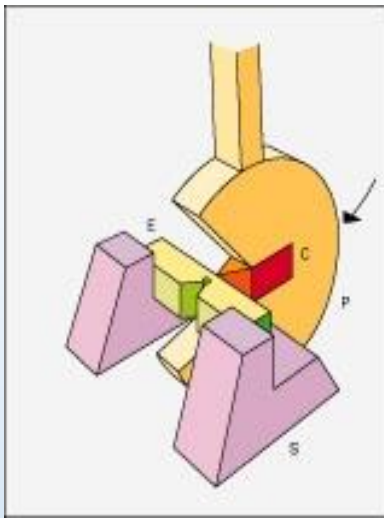
**Rezistența mecanică
la rupere –**
capacitatea
materialelor de a se
împotrivi la acțiunea
forțelor exterioare
care tind să le
distrugă.

**Rezistența
la răsucire**



**Rezistența
la forfecare**

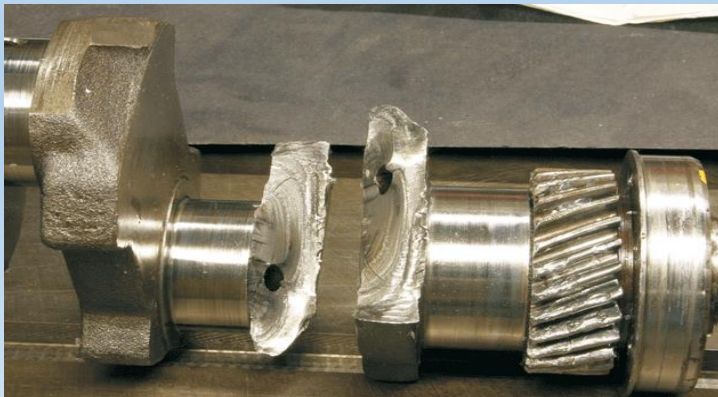
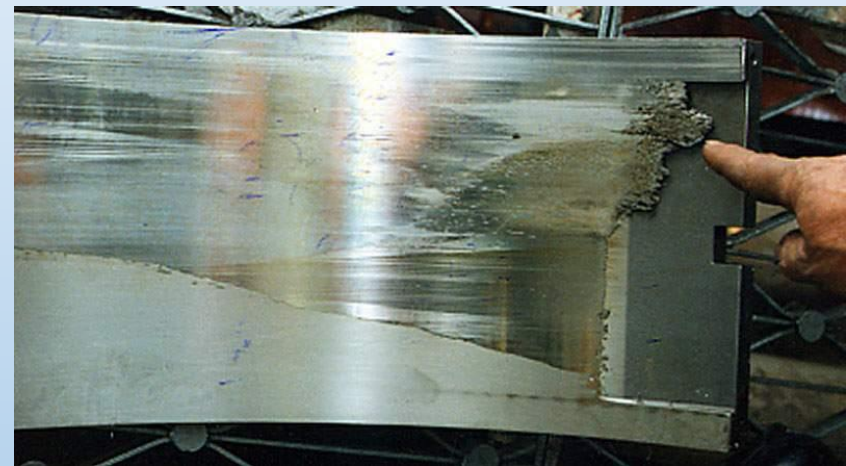




Rezistența la încovoiere prin șoc (reziliența) – proprietatea materialelor metalice de a rezista la acțiunea sarcinilor dinamice de încovoiere.

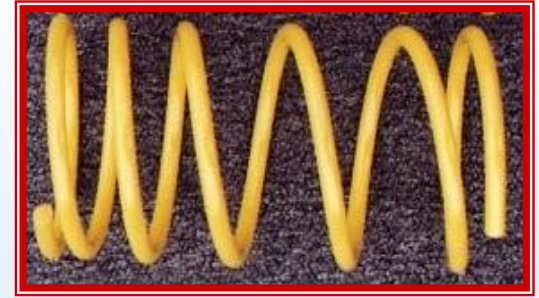


Rezistența la oboseală - proprietatea materialelor de a rezista la acțiunea unor sollicitări variabile ciclice.



Rezistența la uzare - proprietatea materialelor metalice de a rezista la acțiunea de distrugere prin frecare a suprafețelor acestora.

Elasticitatea - proprietatea materialelor metalice de a reveni la forma și dimensiunile inițiale după încetarea acțiunii solicitării exterioare care a produs deformarea.



Plasticitatea - proprietatea materialelor de a deforma sub acțiunea sarcinilor exterioare fără a-și modifica volumul și fără a reveni la forma inițială după dispariția solicitării.

Revenirea elastică - proprietatea materialelor metalice de a-și recupera în timp o parte din deformația permanentă rămasă după încetarea bruscă a sarcinii.

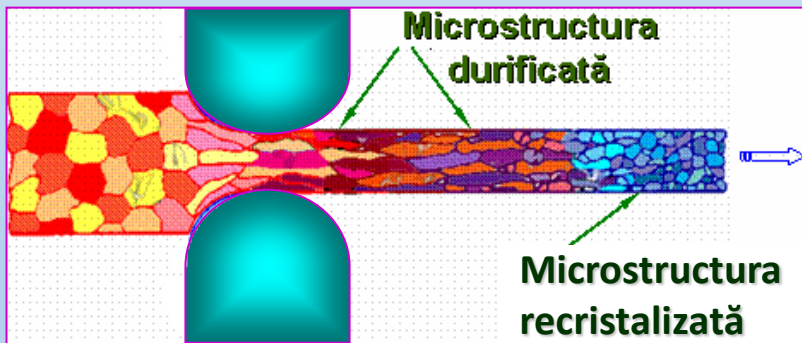
Relaxarea plastică - proprietatea materialelor metalice de a prezenta o scădere a tensiunilor în timp sub deformația constantă.

Tenacitatea - proprietatea materialelor metalice de a rezista la solicitări exterioare statice și dinamice un timp indelungat, deformandu-se mult inainte de a se rupe.



Fragilitatea - proprietatea materialelor metalice de a se rupe brusc sub acțiunea solicitărilor exterioare fără a suferi în prealabil deformații plastice variabile.

Curgerea lentă (fluajul) - proprietatea materialelor metalice de a se deforma lent și progresiv în timp sub acțiunea unor sollicitări constante.



Ecruisarea - proprietatea materialelor metalice de a-și mări rezistența mecanică în urma deformaițiilor plastice la rece. Prin ecruisare intensă materialele devin fragile.

Proprietăți tehnologice ale materialelor

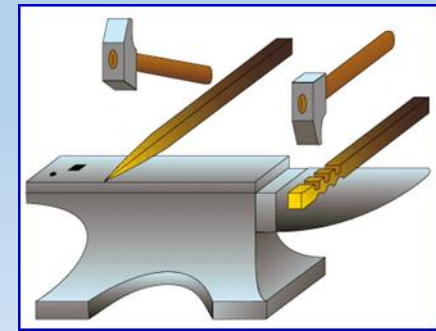
Maleabilitatea - proprietatea materialelor metalice de a putea fi trase în foi subțiri prin deformare plastică la rece

Ductilitatea - proprietatea materialelor metalice de a putea fi trase în foi subțiri prin tragere sau trefilare, fiind condiționată de coexistența tenacității și maleabilității.



Foto 9

Forjabilitatea - proprietatea materialelor metalice de a putea fi supuse prelucrării prin deformare plastică la cald, de a opune o rezistență cât mai scăzută la deformarea la temperaturi joase, suportând modificări substanțiale de formă fără să se rupă.



Turnabilitatea - proprietatea materialelor metalice de a se putea turna în forme.

- Fluiditate;
- Contracție.



Sudabilitatea - proprietatea materialelor metalice de a se îmbina prin încălzire locală până la starea plastică sau topită, cu sau fără adaos de alte materiale, cu sau fără aplicarea unei presiuni mecanice.

Așchiabilitatea - proprietatea materialelor metalice de a putea fi prelucrate prin așchiere cu ajutorul sculelor tăietoare (cuțite, burghie, freze, tarozi, filiere, pietre abrazive), folosind eforturi cât mai scăzute și consumuri minime de energie în scopul obținerii de produse finite.



Călibilitatea - proprietatea materialelor metalice de a se căli pe o adâncime mai mare sau mai mică sau, cu alte cuvinte, proprietatea unor materiale de a deveni mai dure în urma unui ciclu termic de forma încălzire-meninere-răcire.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Analiza termică

- ramură a științei materialelor care urmărește determinarea efectelor termice care însoțesc transformările din structura materialelor, a temperaturilor la care se produc aceste transformări și a mărimii acestor efecte;
- grup de tehnici în care o proprietate fizică a unei substanțe sau/și produsele de reacție ale acesteia este măsurată ca o funcție de temperatură, substanța fiind supusă unei încălziri/mențineri/răcirii controlate;
- o sumă de mijloace de investigare prin care se face legătura între proprietățile fizice și structură.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

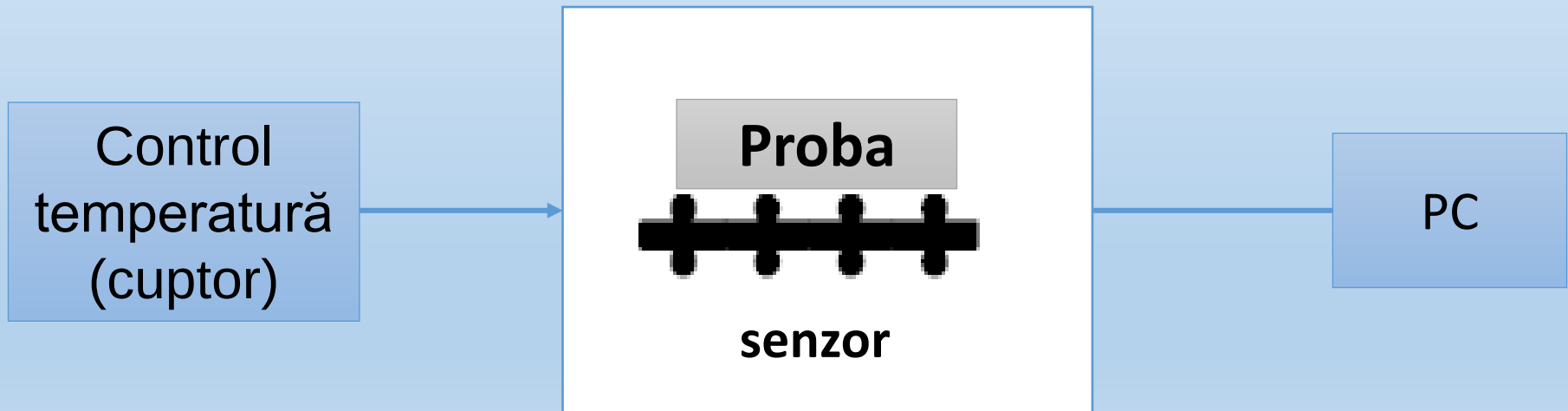
Proprietăți ale materialelor ce pot fi determinate cu analiza termică:

- Temperatura (topire/cristalizare, transformare, descompunere etc.)
- Rezistență la șoc termic
- Coeficient de dilatare/contractie
- Proprietăți mecanice
- Proprietăți optice
- Proprietăți electrice
- Proprietăți magnetice

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Principiul de bază al analizei termice

Proba de analizat este introdusă într-o incintă cu temperatura controlată. Modificarile ce apar în proba sunt analizate cu un dispozitiv corespunzător. Datele sunt trimise către un calculator care trasează un grafic al parametrilor măsurați.



Caracterizarea materialelor prin analize termice

Tehnici de analiză termică și proprietăți ale materialelor studiate de acestea

PROPRIETĂȚI MĂSURATE	TEHNICA DE ANALIZĂ TERMICĂ	ABREVIERE
Temperatura	Analiză termică diferențială	DTA
Entalpia	Calorimetrie diferențială cu baleiaj	DSC
Dimensiunea	Termodilatometrie	TD

Caracterizarea materialelor prin analize termice

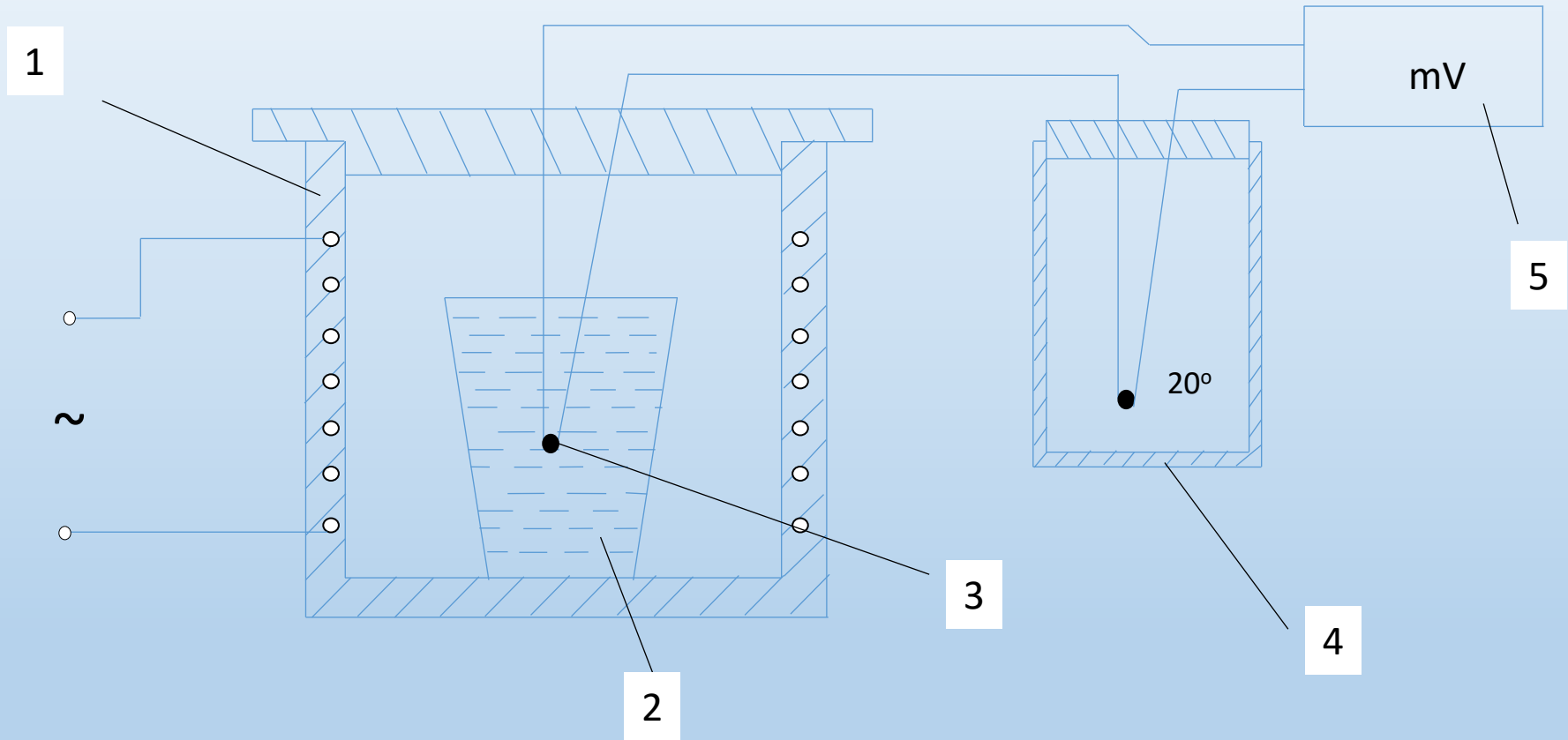
PROPRIETĂȚI MĂSURATE	TEHNICA DE ANALIZĂ TERMICĂ	ABREVIERE
Proprietăți mecanice	Analiză termomecanică	TMA
	Analiză mecanică dinamică	DMA
Masa	Termogravimetrie	TG
Proprietăți magnetice	Termomagnetometrie	TM
Proprietăți optice	Termooptometrie	TO
Proprietăți electrice	Termoelectrometrie	TE

Analiza termică directă

- AT directă este utilă în studiul aliajelor metalice supuse proceselor de încălzire și / sau răcire. **Transformările** de fază care au loc într-un sistem dat la încălzirea sau răcirea lui cu o viteză constantă sunt însoțite întotdeauna de o modificare a conținutului caloric al sistemului, care poate fi pus în evidență prin construirea unei diagrame în care se reprezintă grafic variația temperaturii cu timpul.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Analiza termică directă

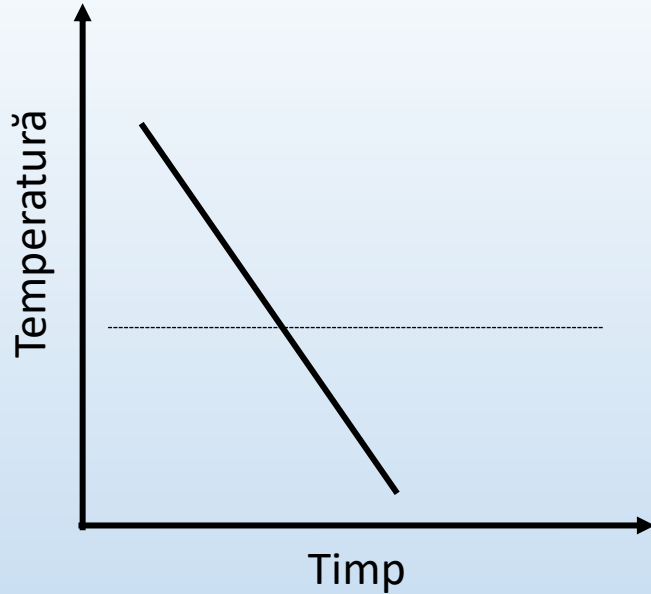


Schema de principiu a instalației de analiză termică directă

Analiza termică directă

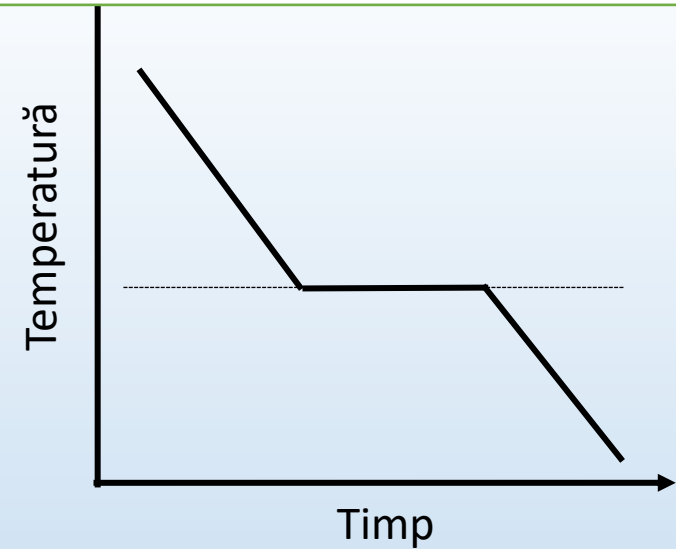
- Trasarea curbelor de încălzire/răcire în cazul AT directe necesită o instalație ca cea prezentată în figura anterioară compusă dintr-un cuptor electric (1) în care se introduce proba de analizat (2), un termocuplu în contact cu proba (3), o încălțită cu temperatura constantă (20 grade) (4) pentru capatul rece al termocuplului și un milivoltmetru (5) ce indică temperatura probei. Pentru a construi cât mai precis curba de încălzire/răcire, înregistrarea temperaturii se face la intervale de timp cât mai mici (5-10 s).

Caracterizarea materialelor prin analize termice

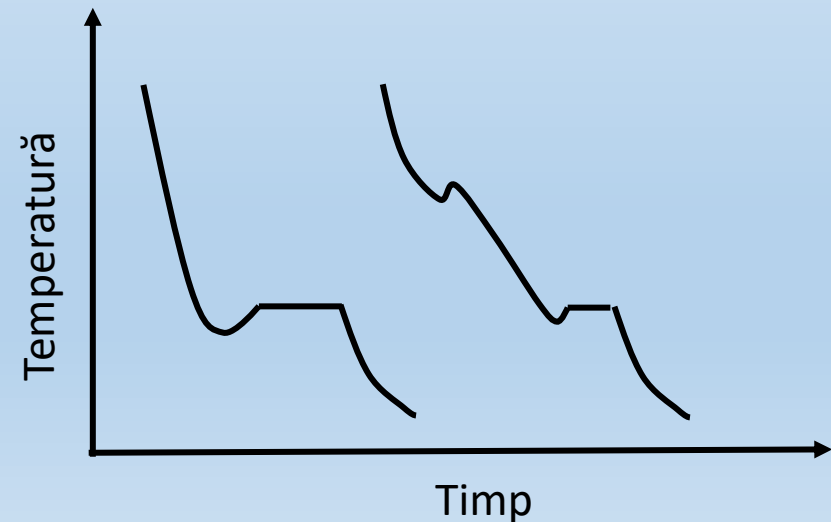


Variația temperaturii în timp pentru un sistem răcit cu viteză constantă, fără transformări de faze

Analiza termică directă; curbe de răcire



Variația temperaturii în timp la racirea cu viteză constantă a unui sistem cu temperatură constantă de transformare

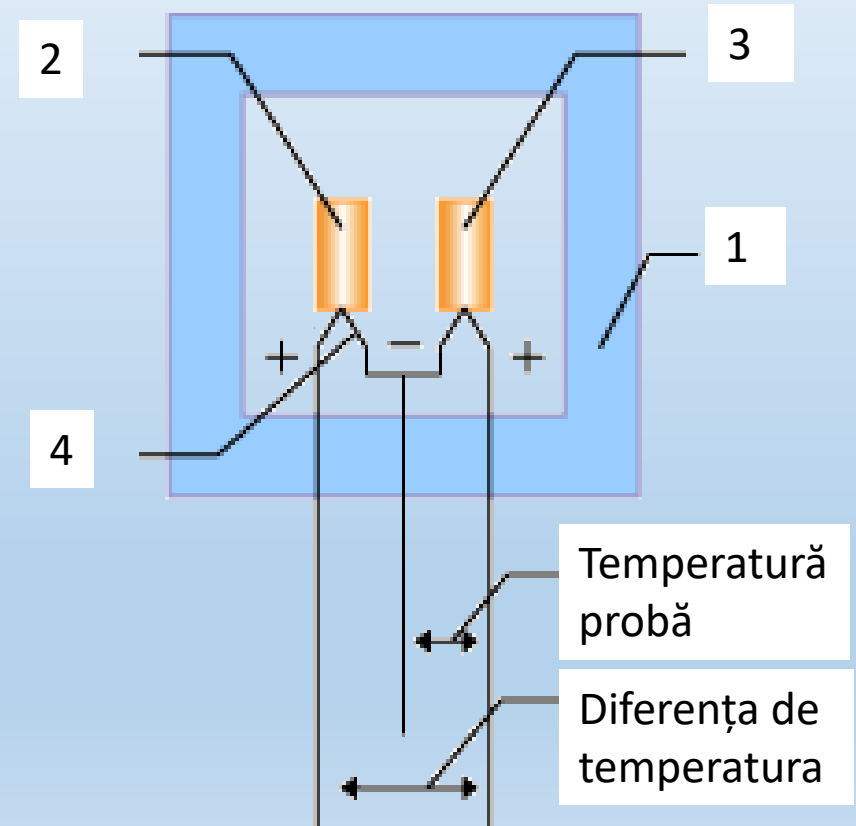


Caracterizarea materialelor prin analize termice

Analiza termică diferențială

❑ Măsoară diferența de temperatură dintre o probă și o referință supuse aceluiași program de temperatură.

- ❑ cuptor;
- ❑ probă și referință
- ❑ termocuple
- ❑ sistem de înregistrare



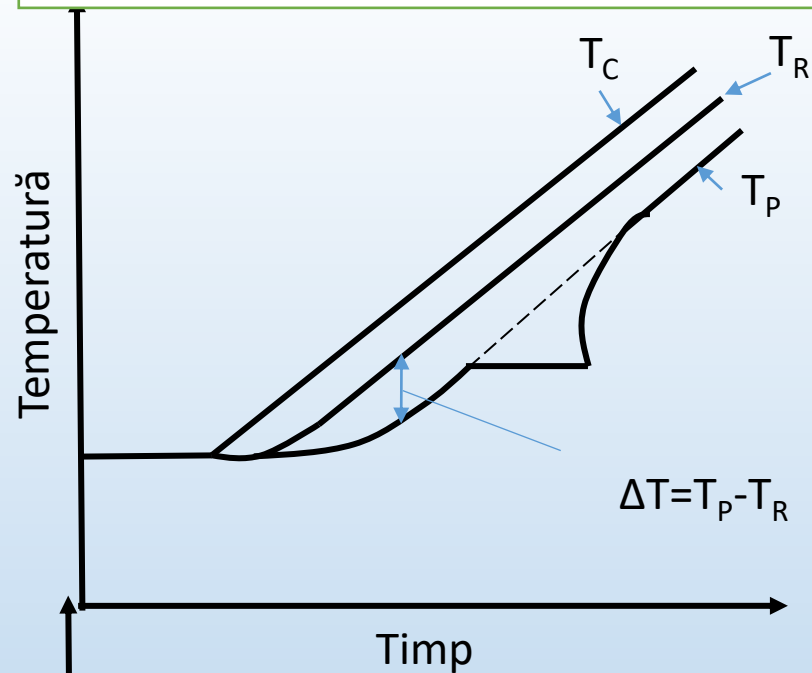
Caracterizarea materialelor prin analize termice

Principiu de lucru

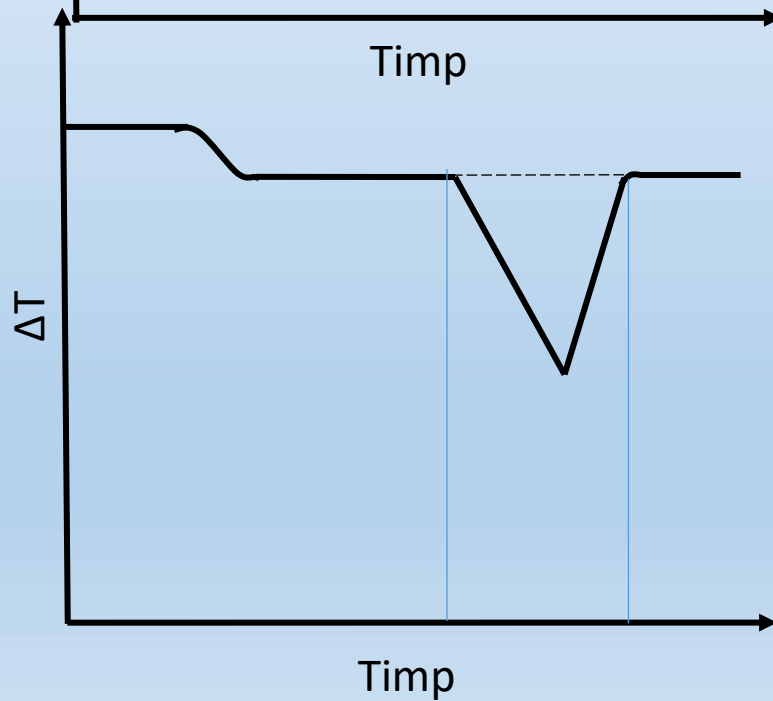
Pe un suport este așezată proba de analizat iar pe celălalt suport este așezată o referință. Se folosesc două termocuple care măsoară atât temperatura probei cât și pe cea a referinței. Atât proba cât și referința sunt supuse aceluiași program de încălzire/ menținere / răcire utilizând aceeași viteză.

In cazul in care proba de cercetat suferă o transformare, se eliberează sau absoarbe căldură, apare o diferență de temperatură $\pm DT$ între probă și etalon. Inregistrarea acestei diferențe funcție de temperatură conduce la obținerea curbelor diferentiale de analiză termică.

Caracterizarea materialelor prin analize termice



Modificarea temperaturii cuptorului (T_C), referinței (T_R) și a probei (T_P) în timp



Modificarea diferenței de temperatură (ΔT) înregistrată în timp

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Echipamentul pentru ATD este utilizat în special pentru măsurători calitative în domenii ca:

- ☐ studiul materialelor;
- ☐ domeniul farmaceutic;
- ☐ chimie;
- ☐ studiul polimerilor.



Analizor pentru analiză termică diferențială - Linseis

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Fenomenele ce cauzează modificări ale temperaturii:

Fizice:

- Absorbție (exotermic)
- Desorbție (endotermic)
- Modificări structurale (endo sau exotermic)
- Cristalizare (exotermic)
- Topire (endotermic)
- Vaporizare (endotermic)
- Sublimare (endotermic)

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Fenomenele ce cauzează modificări ale temperaturii:

Chimice:

- Oxidare (exotermic)
- Reducere (endotermic)
- Reacții de descompunere (endo sau exotermic)
- Transformări în stare solidă (endo sau exotermic)

Caracterizarea materialelor prin analize termice

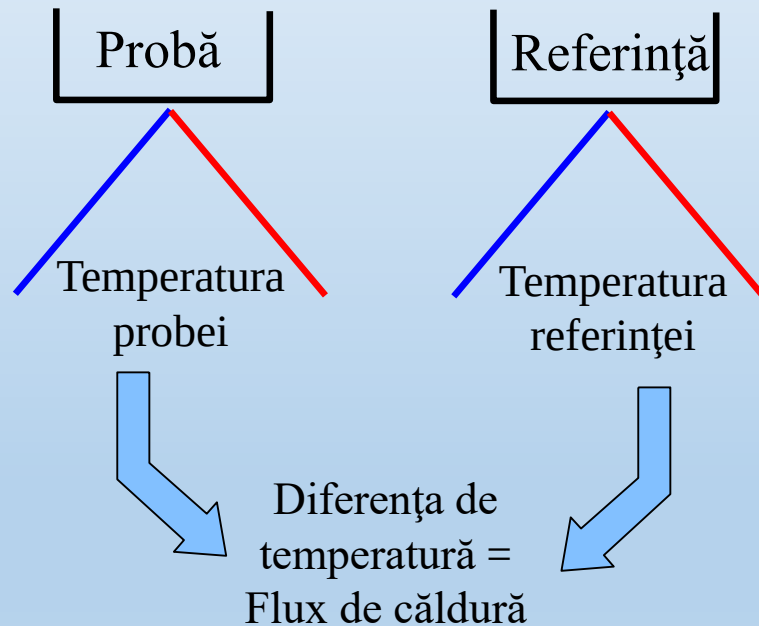
ATD este utilizată pentru:

- ☐ Identificarea temperaturilor de topire și solidificare;
- ☐ Identificarea temperaturii tranziției vitroase;
- ☐ Controlul calității – ATD este foarte utilizată în controlul calității unui număr mare de materiale și substanțe cum ar fi: metale, textile, cimenți, pământ, rășini etc.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

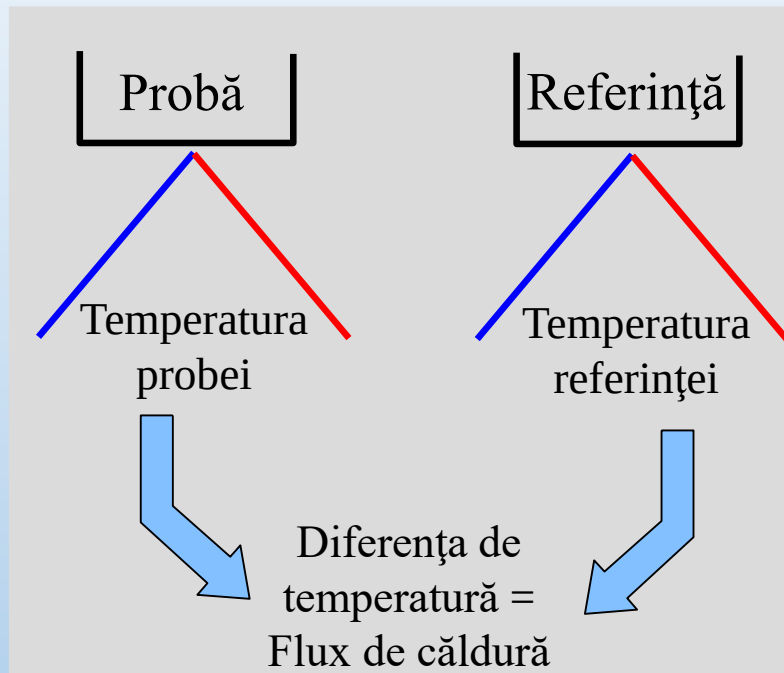
Caracterizarea materialelor prin analiză calorimetrică diferențială cu baleiaj

Calorimetrul diferențial cu baleiaj (DSC) măsoară fluxul de căldură dintre o proba și o referință, supuse aceluiași program termic.



Caracterizarea materialelor prin analize termice

Principiu de funcționare



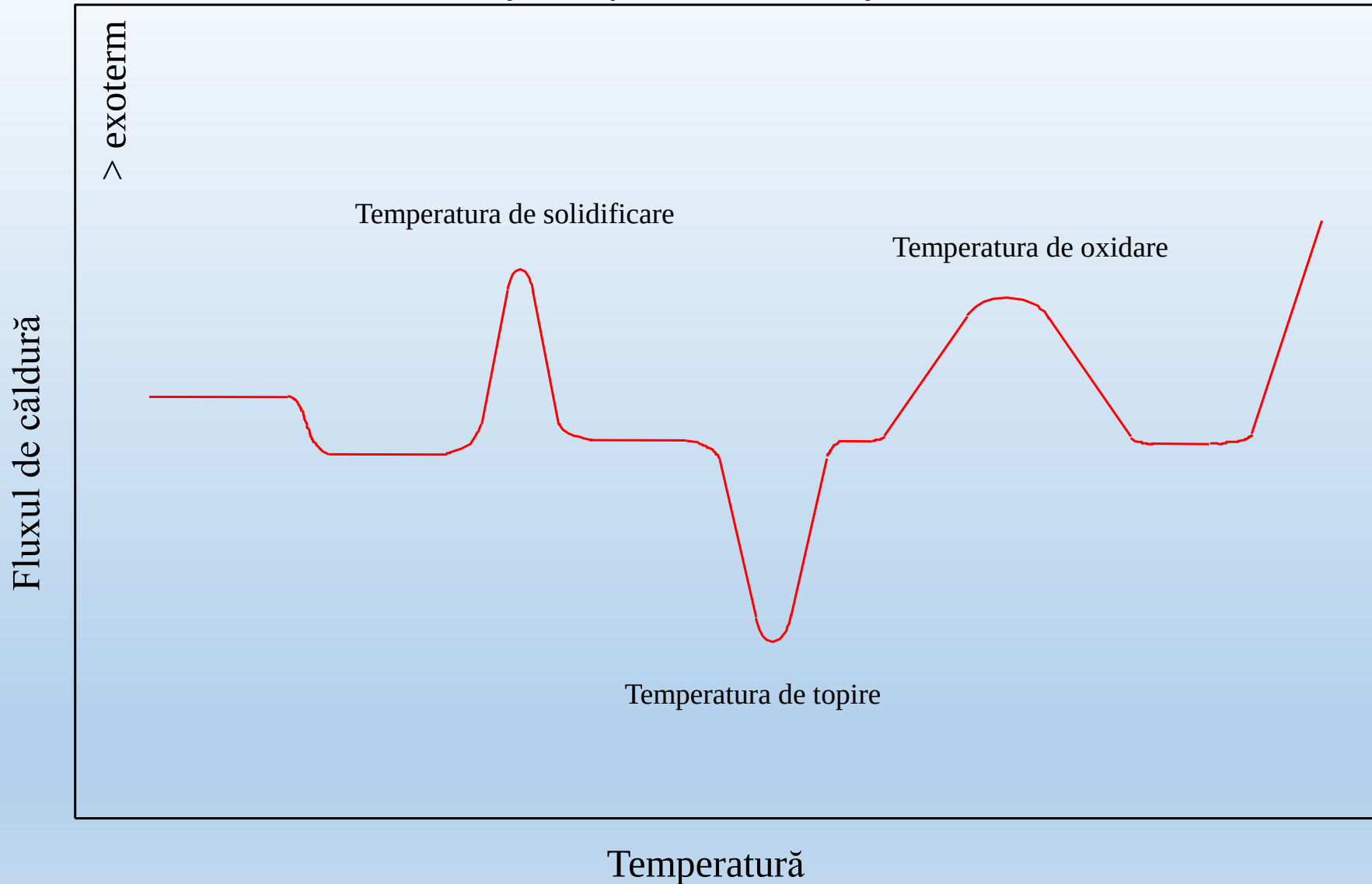
Pentru aceasta tehnică de analiză termică, proba de analizat împreună cu o referință sunt supuse aceluiași program de încălzire-răcire în calorimetrul DSC.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

- ❑ Proba de analizat se introduce în creuzet iar creuzetul împreună cu referința (de cele mai multe ori un creuzet gol) se introduc în cuptorul calorimetrului.
- ❑ Sistemul de încălzire este format dintr-o rezistență electrică.
- ❑ Temperatura probei, a referinței și a cuptorului sunt măsurate cu ajutorul a trei termocuple.
- ❑ Măsurătoarea are loc în atmosferă de gaz protector pentru a nu periclita rezultatele.
- ❑ Răcirea este asigurată de un intracooler sau de azot lichid.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Proprietăți determinate prin DSC



Se pot determina următoarele proprietăți fizice ale materialelor:

- entalpia
- căldura specifică
- temperatura tranziției vitroase;
- entalpia de reacție
- stabilitatea termică

Analiză termomecanică

Analiză termomecanică

Analiză
termodilatometrică

Analiză termomecanică
în regim dinamic
(df TMA)

Analiză termomecanică
în regim static (sf TMA)

Analiză termomecanică
în regim modulat
(mf TMA)

Analiză
termomecanică

Analiză mecano-
dinamică

Analiză termodilatometrică

- ❑ urmărește variația dimensiunilor unei probe în funcție de timp sau de temperatură.

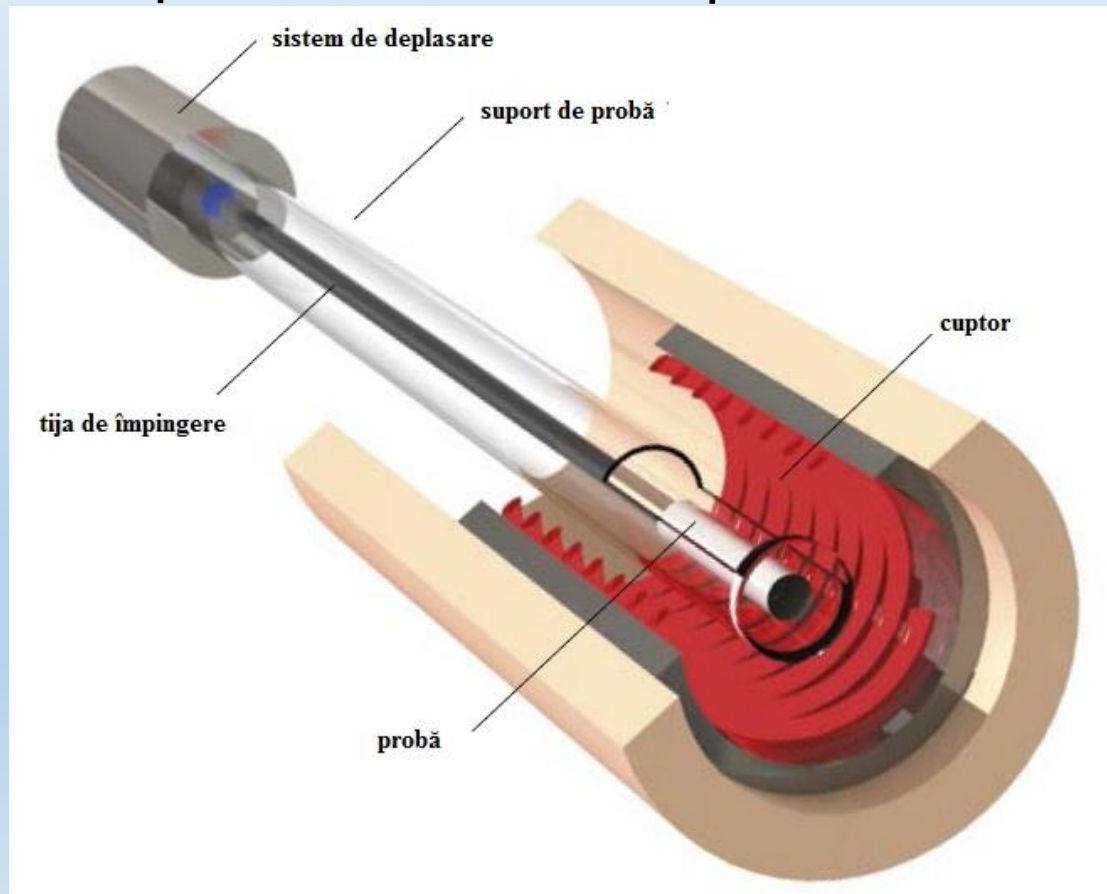
Aplicații:

- Determinarea coeficientului de dilatare liniară;
- Studiul transformărilor în fază solidă;
- Determinarea punctelor de transformare;
- Determinarea rezistenței la șoc termic a materialelor.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Analiza dilatometrică directă

- ❑ determină modificarea dimensiunii liniare a unei probe funcție de temperatură sau de timp.



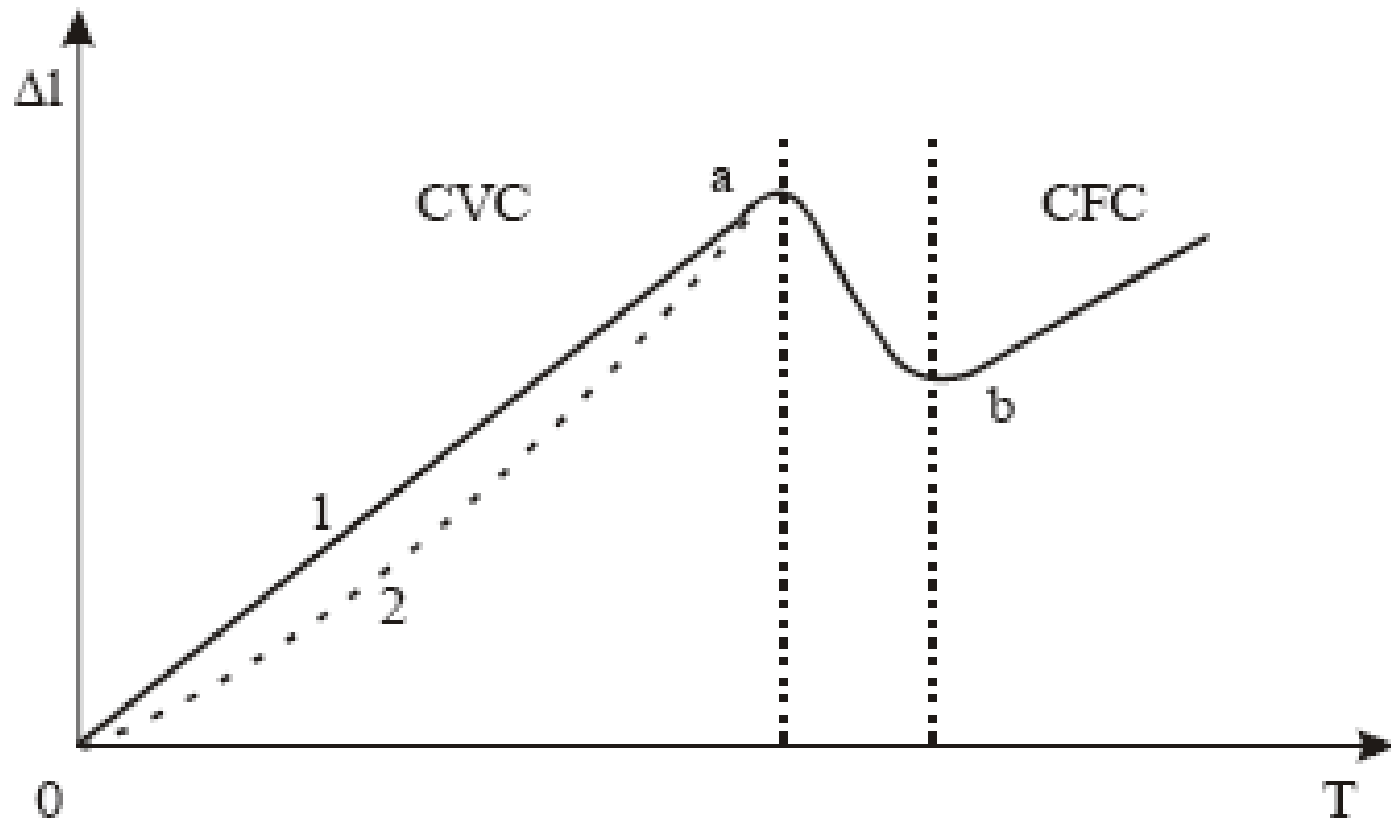
Caracterizarea materialelor prin analize termice

Principiul de lucru:

Cuptorul este încălzit cu o rezistență de încălzire R , comandată de un programator de temperatură. **Proba este fixată** la un capăt, iar dilatarea ei este preluată de o tijă din Al_2O_3 sau SiO_2 (cuarț), care nu suferă transformări în stare solidă. Tijă transmite dilatarea la un traductor, de unde semnalul electric ajunge la interfața unui calculator (PC). Temperatura este măsurată cu un **termocuplu**.

