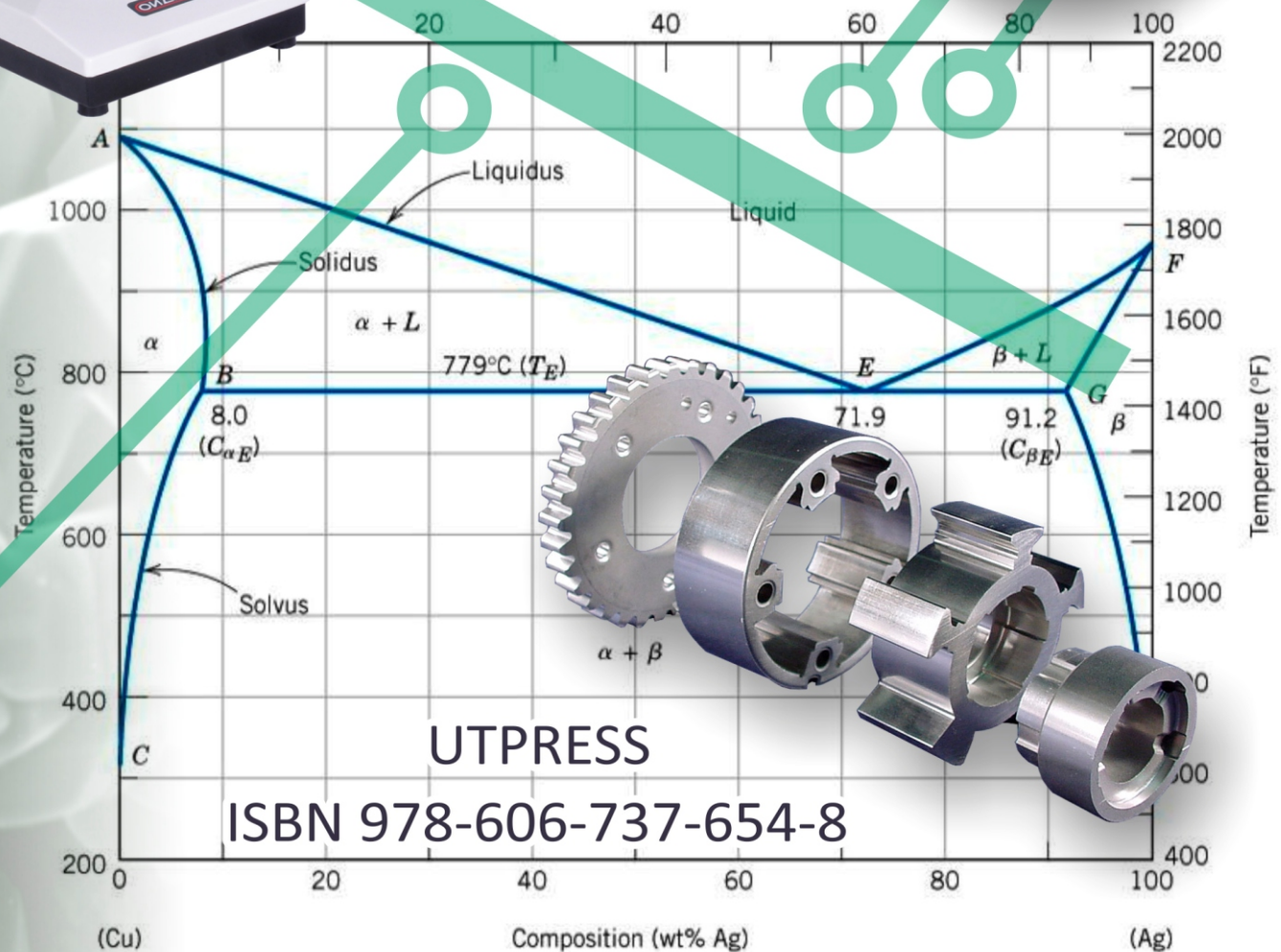
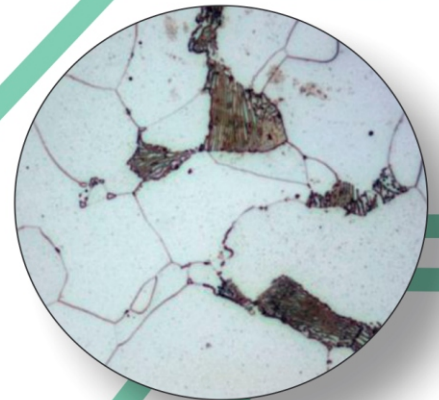


# CURS DE MATERIALE

## NOTIȚE DE CURS



**Marius BODEA**

# **CURS DE MATERIALE**

NOTIȚE DE CURS



**UTPRESS**

**Cluj-Napoca, 2023**

**ISBN 978-606-737-654-8**



Editura UTPRESS  
Str. Observatorului nr. 34  
400775 Cluj-Napoca  
Tel.: 0264-401.999  
e-mail: [utpress@biblio.utcluj.ro](mailto:utpress@biblio.utcluj.ro)  
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Director: Ing. Dan Colțea

Recenzia: Conf.dr.ing. Mariana Pop

Conf.dr.ing. Dan Frunză

Pregătire format electronic on-line: Gabriela Groza

Copyright © 2023 Editura UTPRESS

Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii UTPRESS.

**ISBN 978-606-737-654-8**

Bun de tipar: 02.08.2023

## PREFAȚĂ

Acest suport de curs este destinat studenților din anul I care urmează specializări din domeniul Ingineria Materialelor, Inginerie Industrială, Inginerie Mecanică și Inginerie Economică. Cartea poate fi utilă și pentru alte specializări din învățământul superior, însă structura și aplicațiile prezentate pe parcursul cărții au fost selectate în primul rând pentru studenții acestor specializări, unde sunt necesare o serie de cunoștințe generale sau mai avansate din domeniul ingineriei materialelor.

Supportul de curs de Materiale este un instrument util pentru toți studenții care doresc să-și formeze o cultură tehnică superioară, necesară pentru a putea performa în cariera de inginer la nivelul sec. XXI. Prin excelență domeniul de ingineria materialelor este extrem de vast și se află într-o continuă evoluție, asigurând elaborarea de noi materiale cu caracteristici și performanțe mecanice superioare pentru condiții de exploatare extrem de diverse.

Supportul de curs este structurat astfel încât, pornind de la noțiuni simple de bază sunt introduse treptat o serie de concepte și informații, care stau la baza înțelegerii comportării materialelor în diverse scenarii de încărcare și exploatare. În acest sens, pe parcursul cărții sunt prezentate și o serie de aplicații, microstructuri, diagrame, studii de caz și alte informații utile pentru a putea analiza toate informațiile prezentate într-un context mai larg. O serie de figuri conțin și etichete în limba engleză. Acestea au fost lăsate intenționat pentru facilitarea asimilării unei terminologii tehnice larg utilizate în companii multinaționale și în literatura de specialitate.

Prezentarea cunoștințelor de specialitate este concentrată, fără a intra însă în detalii de natură matematică sau la un nivel foarte avansat de descriere a fenomenelor / proceselor care intervin în controlul proprietăților materialelor. Intenția este de a facilita o lectură ușoară a cursurilor, iar unde este necesar studentul poate consulta lucrări de specialitate, unde informațiile respective sunt abordate la un nivel mai avansat, probabil însoțite și de un model matematic mult mai consistent.

Prin parcurgerea acestor noțiuni de curs, se vor asigura bazele înțelegerii principiilor care stau la baza elaborării și procesării materialelor, analizei și caracterizării materialelor, a selecției acestora în funcție de specificul aplicației de utilizare și a condițiilor efective de exploatare.

Pentru a facilita transferul de informații către student, cartea este editată cu numeroase hiperlink-uri ce vor permite efectuarea de salturi către diferite secțiuni ale cursului, figuri, grafice, materiale video și diverse studii de caz. Prezentarea grafică s-a selectat pentru a facilita înțelegerea unor noțiuni poate mai abstracte, stimulând memoria vizuală și îmbunătățind în ansamblu procesul de lectură.

Cu speranța că suportul de curs va fi un prieten de nădejde în această călătorie în lumea materialelor, autorul vă dorește mult succes în cariera dvs. viitoare.

Sumar notițe de curs	14	Cursuri, 204 pag. A4, Times New Roman 11
	255	Figuri și diagrame
	22	Tabele date
	308	Hyperlink-uri către articole, materiale video, studii de caz
	39	Titluri bibliografice accesibile on-line



## CURS 1. SCURT ISTORIC AL MATERIALELOR

Muzeele din lumea întreagă ne oferă posibilitatea unor incursiuni în trecut pentru a putea admira o serie de obiecte de mare valoare istorică, artistică și științifică. Pe parcursul mileniilor, omul a reușit să făurească de la obiecte de uz general cu o deosebită valoare artistică, precum vasele din ceramică, cupru, argint sau din aur, la construcții impresionante ca mărimi și complexitate. Aceste obiecte denotă o capacitate uimitoare a civilizațiilor anterioare privind creativitatea, precizia și ingeniozitatea sa de a putea extrage, modela și așeza în poziție precisă blocuri uimitoare de piatră sau granit.

Sumerienii au creat primele îmbinări prin brazare a unor vase și obiecte din cupru acum cca. 6000 de ani, iar câteva milenii mai târziu, japonezii realizau primele săbii [Katana](#), de mare rafinament și uimitoare prin proprietățile lor de rezistență și duritate [[video](#)].

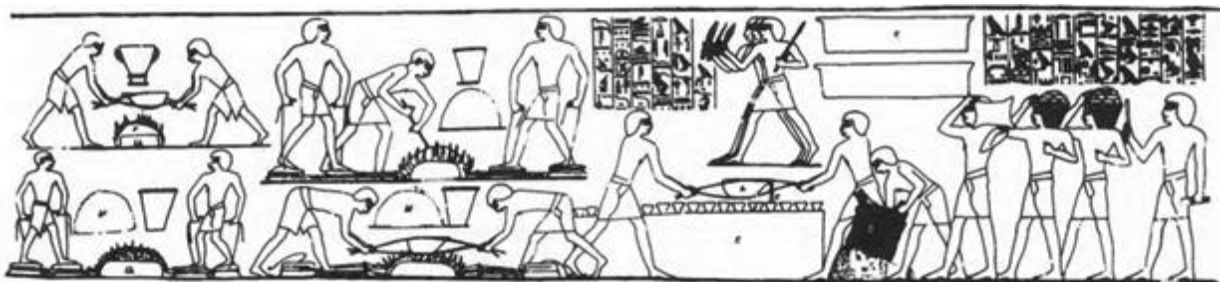


Fig. 1 [Scene din mormântul din Teba](#) ce ilustrează artizani sau meșteri ce prelucrează metalul, inclusiv cele două uși de la intrarea în mormânt, turnate din bronz.



a) mască sumeriană din bronz



b) mineral de malachit, conține cca. 57% Cu



c) Calcocit  $\text{Cu}_2\text{S}$ , conține cca. 80% Cu

Fig. 2 Primele obiecte din aliaje de bronz, obținute din malachit și calcocit, 3.000 BC [1].

Aproximativ prin anul 3000 î.e.n., sumerienii realizau primul aliaj din bronz (Fig. 2), prin amestecarea mineralului de malachit  $\text{Cu}_2[(\text{OH})_2\text{CO}_3]$  cu calcocit  $\text{Cu}_2\text{S}$  și cărbune din lemn în cuptoare deschise cu însuflare de aer, în care se puteau atinge temperaturi de 1.100-1.150°C. Era necesar tăierea a cca. 400 mp de pădure pentru a putea obține cca. 30 kg de cupru [2]. Mai târziu, prin anii 850 î.Hr, [Homer](#) a scris despre armele confecționate din cupru, iar [primele monede din bronz](#) apar în Egipt între anii 430-322 î.e.n. Acestea aveau un conținut de 80% cupru și 20% staniu.

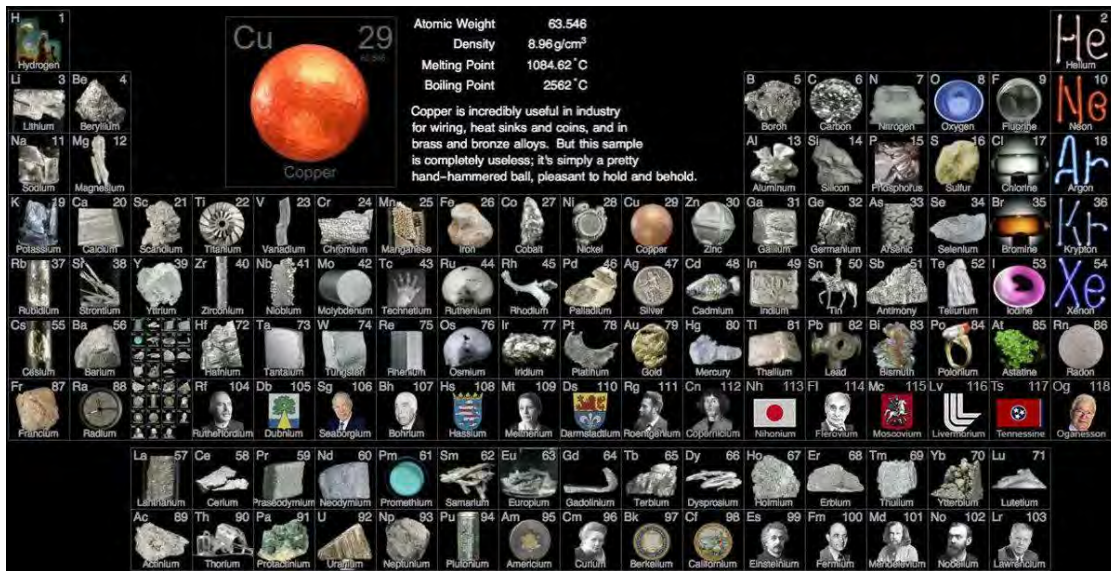


Fig. 3 [Tabelul periodic Mendeleev](#) al elementelor.

În prezent se cunosc [95 de metale](#)<sup>1</sup> (Tabelul periodic Mendeleev, Fig. 3), dar înainte de sec. XIII, erau cunoscute doar 7 metale: Aur (6.000 î.e.n.), Cupru (4.200 î.e.n.), Argint (4.000 î.e.n.), Plumb (3.500 î.e.n.), Staniu (2.500 î.e.n.), Fier (1.500 î.e.n.) și Mercur (750 î.e.n.).

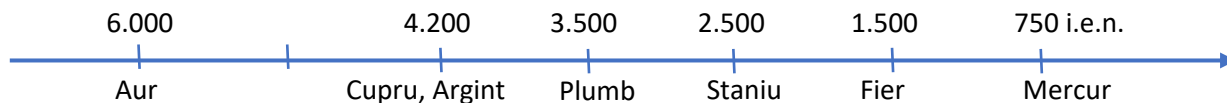


Fig. 4 Istoricul descoperirii unor metale [2].

În perioada istorică respectivă, Cu și Sn erau principalele bunuri de comerț din care se realizau unelte și arme. Exploatarea intensivă a Sn aluvional pentru obținerea produselor din bronz a dus practic la dispariția sa înainte de anul 2.000 î.e.n. și totodată la dispariția pădurilor din Cipru Aegean. Ca urmare, producția de bronz a încetat pentru aproape 300 de ani. În anul 55 î.e.n., Iulius Cezar a invadat teritoriul Marii Britanii pentru a prelua [controlul aprovizionării cu Sn din Cornwall](#). Și în prezent, există o [luptă permanentă între superputeri](#) pentru controlul exploataării unor resurse naturale, precum: metale ușoare necesare pentru fabricarea bateriilor pentru telefoane mobile, automobile electrice, cobalt, diamante, aur, petrol, cherestea. În ultimii 60 de ani, [peste 40% dintre conflictele din lume](#) au fost legate de controlul unor resurse naturale.

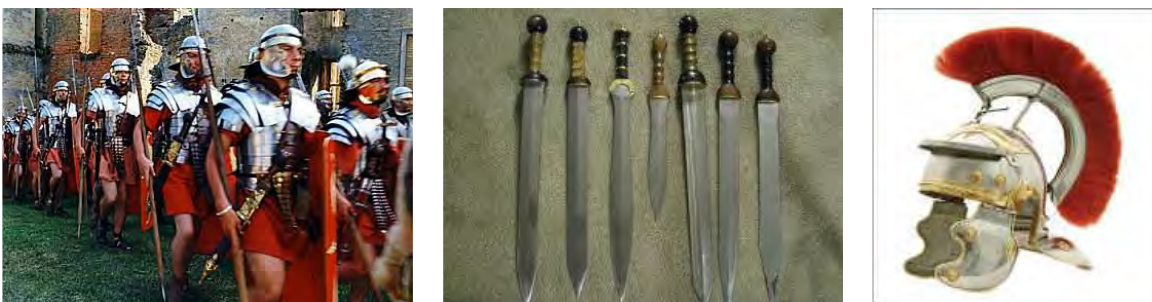


Fig. 4 Epoca fierului a permis realizarea de arme în masă. Încep marile campanii de cucerire.

<sup>1</sup> Nr de metale poate fluctua în funcție de departajarea între metale-nemetale și metaloizi. Nu există o definiție de departajare unanim acceptată.



Se crede că în jurul anilor 2.000 î.e.n. turcii sau persanii au obținut pentru prima dată în cuptoare de pământ primele lingouri de fier, în stare solidă din minereuri native bogate în Fe. Această descoperire a condus curând la obținerea de arme în masă (minereurile de fier erau mai răspândite decât cele de Cu și Sn), lucru care avea să modeleze cursul istoriei și invaziilor militare din secolele următoare.

Aproximativ prin anii 900 î.e.n. japonezii au reușit să elaboreze oțel carbon de înaltă calitate “*tamahagane*” în cuptoare “*tatara*” de argilă, care după tratamentul termic devenea extrem de rezistent, cu duritate ridicată și tăiș extrem de ascuțit, Fig. 5. Tehnica respectivă s-a perfecționat în timp, dar nu a fost înțeleasă timp de 1.000 de ani, până când tehnica de analiză și de caracterizare a materialelor a ajuns la un nivel de maturitate specific civilizației moderne [[video](#)].



Fig. 5 Hamon Detail Katana, [Tokyo National Museum](#), Japan.

Cam în aceeași perioadă istorică, undeva prin anii 300 î.e.n. din India erau aduse în Siria bucăți de minereu de fier din care meșteșugari/fierari din Damasc obțineau un oțel special, extrem de rezistent. Ulterior, a fost cunoscut sub denumirea de oțel Damasc, obținut printr-o tehnică care s-a pierdut prin sec. XVIII.



Fig. 6 [Wootz Steel Ingots](#) pentru obținerea oțelului de Damasc.

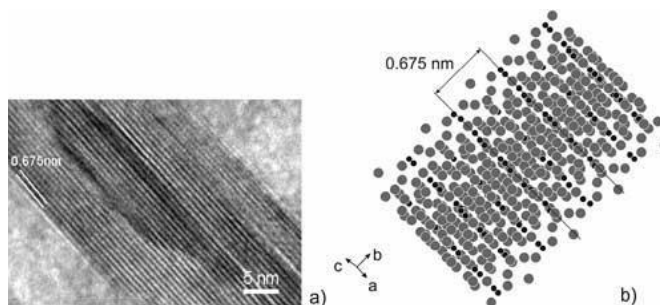


Fig. 7 Nanotuburi de carbon descoperite în oțelul de Damasc [11].

[Studii recente](#) (2006) efectuate la Universitatea din Dresden Germania, au arătat că oțelul de Damasc conține cementită sub formă de nanotuburi rezultate în urma procesului de forjare, Fig. 7 [11].

Descoperirea și rafinarea metodelor de obținere a oțelului a permis dezvoltarea rapidă a societății umane, construcția de căi ferate, drumuri și poduri care au facilitat transportul pe distanțe mari, precum și dezvoltarea unor industrii foarte diversificate, permițând acum unui singur om să hrănească alți 1.000, care ajung să lucreze în sectoare industriale și nu în agricultură, cum se întâmpla de secole până atunci.

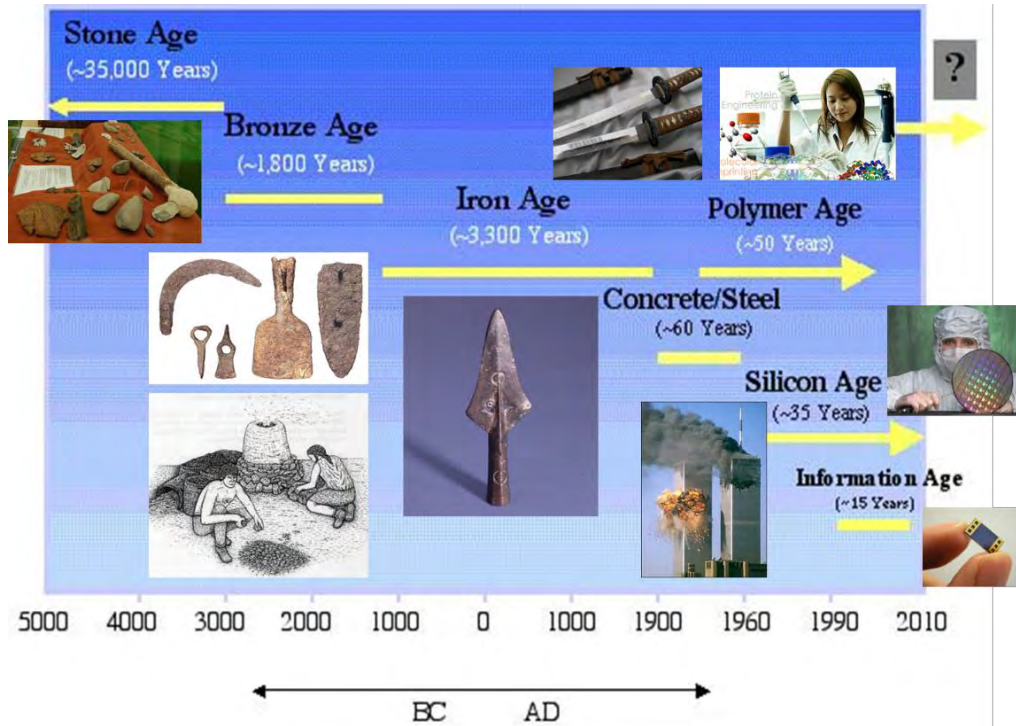


Fig.8 Evoluția istorică a unor materiale care au schimbat cursul evoluției societății umane.



Fig. 9 Muncitori ce lucrează la înălțime la construcția unui zgârie-nori, USA anii 1930. Epoca concrete/steel 1900-1960 [[Lunch atop a Skyscraper](#)].

# INTRODUCERE ÎN ȘTIINȚA MATERIALELOR

ȘTIINȚA MATERIALELOR studiază proprietățile materialelor, precum și dependența acestora de compoziția chimică, structură și temperatură. Se poate spune că Știința și Ingineria Materialelor este un domeniu interdisciplinar care studiază și controlează structura materialelor la diferite niveluri de organizare a materiei (ex. nanotehnologii la scară nanometrică) pentru a obține diferite materiale sau semifabricate utilizate în diverse domenii industriale.

Scopul inginerului de materiale este de a elabora noi materiale care prezintă cel mai bun raport performanță vs. costuri de elaborare/procesare. Așa cum poate fi observat din Fig.10, între microstructura materialului, tehnologia de procesare și compoziția chimică a acestuia, există o strânsă dependență care afectează raportul Performanță/Cost.

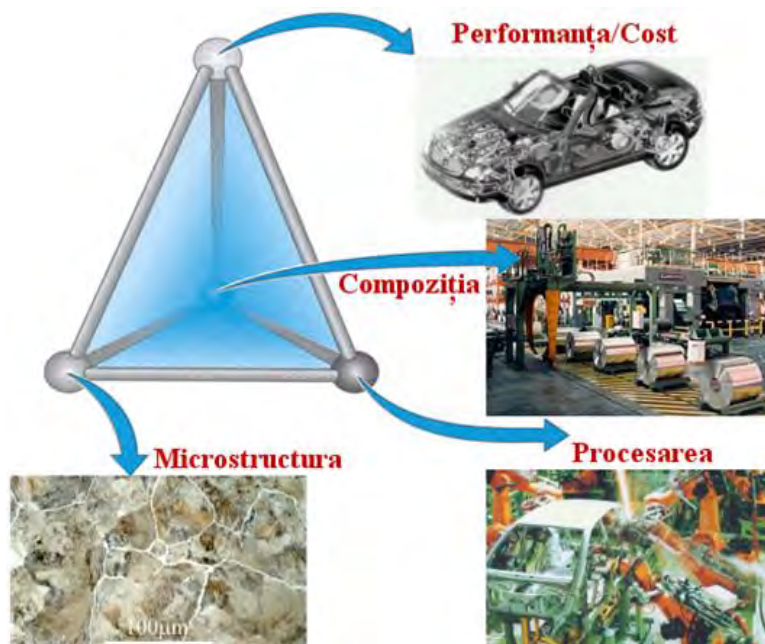


Fig. 10 Dependența dintre microstructura materialului, tehnologia de procesare și compoziția chimică a materialelor.

## TERMENI ȘI DEFINIȚII

<b>Compoziția chimică</b>	Din ce fel de atomi (elemente chimice) este alcătuit materialul.
<b>Structura</b>	Describe modul de aranjare a atomilor la diferite nivele de observație (ex. structura atomică, structura la nivel cristalin)
<b>Microstructura</b>	Cuprinde tipul și distribuția constituenților microstructurali. Determină proprietățile materialului analizat.
<b>Procesare</b>	Describe tehnologia prin care materialul este transformat, adus la diferite forme și dimensiuni, fapt ce atrage o serie de modificări ale proprietăților acestuia (ex. prin turnare, deformare plastică, sudare etc.)

Observație: Alegerea optimă a materialului, a metodei de procesare va determina în final performanțele cât și costul produsului. Rezultă necesitatea și importanța cunoașterii atât a proprietăților materialelor, cât și a metodelor de procesare a acestora.



**Aplicație practică:** Structura materialului are o influență majoră asupra proprietăților mecanice, electrice și tehnologice ale materialelor folosite în industrie, chiar dacă compoziția lor rămâne neschimbată. Dacă de exemplu luăm o sârmă de cupru și o îndoim alternant repetat, o să observăm ca materialul devine tot mai greu de deformat, dar și mai fragil, iar eventual în final se va rupe. Pe același fir de cupru, vom putea constata că prin îndoire repetată, deși nu se schimbă compoziția chimică a firului, va crește rezistivitatea electrică a acestuia. Aceste variații ale proprietăților de material se produc ca urmare a modificării structurii materialului, care poate fi observată la nivel microscopic (microstructura). Înțelegând dependența dintre microstructură, procesare și compoziție chimică, vom putea să controlăm proprietățile materialelor în sensul pe care îl dorim, îmbunătățind performanțele materialelor utilizate în diverse aplicații industriale.



Fig. 11 Crash-test în industria automotive pentru evaluarea siguranței pasagerilor [movie].

La fabricația caroseriilor de autoturisme sunt necesare materiale cu caracteristici complexe de înaltă performanță. Se are în vedere energia consumată la impact, rezistența mecanică, comportarea la coroziune, tehnologiile de reciclare a materialelor folosite, comportamentul aerodinamic, greutatea specifică, costurile de elaborare și distribuție, caracteristicile de deformabilitate și de sudabilitate, operațiile de mentenanță necesare etc.

Unele din aceste caracteristici au cerințe contradictorii (ex. cele de deformabilitate tehnologică și cele de rezistență și securitate), altele au mecanisme mai complicate ce necesită cunoștințe tehnice mai avansate pentru înțelegerea lor (ex. cele legate de sudabilitatea materialelor, tratamente termice etc.).

Materiile prime reprezintă cca. 47% din costul total al unui autoturism. Acesta este realizat din cca. 47% oțel, 10% polimeri, 7-9% aluminiu, 3% sticlă, 25-30% alte materiale. Deși aluminiul este de 2 ori mai scump ca și oțelul, ponderea acestuia în fabricarea autoturismelor este în creștere, deoarece reduce greutatea mașinii, Fig. 12. **Pentru fiecare 10% reducere în greutate, economia de carburant se îmbunătățește cu 5-7% și scad indicatorii de poluare cu emisii de gaze și particule.**



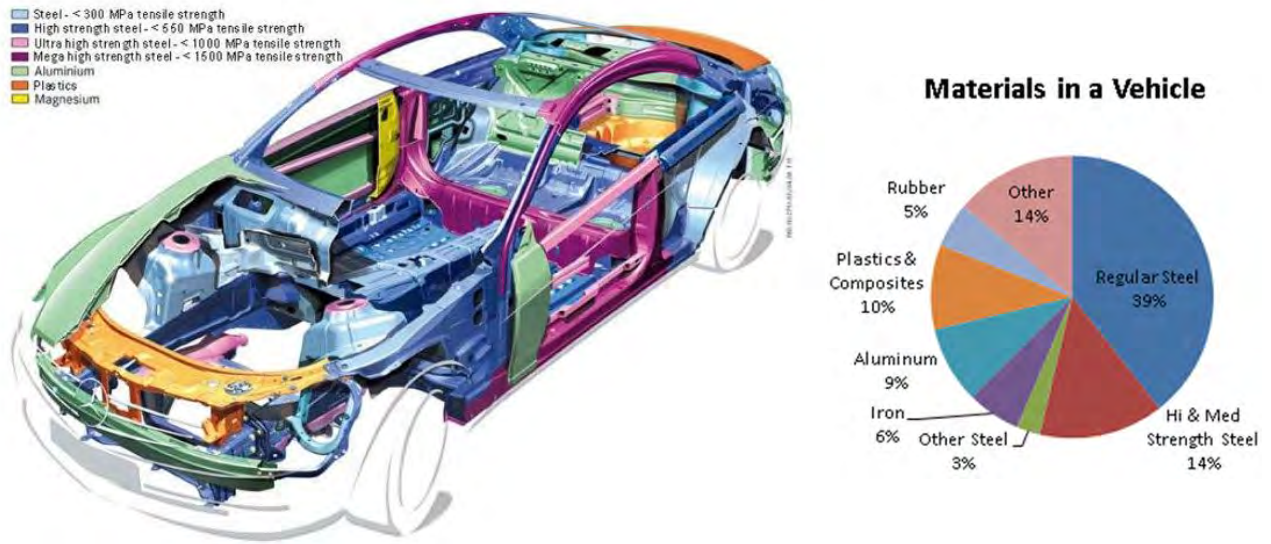


Fig. 12 Structura materialelor dintr-un autoturism modern [data 2020].

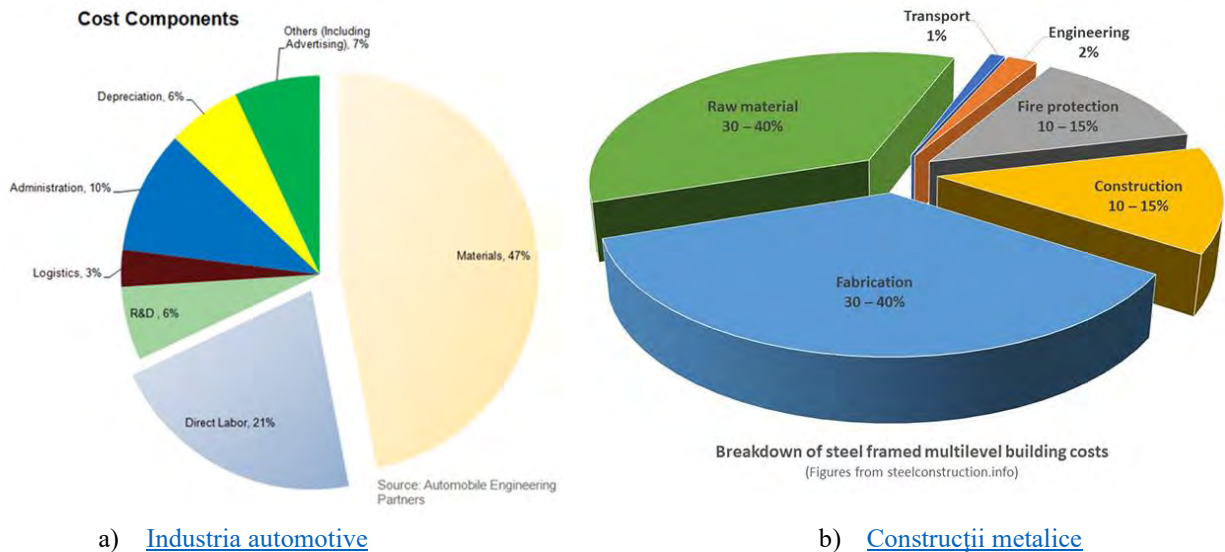


Fig. 13 Structura costurilor de fabricație în industrie.

Companiile cheltuiesc o mare parte din bugetul lor pentru dezvoltarea de noi materiale și tehnologii de procesare, care prin creșterea performanței lor, conduc la scăderea costurilor pentru bunurile fabricate. Conform Fig.13, se poate observa că ponderea cea mai ridicată din costurile de fabricație în domeniul automotive se regăsește în costurile de materiale, cca. 47%. În domeniul construcțiilor metalice (poduri, clădiri) costurile de material se situează între 30 și 40%, iar în domeniul electronicii ajung și la 80% din costul produsului finit.

Acum, putem să înțelegem de ce companiile investesc sume mari de bani în cercetare pentru elaborarea de noi materiale performante, respectiv pentru că în aceste domenii materialele reprezintă zona cea mai importantă de unde se pot obține reduceri de costuri și totodată se pot mări substanțial caracteristicile de performanță și de exploatare sau de reciclare ale produselor fabricate.

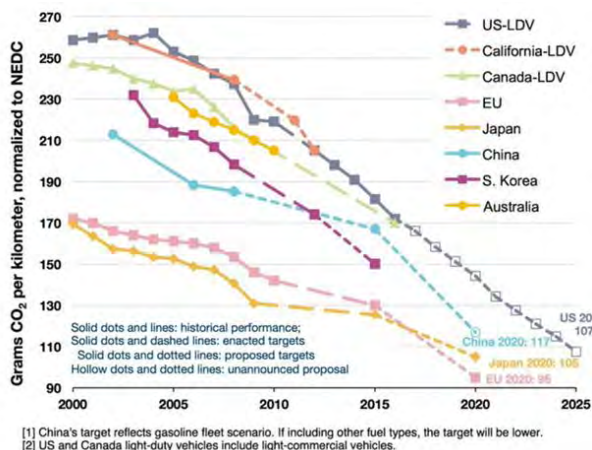


Fig. 14 Evoluția prognozată pentru reducerea [emisiilor de CO<sub>2</sub>](#) în cazul vehiculelor ușoare.