Cu ajutorul semnalelor preluate de calculator va fi trasată curba de dilatare $\Delta l = f(T)$.

Caracterizarea materialelor prin analize termice



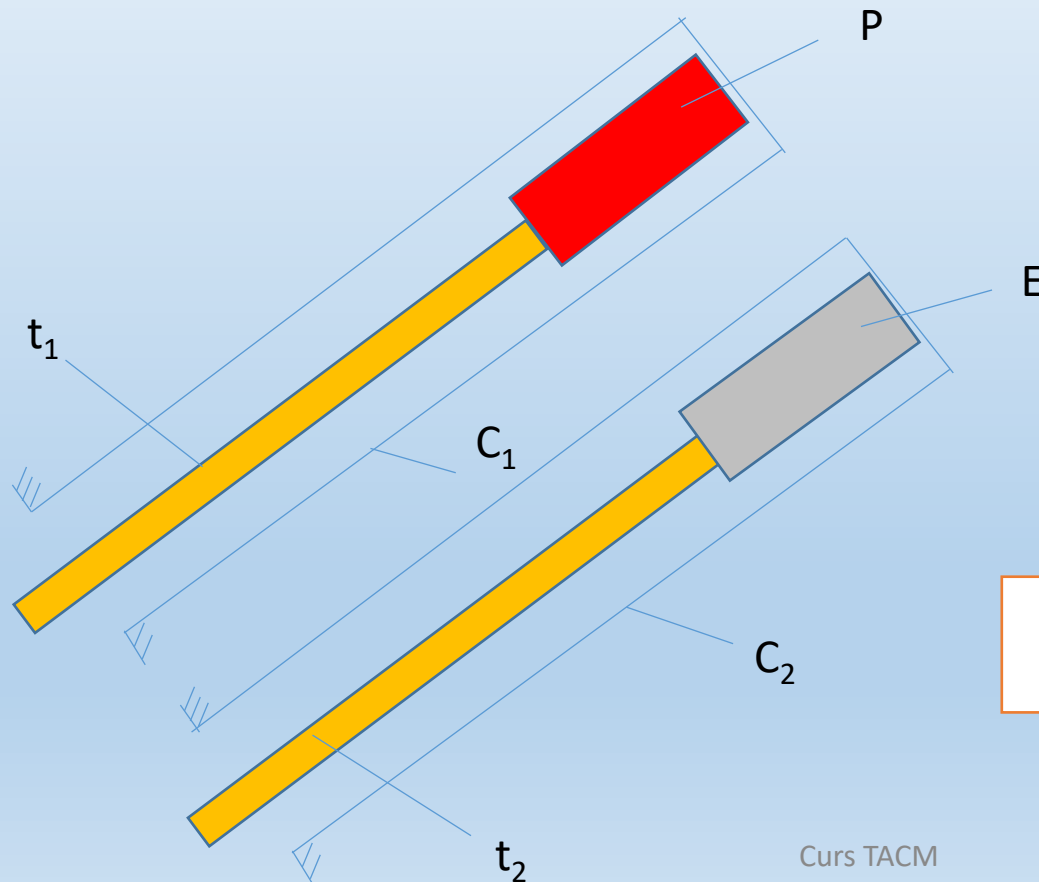
Curba de dilatare pentru un material care are o transformare alotropică de la o structură CVC la o structură CFC (cazul fierului)

$$\text{coeficientul de dilatare liniar, } \alpha = \frac{\Delta l}{l}$$

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Analiza dilatometrică diferențială

Consta in principiu in compararea dilatației probei cu cea a unui etalon convenabil ales, ambele fiind incalzite la aceeași temperatură.

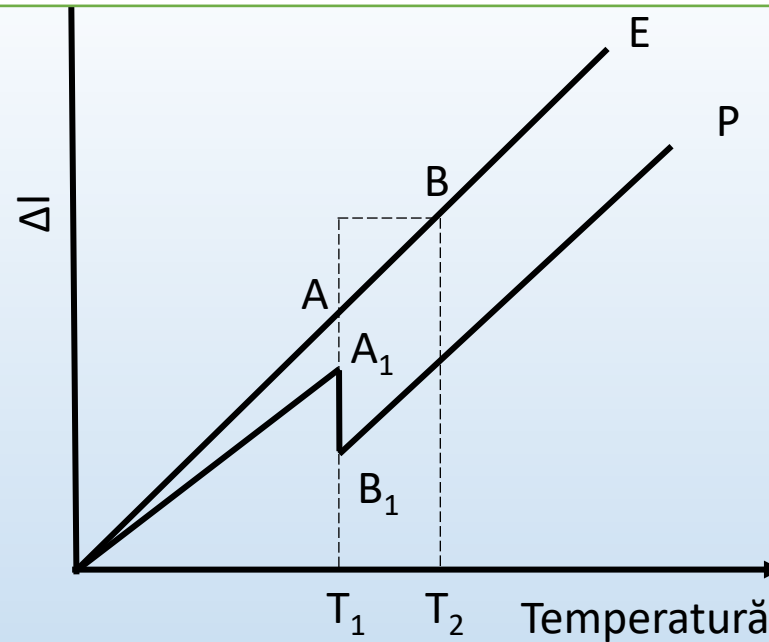


Montarea probelor la analiza dilatometrică diferențială

Caracterizarea materialelor prin analize termice

- Proba (p) si etalonul (e) sunt introduse in tuburile de cuarț c_1 si c_2 asezate unele langa altele iar dilatatia lor este transmisa mecanismului de inregistrare prin intermediul unor tije de cuarț t_1 si t_2 . Etalonul se alege dintr-un material care nu prezinta modificari interne in intervalul de temperatura studiat si are o dilatatie perfect liniara si reversibila.

Caracterizarea materialelor prin analize termice



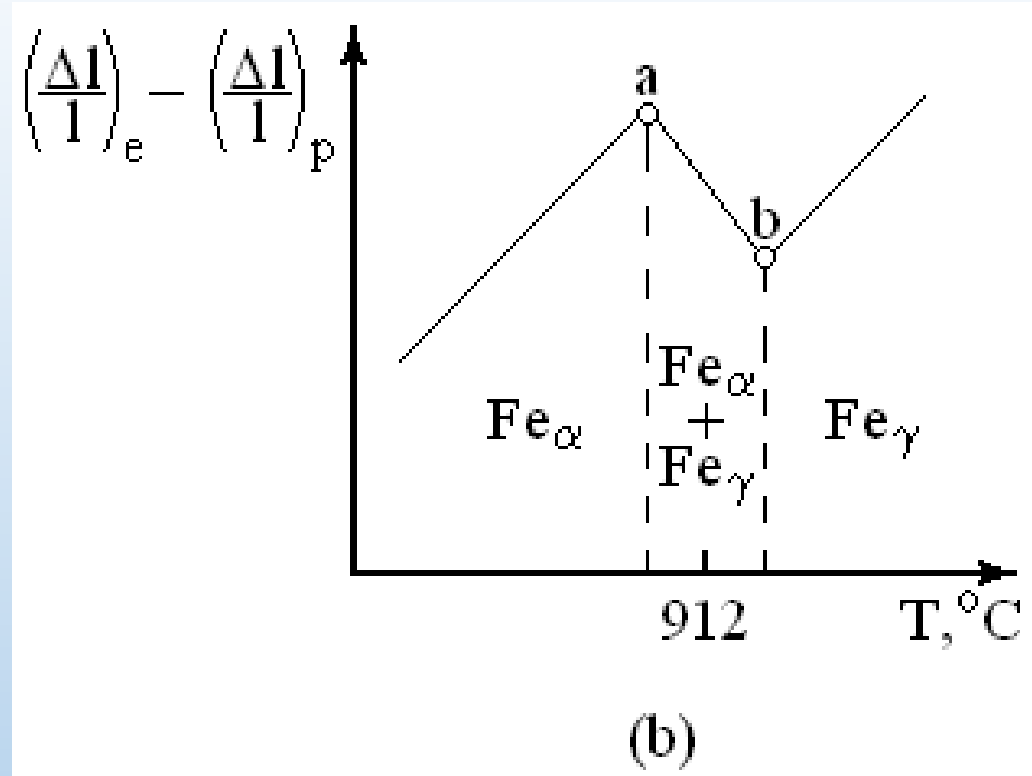
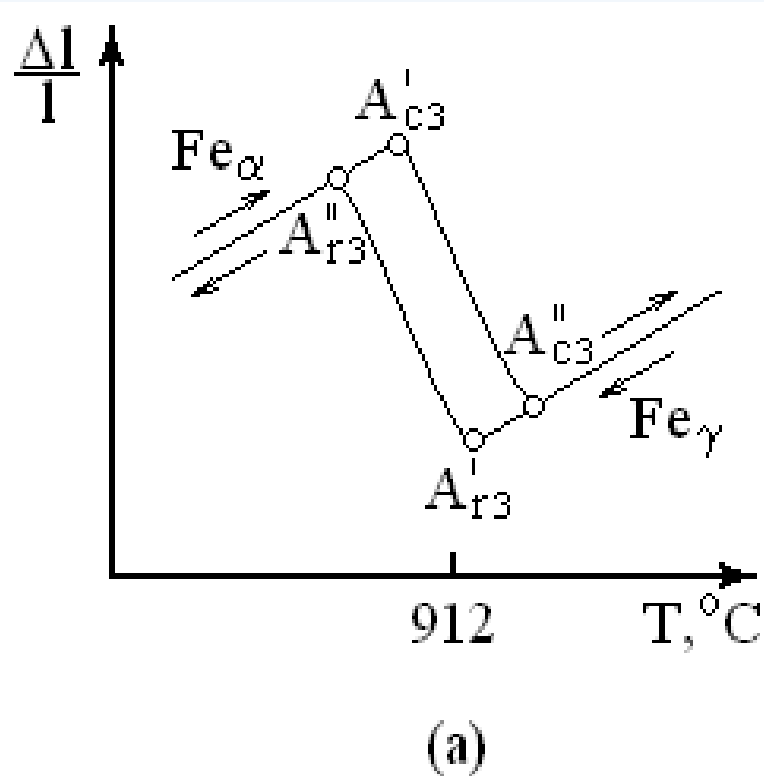
Curbele de dilatare pentru etalon si proba de încercat

$$\alpha = \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_e - \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_p$$

Caracterizarea materialelor prin analize termice

- Curbele de dilatare absoluta a etalonului si a probei au pîna la o anumita temperatura (T_1) aceeasi alura. La temperatura T_1 , are loc o transformare izoterma marcata pe curba de portiunea A_1B_1 . In acelasi timp temperatura etalonului creste de la T_1 la T_2 si dilatatia de la A la B.
- Coeficientul de dilatare liniara este dat de diferenta dintre raportul variatiei lungimii etalonului si lungimea initiala a acestuia si raportul variatiei lungimii probei si lungimea initiala a acesteia.

Caracterizarea materialelor prin analize termice



Curbele dilatometrice directă (a) și diferențială (b) a fierului tehnic pur.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Caracteristici ce pot fi determinate prin dilatometrie

- ☐ dilatare termică liniară
- ☐ coeficientul de dilatare termică (CTE)
- ☐ dilatare volumetrică
- ☐ pași de contracție
- ☐ punct de înmuiere
- ☐ temperatura de tranziție vitroasă
- ☐ transformări de fază
- ☐ schimbare densitate
- ☐ temperatura de descompunere
- ☐ comportamentul anisotropic

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Dilatometrele sunt utilizate în mod obișnuit în:

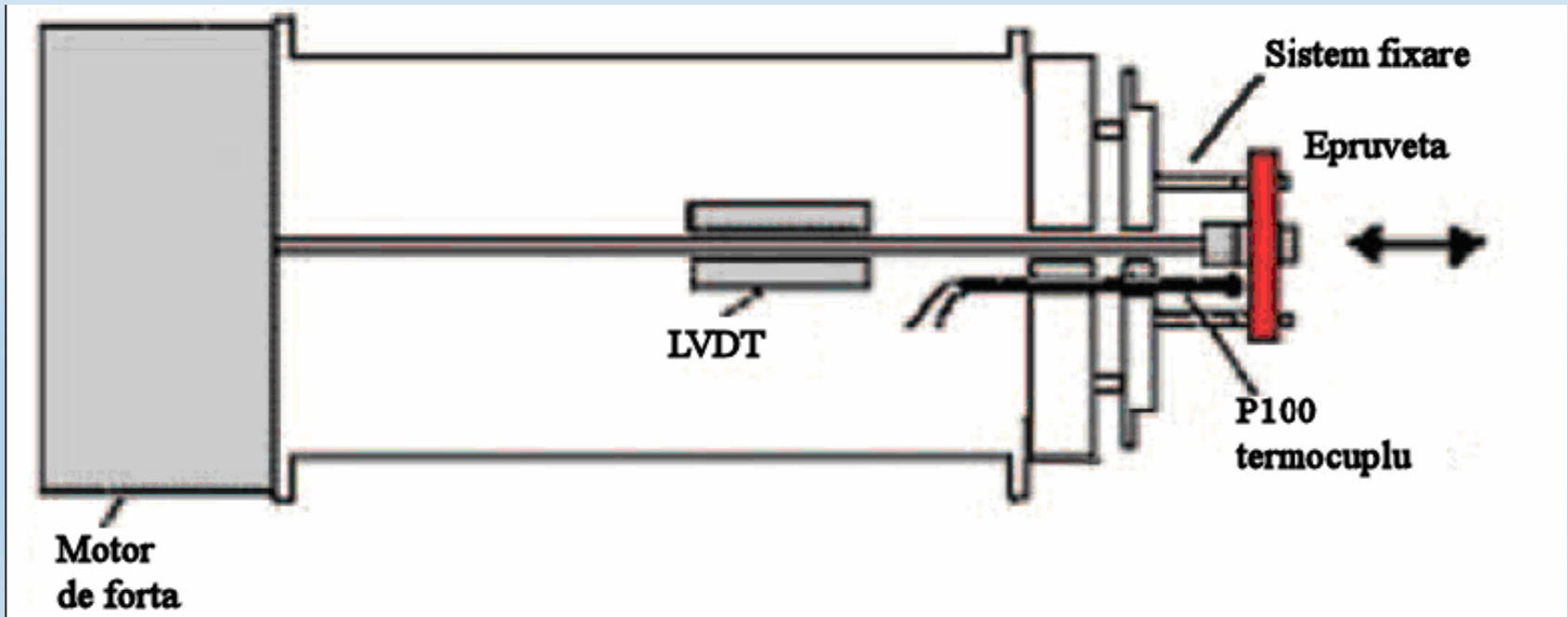
- ☐ • Industria sticlei
- ☐ • Industria ceramică
- ☐ • Sinterizarea ceramicii de înaltă tehnologie
- ☐ • Industria aerospațială
- ☐ • Industria metal / pulberi
- ☐ • Cercetare de materiale noi
- ☐ • Industria auto
- ☐ • Industria polimerilor

Analiza mecano-dinamică

Analiza mecanică în regim dinamic este o tehnică utilizată pe scară largă pentru a caracteriza proprietățile materialelor în funcție de temperatură, timp, frecvență, tensiunea aplicată, atmosfera de lucru sau o combinație ale acestor factori.

Principalele părți componente ale DMA

- ❑ Cuptor
- ❑ Termocuple
- ❑ Detector deplasare
- ❑ Motor de forță



Principiu de funcționare

Proba este fixată în suportul de probe. Suportul de probe împreună cu proba sunt introduse în interiorul unui cuptor și supuse unui program de temperatură controlat.

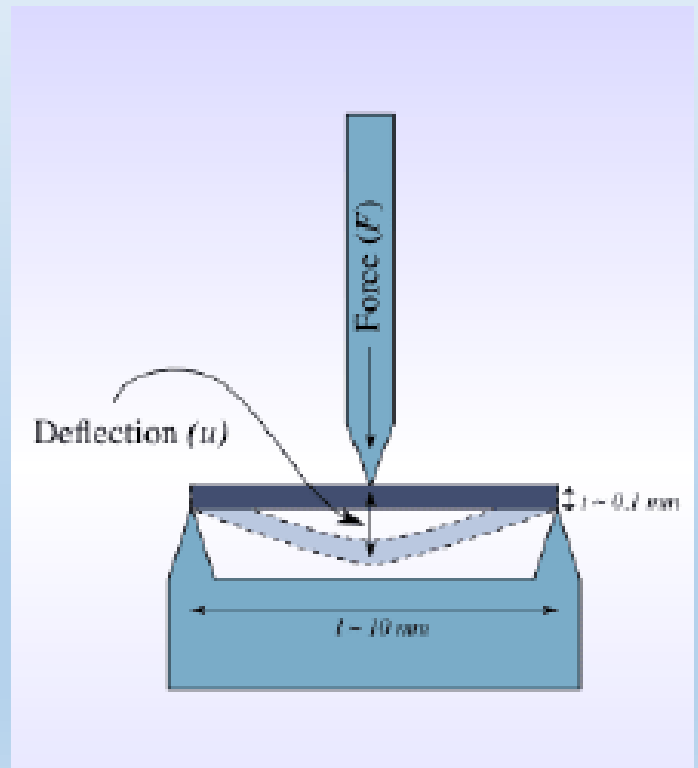
Întregul experiment are loc într-un mediu de gaze inerte. Răcirea se poate realiza cu azot lichid (aprox. $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$) sau cu aer (aprox. $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

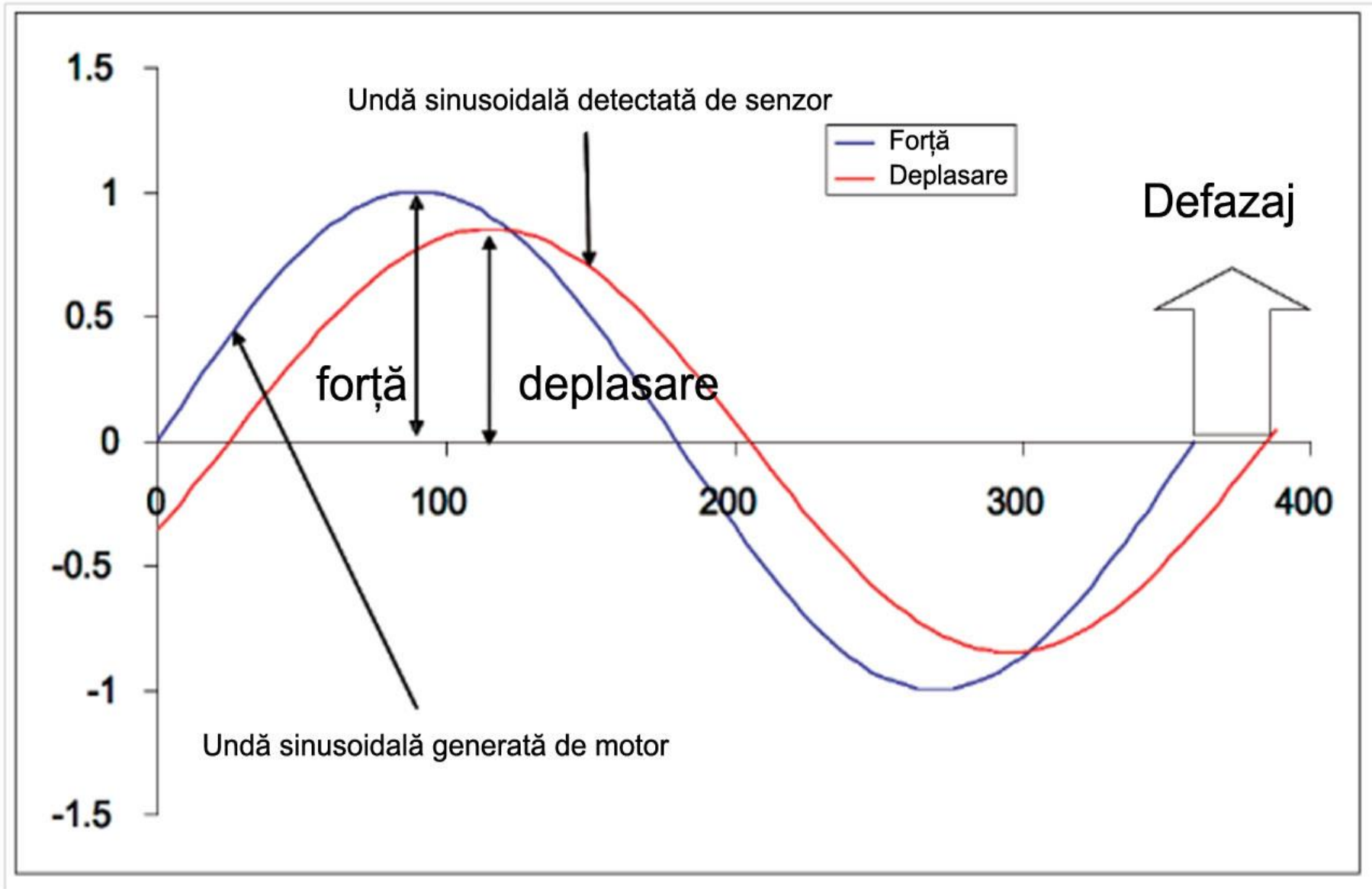
Proba analizată poate fi supusă unei deformări controlate sau alungiri controlate.

La aplicarea unei tensiuni cunoscute, proba se va deforma un anumit procent ce depinde de rigiditatea probei. Deformarea are loc sinusoidal și este aplicată cu ajutorul unui motor ce generează această mișcare oscilatorie ce este transmisă probei prin intermediul unui arbore de acționare. LVDT (Linear Variable Differential Transformer) - sistemul electronic de măsurare înregistrează răspunsului probei la forța aplicată (deformație).

Temperatura probei și cea a cuptorului este măsurată cu ajutorul a două termocuple.

Astfel, cu ajutorul DMA-ul se poate determina rigiditatea și capacitatea de amortizare a materialelor ce sunt desemnate ca fiind modulul de elasticitate și $\tan \delta$ (delta)- frecarea internă. Deoarece este aplicată o forță sinusoidală, putem exprima modulul, denumit modul de înmagazinare, ca fiind componenta de fază inițială și $\tan \delta$, modulul de pierdere, ca fiind componenta defazată.





Relația dintre forța sinusoidală aplicată și reacția materialului din care rezultă diferența dintre faze notată cu $\tan d$

DMA poate fi aplicată la o gamă largă de materiale, folosind diferitele moduri de deformare:

- ☐ tensiune;
- ☐ compresie;
- ☐ îndoire dublă în consolă;
- ☐ încovoiere în 3 puncte
- ☐ forfecare.

Pentru aceasta sunt folosite diferite tipuri de suporturi de probe:



Suport probă pentru încovoiere în trei puncte



Suport probă pentru îndoire dublă în consolă



Suport probă pentru tracțiune



Suport probă pentru forfecare

Trei parametri pot fi calculați cu ajutorul DMA:

- ❑ Modulul de înmagazinare, E' ,
- ❑ Modulul de pierdere, E'' ,
- ❑ Modulul de disipare a energiei, $\tan \delta = \frac{E''}{E'}$

În funcție de variația acestora, pot fi trase concluzii privind transformările ce au loc în probele analizate.

Caracteristici ce pot fi determinate cu DMA

- ☐ modulul de elasticitate;
- ☐ teste de fluaj și relaxare;
- ☐ predicția comportamentului unui material
- ☐ frecarea internă;
- ☐ teste de îmbătrânire.



Suport de probe special pentru materiale cu vâscozitate mare

- ❑ teste cu frecvențe multiple;
- ❑ determinarea temperaturii la care are loc tranziția vitroasă pentru probe de polimeri semicristalini, amorfe sau compozite;
- ❑ compoziție, structură și compatibilitate pentru amestecurile de polimeri;
- ❑ determinarea modulului de elasticitate în diferite condiții, mai ales pentru probele rigide.

Materialle ce pot fi analizate cu DMA

- ☐ Metale și aliaje metalice;
- ☐ Polimeri;
- ☐ Ceramice;
- ☐ Sticle;
- ☐ Compozite;
- ☐ Biomateriale.

Analiza mecanică în regim dinamic este o tehnică utilizată în special în analiza polimerilor dar și a materialelor compozite sau celor metalice.

Pentru a putea obține rezultate bune prin intermediul analizei mecanice în regim dinamic trebuie îndeplinite următoarele condiții: dispozitivul utilizat trebuie să fie calibrat, proba utilizată trebuie și ea să fie pregătită cu atenție ținându-se cont de geometria necesară impusă de tipul suportului de probe utilizat, trebuie utilizate alungiri adecvate tipului de material precum și viteze de încălzire/răcire cuprinse între 2-5 °C, în funcție de sensibilitatea transformării.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Analiza termomagnetică

- ❑ Studiul efectelor magnetice care apar în timpul încălzirii sau răcirii probelor
- ❑ din forma curbelor magnetizare - temperatură se obțin indicații asupra:
 - diferitelor faze magnetice prezente;
 - se pot estima unele mărimi termodinamice specifice materialului respectiv;
 - studiază tranzițiile de fază din starea feromagnetică în starea paramagnetică și invers.

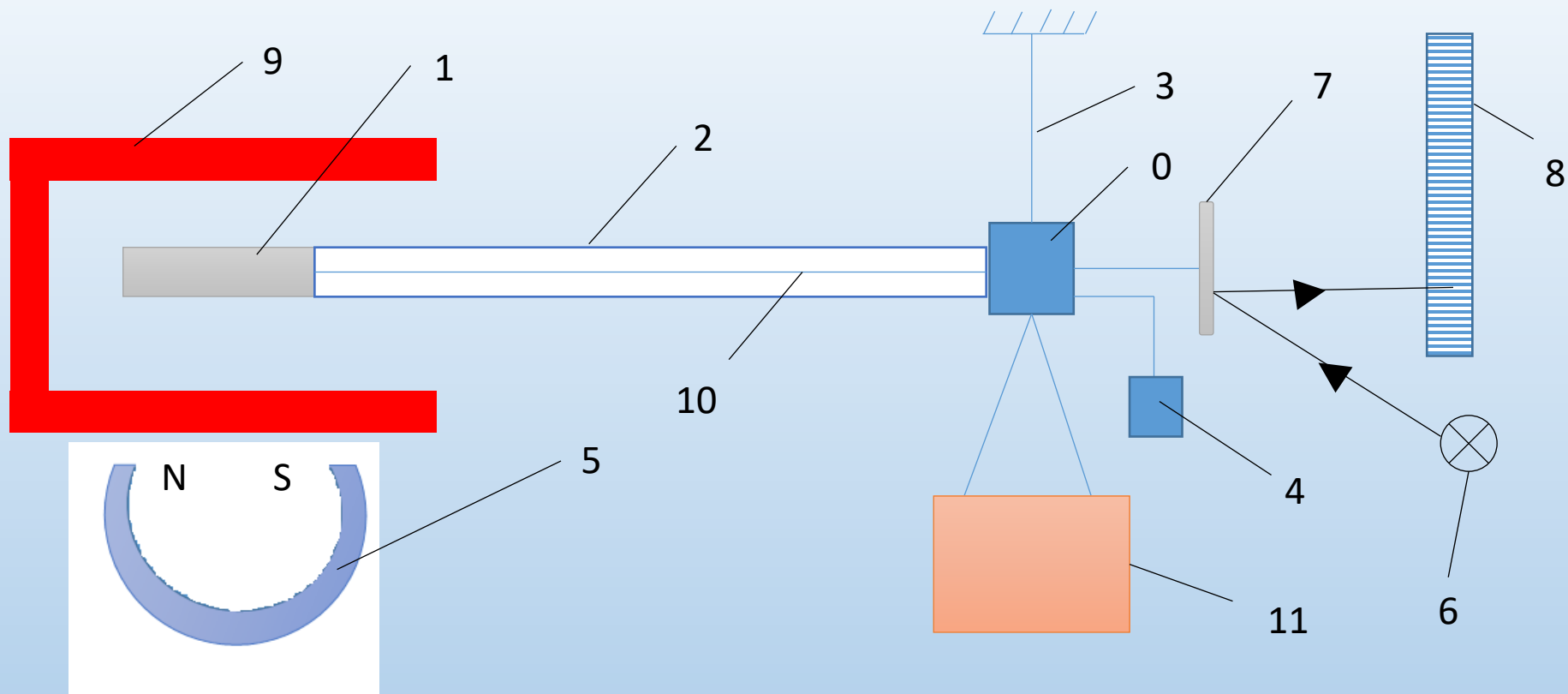
Caracterizarea materialelor prin analize termice

Trei domenii de interes :

- ❑ 1) Determinarea temperaturii de tranziție magnetică pentru a caracteriza materialul sau pentru a servi ulterior ca un potențial standard de temperatură pentru termogravimetrie;
- ❑ 2) detectarea reactanților magnetici, a intermediarilor sau a produselor în timpul reacțiilor și
- ❑ 3) urmărirea vitezelor de reacție pentru astfel de reacții.

Se examinează o gamă largă de **materiale, metale, ceramică, catalizatori, minerale și complexe anorganice.**

Caracterizarea materialelor prin analize termice



Schema constructivă a balanței
termomagnetice cu indicație optică

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Elemente componente:

1-proba de analizat, 2-tijă de cuarț, 3-fir de wolfram, 4-contragreutate, 5-magnet, 6-sursă de lumină, 7-oglindă, 8-scară gradată, 9-cuptor, 10-termocuplu, 11 galvanometru.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

- **Principiu de functionare:**

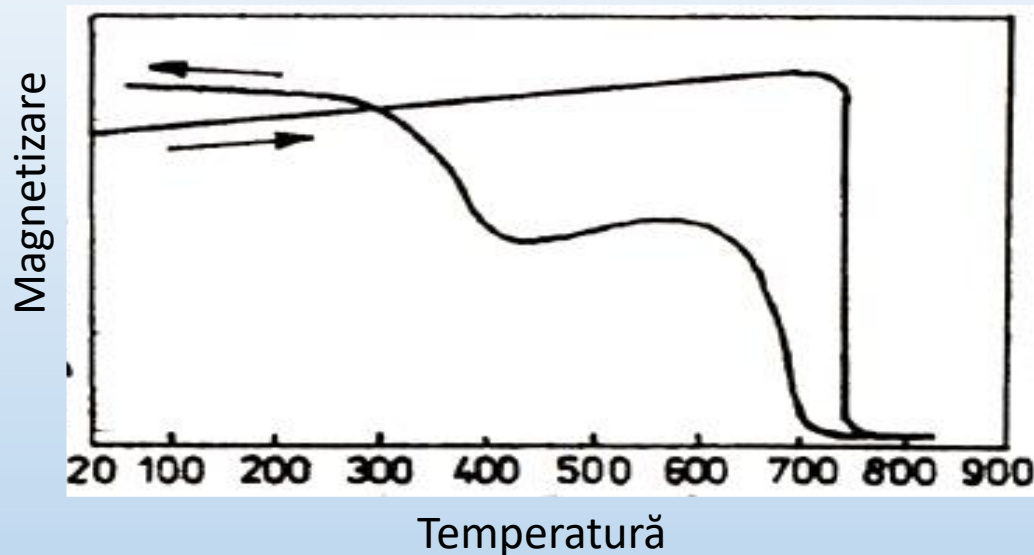
Proba de analizat este fixată pe o tijă de cuarț, suspendată cu un fir de wolfram, în așa fel încât, printr-un sistem de contragreutăți, să se poată echilibra. Forța magnetică este exercitată de către magnetul permanent asupra probei de analizat, astfel încât brațul balanței să fie orizontal, iar fasciculului emis de sursa și reflectat de oglinda să ocupe pe scara gradată poziția inferioară.

- **Încălzirea probei de analizat** în cuptorul, până aproape de punctul Curie, duce la scăderea proprietăților magnetice ale probei și ridicarea brațului balanței; oglinda se inclină, iar fasciculului luminos este deviat proporțional cu scăderea forței magnetice de atracție a probei. **În urma înregistrării demagnetizării/magnetizării** funcție de temperatura măsurată de termocuplul și galvanometrul, se obțin curbe termomagnetice ce pun în evidență punctul Curie,

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Curba magnetizare-temperature pentru Fe este prezentata in fig. alaturata.

Se poate observa ca la temperatura 770 °C apare o demagnetizare puternica.



Curba magnetizare-temperatură pentru Fe

Termomagnetometria a fost aplicată și în studiul coroziunii aliajelor pe bază de fier descoperite de arheologi. Această analiză a cuantificat cu succes gradul de coroziune, măsurat prin pierderea de fier, precum și cantitatea de magnetit formată.

Caracterizarea materialelor prin analize termice

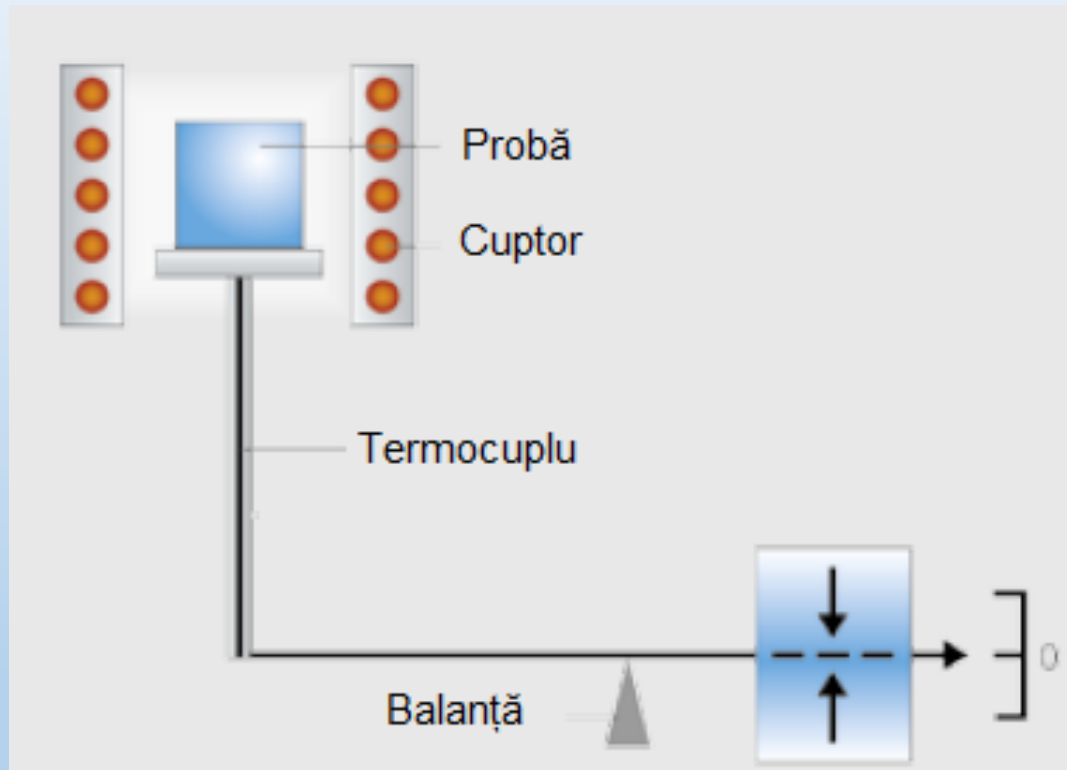
Analiza termogravimetrică

Analiza termogravimetrică (TGA) este o tehnica de analiză termică ce constă în măsurarea schimbărilor masei unei probe odată cu creșterea temperaturii, într-o atmosferă controlată.



Caracterizarea materialelor prin analize termice

Instrumentul folosit în analiza termogravimetrică se numește **termobalanță**.



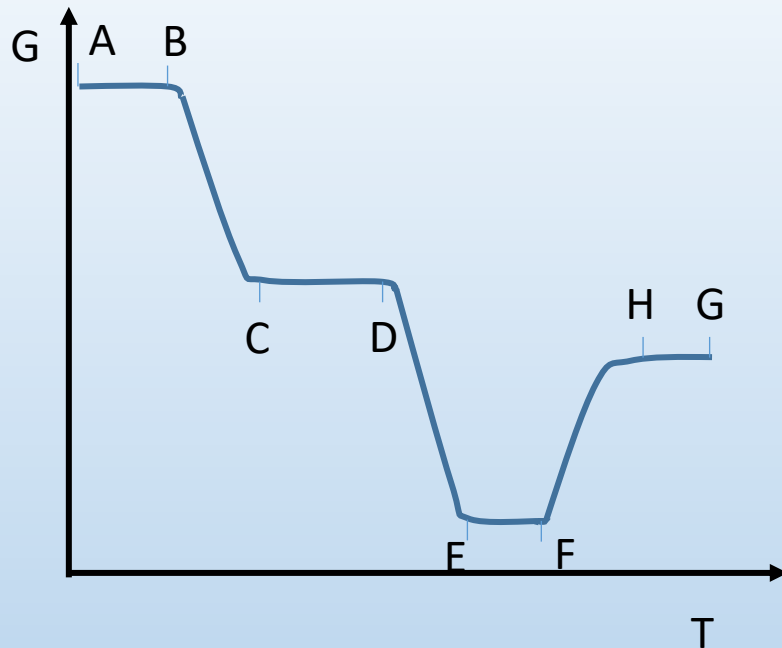
- ☐ cuptor;
- ☐ probă
- ☐ termocuple
- ☐ balanță
- ☐ sistem de înregistrare

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Principiul de functionare:

Proba este introdusă într-un cuptor prevăzut cu un termocuplu atașat de microbalanță. Ansamblul microbalanței măsoară masa inițială a probei la temperatura camerei și apoi monitorizează continuu schimbările masei probei pe măsură ce proba se încălzește. Datele sunt preluate de către un calculator care va trasa curbă termogravimetrică ce indică variația masei unei probe prin modificarea controlată a temperaturii.

Caracterizarea materialelor prin analize termice



Curba termogravimetrică

Analiza termogravimetrică permite obținerea următoarelor informații asupra sistemului cercetat:

- stabilirea domeniilor de stabilitate termică (în absența transformărilor polimorfe) a compusului cercetat, respectiv a produșilor intermediari formați în decursul tratamentului termic (porțiunile A-B, C-D, E-F, G-H)
- determinarea punctelor și intervalelor de descompunere termică (T_b - T_c , T_d - T_e).

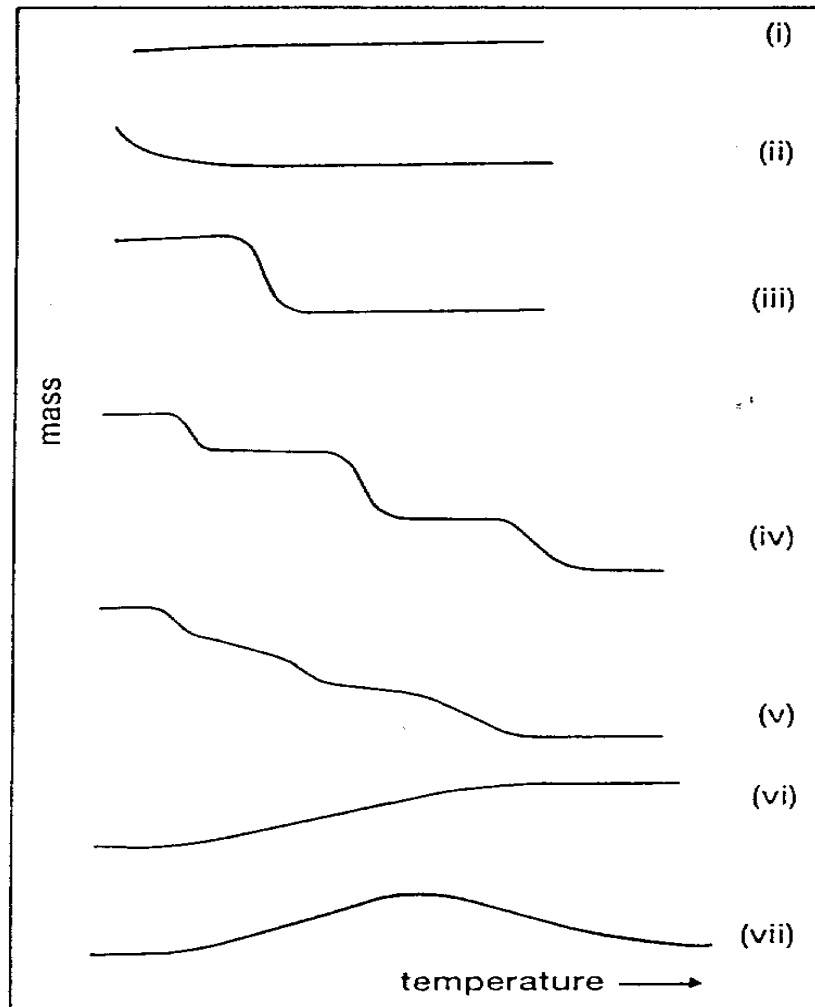
Caracterizarea materialelor prin analize termice

Procese ce pot fi analizate prin TGA

Proces	Variația masei probei	
	creștere	scădere
Adsorbție sau absorbție	●	—
Desorbție	—	●
Deshidratare	—	●
Sublimare	—	●
Vaporizare	—	●
Descompunere	—	●
Reacție solid-solid	—	●
Reacție solid-gaz	●	●

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Interpretarea curbelor TGA



i. Proba nu suferă nicio descompunere cu o pierdere de masă

ii. Pierdere inițială rapidă de masă este caracteristică desorbției sau uscării

iii. Descompunere într-o singură etapă,

iv. Descompunere în mai multe etape, cu intermediari relativ stabile:

v. Descompunere în mai multe etape, fără nici un produs intermediar stabil.

vi. Creșterea masei datorită reacției cu atmosfera, de exemplu, oxidarea metalelor;

vii. Oxizii se descompun din nou la temperatură mai ridicată;

Caracterizarea materialelor prin analize termice

Pot fi analizate:

- ✓ mase plastice
- ✓ cauciuc
- ✓ metale
- ✓ fibre
- ✓ uleiuri
- ✓ ceramica
- ✓ compozite
- ✓ sticla
- ✓ ciment
- ✓ materiale refractare
- ✓ rasini
- ✓ combustibil
- ✓ medicamente
- ✓ substante active
- ✓ alimente

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Structura este cea care determină proprietățile produselor.

Studiul structurii se poate face la diferite mărimi:

- structură macroscopică (mărimi până la 30-50 ori),
- structură microscopică (mărimi de la 100 la câteva zeci de mii de ori)
- structură atomică (mărimi mai mari de 500000 ori).

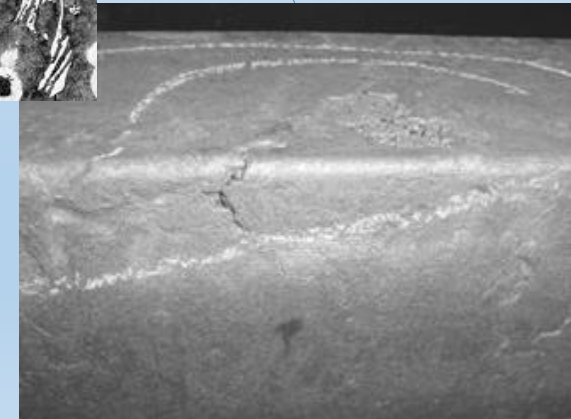
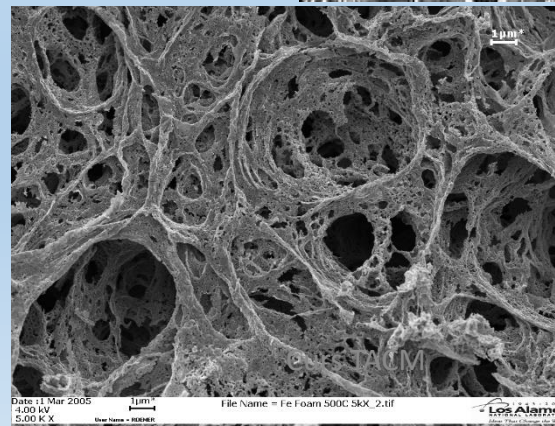
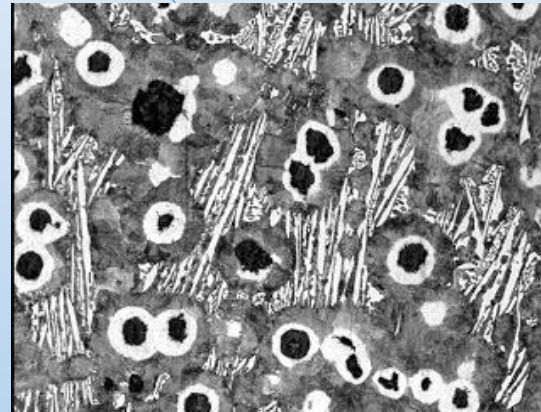
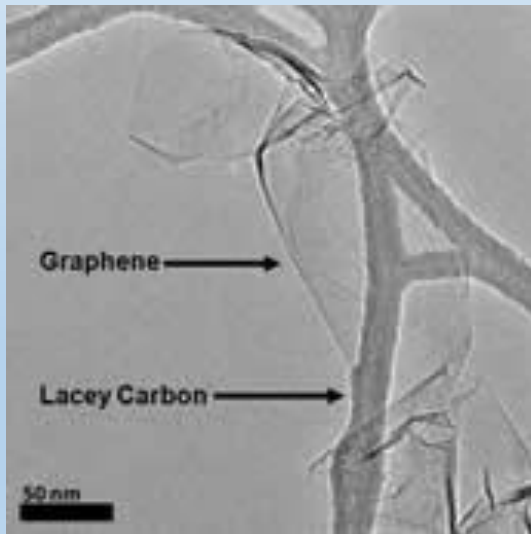
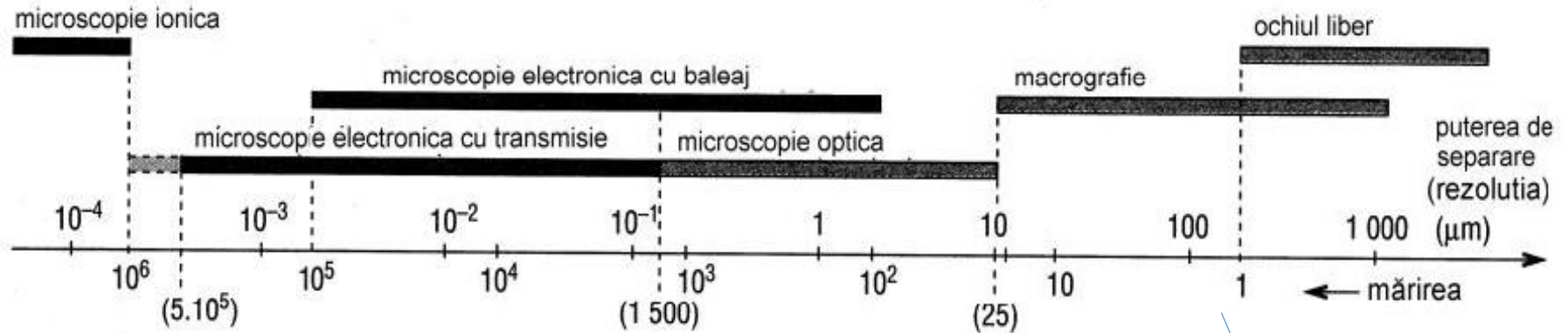
Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Metalografia studiază aspecte fizice legate de structurile metalografice a metalelor și aliajelor, ajungând până în domeniul fizicii moleculare și a fizicii descriptive.

Studiile metalografice sunt importante la studiul:

- tratamentelor termice ale;
- deformării plastice la rece;
- tensiunilor de deformare plastic.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

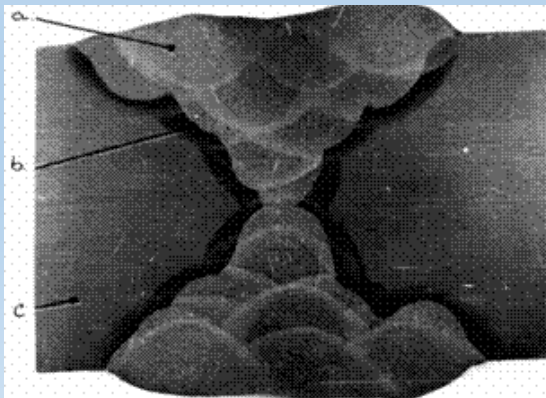
Analiza macroscopică

Metodă rapidă și simplă de cercetare a materialelor. se bazează pe studiul vizual al probelor. permite: examinarea suprafețelor de rupere, a suprafețelor formate prin: solidificare, depunere electrochimică, sau a celor pregătite special prin polizare și șlefuire, iar apoi atacate cu un reactiv chimic.

- ❖ Suprafețe pregătite
- ❖ Superfețe nepregătite

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

- ☐ Defecte de solidificare
- ☐ Rupere
- ☐ Neomogenități chimice, structurale și mecanice;
- ☐ Uzură
- ☐ Structura îmbinărilor sudate



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Analiza microscopică

Determină dimensiunea, forma și distribuția grăunților în cazul unui material monofazic. Într-un material polifazic sunt importante dimensiunea, forma și distribuția fazelor.

Analiza microscopică se referă la metodele optice, opto-electronice sau electronice de analiză structurală și de microtopografie a suprafeței. Se imparte în:

- ☐ microscopia optică,
- ☐ microscopia electronică,
- ☐ microscopie de forță atomică.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopia optică

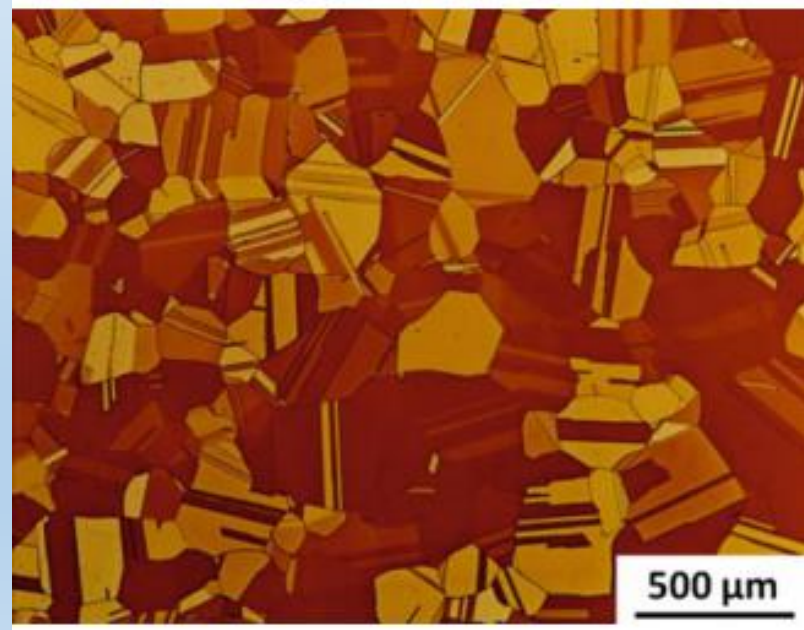
- sunt utilizate în mod obișnuit două moduri de microscopie optică:
- pe baza măsurării luminii transmise (probă transparentă);
- Pe baza luminii reflecte (probă opacă).

În ingineria materialelor se utilizează probe ce reflectă lumina, inclusiv metale, semiconductori, sticle, polimeri și material compozite.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopia optică

- Puteri de mărire 1000-2000x
- Dimensiuni, formă grăunți
- Cantități faze

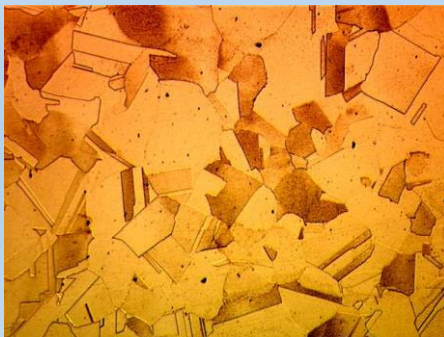
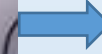
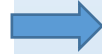


Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

- caracteristici de interes pot fi observate și cuantificate folosind metode de microscopie cantitativă. Includ observarea și determinarea dimensiunilor grăunților, forma, dimensiunea și cantitatea diferitelor faze în sistemele polifazice.
- Se estimează dacă proba indică faptul că materialul este în stare turnată, călita sau prelucrată la rece.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Pregătire probe

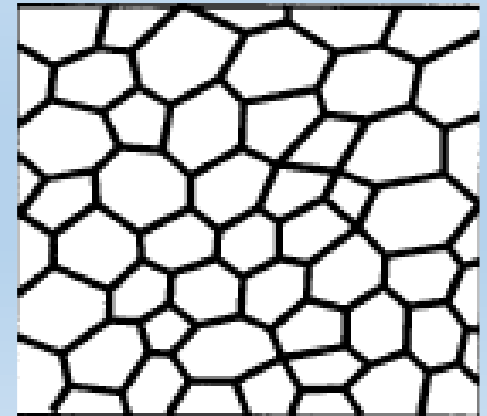
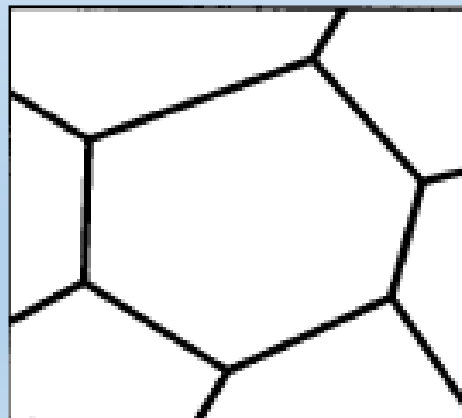


Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

În analiza materialelor de mare importanță este **microscopia optică cantitativă**, folosită pentru determinarea mărimii și numărului de grăunți cristalini.

Din punct de vedere tehnic, măsurarea mărimii grăunților cristalini poate fi efectuată prin determinarea:

- suprafeței medii;
- a diametrului mediu.



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Metode comune de microscopie optică:

- Lumină reflectată
- Câmp luminos -caracteristicile de interes apar întunecate pe un fundal luminos.
- Câmp întunecat -caracteristicile de interes apar strălucitoare pe un fundal întunecat.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

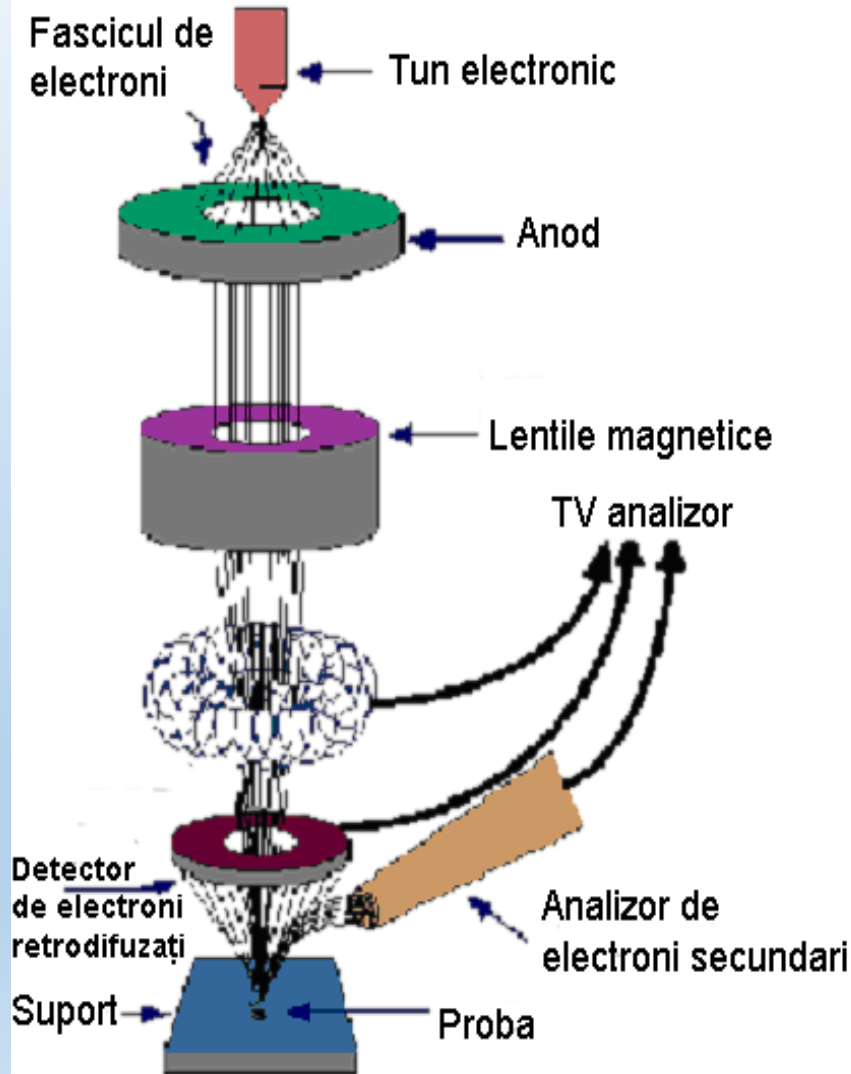
Microscopia electronică

Avantaje:

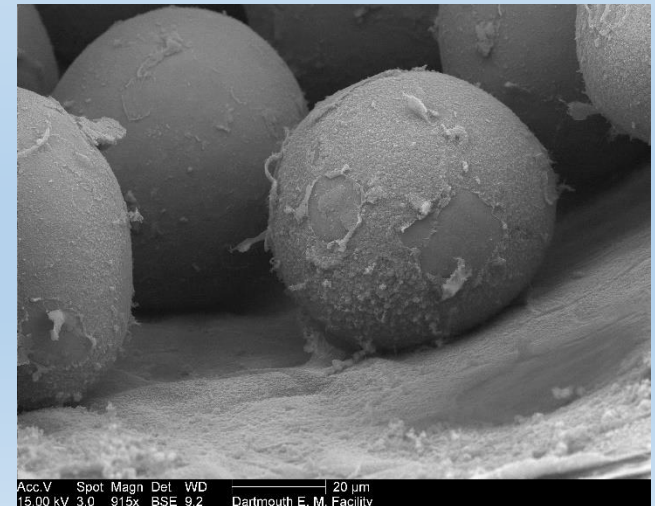
- ☐ rezoluție mai mare
- ☐ putere de mărire mult mai mare
- ☐ adâncime de câmp foarte mare (imagine în relief)
- ☐ puteri de mărire de la $20\times$ până la $> 80000\times$
- ☐ imagini 3D
- ☐ compoziție chimică

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopia electronică



**electroni secundari
+ electroni retrodifuzati**
 $\Rightarrow$
detector $\rightarrow$ semnal
 $\Rightarrow$
image



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopul SEM folosește un fascicul de electroni și lentile electromagnetice. Fasciculul electronic are o traiectorie verticală, trece prin sistemul de lentile care-l focalizează și concentrează pe suprafața probei. Fasciculul traversează o serie de spirale din lentila obiectiv, care baleiază fasciculul pe o arie dreptunghiulară a probei de analizat. Când lovește suprafața probei electronii retrodifuzați și secundari încep să fie expulzați din probă și sunt captați de detectorii ce îi transformă într-un semnal care este trimis pe un ecran unde se formează imaginea SEM. Imaginea SEM obținută este rezultatul intensității emisiei electronilor secundari din proba.

Componentele microscopului electronic cu baleiaj:

- sistemul de iluminare/imagini - produce fasciculul de electroni și-l focalizează pe probă;
- sistemul de achiziție a informațiilor - amplifică semnalele fizice produse la interacțiunea electronilor cu proba prin folosirea a diferite tipuri de detectori;
- sistemul de formare a imaginii - produce pe cale electronică o imagine convențională a probei;
- sistemul de vidare – experimentul se realizează în vid.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

SEM pune în evidență:

- structuri fine, care nu pot fi observate prin MO;
- identificarea produșilor de coroziune;
- identificarea incluziunilor în metale și materiale ceramice și a segregărilor de faze;
- măsurarea porilor de dimensiuni mici;
- studierea straturilor de tratament termochimic.

Microfractografie

- analiza microfisurilor, în special pentru examinarea suprafețe de rupere;
- aspect tridimensional (3D) al suprafețelor ruperii, precum și caracteristicile și topografiile ruperii ce furnizează informații esențiale despre modurile sau cauzele defecțiunilor;

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Analiză de compoziție chimică

- Analiza de distribuție de raze X caracteristice (EDAX) pune în evidență elementele principale de aliere prin liniile lor specifice, analiza efectuându-se pe o microzonă oarecare;
- se realizează distribuția globală, sub forma unei hărți de distribuție a elementelor chimice constitutive.

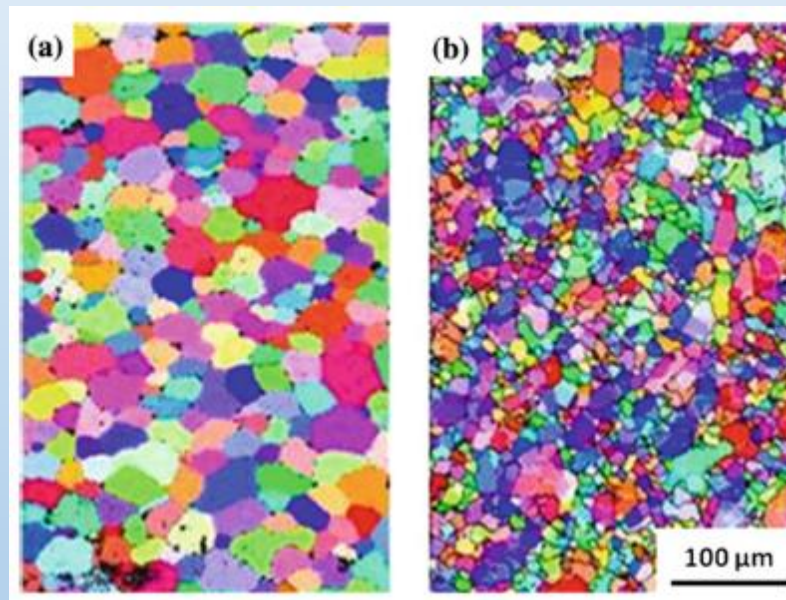
Distribuția elementelor chimice

- hartă a distribuției semnalelor emise de elementele selectate pentru analiză existente într-o zonă aleasă a probei de analizat;
- pune în evidență poziționarea și distribuție a elementelor suprapunerea dacă este cazul sau morfologia compușilor.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Difracție de retrodifuzare a electronilor (EBSD)

- pentru caracterizarea cristalografică (textură) și microstructurală.



nedeformat

deformat

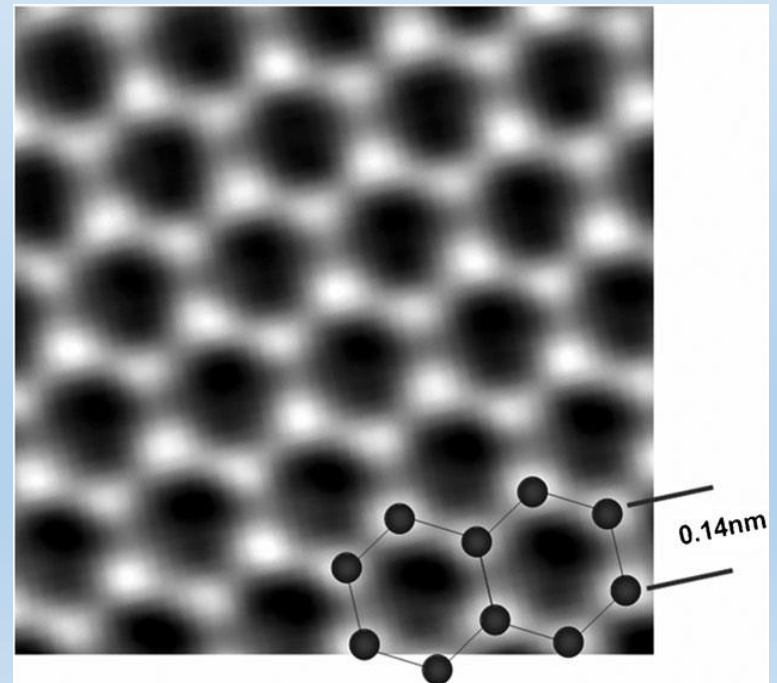
Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopia electronică cu transmisie

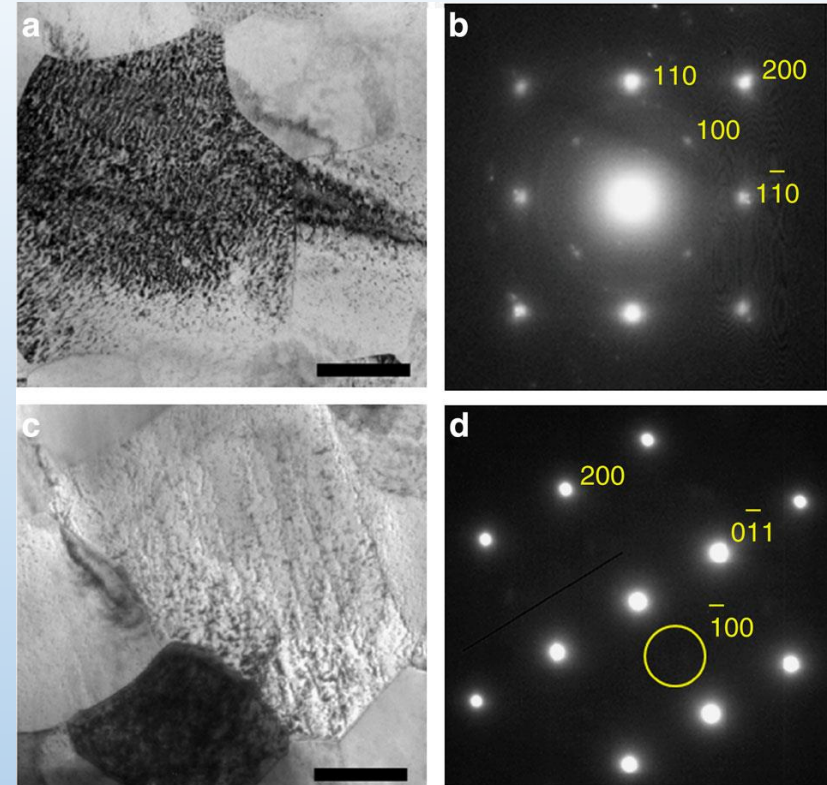
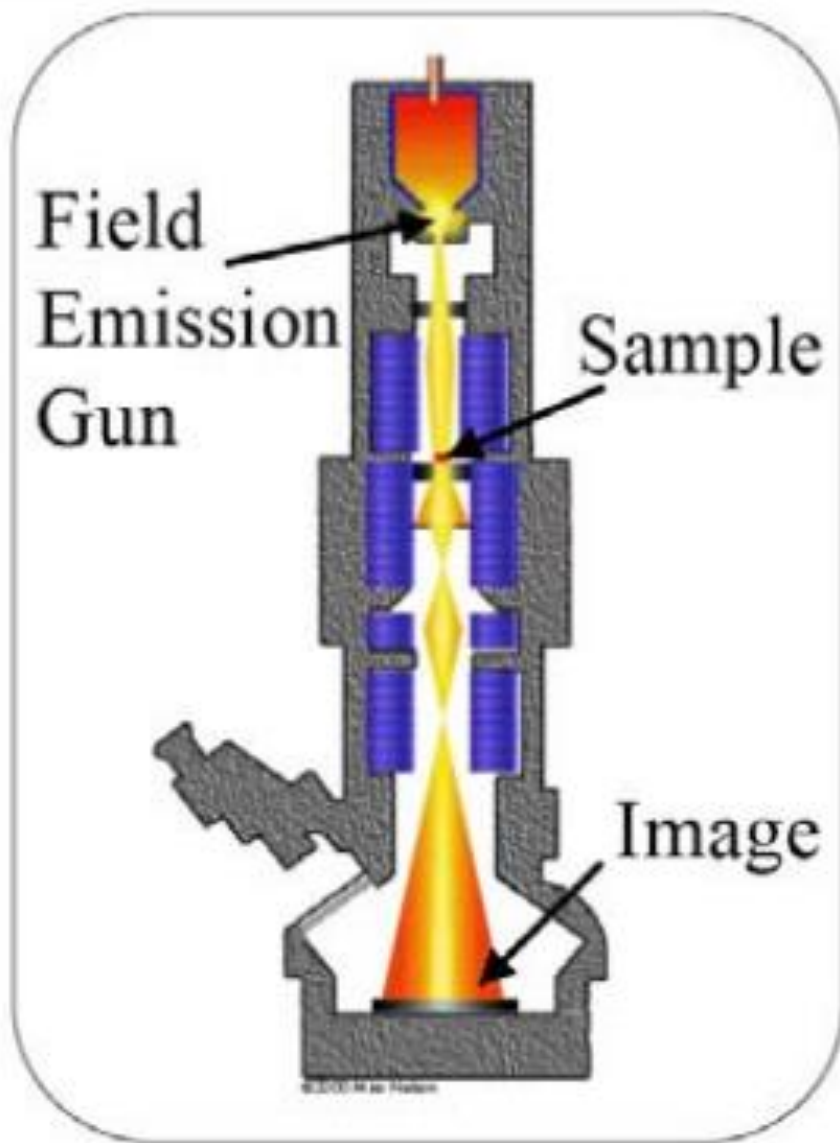
- ❑ Microscopie Electronică cu Transmisie (TEM)
- ❑ Microscopie Electronică cu Transmisie de Inalta Rezolutie (HRTEM)

Avantaje

- Rezoluție de 0,5 Å
- Putere de marire de 50 milioane de ori



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

- **TEM** reprezintă un procedeu de analiză microscopică la care fasciculul de electroni trece prin proba de analizat;
- TEM implică un fascicul de electroni la tensiune înaltă emisă de un catod și focalizată de lentile electrostatice și electromagnetice. Fasciculul de electroni transmis prin proba parțial transparentă dă informații despre structura internă a probei. Imaginea este apoi mărită de o serie de lentile electromagnetice și înregistrată.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Aplicații TEM:

- studiul structurilor cristaline,
- analiza defectelor de rețea
- studierea limitelor de fază.

Deoarece corpurile solide absorb radiațiile, pentru examinare sunt necesare folii deosebit de subțiri ale materialului analizat (ex. 200nm pentru Al; 50nm pentru Fe)

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

- Probele pentru analiză TEM = folii cu grosimi cuprinse între 0,1 ÷ 1 mm.
- urmează subțierea foliilor prin metode chimice și electrochimice (dizolvare anodică).
- lustruirea electrochimică, până în momentul în care materialul este străpuns, în imediata vecinătate a străpungerii obținându-se o folie sub formă de pană înclinată, folie care este suficient de subțire pentru a putea fi folosită ca probă pentru studiul microscopic.

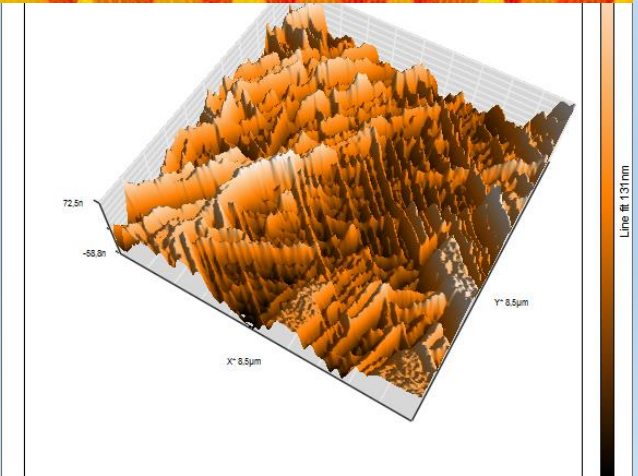
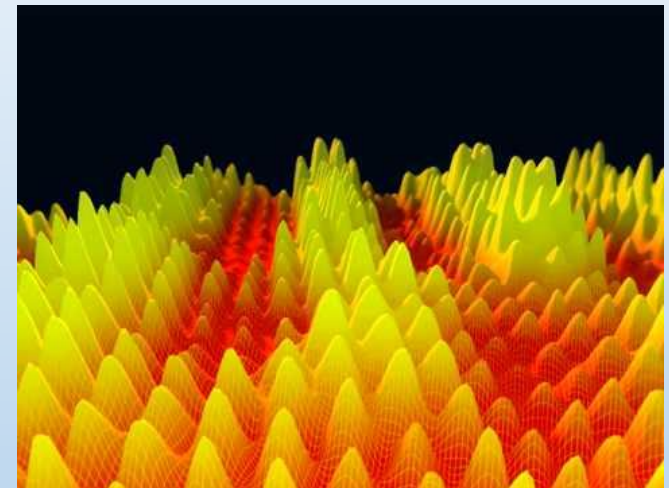
Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopie cu sondă de scanare

- ❑ Microscopia electronică cu efect de tunel (STM)
- ❑ Microscopia de forță atomică (AFM)

Scop

- ❑ imagini ale suprafețelor până la nivel atomic
- ❑ analiza topografică a suprafețelor



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopie cu sondă de scanare

- Familie de tehnici de măsură ce implica baleierea unei suprafețe cu un vârf foarte ascuțit și monitorizarea interacțiunii vârf -suprafață pentru a crea o imagine de înaltă rezoluție a materialului studiat
- Suprafața probei este scanată în direcție x-y și în sus și în jos față de suprafață (direcția z), urmând topografia de așezare a atomilor la suprafață.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopul electronic cu efect de tunel

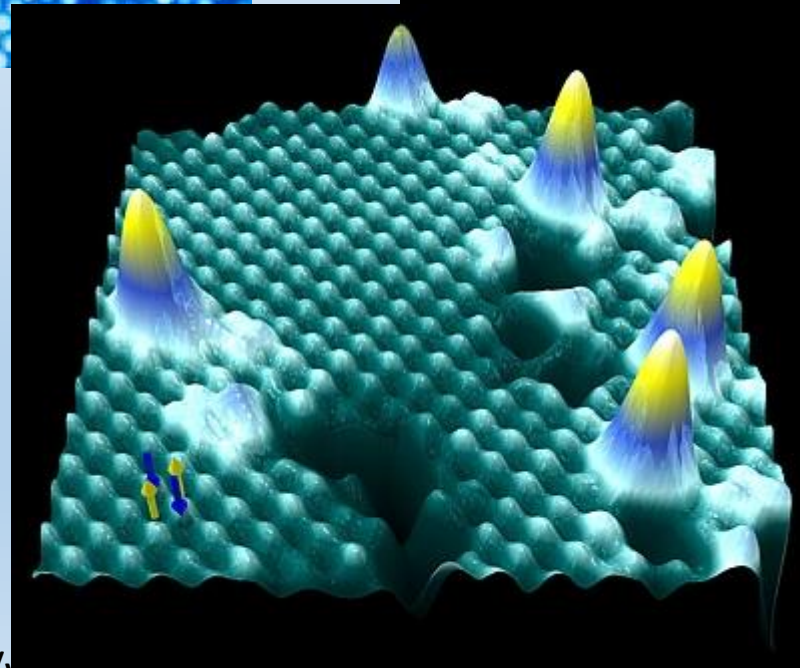
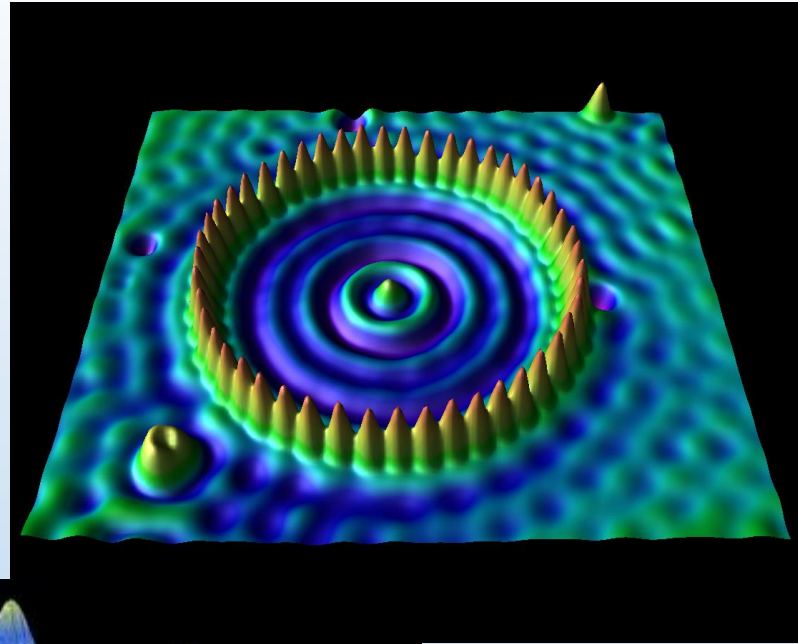
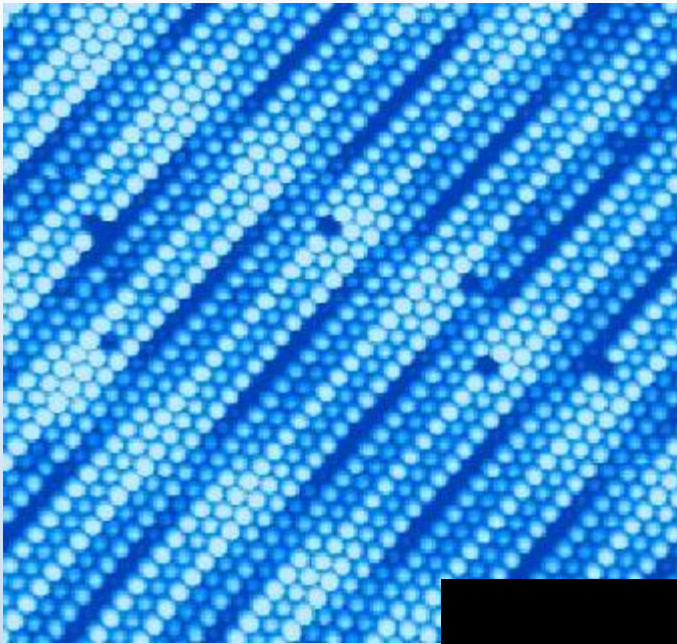
Principiul de funcționare - constă în detectarea curentului electronic de tunelare dintre atomii probei analizate și un vârf conductor foarte ascuțit cu care este înzestrat microscopul.

- Vârful este menținut la o distanță constantă (deasupra suprafeței) prin mișcarea în direcția z în sus și jos după cum este topografia suprafeței.
- Distanța constantă dintre vârf și suprafața probei este menținută printr-un curent de tunelare, generat de o tensiune V aplicată între vârf și suprafața probei conductoare.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

- Curentul de tunelare este curentul care curge prin spațiul lipsit de electroni dintre vârf și suprafața probei. Acest spațiu poate fi de ex. vidul.
- Datorită vârfului microsondei foarte ascuțit, curentul de tunelare într-o anumită poziție curge prin spațiul dintre vârf și atomul deasupra căreia este vârful.
- Scanând suprafața probei și înregistrând valoarea curentului de tunelare se poate obține o imagine de mare rezoluție a topografiei suprafeței

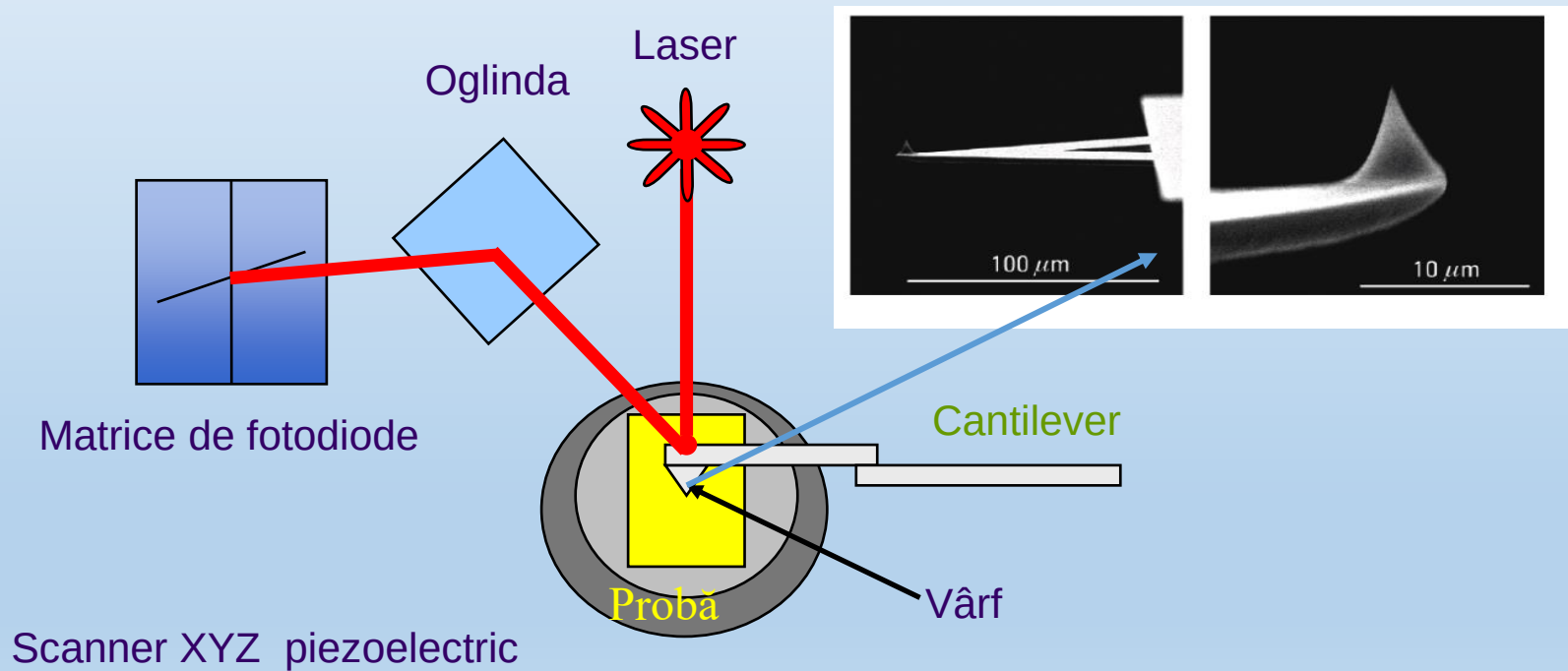
Caracterizarea materialelor prin analiză structurală



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Microscopul de forță atomică (AFM)

se obțin imagini 2D și 3D ale suprafețelor scanate cu o rezoluție laterală nanometrică și de subangstrom pe verticală.

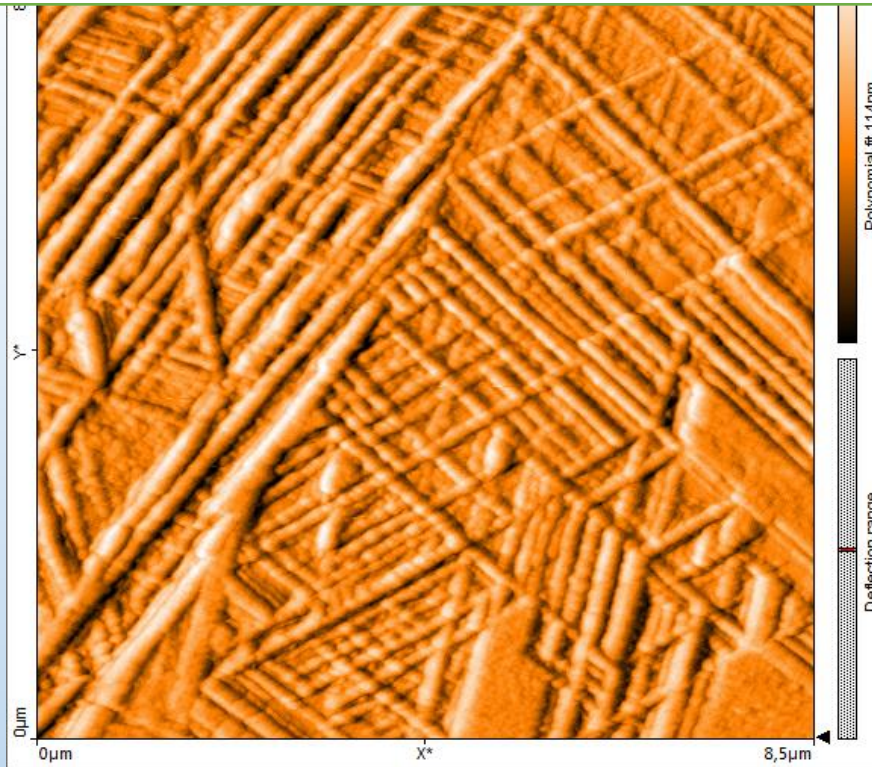


Suprafața probei este scanată de vârful atașat cantileverului.