Schimbările climatice din ultimele decenii au produs perturbări ale precipitațiilor, sezoanelor de secetă și incendii de vegetație ce alternează cu furtuni severe, inundații și alunecări de teren, toate soldându-se cu pierderi materiale semnificative, sau chiar cu pierderi de vieți omenești. Această problemă globală pune presiune suplimentară pe guverne, pe companii și pe sectorul privat să găsească soluții privind elaborarea de noi tehnologii și materiale, care să prezinte o amprentă de carbon mai redusă, dar și metode mai eficiente de reciclare și de implementare a economiei circulare.

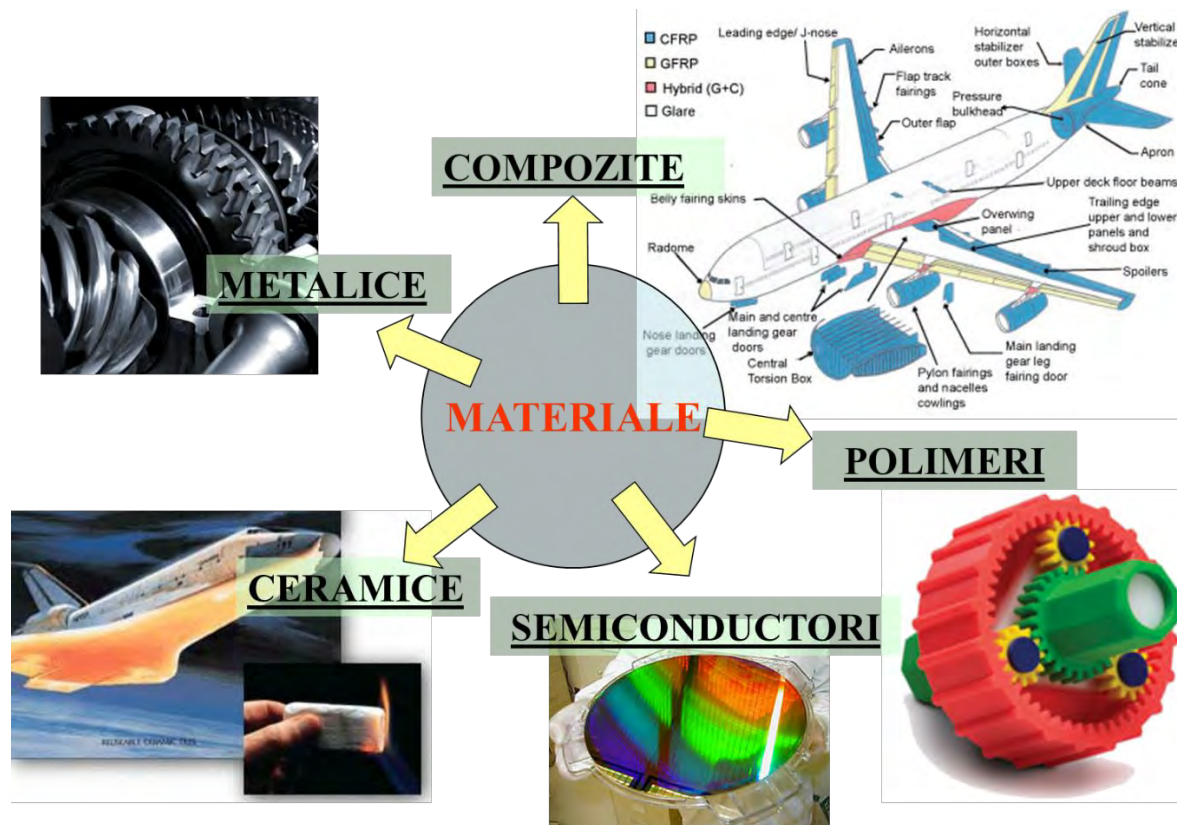


Fig. 15 Aspecte privind reciclarea materialelor. [Hangzhou China](#), 100.000 de vehicule scoase din uz.

La nivelul anului 2016, au fost reciclate 5.5 milioane de vehicule într-o industrie de £10.8 miliarde. Doar în China, la nivelul anului 2015 s-au vândut 17 milioane de autoturisme, când deja existau în circulație peste 154 milioane de mașini.



# CLASIFICAREA MATERIALELOR



Tabel 1. Caracteristici și aplicații ale unor clase de materiale.

Clasa de materiale	Exemple și Aplicații	Proprietăți generale
<b>Metale și Aliaje</b> Cupru Fonte cenușii Oțeluri aliate	Conductori electrici Blocuri motoare, batiuri Caroserii autoturisme, organe mașini	Conductivitate termică și electrică foarte bună Turnabilitate, prelucrabilitate, amortizare vibrații Rezistență mecanică mare, duritate, trat. termice
<b>Ceramide și sticle</b> $\text{SiO}_2$ , $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{CaO}$ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{MgO}$ , $\text{SiO}_2$ $\text{SiO}_2$ Carburi, nitruri	Sticlă, geamuri, construcții Materiale refractare, elaborare materiale Fibre optice, Tehnologia informațională Scule așchietoare, durificare materiale	Transparente optic, izolație termică și fonică Izolație termică, caracter relativ inert față de topituri Pierderi optice minime, index refracție Duritate mare, rezistență la uzare, stabilitate termică
<b>Polimeri</b> Polietilenă Epoxi Kevlar	Ambalaje alimentare, instalații Încapsularea circuitelor electronice Vestе militare, elemente caroserie auto	Ușor formabilă, flexibilă Izolator electric, rezistent la umezeală, vibrații Material ultrarezistent, în anumite condiții ignifug
<b>Semiconductori</b> Ga, As Si	Materiale optoelectronice Tranzistori, circuite integrate	Intermediare între metale și nemetale Convertesc lumină în semnale electrice Conductivitate electrică controlată, dopaj
<b>Compozite</b> Grafit-Epoxy WC-Co Oțel placat cu Ti	Piese în industria aerospațială Scule așchietoare performante Vase de reacție. Industria chimică	Raport foarte bun rezistență mecanică/greutate Duritate foarte mare, rezistență la uzură și șoc Rezistență mecanică și termică, la coroziune

## MATERIALELE METALICE. ALIAJE

În prezent se cunosc 95 de metale conform tabelului periodic lui Mendeleev. Acestea sunt clasificate în alte grupe, respectiv metale alcaline, pământuri rare sau lantanide (17 elemente: Scandiu, Ytriu, Lantan, Ceriu, Praseodim, Neodim, Prometiū, Samariu, Europiu, Gadolinu, Terbiu, Disprosiu, Holmiu, Erbiu, Tului, Yterbiu, Lutețiu), metalele din grupele de tranziție, actinidele un grup de 15 elemente metalice radioactive, de la Actiniu (Z= 89), până la Lawrenciu (Z=103), Fig. 16.

**Periodic table of the elements**

Legend:

- alkali metals
- alkaline earth metals
- transition metals
- other metals
- other nonmetals
- halogens
- noble gases
- rare earth elements (21, 39, 57–71) lanthanide elements (57–71 only)
- actinide elements

\* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).  
 \*\* Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.  
 \*\*\* Discoveries of elements 112–116 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

Fig. 16 Metalele din tabelului periodic al lui Mendeleev.

Metalele prezintă luciu metalic și un caracter electropozitiv, adică cedează ușor electroni și au niveluri energetice comune între banda de conducție și cea de valență. Au bune proprietăți de conductivitate electrică și termică, rezistivitatea electrică crește cu temperatura, în industrie se folosesc mai rar ca și metale pure și mult mai frecvent sub formă de **aliaje** (conțin și alte elemente de tip metalic).

În general, metalele au rezistență mecanică bună, rigiditate/elasticitate, capacitate de deformare plastică și rezistență la impact, ceea ce le recomandă în aplicații structurale (capacitate de preluare sarcini mecanice, ex. clădiri, poduri, mijloace de transport și de ridicat, echipamente industriale etc.) [\[video\]](#).

Adesea, în aceste aplicații combinația dintre rezistență, rigiditate și tenacitate este necesară pentru diferite condiții de sarcină și de temperatură. Materialele metalice sunt de obicei corpuri cristaline. La nivel de monocristal ele prezintă anizotropie (valorile proprietăților sunt diferite în funcție de direcția de măsurare), dar uzual aceste materiale sunt policristaline, caracterul proprietăților acestora fiind cvasi-izotrop.





Fig. 17 Structură metalică de rezistență după prăbușirea turnurilor gemene, 11 sept. 2001.



Fig. 18 Navă maritimă tip vas cargo ce a suferit o rupere catastrofală ca urmare a modificărilor proprietăților de material în urma proceselor de sudare [\[video\]](#).





Hotel Olympia (S 355) and Mapfre Tower (HISTAR<sup>®</sup>460) in Barcelona, Spain

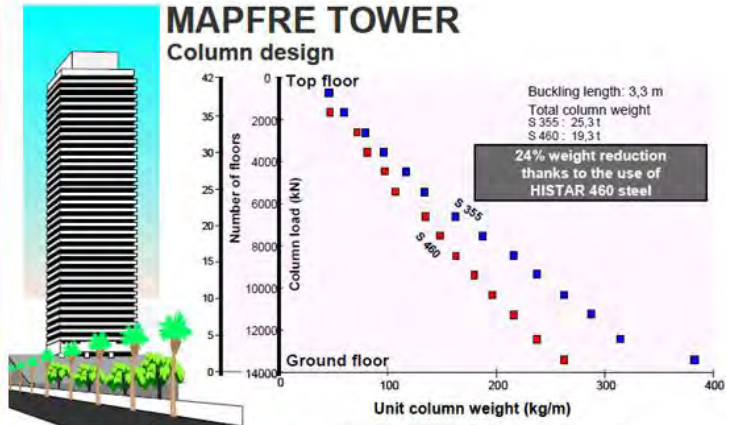


Figure 26: Column weight comparison of S355 to HISTAR<sup>®</sup>460 for the Mapfre Tower

While the structural steel construction of the first erected building is fabricated based on S 355 steel grade, the later erected second building is made of HISTAR<sup>®</sup>460. The result is significant: For the highest loaded columns in the lower part of the building, the column weight of the HISTAR<sup>®</sup>460 columns is reduced by 28% compared to those of S 355.

**THE RIGHT CHOICE OF STEEL**  
- according to the Eurocode -

Oliver Hechler<sup>1</sup>, Georges Axmann<sup>2</sup> and Boris Donnay<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ArcelorMittal, Commercial Sections, Technical Advisory, Luxembourg

<sup>2</sup> ArcelorMittal Esch, Research and Development, Structural Long Products, Luxembourg

Fig. 19 Oțeluri structurale pentru construcții de clădiri, poduri, construcții industriale.



Fig. 20 [Tunul Scherer Gustav](#) (Heavy Gustav lb.eng.)



Tunurile Gustav, construite de Germania în cel de-al doilea război mondial, cântăreau 1.350 tone și puteau trage cu proiectile de 7 tone pe o rază de 37 km, Fig. 20. Ele au fost concepute pentru a străpunge [Linia Maginot](#), de rezistență franceză. Au fost folosite ulterior la asediul Sevastopolului pe durata [operațiunii Barbarossa](#). Au fost mutate la Leningrad, unde au fost capturate de trupele US și distruse, pentru ca să nu poată fi recuperate de forțele rusești (aliate în acel moment istoric).



Fig. 20 Tunul Tsar, Kremlin – Moscova. Președintele Obama și Dmitry Medvedev [[Photo credit SAUL LOEB](#)].

În decursul istoriei, metalele și aliajele, inițial bronzul, au fost folosite în scop militar. Tsarul Rusiei, a ordonat realizarea unui tun gigant de bronz în anul 1586. Țeava tunului cântărește 40 de tone și a fost conceput pentru apărarea Kremlinului, dar nu a fost folosit niciodată.

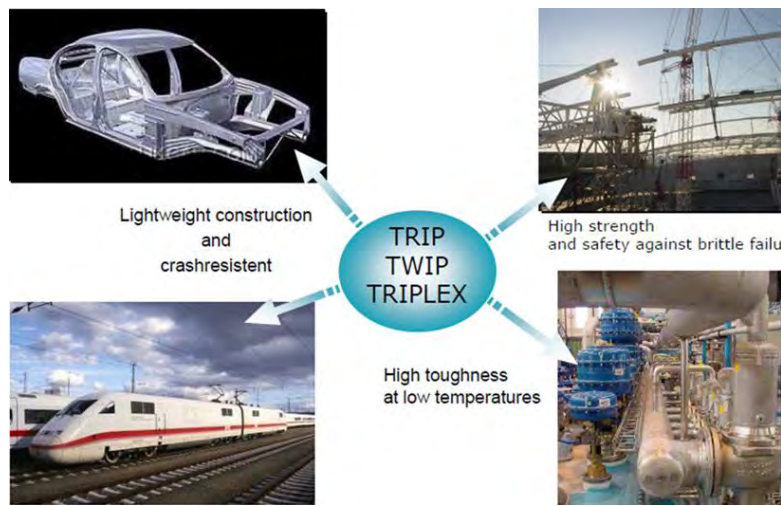


Fig. 21 Aplicații ale oțelurilor de înaltă rezistență [14].

## MATERIALE CERAMICE

Materialele ceramice sunt compuși chimici anorganici dintre elemente metalice și nemetalice (sunt incluse în această clasă de materiale: boruri, oxizii, nitruirile și carburile).

Materialele ceramice conțin elemente metalice combinate cu elemente puternic nemetalice (O, Cl, F, ...), au foarte bune caracteristici de izolatori electrici și termici, sunt rezistente la temperaturi înalte, fapt ce le recomandă la construcția scuturilor termice în industria aerospațială.

Navetele spațiale pe durata coborârii în atmosfera superioară a pământului, ating viteze foarte mari de cca. 20 Mach. Frecarea dintre moleculele de gaz rarefiat cu suprafețele de atac ale aeronavei, generează căldură și temperaturi ce ating 1600°C.

La aceste valori foarte înalte ale temperaturii, structura aeronavei s-ar topi în decurs de câteva secunde de la intrarea în atmosferă a navei, motiv pentru care aceasta este placată cu plăcuțe speciale de natură ceramică (material compozit cu matrice ceramică și fibre de SiO<sub>2</sub>), Fig. 22 [video].

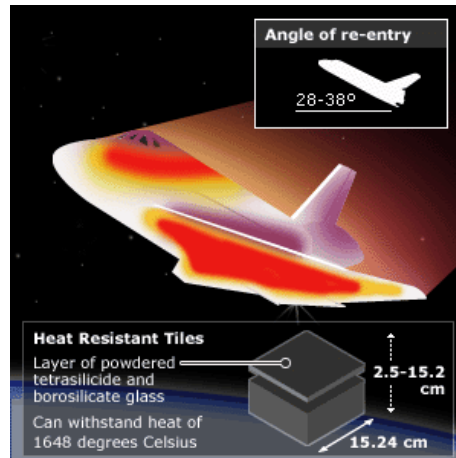


Fig. 22 Scutul termic al navetelor spațiale [NASA eClips youtube].



Fig. 23 Aplicații ale materialelor ceramice de înaltă performanță [photo credit NASA].

Materialele ceramice pot fi clasificate în ceramice **clasice** (porțelan, faianța, lut, ...), **tehnice** (alumina, zircona, TiN, folosite ca și bariere termice sub formă de straturi depuse pe aliaje metalice pentru protecție termică la turbine, motoare rachetă sau avioane militare), ceramice **amorfe** – sticle și ceramice **crystaline**.



Aplicații ale materialelor ceramice includ diverse componente pentru industria automotive: corpul bujiilor de la motoarele termice, actuatori, componente din catalizator pentru filtrarea particulelor și emisiilor de gaze la autoturisme, materiale refractare pentru cuptoare destinate tratamentelor termice, cuptoare de sinterizare, materiale izolatoare în industria electrotehnică etc.

Materialele ceramice posedă o foarte bună rezistență la compresiune, în Fig. 24 – este prezentat un SUV care este susținut de doar 4 cești de cafea. Materialele ceramice sunt dure, dar și fragile, fără capacitate de deformare plastică. Ruperea materialelor ceramice este de tip fragilă, cu consum minim de energie.



Fig. 24 SUV susținut de 4 cești de cafea [\[movie\]](#).

Materialele ceramice amorfe, ex. sticlele metalice se obțin uzual dintr-o topitură metalică răcită cu viteze foarte mari. Termenul de amorf se referă la materiale la care atomii nu sunt aranjați după un sistem ordonat, cum este cazul materialelor cristaline. Sticlele pot fi tratate termic<sup>2</sup>, devin mai rezistente și crește securitatea utilizării acestora [\[movie Tesla Armor Glass\]](#). Studiu de caz: [Aplicații în automotive](#).

Zerodur™ este un exemplu de sticlă ceramică care este utilizată pentru stratul reflectorizant în cazul telescoapelor de mari dimensiuni (ex. telescopul Chandra, Hubble), Fig. 25. Sticlele și sticla-ceramică sunt procesate uzual prin topire și turnare.



Fig.25 [Oglindă diametru 8.2 m. Material Zerodur](#). Își păstrează caracteristicile dimensionale la variații de temperatură necesare pentru calitatea imaginilor.

<sup>2</sup> Tempered glass (lb.eng.)

## MATERIALE SEMICONDUCTOARE

Industria electronică și epoca informațională au transformat fundamental evoluția tehnologică și științifică a societății. Apariția calculatorului și mai târziu a inteligenței artificiale, a revoluționat modul cum omul interacționează (prin rețele sociale, platforme profesionale, recunoașterea textului, a vorbirii și a imaginilor, recunoașterea facială, deep fake tehnology, multiversul social și foarte probabil urmează și alte forme de interacțiune și comunicare). De la calculul numeric, rezolvarea ecuațiilor diferențiale neliniare, la algoritmi de [machine learning](#) care stau la baza inteligenței artificiale, omnia a făcut un salt uriaș de cunoaștere privind posibilitatea modificării realității înconjurătoare.

Toate acestea au fost posibile datorită materialelor semiconductoare. Siliciul, germaniul și semiconductorii Ga-As stau la baza obținerii componentelor electronice folosite în electronică: televizoare, telefoane, laptopuri, [IoT](#) (internet of things), senzori, sisteme de ghidaj avioane de linie și tehnică militară, rachete, navete spațiale, comunicații, roboți industriali și mai recent, roboți sociali și utilitari (de ordine și militari).

Datorită creșterii exponențiale a puterii de calcul, acum se pot lansa misiuni spațiale complexe, s-au realizat roboți autonomi care iau singuri decizii în timp real, vehicule care se conduc singure, recunosc participanții la trafic, recunosc obiecte statice și în mișcare, au un management optimizat al consumului de energie și de resurse etc. Nu în ultimul rând, s-a reușit explorarea și înțelegerea universului, a unor fenomene distante și a unor procese care au loc în miliarde de ani, s-au făcut și se fac în continuare o serie de simulări, modelări care ne ajută să înțelegem fenomene extrem de complexe la o scară greu imaginabilă (de timp, de energie sau distanță). Material video recomandat: [How are microchips made?](#)

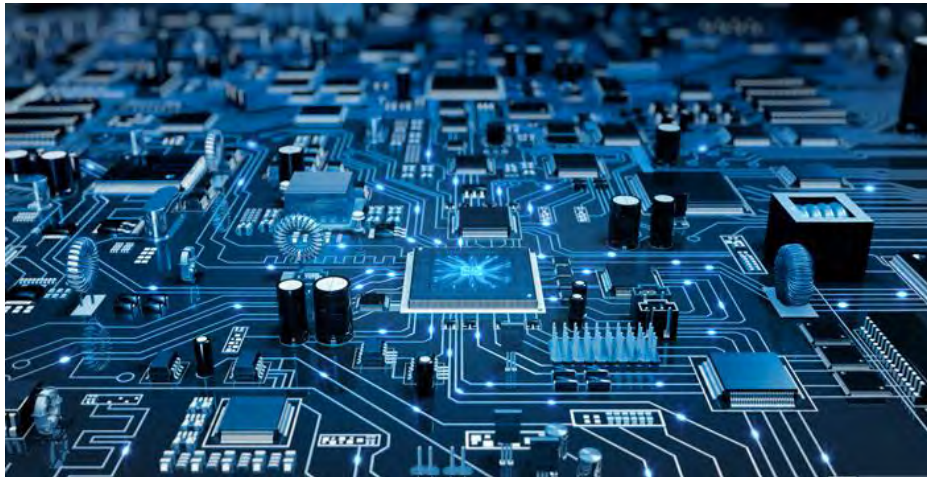


Fig.26 Componente electronice realizate din materiale semiconductoare. Chip-ul este sistemul de comandă și control al oricărui device electronic (procesare semnale electrice, optice, audio, olfactive sau tactile) prin utilizarea [IoT](#).

Conductivitatea electrică a materialelor semiconductoare este situată între cea a materialelor metalice și a celor ceramice, izolatoare. Tranzistorii, diodele și alte componente electronice se comportă ca niște switch-uri (întrerupătoare), care permit sau opresc trecerea curentului prin circuitele integrate. Acestea conțin la ora actuală miliarde de tranzistori dispuși pe un cm pătrat, [Legea lui Moore](#), Fig. 29. Proprietățile electrice ale materialelor semiconductoare sunt puternic dependente de prezența unor mici cantități de impurități.



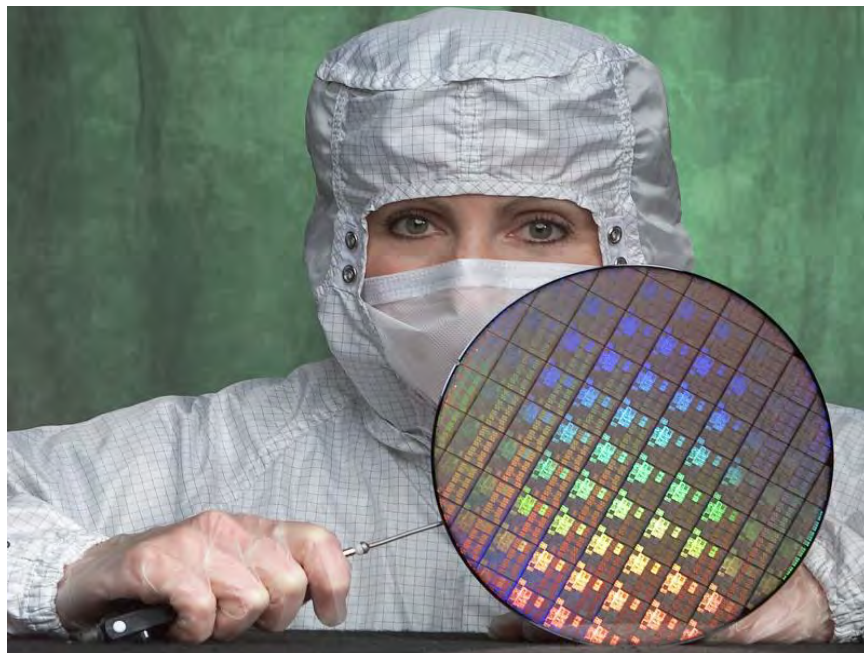


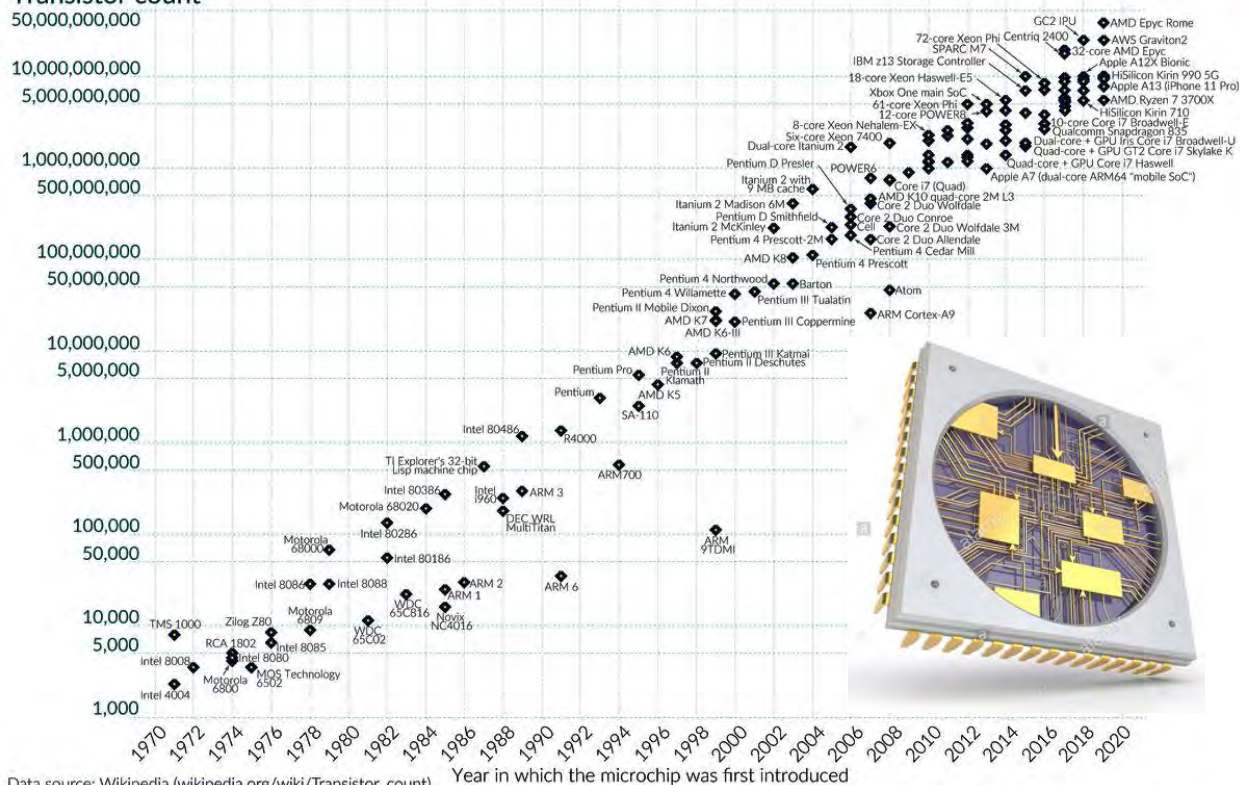
Fig. 28 Wafe de Siliciu pentru obținerea chip-urilor.

### Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years



Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

#### Transistor count



Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor\_count) Year in which the microchip was first introduced  
 OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems. Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Fig. 29 Legea lui Moore (1965). Numărul de tranzistori din microchip-uri se dublează la fiecare doi ani [3].

Conform unui [articol](#) publicat [4] de Ann Kelleher, INTEL Executive Vice President, reiasă faptul că evoluția prognozată pentru viitor în domeniul informațional este absolut spectaculoasă, cantitatea de date ce trebuie procesată zilnic în prezent este de 270.000 petabytes ( $27 \times 10^{19}$  bytes), aflată într-o creștere exponențială, ceea ce va susține în continuare creșterea cererii pentru puterea de calcul (creșterea densității de tranzistori pe cm pătrat, Legea lui Moore).

“Intel CEO Pat Gelsinger has shared: “Technology has never been more important for humanity than it is now. Everything is becoming digital, with four key superpowers.” The superpowers – ubiquitous computing, cloud-to-edge infrastructure, pervasive connectivity and artificial intelligence – are set to transcend and transform the world. At this time we see no end to the demand for compute, and more compute continues to push the industry for more innovation. For example, the world creates nearly 270,000 petabytes (i.e.  $27 \times 10^{19}$ ) of data every day<sup>2</sup>. We are projecting that by the end of this decade, on average, all of us will have 1 petaflop ( $10^{15}$  floating-point operations per second) of compute and 1 petabyte of data less than 1 millisecond away<sup>3</sup>. This demand for more and more computing power is the push for the industry to maintain the pace of Moore’s Law.”

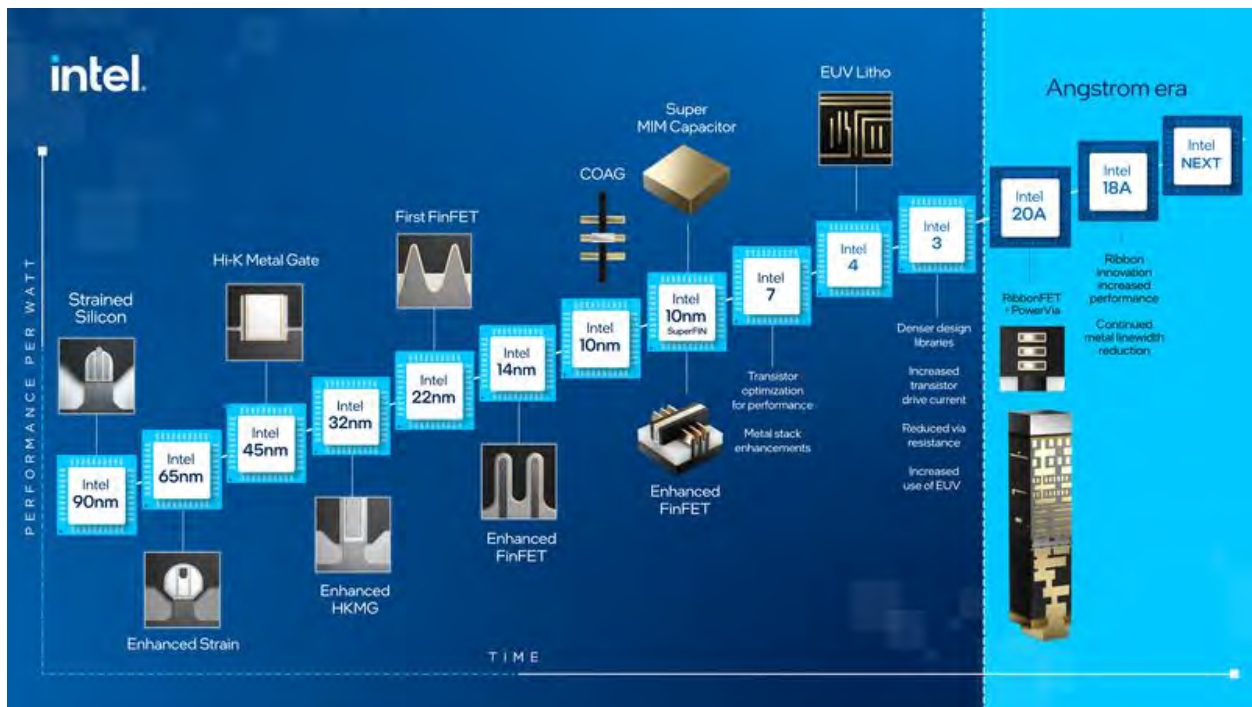
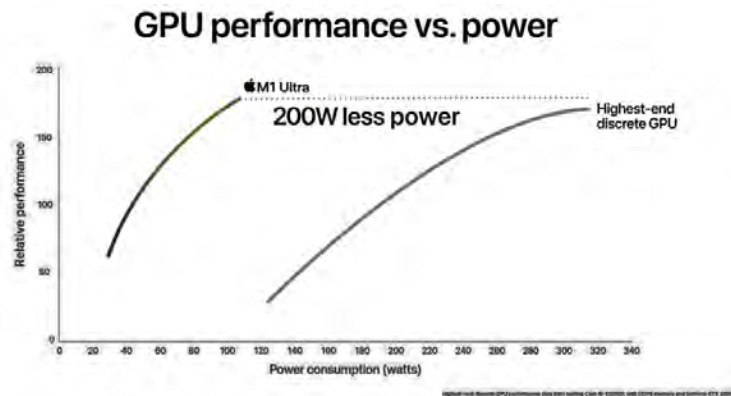


Fig. 30 Prognoza pentru Legea lui Moore. Arhitecturi pe verticală a semiconductorilor. Era Angstrom [4].

În prezent, în telefoanele Apple iPhone 12, microchip-ul este pe tehnologie de 5 nm (2022) [5]. Tehnologie de 5 nm, înseamnă că mărimea tranzistorilor s-a redus a.î. întrerupătoarele on-off au acum o lățime de doar 25 de atomi, ceea ce permite creșterea numărului de tranzistori pe unitatea de suprafață și implicit creșterea puterii de calcul, Fig. 31 [5].





Nu în ultimul rând, reducerea dimensiunii tranzistorilor implică o scădere a energiei consumate, în noua tehnologie pe 5 nm (171 de milioane de tranzistori pe fiecare mm<sup>2</sup>) chip-ul își mărește viteza de calcul cu 15% față de generația anterioară de chip-uri pe 7 nm, la același consum de energie, Fig. 31 [5].

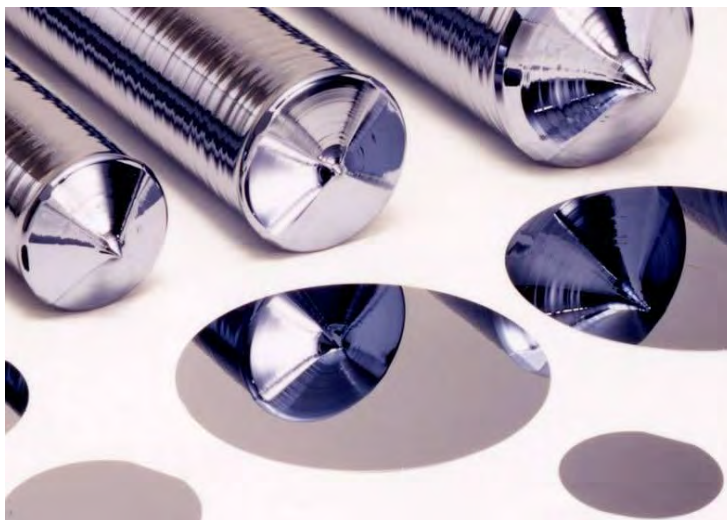


Fig. 32 Cristale de Siliciu pentru confecționarea wafelilor pentru microchip-uri [5].

Wafele de Siliciu (Fig. 28) sunt discuri cu grosime de cca. 1 mm, tăiate cu precizie dintr-un cristal de înaltă puritate de Si, Fig. 32. Suprafața discului este lustruită cu mare precizie, curățată și pe urmă cu ajutorul litografiei optice de înaltă precizie cu laser, se obține arhitectura tranzistorilor pe suprafața wafei de Si.

## MATERIALE POLIMERICE

Polimerii sunt materiale organice macromoleculare constituite din lanțuri lungi de atomi de C + H, O, N. Structura macromoleculară este obținută prin repetarea unor unități structurale denumite monomeri, conectați prin legături covalente.