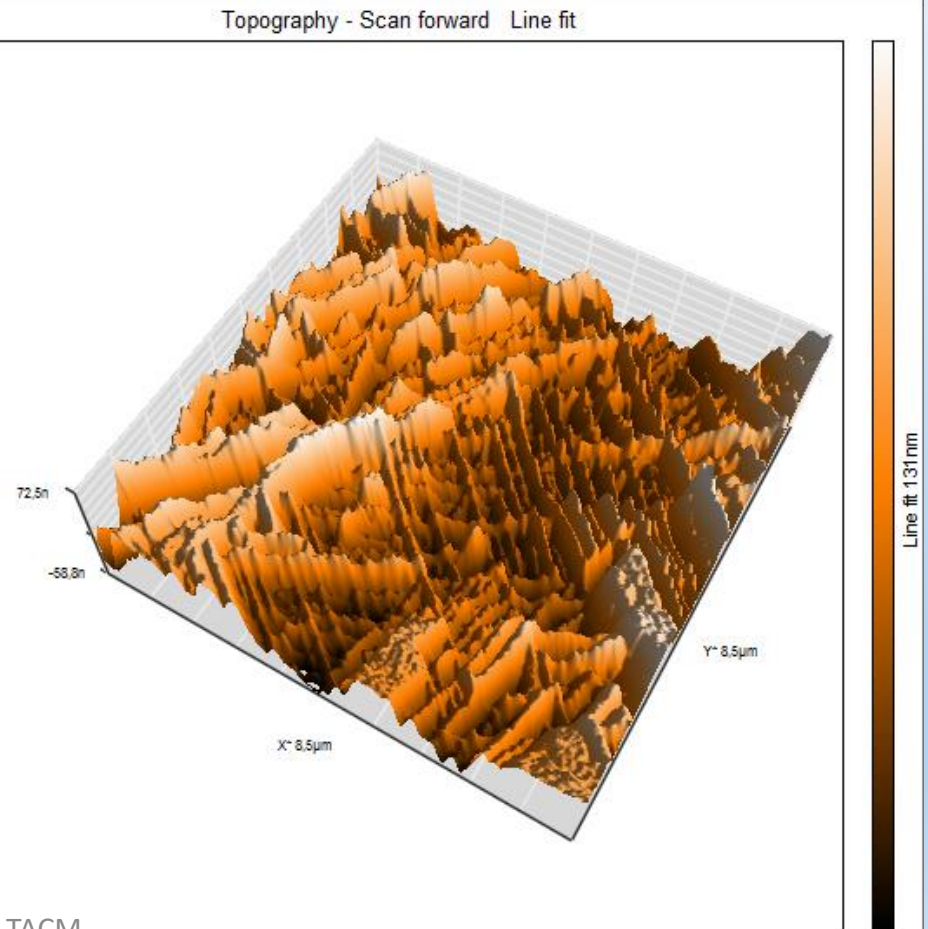
Avantaj al AFM:

- poate opera în aer, în lichide la diferite temperaturi.
- Este utilizat în cercetarea, în industrie AFM (dezvoltarea nanotehnologiei).
- Senzorul este format dintr-un cantilever de lungimea 100-200 μm , acesta fiind prevăzut cu un vârf ascuțit care scanează suprafața probei analizate. Cantilever-ul reflectă un fascicul laser, modificările fizice ale suprafeței fiind asociate cu schimbarea semnalului din fotodetector.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală



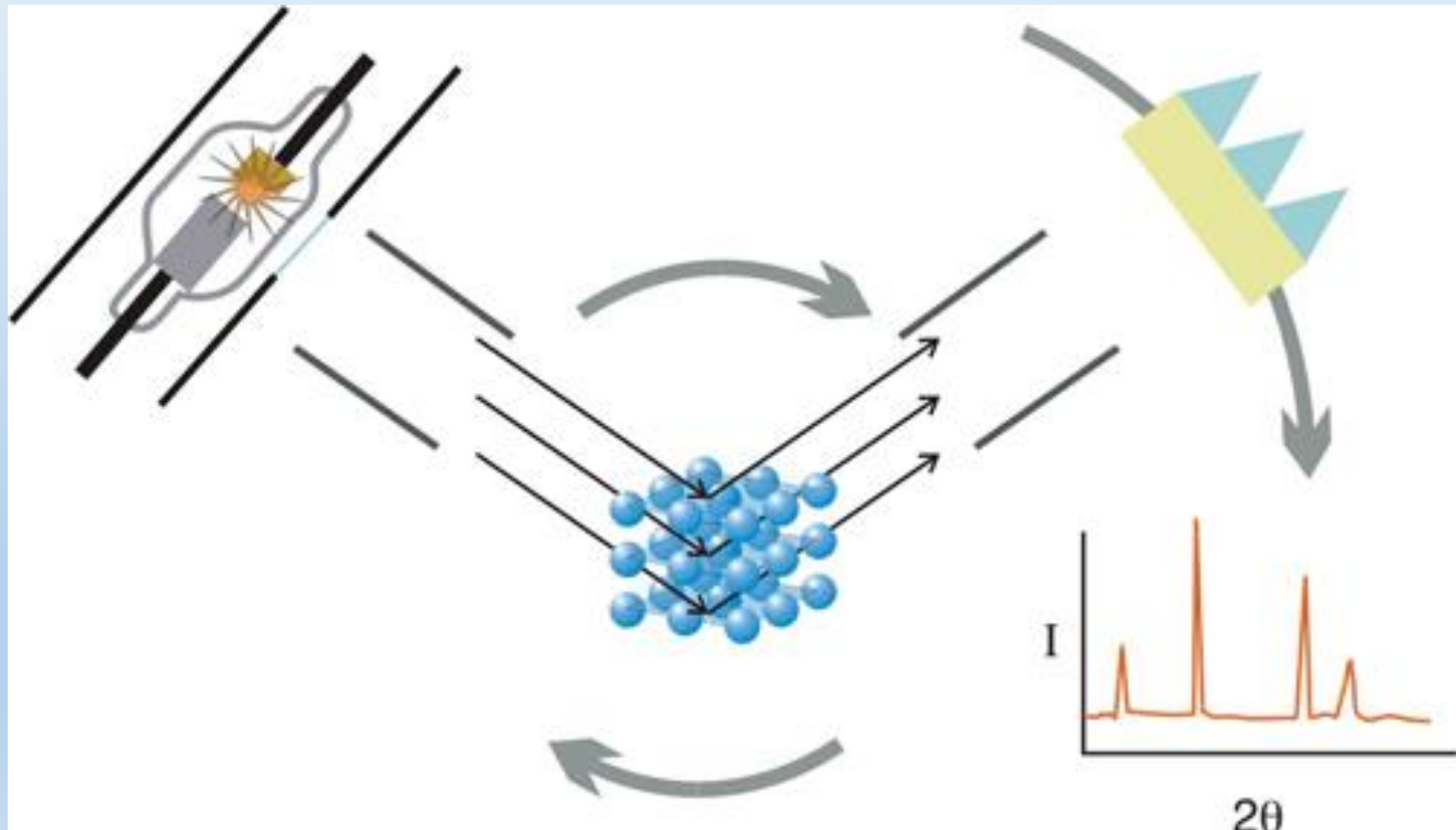
Micrografii 2D si 3 D ale unui aliaj cu memoria fommrei



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Analiza structurală cu radiații X

Lungimea de undă a razelor X $\approx$ parametrii rețelei cristaline



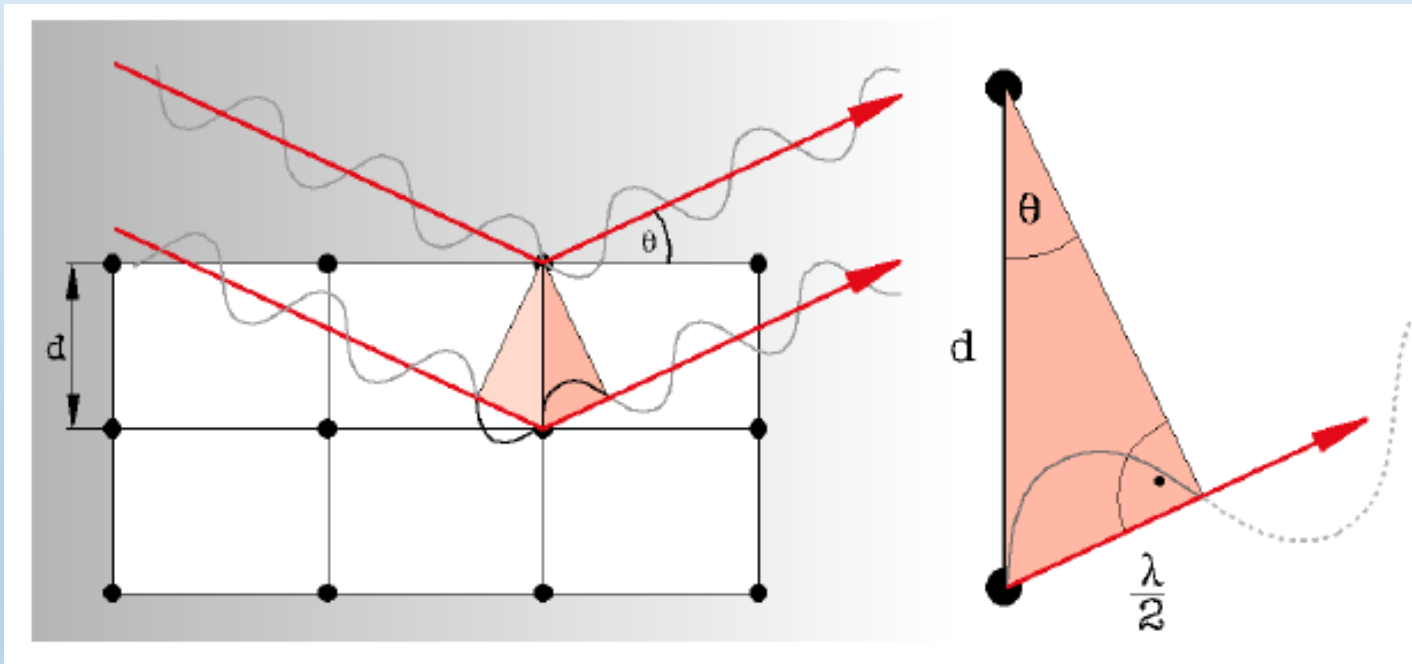
Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Lungimea de undă a razelor X este de același ordin de mărime cu parametrii rețelei cristaline.

La trecerea razelor x prin cristal are loc un fenomen de difracție în locul unui fascicul incident obținându-se mai multe fascicule a a caror unghiuri de difracție depind de structura cristalină și de lungimea de unda a radiației.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Dacă pe cristal cade un fascicul incident îngust de raze X, cu o lungime de undă determinată λ , sub unghiul θ față de planele atomice, dispuse paralel cu suprafața cristalului, distanța dintre plane fiind d , atunci este valabilă rețeaua Wulf și Bragg.



Legea lui Wulff-Bragg: $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$

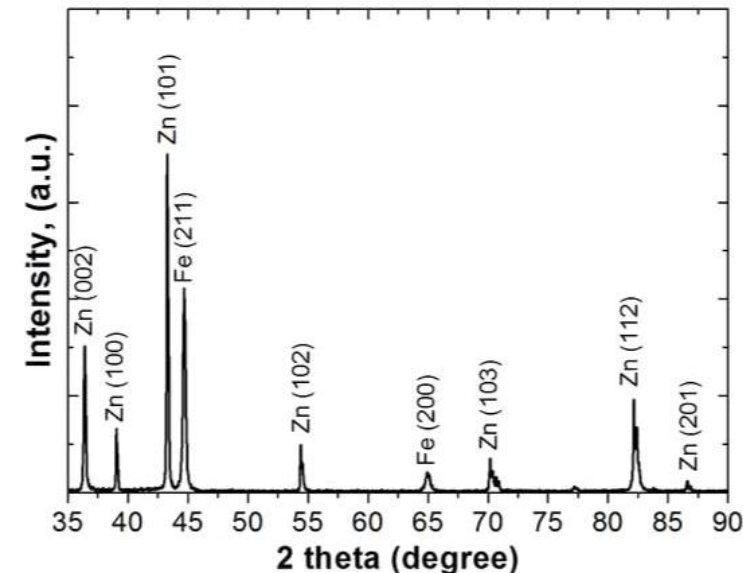
Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

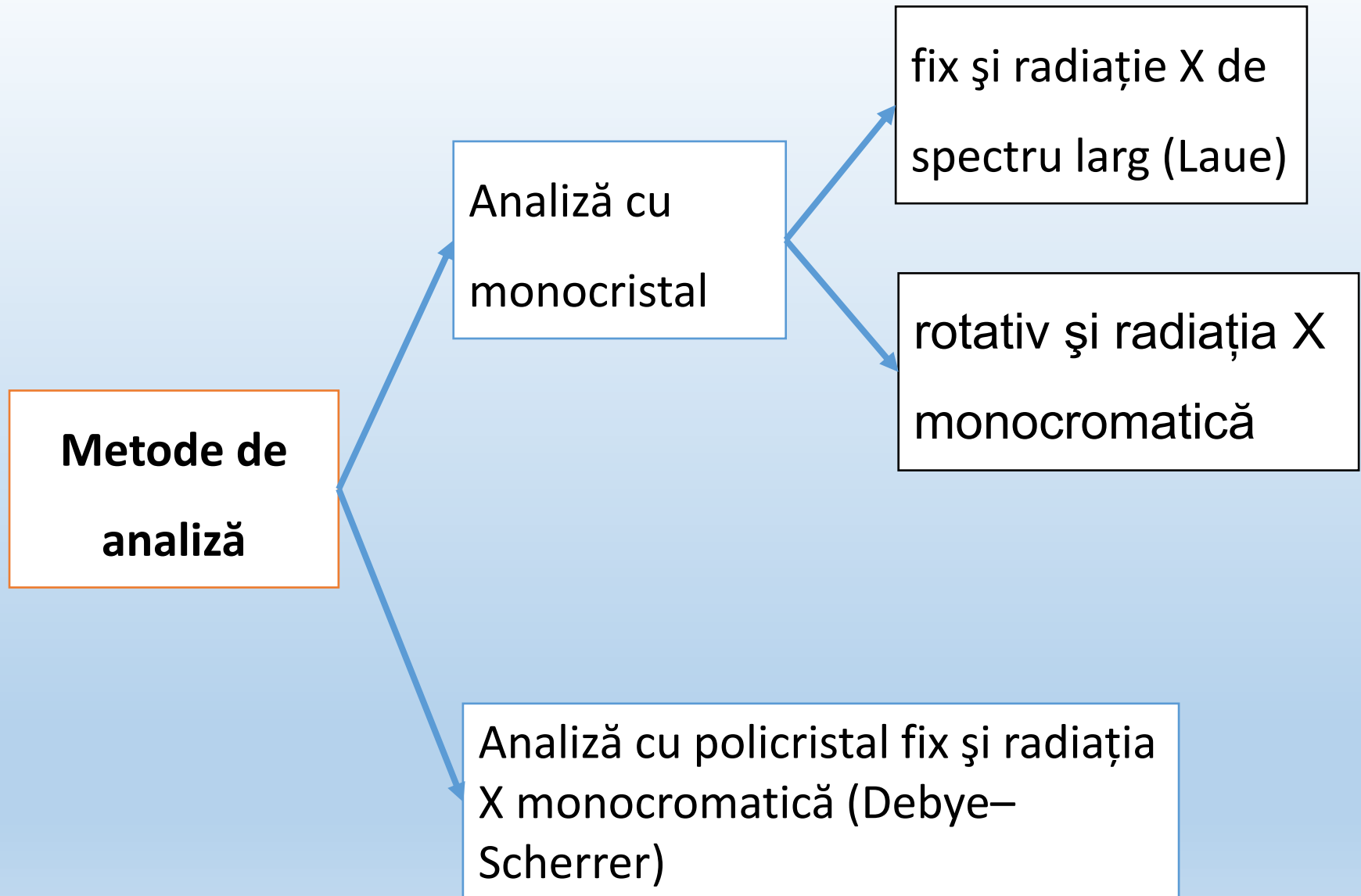
- d este distanța dintre o familie de planele atomice paralele;
- θ - unghiul de incidență al razei cu planul atomic;
- λ - lungimea de undă a razelor;
- n - ordinul difracției.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Studiul structurii fine a materialelor metalice cu ajutorul difracției, permite măsurarea precisă a parametrilor rețelei cristaline precum și identificarea și măsurarea cantitativă a fazelor cristaline. Fiecare fază cristalină produce spectre de difracție caracteristice naturii sale. Fiecare spectru constă dintr-o succesiune de maxime corespunzând fiecărei unei familii de plane atomice (hkl).

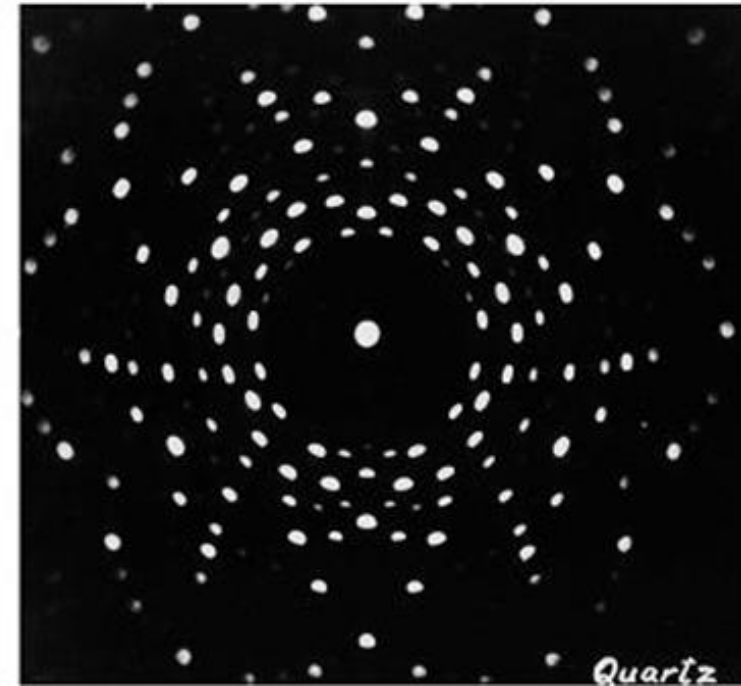
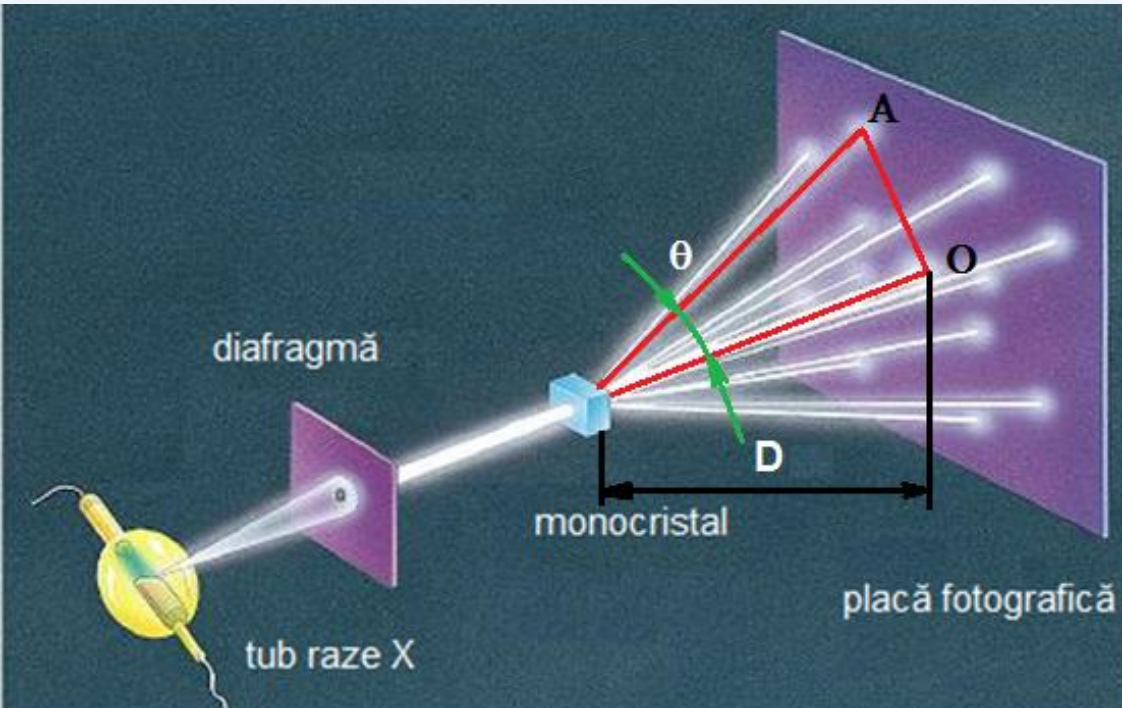


Caracterizarea materialelor prin analiză structurală



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Metoda Laue



$$\operatorname{tg} \theta = \frac{OA}{D}$$

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

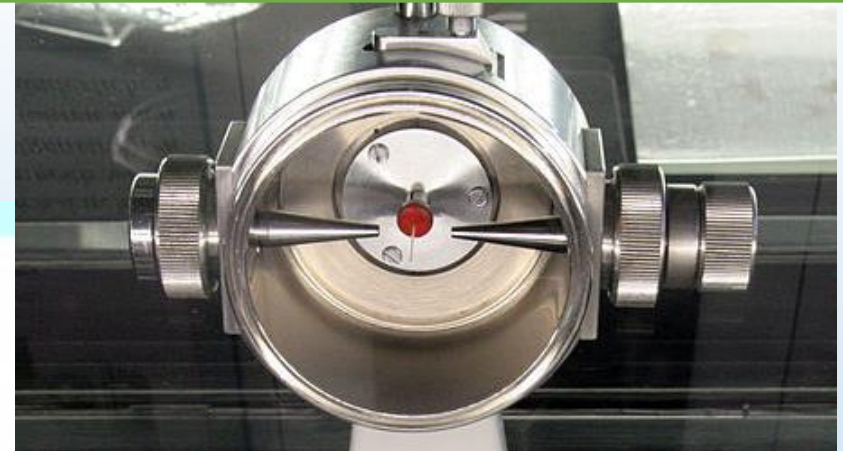
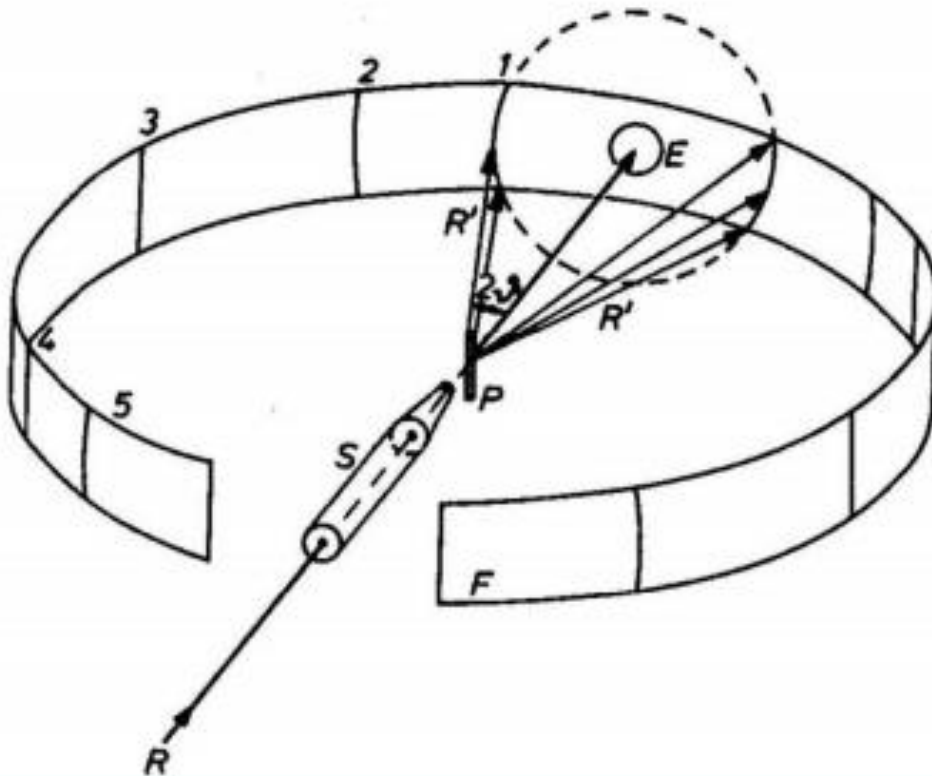
Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Metoda Laue folosește pentru determinarea parametrilor rețelei cristaline, bombardarea unui monocristal fix cu un fascicul de raze X cu lungime de undă cunoscută. Razele x vor fi difractate de atomii monocristalului și vor impresiona o placă fotografică așezată în spatele acestuia.

Cu ajutorul fotogramelor obținute se poate calcula unghiul de difracție care introdus în relația Bragg ajută la determinarea parametrului rețelei cristaline.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

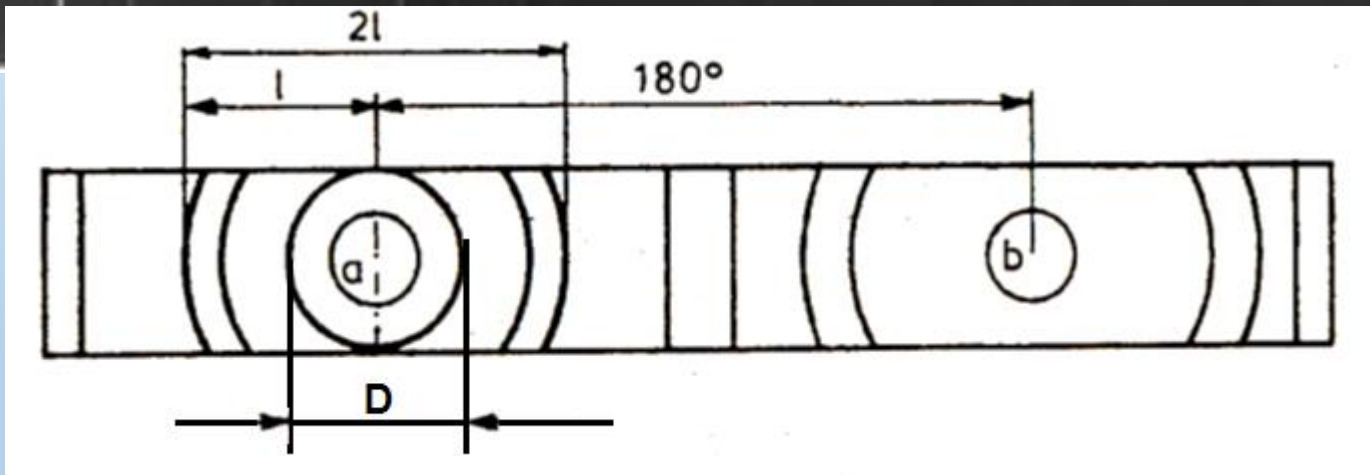
Metoda Debye - Scherrer



Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

- determinarea parametrilor rețelei cristaline, bombardarea unui policristal sau un conglomerat de pulberi metalice în mișcare rotativă, fix cu un fascicul de raze X cu lungime de undă cunoscută.
- *metoda Debye – Scherrer* , utilizează o cameră de difracție cilindrică cu filmul pe peretele lateral și cu proba de formă cilindrică așezată pe axa camerei. Razele X difractate sunt înregistrate pe filmul fotografic sub forma unor linii - arce de cerc , perechi două câte două.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală



$$D = 4 \cdot R \cdot \theta$$

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Mod de lucru:

- se măsoară diametrul primului cerc de pe debyegramă D;
- se cunoaște distanța R la care se afla agregatul policristalin față de film;
- se consideră ca, pentru unghiuri mici, tangenta unghiului este aproximativ egală cu valoarea unghiului respective;
- se poate scrie:

$$D = 4 \cdot R \cdot \theta$$

- se scoate valoarea unghiului teta și se introduce în relația lui Bragg.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Se poate determina:

- parametrul rețelei
- tipul sistemului de cristalizare,
- numărul de atomi din celulă,
- mărimea și forma graunțelului cristalin,
- textura materialului metalic.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

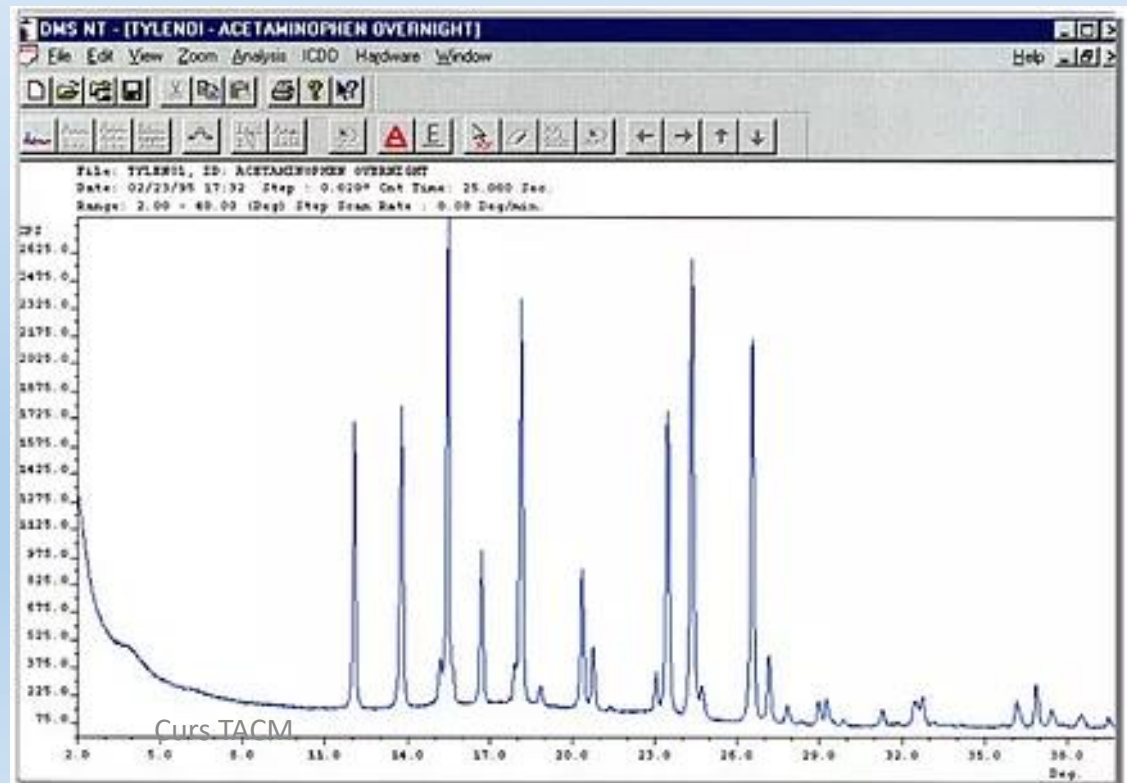
Difractia cu radiatii X este destinată determinării:

- parametrilor structurali ai materialelor mono si policristaline;
- dimensiunilor medii statistice ale cristalitelor;
- analizei calitative si cantitative de faze;
- evaluarea densității de dislocatii si a tensiunilor interne remanente.

Caracterizarea materialelor prin analiză structurală

Determinări si analize difractometrice

- Analiza cantitativă de fază;
- Determinarea structurii;
- Determinarea parametrilor de rețea;
- Determinarea mărimii grăunților cristalini;
- Analiza texturii.



Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Spectroscopia

- O caracterizare completă a unui aliaj sau metal tehnic nu este posibilă fără cunoașterea compoziției și a concentrației diferitelor elemente de aliere care le compun.
- În acest scop sunt folosite la ora actuală tot mai mult procedeele analitice instrumentale.
- Determinările calitative (de compoziție) = punerea în evidență a naturii tuturor componentelor dintr-un aliaj metalic,
- Determinările cantitative (de concentrație) = stabilirea concentrației componentelor aliajului.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

- **Spectroscopia** - știința care se ocupă cu studiul spectrelor.
- **Spectrometru** - Instrument pentru studiul spectrelor prin măsurarea intensității fiecărei radiații monocromatice din spectru;
- **Spectru** – distribuție bine definită a frecvenței liniilor spectrale în funcție de lungimea de undă.
- **Analiza spectrală** - metode de investigare a compoziției și concentrației substanțelor și materialelor ce se bazează pe studiul fenomenelor ce apar ca urmare a acțiunii reciproce dintre radiațiile electromagnetice sau/și particule elementare și proba de analizat.

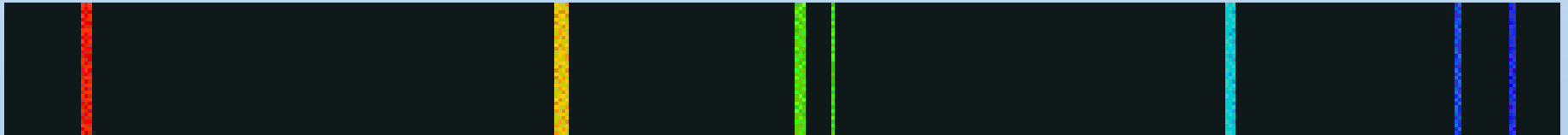
Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Domenii de utilizare:

- ☐ Determinări curente ale elementelor de aliere,
- ☐ Supravegherea automată a proceselor metalurgice prin pregătire specială a probelor - posibilitatea determinării elementelor la limita de fază și la limita de grăunte,
- ☐ Conținutul în elemente, caracterizarea materialelor,
- ☐ Caracterizarea segregațiilor,
- ☐ Studiul difuziei la tratamente termochimice,
- ☐ Studiul starării suprafeței, produselor de coroziune.

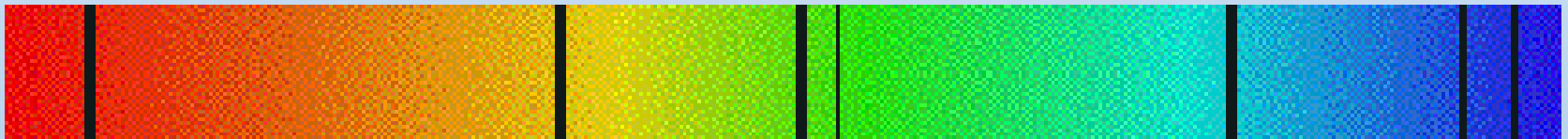
Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Spectrele de absorbție: cuprind totalitatea radiațiilor corespunzătoare tranzițiilor de pe nivelele energetice inferioare ale atomilor și moleculelor pe nivele energetice superioare (se prezintă sub forma unor linii înnegrite ce apar în spectrul continuu inițial corespunzând lungimilor de undă ale radiațiilor lipsă).



Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Spectre de emisie: cuprind totalitatea radiațiilor emise în urma tranzițiilor de pe nivele energetice inferioare, urmare a unor condiții potrivite de excitare (se prezintă doar sub forma acelor linii sau benzi colorate corespunzătoare radiațiilor emise).



Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

**compoziția și
structura
sistemului
atomic care dă
spectre**

spectroscopie nucleară

**nivelele de energie ale
nucleelor atomice și tranzițiile
dintre aceste nivele**

spectroscopie atomică

**nivelele electronice de
energie ale atomilor și
tranzițiile dintre ele**

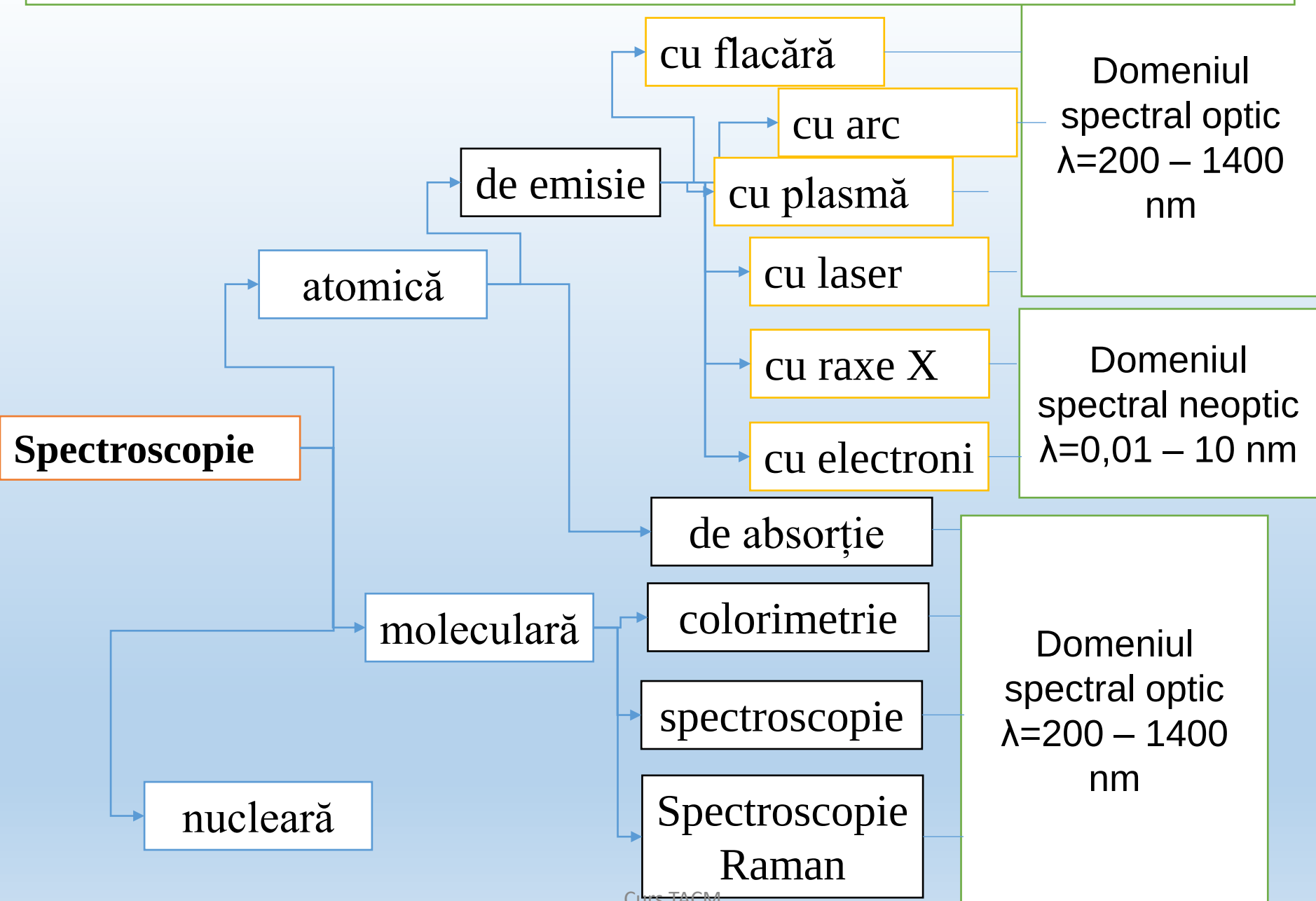
spectroscopie moleculară

**nivelele electronice de
vibrație și de rotație ale
moleculelor și tranzițiile
dintre ele**

spectroscopia mediilor condensate

**studiază nivelele de energie și
tranzițiile dintre ele pentru
sisteme condensate**

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică



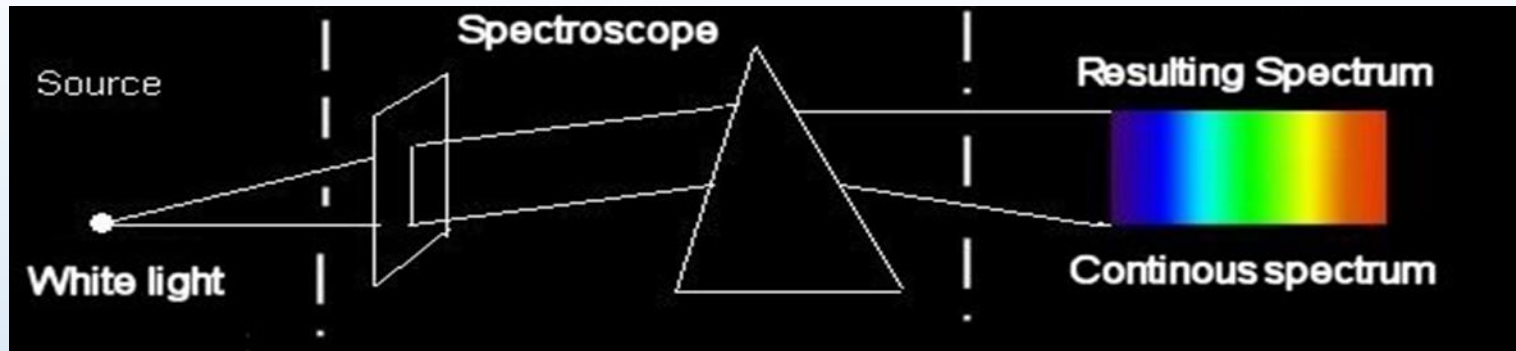
Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Pentru vizualizarea, înregistrarea, examinarea și analiza spectrelor se folosesc aparate specializate numite spectroscopice.

Structura unui spectroscop include:

- ❑ sursa de radiație,
- ❑ proba de analizat,
- ❑ sistemul de vizualizare și înregistrare

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică



Filtrele. Sunt dispozitive optice care se plasează în calea radiațiilor policromatice pentru a separa o anumită lungime de undă sau bandă spectrală cât mai îngustă.

Monocromatoarele. Sunt sisteme optice destinate separării unei anumite lungimi de undă dintr-o radiație complexă.

Prismele. Reprezintă sisteme optice folosite pentru separarea diferitelor lungimi de undă distincte dintr-o radiație incidentă.

Rețele de difracție. Sunt sisteme care descompun radiația policromatică în radiație monocromatică având la bază fenomenul de difracție.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Spectroscopia de emisie atomică

Domeniul spectral optic	→	metodele spectroscopice care operează în zona electronilor de valență
Domeniul spectral neoptic	→	metodele ce operează în zona electronilor apropiați de nucleu

Spectroscopia de emisie atomică

- în flacăra
- cu descărcare electrică în regim de scânteie sau în regim de arc
- cu plasmă cuplată inductiv
- cu radiații Röntgen

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Spectroscopia de emisie atomică cu descărcare electrică în regim de scânteie sau în regim de arc

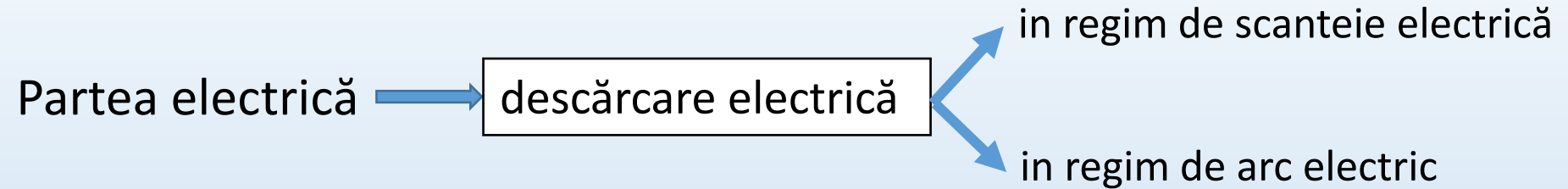
- Principiul metodei = vaporizarea și excitarea atomilor probei de analizat, separarea radiațiilor emise în funcție de lungimea de undă, înregistrarea lor, interpretarea semnalelor obținute.
- Vaporizarea și excitarea atomilor se poate face în arc electric, în scânteie electrică inițiate între un **electrod de grafit** de înaltă puritate și un **electrod** din aliajul de analizat.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Analiza calitativă se face pe baza pozițiilor în spectru (a lungimilor de undă) a radiațiilor emise, fiecare element emițând un spectru caracteristic. Analiza cantitativă se face prin măsurarea intensității radiațiilor emise.

Un spectroscop de emisie atomică cu descărcare electrică în scânteie sau arc se compune dintr-o parte electrică și una optică.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică



Descarcarea în regim de scanteie electrica

Se utilizează pentru analize spectrale cantitative la aliaje metalice.

Este o descărcare scurtă și oscilantă între doi electrozi aflați la o mare diferență de potențial.

Temperatura scântei electrice $\approx 10.000-30.000^{\circ}\text{C}$.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

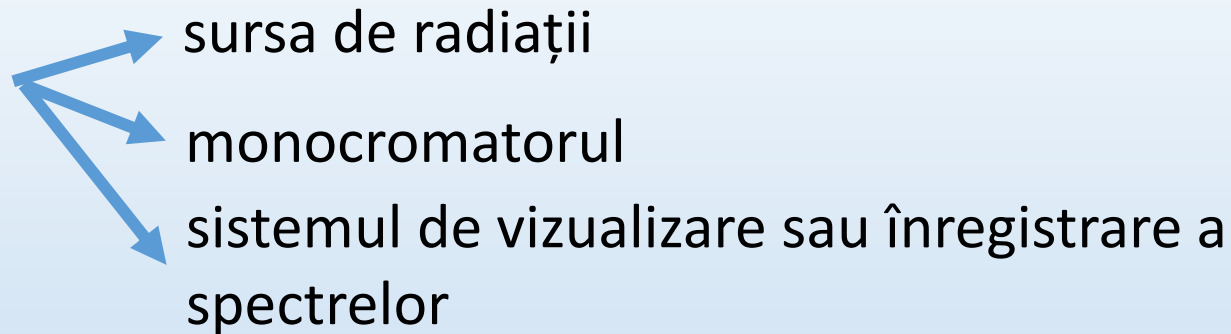
Descarcarea in regim de arc electric

Pune în evidență toate elementele metalice și unele metaloide.

- curenți continuu de joasă tensiune (10-25 V, 5-30 A),
 - curenți continuu de înaltă tensiune (1200 V, 0,2-0,3 A).
- Vaporizarea se produce datorită încălzirii ce are loc la trecerea curentului electric.
- Temperatura arcului de curenți continuu $\approx 4000-6500^{\circ}\text{C}$. Excitarea atomilor probei se datorează atât energiei termice, cât și energiei electrice.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Partea optică



- sursa de radiatii = este reprezentată de scanteia sau arcul care se formează între doi electrozi;
- monocromatorul = realizează descompunerea radiației policromatice în lumină monocromatică.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Analiza calitativă constă în identificarea liniilor spectrale caracteristice, care definesc un anumit element, folosind atlasele spectrografice, realizate de producătorul de spectroscopie

Analiza cantitativă - se face determinând intensitatea radiațiilor emise în funcție de concentrația speciei de analizat.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Metode electrochimice de analiză

Metode electrochimice
de analiză

Electrogravimetrie

Coulometrie

Electrografie

Potențimetrie

Voltametrie

Conductometrie

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Electrogravimetria → determinarea cantitativă a ionilor metalici din soluția de analizat prin depunerea acestora pe catod și cântărirea acestuia. Din diferența dintre masa finală și cea inițială a catodului rezultă cantitatea de metal depusă pe catod și, prin raportare la soluția inițială de electrolit se determină concentrația.



Curs TACM



Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Coulometria → determina cantitatea de electricitate ce trece printr-un circuit de electroliză (concentrației unor metale din soluție).

Electrografia → metodă electrochimică calitativă, bazată pe migrația cu viteză diferită a ionilor sub gradient de potențial, și punerea în evidență a acestora prin reacții de culoare.

Potențimetria → determinarea potențialului unui electrod introdus în soluția de analizat.

Voltametria → studiul și interpretarea proceselor de electrod cu ajutorul curbelor intensitate - potențial.

Conductometria → metodă de analiză cantitativă bazată pe dependența dintre conductivitatea electrică a unei soluții și concentrația unui ion din acea soluție.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Determinarea rezistenței la coroziune

Coroziunea → fenomenul de distrugere parțială sau totală a metalelor sub acțiunea agenților chimici sau electrochimici din mediul înconjurător, cu formarea unor compuși chimici.

Rezistența la coroziune - proprietate chimică.

Coroziunea = **proces electrochimic** când mediul corosiv este un electrolit.

După aspectul distrugerii, coroziunea poate fi clasificată în: *coroziune continuă*, când întreaga suprafață metalică a fost cuprinsă de acțiunea mediului agresiv;

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

După aspectul distrugerii poate fi clasificată în:

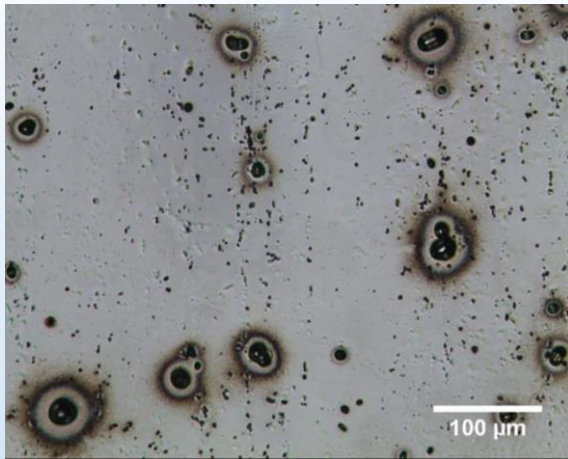
- ❑ *coroziune continuă*, când întreaga suprafață metalică a fost cuprinsă de acțiunea mediului agresiv;
- ❑ *coroziune locală*, când distrugerea se produce numai pe anumite porțiuni ale suprafeței metalului sau aliajului.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Coroziunea locală poate fi :

- ❑ *coroziunea punctiformă* – se localizează pe suprafețe mici (puncte de coroziune sau pitting);
- ❑ *coroziunea sub suprafață* – începe la suprafață, dar se extinde în principal sub suprafața metalului (pungi de coroziune);
- ❑ *pete de coroziune* – se repartizează pe suprafețe relativ mari, dar adâncimea lor este mică;
- ❑ *coroziunea intercristalină* – se caracterizează prin distrugerea selectivă a metalului la limita dintre cristale;
- ❑ *coroziunea transcristalină* –distrugerea corozivă este determinată de direcția tensiunilor mecanice de întindere.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică



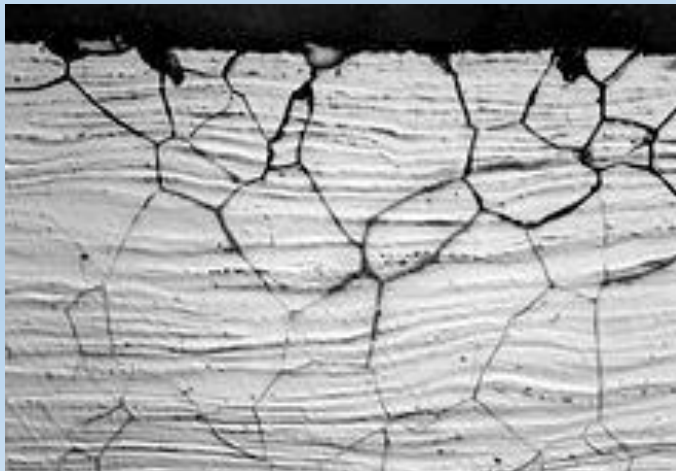
coroziunea punctiformă

pete de coroziune

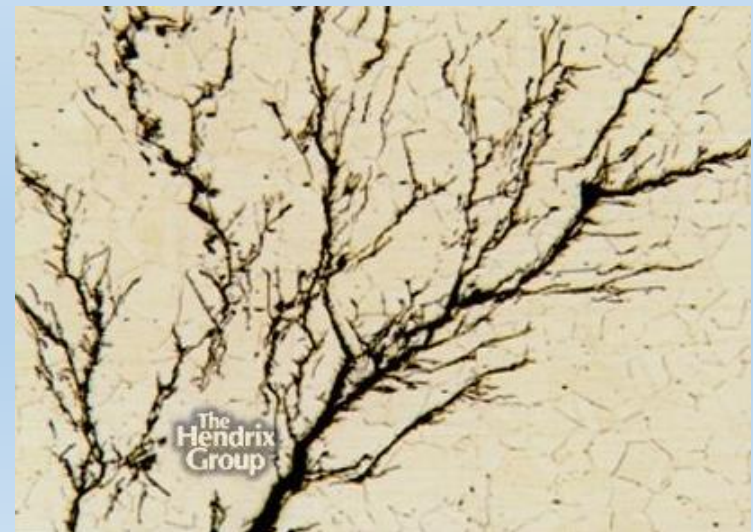


coroziunea sub suprafață

coroziunea intercristalină



coroziunea transcristalină



Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

După mecanismul de desfășurare se pot distinge două tipuri de coroziune:

- **coroziune chimică** - care se referă la procesele de distrugere a metalelor și aliajelor care se produc în gaze uscate, precum și în lichide fără conductibilitate electrică și în majoritatea substanțelor organice;



- **coroziune electrochimică** - se referă la procesele de degradare a metalelor și aliajelor în soluții de electroliți, în prezența umidității, fiind însoțite de trecerea curentului electric prin metal.



RMS Titanic Inc./Discovery Channel/AFP

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Rezistența la coroziune

viteza de corodare $V_{\text{cor}} = \Delta m / S \cdot t$, g/m²

penetratie $p = V_{\text{cor}} / \rho$, mm/s,

unde Δm este pierderea de masă;

S - suprafața;

t - timpul;

ρ - densitatea.



Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Protecția anticorrosivă:

- ☐ galvanizare,
- ☐ metalizare,
- ☐ placare,
- ☐ tratamente termochimice,
- ☐ vopsire,
- ☐ lăcuire.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Influența unor factori asupra oxidării metalelor

Factori interni: compoziția chimică a materialului, structură, starea de prelucrare, tensiuni interne;

Externi: natura mediului corosiv, prezența gazelor, temperatură, apă (PH-ul, prezența microbilor, a bicarbonaților etc), viteza curenților.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Coroziune chimică (uscată): coroziunea metalelor în atmosferă fără umiditate; are loc datorită acțiunii chimice directe a gazelor atmosferice :O₂, CO₂, SO₂ precum și în lichide fără conductibilitate electrică și în majoritatea substanțelor organice; .

- Coroziune oxidativă;
- Coroziunea în metale lichide și neelectroliti;
- Coroziunea în gaze.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Coroziune electrochimică: proces de degradare a metalelor și aliajelor în soluții de electroliți, în prezența umidității, fiind însoțite de trecerea curentului electric prin metal.

Pentru apariția acestui tip de coroziune este necesar să existe un anod, un catod, un electrolit și un conductor, deci un element galvanic.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Regimul electrochimic

potențiostatic

potențiodinamic

galvanostatic

galvanodinamic

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Evaluare:

- ☐ tipul de coroziune;
- ☐ principalii parametri ai procesului de coroziune;
- ☐ viteza de coroziune;
- ☐ rezistența la coroziunea localizată;
- ☐ intensitatea procesului de coroziune localizată;
- ☐ efectele procesului de coroziune.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Viteza de coroziune

- ❑ *Viteza de coroziune superficială* - pierderea în greutate în unitatea de timp pentru unitatea de suprafață;
- ❑ *Viteza de penetrare* - grosimea stratului de metal îndepărtat prin coroziune în unitatea de timp

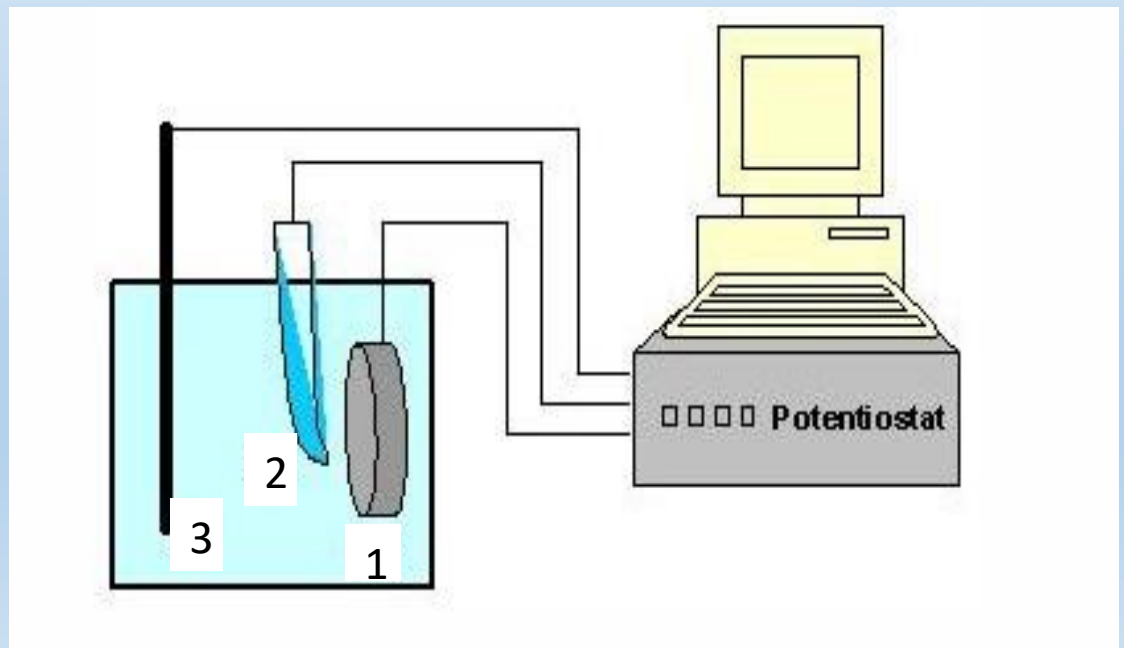
Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Inercările potențiostatice - potențialul se menține constant, cu ajutorul unui potențiostat electronic.

Densitatea de curent măsurată în anumite condiții = viteză de coroziune.

celulă electrochimică

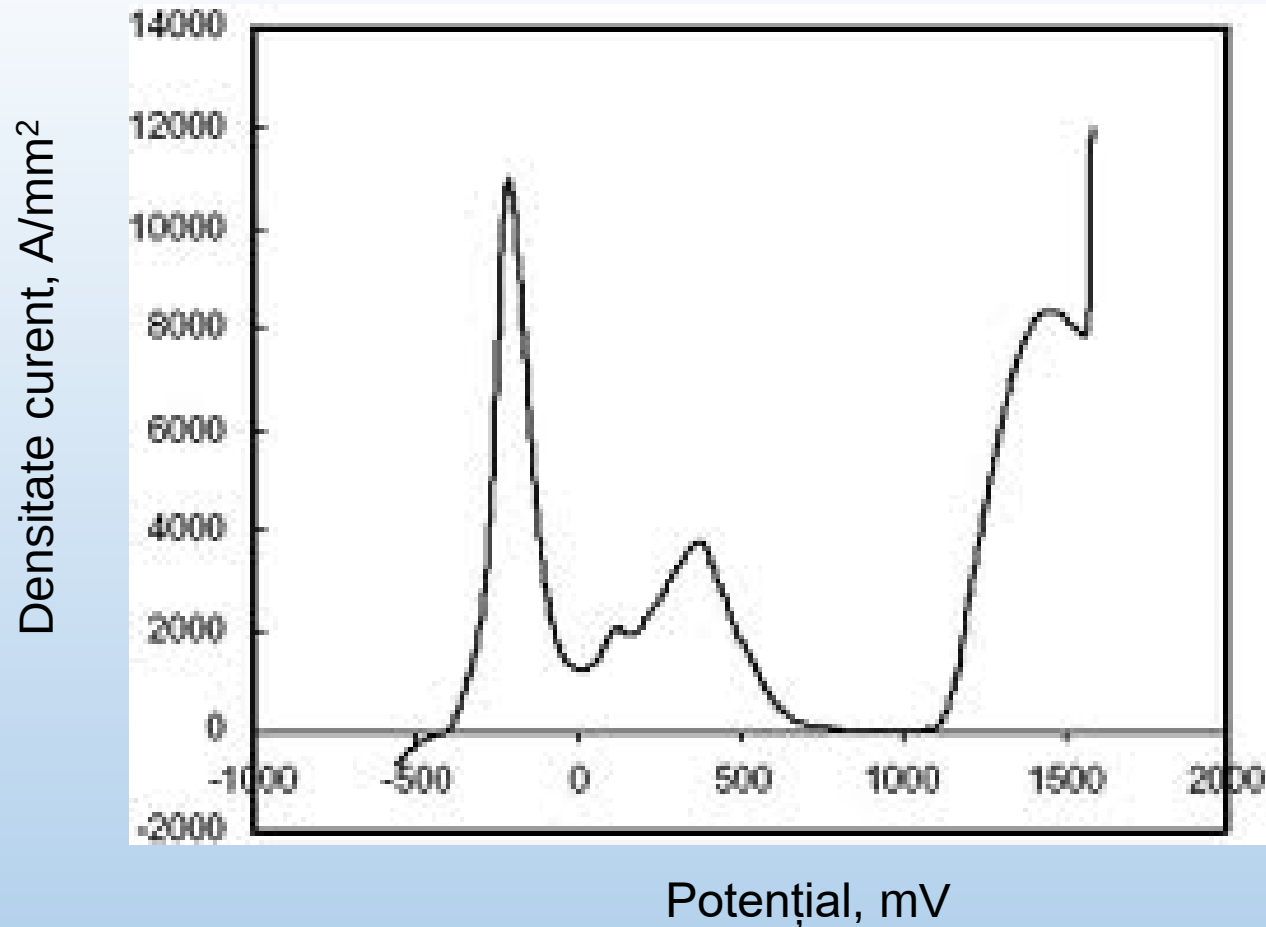
- 1 proba (electrod de lucru)
- 2. electrod de referință
- 3. contraelectrod



Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

- ❑ Măsurătorile se pot realiza într-o celulă cu trei electrozi, prevăzută cu manta de termostatare și cu sistem de barbotare a gazelor prin soluție (fie gaze inerte fie aer sau oxigen).
- ❑ Permite evaluarea potențialului în circuit deschis, pentru înregistrarea curbelor de polarizare anodică liniară și pentru înregistrarea curbelor de polarizare ciclică.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică



$$I_{cor} = B \cdot \frac{1}{R_p}$$

I_{cor} – viteza de coroziune

B - constantă

R_p - rezistenței de polarizare

Încercările potențiodinamice

- ❑ Principalele metode de măsurare a coroziunii sunt cele electrochimice; se bazează pe măsurarea curentului și a potențialului de coroziune.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Monitorizarea potențialului de circuit deschis

- ❑ măsoară variația în timp a potențialului electrodului de lucru în raport cu un electrod de referință, folosind un voltmetru cu impedanță foarte mare.
- ❑ Permite determinarea curentului de coroziune la potențialul de corodare a unui metal sau aliaj folosind curba de polarizare liniară obținută pentru supratensiunile relativ mici.
- ❑ Potențialul de electrod = diferența de potențial care apare între un metal și o soluție de electrolit în contact cu metalul.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică



Sistemul de analiza a coroziunii = potențiostat + calculator + celula electrochimică în care se află cei trei electrozi (un electrod de calomel saturat ca electrod de referință, un electrod de platină utilizat ca electrod auxiliar și un electrod din Teflon, pe care este fixată proba de analizat).

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Potențostat :

- voltametrie liniară;
- voltametrie ciclică;
- studii de coroziune (pitting).

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Condiții:

- suprafața expusă coroziunii să fie plană, unidimensională, fără muchii și colțuri;
- contactele dintre probă și bornele aparatului de măsură să fie sigure și să nu se modifice în timp, evitându-se pe cât este posibil apariția oxidării sau pătrunderea mediului de coroziune;
- materialul izolator utilizat pentru încadrarea probei să fie inert din punct de vedere chimic și să asigure etanșietatea, pentru ca suprafața probei să fie cea măsurată și să se evite apariția coroziunii în crevase.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

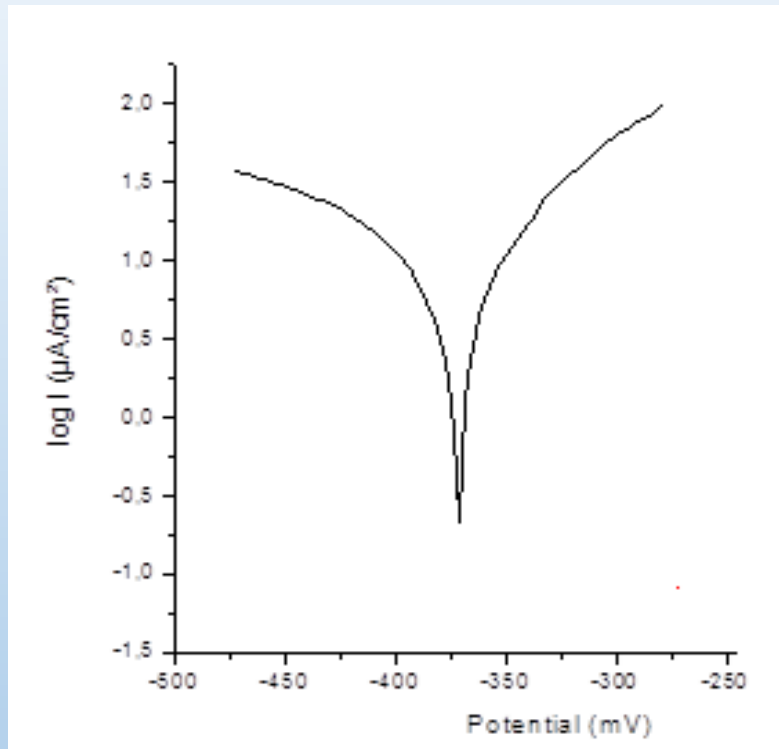
- Procesul fundamental în reacțiile electrochimice este transferul de electroni la interfața metal/soluție.
- Cinetica acestui proces poate fi influențată semnificativ de:
- microstructura și rugozitatea suprafeței electrodului,
- prezența unor specii ionice sau atomice adsorbite (care pot bloca centrii activi).

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

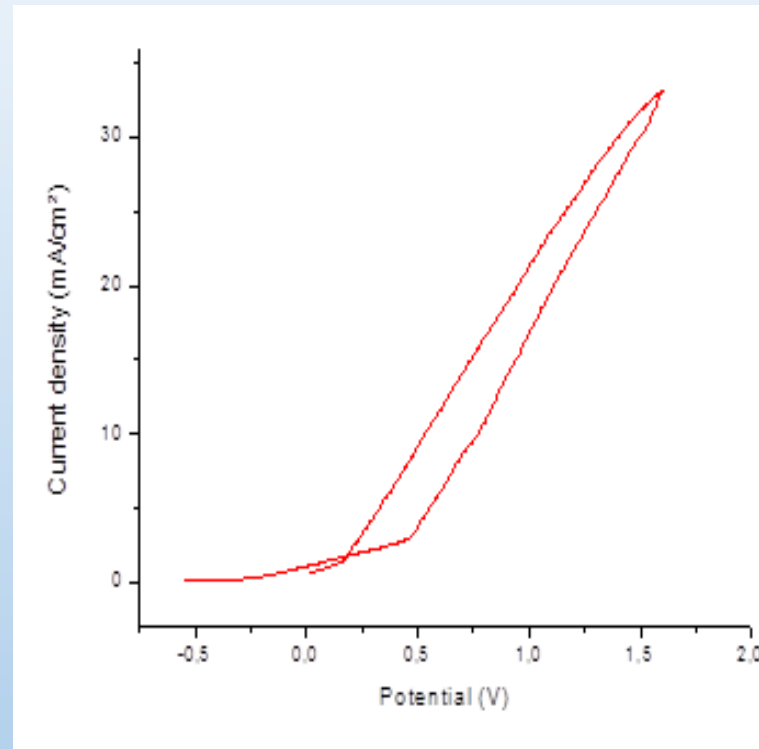
Testele de coroziune constau de obicei în obținerea diagramei Tafel și a parametrilor caracteristici coroziunii:

- potențialul de coroziune (E);
- rezistența la polarizare (R_p);
- curentul de coroziune (i_{corr});
- pantele curbei Tafel (B_a și B_c);
- viteza de coroziune.

Caracterizarea materialelor prin analiză chimică



*Variația polarizării
liniare (Tafel)*



*Curba de polarizare
potențiodinamică*

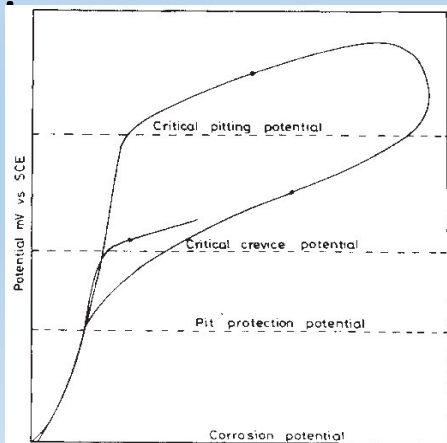
Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

- Curbele de polarizare liniară permit evidențierea potențialelor de coroziune (E_{cor}) și a curenților de coroziune (I_{cor}).
- Densitatea curentului de coroziune (I_{cor}) este reprezentativ pentru gradul de deteriorare al materialului. Aceasta poate fi estimată din analiza curbei liniare (Tafel).

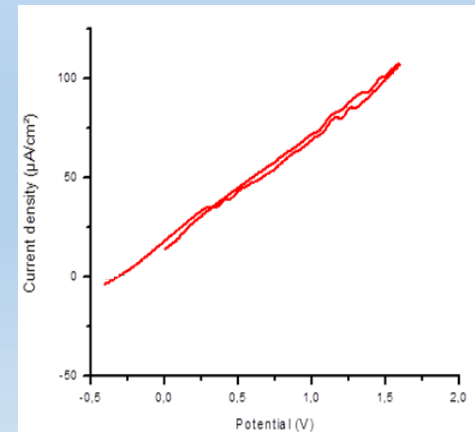
Caracterizarea materialelor prin analiză chimică

Din diagrama ciclică a procesului de coroziune se determină tipul de coroziune pe care îl prezintă materialul (pitting sau coroziune generalizată). În cazul coroziunii pitting variația potențialului înregistrată în timpul procesului de coroziune formează o buclă între cele două puncte de potențial stabilite. În cazul coroziunii generalizate variația potențialului înregistrată în timpul procesului de coroziune formează o singură linie între cele două puncte de potențial stabilite.

*coroziune
pitting*



*coroziune
generalizată*



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Proprietăți mecanice

Proprietățile mecanice reflectă comportarea metalelor și aliajelor sub acțiunea unor forțe exterioare de natură mecanică.

➤ *Structura metalului*, care reprezintă modul de distribuție a atomilor, cât și forțele de legătură dintre atomi pot influența profund caracteristicile mecanice.

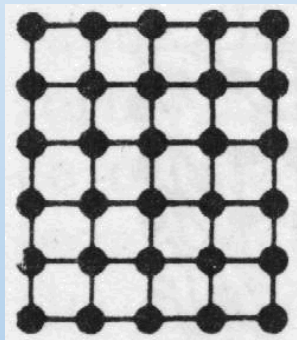
Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

➤ Studiul caracteristicilor mecanice se efectuează conform standardelor, pentru fiecare metal în parte, în laboratoare de specialitate, cu ajutorul aparatelor speciale de încercări mecanice.

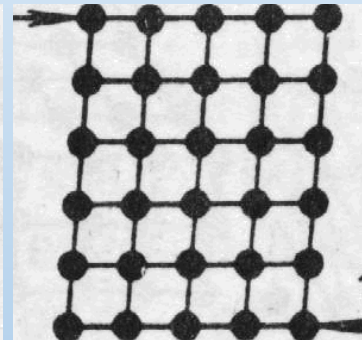
Prin încercări mecanice se studiază modul de comportare al unei epruvete din materialul studiat până când aceasta cedează. Se înregistrează valorile parametrilor caracteristici pe timpul încercării și se analizează felul ruperii cât și aspectul ruperii.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

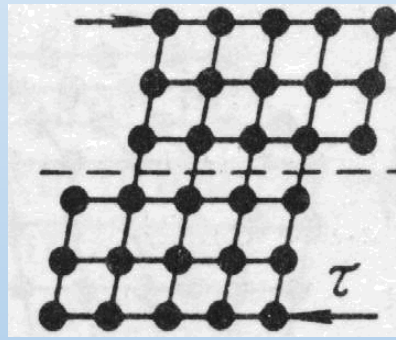
► **Materialele** sunt apreciate după rezistența lor mecanică, adică după capacitatea de a suporta încărcări apreciabile fără a se înregistra deformații considerabile.



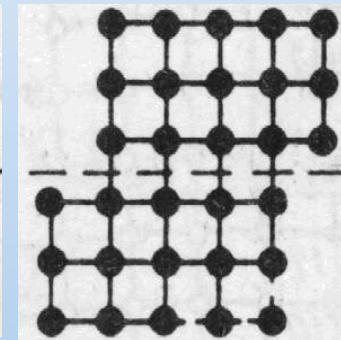
Cristalul
inițial



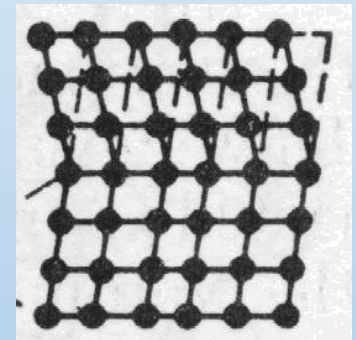
Deformare
elastică



Creșterea deformării
elastice și apariția
alunecării atomilor
la limita de
elasticitate



Deformare
plastică
prin forfecare



Deformare plastică
prin rotirea unor
grupe de atomi
față de planul de
deformare (maclare)

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Încercările mecanice de rezistență urmăresc în principal determinarea comportării la sollicitările simple de:

- întindere (tracțiune), compresiune
- forfecare
- încovoiere
- răsucire (torsiune).

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Proprietate mecanică	Metoda de testare
Elasticitate, plasticitate	Test de tracțiune, test de compresie, test de îndoire, test de torsiune
Rigiditate, comportamentul materialului sub sarcină statică	
Comportare la fluaj	Test de comportare la fluaj
Duritate	Brinell, Rockwell, Vickers
Reziliență	Test de reziliență
Comportament la oboseală	Test de oboseală
Rezistență la oboseală	

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Denumirea încercării	Standarde	Caracteristici determinate
Tracțiune	SR EN 10002-1/94, SR EN 10002-5/96, STAS 9760-84, STAS 6596-73, STAS 7209-73, STAS 8027-78	Limita de curgere, limita de rupere, alungirea la rupere, gătuirea la rupere, limita tehnică de fluaj, rezistența tehnică de durată, limita tehnică de relaxare Energia de rupere Limita de oboseală, rezistența la oboseală pentru N cicluri de solicitare
Compresiune	STAS 1552-78	Limita de curgere, rezistența la compresiune, scurtarea specifică Rezistența la flambaj
Încovoiere	SR EN 10045-1/1993, STAS 1660-80, SATS 7511-81	Rezistența la încovoiere, săgeata la încovoiere Energia de rupere, reziliența Limita de oboseală, rezistența la durabilitate limitată
Răsucire	-	Rezistența la torsiune Energia de rupere
Forfecare	STAS 7926-67	Rezistența la forfecare
Presiune de contact	STAS 493-91, STAS 492/1-85, SR EN 10003-1, 1997	Rezistența la strivire Duritatea Brinell, Vickers, Rockwell, Duritatea de durată Duritatea dinamică

ÎNCERCAREA LA TRACȚIUNE

Încercarea la tracțiune se execută aplicând unei epruvete standardizate o forță axială crescătoare, înregistrând continuu variațiile de lungime, până în momentul ruperii.

Aplicarea unei forțe exterioare F determină apariția în epruvetă a unor reacțiuni numite tensiuni normale, care se calculează cu relația:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Fiecărei tensiuni îi corespunde o anumită alungire care se calculează cu relația:

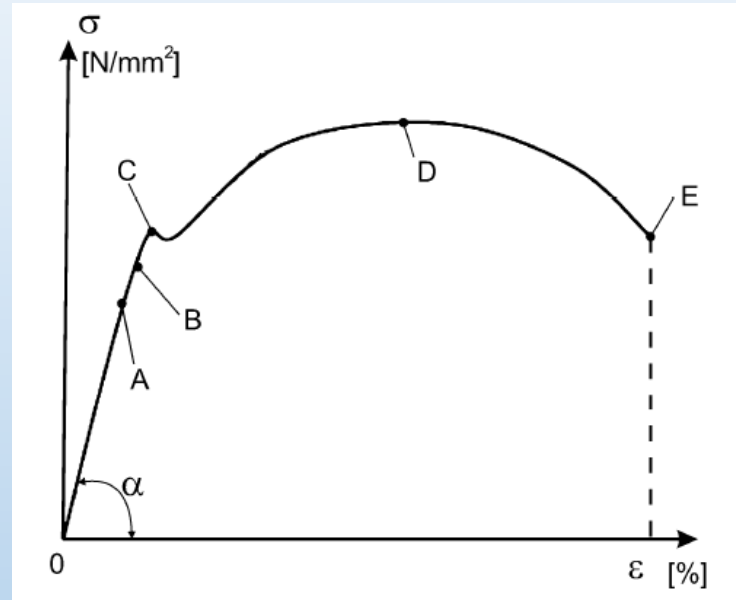
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Prin reprezentarea grafică a variației tensiunii în raport cu alungirea, rezultă curba caracteristică a materialului, numită și curba tensiune-deformație.

Prima parte a curbei caracteristice este o linie dreaptă, tensiunile normale fiind proporționale cu deformațiile ceea ce se exprimă prin legea lui Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$



σ - tensiunea normală

ε - alungire

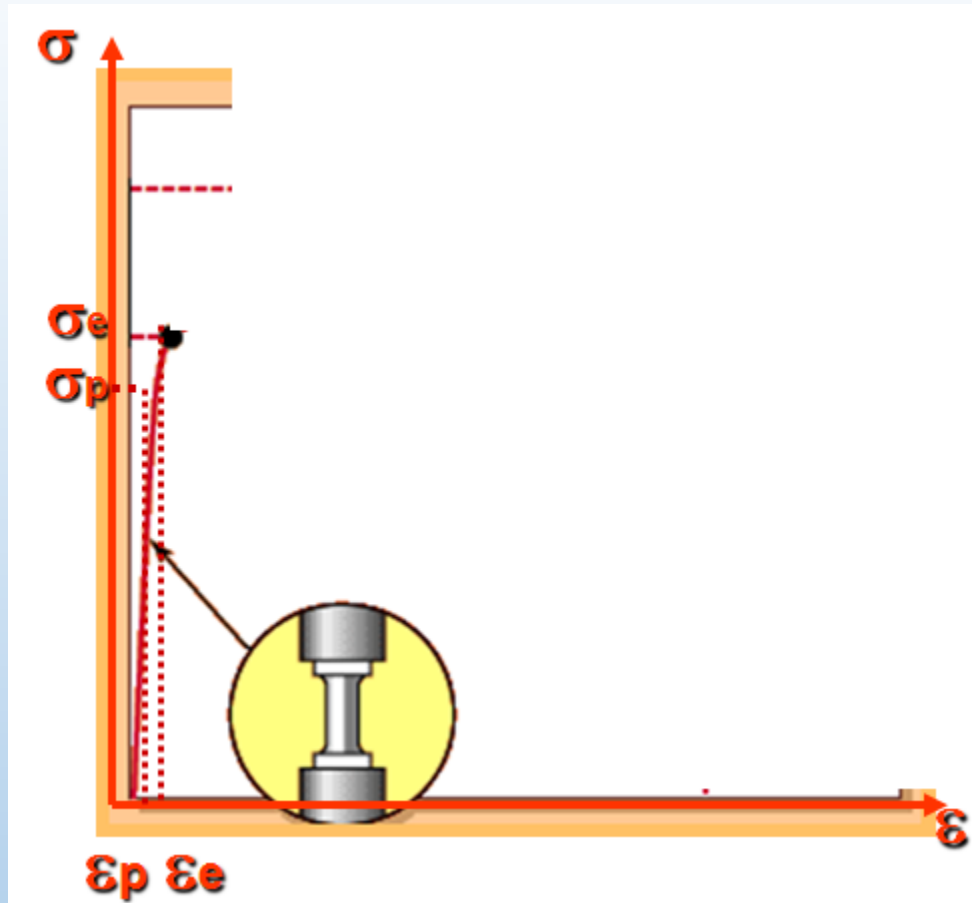
E - modulul de elasticitate longitudinal

- ▶ este constanta de material

- ▶ este factor de proportionalitate,

- ▶ se măsoară în [N/mm²].

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



Domeniul elastic

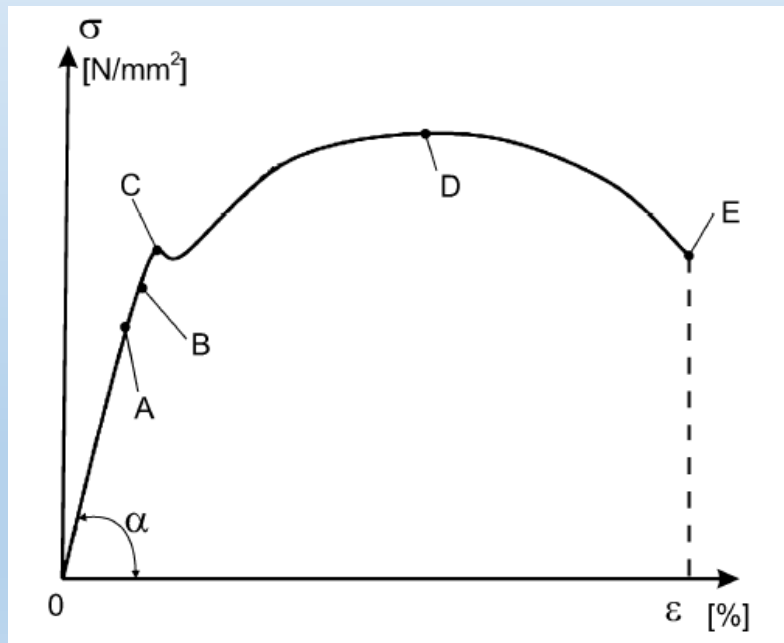
σ_p - Limita de
proporționalitate până la
care materialul prezintă o
comportarea elastic
proporțională

σ_e - **Limita de elasticitate** - corespunde tensiunii până la
care deformarea este de tip elastic.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

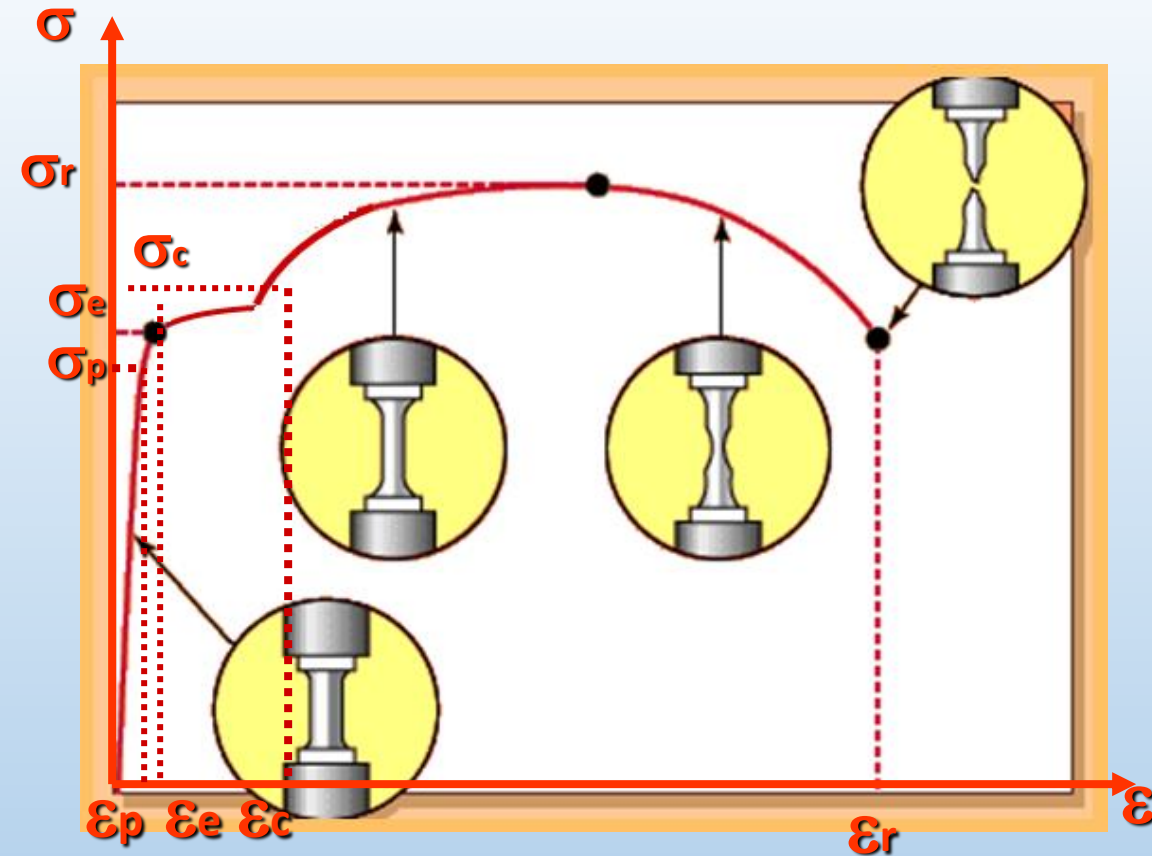
Domeniul plastic: curgerea, ruperea

Dincolo de limita elastică, deformațiile cresc mai repede decât tensiunile. La o anumită valoare a forței de întindere, deformația epruvetei crește fără ca forța de întindere să crească sensibil, materialul “curge”.



- segmentul BC reprezintă zona în care deformația are caracter elasto-plastic;
- punctul C reprezintă momentul în care deformațiile plastice încep să devină foarte mari, iar materialul începe să „curgă” (se deformează deși sarcina nu mai crește);

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



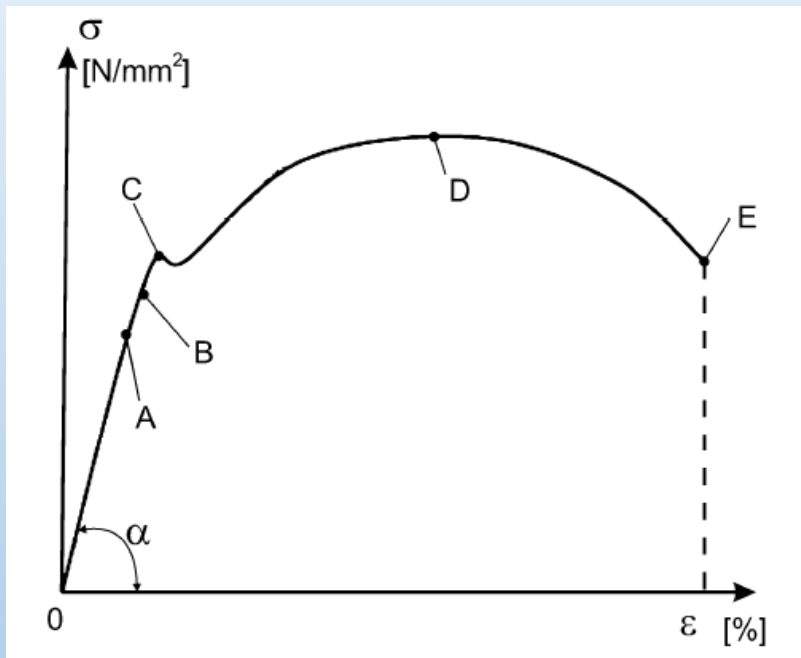
σ_c - Limita de curgere
aparentă – tensiunea de
la care materialul începe
să se deformeze plastic.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S_0} , \text{ N/mm}^2$$

ϵ_c - este alungirea la curgere.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

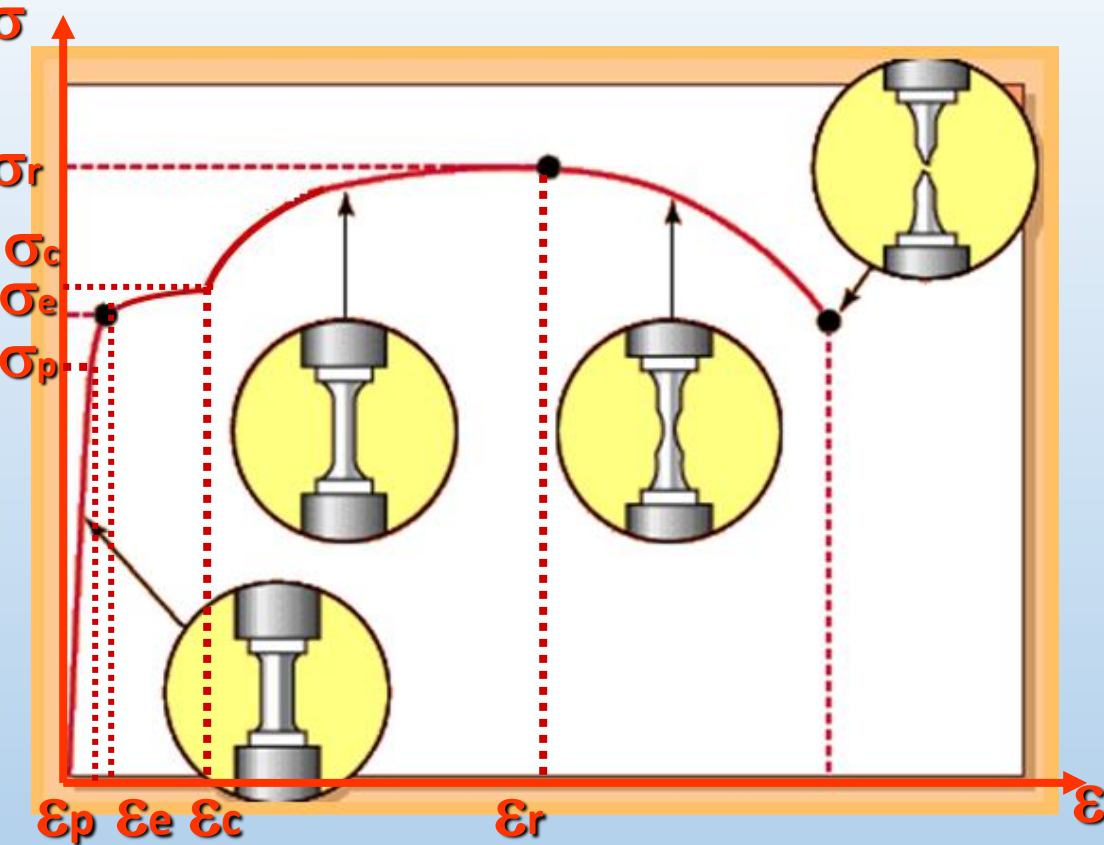
Domeniul plastic: curgerea, ruperea



- punctul D corespunde sarcinii maxime din timpul încercării, iar zona dinaintea punctului D se numește zona de ecruisare (de durificare superficială);
- punctul E marchează momentul în care epruveta se va rupe.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Domeniul plastic: curgerea, ruperea



σ_r - Limita de rupere este tensiunea maximă pe care o poate suporta materialul încercat fără să se rupă și reprezintă rezistența la rupere a materialului.