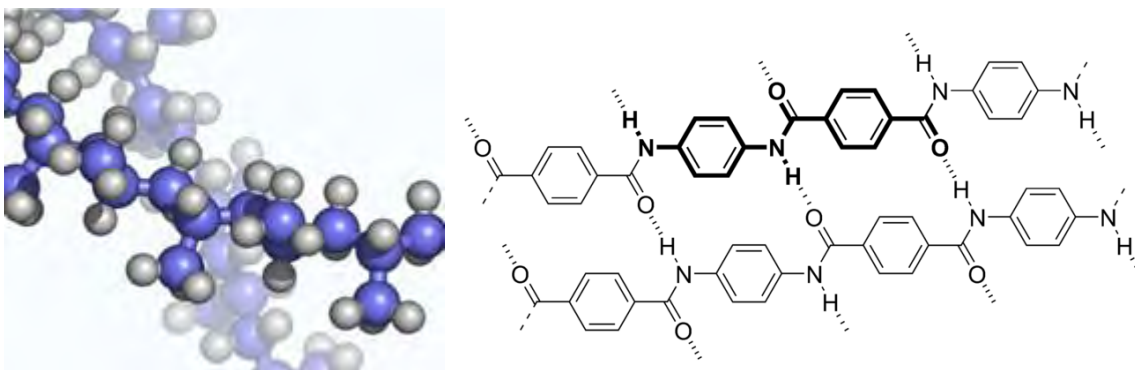


Fig. 33 Polimerii. Structuri macromoleculare de monomeri.

În general, materialele polimerice au densitate relativ mică, nu sunt stabile la temperaturi ridicate, în funcție de comportamentul la încălzire polimerii se clasifică în **polimeri termoplastici** care se înmoaie sau se lichefiază reversibil la cald și **polimeri termoreactivi** care se înmoaie la cald și se întăresc ireversibil cu formare de structuri reticulate.

În funcție de proveniența lor, polimerii se clasifică în:

- **Polimeri naturali** (proteine, acizi nucleici, polizaharide, polihidrocarburi). Acești polimeri au fost sintetizați de către organisme vii, plante, animale, etc., iar omul le utilizează fără a schimba compoziția lor chimică;
- **Polimeri artificiali**, obținuți prin modificarea celor naturali (vâscoză, celofan). La polimerii naturali au loc o serie de modificări, scheletul polimerului (atomii de carbon) rămâne neschimbat, la care se adaugă anumiți radicali, sau grupe funcționale;
- **Polimeri sintetici** obținuți prin reacții chimice, pornind de la monomeri. Se obțin pe cale sintetică din monomeri, prin reacții de polimerizare sau policondensare.

În funcție de **energia de coeziune** care leagă lanțurile macromoleculare între ele, clasificarea polimerilor se poate face în:

- elastomeri sau cauciucuri ( $1-2 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ );
- materiale plastice ( $2 - 5 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ );
- fibre cu structuri orientate paralel (energie de coeziune specifică peste  $5 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

În funcție de **forma geometrică a monomerilor**, avem o clasificare a materialelor polimerice în:

- lanțuri liniare;
- lanțuri ramificate, cu ramificații scurte sau lungi;
- macromolecule cu structură bidimensională, stratificată;
- macromolecule cu structură tridimensională numită reticulată.

Exemple de materiale polimerice sunt polietilena (LDPE), nylon, policlorura de vinil (PVC), policarbonatul (PC), polistirenul (PS), cauciucul siliconat etc. Fiecare dintre aceste materiale polimerice, conțin subclase cu anumite proprietăți specifice: ex. polietilena de înaltă densitate (PEHD), polietilena reticulată, polistiren expandat de înaltă densitate (HD-EPS), polistiren extrudat (XPS) etc.

Valorile de rezistență mecanică, rigiditate sunt relativ modeste, dar raportat la greutate sunt comparabile cu cele ale materialelor metalice sau ceramice. Au o capacitate ridicată de formare, au ductilitate foarte bună, se pot obține forme foarte complexe cu pereți subțiri. Au conductivitate electrică scăzută, sunt paramagnetici și se descopun relativ ușor odată cu creșterea temperaturii.

Industria modernă a materialelor polimerice a fost inițiată de Wallace Carothers de la firma DuPont (SUA) în anii 1930, ca efect al crizei mătasei naturale. S-a căutat un material înlocuitor pentru mătase, atât pentru obiecte vestimentare, cât și pentru materialele folosite la parașute. Nylon-ul a fost prima fibră artificial creată în acest scop. Ulterior, în cel de-al doilea război mondial s-au căutat materiale înlocuitoare pentru cauciucul natural folosit la realizarea anvelopelor.



Fig. 34 Kevlar

Cercetările care au urmat au dus la inventarea kevlar-ului (Fig. 34) un material cu proprietăți de rezistență deosebite, fiind folosit pentru căști de protecție, vestă antiglonț sau chiar pentru construcția caroseriilor performante de mașini de curse, electrice, Fig. 35 etc.



Fig.35 Elemente de caroserie realizate din kevlar. Se mai pot obține curele de transmisie, componente sistem de frânare, anvelope performante, [Automotive Materials with Kevlar® \(dupont.com\)](http://Automotive Materials with Kevlar® (dupont.com))

Industria materialelor polimerice a crescut extraordinar în ultimele decenii, conform unor studii [7], în prezent a depășit industria extractivă a cuprului, oțelului, aluminiului și a altor metale combinate. Mai jos, sunt prezentate câteva date statistice din literatura de specialitate, Fig. 36, Fig. 37 [6].

### World production of plastics

In 2015, around 322 million tons of plastic were produced worldwide.

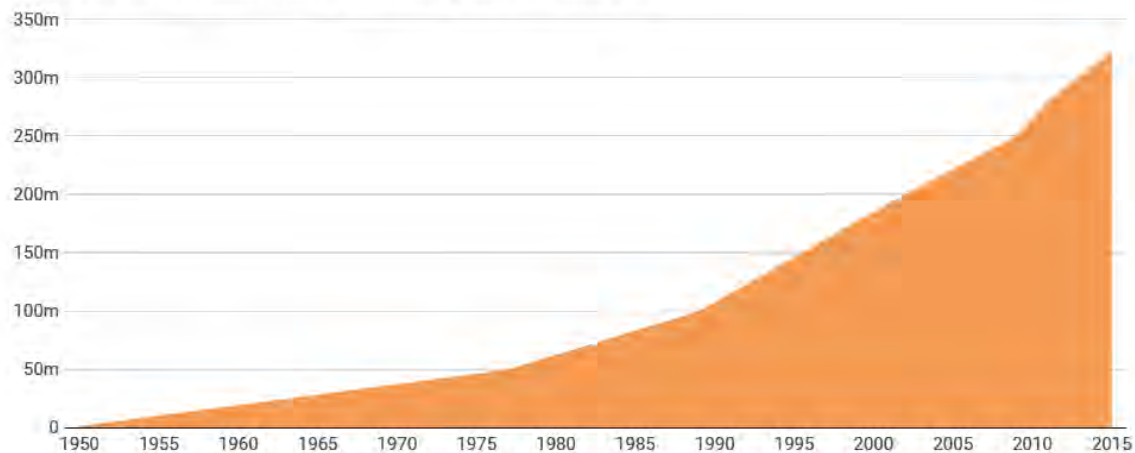


Chart: The Conversation, CC-BY-ND • Source: Plastics Europe • [Get the data](#)

Fig. 36 Producția de polimeri la nivel mondial [6].

## Plastic around the globe

The term "plastic" covers many different types of polymers, each produced in many millions of tons in 2015.

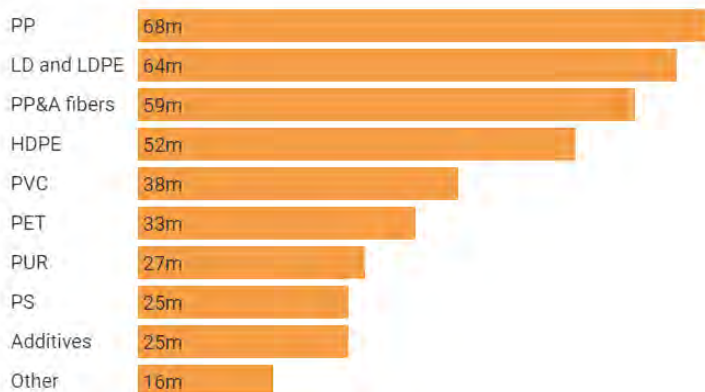


Chart: The Conversation, CC-BY-ND • Source: [Science Advances \(2017\)](#) • [Get the data](#)

Fig. 37 Aplicații ale materialelor polimerice, anul 2015 [6].

Industria automotive folosește polimerii termoplaști pentru a reduce greutatea proprie a autoturismelor, în vederea reducerii consumului de combustibil și pentru a se încadra în standardele de eficiență și emisii de gaze stabilite de Comisia UE. La ora actuală, cca. 16% din greutatea unei mașini din UE este deținută de materiale polimerice.



Fig. 38 Insulă artificială de deșuri din materiale plastice în Oceanul Pacific.

Ocupă o suprafață mai mare decât cea a Franței, Germaniei și Spaniei combinate împreună [['Great Pacific Garbage Patch' Threat To Marine Life - YouTube](#)].



Tot la capitolul economie circulară, industria textilă contribuie cu o pondere importantă la generarea de deșeuri care nu se reciclează. Cetățeanul american de condiție socială medie generează deșeuri vestimentare de peste 40 kg/an. Conform studiilor Greenpeace, în anul 2016 în USA s-au cumpărat în medie cu cca. 60% mai multă îmbrăcăminte decât a făcut-o aceeași persoană în urmă cu 15 ani, iar durata de utilizare a hainelor s-a redus considerabil.

Aceste atitudini și comportamente ale omului modern, generează probleme de mediu extrem de severe, amenințând viața și existența a unor ecosisteme care au supraviețuit zeci de milioane de ani.

## MATERIALE COMPOZITE

Materialul compozit este compus din mai multe tipuri de materiale din clasa materialelor metalice, ceramice și polimerice. Materialele compozite au fost dezvoltate pentru a conferi acestora proprietăți combinate rezultate din diferite proprietăți specifice ale materialelor componente, care nu pot fi regăsite într-un singur tip de material. Ele prezintă o **matrice** de tip polimeric, metalic sau ceramic, care reprezintă elementul de bază în care este dispersat un **constituent de armare** sub formă de fibre, țesătură sau particule. O categorie de materiale compozite sunt materialele stratificate, realizate din straturi de materiale diferite, îmbinate solidar și care se comportă ca un material unitar.

Betonul, panourile de OSB, placajul TEGO folosit în construcții, fibra de sticlă sunt exemple de materiale compozite. Prin dispersia fibrelor de sticlă într-o matrice polimerică (rășini ce se întăresc, epoxy) se pot obține elemente de caroserie auto, componente de fuselaj în industria aeronautică sau componente ale vagoanelor pentru trenurile de mare viteză, Fig. 39.

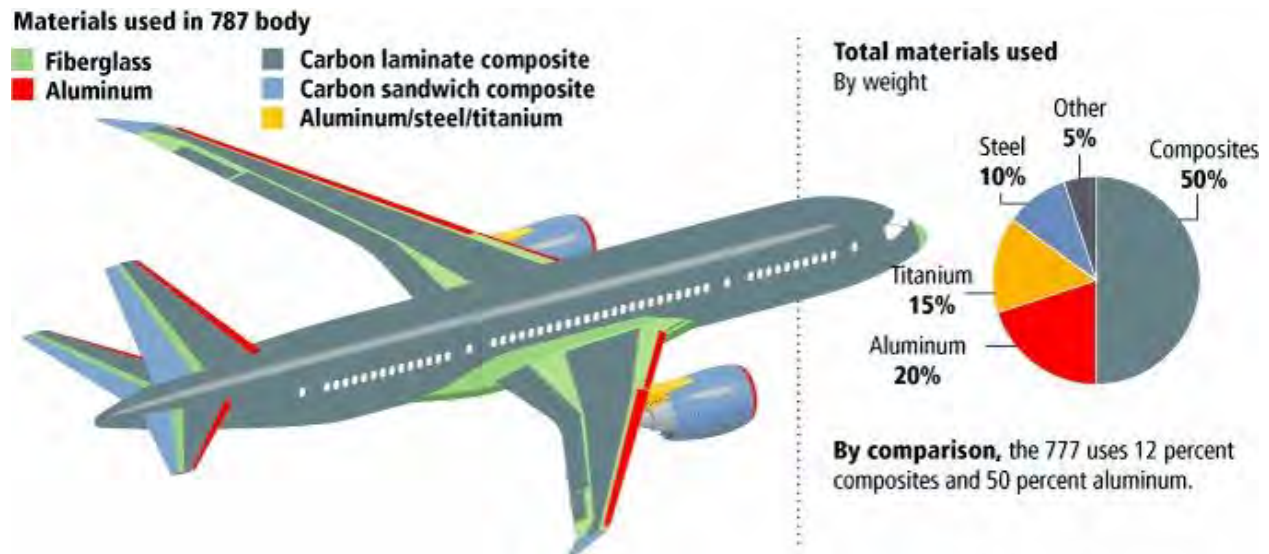


Fig. 39 Materiale compozite folosite în industria aeronautică [Appropedia].

Fibra de sticlă conferă rigiditate și rezistență mecanică materialelor compozite în care se regăsește. În prezent se realizează compozite pe bază de polimeri ranforșați cu fibră de carbon, care sunt utilizați în confecționarea cadrului de biciclete, motociclete, rachete de tenis, mașini sportive, sau elemente de fuselaj în industria aeronautică, Fig.40. Aceste generații noi de materiale compozite sunt mai ușoare și mai rezistente decât cele pe bază de fibră de sticlă.



Fig. 39 Materiale compozite pe bază de polimeri ranforșați cu fibră de carbon, [CFRP](#).

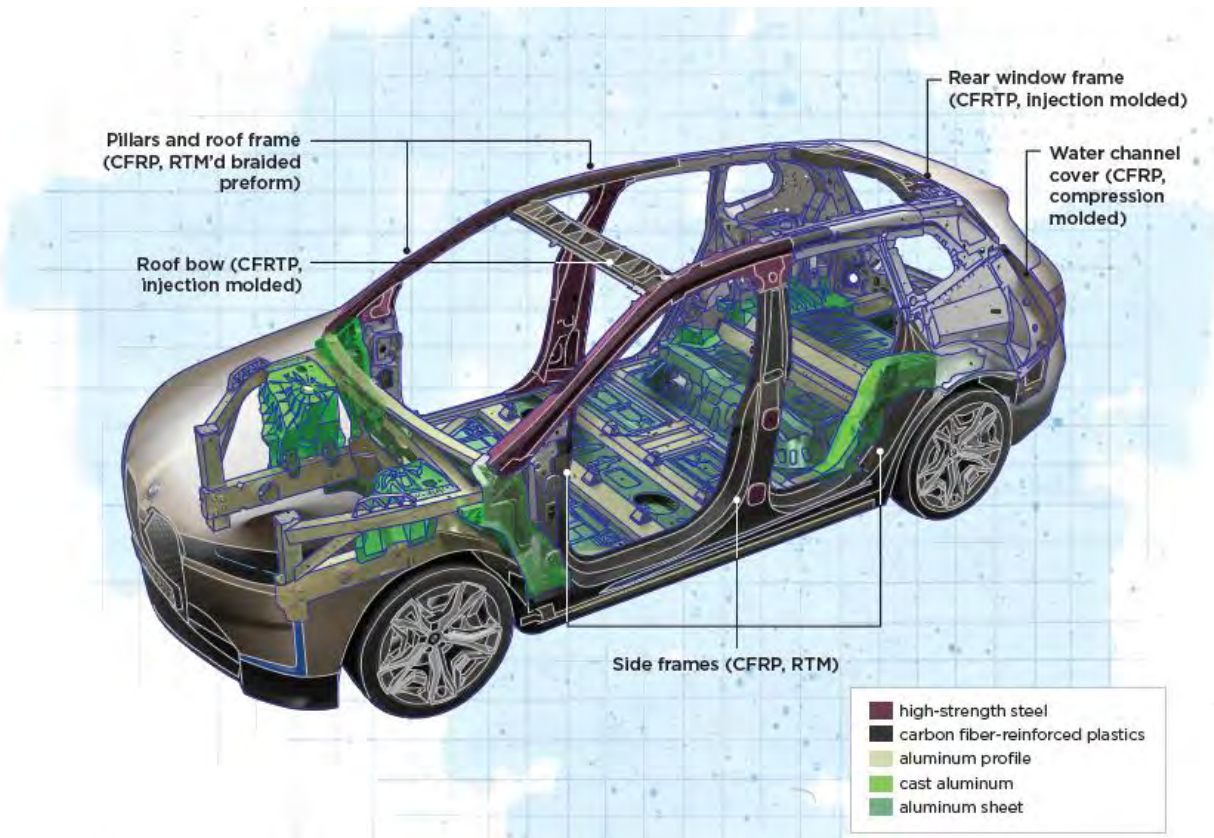


Fig. 40 Materiale compozite pe bază de polimeri ranforșați cu fibră de carbon CFRP, în industria automotive, [BMW iX 2022](#)

**Studiu de caz:** “BMW calls its multi-material concept an “*intelligent lightweight design*.” The vehicle (which comes in at a total curb weight of 5,659 pounds/2,566 kilograms) is similar in size to the BMW X5, but the vehicle body shell is said to be 176 pounds/80 kilograms lighter on the *iX*. The vehicle body comprises carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) interior frame and pillar components inside of a metal spaceframe — an aluminum floor assembly, and steel exterior side frames for extra strength and crash protection. Fitting a CFRP side frame instead of a conventional steel part is said to shave several kilograms off the vehicle’s weight. The overall idea is to “reduce weight while increasing body stiffness,” Koehler says, ultimately pushing the vehicle toward maximum efficiency/range and high crash safety. “Innovative, lightweight design is an essential feature of BMW *i* vehicles,” he notes. “When it’s used in the right places on the body structure, CFRP offers a high degree of functional advantages. With the *iX*, we rely on an intelligent material mix with the right materials in the right place.”



# CURS 2. PROPRIETĂȚILE MATERIALELOR

## PROPRIETĂȚI INTRINSECI

Proprietatea intrinsecă este o caracteristică a unui obiect specificat, care se manifestă independent de condițiile exterioare obiectului (exemplu masa obiectului).

În știința materialelor, o **proprietate intrinsecă** este independentă de cantitatea de material prezentă și este independentă de forma materialului. Proprietățile intrinsece depind în principal de compoziția chimică fundamentală și de structura materialului (ex. structura cristalină a metalelor).

**Proprietățile extrinsece** sunt diferențiate ca fiind dependente de prezența contaminanților chimici evitabili sau a defectelor structurale, a condițiilor de aplicare a sarcinilor, precum viteza de variație a acestora, regimul de temperaturi, vibrații, respectiv alți factori externi.

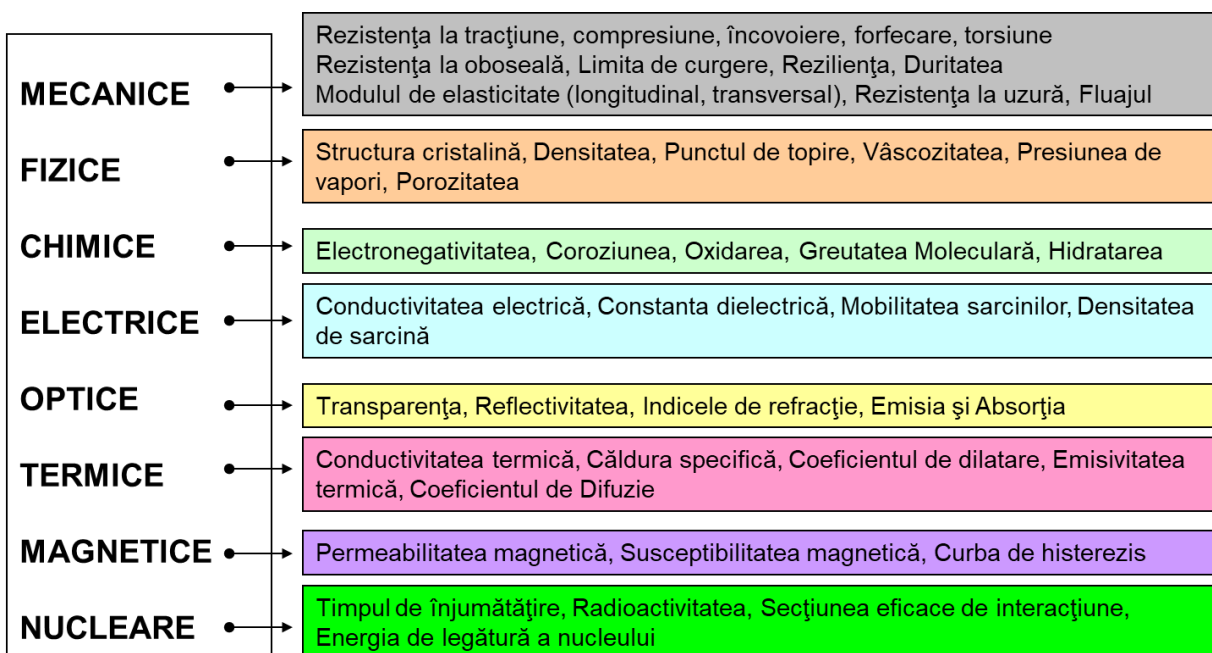


Fig. 41 Proprietăți intrinsece ale materialelor.

Pe baza proprietăților intrinsece ale materialelor, inginerii pot face o serie de calcule de rezistență, de dimensionare sau de modelare a comportării materialelor în diferite scenarii de prelucrare/procesare, de exploatare etc. În literatura de specialitate se găsesc astfel de date pentru parametrii de material, precum coeficienții de dilatare liniară, de conductivitate termică, de difuzie în raport cu temperatura ș.a.m.d.

Este extrem de important înțelegerea acestor caracteristici de material de care depind mai departe procesul de selecție a materialelor pentru o aplicație dată, caracteristicile de prelucrabilitate sau pe scurt proprietățile tehnologice ale materialelor, riscul producerii unor avarii, conform Fig. 42 și Fig. 43.

De exemplu, după sudare, ca urmare a ciclului termic au loc modificări semnificative ale proprietăților de material, aspecte care poate avea o influență decisivă asupra duratei de exploatare, performanței și caracteristicilor de siguranță în exploatare a construcției metalice sudate.



Fig. 42 Platforma [P-36 Petrobas](#) s-a scufundat la data de 15 martie 2001; 11 decese, pierderi financiare estimate la 400 mil. \$ la nivelul anului 2001.

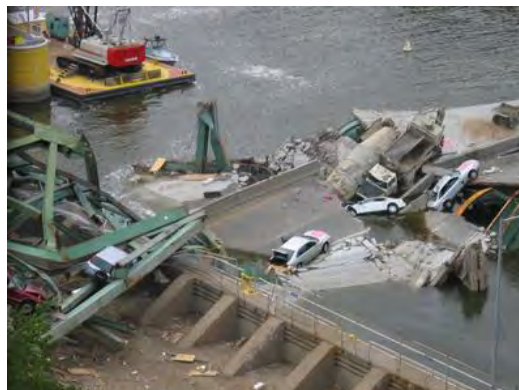


Fig. 43 În anul 2007 s-a prăbușit un [pod în Minneapolis, Minnesota](#); 13 decese; s-au acordat despăgubiri morale în valoare de 52.4 mil. \$.

Studiu de caz (video): [Inside a Catastrophic Minneapolis Bridge Collapse | When Big Things Go Wrong](#)

## PROPRIETĂȚI TEHNOLOGICE

**Proprietățile tehnologice** caracterizează capacitatea de prelucrare și modul de comportare al materialelor metalice la diferite procese tehnologice de prelucrare la cald sau la rece. Cele mai importante proprietăți tehnologice sunt: turnabilitatea, deformabilitatea plastică, forjabilitatea, maleabilitatea, ductilitatea, sudabilitatea, așchiabilitatea, călibilitatea, susceptibilitatea la supraîncălzire, susceptibilitatea la deformare și fisurare.



Fig. 44 Proprietăți tehnologice ale materialelor.

Forjabilitate – aptitudinea aliajelor de a putea fi forjate (liber sau în matriță);  
 Maleabilitate – capacitatea materialelor de a putea fi obținute sub formă de foi (table);  
 Ductilitate – capacitatea materialelor de a putea fi obținute sub formă de fire (trefilare);  
 Călibilitate – capacitatea materialelor de a putea fi tratate termic, controlul durtății;

## STRUCTURA ATOMICĂ A MATERIALELOR

Încă din cele mai îndepărtate timpuri, omul a căutat să înțeleagă fenomenele și obiectele din jurul său. Treptat, prin acumularea de noi informații, prin dezvoltarea gândirii abstracte și prin cercetare științifică, omul a reușit să descifreze mecanisme extrem de complicate care acționează la nivel fundamental, din universul micro, o lume cuantică extrem de bizară, la universul observabil care se extinde la miliarde de ani lumină distanță față de Pământ.

În acest tablou suprarealist pe care-l denumim realitate sau universul înconjurător din care evident facem și noi parte, **materia** joacă un rol cheie pentru descifrarea tainelor universului la un nivel fără precedent în istorie, permițându-ne ca într-o zi să devenim o civilizație de tipul II (care poate capta energia steii din sistemul solar din care face parte) și teoretic, chiar de tipul III (care captează energia din galaxia din care face parte), conform clasificării propuse de astronomul rus Kardashev<sup>3</sup> în anul 1964.

Pentru a formula un scurt parcurs istoric al cunoașterii umane asupra **structurii materiei**, ne putem întoarce în antichitate, când filozofii greci Aristotel și Platon au descris materia ca fiind compusă din patru elemente fundamentale: pământ, foc, aer și apă, Fig. 45.

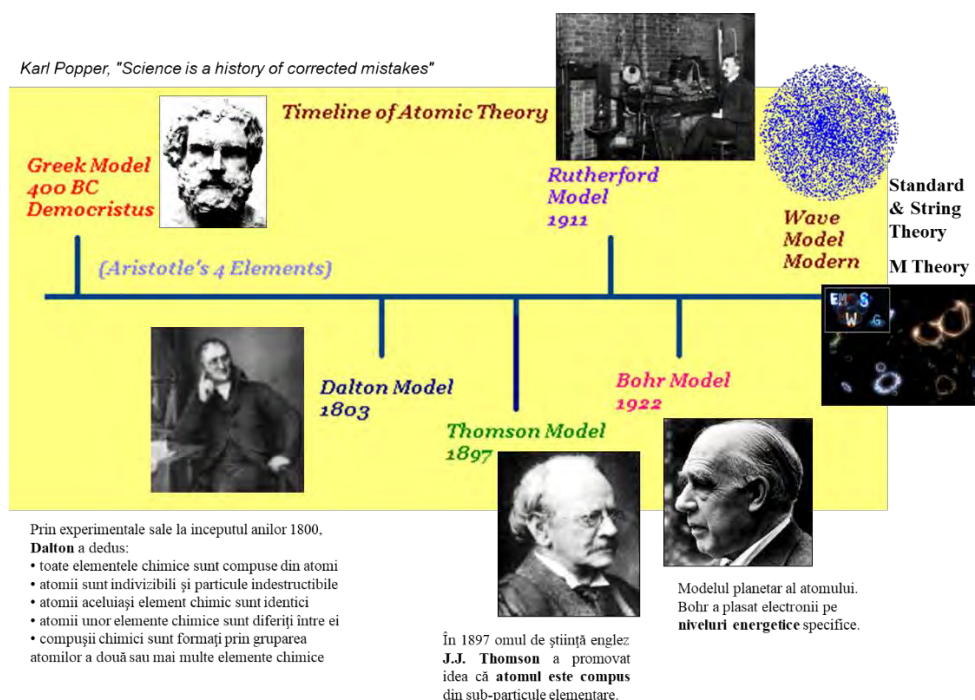


Fig. 45 Repere istorice privind descoperirea structurii atomice a materiei [[video experiment Rutherford](#)].

<sup>3</sup> The Kardashev scale is a method of measuring a civilization's level of technological advancement based on the amount of energy it is able to use. Physicist and futurist [Michio Kaku](#) suggested that, if humans increase their energy consumption at an average rate of 3 percent each year, they may attain Type I status in 100–200 years, Type II status in a few thousand years, and Type III status in 100,000 to a million years.



În prezent, cercetările din domeniu au ajuns la un nivel extrem de avansat, s-au construit acceleratoarele de particule de dimensiuni gigantice unde se studiază interacțiuni și particule fundamentale în ciocniri controlate ale unor particule accelerate la viteze apropiate de cele ale luminii, Fig. 46.



Fig. 46 Vedere detector și acceleratorul de particule [Large Hadron Collider](#), situat la Geneva la granița dintre Franța și Elveția. Cercurile reprezintă tuneluri vidate îngropat la adâncimi de 45-175 m.

Pentru că timpul și volumul limitat de informații din suportul de curs nu ne permite să intrăm în detalii tehnice pentru această realizare absolut remarcabilă, putem concluziona că materia familiară simțurilor noastre de observație se numește **materie barionică**, și reprezintă tot ceea ce putem vedea și interacționa în jurul nostru, inclusiv materialele pe care le studiem în această disciplină. Pentru a trezi curiozitatea dvs. mai putem spune că această materie reprezintă cca. 5% din masa Universului observabil. Restul este o enigmă și va invita să aflați mai multe citind articole de specialitate, precum cele aflate pe site-ul web [Space](#).

Materia barionică este formată din atomi, iar aranjamentul spațial al atomilor și tipul interacțiunilor dintre aceștia (legăturile chimice) determină caracteristicile și proprietățile materialelor solide. În funcție de aceste aranjamente spațiale ale atomilor, materialele pot fi clasificate în 3 grupe mari:

- materiale cristaline
- materiale amorfe
- materiale vitroase.

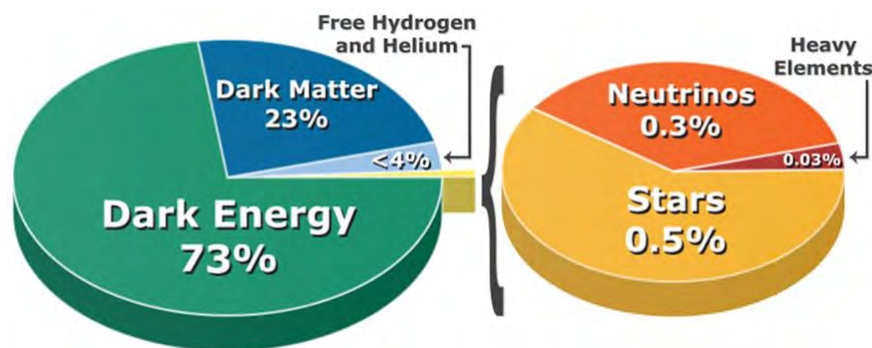


Fig. 47 Structura universului observabil conform observațiilor din prezent [[video Brian Cox](#)].

Masa atomilor este formată peste 99% din masa nucleelor ce conțin protoni și neutroni, care fac parte din familia particulelor subatomice compuse din câte trei cuarci, cunoscute colectiv sub numele de **barioni**, particule grele (relativ la electroni).

Numele "barion", a fost introdus de [Abraham Pais](#) și provine din limba greacă, fiind un cuvânt pentru „greu” (βαρύς, barýs). La momentul numirii lor, cele mai cunoscute particule elementare aveau mase mai mici decât barionii. Fiecărui barion îi corespunde o antiparticulă, un antibarion. De exemplu, un proton este format din doi cuarci Up și unul Down, iar antiparticula sa, denumită antiproton, este alcătuită din doi antiquarkuri Up și un antiquark Down, Fig. 48.

## STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES



Fig. 48 Modelul standard al particulelor atomice elementare.

Cele mai cunoscute particule de tipul barionilor sunt **protonii** și **neutronii**, ambele conțin trei particule quark și din acest motiv mai sunt uneori denumite triquarks. Aceste particule alcătuiesc cea mai mare parte a masei vizibile din univers și concentrează masa în nucleul atomic din fiecare atom. Electronii, cealaltă componentă majoră a atomului, sunt membri ai unei familii diferite de particule numite **leptoni**. Barioni exotici care conține cinci quarcuri, numiți pentaquarks, au fost, de asemenea, descoperite și studiate.

Modelul standard acceptat în fizica particulelor este format dintr-un număr mic de particule fundamentale:

- Quarcuri (6 tipuri: Up, Down, Charm, Strange, Top și Bottom)
- Leptoni (particule similare electronului)
- Bozoni

Există 6 tipuri diferite de leptoni: 3 cu sarcină electrică negativă și 3 tipuri neutri d.p.d.v. electric. Cei mai cunoscuți leptoni încărcăți electric sunt:

- Electronul (e)
- Miuonul (μ)
- Tauonul (τ)

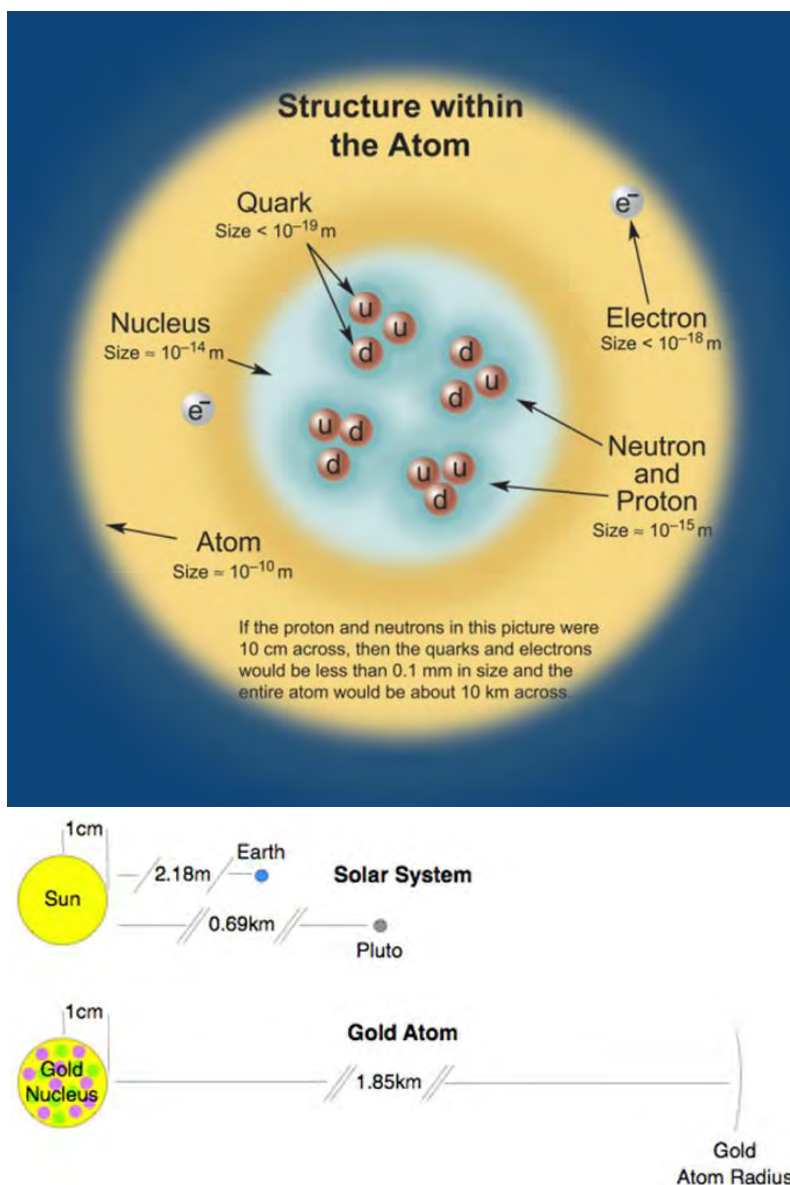


Fig. 49 [Structura și dimensiunilor atomilor](#) prin comparație cu dimensiunile sistemului solar.