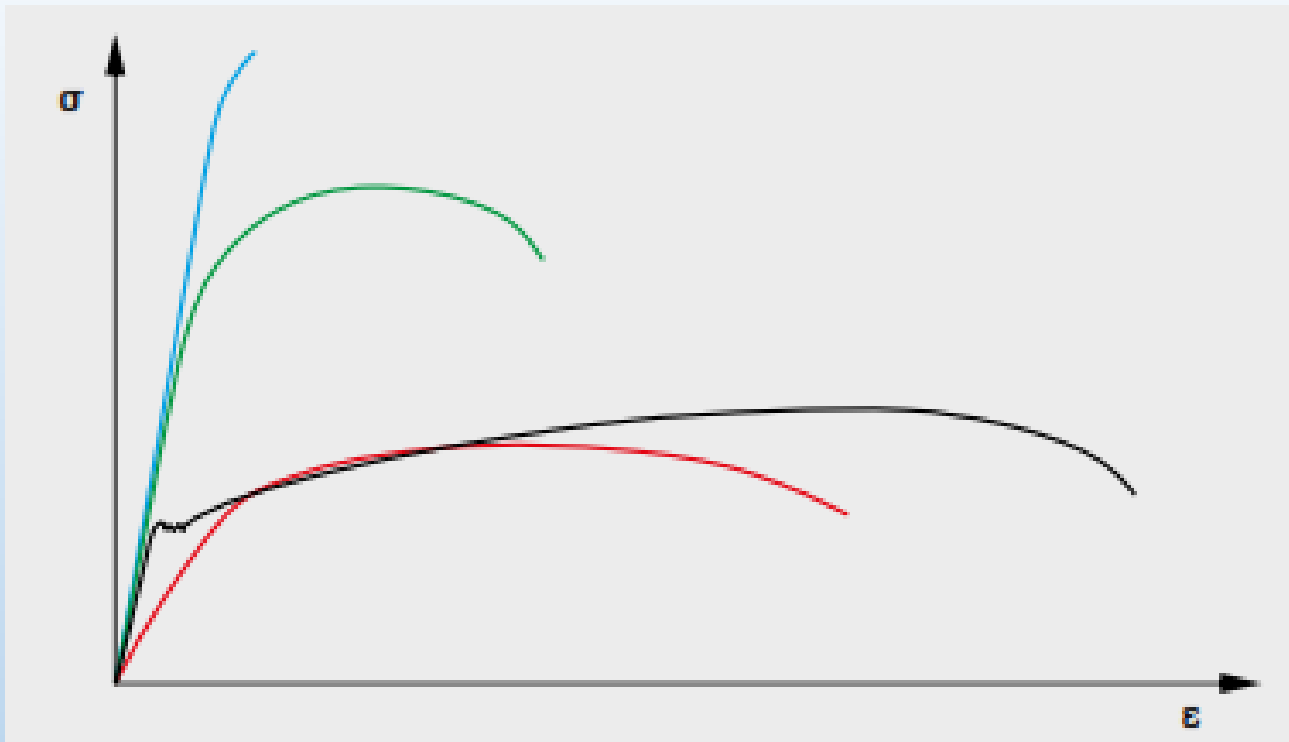
ϵ_r - este alungirea la rupere.

$$\sigma_r = \frac{F_{\max}}{S_0}$$

unde: $F_{\max}$ - forța maximă de rupere

S_0 - secțiunea transversală inițială a epruvetei.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



Oțel călit



Oțel cu rezistență redusă



Oțel călit și revenit



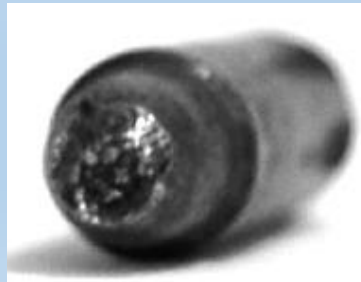
Aliaj de aluminiu

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Fractografia studiază suprafața formată la distrugerea epruvetelor sau pieselor în urma încercărilor mecanice sau exploatării.

Dă informații despre: mecanismul procesului de rupere, stărea structurală, proprietățile materialului.

Metoda presupune găsirea legăturii dintre structura metalografică a materialului din zona rupturii, condițiile de deformare și geometria suprafeței de rupere.



Fractografia materialelor metalice



Fractografie

Macro

Micro

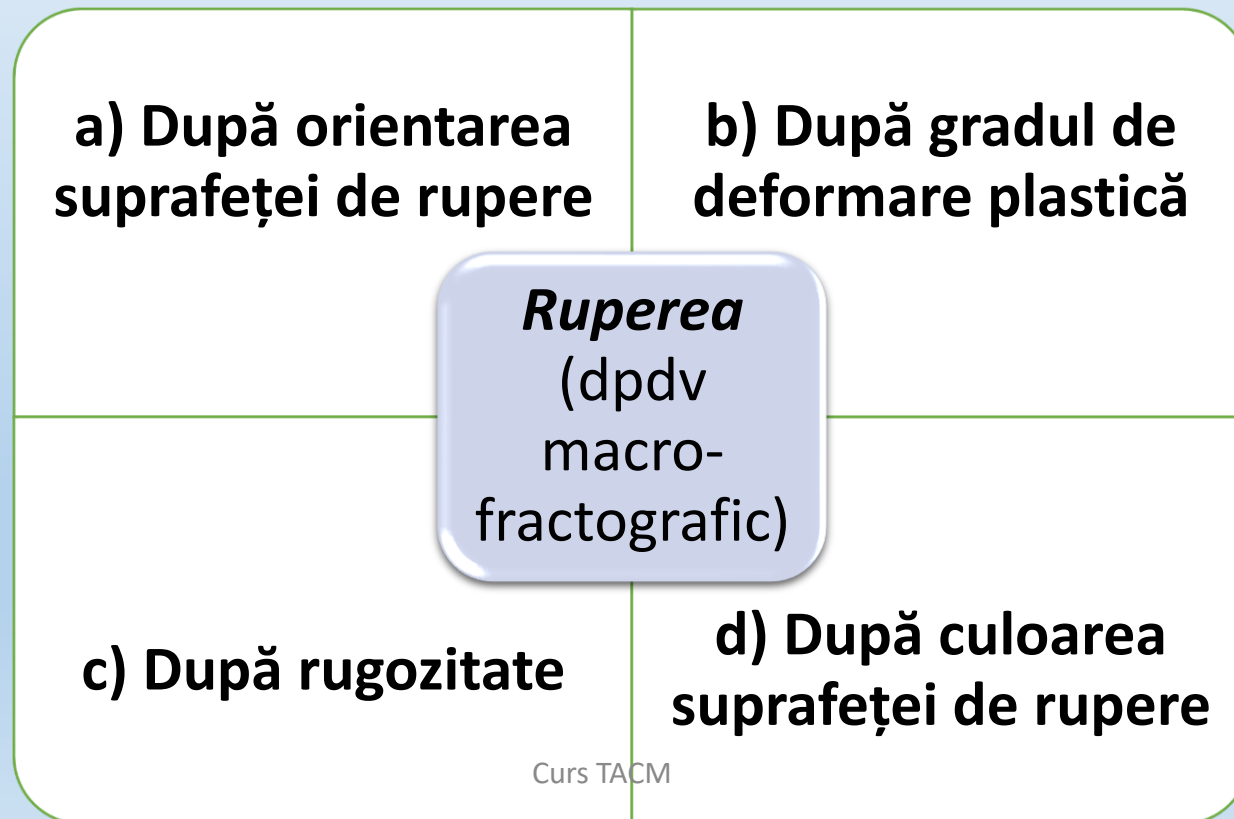
Curs TACM



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Macrofractografia

Macrofractografia analizează cu ochiul liber sau cu diverse aparate optice cu puteri de mărire de maxim $60\div 120:1$ suprafețe de rupere proaspăt obținute, fără deteriorări mecanice sau de altă natură, fără urme de oxizi, murdărie etc.



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

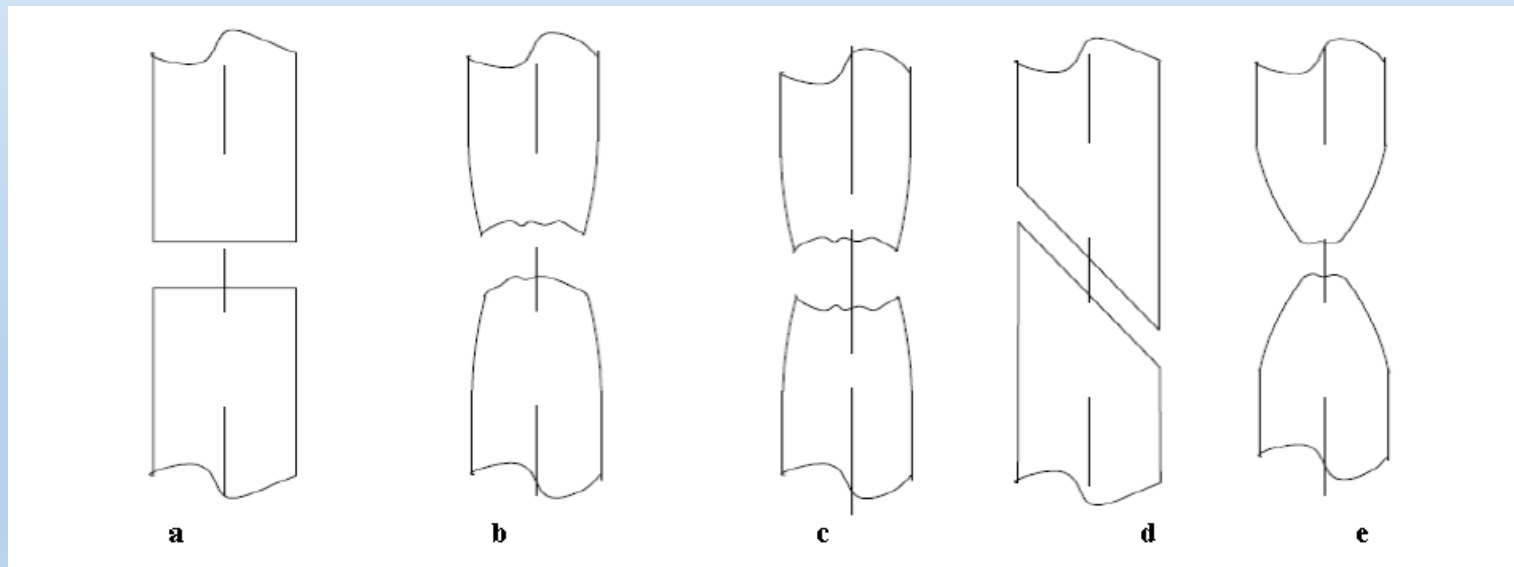
După gradul de deformare plastică *ruperea* poate fi:

- *fragilă*
- *cvasifragilă*
- *tenace*

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

După orientarea suprafeței de rupere:

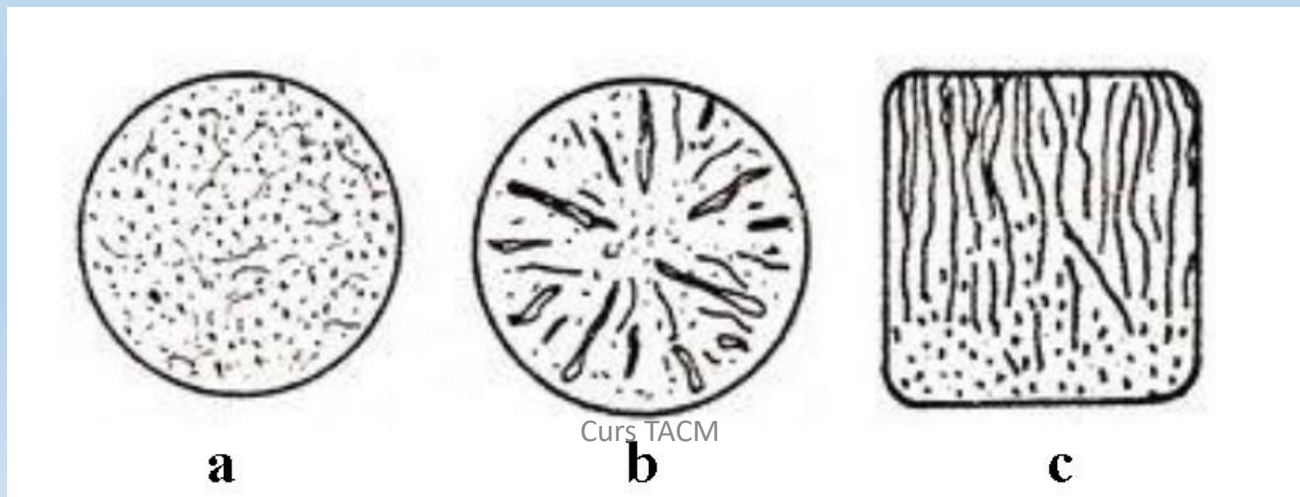
- ☐ Ruperea dreaptă (a)
- ☐ Ruperea mixtă (b, c)
- ☐ Ruperea oblică (d)
- ☐ Rupere conică (e)



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

După rugozitate suprafeței de rupere :

- Grăunțoasă - suprafața de rupere grăunțoasă (fig. a) apar fațete, => deformare plastică redusă până la rupere.
- Stelată - tipică materialelor tenace (fig. b).
- Fibroasă - sunt prezente fibre formate prin deformarea plastică a grăunților din timpul procesului de rupere (fig. c) .



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

După culoarea suprafeței de rupere:

Culoarea suprafețelor de rupere este determinată de condițiile de încărcare, de structura fizică și de compoziția chimică a materialului metalic, astfel:

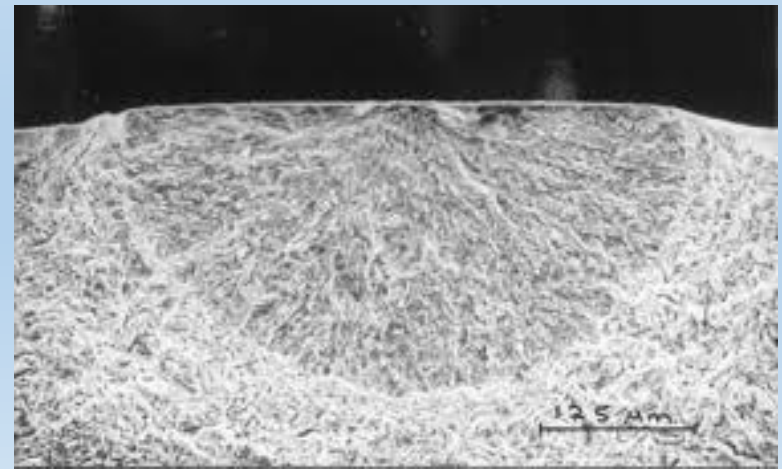
- oțelurile carbon au suprafața de rupere argintie,
- cele aliate cu Ni – nuanță galben deschis specifică,
- cele aliate cu Cr - cenușiu deschis,
- cele cu Mn - cenușiu mat.

Microfractografia

Microfractografia optică utilizează microscopul metalografic optic;

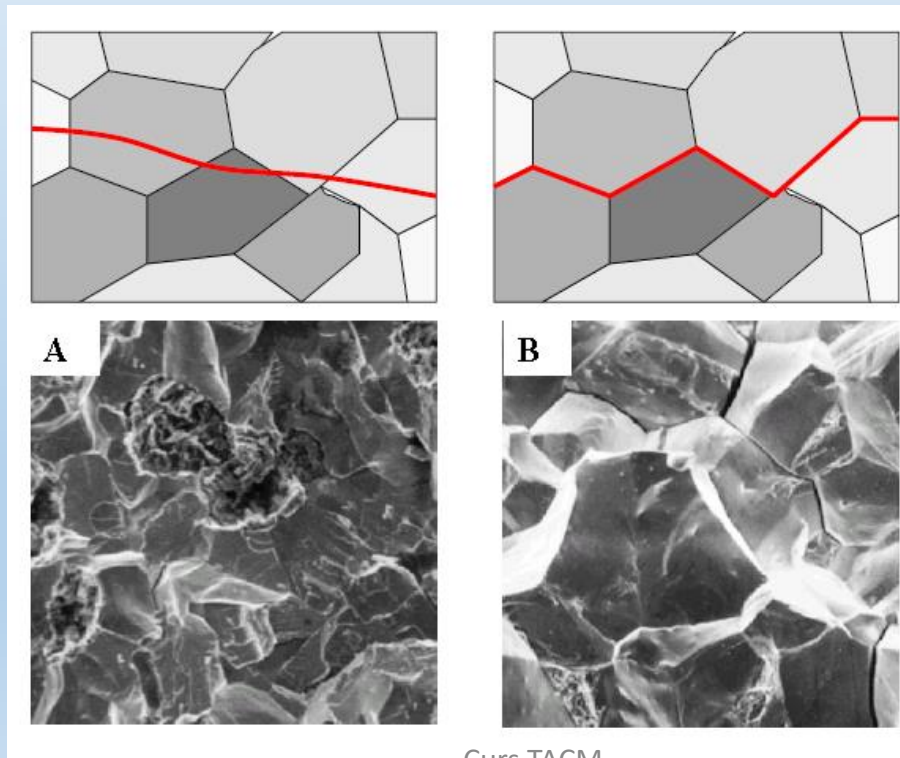
Determină:

- dimensiunile fațetelor, dacă sunt în trepte, geometria conturului fațetelor, prezența sistemelor de striațiuni, rugozități, prezenta fisurilor și a altor defecte ce întrerup continuitatea domeniului cristalin, starea suprafeței, morfologia domeniului cristalin.



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Se pot diferenția ***suprafețele rupere intracristalină - A*** (rupere prin interiorul grăunților cristalini), ***rupere intercristalină - B*** (rupere pe la limita grăunților cristalini).



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

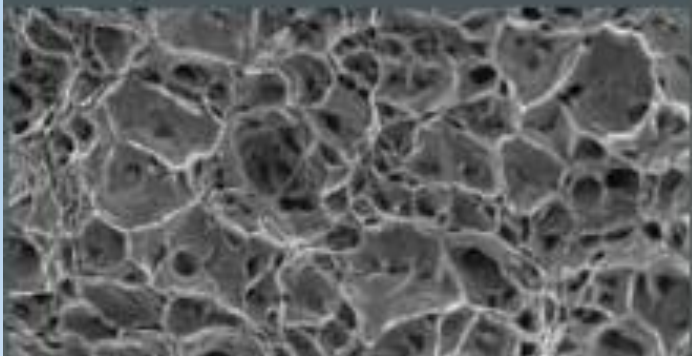
Microfractografia electronică permite obținerea de imagini clare ale microreliefului de rupere. Se pot analiza fisuri foarte fine, substructura straturilor de pe suprafața de rupere, compoziția chimică din zona respectivă, se poate determina tipul ruperii (inter sau intracristalină; fragilă, tenace, prin oboseală etc.).



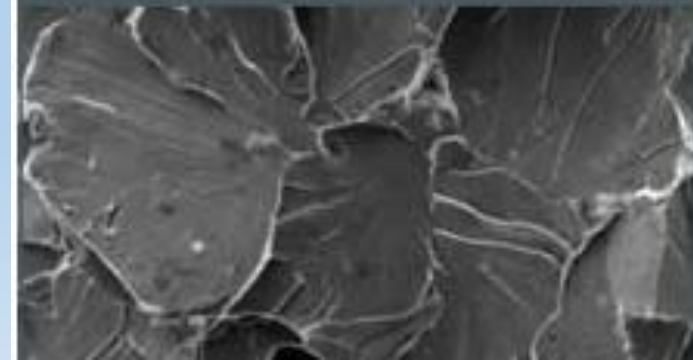
Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Tipul ruperii	Mecanismul ruperii	Test
Rupere forțată • apare brusc • suprafață rupere de cristalină mată sau lucioasă și parțial fisurată pe întreaga secțiune transversală; în ruperea ductilă, apar adesea margini de forfecare la margine	Suprasolicitare statică a) Rupere prin clivaj cu deformare redusă apare atunci când forța maximă depășește forța de rupere b) Rupere ductilă (rupere microscopica tip fagure) apare atunci forța maximă de forfecare depășește tensiunea de curgere c) se poate produce o fractură intergranulară cu deformare scăzută, cu o reducere coeziunii limitei de grăunte sub influența tensiunii normale	Test de tracțiune, Test de reziliență

Honeycomb fracture

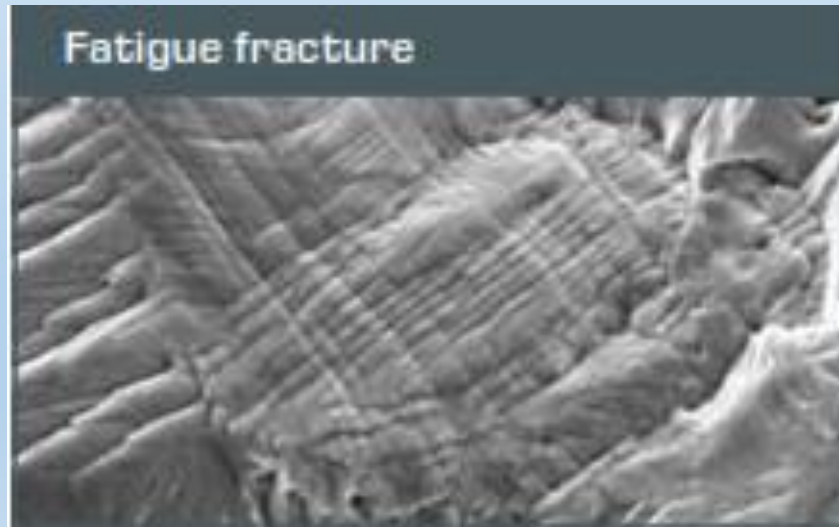


Cleavage fracture



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

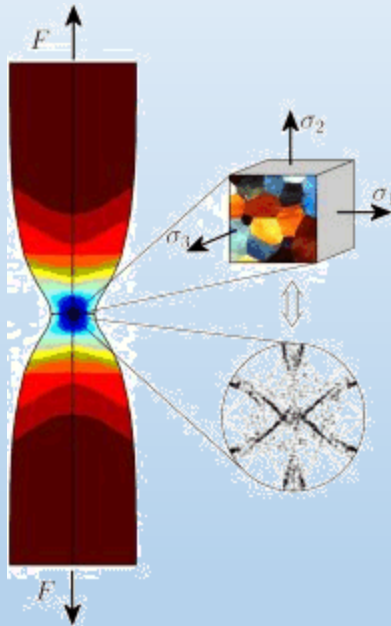
Tipul ruperii	Mecanismul ruperii	Test
Rupere la oboseală • se poate dezvolta ca urmare a supunerii la tensiune repetată sub influența forței de forfecare sau a tensiunii normale • rupere cu deformare redusă	Suprasolicitare dinamică Pornind de la creștături sau imperfecțiuni, fisurile oscilatorii se propagă prin material. Când rezistența materialului este depășită, suprafața rămasă se rupe prin intermediul unei ruperi forțate.	Test de oboseală



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Tipul ruperii	Mecanismul ruperii	Test
Rupere prin fluaj • proces continuu în timp • se instalează la temperaturi mai ridicate și duce în cele din urmă la ruperi, deși materialul este încărcat sub punctul de rupere	Tensiune statică de ex. temperatura crescută Nenumărate fisuri se formează independent una de cealaltă	Test de rupere prin fluaj

GÂTUIREA LA RUPERE

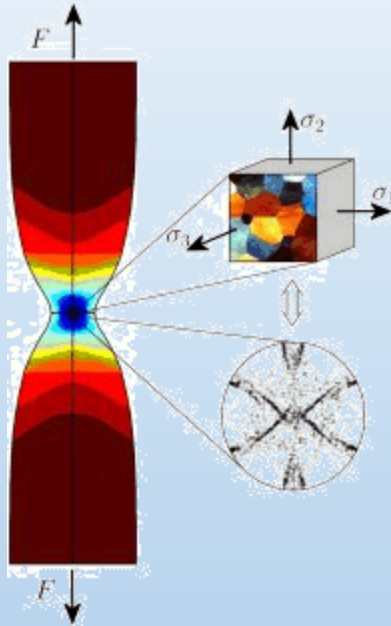


Pentru aprecierea proprietăților mecanice ale unui material, de mare importanță este gâtuirea la rupere. La o valoare mai mare decât rezistența la rupere, deformația epruvetei se concentrează într-un singur loc, pe epruvetă apare o gâtuire și în acest loc se va produce ruperea.



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

După gradul de deformare plastică la rupere, ruperea poate fi:



- **fragilă** - gătuirea specifică a secțiunii transversale este de maxim 1,5%;
- **cvasifragilă** – maxim 15%;
- **tenace** – minim 15%.

$$Z = \frac{S_o - S_r}{S_o} \cdot 100 [\%]$$

S_o - aria secțiunii inițiale a epruvetei
 S_r - aria secțiunii la rupere



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

ALUNGIREA

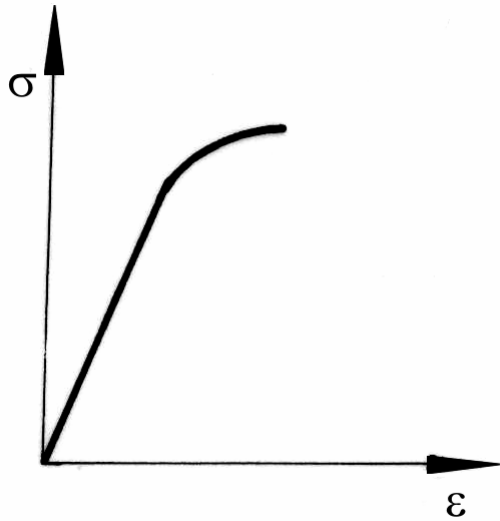
Alungirea la rupere este definita prin raportul

$$A_f = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \%$$

care este o masura a plasticitatii materialului metalic.

$$A_5 = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\%$$

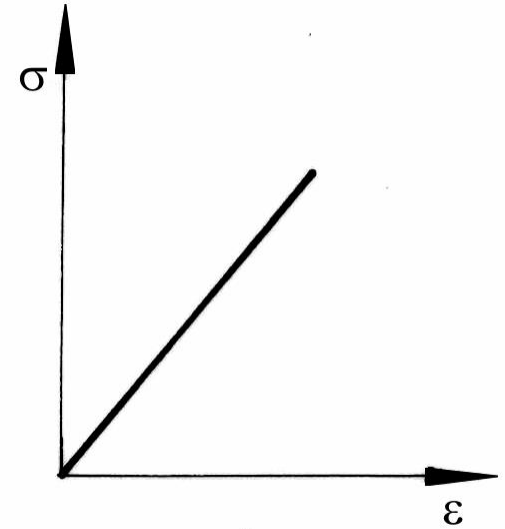
Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



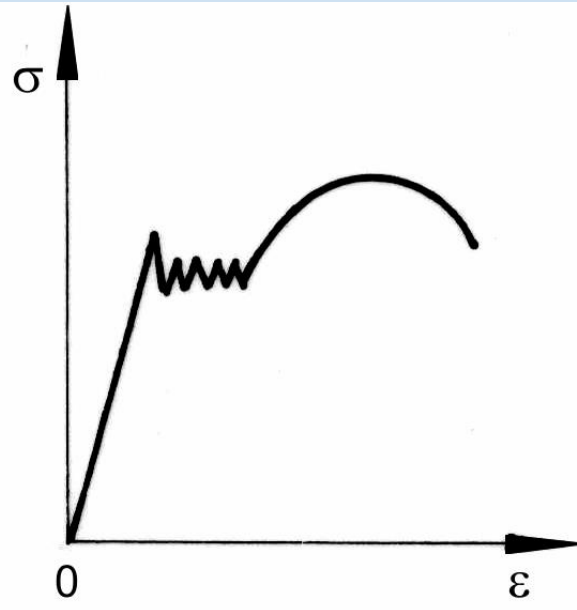
a.

Curbă tensiune
deformație pentru:

- a. un material fragil;
- b. un material complet fragil.



b.



Curbă tensiune –
deformație cu palier de
curgere (materiale
ductile)

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

TENACITATEA

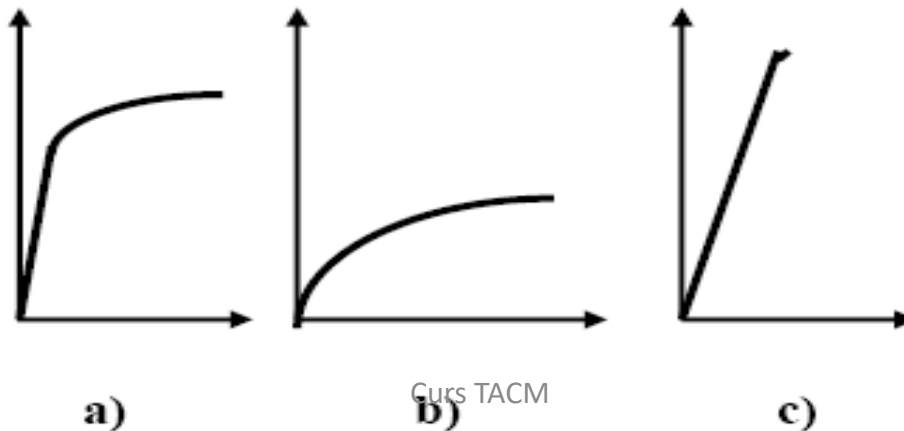
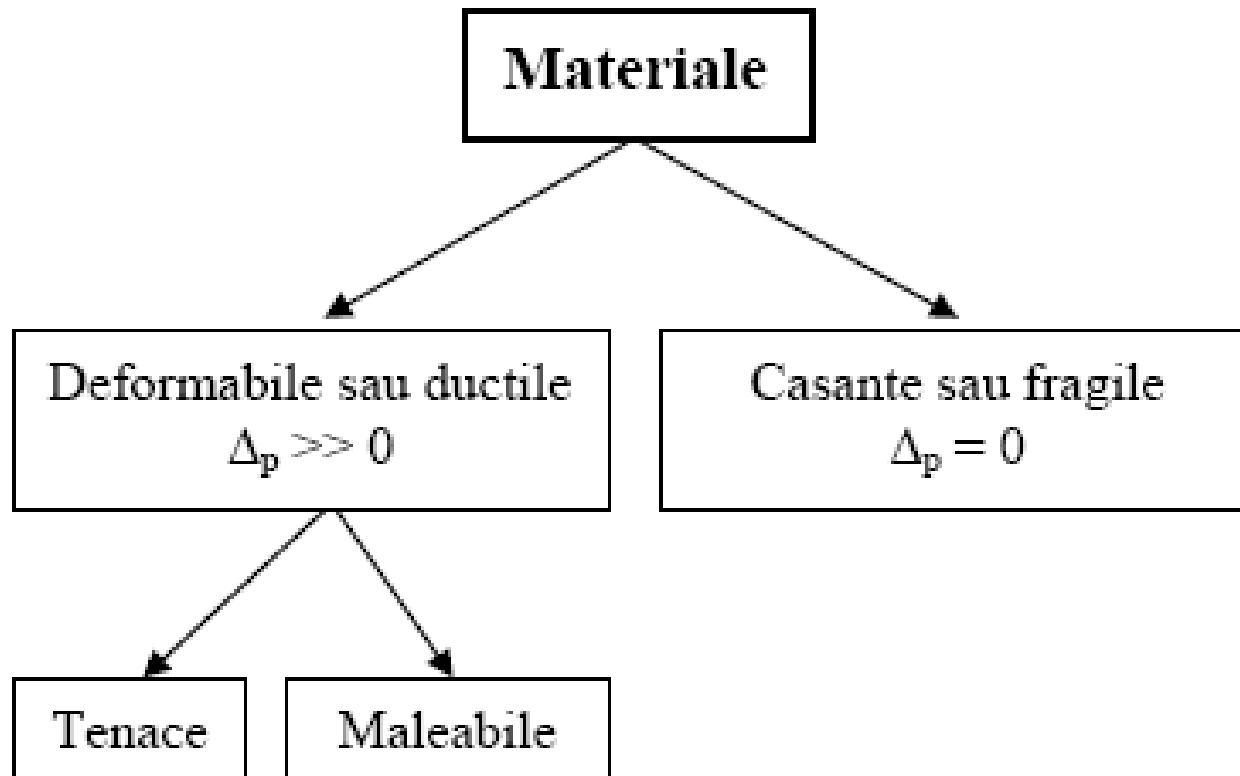
Tenacitatea proprietatea materialelor metalice de a rezista la solicitări exterioare statice și dinamice un timp îndelungat, deformandu-se mult înainte de a se rupe.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Pe baza deformațiilor pe care le suferă un material până la rupere, materialele pot fi:

- ❑ deformabile sau ductile (deformația plastică $\gg 0$)
- ❑ fragile sau casante (deformația plastică $= 0$)

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Materialele maleabile sunt materialele care până la rupere au deformații plastice mari, dar nivelul tensiunii este scăzut. Aceste materiale, în timpul deformării plastice, nu prezintă fenomenul de ecruisare.

Materialele tenace suferă până la rupere deformații plastice mari, dar și nivelul tensiunii este ridicat. La aceste materiale este prezent fenomenul de ecruisare.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

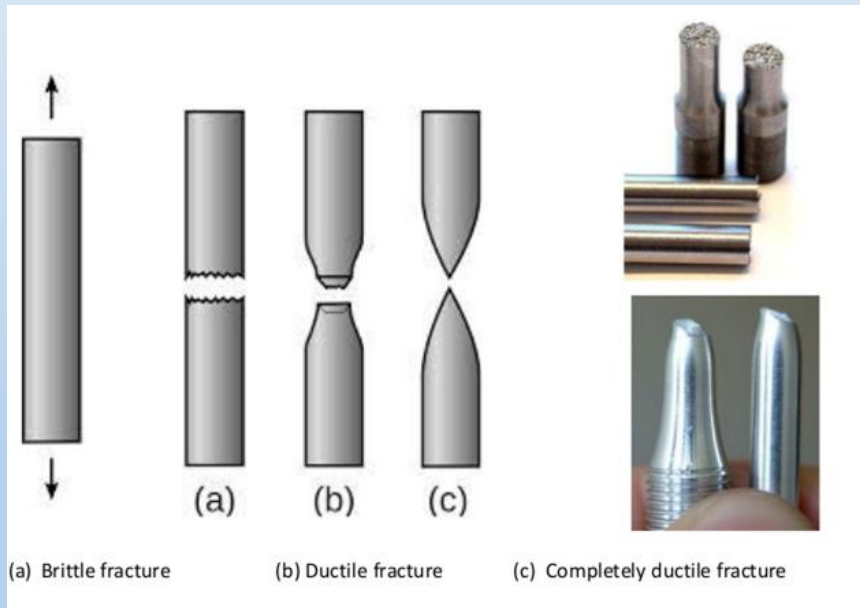
Tenacitatea poate fi:

- ☐ statica (fiind egala cu suprafața de sub curba tensiune-deformație)
- ☐ dinamica (obținută prin încercarea de reziliență).

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

FRAGILITATEA

Fragilitatea, opusă tenacității, este proprietatea materialelor de a se rupe fără a avea deformații mari.



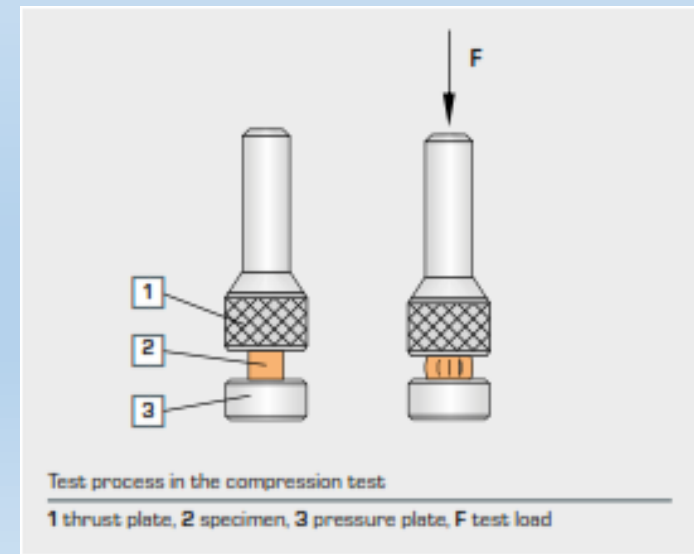
Pentru piesele solicate prin șoc sau la vibrații se evită folosirea materialelor fragile.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

ÎNCERCAREA LA COMPRESIUNE

Rezistența la compresiune – este proprietatea corpurilor solide de a se opune deformării sub acțiunea a două forțe axiale de sens contrar, orientate către interiorul piesei. O epruveta standardizata cu o secțiune transversală cunoscută este supusă unei forțe axiale c valoare mică. O stare de tensiune uniaxiala predomină în probă.

Raportul dintre tensiune și compresie poate fi arătat din grafic în diagramă forță-compresiune.



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Prin această încercare se determină:

- ☐ **scurtarea**
- ☐ **rezistența de rupere la compresiune,**

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

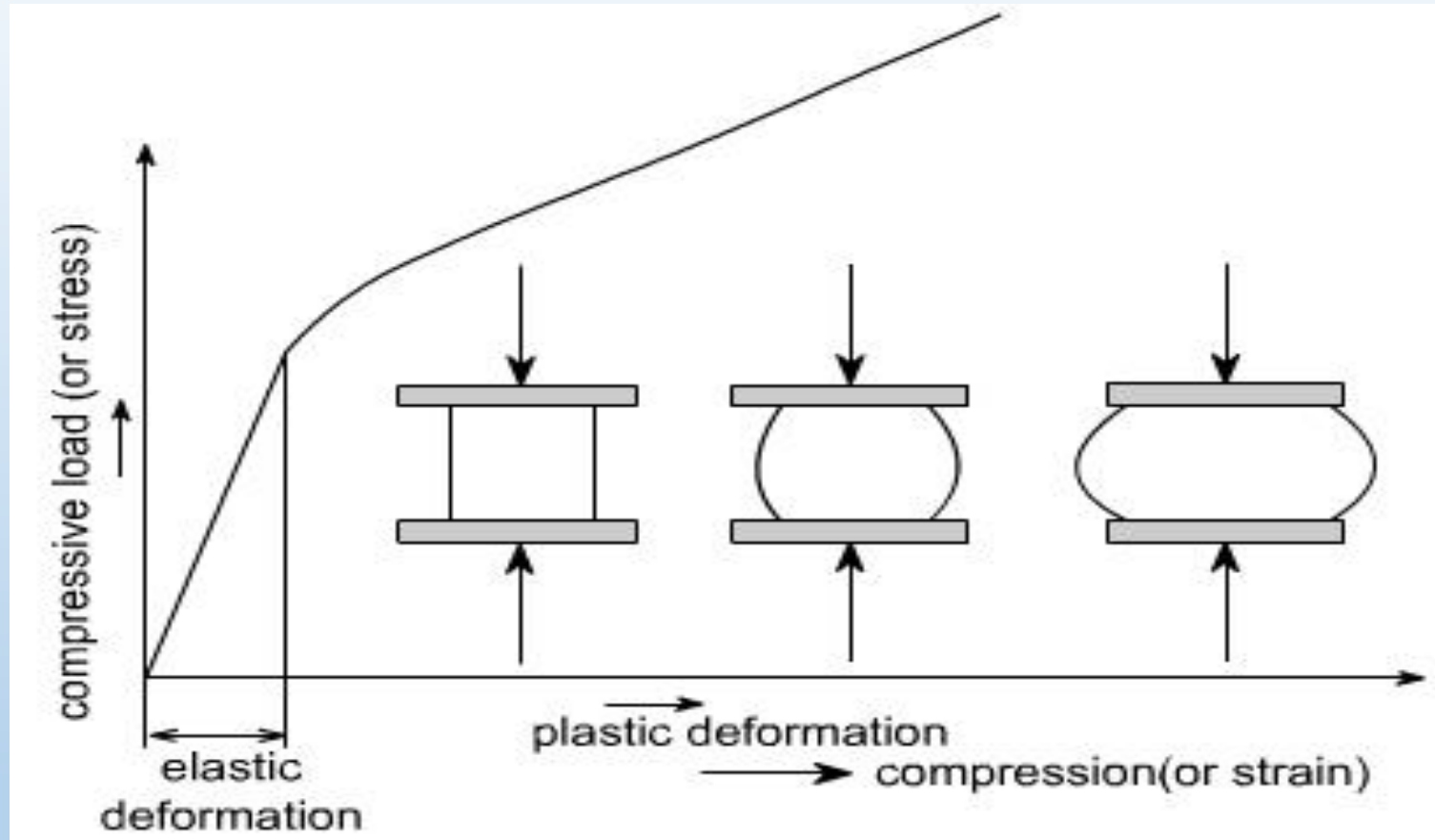
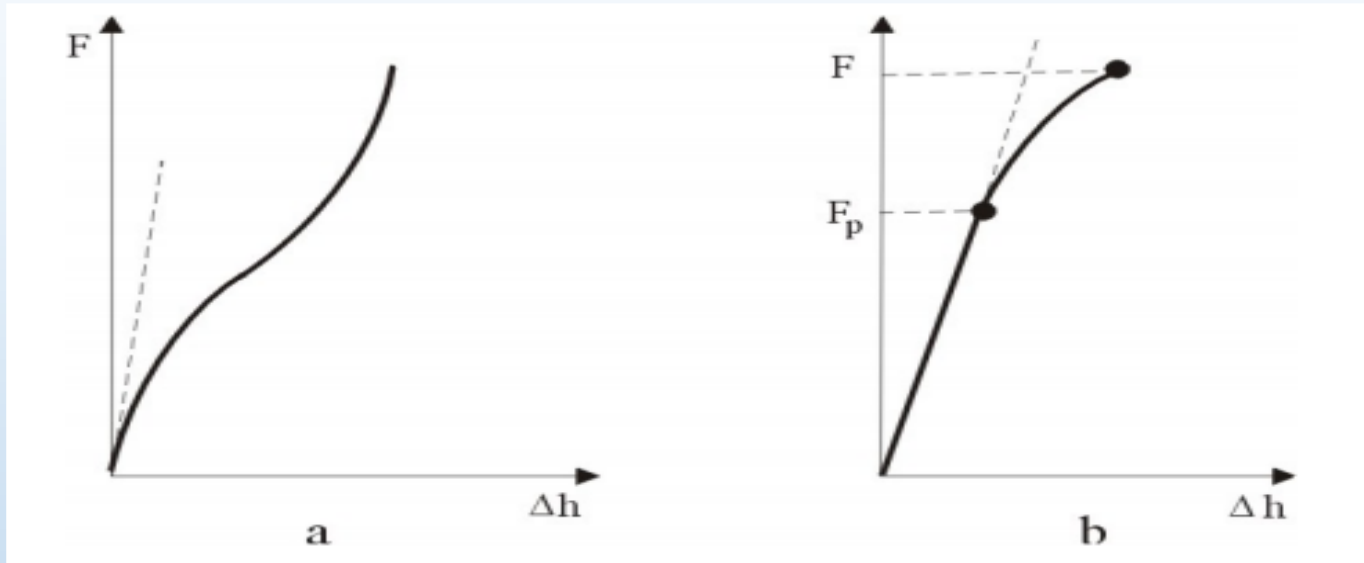


Diagrama tensiune-compresie

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

În urma deformării epruveta ia o formă de butoi. Rămânerea în urmă a deformărilor transversale ale suprafețelor de bază ale epruvetei se datorează forțelor de frecare ce apar între aceste suprafețe și platourile mașinii de încercat.