Din Fig. 49 se poate observa o paralelă între dimensiunile și distanțele la scara sistemului solar, respectiv la scară atomică. Dacă am micșora virtual soarele la un disc cu raza de 1 cm, Pământul s-ar afla la o distanță de 2.18 m, iar planeta Pluto s-ar afla la o distanță de 0.69 km. Aplicând aceeași idee, de data aceasta am mări virtual nucleul atomului de Aur până la dimensiunea unui disc cu raza de 1 cm, atunci raza atomului de Aur ar atinge impresionanta valoare de 1.85 km. În acest model sau scară virtuală, electronii ar ocupa tot acest spațiu imens cu raza de 1.85 km și ar avea o dimensiune de doar 1  $\mu$ m. Practic nu ar putea fi detectați nici măcar cu ajutorul unui microscop optic, la care rezoluția maximă este de cca. 2-3  $\mu$ m.

#### Lecturi video recomandate:

1. Profesorul Brian Cox explică structura atomică în prelegerea de la postul renumit de televiziune BBC: [A Night With the Stars](#)
2. Theoretical Physics: [Atomic orbitals and periodic table construction](#)
3. [Cathode rays, crookes tubes and the discovery of the electron](#)



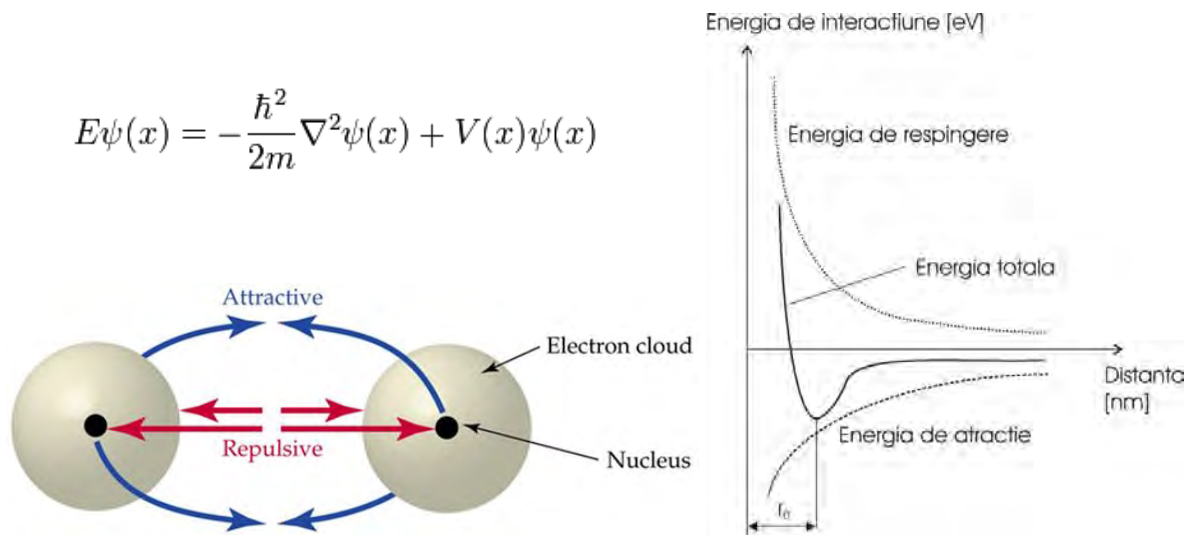


Fig. 50 Interacțiuni dintre atomi. Formarea legăturilor chimice.

În nucleul atomilor se găsesc protonii și neutronii, practic 99% din masa atomului fiind concentrată în nucleu. Protonii au sarcină electrică pozitivă, iar neutronii sunt neutri d.p.d.v. electric. În jurul nucleului, într-un spațiu imens comparativ cu dimensiunile nucleului și ale electronilor, se găsesc zone spațiale populate de electroni denumite **orbitali atomici**, Fig. 51.

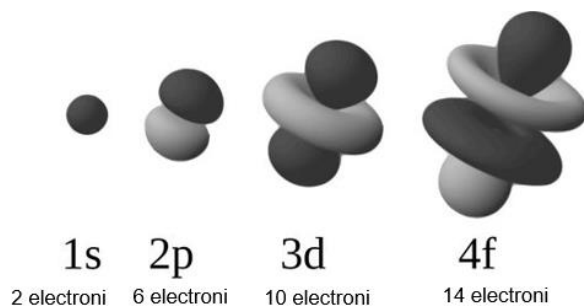


Fig. 51 Orbitali atomici: s, p, d, f și numărul maxim de electroni ce pot ocupa orbitalul respectiv.

Potrivit mecanicii cuantice, electronii nu se deplasează într-un atom pe niște orbite definite ca și planetele în jurul soarelui ([Modelul Bohr](#)), ci în funcție de energia pe care o posedă, aceștia se regăsesc cu o anumită probabilitate într-o zonă spațială specifică (orbitali), care pot găzdui un număr bine determinat de electroni, vezi Fig. 51. Practic, este imposibil determinarea simultană a locației și vitezei de deplasare a unui electron în jurul nucleului atomic ([Principiul de incertitudine al lui Heisenberg](#)).

Locația probabilă a electronului în atom depinde de ce cantitate de energie dispune electronul respectiv. Electronii cu energii joase se regăsesc pe nivele apropiate de nucleu, iar cei cu energii ridicate sunt plasați pe nivele energetice mai îndepărtate de nucleu (există 7 nivele energetice notate cu: K, L, M, N, O, P, Q).

Conform schiței din Fig. 50, între nucleele a doi atomi apropiați se manifestă forțe de respingere, la fel între orbitalii atomici, deoarece au aceeași sarcină electrică, iar între nucleul și orbitalii electronici dintre atomi diferiți se manifestă forțe de atracție. Practic se stabilește un echilibru dinamic de interacțiune dintre atomi și spunem că se formează o legătură chimică între aceștia (există o energie de interacțiune).

Fie că dorim să apropiem mai mult atomii între ei, fie că încercăm să-i separăm, va trebui să introducem energie în sistem, conform diagramei prezentate în Fig. 50.

Energia potențială totală (de atracție și de respingere) este negativă și corespunde stării de echilibru a atomilor în stare legată. Forțele de atracție sunt egale și de semn contrar celor de respingere, energia potențială obținută prin suma dintre energia potențială de atracție și cea de respingere prezintă un minim, care este specific tipurilor de atomi care interacționează (nr. de protoni și electroni, valență).

Electronii manifestă un [comportament dual undă-corpuzcul](#), sub forma unor unde staționare. Energia electronilor este proporțională cu frecvența fundamentală a unei staționare (cea mai joasă), fiind un multiplu al acesteia (unde armonice). Din acest motiv, orbitalii atomici ocupă un spațiu așa de mare, comparativ cu dimensiunea electronilor. Electronii pot efectua salturi energetice între orbitali (după o interacțiune cu un foton - tranziții energetice).

Orbitalul atomic reprezintă zona din jurul nucleului unde electronul are cea mai mare probabilitate de a fi găsit (conform [funcției de undă Schrödinger](#), Fig. 50). Orbitalii sunt clasificați în **s**, **p**, **d** și **f** având forme caracteristice. Fiecărui orbital din atom îi corespunde un set unic de 4 numere cuantice, iar numerele cuantice  $n$  și  $l$  determină configurația electronilor în atom:

1.  $n$  (K, L, M, N, O, P, Q) este nr. cuantic principal,
2.  $l$  tipul orbitalului:  $s(l=0)$ ,  $p(l=1)$ ,  $d(l=2)$ ,  $f(l=3)$ ,
3.  $m$  (moment magnetic orbital),
4.  $s$  spinul electronului. Poate lua valori de  $(+1/2)$  sau  $(-1/2)$ .

## LEGĂTURI CHIMICE (INTERATOMICE)

**Electronegativitatea** = o măsură a aptitudinii de reținere a electronilor proprii și de a capta electroni străini. Determină tipul legăturii între două specii de atomi. Se exprimă prin: **electronegativitatea relativă**  $\chi/\chi_{Li}$

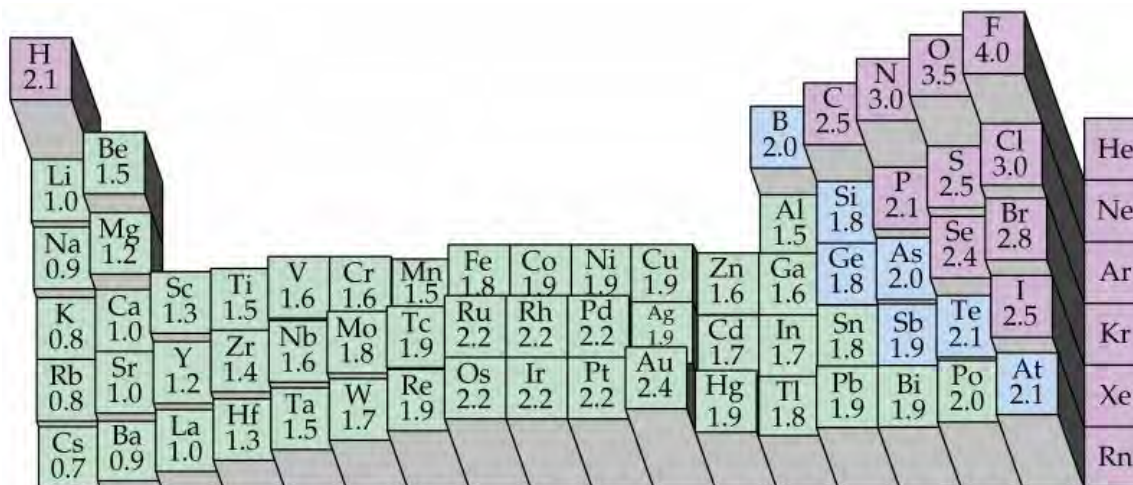


Fig. 52 Electronegativitatea elementelor din tabelul periodic [\[video\]](#).

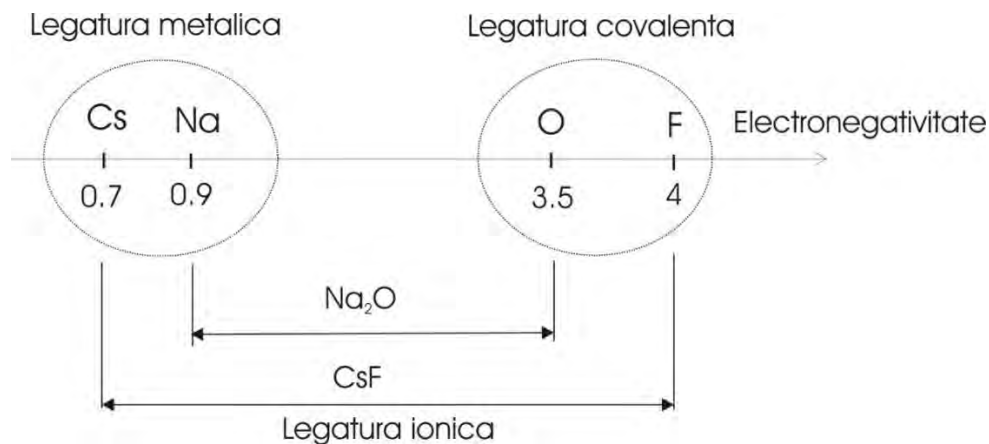


Fig. 53 Clasificarea legăturilor chimice în funcție de electronegativitatea elementelor chimice.

Electronegativitatea este o proprietate de interacțiune dintre doi atomi. Este o mărime adimensională. Metalele cedează electroni (sunt slab electronegative sau electropozitive), iar nemetalele acceptă electroni (sunt puternic electronegative). Atomii cu stratul de valență complet ocupat cu electroni, sunt cei mai stabili.

Din Fig. 53 se poate observa că “legături perfecte” sau legături tari, se obțin numai la extreme: legătura metalică, legătura covalentă și legătura ionică, Fig. 54. Majoritatea legăturilor interatomice sunt hibride, adică predomină un tip de legătură din cele menționate mai devreme (legături tari).

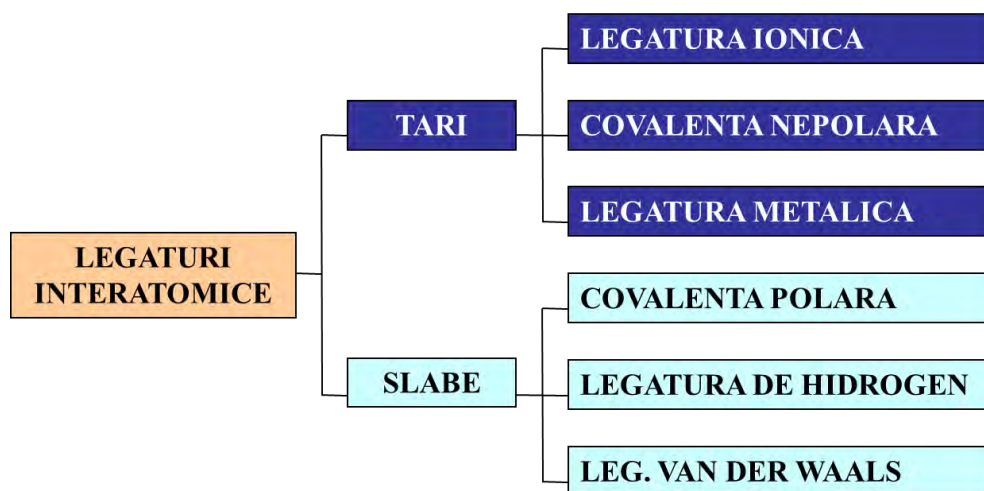


Fig. 54 Clasificarea legăturilor chimice sau interatomice [video].

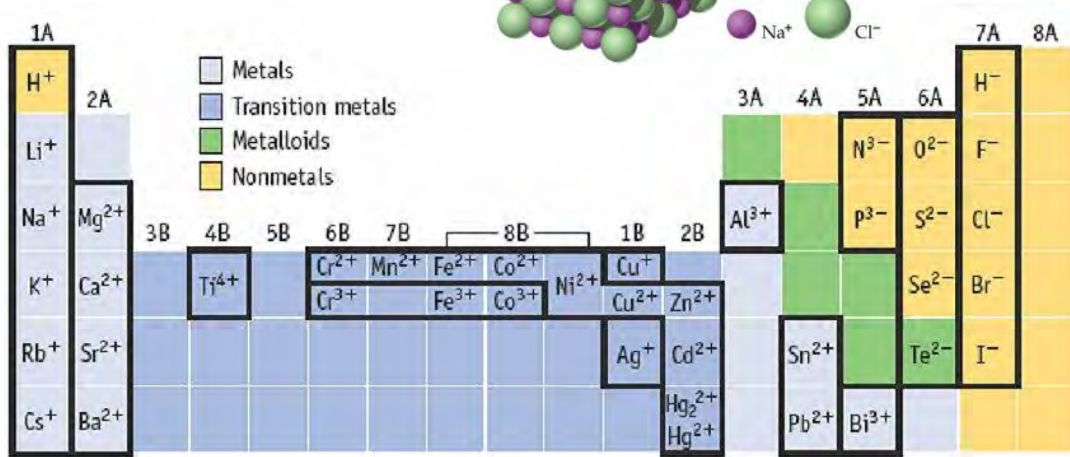
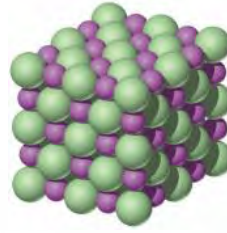
### LEGĂTURA IONICĂ

Se stabilește la **diferențe mari de electronegativitate, când  $\Delta\chi$  dintre atomi este  $> 1.7$**  și are loc prin schimb de electroni. METALELE cedează electronii de valență NEMETALELOR, ambele tipuri de atomi primesc configurații stabile, dar devin ioni.

- Caracter ionic
- Grad minim de mobilitate a electronilor
- Legături puternice (punct de topire ridicat)



- Dure și fragile
- Buni izolatori termici și electrici
- Transparente



$$\% \text{ Ionic Character} = \left\{ 1 - \exp[-0.25(X_A - X_B)^2] \right\} \times 100$$

Fig. 55 Legături ionice între metale și nemetale,  $\Delta\chi > 1.7$  [8, 12].

### LEGĂTURA COVALENTĂ NEPOLARĂ

Se manifestă la atomii din aceeași specie sau la atomii din specii diferite care au **electronegativități foarte apropiate** (C și H<sub>2</sub> - esențială la polimeri -C-C-). Fiecare dintre cei doi atomi partajează în mod egal electronii de valență. Legătura covalentă nepolară este o stare de echilibru dintre forțele de atracție și de repulsie dintre atomi, care ajung „la înțelegere” prin partajarea electronilor de valență. **Legătura se realizează când diferența dintre electronegativitatea atomilor este ( $\Delta\chi < 1.7$ ).**



Fig. 56 Legătura covalentă nepolară.

### LEGĂTURA METALICĂ

Se realizează între atomii ai **metalelor**, pentru **diferențe mici de electronegativitate**. Are loc tot prin partajarea electronilor de valență între toți atomii (niveluri energetice suprapuse). Ioni pozitivi formează rețeaua cristalină în care se găsește uniform distribuit **norul de electroni** sau **gazul de electroni**. Se caracterizează prin mobilitate mare a electronilor.

Coeziunea mare a metalelor este explicată de către [L.Pauling](#) prin existența **valenței metalice** care este cuprinsă între 1 și 6. Valența metalică este reprezentată de numărul electronilor care participă la formarea legăturii metalice, Fig. 57.

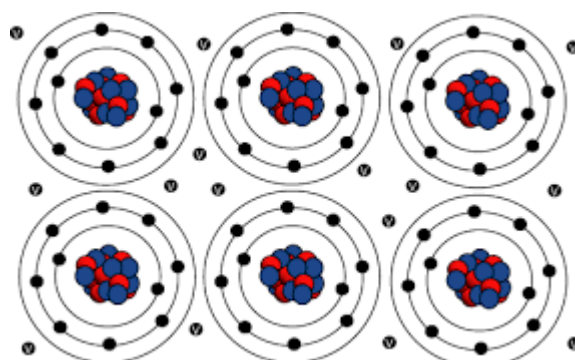


Fig. 57 Legătura metalică.

Prin urmare, numărul maxim de legături metalice este format de metalele tranziționale cu coeziune maximă din grupele VI b, VII b și VIII b. Metalele al căror număr de legături metalice este mare, au raze atomice mici, densități și durități mari, temperaturi de topire și de fierbere ridicate, precum și o rezistență remarcabilă la solicitările mecanice exterioare. Spre deosebire de legăturile covalente, legăturile metalice sunt nesaturate, nelocalizate și nedirijate în spațiu, ceea ce ar explica plasticitatea bună a metalelor.

#### LEGĂTURA COVALENTĂ POLARĂ

Se realizează **între un atom cu electronegativitate relativă mare și un atom cu  $\chi$  mai mică**, exemplu la polimeri C – O – C;  $\chi_C = 2.5$ ;  $\chi_O = 3.5$

Se realizează doar între atomi ai nemetalelor din specii diferite, iar fiecare dintre cei doi atomi pune în comun câte un electron, dar atomul care are electronegativitatea mai mare atrage mai puternic perechea formată. Are loc o partajare inegală a electronilor de valență.

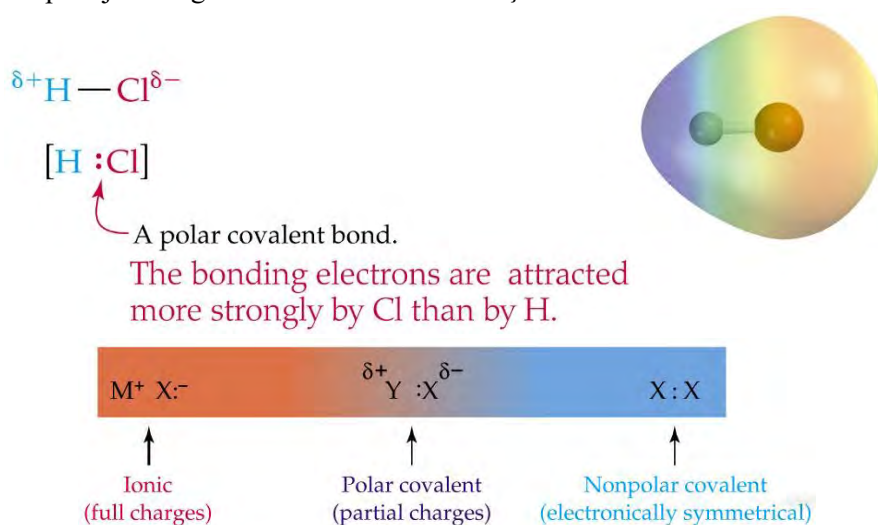


Fig. 58 Legătura covalentă polară [8].

## LEGĂTURA DE HIDROGEN

Se manifestă între atomi puternic electronegativi (O, N, F) dintr-o moleculă și un atom de hidrogen legat covalent de atomi puternic electronegativi într-o altă moleculă. Este importantă la polimeri – legare transversală.

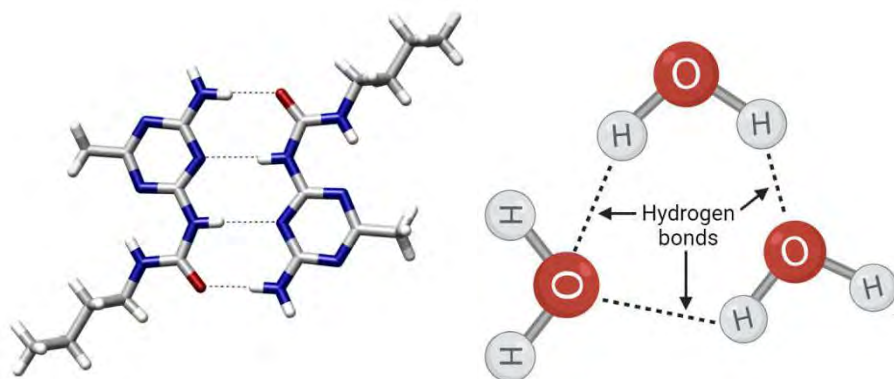


Fig. 59 Legătura de hidrogen.

## LEGĂTURA VAN DER WAALS

Forțele van der Waals reprezintă interacții de atracție sau de respingere, de putere relativ mică dintre molecule neutre și se datorează tendinței acestora de a constitui dipoli electrici, transmițând polarizarea la moleculele învecinate. Se manifestă între molecule în care există legătură covalentă:

- forța de interacție între atomii moleculei este puternică
- moleculele formate din atomi diferiți manifestă un fenomen de polarizare
- între molecule apare o forță de interacție slabă, datorită polarizării moleculelor.

Ex; Molecula de apă ( $H_2O$ ). Între legăturile H-O există un unghi de  $104.5^\circ$ , la atomul de H apare o polarizare pozitivă, iar la cel de O una negativă. Aceste forțe se întâlnesc și la polimeri, dar intensitatea forței Van der Waals este mai puternică.

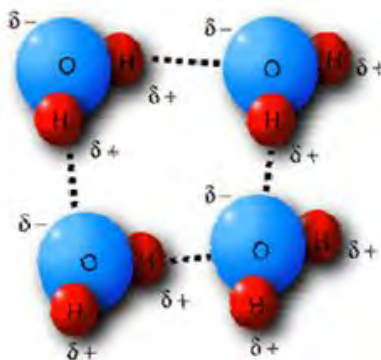


Fig. 60 Legătura Van der Waals.

O forță intermoleculară mediază interacțiunea dintre molecule, inclusiv forțele electromagnetice de atracție sau de repulsie care acționează între atomi și alte tipuri de particule învecinate, de exemplu atomi sau ioni. Forțele intermoleculare sunt slabe în raport cu forțele intramoleculare, forțele care țin o moleculă legată.



**Aplicații:** Practic, toate fenomenele fizice-chimice sau mecanice pot fi explicate prin prisma interacțiunilor care au loc la scară atomică. Un fenomen important în știința materialelor este **adsorbția moleculară**, respectiv aceasta este un proces prin care atomi, ioni sau molecule aderă la o suprafață, fiind un fenomen de suprafață în care acționează forțe Van der Waals, forțe covalente (chemisorbție) sau chiar forțe electrostatice. Astfel de fenomene stau la baza formării oxizilor pe suprafețe metalice, iar în funcție de permeabilitatea acestora la ioni de oxigen/ioni metalici, aderența acestora, stabilitatea lor termică materialele se comportă diferit la temperaturi înalte (rezistență la oxidare) sau în diferite medii chimice (rezistență la coroziune).

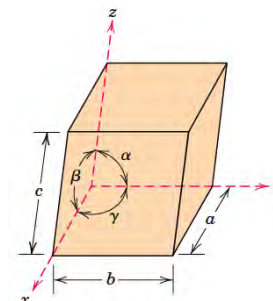
## REȚELE CRISTALINE

S-a văzut deja că materialele pot fi clasificate în funcție de aranjamentul spațial ale atomilor în materiale **cristaline**, materiale **amorse** și materiale **vitroase**. Totodată, intensitatea energiilor de interacțiune dintre atomi depinde de tipul atomilor și de distanța dintre aceștia, adică depinde de aranjamentul acestora la nivel atomic. Prin urmare, toate proprietățile mecanice, tehnologice ș.a. sunt un efect al acestor forțe de interacțiune, respectiv depind esențial de aranjamentul atomilor în spațiu.

Atomii în cazul materialelor cristaline ocupă niște poziții spațiale după un patern regulat, denumit **rețea cristalină**. Acest aranjament spațial se află într-o stare de echilibru termodinamic, determinată de forțele de interacțiune dintre atomi. Intensitatea acestor forțe s-a văzut că depinde de temperatură (energia sistemului) și de distanța dintre atomi. Uzual, toate metalele și multe materiale ceramice au o structură cristalină. Materialele cristaline sunt în general compuse din mai multe cristale sau grăunți cristalini (materiale policristaline). Obținerea unui monocristal (ex. pentru wafele de Si) este extrem de laborioasă și presupune condiții speciale de nucleație și de creștere a cristalului. Toți acești grăunți cristalini dintr-un material aferenți unei faze sau unui compus chimic, au o structură identică, însă orientată diferit în spațiu, aspect pe care-l vom discuta puțin mai târziu.

Cea mai mică unitate structurală dintr-o rețea cristalină se numește **celula elementară** a structurii, vezi figura alăturată [\[video\]](#). Practic, prin repetarea acestei unități sau celule elementare după trei axe spațiale, conduce la formarea rețelei cristaline (**rețea Bravais**).

Proprietățile de simetrie ale cristalelor sunt descrise de conceptul de **grupuri spațiale**. Acestea pot fi clasificate în 230 de grupuri spațiale.



În spațiul tridimensional pot fi descrise 14 rețele Bravais, dintre care 7 sunt fundamentale: **triclinic**, **monoclinic**, **ortorombic**, **tetragonal**, **hexagonal**, **romboedric** (trigonal) și **cubic**, Fig. 62.

Metalele pot cristaliza după unul din cele trei tipuri de sisteme cristaline [\[video\]](#):

- Cubic volum centrat (cvc) – Fe( $\alpha$ ), Cr, W, Mo, Ti( $\beta$ ), ...
- Cubic cu fețe centrate (cfc) – Fe( $\gamma$ ), Al, Cu, Au, Ag, ...
- Hexagonal compact (hc) – Zn, Mg, Ti( $\alpha$ ), ...

Fe( $\alpha$ ), Fe( $\gamma$ ) etc. reprezintă notații pentru anumite stări alotropice ale unor materiale metalice, în cazul considerat fierul, care pot prezenta mai multe tipuri de rețele cristaline.

Înșuşirile unor elemente de a prezenta reţele cristaline diferite pe anumite intervale de temperatură, poartă denumirea de **polimorfism**, iar stările respective se numesc **stări alotropice**.


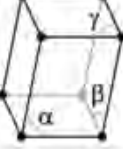
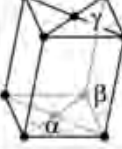
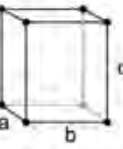
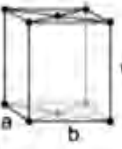
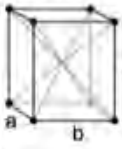
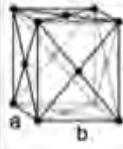

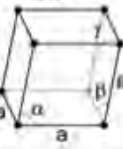
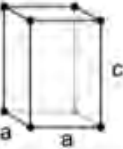
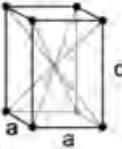
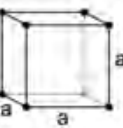
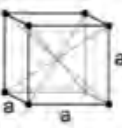
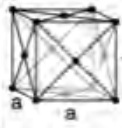
Sistem cristalin	Celule elementare			
triclinic	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
monoclinic	simplu $\alpha \neq 90^\circ$ $\beta, \gamma = 90^\circ$ 	centrat $\alpha \neq 90^\circ$ $\beta, \gamma = 90^\circ$ 		
ortorombic	simplu $a \neq b \neq c$ 	baze centrate $a \neq b \neq c$ 	volum centrat $a \neq b \neq c$ 	fete centrate $a \neq b \neq c$ 
hexagonal	$a \neq c$ 			
romboedric (trigonal)	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ $a = b = c$ 			
tetragonal	simplu $a \neq c$ 	volum-centrat $a \neq c$ 		
cubic	simplu $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 	volum centrat $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 	fete centrate $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 	

Fig. 62 Reţele Bravais. Parametrii celulei cristaline:  $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ .

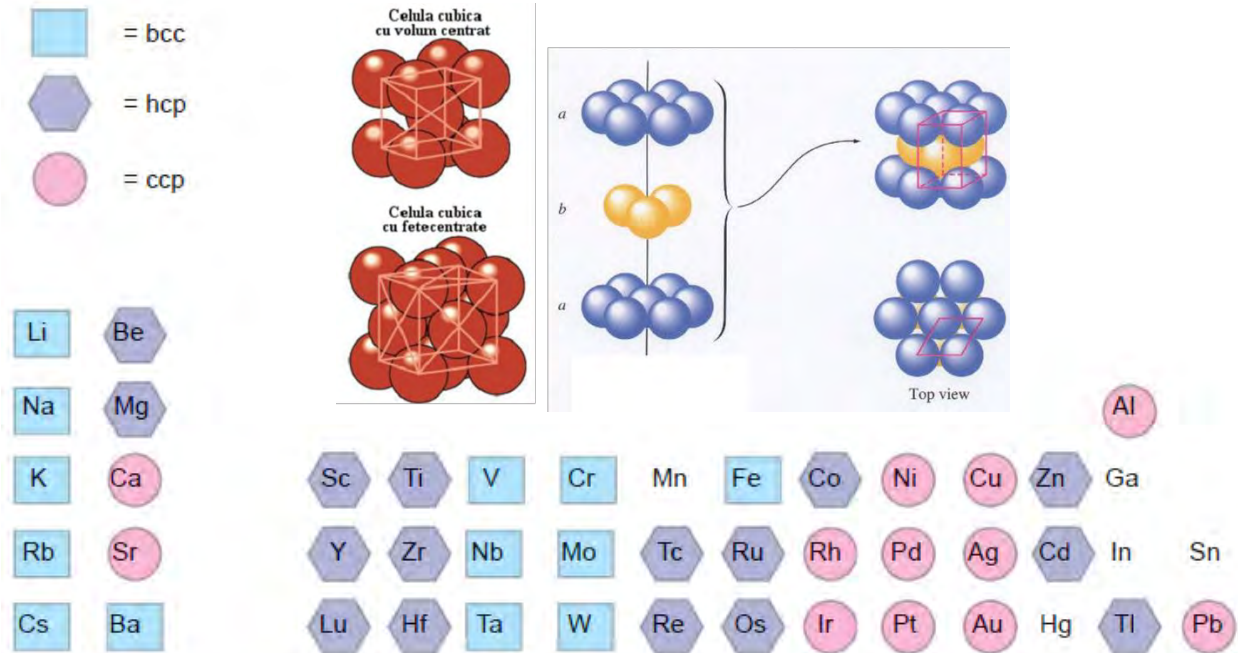
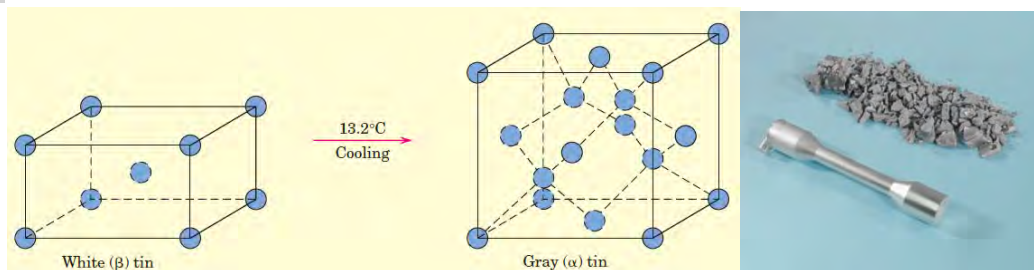
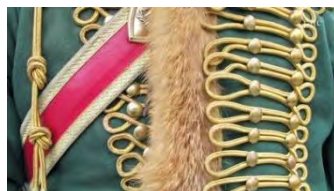


Fig. 63 Metale cu diferite tipuri de structuri cristaline [după 8].  
**bcc)** cubică cu volum centrat; **hcp)** hexagonal compact și **ccp)** cubică cu fețe centrate

#### Aplicații: Studiu de caz



La temperaturi de peste  $13.2^\circ\text{C}$ , Sn ( $\beta$ ) este metalic, ductil, cu aspect argintiu și prezintă o rețea cristalină tetragonală cu volum centrat. Sub  $13.2^\circ\text{C}$ , Sn suferă o transformare alotropică de la forma Sn ( $\beta$ ), la Sn ( $\alpha$ ), care este nemetalică, gri și cu structură cubică tip diamant. Transformarea este lentă, fiind accelerată de scăderea temperaturii și este însoțită de o creștere în volum cu 27%, care conduce la dezintegrarea Sn  $\beta$  metalic în pulbere gri nemetalică, Sn  $\alpha$ . Fenomenul se mai numește boala Sn [8].



În anul 1850, Napoleon era în campanie de cucerire a Rusiei cu o armată de 500.000 de soldați. Dintre aceștia, au supraviețuit doar 10.000. Pierderile masive s-au datorat în mare măsură transformării alotropice a Sn ( $\beta$ ) în Sn ( $\alpha$ ). Iarna din acel an a fost una foarte friguroasă, iar uniformele militare franceze erau prevăzute cu butoni (nasturi) din Sn. La temperaturile severe de  $-30^\circ\text{C}$  din Rusia, nasturii de Sn s-au dezintegrat în pulbere gri, conducând la ceea ce mai târziu s-a numit “the greatest wardrobe malfunction in history” [8].

#### DEFECTE ÎN REȚELE CRISTALINE

Toate proprietățile materialelor sunt influențate semnificativ de structura la scară atomică a materialului. Rețeaua cristalină prezintă o serie de imperfecțiuni care apar pe parcursul procesului de cristalizare, în cursul deformațiilor plastice la cald sau la rece, după prelucrări mecanice, termice, sudare etc.



Imperfecțiunile rețelelor cristaline pot fi:

- **Punctuale** – vacanțe, atomi străini (de substituție sau interstițiali);
- **Liniare** – dislocații marginale și elicoidale;
- **De suprafață** – limite de grăunți, limite de faze, macle de deformare sau de recoacere, defecte de împachetare.

În materiale, la scară atomică sub acțiunea sarcinilor mecanice, a variațiilor de temperatură sau vibrații, au loc procese dinamice de permutare între vacanțe și atomi, fenomene de difuzie, deplasarea dislocațiilor în grăunții cristalini, aspecte care definesc modul cum se comportă materialul respectiv în anumite condiții de temperatură, de sarcini etc.

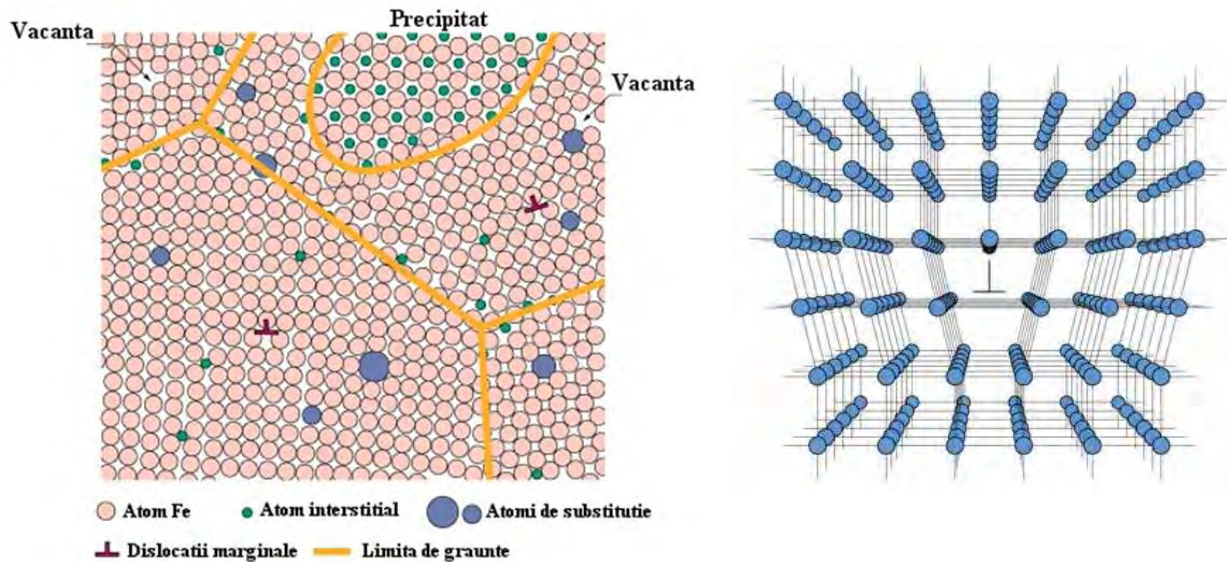


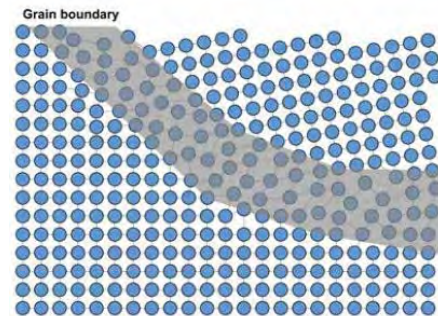
Fig. 65 Imperfecțiuni în rețele cristaline [după 8, 12].

**Vacanțe** = imperfecțiuni punctuale de rețea, materializate prin lipsa unor atomi din nodurile rețelei. Acest fapt atrage modificarea forțelor de interacțiune dintre atomii învecinați și modificarea locală a distanțelor dintre aceștia.

**Atomi străini** = având raze atomice diferite, perturbă poziția atomilor învecinați din rețea.

**Dislocații** = defecte de rețea prin lipsa unor plane atomice (**marginale**), deplasări parțiale ale unor zone de cristal (**elicoidale**).

**Limite de grăunți** = zone marginale ale grăunților cristalini în care ordinea geometrică de aranjare a atomilor în rețea este perturbată de prezența grăunților cristalini vecini, care deși au o rețea cristalină similară, poziția și orientarea ei în spațiu este diferită. Se formează o zonă de tranziție în care atomii respectivi ocupă poziții intermediare și care fac tranziția de la un grăunte cristalin la grăunțele învecinat.



**Defecte de suprafață** = separă zone cristaline după orientare cristalografică, orientarea magnetizării spontane, limitele de fază, macle de deformare etc.

## TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII

Pe durata exploatării, s-a văzut că asupra mașinilor, echipamentelor, a construcțiilor de diferite tipuri, acționează o serie de sarcini variabile în condiții diferite de temperatură, fapt ce conduce în interiorul componentelor acestora la o stare de tensiuni și de deformații, proporționale cu regimul de încărcare și designul structurii metalice.

Distribuția acestei stări de tensiuni și deformații este dependentă de continuitatea<sup>4</sup>, omogenitatea și izotropia<sup>5</sup> materialului. La scară macroscopică, majoritatea metalelor și aliajelor pot fi considerate izotrope, dar la scară microscopică apar faze diferite, compuși chimici, compuși intermetalici, incluziuni, fapt ce determină o stare diferită de tensiuni puternic influențată de mărimea și forma acestora, manifestându-se un caracter de anizotropie a proprietăților de material.

Tensiunea sau efortul unitar din material caracterizează distribuția sarcinilor mecanice la nivel intern din materiale și se calculează ca raportul dintre sarcina aplicată pe unitatea de suprafață. Eforturile perpendiculare pe unitatea de suprafață se numesc eforturi normale  $\sigma$ , iar eforturile cuprinse în plan se numesc eforturi tangențiale sau tensiuni de forfecare  $\tau$ . Se măsoară în MPa (sau N/mm<sup>2</sup>), Fig. 67.

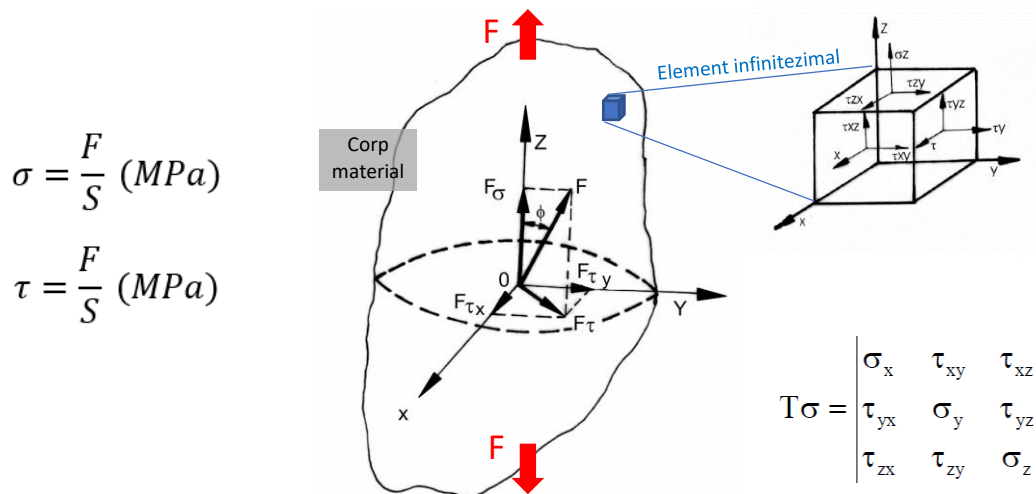


Fig. 67 Eforturi normale  $\sigma$ , tangențiale  $\tau$  și tensorul tensiunii  $T_\sigma$ .

Conform Fig. 67, se poate observa că orice forță care acționează asupra unui corp se poate descompune după un sistem cartezian de coordonate. Pe unitatea de suprafață considerată vom avea o componentă normală (perpendiculară)  $F_\sigma$ , iar în secțiune vom obține două componente tangențiale  $F_{\tau_x}$  și  $F_{\tau_y}$  după cele două axe OX și OY. Într-un element infinitesimal ca mărime, se obțin 9 componente de tensiuni, denumite tensorul tensiunii  $T_\sigma$  care este o mărime vectorială. Pentru o stare de tensiuni uniaxială se pot scrie relațiile:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ (MPa)} \text{ și } \tau = \frac{F}{S} \text{ (MPa)}$$

<sup>4</sup> Lipsa porilor, cavitațiilor, discontinuităților de material, structură etc.

<sup>5</sup> Proprietățile de material sunt identice independent de direcția de măsurare. Efectul invers se numește anizotropie.

Ca urmare a sarcinilor mecanice preluate de material, va lua naștere o stare de tensiuni, respectiv se vor produce o serie de deformații. Pot fi distinse **trei tipuri de deformații**: elastice, plastice și anelastice.

Deformațiile elastice sunt deformații care dispar odată cu îndepărtarea forței care le-a produs. Prin urmare, au un caracter temporar.

Deformațiile plastice sunt deformații cu caracter permanent. Alfel spus, ele se păstrează și după încetarea forței care le-a produs.

Dacă sarcina încetează brusc, o parte din deformații dispar treptat în timp. Aceste deformații, se mai numesc deformații anelastice. Relaxarea materialului după încetarea bruscă a sarcinii se produce treptat în timp. Este important acest fenomen în procese unde se efectuează măsurători de precizie, de exemplu în cazul încercărilor mecanice unde deformațiile echipamentului de încercat poate introduce o serie de erori în calculul unor proprietăți mecanice. În general, deformațiile elastice și cele anelastice sunt mici în comparație cu deformațiile plastice.

### MECANISMUL DE DEFORMARE PRIN ALUNECARE

Pentru a înțelege proprietățile mecanice ale materialelor, modul cum pot fi determinate la nivel macroscopic, condițiile de încercare pentru determinarea acestora, dar și aplicabilitatea acestor proprietăți, este necesar să facem o incursiune la scară atomică pentru a surprinde fenomenele care au loc la nivelul grăunților cristalini.

Procesul de alunecare constă în deplasarea de pachete de plane atomice din material de-a lungul unor plane cristaline denumite plane de alunecare. Prin alunecare, integritatea materialului nu este afectată, deoarece fiecare atom din planurile atomice care alunecă, se deplasează cu un număr întreg de distanțe atomice.

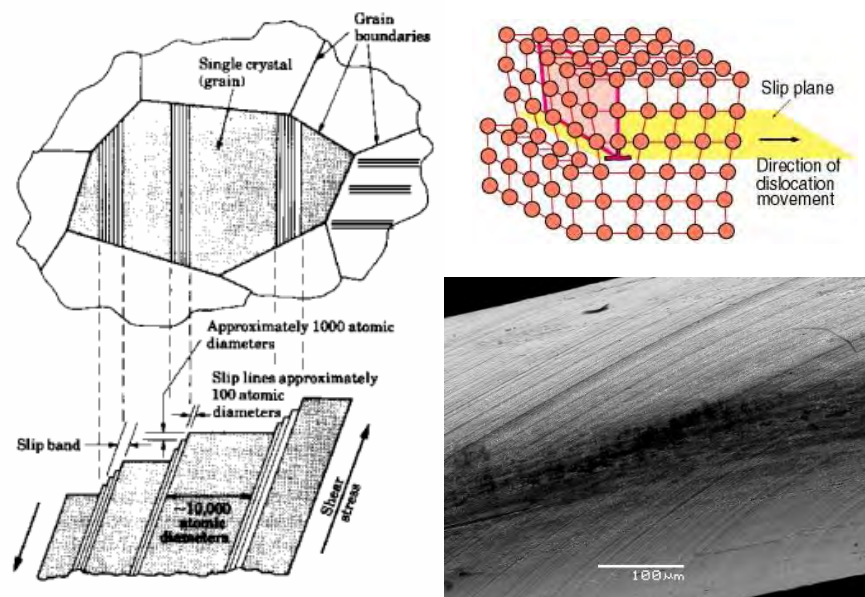


Fig. 68 Mecanismul de deformare prin alunecare în lungul planurilor de alunecare [[video simulation](#)].

Prin alunecare, pe suprafața epruvetei apar benzi de alunecare, care sunt vizibile ușor atât în microscopie optică, cât și în cea electronică, Fig. 68. După lustruirea probei, aceste benzi dispar.



La tensiuni mici, alunecarea are loc pe un număr relativ mic de plane de alunecare grupate în benzi de alunecare. Pe măsură ce crește sarcina aplicată, cresc deformațiile și benzile de alunecare se lărgesc, cuprinzând un număr tot mai mare de plane atomice. Deformarea plastică se produce sub acțiunea tensiunilor tangențiale de forfecare  $\tau$ .

S-a demonstrat experimental că alunecarea în grăunții cristalini nu începe la orice valoare a tensiunii  $\tau_R$ , ci numai atunci când această tensiune atinge o valoare critică descrisă de **legea lui Schmid**, Fig. 69. Se poate spune că mecanismul de alunecare se produce în lungul planelor de alunecare, când produsul  $\cos\Theta \cdot \cos\lambda$  este maxim, aspect care corespunde unor plane cu densitate maximă de atomi.

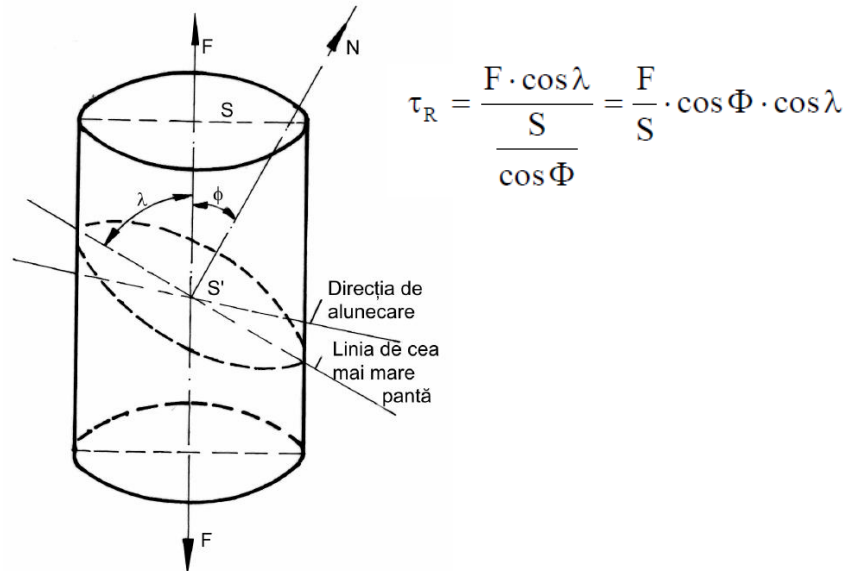


Fig. 69 Tensiunea critică de deformare  $\tau$ , Legea lui Schmid [9].

Valorile critice ale componentei tensiunii de forfecare  $\tau_R$  diferă semnificativ la metale. Spre exemplu, pentru Zn valoarea este de 18 gf/mm<sup>2</sup>, la Cu este de 65 gf/mm<sup>2</sup>, la Ni este de 580 gf/mm<sup>2</sup> iar la fier este de 2800 gf/mm<sup>2</sup> [9]. Factorii care influențează această mărime sunt: compoziția chimică, microstructura materialului, temperatura, viteza de aplicare a sarcinii etc.

În mecanismul de deformare prin alunecare este foarte important și numărul de plane de alunecare, respectiv densitatea de atomi din aceste plane:

- În metalele cu rețea c.f.c alunecarea se produce pe planele {111}, unde în total sunt 12 sisteme de alunecare posibile cu densitate mare de atomi;
- În metalele cu rețea c.v.c. densitatea maximă de atomi aparține planelor {110}, dar nu diferă foarte mult de cea a planelor {112} și {123}, ceea ce face ca alunecarea să se poată produce după toate cele trei familii de plane;
- În metalele h.c. alunecarea are loc pe planele de bază sau în lungul axelor diagonale, ceea ce înseamnă un număr de trei sisteme posibile de alunecare, dar cu densitate atomică mult mai mică.

În cazul deformărilor la rece, pentru asigurarea continuității procesului este necesară o creștere continuă a tensiunii, respectiv a forțelor aplicate pe material. Procesul se mai numește **ecruisare** sau **durificare prin deformare plastică**, ceea ce înseamnă o creștere a limitei de curgere a materialului.

## MECANISMUL DE DEFORMARE PRIN MACLARE

Două regiuni ale grăuntelui cristalin sunt deplasate simetric după un plan de separație. Mărimea deplasării zonei cristaline nu coincide uzual cu distanța atomică (linia punctată).

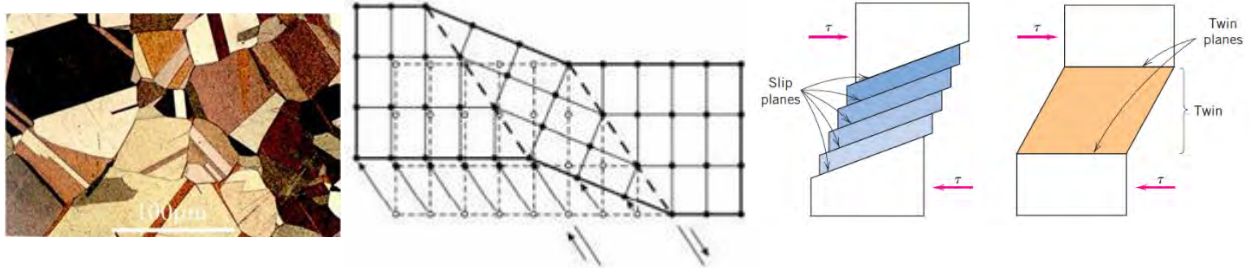


Fig. 70 Deformarea prin maclare (twin) vs. deformare prin alunecare (slip) [modificat după 8].

Pot fi distinse două tipuri de macle: **mecanice** (de deformare), de **recoacere** sau de creștere. În Fig.70 este ilustrată o microstructură ce prezintă macle de recoacere la o **alamă** ce conține 70% Cu și 30% Zn [10].

Maclele de recoacere se formează în metale cu structură cristalină c.f.c, în vreme ce maclele de deformare pot fi observate la metale cu structură c.v.c și h.c la temperaturi joase și viteze mari de deformare. Raportul între mecanismul de deformare prin alunecare și cel de maclare este în favoarea mecanismului de deformare prin alunecare datorat tensiunilor tangențiale, contribuția mecanismului de deformare prin maclare fiind mai redusă. Prin maclare, se pot crea subzone de grăunți cristalini orientate favorabil pentru alunecare. Maclele de recoacere sau de creștere apar datorită tendinței de minimizare a energiei de interfață și prin urmare prezintă muchii drepte, Fig. 70.

## CURBA CARACTERISTICĂ A MATERIALELOR

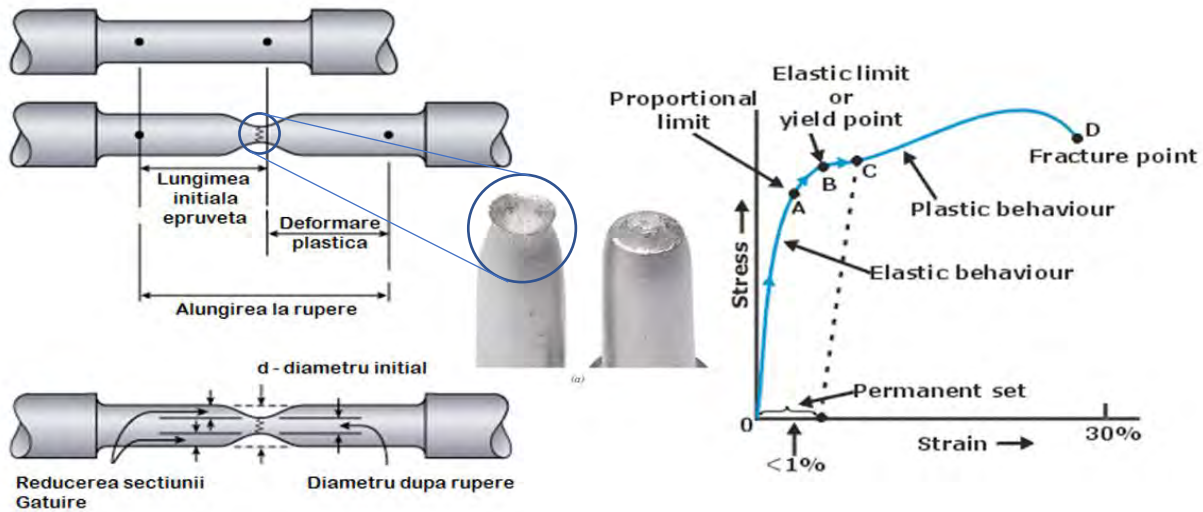
Materialele se comportă diferit sub acțiunea sarcinilor mecanice, iar modul cum materialele răspund la aceste solicitări mecanice este cuantificat sub forma proprietăților mecanice: rezistență la tracțiune, la compresiune, la forfecare, la încovoiere, rezistență la presiune de contact (duritate), fluaj (comportarea sub sarcini constante și la temperaturi ridicate), la oboseală etc.

Pentru a putea determina aceste caracteristici mecanice ale materialelor, dar și alte proprietăți sau caracteristici de material, s-au elaborat o serie de **standarde** care conțin toate condițiile de încercare. Aceste standarde sunt realizate de specialiști din întreaga lume afiliați la diverse institute de standardizare, asociații profesionale, precum: ISO – [International Organization for Standardization](https://www.iso.org/), ASTM – [American Society for Testing and Materials](https://www.astm.org/), ANSI – [American National Standards Institute](https://www.ansi.org/), EN – [European Standards](https://www.cen.eu/), BSI, JIS.

O caracteristică mecanică fundamentală a materialelor este comportarea la solicitarea de tracțiune axială. Condițiile și modul de realizare a încercării la tracțiune sunt stipulate în [SR EN ISO 6892-1:2020](https://www.iso.org/standard/6892-1.html) Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metodă de încercare la temperatura ambiantă.

Fiecare detaliu al încercării, aspectele de pregătire a probelor (acestea se mai numesc **epruvete** în terminologia de specialitate), rugozitatea suprafețelor, forma și dimensiunea acestora, viteza de aplicare a sarcinilor, temperaturile de încercare, caracteristicile mașinilor de încercare, măsurarea și interpretarea datelor, toate sunt aspecte reglementate prin conținutul fiecărui standard specific al încercării. În acest fel, datele obținute sunt reproductibile și comparabile, chiar dacă aceeași încercare se face în locuri și momente diferite, pe echipamente diferite.

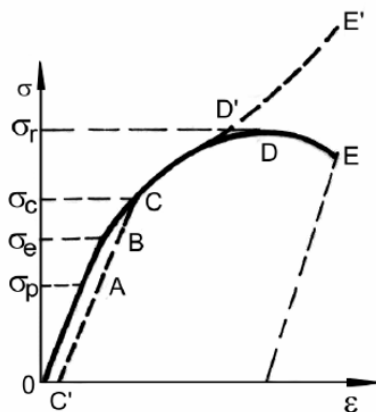
În funcție de forma și tipul semifabricatelor, epruvetele pot fi rotunde, plate, fâșie de țevă, etc. Ele au două capete de prindere și o porțiune calibrată, iar epruvetele proporționale respectă niște condiții între lungimea și secțiunea acestora ( $k = 5,65$ ), ceea ce este echivalent pentru epruvetele rotunde, cu  $L_0 = 5 \cdot d_0$ .



$L_0$  – lungimea inițială,  $d_0$  – diametru inițial pe porțiunea calibrată  
Fig. 71 Epruvete și curba caracteristică a materialelor.

Mașinile moderne de încercare au sisteme de înregistrare și trasare în timp real a curbelor de încercare asistate de un program software, curbe care exprimă dependența dintre sarcini și deformații. Acestea se numesc **curbe caracteristice de material** sau **curba caracteristică tensiune-deformație specifică** a materialului, Fig. 71. Aceste diagrame au pe ordonată forța aplicată pe epruvetă sau tensiunea normală (normal stress lb.eng), iar pe abscisă este deformația specifică  $\epsilon$  (strain lb.eng.) care se exprimă în procente.

**Curba convențională** (curba solidă din Fig. 72) este o formă simplificată a **curbei reale de încercare** (curba desenată cu linie întreruptă), deoarece efortul normal  $\sigma$  se calculează ca raportul dintre forța aplicată la un moment dat și secțiunea inițială a epruvetei. Pe durata încercării, secțiunea epruvetei nu rămâne constantă, ci se micșorează ca urmare a alungirii acesteia.



OA – zonă de proporționalitate; CD – zona deformațiilor plastice;  
 $\sigma_p$  – limită de proporționalitate;  $\sigma_e$  – limită de elasticitate;  $\sigma_c$  – limită de curgere;  
Fig. 72 Curba convențională tensiune – deformație specifică.



Limita de elasticitate se mai notează cu  $\sigma_{0.01}$  și reprezintă efortul unitar pentru care îi corespunde o deformație remanentă (permanentă) de 0.01% (punctul B, Fig. 72).

În zona de elasticitate sau în domeniul elastic este valabilă legea lui Hooke, de proporționalitate liniară între tensiuni și deformații ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ), unde  $E$  se numește modul de elasticitate longitudinal sau modulul lui Young. Se măsoară în GPa.

Modulul de elasticitate  $E$  determină capacitatea materialelor de a se opune deformațiilor elastice, proprietate numită rigiditate. Rigiditatea este direct proporțională cu modulul de elasticitate. În principiu, modulul de elasticitate depinde de metoda de elaborare a materialului (turnare, deformare plastică sau tratament termic), și de gradul de aliere (de ex. oțelurile pentru arcuri au un conținut mai ridicat de carbon).

Limita de curgere se mai notează cu  $\sigma_{0.2}$  și reprezintă efortul unitar pentru care îi corespunde o deformație remanentă (permanentă) de 0.2% (punctul C, Fig. 72).

Rezistența la tracțiune  $\sigma_r$  reprezintă efortul maxim suportat de material, fără ca acesta să se rupă (punctul D, Fig. 72). La creșterea sarcinii aplicate, se produce fenomenul de gătuire a epruvetei și are loc ruperea în punctul E, Fig. 72.

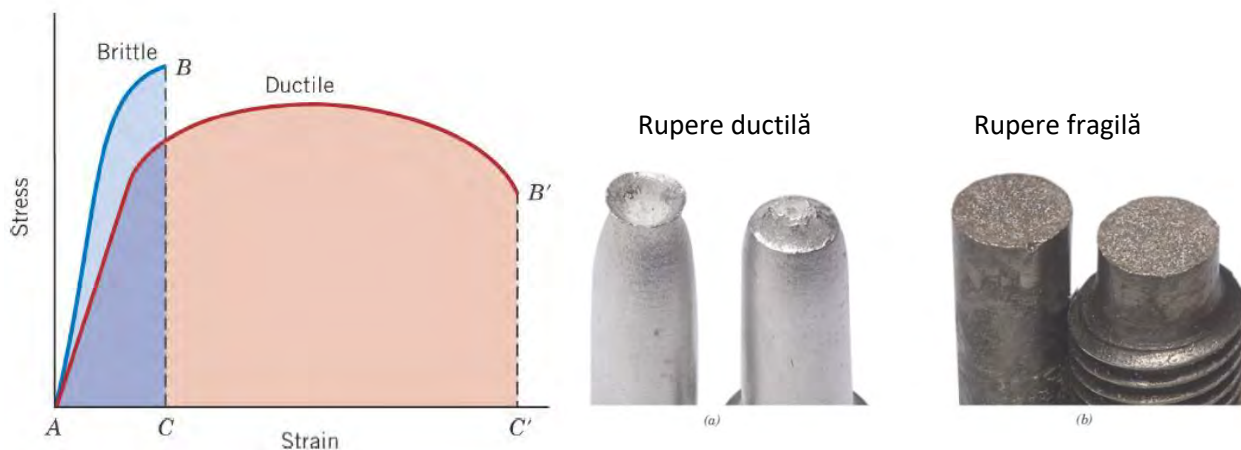
## MECANISME DE RUPERE. CLASIFICARE

Mecanismul după care se produce ruperea materialelor este extrem de important în practica industrială. Sunt multe variabile care controlează acest mecanism, precum compoziția chimică și microstructura materialului, conținutul de incluziuni, forma și distribuția acestora în masa metalică de bază, temperatura de lucru, viteza de aplicare a sarcinilor, existența unor concentratori de tensiune etc. Materialele se comportă diferit în exploatare. Un aspect important pentru siguranța și performanța unor mașini, echipamente sau construcții este modul de rupere în anumite scenarii.

Ruperile materialelor (pieselor) metalice se pot clasifica folosind mai multe criterii:

- mărimea deformațiilor plastice care preced ruperea (scară macroscopică);
- aspectul ruperii (scară microscopică);
- modul cristalografic de rupere (scară atomică).

După mărimea deformațiilor plastice care preced ruperea, considerând fenomenul de rupere la scară macroscopică, ruperile pot fi: **ruperi fragile**, precedate de deformații plastice nesemnificative și care se propagă cu viteze foarte mari, respectiv **ruperi ductile**, caracterizate prin deformații plastice apreciabile produse înaintea și în timpul realizării fenomenelor de rupere.



Brittle – rupere fragilă; Ductile – rupere ductilă (lb.eng.)

Fig. 73 Rupere ductilă și fragilă. Aspecte secțiuni de rupere [8].

După aspectul ruperii, care consideră fenomenul de rupere la scară microscopică, ruperile se clasifică în două categorii:

- ruperi cu **aspect cristalin** – strălucitor
- ruperi cu **aspect fibros** – mat.

După modul cristalografic de rupere, care consideră fenomenul de rupere la scară atomică, ruperile se încadrează în două categorii:

- ruperi prin **clivaj** (smulgere), produse prin acțiunea unor tensiuni normale  $\sigma$ ;
- ruperi prin **forfecare**, produse prin acțiunea unor tensiuni tangențiale  $\tau$ .

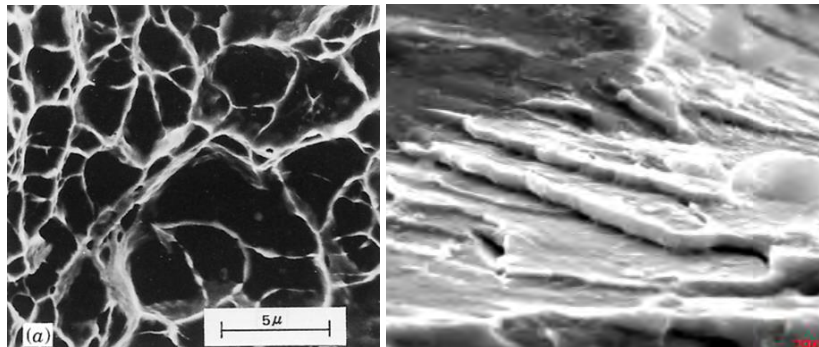


Fig. 74 Rupere ductilă vs. rupere fragilă [8, 12].

**Materialele ductile** au capacitate foarte mare de deformare plastică înainte de rupere. Exemple: aur, cupru, argint, aluminiu, plumb.

**Materiale tenace** au și o rezistență mecanică ridicată simultan cu o bună capacitate de deformare plastică înainte de rupere. Exemple: oțeluri structurale, oțeluri de îmbunătățire, oțeluri slab aliate.

**Materiale fragile** au rezistență mecanică ridicată, dar o capacitate redusă de deformare plastică înainte de rupere. Exemple: oțeluri de scule, oțeluri călite, fonta albă.

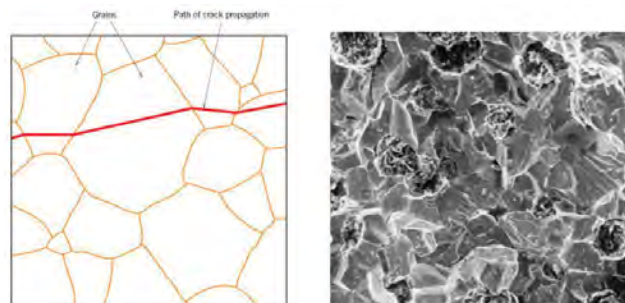


Fig. 75 Rupere intracristalină sau transcristalină [8].

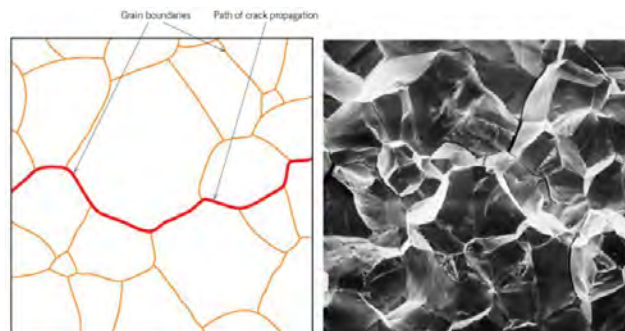


Fig. 76 Rupere intercristalină [8].

Ruperea intercristalină se datorează fragilizării limitei de grăunte datorită atacului chimic (coroziune), oxidare, precipitare impurități (S, P, Se, Sb, B) sau a unor carburi, Fig. 76.

Ruperile fragile se produc prin clivaj (smulgere) produse prin acțiunea unor tensiuni normale  $\sigma$ , au o propagare intercristalină (prin limitele grăunților cristalini) sau transcristalină (prin grăunții cristalini) și prezintă aspect cristalin strălucitor și suprafețe de rupere plane, în trepte, Fig. 74 b.

Ruperile ductile se produc prin tensiuni de forfecare și au de obicei o propagare transcristalină, prezentând un aspect fibros, Fig. 74.

#### Aplicații. Studii de caz:

- Rupere la oboseală datorate solicitărilor ciclice și prezenței incluziunilor nemetalice de tipul MnS



Fig.78 [Rupere la oboseală mecanică](#) datorată incluziunilor nemetalice de MnS [\[video\]](#).

*The failure of the gear teeth was caused by the presence of **manganese sulfide (MnS) inclusions** leading to fatigue cracking and brittle overload of the through hardened gear teeth. **Inclusions were found in the fatigue crack regions** which EDS revealed to be manganese sulfide (MnS) streamers. These inclusions serve as **fatigue crack initiation locations** and are known to be **highly detrimental to the fatigue properties** of through hardened steels. In a through hardened gear there is very little ductility or toughness, so once a fatigue crack was initiated at the inclusions the failure of the gear teeth was very likely.*

- Scufundarea navelor de război Liberty.