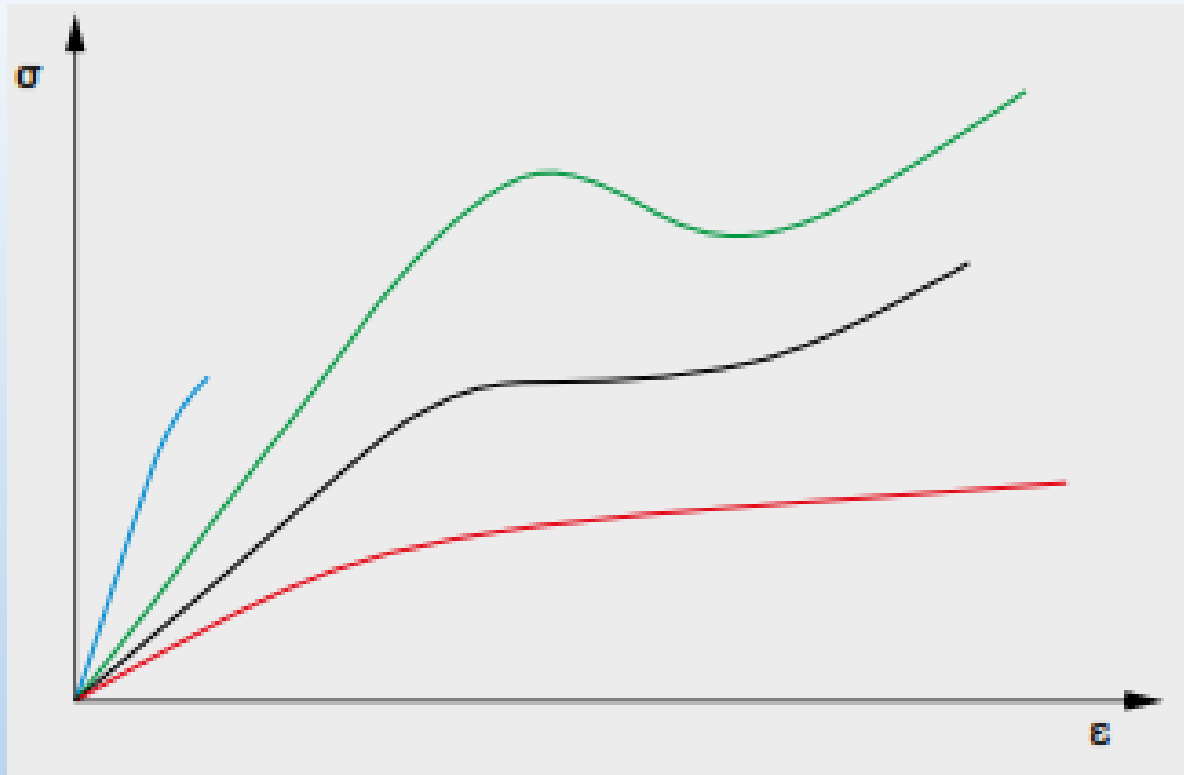
Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



*Diagrama de compresiune a metalelor plastice (a)
și a metalelor rigide (b)*

La încercarea la compresiune materialele tenace, nu se rup. Ele se deformează plastic în mod continuu, pe măsura creșterii sarcinii. Metalele rigide prezintă o etapă de deformare elastică urmată de una de deformare plastică, care se termină prin distrugerea epruvetei.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



Plastic fragil, fără rezistență la compresiune



Plastic ductil cu rezistență mare de compresie

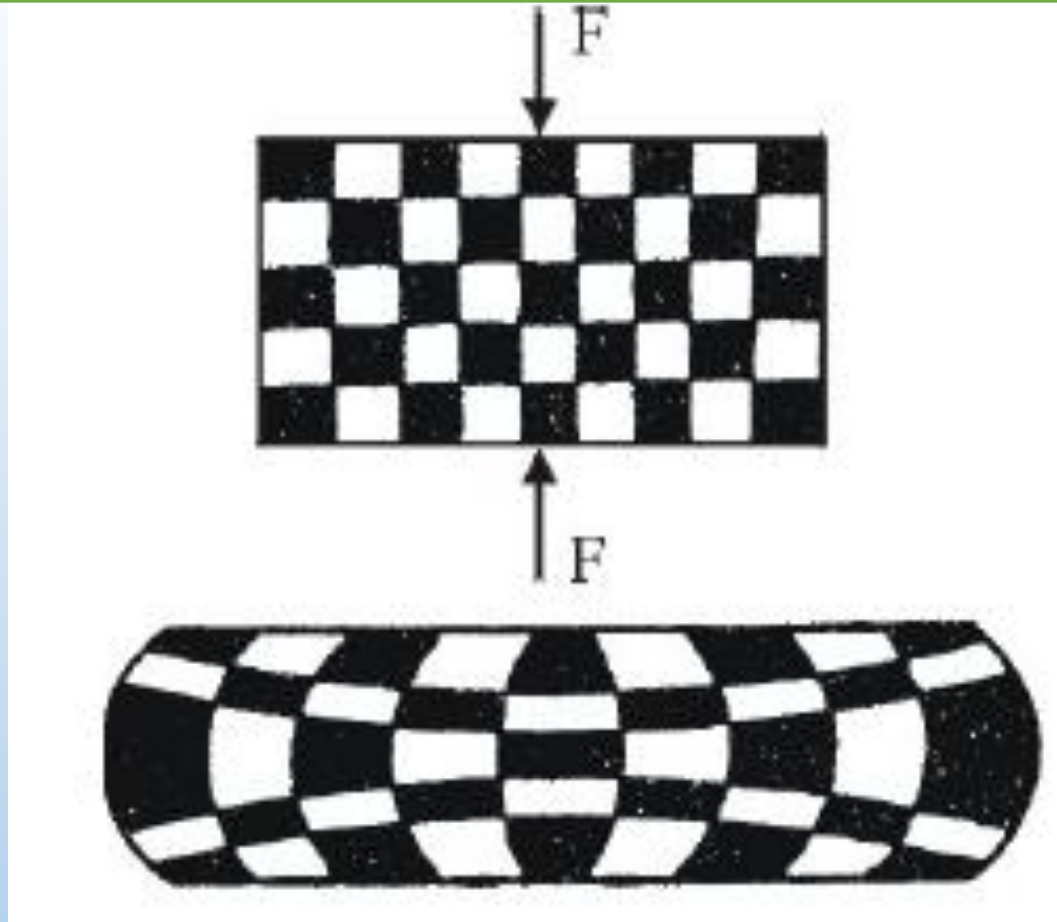


Plastic ductil cu rezistență mică de compresie



Plastic ductil fără rupere

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



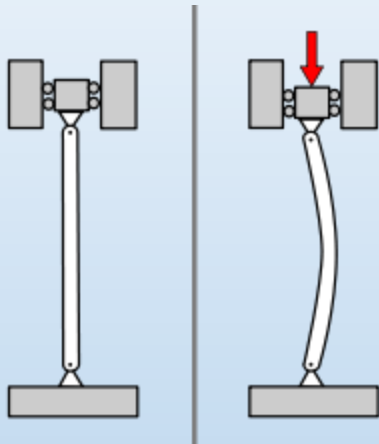
Din punct de vedere al structurii sale, deformarea unei epruvete are loc după cum se vede în figura.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Caracteristicile ce se determină prin încercarea la compresiune

	Termenul	Simbolul
Epruveta	Diametrul inițial și ultim Lungimea dintre repere; inițială și ultimă Aria secțiunii transversale: - inițială: -ultimă:	d_0, d_u ; [mm] h_0, h_u ; [mm] S_0 [mm ²] S_u [mm ²]
Sarcina	Curentă La limita de curgere Ultimă	F [N] F_c [N] F_u [N]
Caracteristici mecanice uzuale	Limita de curgere Rezistența la compresiune Scurtarea procentuală a epruvetei Umflarea procentuală a epruvetei	$\sigma_c = F_c/S_0$; [N/mm ²] $\sigma_{rc} = F_{max}/S_0$; [N/mm ²] $A_c = ((h_0 - h_u)/h_0) \times 100$ [%] $Z_c = ((S_u - S_0)/S_0) \times 100$ [%]

ÎNCERCAREA LA FLAMBAJ



Fenomenul de flambaj se poate produce atât în domeniul elastic cât și în domeniul plastic. Influența materialului barei se evidențiază în formulele de calcul prin modulul de elasticitate, fie prin efortul unitar critic de flambaj.

Barele subțiri, tuburile cu pereți subțiri supuse la compresiune, se verifică suplimentar la stabilitate.

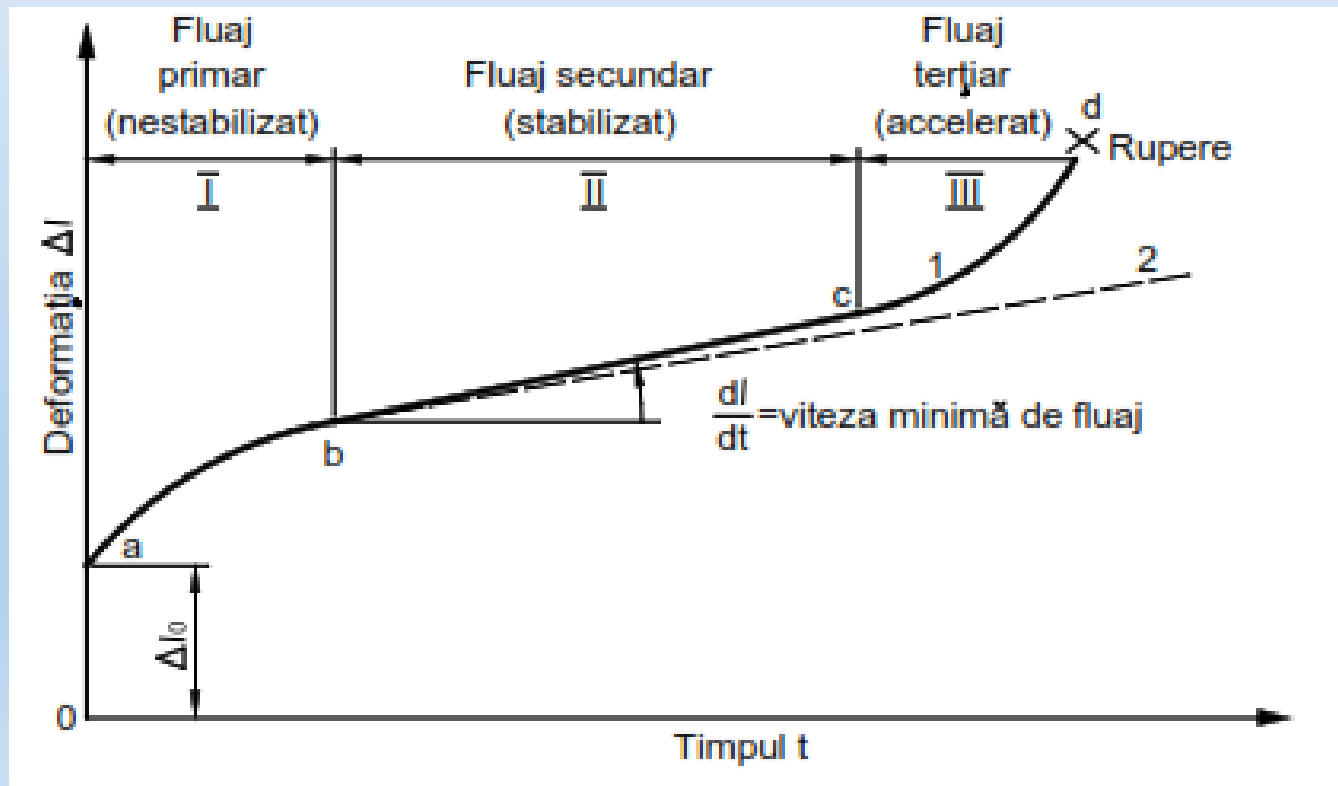
ÎNCERCAREA LA FLUAJ

Fluajul urmărește deformarea în timp a unei epruvete , în condițiile de menținere la o solicitare și o temperatură constantă, pe toată durata încercării, în vederea determinării deformației remanente după o anumită durată de solicitare sau a duratei de solicitare la care se produce ruperea epruvetei.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Fluajului are drept scop să clarifice relația între timpul t :

- ❑ temperatura T
- ❑ tensiunea normală (efortul unitar normal) σ .
- ❑ deformația specifică ε .

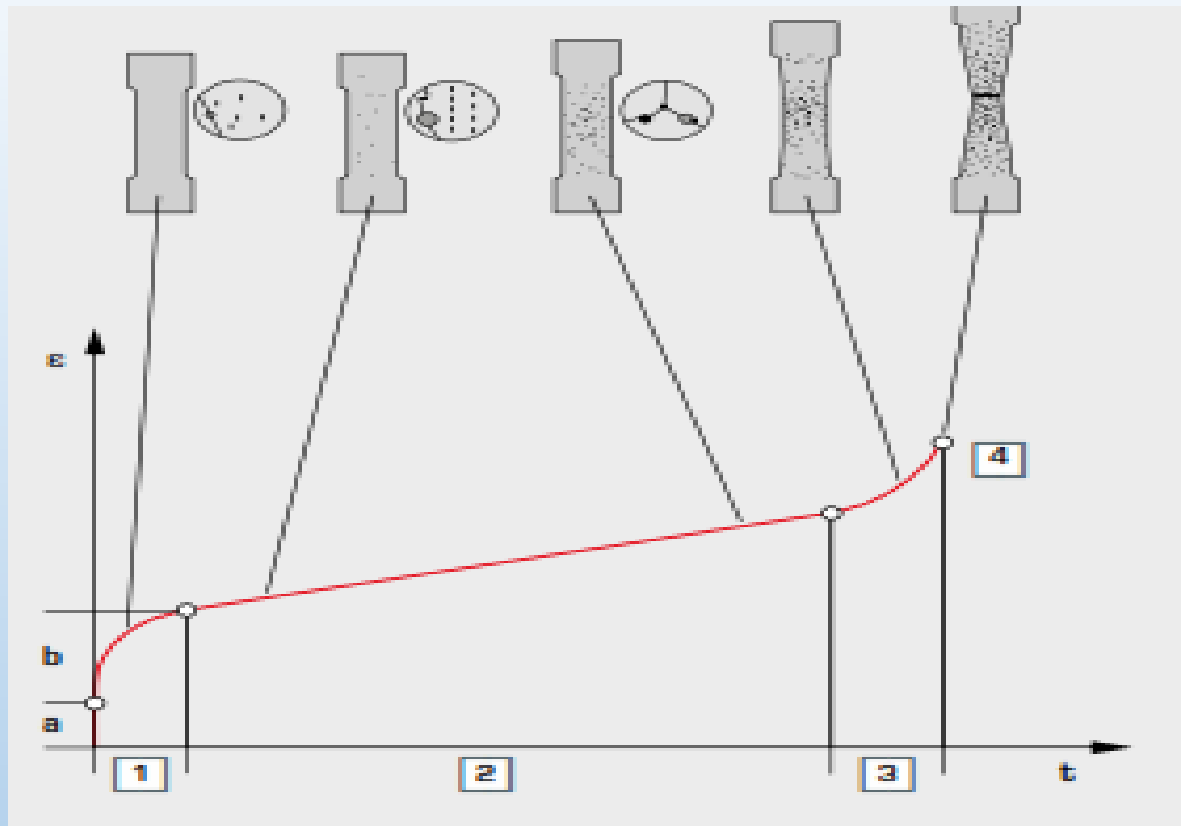


Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Principiul testului de rupere prin fluaj:

O epruvetă este supusă solicitării la tensiune constantă și temperatură constantă. Deformațiile plastice sunt măsurate în intervale de timp continue. Toate valorile măsurate pot fi apoi transferate într-o diagramă de fluaj.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



t - timp ,
 ϵ - alungire,
1 - fluaj primar,
2 - fluaj secundar,
3 - fluaj terțiar,
4 - ruperea epruvetei,
a - deformare elastică,
b - deformare plastică.

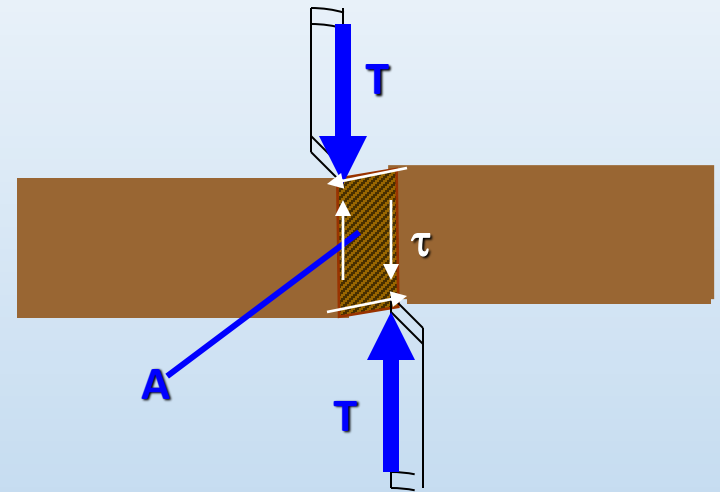
Modificarea epruvetei în timp

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

ÎNCERCAREA LA FORFECARE

Rezistența de rupere la forfecare

$$\tau = \frac{T}{A}$$



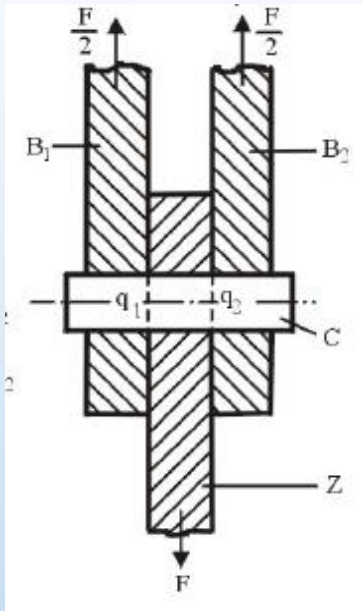
Rezistența la forfecare - este proprietatea corpurilor solide de a se opune acțiunii momentane a două forțe paralele, egale ca mărime, de sens contrar și dispuse perpendicular pe axa corpului, la foarte mică distanță una fata de alta, de o parte și de alta a unei secțiuni.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

ÎNCERCAREA LA FORFECARE

Această încercare se aplică epruvetelor prelevate din semifabricate destinate executării unor piese ce vor fi supuse, în exploatare, la forfecare. Prin încercarea la forfecare se pot determina caracteristici mecanice și elastice similare cu acelea care se determină prin solicitarea la tracțiune

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



Schema de principiu a dispozitivului de încercat la forfecare

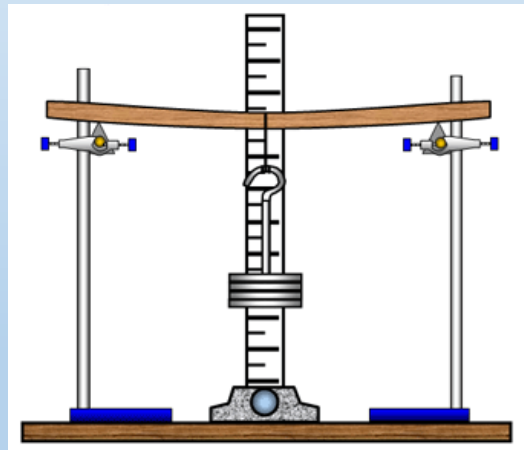


De obicei epruveta are secțiune circulară. Epruveta se trece prin trei inele de oțel călit, cu dimensiunea alezajului corespunzătoare secțiunii epruvetei. Schema de principiu a dispozitivului arată că, sub acțiunea forței F , epruveta C este ruptă între fălcile de fixare B_1 , B_2 și falca de tăiere Z , după două secțiuni de forfecare, q_1 și q_2 .

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

ÎNCERCAREA LA ÎNCOVOIERE

Rezistența la încovoiere este proprietatea corpurilor solide de a se opune deformării sub acțiunea unor forțe sau cupluri de forțe care se află în planul care trece prin axa barei.



Aparat pentru măsurarea deformațiilor la încovoiere

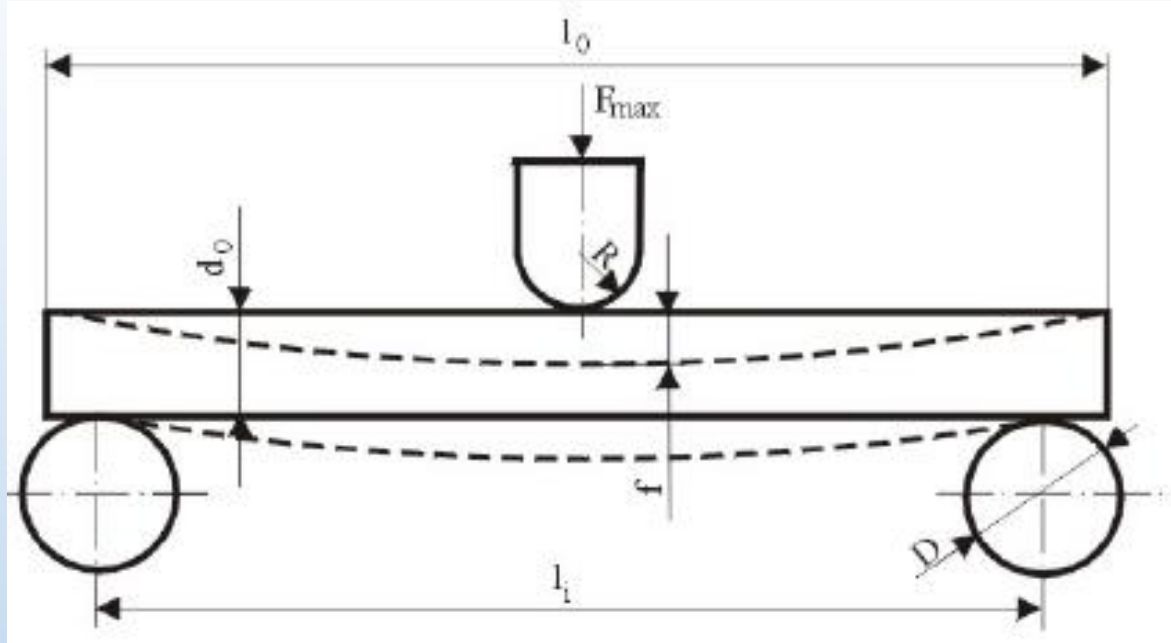
Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

În timpul solicitării, în epruvetă apar concomitent eforturi de tracțiune și compresiune. Axa barei se deformează, fibrele din partea convexă se lungesc (întindere), iar cele din partea concavă se scurtează (compresiune).

La încovoiere, ca și la compresiune, metalele se comportă în două moduri:

- **tenace**, cum este cazul oțelurilor, care pot fi deformate apreciabil prin încovoiere fără ca ele să se rupă,
- **rigide**, cum este de exemplu fonta, folosită mult în construcția de mașini, dar care se rupe relativ ușor în cazul solicitării la încovoiere.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



Epruveta ce are forma unei bare cu secțiunea circulară sau dreptunghiulară, se va rezema simplu la ambele capete, iar sarcina va fi aplicată perpendicular pe axa epruvetei, la mijlocul distanței dintre reazeme, până în momentul producerii ruperii.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Odată cu determinarea valorii sarcinii maxime din momentul ruperii, $F_{\max}$, cu ajutorul dispozitivului de înregistrare al mașinii universale de încercat, se determină și săgeata la rupere.

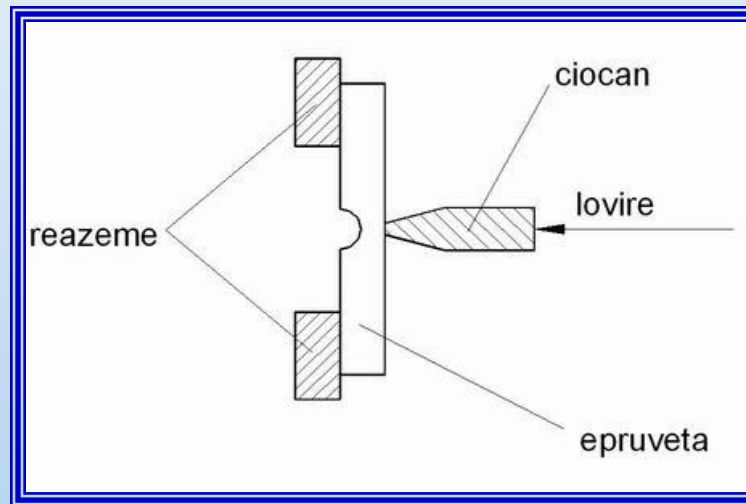
Săgeata la rupere este însăși deformația epruvetei în momentul ruperii, măsurată prin deplasarea verticală a punctului de aplicare al sarcinii.

ÎNCERCAREA LA ÎNCOVOIERE PRIN ȘOC (REZILIENȚA)

Prin încercări dinamice prin șoc se evidențiază comportarea metalelor la viteze mari de deformare, relevând capacitatea acestora de deformare în condiții de viteză de deformare, de temperatură și de stare de tensiune.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

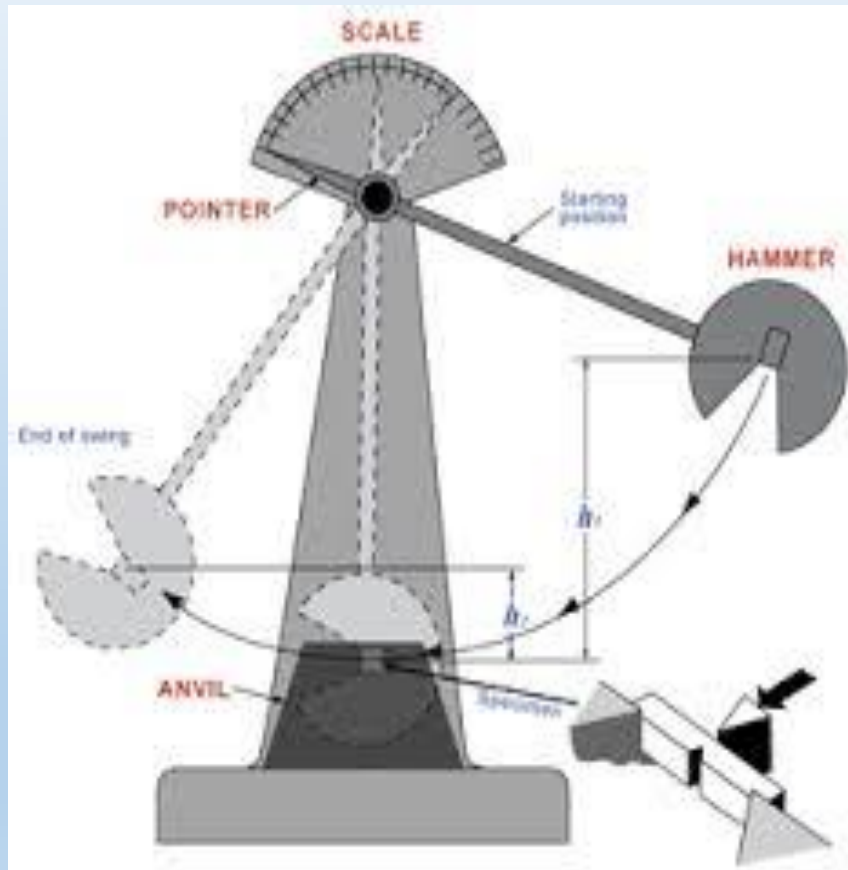
Reziliența se determină cu pendulul de reziliență Charpy.



Schema de principiu

Încercarea constă în ruperea unei epruvete prismatice, prevăzută cu o creștătură în formă de U sau V în zona de mijloc.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice



$$KCU = \frac{E_{rupere}}{S} \quad [J/m^2]$$

K – reziliența

C – pendul Charpy

U – forma creștăturii epruvetei

S – secțiunea de rupere

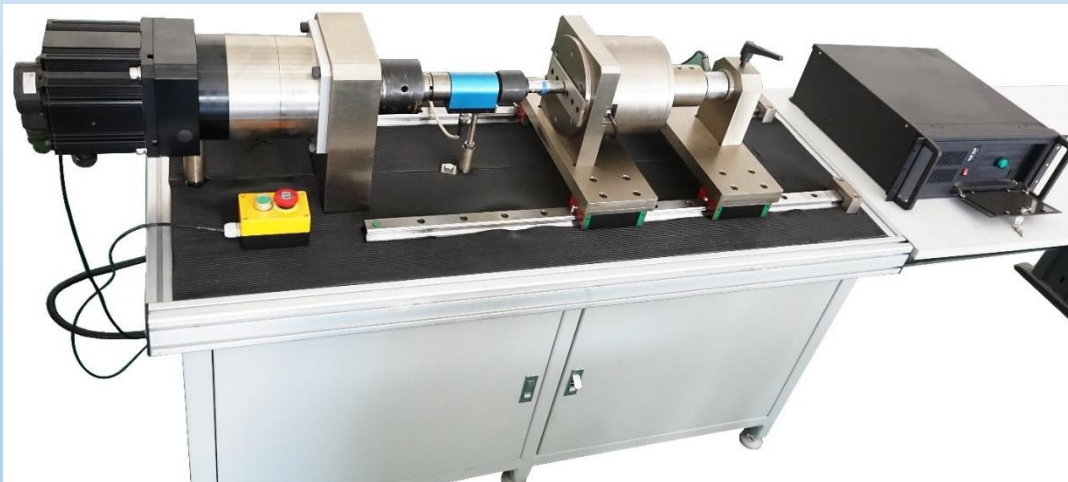
Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Se ridică pendulul la o anumită înălțime. Se lasă apoi să cadă liber lovind epruveta în partea opusă creștăturii. Se constată că după ruperea epruvetei pendulul se ridică la o înălțime mai mică decât cea inițială. Diferența dintre energia potențială inițială a pendulului și cea finală reprezintă energia de rupere (E_{rupere})

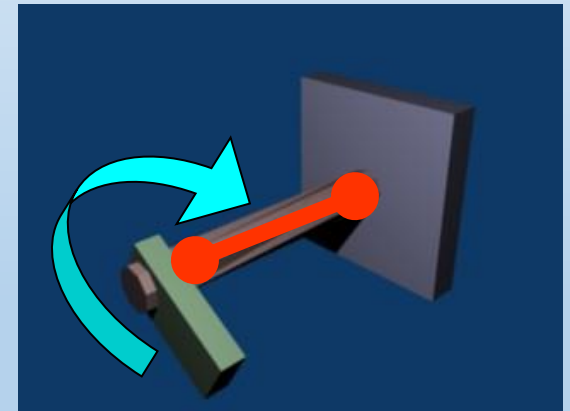
Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

REZISTENȚA LA TORSIUNE

Rezistența la torsiune este proprietatea corpurilor solide de a se opune deformării sub acțiune a două cupluri de răsucire M_t situate în planuri perpendiculare pe axa barei.



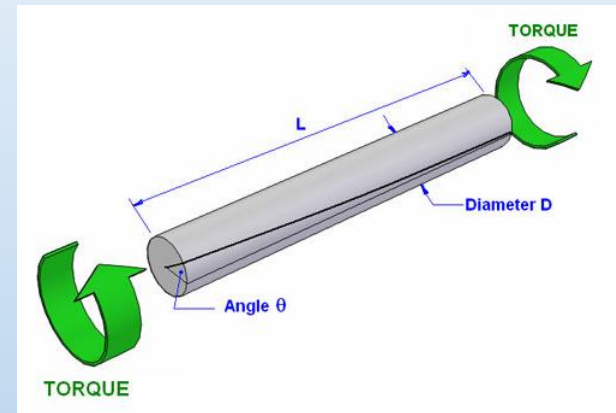
Aparat de încercare
la torsiune



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

ÎNCERCAREA LA TORSIUNE

O bară dreaptă de secțiune circulară sau inelară este sollicitată la răsucire pură dacă asupra ei acționează la extremități două cupluri M_t situate în planuri perpendiculare pe axa barei.



τ - tensiunile tangențiale;

$$\tau = G \cdot \gamma$$

G- modul de elasticitate transversal

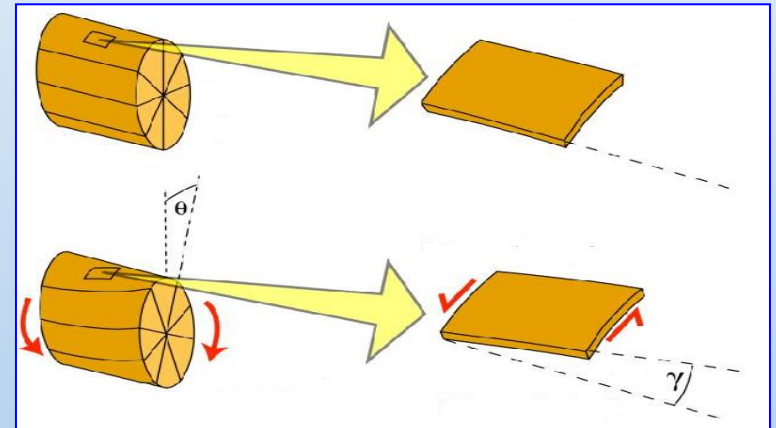
γ - lunecarea specifică

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

ÎNCERCAREA LA TORSIUNE

Studiul proprietăților mecanice de forfecare pură se efectuează prin încercarea la răsucire a unui tub cu perete foarte subțire. Se măsoară momentul de răsucire aplicat probei și unghiul de torsiune al acesteia. Se determină apoi:

- tensiunea tangențială, τ și
- lunecarea specifică, γ .



Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

DURITATEA

Duritatea este proprietatea materialelor de a se opune pătrunderii în masa lor a unor corpuri străine care tind să le deformeze suprafața.



Durimetru portabil



Durimetru universal



DURITATEA

Metodele de determinare a durității, în funcție de viteza de acționare a forței asupra penetratorului:

- ❑ **metode statice**, la care viteza de acționare se situează sub 1 mm/s,
- ❑ **metode dinamice**, pentru care viteza de acționare depășește această valoare.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

Metodele frecvent utilizate la determinarea durității

Metoda	Tip penetrator	Evaluarea durității	Scări utilizate	Domeniul de utilizare	Tipul metodei
Brinell	bilă oțel	$F/S, [N/mm^2]$	-	$< 450 \text{ HB}$	statică
Rockwell	bilă oțel	$h, [mm]$	$B = 130$	$< 450 \text{ HB}$	statică
	con de diamant	$h, [mm]$	$C = 100$	toate materialele	statică
Vickers	piramidă de diamant	$F/S, [N/mm^2]$	-	toate materialele	statică
Poldi	bilă de oțel	comparativă	-	$< 450 \text{ HB}$	dinamică

OBOSEALA MATERIALELOR

Oboseala este un fenomen de reducere a rezistenței de rupere în cazul solicitărilor repetate de un număr mare de ori.



Se produce în cazul axelor de rotație sub acțiunea greutateilor proprii precum și a altor forțe care nu-și modifică sensul. Se obține, de asemenea, ca efect al vibrațiilor.

OBOSEALA MATERIALELOR

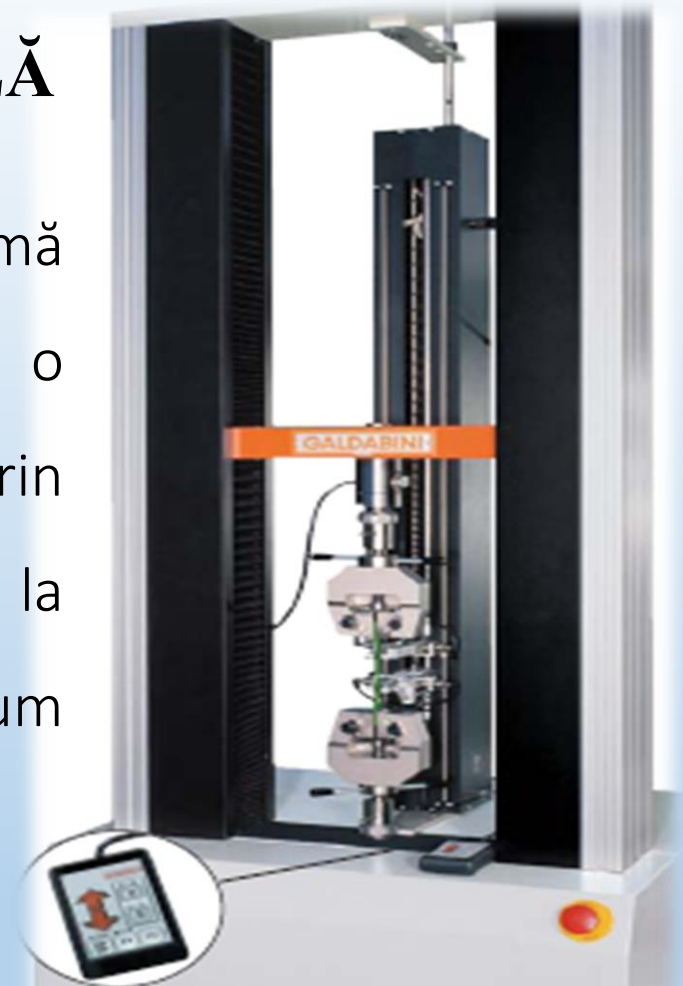
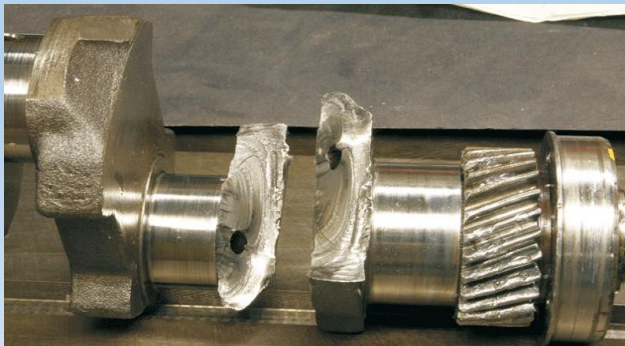


Se constată că piesele cu solicitări variabile se pot rupe la nivele de solicitare mai mici decât rezistența de rupere statică, cu atât mai mici cu cât numărul ciclurilor de solicitare este mai mare.

Caracterizarea materialelor prin încercări mecanice

REZISTENȚA LA OBOSEALĂ

Rezistența la oboseală este mărimea maximă a solicitării pentru care piesele au o durabilitate nelimitată. Se determină prin încercări de oboseală. Mărimea rezistenței la oboseală depinde de tipul solicitării, precum și de forma ciclului de solicitare.



**Mașină de
încercare la oboseală**

CARACTERIZAREA MATERIALELOR PRIN ÎNCERCĂRI TEHNOLOGICE

ÎNCERCĂRI TEHNOLOGICE ALE MATERIALELOR

- Proprietățile tehnologice ale materialelor metalice exprimă capacitatea acestora de a fi prelucrate prin diferite procedee tehnologice de prelucrare ori formare la rece sau la cald.
- Sunt evaluate calitativ, prin acordarea unor calificative.

PROPRIETĂȚILE TEHNOLOGICE ALE MATERIALELOR

- ☐- turnabilitate
- ☐- deformabilitate
- ☐- sudabilitate
- ☐- călibilitate
- ☐- prelucrabilitate prin așchiere
- ☐- maleabilitate
- ☐- ductilitate

Turnabilitatea

- este proprietatea materialelor de a umple în stare lichidă tot interiorul unei forme de turnare.



Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Proprietăți de turnare

- ☐ Fluiditatea
- ☐ Contractia
- ☐ tendința de segregare
- ☐ tendința de absorbție a gazelor
- ☐ tendința de fisurare

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Proprietățile de turnare sunt cu atât mai bune cu cât materialul are o compoziție mai apropiată de eutectic.

Fluiditatea se exprimă ca raport între lungimea obținută la turnare și lungimea total a spiralei, proprietatea de turnare fiind cu atât mai bună cu cât materialul umple o lungime mai mare.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Determinarea fluidității materialelor metalice servește la:

- ❑ controlul capacității aliajului de a umple forma;
- ❑ controlul temperaturii aliajului la o compoziție chimică dată a acestuia;

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- ❑ aprecierea calitativă a variațiilor de compoziție chimică și a variațiilor proprietăților aliajului în stare lichidă, pentru o temperatură dată, constantă, de turnare;
- ❑ alegerea aliajului cu fluiditatea cea mai bună dintr-o serie de aliaje echivalente din punct de vedere al celorlalte proprietăți.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Fluiditatea materialelor metalice pentru turnătorie depinde de trei categorii de factori, care, în principal, sunt:

- ***Proprietățile intrinseci ale materialului metalic:***
 - vâscozitatea
 - temperatura intervalului de cristalizare
 - conductivitatea termică

Tehnologia de turnare

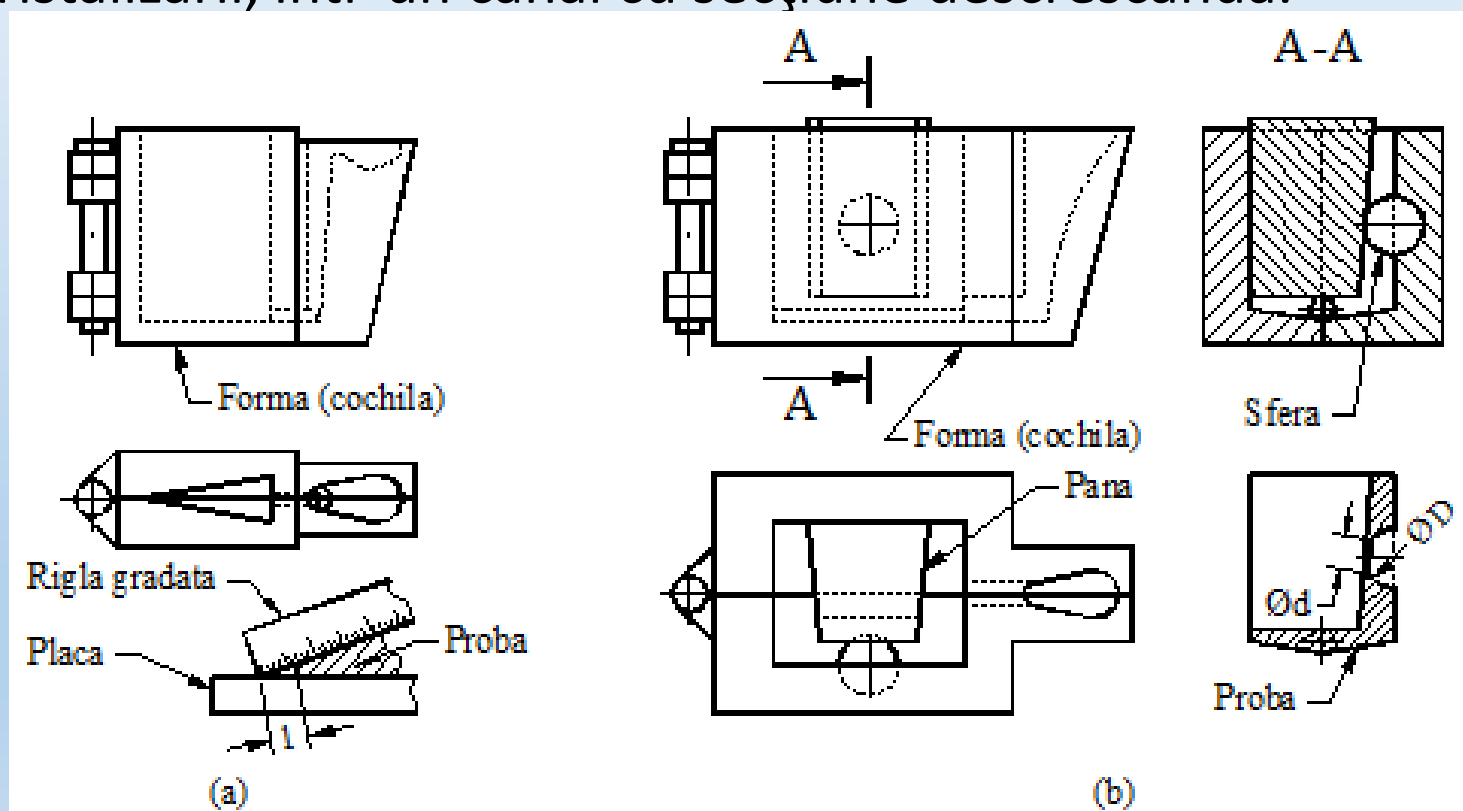
- temperatura de turnare
- viteza de turnare
- dimensiunile și amplasarea sistemului de turnare.

Proprietățile formeii de turnare

- conductivitatea termică a materialului formeii
- umiditatea formeii
- temperatura formeii
- calitatea suprafeței formeii
- permeabilitatea formeii

Metode de determinare a fluidității

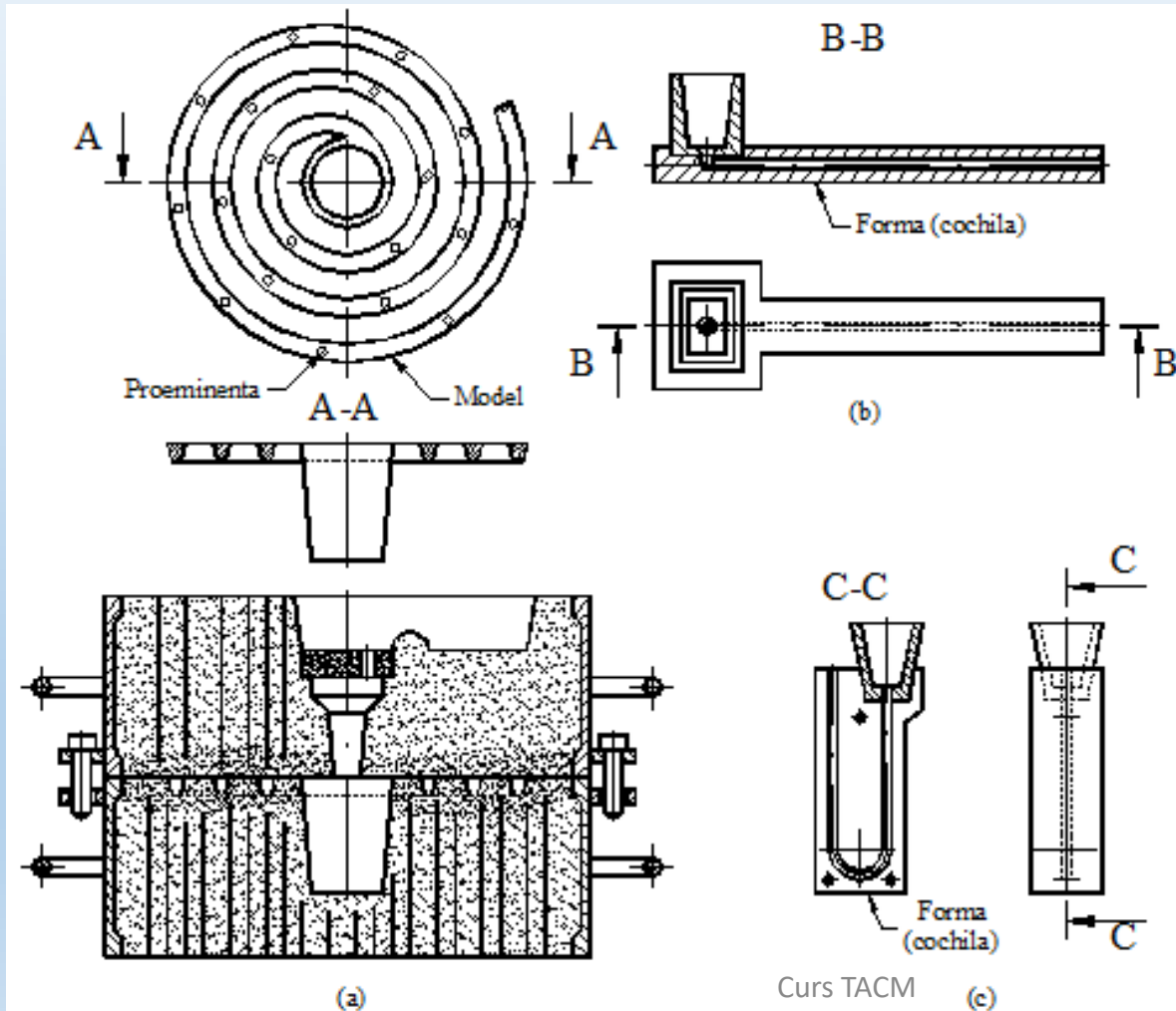
- metoda bazată pe încetarea curgerii materialului metalic, datorată cristalizării, într-un canal cu secțiune descrescândă.