*The failure of many of the World War II Liberty ships [\[1\]](#) is a well-known and dramatic example of the brittle fracture of steel that was thought to be ductile. [\[2\]](#) Some of the early ships experienced structural damage when cracks developed in their decks and hulls. These Liberty ships were constructed of steel that experienced a ductile-to-brittle transition.*



Fig. 79 [Scufundarea navelor Liberty](#) datorită temperaturii mari de tranziție ductil-fragil.



## TENACITATEA MATERIALELOR

Tenacitatea este o măsură a energiei consumate la rupere a materialului și presupune inclusiv rezistență la șocuri. Practic, exprimă capacitatea unui material de a opune rezistență la deformare și de a absorbi o cantitate mare de energie înainte de rupere. Este o proprietate mecanică ce combină rezistența mecanică cu ductilitatea materialului.

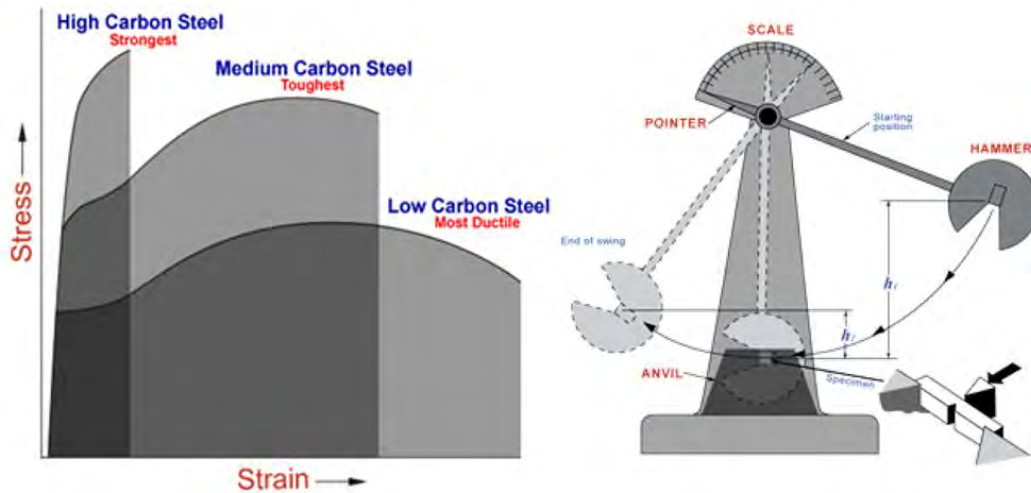
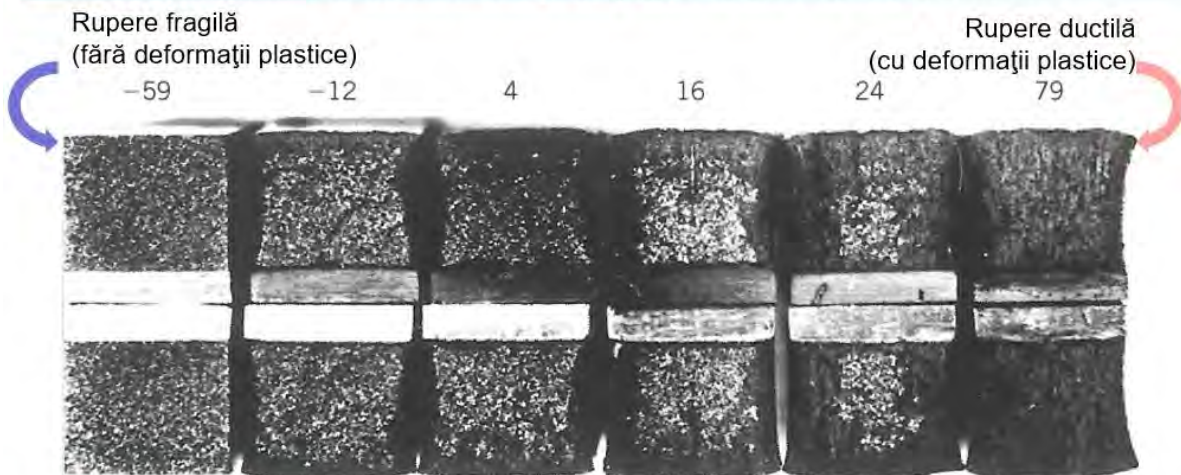


Fig. 80 Energia consumată la rupere. Ciocanul pendul Charpy [[video rupere ductilă](#)].

## Încercări la încovoiere prin șoc, SR EN ISO 9016-2013



**Fracture surfaces** after impact showing the variation in ductility with **testing temperature** ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Variația aspectului suprafeței de rupere în raport cu temperatura de încercare.

**Sensul de creștere a ductilității**

Fig. 81 Aspectul secțiunii de rupere în raport cu temperatura de încercare [[video, rupere fragilă](#)].

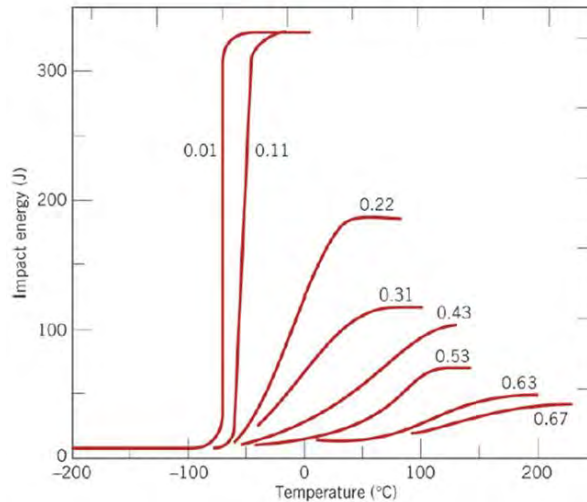


Fig. 82 Variația temperaturii de tranziție în raport cu temperatura și concentrația de carbon [8].

Analizând figurile 81 și 82, se poate observa cu ușurință că scăderea temperaturii modifică comportamentul materialelor la solicitări dinamice (test la încovoiere prin șoc cu pendulul Charpy). Compoziția chimică are deasemenea un impact major asupra tenacității. Creșterea conținutului de carbon, duce la o scădere accentuată a energiei consumate la rupere. Un fenomen similar are loc și la creșterea concentrației de incluziuni nemetalice din microstructura materialului.

Scufundarea vasului Titanic a avut ca și cauze principale temperatura ridicată de tranziție ductil-fragil coroborat cu temperatura joasă a apelor în care naviga vasul, concentrațiile mari și formele grosolane ale incluziunilor nemetalice de MnS, calitatea inferioară a oțelului (puritate), alinierea nefavorabilă în șiruri paralele a incluziunilor din oțel, au favorizat forfecarea niturilor de asamblare a carenei Titanicului.



**Studiu de caz:** Metallurgical and mechanical analyses were performed on steel and rivet samples recovered from the wreck of the RMS Titanic. It was found that the steel possessed a ductile-to-brittle transition temperature that was very high with respect to the service temperature, making the material brittle at ice-water temperatures. This has been attributed to both chemical and microstructural factors. It has also been found that the wrought iron rivets used in the construction of Titanic contained an elevated amount of incorporated slag, and that the orientation of the slag within the rivets may hold an explanation for how the ship accumulated damage during its encounter with the iceberg.

# CURS 3. TEORIA ALIAJELOR

## CRISTALIZAREA METALELOR

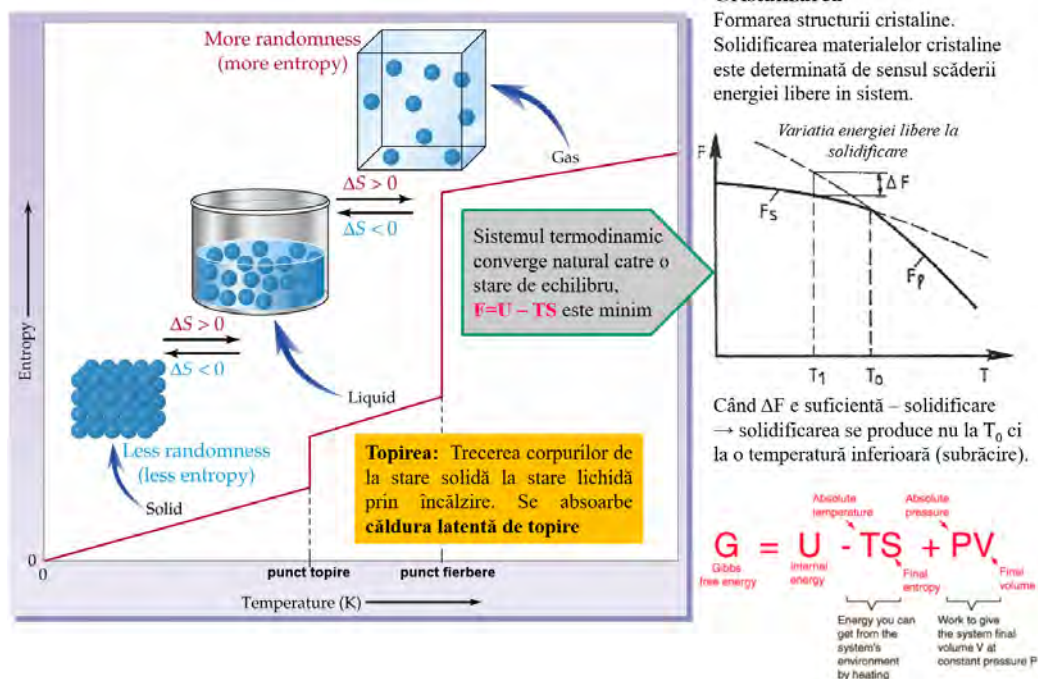


Fig. 84 Stări de agregare ale materiei. Energia liberă Gibbs [modificat după 8].

În funcție de condițiile de stare, temperatură și presiune, materia poate fi organizată în stare solidă, lichidă, gazoasă și de plasmă. Există și o stare specială de agregare denumită [Bose-Einstein condensate](#), care se manifestă la temperaturi aproape de zero absolut. Transformările de fază, de exemplu cele de la starea solidă la starea lichidă, sunt guvernate de legile termodinamicii și întotdeauna energia sistemului termodinamic se conservă (prima lege a termodinamicii).

Suma tuturor formelor microscopice de energie într-un sistem este definită ca **energie internă**. [Energia internă](#) depinde de structura moleculară și de gradul de activitate molecular. **Energia internă** a unui sistem sau a unui corp este totalul energiei cinetice care este rezultatul mișcărilor de translație, rotație și de vibrație a moleculelor, precum și energia potențială legată de energia electrică și vibratorie a atomilor din molecule.

**Energia termică** este suma **energiei interne latente** (apare în timpul schimbării fazei unui sistem) și a **energiei interne** (energia cinetică a moleculelor cum ar fi translația moleculară, rotație, vibrație, translația electronilor, spinul și spinul nuclear).

Metalele sau mai precis aliajele tehnice, oțeluri, fonte aliaje neferoase se elaborează în fază lichidă, iar un proces important în controlul proprietăților acestor materiale ingineresti, îl reprezintă **formarea structurii cristaline**, dar și **transformările structurale** ulterioare care au loc în cadrul unor procese metalurgice.

Solidificarea materialelor cristaline este determinată de sensul scăderii **energiei libere Gibbs** din sistemul termodinamic format din materialul care se elaborează sau se procesează printr-un proces tehnologic (turnare, deformare plastică etc), Fig. 84.



Procesul de cristalizare începe cu formarea sau inocularea de germeni cristalini (particule solide de mici dimensiuni). Germeii cristalini pot fi omogeni (de aceeași natură cu topitura) sau eterogeni (de altă natură cu topitura, uzual de natură ceramică), Fig. 85. Uzual predomină germinarea eterogenă.

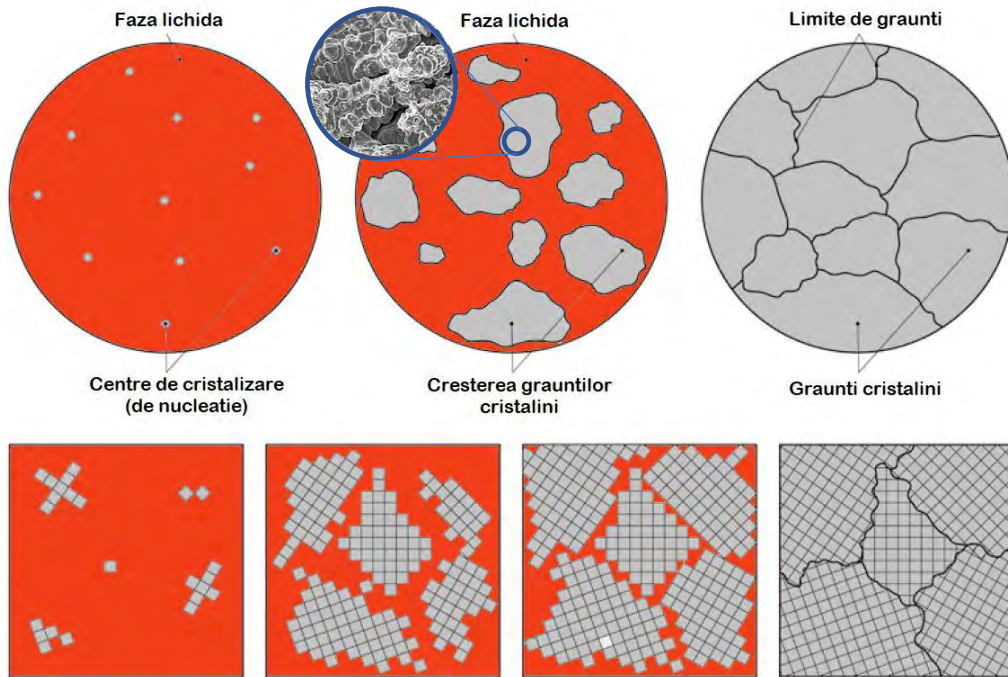


Fig. 85 Procesul de nucleație, creștere grăunți și formarea limitelor de grăunți, [modificat după 8].

În procesul de cristalizare se creează o interfață între mediul lichid-solid. Acestei suprafețe de separație îi este asociată o energie liberă. Cu cât crește cantitativ faza solidă, cu atât crește proporțional energia liberă  $\Delta G$  asociată suprafeței de separație dintre mediul lichid și cel solid.

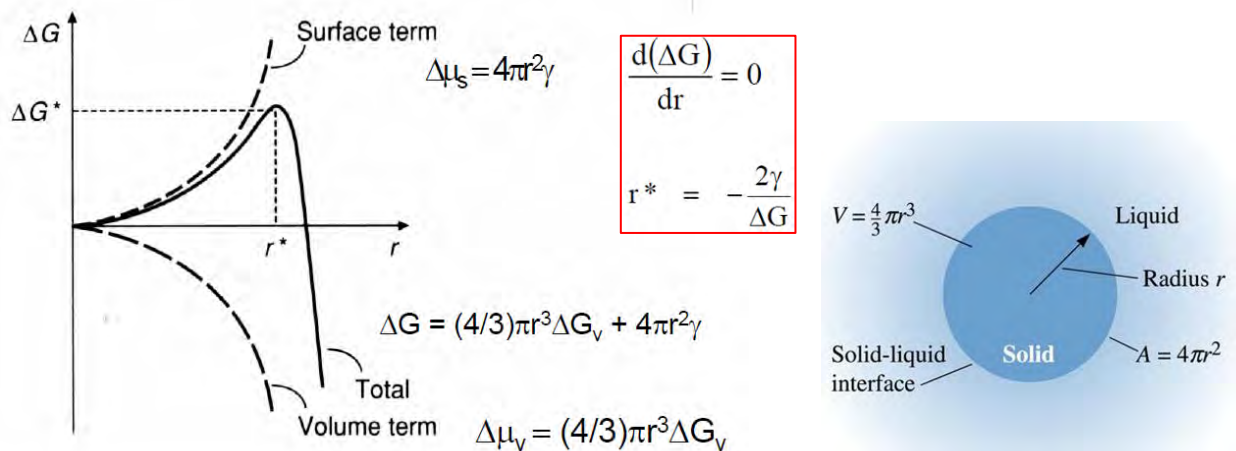


Fig. 86 Raza critică  $r^*$  pentru germeni de cristalizare viabili [8, 12].

**Raza critică  $r^*$**  reprezintă mărimea minimă a germeilor cristalini ce se formează prin gruparea unor atomi în faza lichidă, înainte ca particulele solide formate să crească. Sub această dimensiune critică, germeii se dizolvă în topitura metalică.

Odată ce se formează acești germeni de cristalizare, sau centre de nucleație, are loc un proces de creștere a lor prin adăugarea de noi atomi la structurile cristaline formate, Fig. 85. Scăderea temperaturii în baia metalică, permite ca noi atomi din faza lichidă să se atașeze la structurile formate, de tip dendritic.

Treptat, grăunții cristalini formați cresc ca și dimensiuni și ajung să se blocheze reciproc ca și orientare spațială în faza lichidă, datorită grăunților învecinați cu care intra în contact și în final se formează limitele de grăunți. Datorită variației compoziționale a fazei lichide, are loc și un fenomen chimic de segregare, ultimele cantități de fază lichidă care cristalizează sunt mai bogate în impurități.

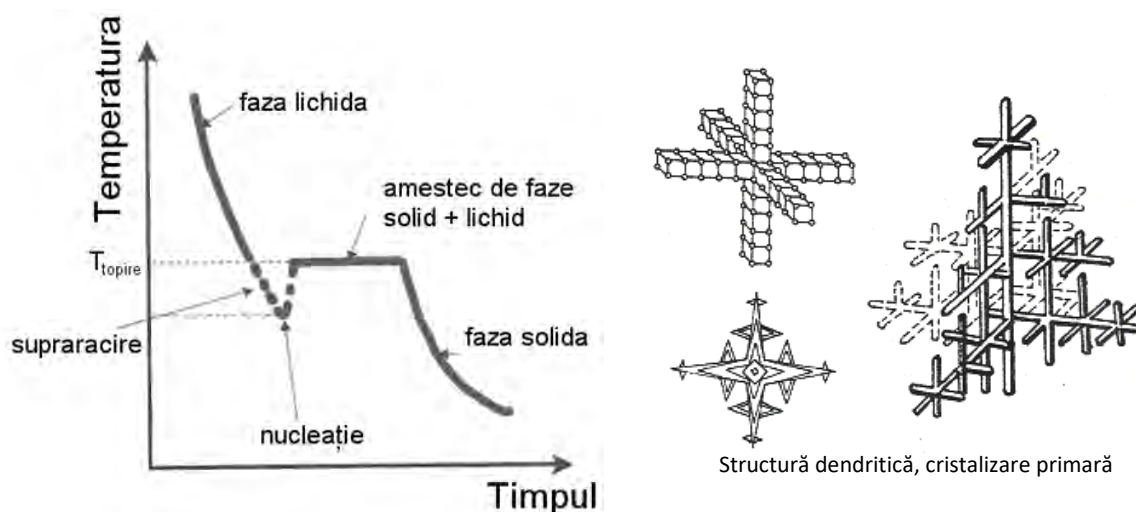


Fig. 87 Evoluția temperaturii în procesul de cristalizare a metalelor tehnic pure.

Dacă cristalizarea metalelor/aliajelor are loc din fază lichidă, procesul se mai numește **cristalizare primară**. Dacă la răcire au loc o serie de transformări în stare solidă, procesele de cristalizare a noii faze se numesc **procese de cristalizare secundare**, terțiare etc.

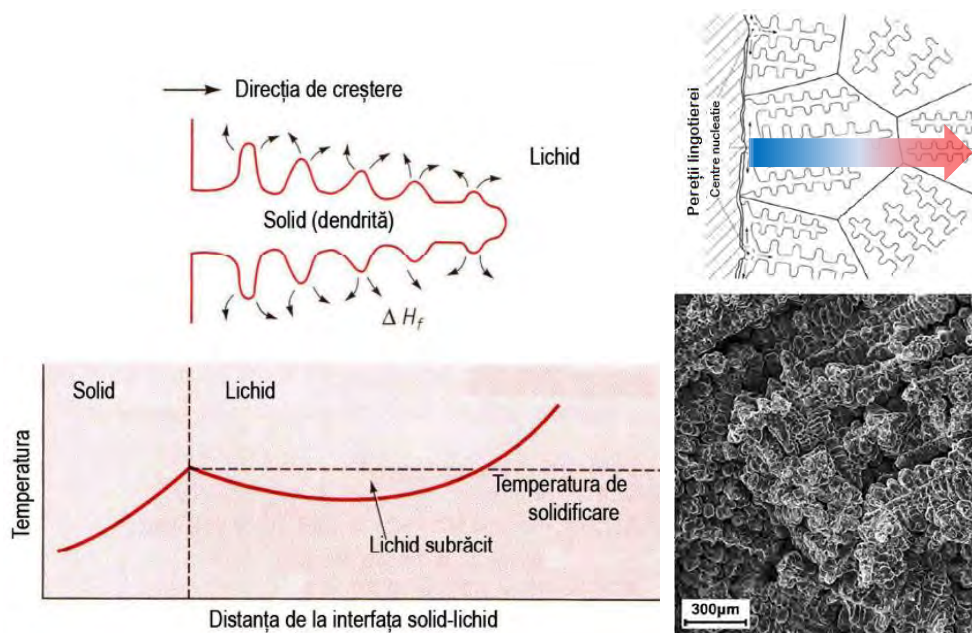
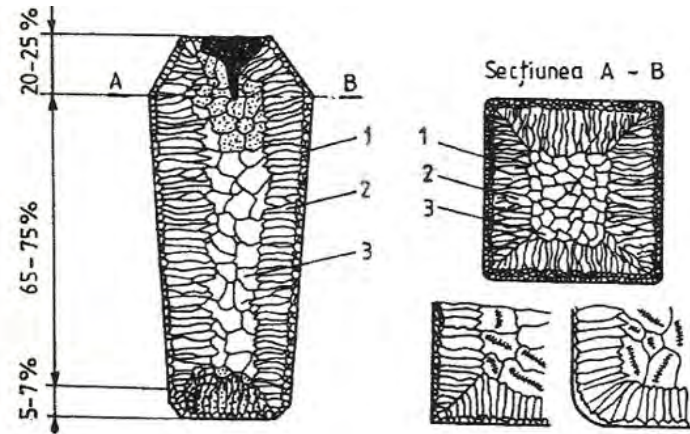


Fig. 88 Creșterea cristalelor dendritice are loc în direcția gradientului de temperatură. Structuri dendritice [după 12].



Cu cât viteza de răcire a fazei lichide este mai ridicată, cu atât fenomenul de **histerezis termic** este mai pronunțat. Se observă că nucleația se produce la temperaturi mai joase, sub punctul teoretic de topire sau cristalizare. Fenomenul se numește **suprarăcire**, Fig. 87.

## STRUCTURA ȘI DEFECTELE LINGOULUI DE TURNARE



Dupa elaborare, aliajele se toarnă in lingotieră → **LINGOU**

1 – zona graunților marginali:  
răcire foarte rapidă (exterior)  
structura fină, echiaxială

2 – zona cristalitelor columnare:  
gradient de temperatură interior (temperatura mare) → exterior (temperatura mai mică), cristalite grosolane, alungite

3 – zona cristalitelor centrale viteza foarte mică de răcire, temperatura relativ uniform cristalite echiaxiale, grosolane

Fig. 89 Structura lingoului de turnare.

### **RETASURA**

gol rezultat prin contracția de solidificare

- **superioară** în maseleta (defect de principiu)
- **centrală** (defect accidental)
- **dispersată** (defect accidental)

### **SEGREGAȚIA**

neomogenitate chimică

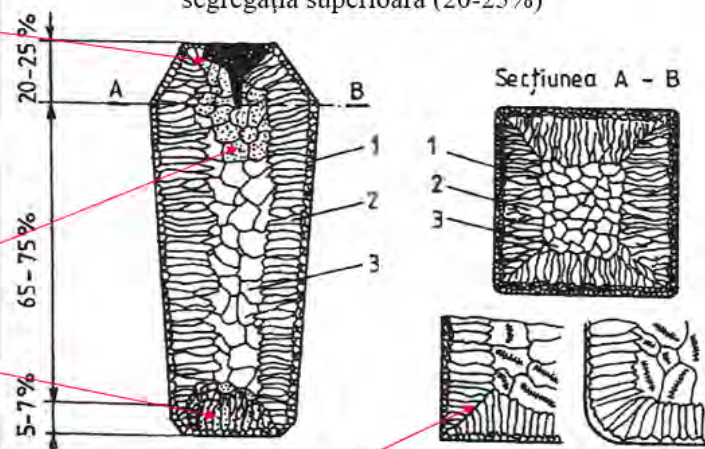
- **macroscopică** (la nivelul lingoului)
- **microscopică** (în interiorul graunților cristalini)
- **segregația zonală superioară**
- **segregația zonală inferioară**

### **INCLUZIUNILE NEMETALICE**

particule ceramice exo / endogene

- **incluziuni macroscopice**
- **incluziuni microscopice**
- **sufluri** = **incluziuni de gaze**

**Maseleta** = retasura (superioară) + segregarea superioară (20-25%)



### **ZONE DE MINIMĂ REZISTENȚĂ**

zone de întâlnire a cristalitelor columnare de pe laturi adiacente

Fig. 90 Defectele lingoului de turnare: retasura, segregările chimice și suflurile (porozități).



La elaborarea materialelor metalice, se obțin semifabricate denumite lingouri obținute prin turnare în niște forme denumite lingotiere. Mai departe, lingourile obținute sunt procesate ulterior prin deformare plastică la cald/rece și se obțin alte produse metalurgice: table, benzi, bare, țevi, profile laminate, sârme. Metalul topit în contact cu pereții lingotierei cristalizează rapid și formează o structură fină. Viteza de răcire scade în intensitate și frontul de solidificare înaintea spre centrul piesei turnate, cu o viteză mai mică, Fig. 91.

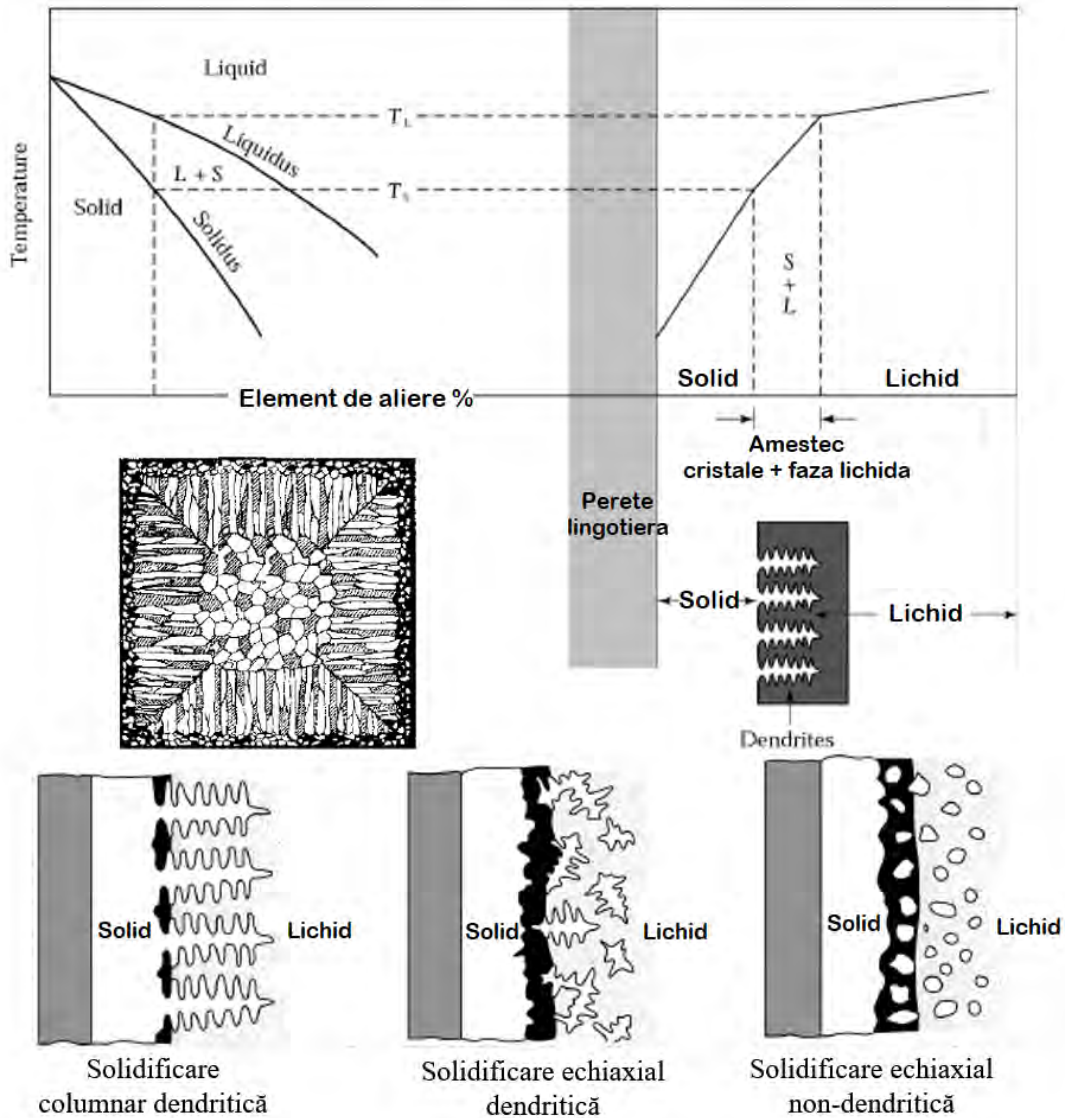


Fig. 91 Propagarea frontului de cristalizare în vecinătatea pereților de lingotieră.

În funcție de viteza de răcire, structura care se formează poate fi **columnar dendritică** (viteze mai mari de răcire), **echiaxial dendritică** sau **echiaxial non-dendritică**, Fig. 91. Controlul vitezei de răcire și a microstructurii la elaborarea materialelor metalice joacă un rol esențial în controlul proprietăților mecanice și tehnologice ale materialelor.

În ultimele decenii, în producția de masă a semifabricatelor din oțel, turnarea în lingouri a fost înlocuită de turnarea continuă.

Avantajul acestui proces este creșterea productivității, reducerea pierderilor de material (la lingouri partea utilă este de 65-75 % din volumul lingoului, Fig. 90), scăderea consumului de energie și a costurilor de fabricație (în vederea deformării plastice la cald, nu mai este nevoie de reîncălzirea lingoului).

La turnare continuă, metalul din oala de elaborare alimentează două oale de turnare ce lucrează alternativ (una se alimentează, în vreme ce din cealaltă se toarnă material în creuzetul instalației de turnare continuă. Prin vibrarea acestuia, se stimulează formarea de centre de cristalizare și se obține o crustă solidificată a semifabricatului care continuă procesul de solidificare în timp ce înaintază pe linie.

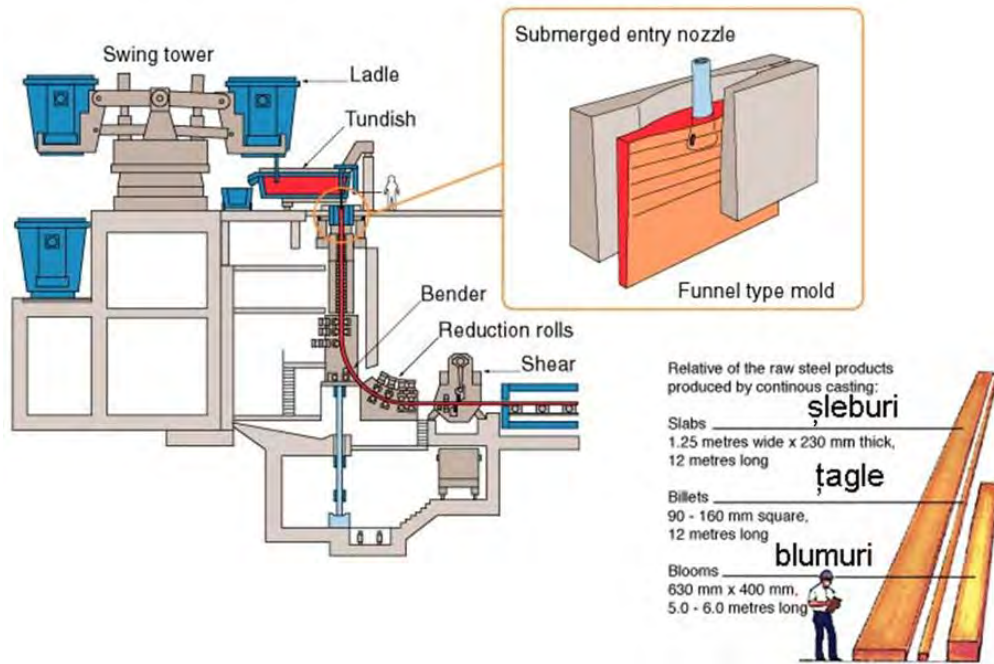


Fig. 92 Turnarea continuă și obținerea șleburilor, țagelilor și a blumurilor [video].

Instalație de turnare continuă șleberi

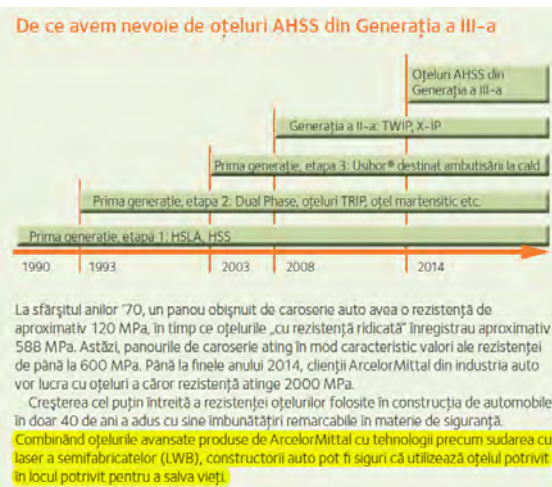
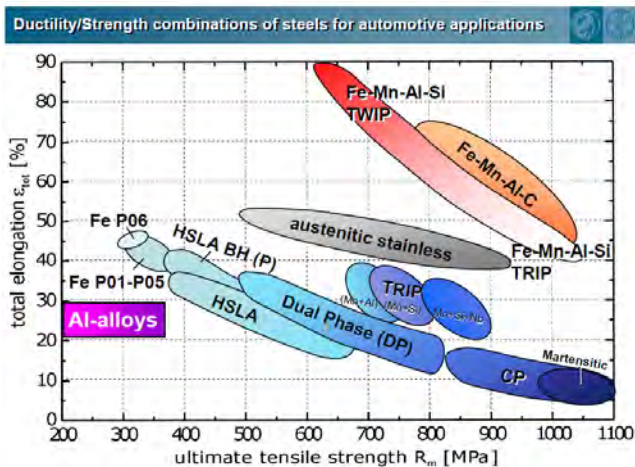


Fig. 93 Obținerea șleburilor prin turnare continuă și aplicații ale oțelurilor de înaltă rezistență (AHSS – Advanced High Strength Steels) în industria automotive.



Aplicație: În diagrama alăturată sunt prezentate o serie de oțeluri folosite în industria automotive care oferă o paletă largă de proprietăți în coordonate alungire-rezistență la tracțiune. S-a văzut că tenacitatea este o caracteristică foarte importantă în aplicații structurale sau în domeniul automotive. Creșterea rezistenței mecanice, a durtății materialului atrage o scădere a caracteristicilor de plasticitate. Energia consumată la rupere, sau la impact în domeniul automotive, este o caracteristică esențială de rezistență și securitate în același timp.

Fig. 94 Oțeluri utilizate în domeniul automotive [14].

### ALIAJE. NOȚIUNI GENERALE

Metalele în stare tehnic pură sunt greu de obținut, au preț foarte ridicat și proprietăți mecanice care nu corespund cerințelor de exploatare din practică. Este mult mai convenabil ca metodă de elaborare și preț de achiziție, obținerea unor aliaje metalice care oferă caracteristici de rezistență superioare metalelor tehnice pure, ce pot fi particularizate în funcție de specificul aplicațiilor: temperaturi de exploatare, medii de lucru, regim de sarcini.

Aliajele se definesc ca fiind materiale complexe, obținute din combinarea unui metal cu alte metale sau cu metaloizi, Fig. 95 și Fig. 96.

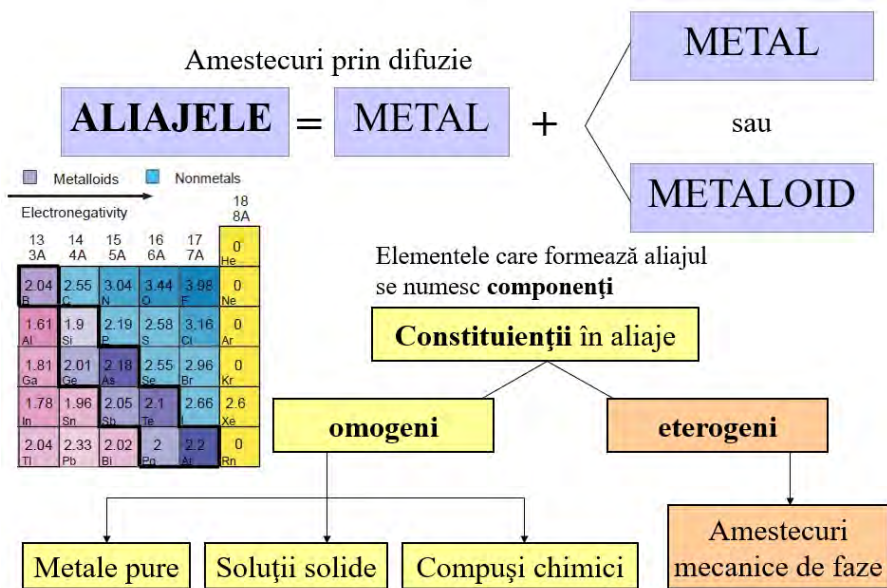


Fig. 95 Aliaje și constituenții din aliaje.

Conform datelor furnizate de Volvo pentru modelul XC90, caroseria acestui model conține cca. 40% din greutate oțeluri cu bor deformate la cald, care sunt cele mai rezistente oțeluri utilizate în prezent în industria automotive, Fig. 96. Așa cum se poate observa și în Fig. 97, tendința în domeniul automotive este de a utiliza oțeluri de înaltă rezistență, ce reprezintă cca. 76% din masa caroseriei la nivelul anului 2015 [15].



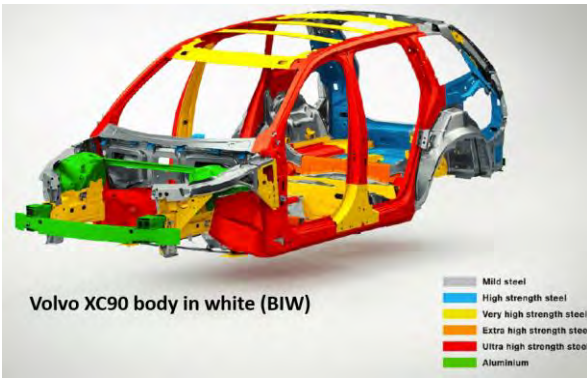


Fig. 96 Tipuri de materiale metalice utilizate la caroseria automobilului [Volvo XC90](#).

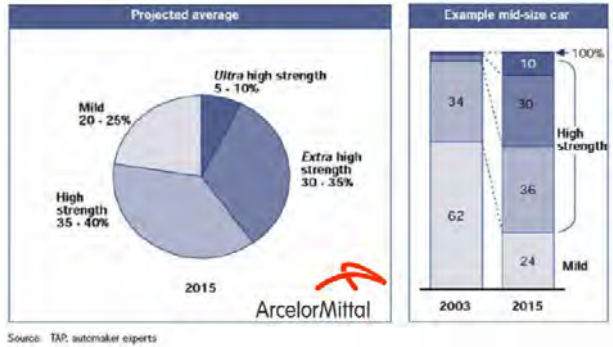


Fig. 97 Tendințe de utilizare oțeluri de înaltă rezistență în industria automotive [15].

Prin aceasta, [scade consumul de combustibil și emisiile de gaze](#), conform unor [directive Europene](#), dar și a unor înțelegeri la nivel mondial între principalele puteri economice ale lumii (video: [Acordul de la Paris](#)).

La baza elaborării aliajelor stau fenomene de difuzie atomică a elementelor componente (C, Si, Mn, Cr...) în stare lichidă, sau în stare solidă (ex. tratamente termice). Studiul aliajelor se face pe [sisteme de aliaje](#), care în funcție de numărul de componenți pot fi binare, ternare, respectiv polinare.

[Structura aliajelor](#) este formată din [constituenți structurali](#), care la rândul lor pot fi omogeni sau eterogeni. [Constituenții omogeni](#) se mai numesc [faze](#) (ex. ferita, austenita din oțeluri, în general [metale pure](#), [soluțiile solide](#) și [compuşii chimici](#) în care [elementele componente](#) notate cu A, B,... sau Cr, Ni, Fe,... nu pot fi separate prin metode optice, ci doar prin metode chimice.

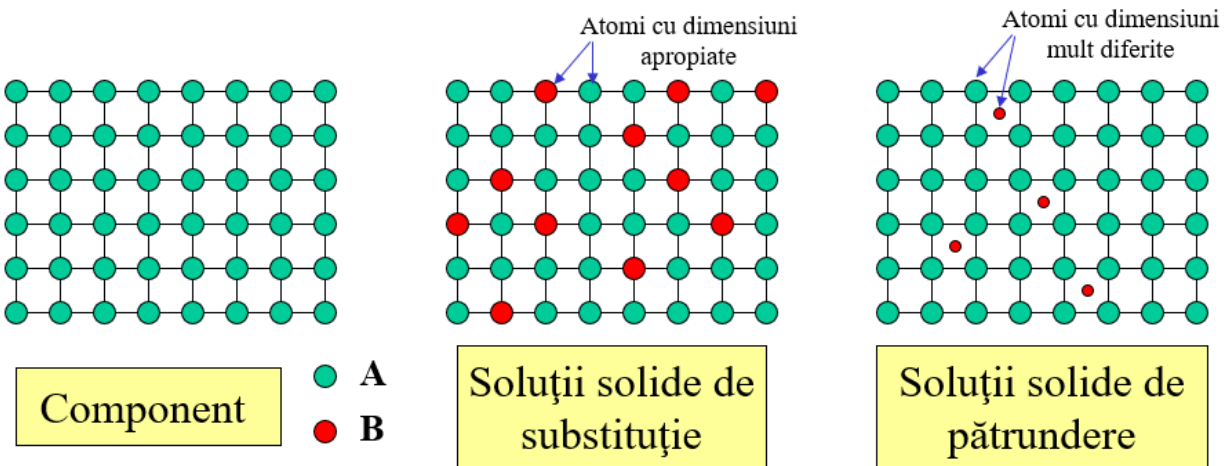


Fig. 98 Metal tehnic pur A, soluții solide de substituție și soluții solide de pătrundere.

Microstructura materialelor reprezintă un interes deosebit în activitățile de caracterizare a materialelor și a proprietăților acestora. Se studiază prin microscopie optică (metalografie optică), iar la mărimi ridicate prin microscopie electronică (SEM și TEM). Este o analiză care se efectuează în laboratoare de materiale și nu lipsește în nici o expertiză tehnică, se poate efectua la temperatura camerei sau la cald, cu ajutorul unor microscopie speciale [\[video\]](#).

## CURS 4 DIAGrame DE ECHILIBRU BINARE

### NOȚIUNI INTRODUCTIVE

Studiul aliajelor se face pe sisteme de aliaje și deoarece diagramele binare sunt cele mai simple, vom începe această discuție cu acestea, iar mai departe pe baza lor vor putea fi înțelese diagrame mai complexe.

Diagramele de echilibru binare se construiesc în coordonate Temperatură – Concentrații și ne indică:

- Domenii de existență ale diferitelor faze ce apar pe diferite intervale de temperaturi și concentrații;
- Temperaturile la care au loc transformări de fază, transformări în stare solidă, precum și punctele critice (temperaturi specifice la care au loc aceste transformări);
- Structura aliajelor;
- Temperaturile la care se pot efectua o serie de tratamente termice;
- Intervalele de temperaturi în care se pot aplica procese de deformare plastică la cald.

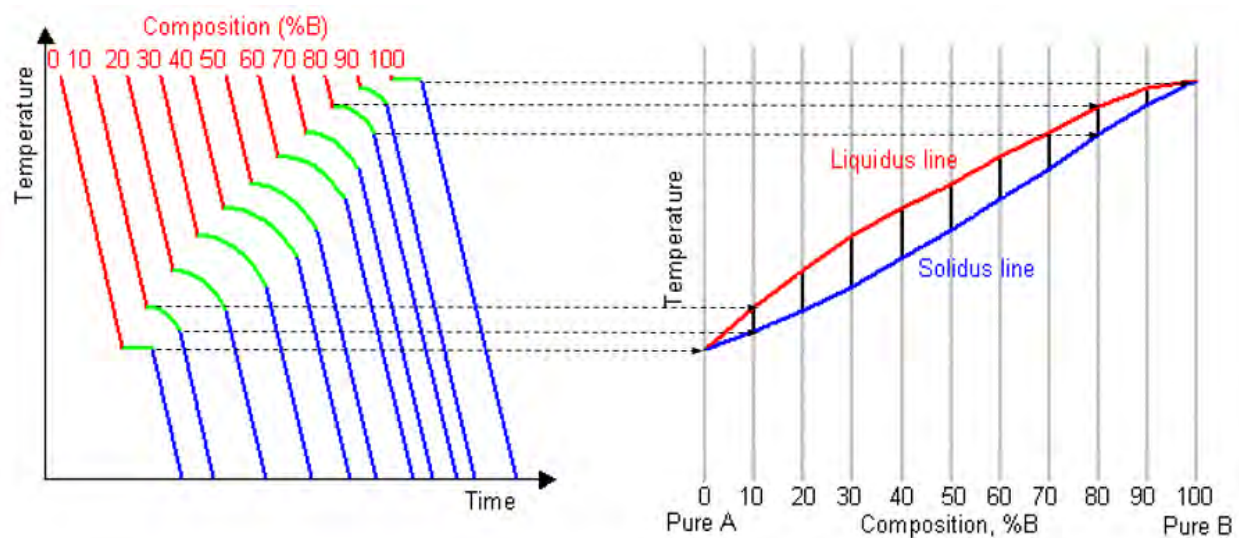


Fig. 99 Construcția diagramei de echilibru binare.

S-a văzut forma curbei de răcire pentru un metal tehnic pur (Fig. 87), și în mod similar se pot trasa curbe de răcire pentru o serie de aliaje formate din componenții notați generic cu A și B, Fig. 99. Spre deosebire de metalele tehnice pure, aliajele cristalizează într-un interval de temperatură și nu la temperatură constantă. Proiectând orizontal cu linie punctată, punctele de început și sfârșit de cristalizare, acestea se vor intersecta cu o serie de drepte verticale, care corespund diverselor concentrații ale aliajelor studiate (ex. 10% B + 90% A). Repetând această operațiune pentru toate aliajele din sistemul de aliaje considerat, se obțin o succesiune de puncte de început, respectiv de sfârșit de cristalizare. Unind punctele de același tip, de exemplu cele de început de cristalizare, se obține curba lichidus (curba de culoare roșie), iar prin unirea punctelor de sfârșit ale procesului de cristalizare, rezultă curba solidus (curba de culoare albastră), Fig. 99.

Astfel, tot ce este situat deasupra curbei lichidus se va afla în fază lichidă, iar tot ce află sub curba solidus se află în stare solidă. Între cele două curbe, vom avea un amestec de faze, respectiv lichid+solid. Diagrama se spune că este de echilibru, deoarece în sistemul termodinamic alcătuit din aliajul studiat temperatura variază foarte lent, astfel că aliajul se află într-o stare de cvasi-echilibru termodinamic. Practic este o aproximare a stării de echilibru termodinamic, deoarece avem variații de temperatură și chiar transformări de fază.

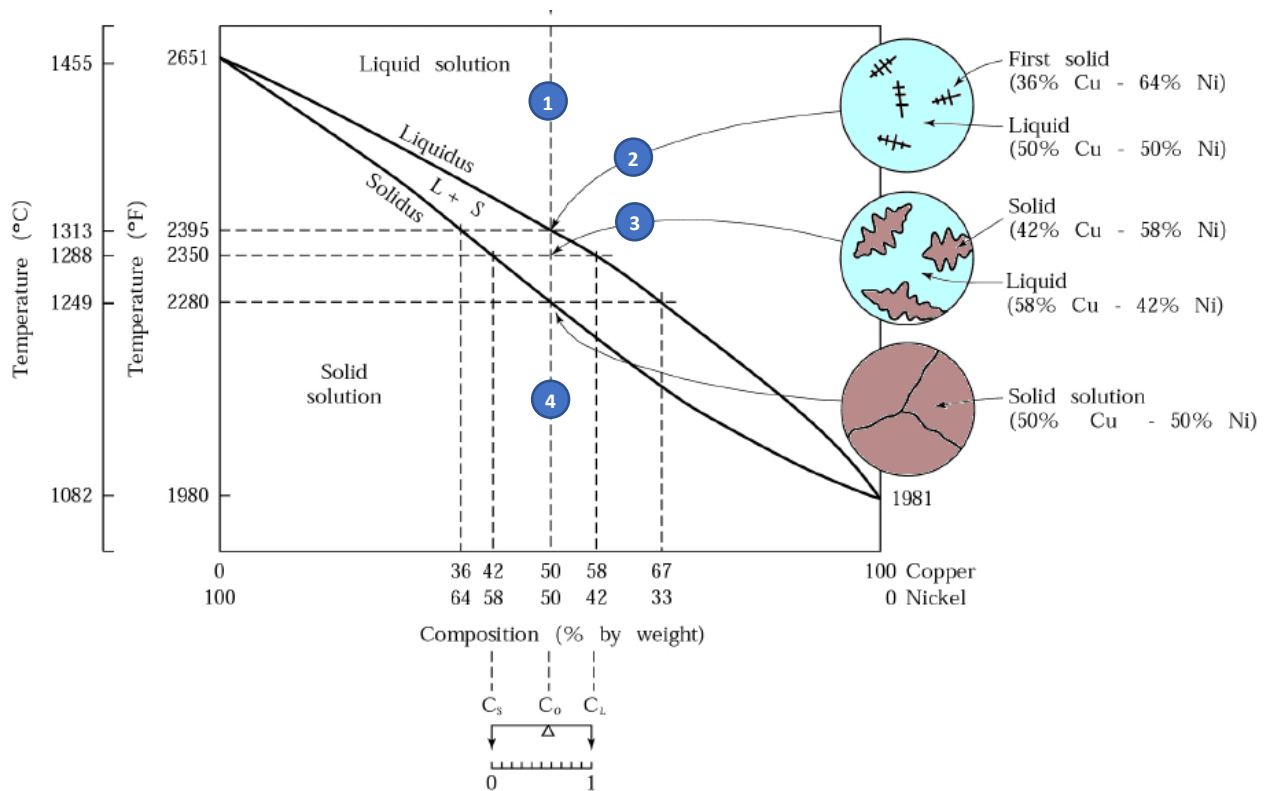


Fig. 100 Diagrama binară de echilibru Cu-Ni [8, 12].

Pentru a înțelege cum se interpretează o astfel de diagramă de echilibru, putem considera exemplul diagramei Cu-Ni, prezentată în Fig. 100. Aliajul considerat are o compoziție masică 50% Cu și 50% Ni și este reprezentat pe diagramă cu o linie verticală aferentă concentrațiilor prezentate, iar în cercurile colorate cu albastru sunt 4 etichete notate de la 1 la 4. Toate aceste etichete se află pe dreapta verticală aferentă aliajului, dar pentru a avea o imagine mai clară, etichetele 2 și 3 au fost așezate pe indicațiile cu săgeți aferente structurilor pe care le prezintă aliajul la temperatura respectivă.

În punctul 1, aliajul este în fază lichidă la o temperatură aproximativă de 1400°C, determinată prin proiecția punctului 1 pe axa verticală a temperaturilor. Pe măsură ce aliajul pierde energie, scade temperatura sa și ne apropiem de curba lichidus, pe care o intersectează în punctul 2. Ne imaginăm un punct virtual care glisează pe axa verticală a aliajului, aflându-se la un moment dat la diferite valori ale temperaturii.

În punctul 2, aliajul începe procesul de cristalizare. În faza lichidă apar germeni de cristalizare, la care încep să se atașeze atomi din topitură, formându-se primele cristale cu structură dendritică, înconjurată de fază lichidă. Dacă în punctul 2 ducem o izotermă, aceasta va intersecta curba lichidus și curba solidus în două puncte diferite. Proiecția punctului de pe curba lichidus pe axa concentrațiilor ne spune care este concentrația fazei lichide, iar proiecția punctului de pe curba solidus pe axa concentrațiilor, ne spune care este concentrația fazei solide care se separă din faza lichidă la acea temperatură. În cazul considerat, pentru punctul 2, faza lichidă are concentrația de 50% Cu și 50% Ni, iar cristalele care se formează au concentrația de 36% Cu și 64% Ni. Se observă o diferență a concentrațiilor dintre cea a fazei lichide, respectiv a fazei solide care se separă din faza lichidă la o anumită temperatură. Această situație este o consecință a faptului că aliajele se solidifică într-un interval de temperatură, pe curba de răcire fiind evidențiate două puncte distincte de temperatură, de început, respectiv de sfârșit de cristalizare.



Dacă am menține un timp nelimitat aliajul nostru la o temperatură cuprinsă între aceste două limite, aliajul va prezenta un amestec de faze L+S pe toată durata respectivă, aflându-se într-o stare de echilibru termodinamic. Practic atomii cu energie mai joasă din topitură se vor atașa la cristalele separate din faza lichidă, iar atomii cu energie mai ridicată la nivelul cristalelor formate, vor trece înapoi în faza lichidă.

Pe măsură ce temperatura aliajului scade, punctul nostru virtual ajunge în poziția indicată de **punctul 3**. În acest punct, faza lichidă are concentrația de 58% Cu și 42% Ni, iar cristalele care se separă vor avea o concentrație de 42% Cu și 58% Ni, mărindu-și dimensiunile corespunzător. Se spune că **faza lichidă se îmbogățește relativ în Cu**. În punctul 2 faza lichidă avea 50% Cu, în punctul 3 crește la 58% Cu, iar în punctul 4 faza lichidă rămasă necristalizată, ajunge la o concentrație de 67% Cu. Îmbogățirea fazei lichide în Cu este relativă, deoarece nu se adaugă Cu în topitură. Concentrația în Cu a fazei lichide crește, deoarece din aceasta se atașează la cristalele formate mai mulți atomi de Ni, decât cei de Cu și astfel în faza lichidă vor rămâne mai mulți atomi de Cu. Efectul acestui proces este că și în interiorul cristalelor formate vom avea o variație a concentrației de Cu și Ni, ceea ce va conduce la un **fenomen de segregare chimică**.

Prin urmare, aliajul nostru studiat va avea întotdeauna, la orice temperatură considerată, o concentrație de 50% Cu și 50% Ni, doar că atomii de Cu și Ni nu sunt uniform repartizați între fazele aliajului, cu excepția fazei lichide, aflate deasupra curbei lichidus care este omogenă. Totodată, înțelegem acum că piesele turnate vor prezenta întotdeauna o neomogenitate chimică indusă de fenomenul de segregare chimică, aspect ce poate avea implicații negative asupra unor proprietăți mecanice sau tehnologice.

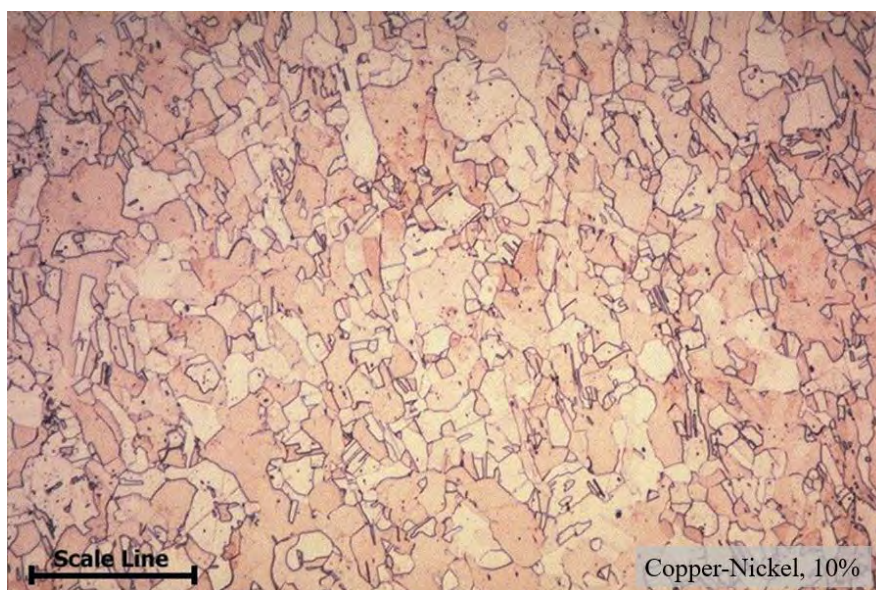


Fig. 101 Microstructura unui aliaj Cu-Ni cu 10%Ni, 90% Cu [10].

Atomii de Ni și Cu având electronegativități și dimensiuni atomice apropiate, respectiv același sistem de cristalizare (c.f.c.), va forma soluții solide omogene **pe toată axa de concentrații**, Fig. 100. Acest tip de soluții solide se numesc **soluții solide izomorfe**, Fig. 101.




Aliajele Cu-Ni posedă o serie de proprietăți interesante, prezintă proprietăți mecanice relativ bune, chiar și la temperaturi mai ridicate, împreună cu o comportare foarte bună în medii corozive, precum apa de mare. Proprietățile lor de rezistență mecanică pot fi îmbunătățite prin adăugarea în compoziția aliajelor a unor elemente de aliere precum: Fe, Mn, Nb, Si, C conform Tabelului 2.

Tabel 2. Aliaje din sistemul Cu-Ni și simbolizarea acestora conform unor norme internaționale.

Diferite aliaje din sistemul Cu-Ni în diferite țări (including ISO)					
Europe <b>EN</b>	Germany <b>DIN</b>	Great Britain <b>BS</b> <sup>2</sup>	France <b>NF</b> <sup>3</sup>	USA <b>UNS</b> <sup>1</sup>	International Standardization <b>ISO</b> <sup>4</sup>
CuNi9Sn2	CuNi9Sn2	-	-	C 72500	CuNi9Sn2
CuNi10Fe1-Mn	CuNi10Fe1Mn	CN 102	CuNi10Fe1Mn	C 70600	CuNi10Fe1Mn
CuNi25	CuNi25	CN 105	CuNi25	C 71300	CuNi25
CuNi30Mn1-Fe	CuNi30Mn1Fe	CN 107	CuNi30Mn1Fe	C 71500	CuNi30Mn1Fe
CuNi30Fe2-Mn2	CuNi30Fe2Mn2	CN 108	CuNi30Fe2Mn2	C 71640	CuNi30Fe2Mn2
CuNi44Mn1	CuNi44Mn1	-	CuNi44	C 72150	CuNi44Mn1
CuNi10Fe1-Mn1-C	G-CuNi10	-	-	C 96200	-
CuNi30Fe1-Mn1-C	-	-	-	-	-
CuNi30Cr2-FeMnSi-C	-	-	-	-	-
CuNi30Fe1-Mn1NbSi-C	G-CuNi30	CN 2	-	C 96400	G-CuNi30Nb

<sup>1</sup>UNS = United Numbering System.  
<sup>2</sup>BS = British Standards.  
<sup>3</sup>NF = Norme Francaise  
<sup>4</sup>ISO = International Organisation for Standardization

O aplicație interesantă a aliajelor Cu-Ni este în domeniul monetăriei. [Monedele realizate din aliaje Cu-Ni](#) au fost folosite pentru prima dată în USA în anul 1865, în prezent moneda Dolar american este placată cu un aliaj cu 75% Cu și 25% Ni, în vreme ce moneda Euro, Francul Elvețian și monedele din Coreea de Sud sunt realizate din aliaje asemănătoare din sistemul Cu-Ni, Fig. 102 și Fig. 103. Există monezi vechi, încă din anul 235 i.e.n. realizate din aliaje Cu-Ni.

 1836 \$2 1/2 Classic Gold Coin PCGS About Uncirculated 50(AU50) CAC <b>\$1,294.00</b>	 1908 \$20 Saint Gaudens No Motto PCGS Mint State 66(MS66) CAC <b>\$5,739.00</b>	 1901 \$10 Liberty NGC MS65 CAC <b>\$4,158.00</b>
---	--	--

**Price** \$7,698.00

Blanchard prides itself on sourcing the highest quality numismatics available anywhere. If there is a coin that you are searching for, contact us today. [Learn more](#)



Greco-Bactrian kings circulated the first copper-nickel coins around 235 B.C.E. Since that time, many civilizations minted durable, corrosion-resistant [coins made from copper-nickel](#).  
 Fig. 102 Monede de colecție din aliaje Cu-Ni ce datează din anul 235 î.e.n. și valoarea lor de piață.



The 1 euro coin is composed of a silver-colored inner section (75% Cu, 25% Ni clad on nickel core) and a copper-colored outer section (75% Cu, 20% Zn, 5% Ni). The 2 euro has a reversed look and somewhat different composition: a copper-colored inner section (75% Cu, 20% Zn, 5% Ni clad on nickel core) and a silver-colored outer section (75% Cu, 25% Ni).

Fig. 103 Monezile în zona Euro, realizate din aliaje Cu-Ni.



Table 2. Vessels constructed with Cu-Ni hulls.

Vessel	Length (m)	Launched	Built	Hull Thickness (mm)	Operating
Asperida II	16	1968	Netherlands	4	USA
Ilona	16	1968	Netherlands	4	Curacao
Copper Mariner	22	1971	Mexico	6	Nicaragua
Pink Lotus/Pink Jasmine/Pink Rose/Pink Orchid	17	1975	Mexico	4	Sri Lanka
Copper Mariner II	25	1977	Mexico	6+2*	Nicaragua
Sieglinde Marie	21	1977	UK	6	UK/Caribbean
Pretty Penny	10	1979	UK	3	UK
Fireboat VF 541	21.5	1984	Italy	6+2*	Italy

6+2\*: 90-10 Cu-Ni clad steel plate



Fig. 104 Vase maritime ce utilizează placarea carenei cu aliaje Cu-Ni.

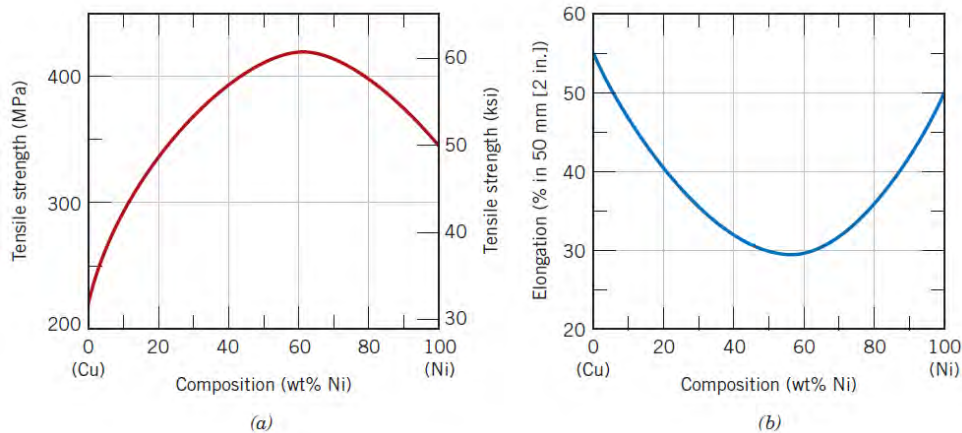


Fig. 105 Proprietățile mecanice ale aliajelor Cu-Ni [8].

În sistemul Cu-Ni de aliaje (Fig. 100), se poate observa că există o solubilitate totală în stare solidă pe toată axa concentrațiilor. Asta înseamnă că se formează o singură soluție solidă omogenă, în care atomii de Cu, cât și cei de Ni se substituie reciproc în rețeaua cristalină. Amintim, că acest tip de soluție solidă se numește soluție solidă izomorfă. Această substituție reciprocă este posibilă datorită faptului că ambii atomi au electronegativități și raze atomice apropiate și posedă același sistem de cristalizare c.f.c. Prin urmare, fiecare component (Cu, respectiv Ni), determină un efect de creștere a rezistenței mecanice prin aliere a soluției solide formate. Rezistența mecanică la tracțiune este maximă pentru aliajul cu 60 %Ni, respectiv alungirea va fi minimă pentru același aliaj, Fig. 105.

## DIAGrame CU FORMARE DE EUTECTIC

Solubilitatea nelimitată în stare solidă (Fig. 100) este o situație rar întâlnită în sistemele de aliaje. Cazul general, este situația în care solubilitatea componentelor variază cu temperatura, dar și cu concentrația componentelor în aliaj. Prin urmare, este și cazul diagramelor binare cu formare de eutectic, Fig. 106.

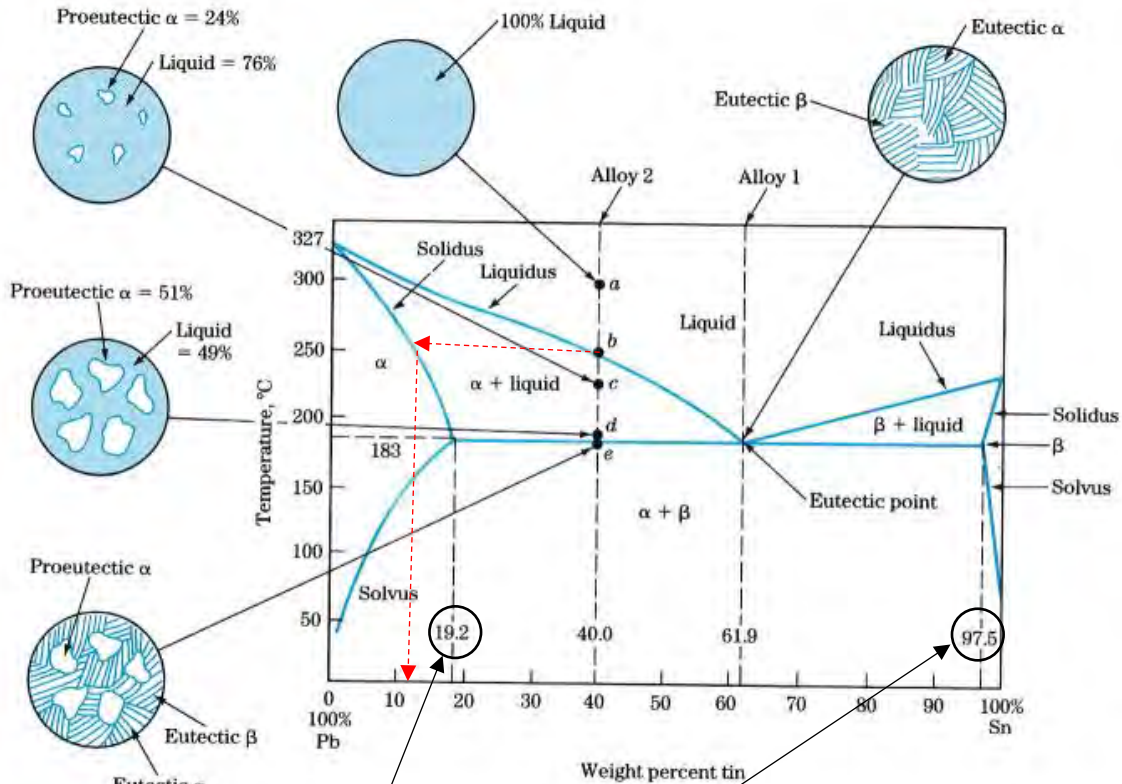


Fig. 106 Diagrame cu formare de eutectic. Diagrama Pb-Sn. Cositorul [8, 12].

Din diagrama de echilibru mai sus, Fig. 106 – cu formare de eutectic, se pot face câteva observații:

- Se formează două soluții solide, notate cu  $\alpha$  (bogate în Pb) și cu  $\beta$  (bogate în Sn) care au un domeniu limitat de existență: soluția  $\alpha$  poate dizolva max. 19.2% Sn la temperatura de 183°C, iar soluția solidă  $\beta$  poate dizolva max. 2.5% Pb la aceeași temperatură;
- La concentrația de 61.9% Sn și temperatura de 183°C, se formează un constituent nou microstructural denumit eutectic și după cum vom vedea în continuare, acesta este un constituent eterogen, adică un amestec mecanic de faze format din  $\alpha + \beta$ ;
- La răcirea în continuare sub temperaturi de 183°C (orizontala transformării eutectice), solubilitatea scade având loc precipitări secundare. Vor precipita faze secundare din stare solidă, respectiv va precipita  $\alpha''$  din soluția solidă  $\beta$  și respectiv, va precipita  $\beta''$  din soluția solidă  $\alpha$  (sub curbele solvus).