Proba pană (a) și proba sferă (b) pentru determinarea fluidității

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- metoda bazată pe încetarea curgerii materialului metalic, datorată cristalizării, într-un canal lung cu secțiune constantă.



Proba spirală (a),
proba dreaptă (b)
și proba U (c)

Prelucrabilitatea

- ❑ reprezintă capacitatea unui material de a fi prelucrat printr-un anumit procedeu, dar și comportarea acestuia în timpul procesării.
- ❑ este apreciată prin încercări specifice, încercări tehnologice, care urmăresc principalele caracteristici ale procedurii propus.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- Încercările tehnologice se elaborează pentru condiții concrete; semifabricatul este declarat corespunzător când *asigură un răspuns minim necesar stabilit prin experimente anterioare, reglementat prin standard.*

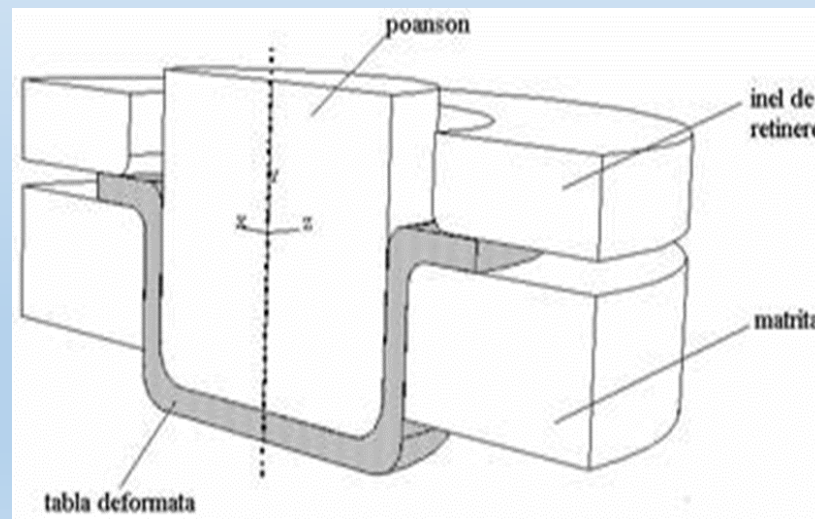
Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- **Prelucrarea prin deformare plastică la rece** presupune modificări de formă și secțiuni, fără rupere.
- *Tablele* se încearcă la ambutisare și îndoire alternată.
- *Sârmele* se încearcă atât la îndoire alternată cât și la răsucire și înfășurare pe dorn.
- *Tevile* se încearcă la îndoire, aplatizare, lărgire și răsfrângere.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Încercarea la ambutisare

- Ambutisarea constă în modificarea formei unui semifabricat, de la forma plană la cea cavă sau în mărirea adâncimii unui semifabricat cav cu sau fără modificarea grosimii pereților.

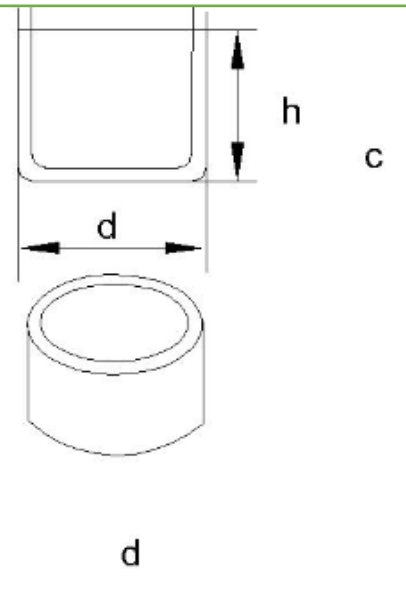
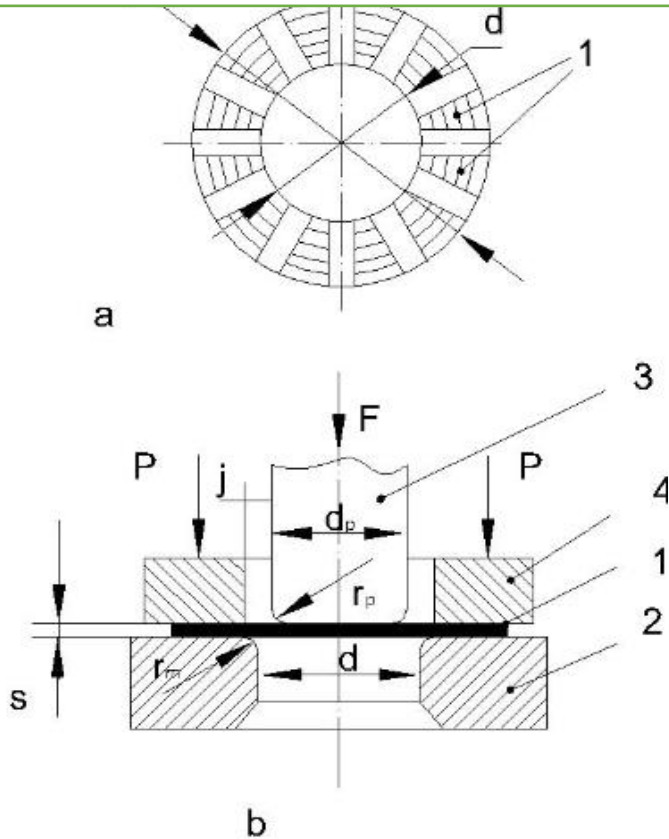


Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- Deformabilitatea tablelor exprima capacitatea acestora de a se deforma plastic pentru a lua o forma data fără sa apară defecte în piesa. Mărimea cantitativa a deformabilității este gradul de deformare suferit de un material până la care începe sa apară prima fisură.



Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice



*Schema ambutisirii
unei piese cilindrice*

Deformarea materialului *semifabricatului 1* se realizează prin trecerea lui forțată printr-o *placă activă 2* de diametru d sub acțiunea forței F a unui *poanson 3* cu diametrul d_p . Pentru ca semifabricatul să nu fie tăiat, atât poansonul cât și placa activă (matrița) sunt prevăzute cu raze de racordare r_p , respectiv r_m . Semifabricatul de la care se pleacă este un disc de diametru D și grosime s .

Determinarea capacității de ambutisare la rece a tablelor subțiri prin metoda ERICHSEN

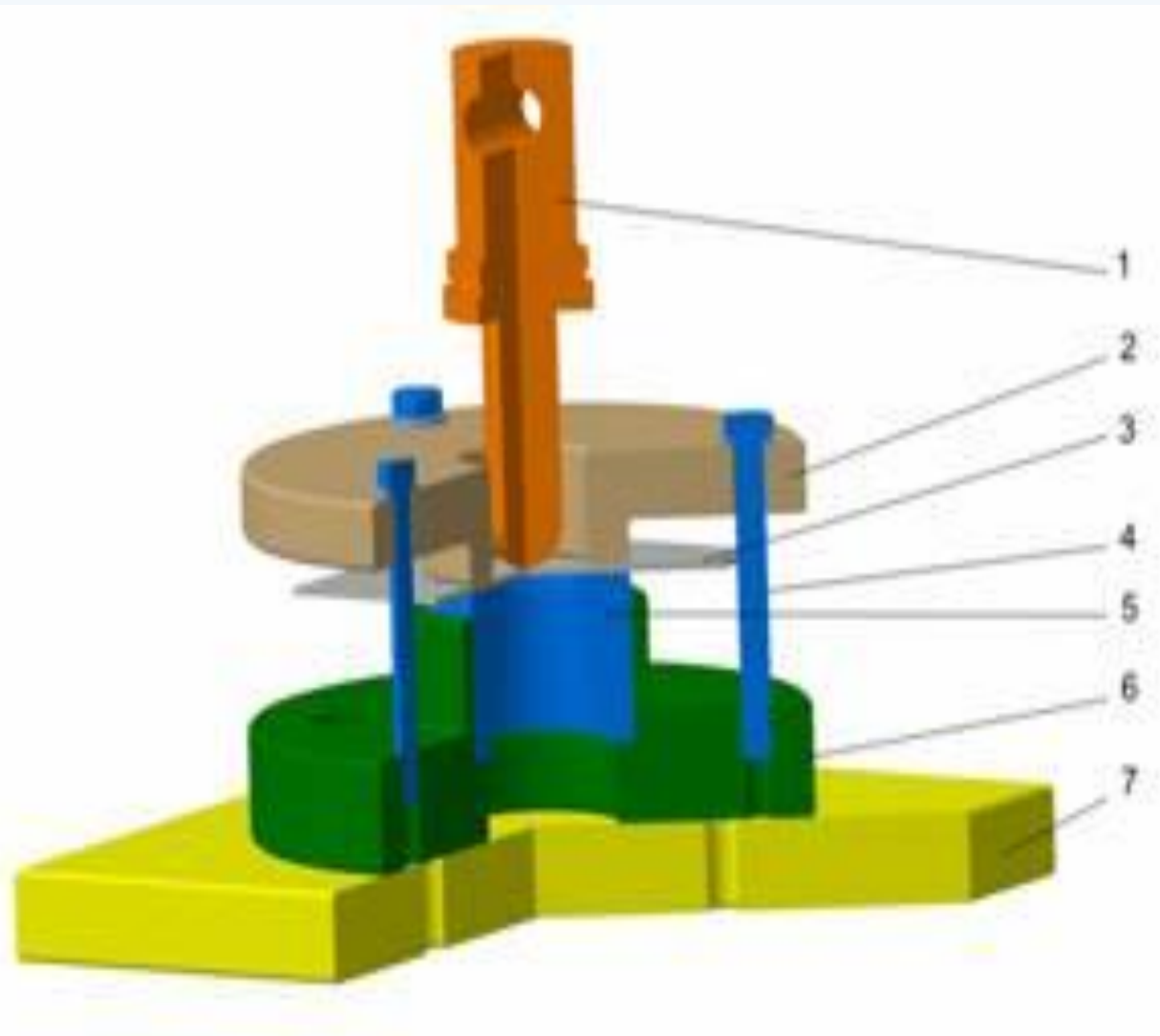
Încercarea consta din deformarea în matriță a unei epruvete, folosind un poanson cu capăt sferic, în vederea determinării adâncimii maxime de ambutisare, până la apariția unei fisuri pătrunse, în vederea determinării deformațiilor suferite și a adâncimii maxime de ambutisare a materialului.

Aceasta adâncime, măsurată în mm, cu precizie de 0,1 mm, reprezintă indicele Erichsen.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- SR EN ISO 20482:2014
- Materiale metalice. Table și benzi. Încercarea de ambutisare Erichsen

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice



1 – poanson

2 – placă de presiune

3 – semifabricat

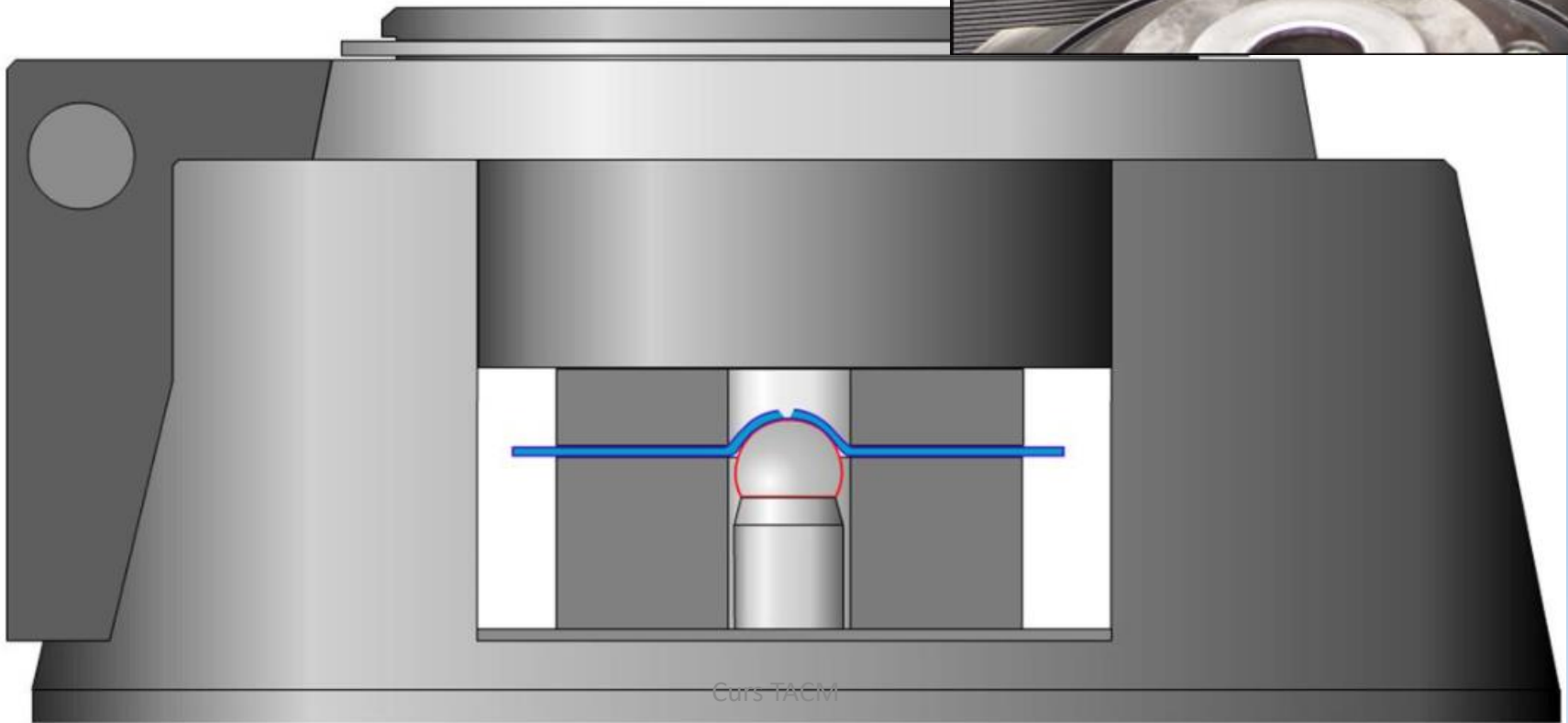
4 – șuruburi de fixare

5 – placă activă

6 – suport placă activă

7 – masa mașinii

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice



Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- Standul este compus din poansonul 1, proiectat în așa fel încât să se poată monta pe traversa mobilă a mașinii, suportul plăcii active 6, care se fixează pe masa mașinii 7, placa activă 5 și placa de presiune 2. Semifabricatul 3, este strâns între placa de presiune și placa activă 5 prin intermediul șuruburilor de fixare 4.
- Încercarea se consideră terminată în momentul formării unei fisuri pătrunse, pe o lungime de aproximativ 5 mm.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

După ambutisare, epruveta se scoate din dispozitiv și se măsoară adâncimea de pătrundere a poansonului.

Material	Indicele Erichsen I_E pentru grosimea tablei de 1 mm
Oțel carbon de calitate pentru ambutisare	9,0-10,5
Cupru	8,5-9,5
Aluminiu	8,5
Alamă	8,5-12

Tinand cont de rezultate, se pot trage concluzii asupra deformabilității materialului supus procesului de ambutisare și a indicelui Erichsen, I_E .

Încercarea la îndoire

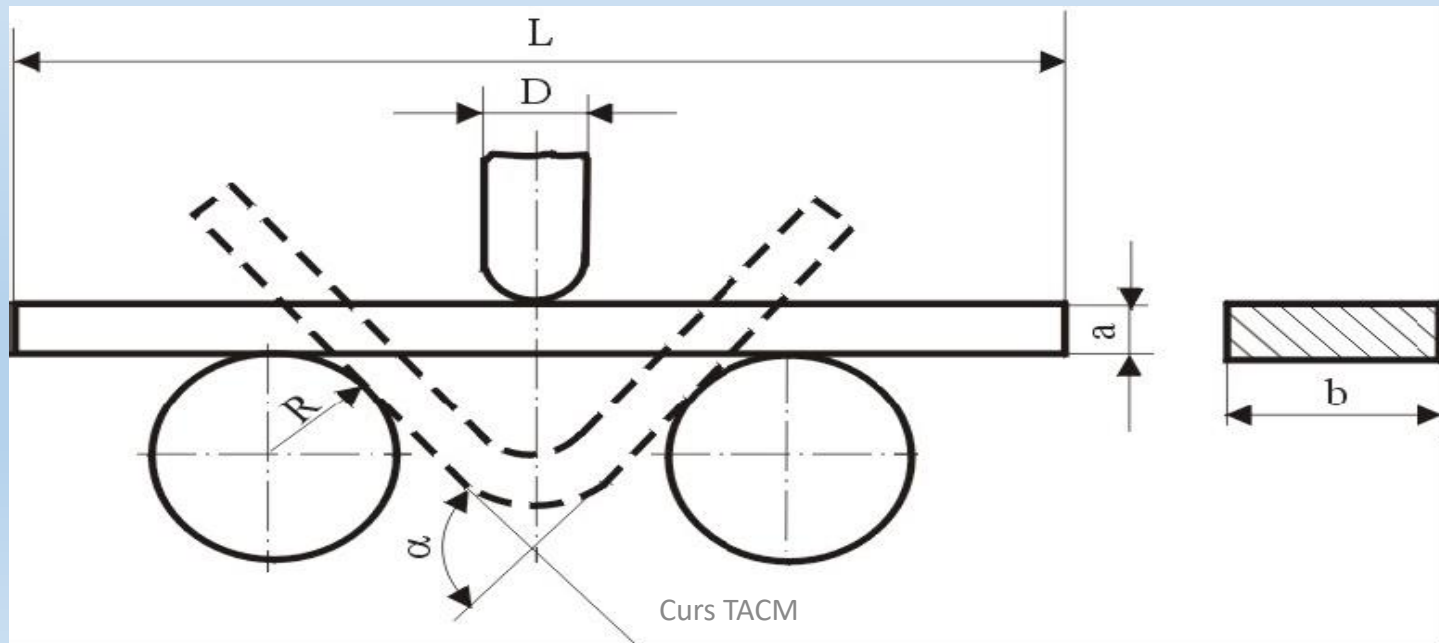
Se urmărește determinarea capacității de deformare prin îndoire a materialelor metalice, verificarea calității produselor precum și evidențierea defectelor de suprafață a semifabricatelor cu secțiuni dreptunghiulară, rotundă sau poligonală, având diametrul sau grosimea ≤ 4 mm.

SR EN ISO 7438:2016 Materiale metalice. Încercarea la îndoire

Standardul specifică o metodă pentru determinarea capacității de deformare plastică prin îndoire a materialelor metalice și se aplică epruvetelor prelevate din produse metalice, așa cum se specifică în standardele de produs corespunzătoare. Standardul nu se aplică anumitor materiale sau produse, de exemplu țevi fără sudură sau sudate, pentru care există alte standarde.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- ❑ deformarea plastică prin îndoire lentă, continuă și fără șocuri a unei epruvete rectilinii, în jurul unui dorn până la un unghi α format între fața unei ramuri a epruvetei îndoite și prelungirea feței celeilalte ramuri fie până la apariția unei fisuri cu luciu metalic de minim 3 mm.



Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- Se deosebesc următoarele tipuri de încercări:
 - ❑ Îndoirea liberă pe dispozitive cu role până la diferite unghiuri mai mici de 160°
 - ❑ îndoirea în matriță profilată la unghiuri stabilite de profilul matriței (valoarea unghiului de $60^{\circ+10}$ este exemplificativă);
 - ❑ îndoirea completă la 180° cu sau fără distanțe între fețele interioare ale ramurilor epruvetei îndoite
 - ❑ îndoirea în menghină cu sprijinul unui dorn.

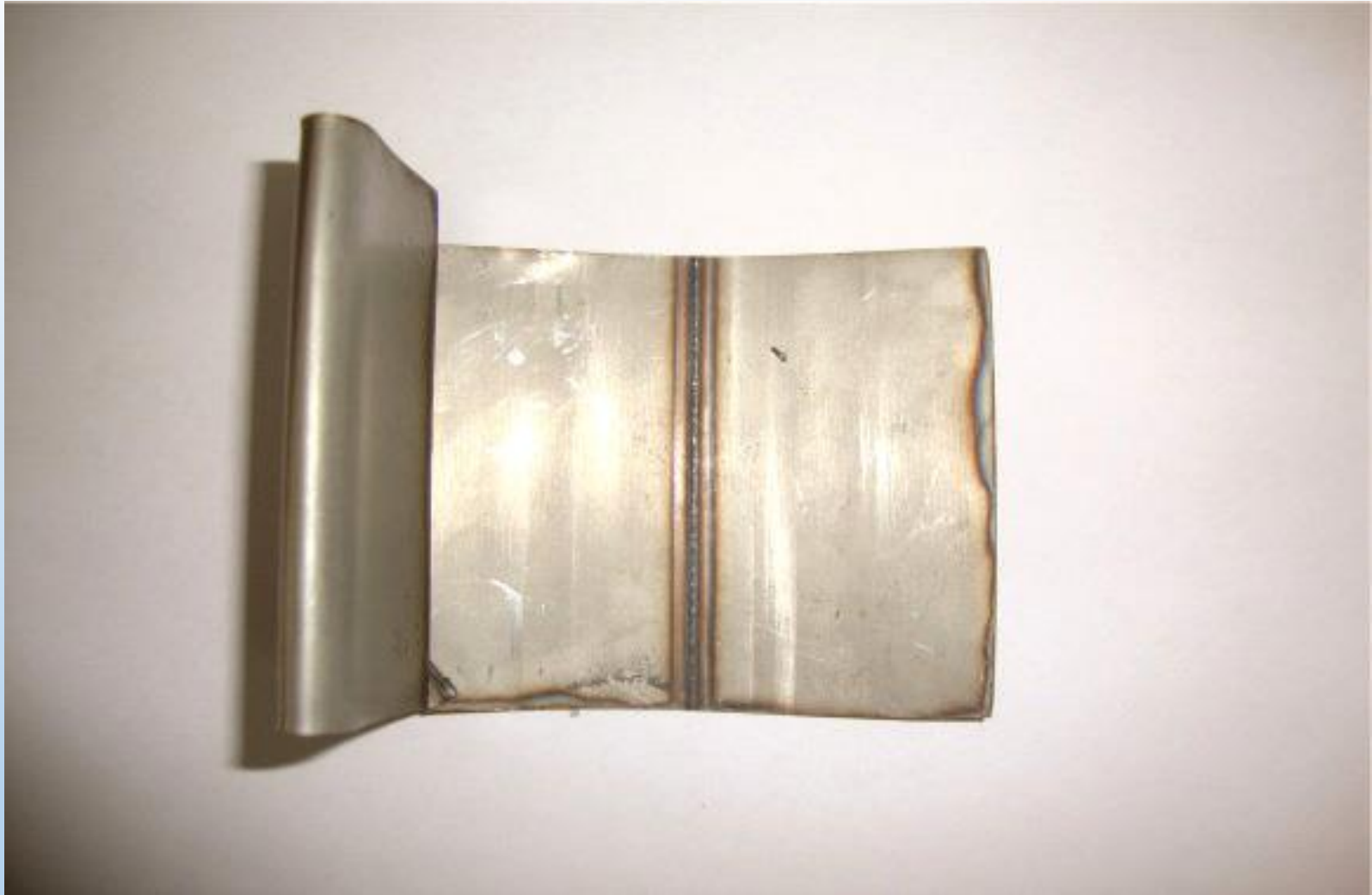
Încercarea la dublă îndoire a tablelor subțiri și a benzilor

- Se urmărește determinarea capacității de deformare prin dubla îndoire a tablelor subțiri și a benzilor laminate la rece
- Încercarea la dublă îndoire presupune efectuarea a două îndoiri ale epruvetei după direcții perpendiculare între ele, fiecare realizându-se la un unghi de 180° .

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- I. epruveta se îndoaie, până la un unghi de aproximativ 100° , în jurul unui dorn cu diametrul de 10 mm; dornul se îndepărtează iar îndoirea se continuă până la 180° și suprapunerea celor două jumătăți ale epruvetei.
- II. noua muchie de îndoire va fi perpendiculară pe prima.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice



Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Se consideră că materialul are capacitatea bună de deformare prin dublă îndoire, dacă epruvetele supuse procesului nu prezintă fisuri vizibile cu ochiul liber, pe muchia de îndoire și în special în colțul celei de-a doua îndoiri.

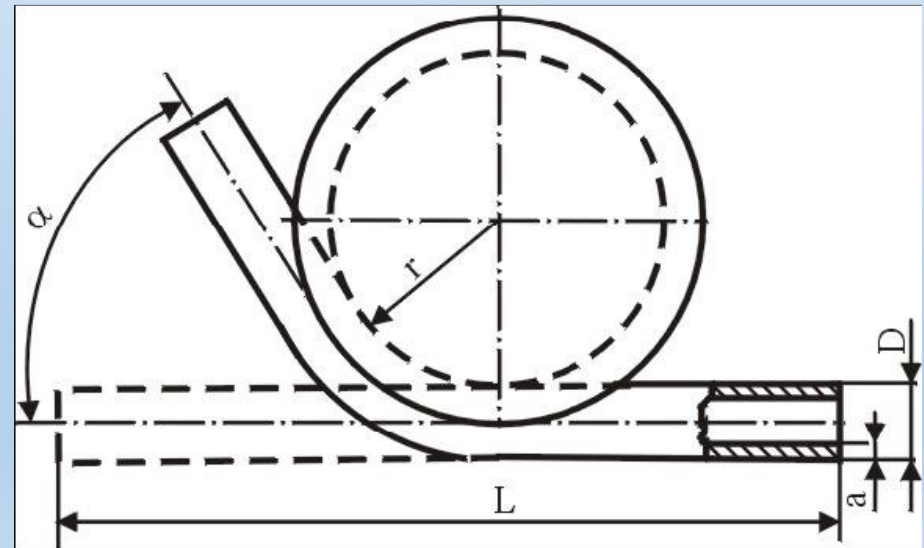
Încercările tehnologice ale țevelor

- ❑ Această încercare tehnologică se aplică tronsoanelor din țevi metalice cu secțiune circulară și cu diametrul exterior de maxim 65 mm în vederea determinării capacității de deformare plastică prin îndoire a acestora.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Încercarea la îndoire

- ❑ constă în îndoirea acestora pe o rolă prevăzută cu o canelură de rază „ r ”, până când unghiul α atinge valoarea menționată în standardul de produs.
- ❑ încercarea se consideră satisfăcătoare dacă pe suprafața țevii nu se observă fisuri vizibile cu ochiul liber.

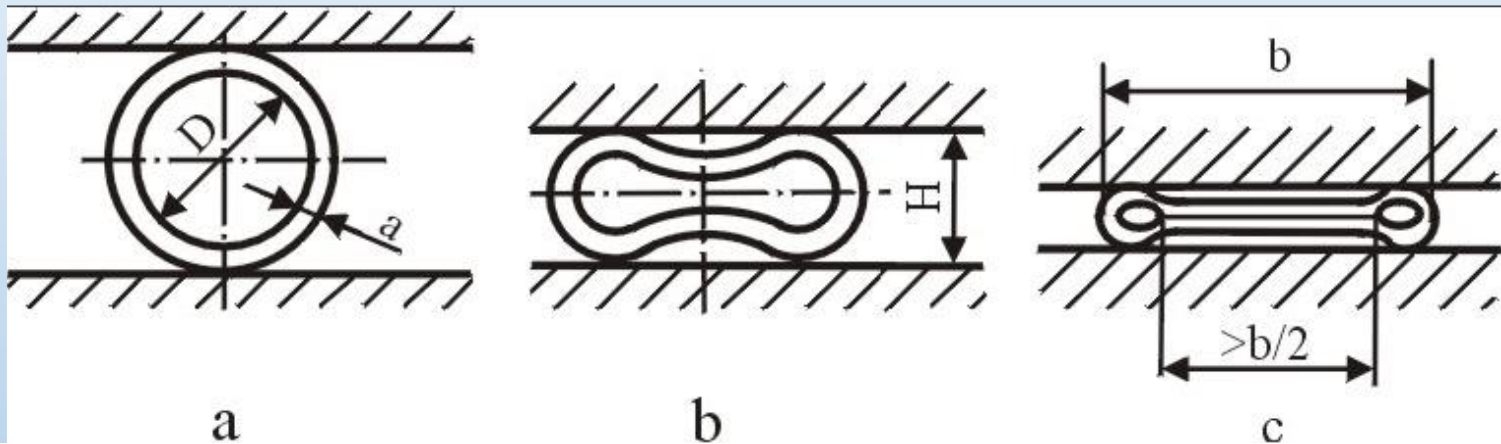


Încercarea la aplatizare

- ❑ determinarea a capacității de deformare plastică prin aplatizare a țevelor metalice cu secțiunea circulară și cu diametrul exterior de maximum 400 mm, având grosimea peretelui de max 15 % din diametrul exterior.
- ❑ poate pune în evidență și anumite defecte ale țevelor.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- are loc între plăcile unei mașini, până când distanța dintre ele, măsurată sub sarcină și pe direcția de aplatizare, atinge valoarea specificată „H” din standardul de produs.



Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- ❑ Incercarea la aplatizare arată rezistența la compresiune a tevilor metalice testate.
- ❑ Pentru a avea rezultate bune, teava nu trebuie să prezinte fisuri evidente la inspectarea vizuală.

Încercarea la lărgire

- ❑ determinarea capacității de deformare plastică prin lărgire a țevilor metalice cu secțiunea circulară, având diametrul exterior de maxim 150 mm și grosimea peretelui de maxim 10 mm .
- ❑ Prin lărgire se urmărește obținerea unei porțiuni evazate la capătul țevii care servește la îmbinarea și etanșarea a două conducte.

Încercarea la răsfrângere

- ❑ determinarea capacității de deformare plastică prin răsfrângere a țevelor metalice, de secțiune circulară, având diametrul exterior de max 150 mm și grosimea peretelui de maxim 10 mm .
- ❑ se urmărește formarea unei borduri plane și perpendiculare pe axa țevei.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Utilizează mașina universală de încercat cu un dispozitiv ce conține:

- ❑ o sculă tronconică cu unghiul la vârf adecvat, de obicei 90^0
- ❑ o sculă având un capăt cilindric cu diametrul mai mic cu 1 mm față de diametrul interior al țevii și o porțiune plană concentrică cu capătul cilindric perpendiculară pe axa sculei de deformare.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- ❑ Încercarea se consideră satisfăcătoare, dacă la nivelul diametrului maxim al bordurii nu se observă cu ochiul liber nici o fisură.



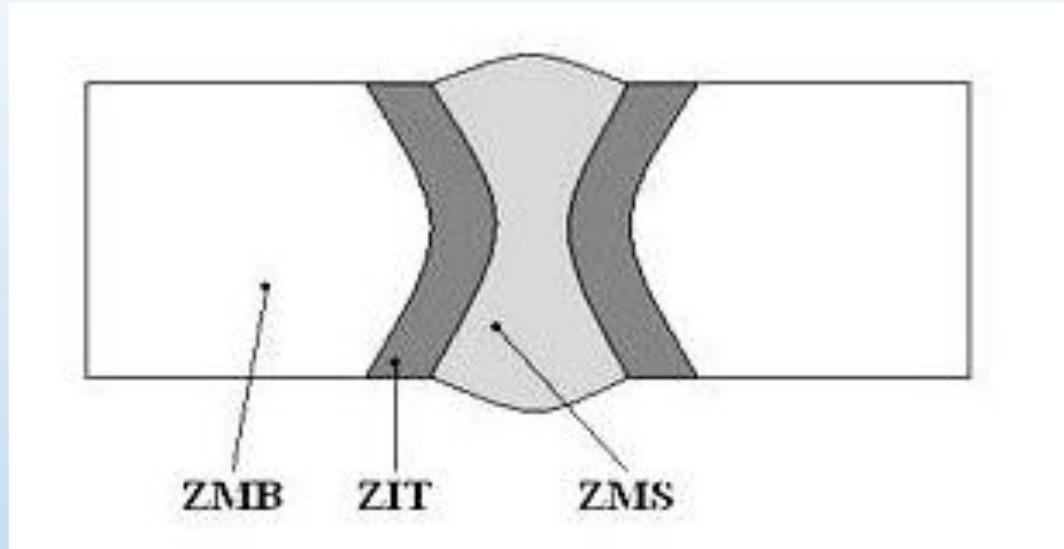
Sudabilitatea

Capacitatea unui metal de a fi sudat în condițiile de fabricație impuse într-o construcție concepută corespunzător și de a se comporta satisfăcător în exploatarea pentru care este destinată.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- Sudabilitatea este o însușire complexă determinată de:
 - ❑ proprietățile materialului de bază,
 - ❑ proprietățile materialului de adaos,
 - ❑ tehnologia de sudare,
 - ❑ nivelul solicitărilor în exploatare.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice



Metodele de încercare, utilizate în prezent pentru determinarea sudabilității, sunt numeroase și variate, fără să se fi ajuns la standardizarea unor metode unice.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- **Sudabilitatea oțelurilor în funcție de compoziția chimică:**

- ☐ Bună (% C < 0,2)

- ☐ Satisfăcătoare (% C 0,2 ... 0,3)

- ☐ Limitată (% C 0,3 ... 0,4)

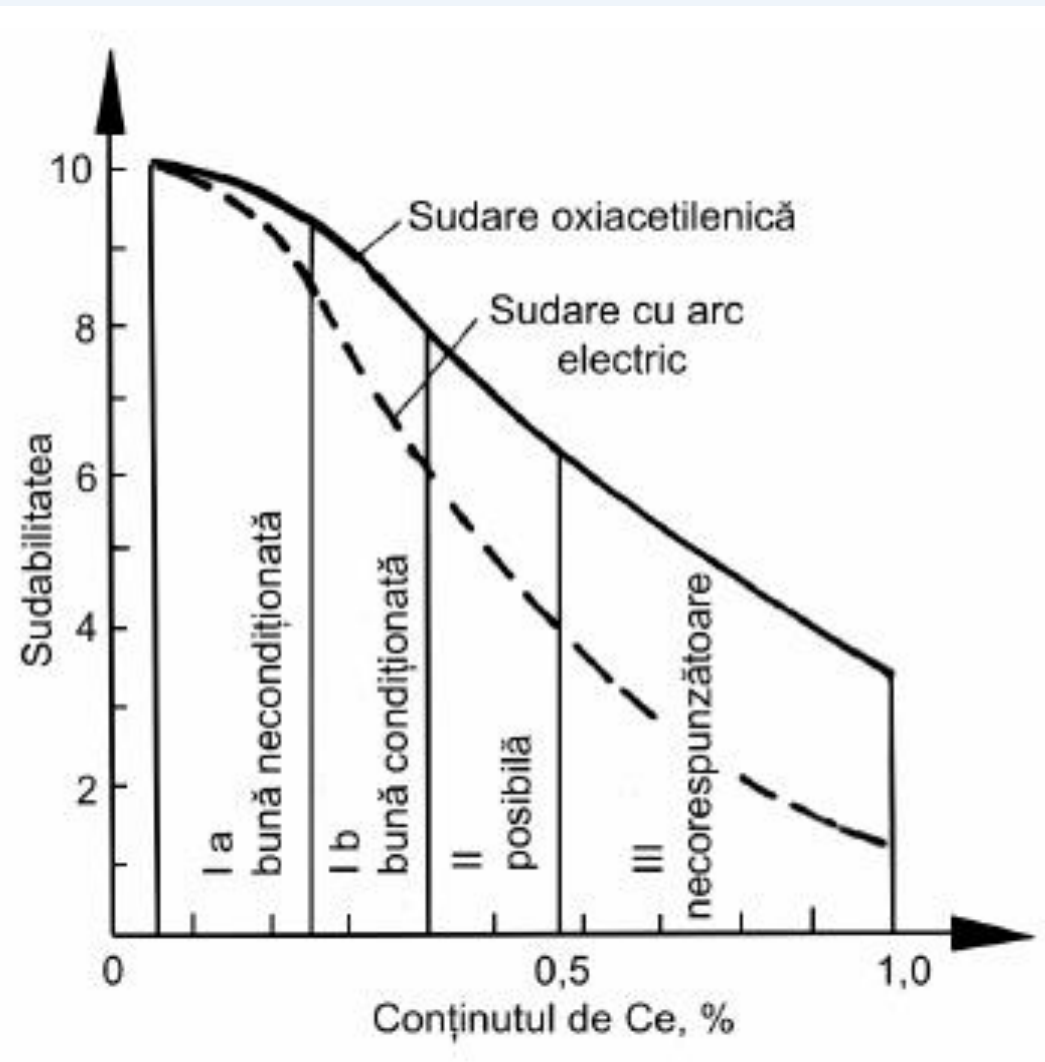
- ☐ Rea (% C > 0,4)

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Comportarea oțelurilor la sudare se judecă prin prisma valorilor unui coeficient C_e – carbon echivalent.

- C_e reprezintă însumarea influențelor elementelor de aliere, din compoziția unui oțel, raportate la influența carbonului asupra caracterului structurii de răcire, deci sudabilității.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice



bună necondiționată

se garantează construcția sudată fără condiții

bună condiționată

se garantează numai în anumite condiții

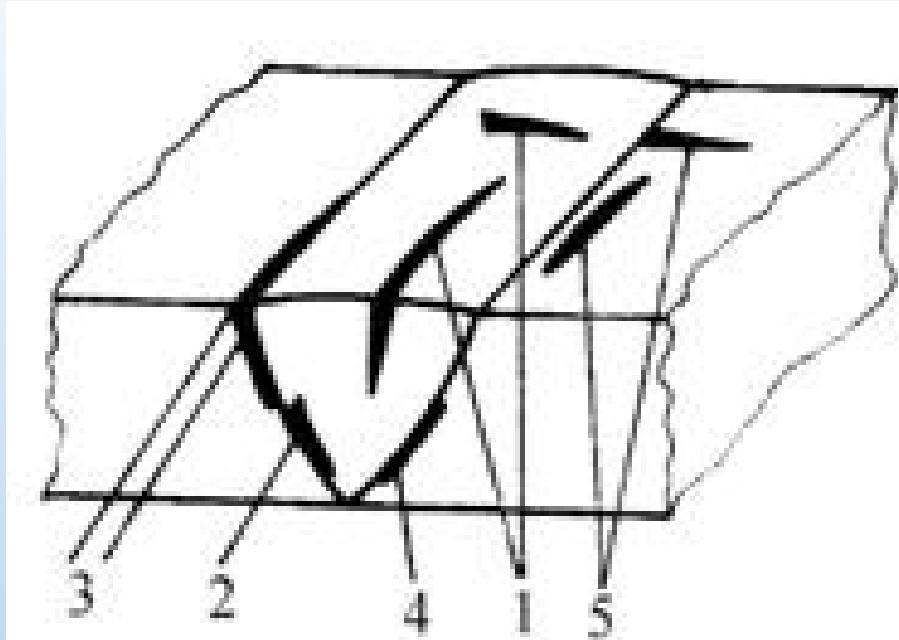
posibilă

nu se garantează construcția sudată

necorespunzătoare

nu se garantează construcția sudată

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice



Cel mai frecvent se pot produce fisuri în mijlocul cusaturii (1), în zona de diluare (2), în zona de racordare (3), sub cordon (4) sau în zona influențată termic (5).

Standarde de caracterizare a imbinărilor sudate

- SR EN ISO 23277:2015, Examinări nedistructive ale sudurilor, Examinarea cu lichide penetrante a sudurilor.
- SR EN ISO 23278:2015, Examinări nedistructive ale sudurilor, Examinarea cu pulberi magnetice a sudurilor

Călibritatea

Proprietatea unui material metallic de a realiza o duritate minima pe o adâncime mai mare sau mai mică;



Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Călirea consta într-o succesiune de operații de încălzire cu o anumită viteză până la temperaturi situate peste punctele critice de transformare structurală, menținere la aceste temperaturi și o răcire cu viteză mare până la temperatura ambiantă sau chiar sub 0°C .

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- Alegerea metodei de racire pentru calire a piesei depinde de forma acesteia, de dimensiuni si de compozitia chimica.
- Cu cat mai mare este continutul de carbon din otel, cu atat mai mari vor fi modificarile de volum, ce decurg in timpul transformarii fazice si cu atat mai mare va fi pericolul de deformare si de formare de fisuri, fiind deci, in acest caz, cu atat mai importanta alegerea mediului de racire adecvat.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

Aprecierea călibrității se face prin:

- ❑ viteza critică de călire;
- ❑ indicele de călibritate;
- ❑ diametrul critic de călire

- **Metode de determinare a călibrității**
- *Determinarea călibrității* prin călire frontală (încercarea Jominy)
- - încălzirea unei epruvete cilindrice din oțel la temperatura de călire un timp stabilit apoi, în anumite condiții prescrise, răcirea cu apă a unuia dintre capetele epruvetei și măsurarea durtății de la capătul răcit la capatul nerăcit.

Caracterizarea materialelor prin încercări tehnologice

- Valorile duritatii astfel determinate se inscriu, in functie de distanta de la capatul racit, intr-o diagram obtinandu-se astfel curba de calibilitate a otelului respective.
- Pe baza acestor curbe se stabileste indicele de calibilitate.

Bibliografie:

1. Handbook of Materials Characterization, Surender Kumar Sharma Editor, Dalip Singh Verma, Latif Ullah Khan, Shalendra Kumar, Sher Bahadar Khan Associate Editors, Springer, SBN 978-3-319-92955-2 (eBook), 2018
2. Materials Characterization, Yang Leng, Second Edition, Wiley-VCH, 2012, ePDF ISBN: 978-3-527-67080-2
3. Proprietățile materialelor metalice, Bădărău, G. ș.a., 2003, Ed. "Gh.Asachi" Iași
- 4 Alegerea și utilizarea materialelor metalice, Alexandru, I., ș.a., 1997. Ed. Did. Și Ped., R.A. București
5. Materials Science and Engineering – An Introduction. Applications, Callister, W.D., 1991, John Wiley & Sons Inc., New York.
6. . Baci, M.-N. Lohan, E. Matcovschi, D.-P. Burduhos-Nergiș, Mihai Popa, Știința și ingineria materialelor. Noțiuni generale-parte I, Editura Performantica, Iași, 2022, 18x26cm, 120 pag. ISBN 978-606-685-911-0
7. Încercarea și caracterizarea materialelor metalice, Gutt, G. ș.a., 2000, Ed. Tehnică, București.
8. Tehnici de analiză în ingineria materialelor. Aplicații practice, Rusu I., Ed. PIM, 110pg, 2011
9. Tehnici avansate de analiză termică. Îndrumar de laborator. N.M. Lohan, B. Pricop, L. G. Bujoreanu, Ed. Performantica, 2020, ISSN 978-606-685-736-9
10. Tehnologia Materialelor – Lucrări practice, C. Bejenariu, I. Mălureanu, A. Florescu, V.V. Moldoveanu, Diana Gheorghiu, St. L. Toma, Monica Lohan, Editura Tehnopress, 2008, ISBN 973-702-522-9
11. Tehnologia Materialelor. Știința și Ingineria materialelor – Lucrări practice, C. Bejenariu, I. Mălureanu, V.V. Moldoveanu, ȘT. L. Toma, D. A. Gheorghiu, N.M. Lohan, A. Corăbieru, A.M. Cazac, D.P. Burduhos Nergiș, 344 pag, 17x24cm, Ed. Tehnopress, 2022, ISBN 978-606-687-500-4