Pentru aliajul notat cu Alloy 2 pe diagramă (40% Sn), putem face următoarele observații:

- În punctul a aliajul este în fază lichidă, un amestec omogen de atomi de Pb și Sn (cca. la 300°C);
- În punctul b din fază lichidă se formează primele cristale care sunt de tip  $\alpha$ . Din punctul b, se duce izoterma (săgeata punctată de culoare roșie) până unde intersectează curba solidus. Punctul de intersecție cu curba solidus, ne spune ce fază se separă din fază lichidă, iar proiecția acestuia pe axa concentrațiilor, ne spune ce concentrație are faza respectivă la temperatura considerată.

- În **punctul c** continuă procesul de cristalizare a aliajului, ne aflăm într-un domeniu bifazic  $L + \alpha$ ;
- În **punctul d** suntem ușor deasupra orizontalei eutectice aflată la temperatura de  $183^{\circ}\text{C}$ . Din microstructura aferentă punctului d, observăm că în acest moment din faza lichidă s-au separat cristale de tip  $\alpha$  într-o proporție de 51%, faza lichidă rămasă având o pondere de 49%. Cristalele  $\alpha$  ce s-au separat înaintea transformării eutectice care are loc la temperatura de  $183^{\circ}\text{C}$ , se numesc cristale  $\alpha$  proeutectice.
- În **punctul e**, aflat pe orizontala eutectică la temperatura de  $183^{\circ}\text{C}$ , are loc **reacția eutectică** de formare a unui amestec mecanic de faze, denumit eutectic. Practic, începând din punctul b, soluția lichidă se îmbogățește relativ în Sn, iar la temperatura eutectică ( $183^{\circ}\text{C}$ ), faza lichidă ajunge la concentrația punctului eutectic, adică la 61.9% Sn. În acest moment, faza lichidă rămasă (într-o proporție de 49%), se solidifică la temperatură constantă ca și un metal pur și va forma un eutectic ce va înconjura grăunții de tip  $\alpha$  formați anterior (vezi detaliul asociat cu **punctul e**), Fig. 106.
- La temperatura ambiantă, aliajul considerat va avea o structură formată din cristale de tip  $\alpha$ , înconjurate de eutectic. Cel mai frecvent, eutecticul va prezenta o structură lamelară, Fig. 107.

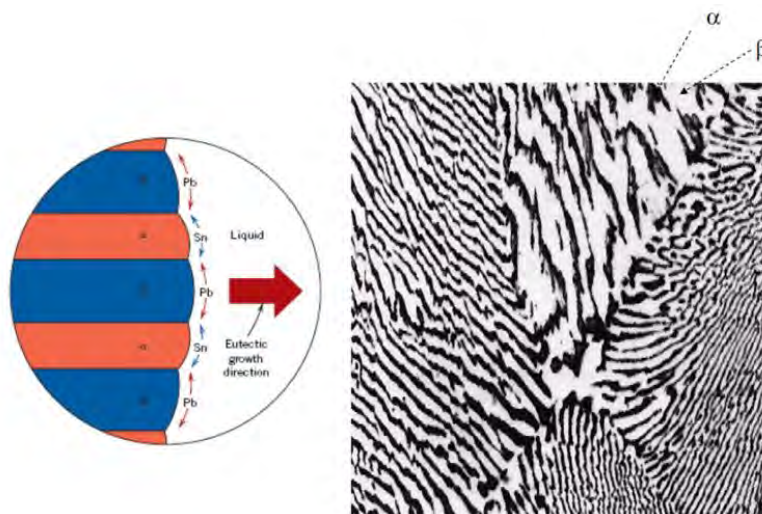


Fig. 107 Aspectul microscopic al eutecticului lamelar ( $\alpha$  – zone întunecate;  $\beta$ – zone luminoase), [după 12].

Aspectul întunecat sau deschis al unor faze sau constituenți microstructurali este dat de tipul reactivilor chimici utilizați pentru a pune în evidență aceste caracteristici microstructurale. În cazul considerat, faza  $\alpha$  este mai întunecată, deoarece reactivul chimic folosit a atacat cu preferință această fază, creând mici adâncituri pe suprafața probei analizate. În microscopia optică, folosind o tehnică de analiză în câmp luminos, aceste denivelări microscopice apar întunecate în câmpul de observație.

**Studiu de caz:** În industria electronică se realizează o serie de circuite electronice, prin lipirea unor componente precum diode, tranzistori, condensatori, rezistente electrice, circuite integrate și alte componente pe o placă ce conține un circuit de cupru, Fig. 108. Aliajele de lipit se aleg în jurul concentrațiilor eutectice, deoarece au punctul de topire cel mai scăzut și reduce riscul apariției unor defecte la lipire.

În ultimele decenii s-au produs cantități impresionante de bunuri ce conțin circuite electronice. După utilizarea lor, multe din aceste produse ajung să fie depozitate în condiții improprie, fapt ce mărește riscul contaminării mediului, a pânzelor freactice cu metale grele, cum ar fi plumbul. Acesta are un efect toxic asupra sănătății oamenilor și animalelor, producând boala de [saturnism](#), motiv pentru care există o [directivă la nivelul UE pentru substituirea Pb](#) cu alte metale în aliajele de lipit.



- In lead-free alloys, here too we have an impressive list:
- Sn100 (232 °C)
  - Sn99.3Cu0.7 (227 °C)
  - Sn96.5Ag3.5 (221 °C)
  - Sn95.5Ag3.8Cu0.7 (217 °C)
  - Sn96.5Ag3Cu0.5 (217-220 °C)
  - Sn96.3Ag3.7 (221-223 °C)
  - Sn95Sb5 (232-240 °C)
  - Sn97Ag0.2Sb0.8Cu2 (220-234 °C)
  - Sn5Pb93.5Ag1.5 (296-301 °C)
  - Sn10Pb88Ag2 (268-299 °C)
  - Sn35Pb65 (247 °C)
  - Sn5Pb92.5Ag2.5 (287-347 °C)
  - Sn40Pb60 (183-238 °C)
  - Sn50Pb50 (183-216 °C)
  - Sn60Pb40 (183-190 °C)
  - Sn63Pb37 (183 °C)
  - Sn62Pb36Ag2 (179 °C)
  - Sn43Pb43Bi14 (144-163 °C)

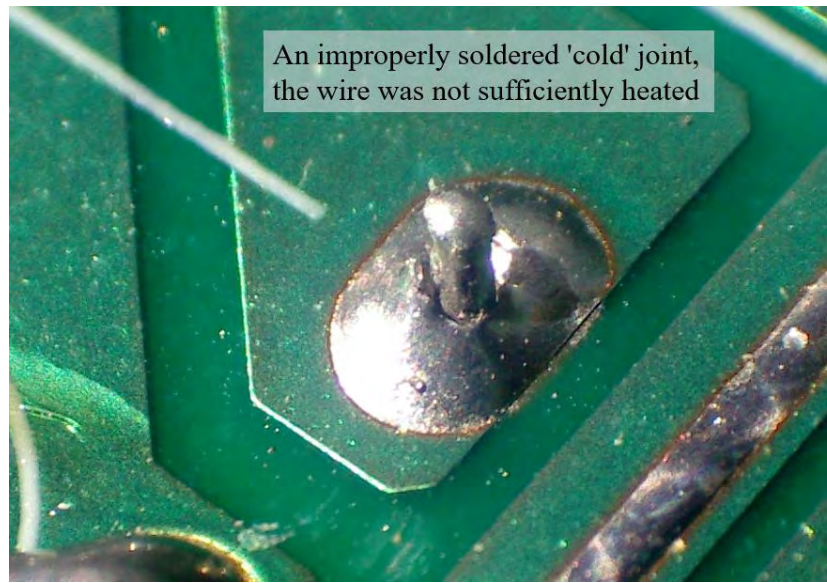


Fig. 108 Lipirea componentelor electronice cu aliaje Pb-Sn sau aliaje înlocuitoare fără Pb ([Directivă Europeană](#)).

DURIFICAREA PRIN PRECIPITARE

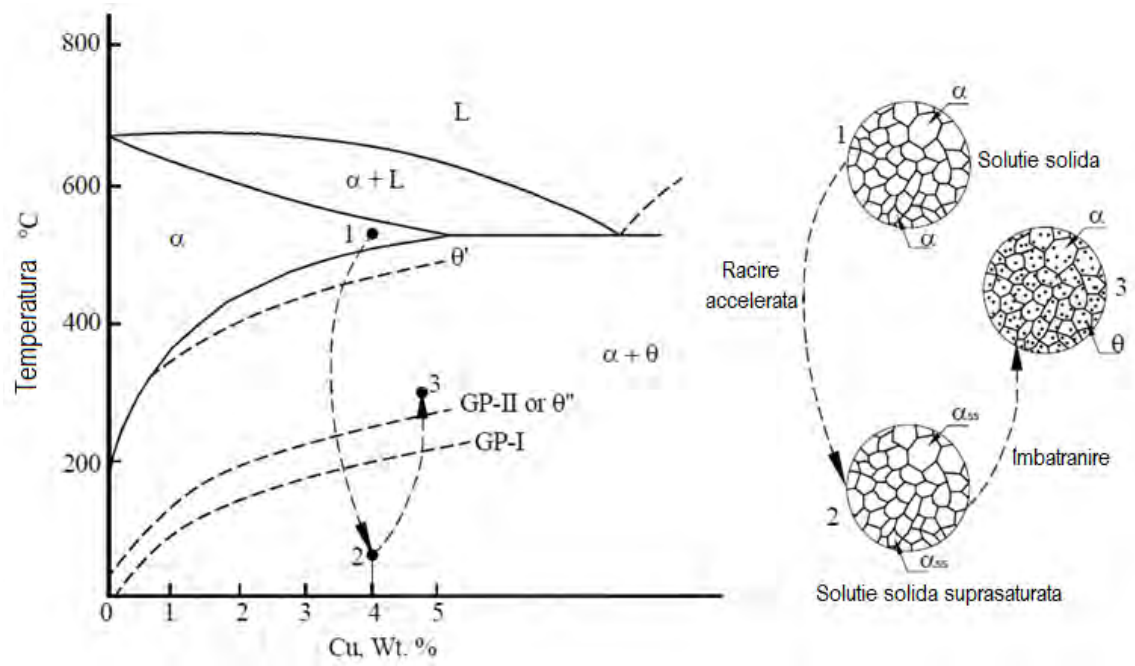


Fig. 109 Principiul durificării prin precipitare. Îmbătrânirea [după 8, 12].

În industrie se folosesc multe aliaje neferoase care au proprietăți remarcabile de rezistență mecanică raportat la greutatea materialului, dar și alte caracteristici importate precum:

- Comportare la fluaj, la temperaturi și sarcini ridicate;
- Tenacitate mare la temperaturi joase, în aplicații criogenice sau în zona Cercului Arctic;
- Prelucrabilitate bună;
- Rezistență înaltă la coroziune, etc.

Aceste proprietăți remarcabile, sunt necesare în industria aerospațială, industria chimică și petro-chimică, industria automotive etc. și se obțin printr-un tratament termic de durificare prin precipitare. Spre exemplu, compusul nestoichiometric  $\text{CuAl}_2$  (există într-un interval de concentrații, vezi Fig. 110), poate conduce la asemenea efecte benefice pentru o serie importantă de aliaje de aluminiu.

## METALLIC MATERIALS - INTERMETALLICS

### • Properties and Applications:

#### • Copper Aluminide ( $\text{CuAl}_2$ )

• Precipitation of the nonstoichiometric intermetallic copper aluminide  $\text{CuAl}_2$  causes strengthening in a number of important aluminium alloys.

• Precipitation hardening – by forming  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) phase in  $\alpha$  matrix, gives high strength and toughness.

#### • Properties:

- High strength (2119:  $\sigma_s$  505 - 520 MPa).
- Good creep strength at high temp.
- High toughness at cryogenic temp.
- Good machinability.

#### • Applications:

- Fuel Tanks (2119)
- Pistons, rivets for aircraft constructions (2024-T4) :  $\text{Al}_2\text{CuMg}$

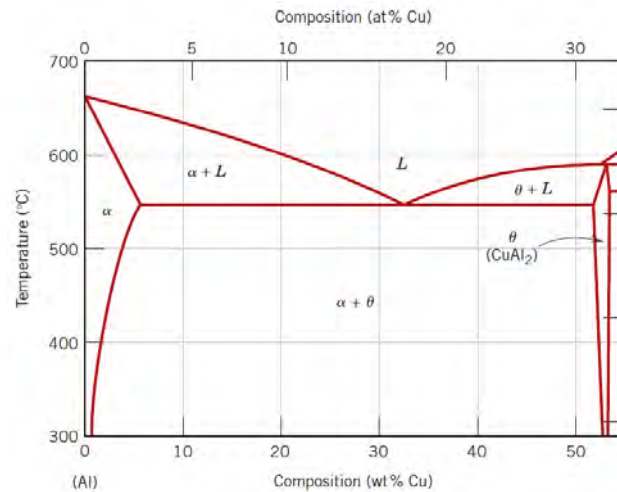
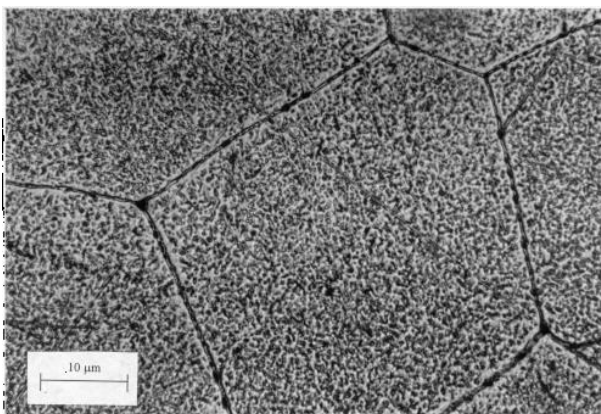


Fig. 110 Compuși intermetalici  $\text{CuAl}_2$  proprietăți și aplicații [12].

Principiul durificării prin precipitare (îmbătrânire) este ilustrat în Fig. 109. Soluția solidă  $\alpha$  este răcită rapid din punctul 1 în punctul 2, ceea ce va conduce la obținerea unei soluții solide suprasaturate în Cu notată cu  $\alpha_{ss}$  conform Fig. 109. Prin aplicarea unei încălziri moderate, corespunzător punctului 3, în grăunții cristalini cu structură  $\alpha$ , va precipita compusul intermetalic  $\text{CuAl}_2$  notat cu  $\Theta$ . Aceste precipitate foarte fine de compus intermetalic  $\text{CuAl}_2$  joacă rolul unor bariere fizice, ce împiedică propagarea dislocațiilor în rețeaua cristalină a fazei  $\alpha$ , durificând astfel aliajul respectiv, Fig. 111.



Precipitatele de  $\text{CuAl}_2$  notate cu  $\Theta$ , sunt de culoare închisă și se poate observa cu ușurință că mărimea acestora este mai mare pe limita grăunților și mai fină în interiorul acestora. Putem să bănuim deja, că toate proprietățile mecanice, tehnologice ale aliajelor durificate depind esențial de mărimea și distribuția acestor precipitate de compusi intermetalici în matricea metalică a grăunților  $\alpha$ .

Fig. 111 Distribuție omogenă a precipitatelor de  $\text{CuAl}_2$  într-un aliaj de aluminiu [8].



**Figure** A transmission electron micrograph showing the microstructure of a 7150-T651 aluminum alloy (6.2 Zn, 2.3 Cu, 2.3 Mg, 0.12 Zr, the balance Al) that has been precipitation hardened.

The light matrix phase in the micrograph is an aluminum solid solution. The majority of the small plate-shaped dark precipitate particles are a transition  $\eta'$  phase, the remainder being the equilibrium  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) phase. Note that grain boundaries are "decorated" by some of these particles. 90,000 $\times$ . (Courtesy of G. H. Narayanan and A. G. Miller, Boeing Commercial Airplane Company.)

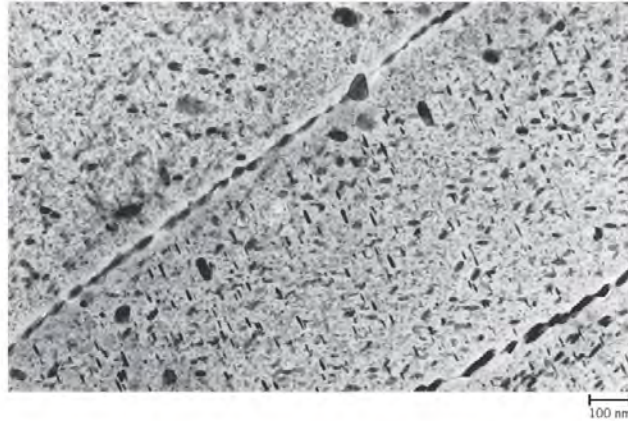


Fig. 112 Detaliu de analiză SEM, privind precipitarea unor compuși intermetalici  $MgZn_2$  într-un aliaj de aluminiu 7150-T651 folosit în industria aerospațială, compania Boeing. Factor de mărire X 90.000 [12].

## DIAGrame CU FORMARE DE PERITECTIC

Reacția eutectică s-a văzut că este o reacție de descompunere la temperatură constantă a unei faze lichide într-un amestec mecanic de faze, Fig. 106.

Reacția peritectică este o reacție de compunere de faze, respectiv reacția dintre o fază solidă și o fază lichidă la temperatură constantă, prin care se formează o fază nouă de compoziție chimică intermediară, Fig. 113.

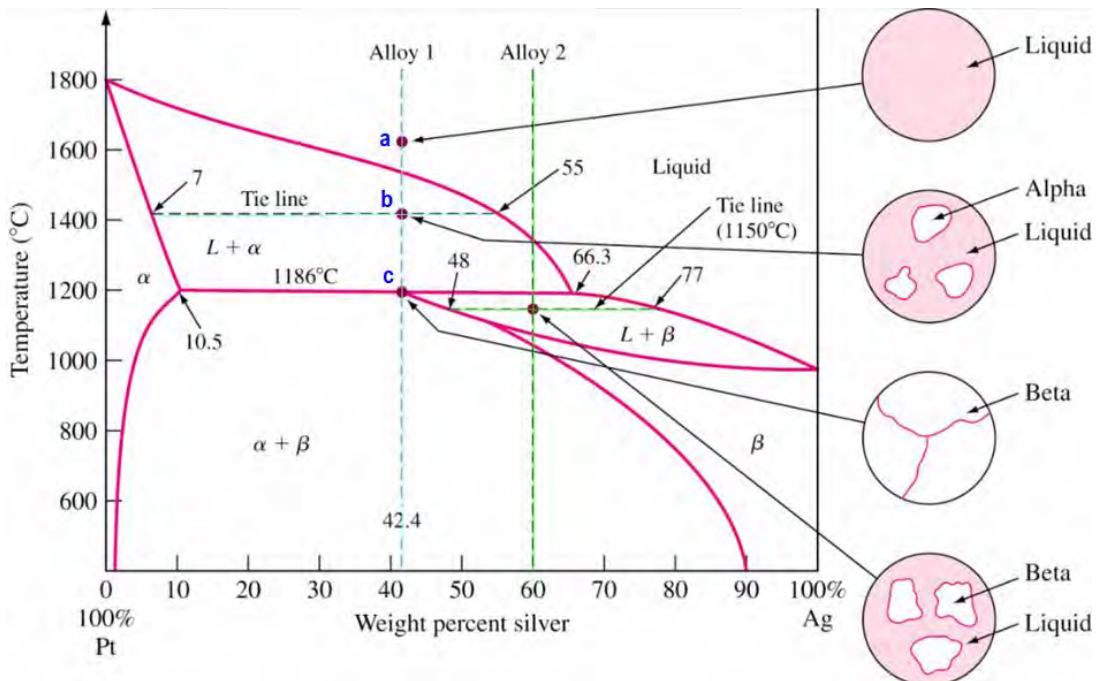


Fig. 113 Diagrame cu formare de peritectic. Diagrama Pt-Ag [8, 12].

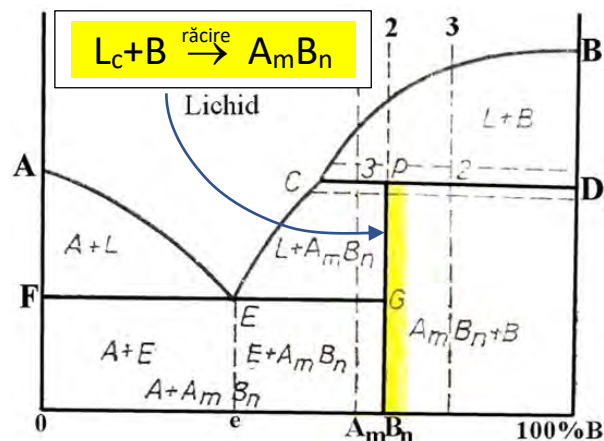
Pentru aliajul notat cu Alloy 1 în Fig. 113, se pot face următoarele observații:

- Aliajul considerat are o concentrație de 42.4% Ag și corespunde concentrației punctului peritectic situat la temperatura de 1186°C și notat cu punctul c pe diagramă;
- În punctul a aliajul se află în fază lichidă omogenă;



- În **punctul b** ne aflăm deja într-un domeniu bifazic ( $L+\alpha$ ), concentrația fazei lichide, respectiv a fazei  $\alpha$  care se separă din fază lichidă la temperatura de cca. 1400°C este dată de proiecția punctelor de intersecție cu izoterma punctului b cu curba lichidus, respectiv solidus;
- În **punctul c**, faza lichidă ajunge la concentrația de 66.3% Ag, iar faza  $\alpha$  la 10.5% Ag. La temperatură constantă, respectiv la 1186°C, faza lichidă se compune cu cristelele  $\alpha$  formate anterior și rezultă o fază nouă notată cu  $\beta$ . La această concentrație specifică, cele două faze ( $\alpha + L$ ) se află exact în cantitățile necesare pentru a forma integral faza  $\beta$ .
- Dacă aliajul nostru va avea o concentrație mai mare de 42.4% Ag, (concentrația punctului peritectic), faza lichidă este în exces, lucru care va conduce la apariția unui domeniu bifazic ( $L + \beta$ ) procesul de cristalizare a fazei lichide rămase după reacția peritectică continuă, formându-se în continuare cristale de tip  $\beta$  (cazul aliajului notat cu **Alloy 2**, cu linie punctată verde, 60% Ag);
- Dacă aliajul nostru va avea o concentrație mai mică de 42.4% Ag, atunci faza  $\alpha$  se află în exces față de raportul peritectic, iar după încheierea reacției peritectice, în structură vom avea grăunți de tip  $\alpha$  care au rămas netransformați și structura finală a aliajului va fi formată din grăunți ( $\alpha + \beta$ ).

Prin reacții peritectice se pot forma și compuși chimici intermetalici, care am văzut deja că sunt importanți în mecanismele de durificare și de creștere a rezistenței mecanice a aliajelor neferoase. Putem avea formarea de compuși chimici cu topire congruentă (cristalizează la temperatură constantă ca și metalele pure, Fig. 116) sau compuși chimici care se descompun la încălzire într-o fază solidă și una lichidă, Fig. 114 (topire necongruentă).



$L_c$  = faza lichidă corespunzător concentrației punctului C;  
B = component metallic;

Fig. 114 Formare de compuși chimici  $A_mB_n$  cu topire necongruentă prin reacție peritectică, caz teoretic.

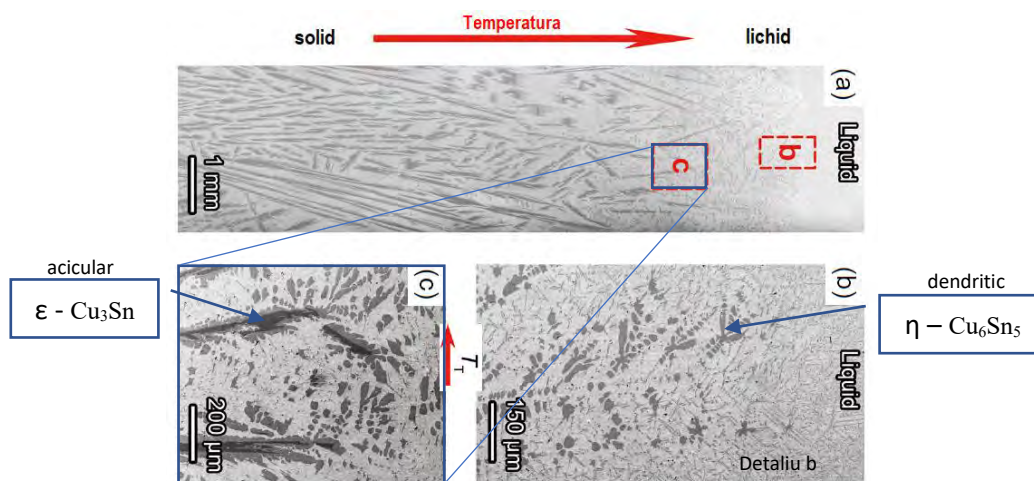


Fig. 115 Formare de compuși chimici  $\epsilon - Cu_3Sn$  și  $\eta - Cu_6Sn_5$  prin reacție peritectică din sistemul Cu-Sn [sursa].

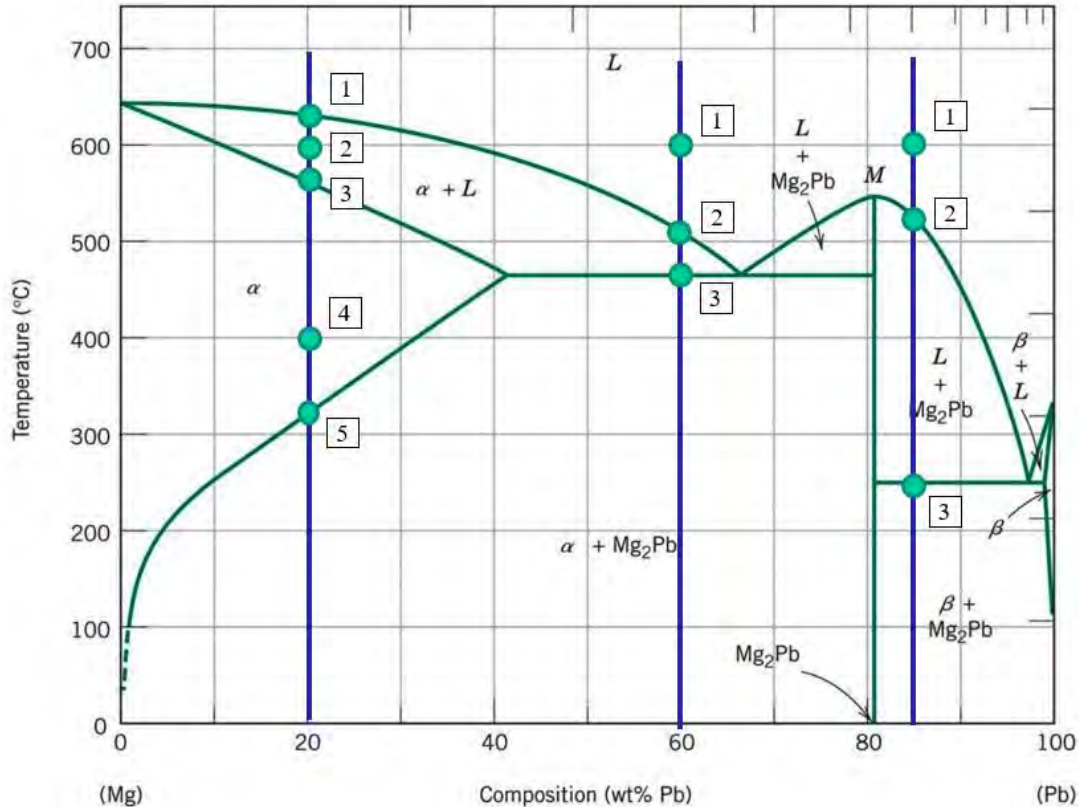


Fig. 116 Formare de compuși chimici  $Mg_2Pb$  cu topire congruentă, diagrama echilibru Mg-Pb.

Studii de caz: Din exemplele prezentate mai jos în Fig. 117, se poate observa că compuși intermetalici, precum  $MgSi_2$ ,  $TiAl$ ,  $Ni_3Al$  contribuie esențial la îmbunătățirea unor caracteristici de exploatare: rezistență la oxidare, rezistență la coroziune, creșterea rezistenței mecanice la aliaje cu greutate specifică redusă în diverse aplicații de mare performanță (aeronautic, industria energetică, reactoare nucleare, componente motoare, industria automotive etc).

#### METALLIC MATERIALS - INTERMETALLICS

##### • Properties and Applications:

##### • Al-Mg-Si Alloys ( $Mg_3Si$ )

- Mg and Si are added in balanced amount to form  $Mg_3Si$ .
- $Mg + Si$  (0.8-1.2%) ;  $Mg + Si$  (> 1.4%)

##### • Properties:

- Medium-strength structural alloys (most widely used 6063-T6,  $\sigma_y$  215 MPa,  $\sigma_u$  245 Mpa).

- Readily extruded
- Colour anodized.

##### • Applications :

- Car bodies, Electric trains (6009)
- Structural Components (6061)
- Satellite dish (6005)
- Large water pipes (6063)
- Aircraft, Automotive (6013 – T6,T8)



#### METALLIC MATERIALS - INTERMETALLICS

##### • Properties and Applications:

##### • TiAl and Ni3Al (Nickel base superalloys)

##### • Properties:

- TiAl and Ni<sub>3</sub>Al possess good combinations of high-temperature mechanical properties and oxidation resistance up to approximately 650 - 960°C.
- Good Toughness and Corrosion resistance.

##### • Applications:

- Aircrafts, space vehicles, rocket engines
- Industrial gas turbines (IN 738LC).
- Nuclear reactors, submarines.
- Steam power plants, petrochemical equipment.
- Combustion Engine Exhaust Valves
- Submarines



Fig. 117 Aplicații ale compușilor intermetalici  $MgSi_2$ ,  $TiAl$ ,  $Ni_3Al$  în diverse sectoare performante.





## DIAGrame CU FORMARE DE PERITECTOID

Reacția peritectică s-a văzut că este o reacție de compunere la temperatură constantă dintre o fază lichidă și una solidă, prin care se formează o fază nouă de compoziție intermediară, [Fig. 113](#).

**Peritectoidul este o reacție de compunere între două faze solide, rezultând o fază nouă de compoziție intermediară.** Trebuie reținut deasemenea, faptul că reacția peritectoidă este o reacție în stare solidă, Fig. 119.

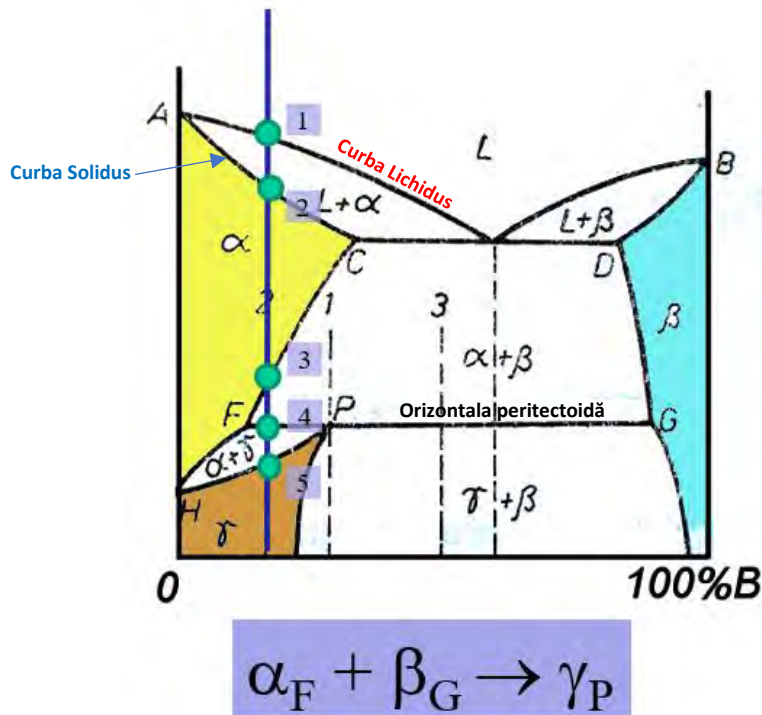


Fig. 119 Diagrame de echilibru cu transformări în stare solidă. Diagrama cu peritectoid. Caz teoretic.

Cristalizarea aliajului începe în **punctul 1**. Din faza lichidă se separă primele cristale, (faza  $\alpha$ ).

Între **punctele 1-2** există un domeniu bifazic: **faza  $\alpha$**  și **fază lichidă** ce înconjoară cristalele formate deja.

În **punctul 2** se încheie procesul de cristalizare primară, aliajul este complet solidificat și este format integral din **faza  $\alpha$** . Structura este columnar dendritică de solidificare.

În **punctul 3** datorită scăderii solubilității atomilor B în **faza  $\alpha$** , se separă la limita grăunților  $\alpha$  faza secundară  $\beta$ . Difuzia atomilor fiind limitată în stare solidă, **faza  $\beta$**  este foarte fină și o regăsim în jurul grăunților de tip  $\alpha$ . Pentru observație, necesită mărimi mari la microscopie optică/electronică.

În **punctul 4**, are loc reacția peritectoidă. **Faza  $\alpha$**  se află în exces și va reacționa cu **faza  $\beta$**  la temperatură constantă. Se formează **faza  $\gamma$**  prin compunerea dintre **faza  $\alpha_F$**  și **faza  $\beta_G$** . Faza  $\alpha$  fiind în exces se trece într-un domeniu bifazic  $\alpha + \gamma$  (între **punctele 4-5**). Continuă transformarea fazei  $\alpha$  în faza  $\gamma$ , până în **punctul 5** când această transformare este completă, întreaga structură a aliajului fiind formată din **fază  $\gamma$** .

NOTĂ: Fazele secundare în urma transformărilor în stare solidă, conduc la faze noi care au o morfologie mult mai fină comparativ cu cea a fazelor primare de transformare, datorită mobilității mai reduse a atomilor în starea solidă față de cea lichidă.

## DIAGrame TERNARE

În capitolul anterior s-au văzut o serie de diagrame de echilibru, necesare pentru a putea înțelege diagrame mai complexe din diferite sisteme de aliaje binare (cu doi componenți). Mai jos este prezentată schematic o diagramă de echilibru ternară (cu trei componenți), cu formare de eutectic, Fig. 120. Este evident că creșterea numărului de componenți complică extrem de mult construcția diagramelor de echilibru după metodele deja prezentate.

Se pot construi diverse secțiuni izoterme în astfel de diagrame cu mai mulți componenți, pornind de la calcule termodinamice complicate și folosind programe software specializate (ex. [Thermo Calc Software](#), [ACERS-NIST Phase Equilibrium Diagram](#), [ThermoCalc](#), [Theriak Domino](#) și altele. Aceste probleme rămân în seama cercetătorilor din domeniul ingineriei materialelor și în continuare vom aborda o diagramă esențială de echilibru în inginerie și anume diagrama fier-carbon.

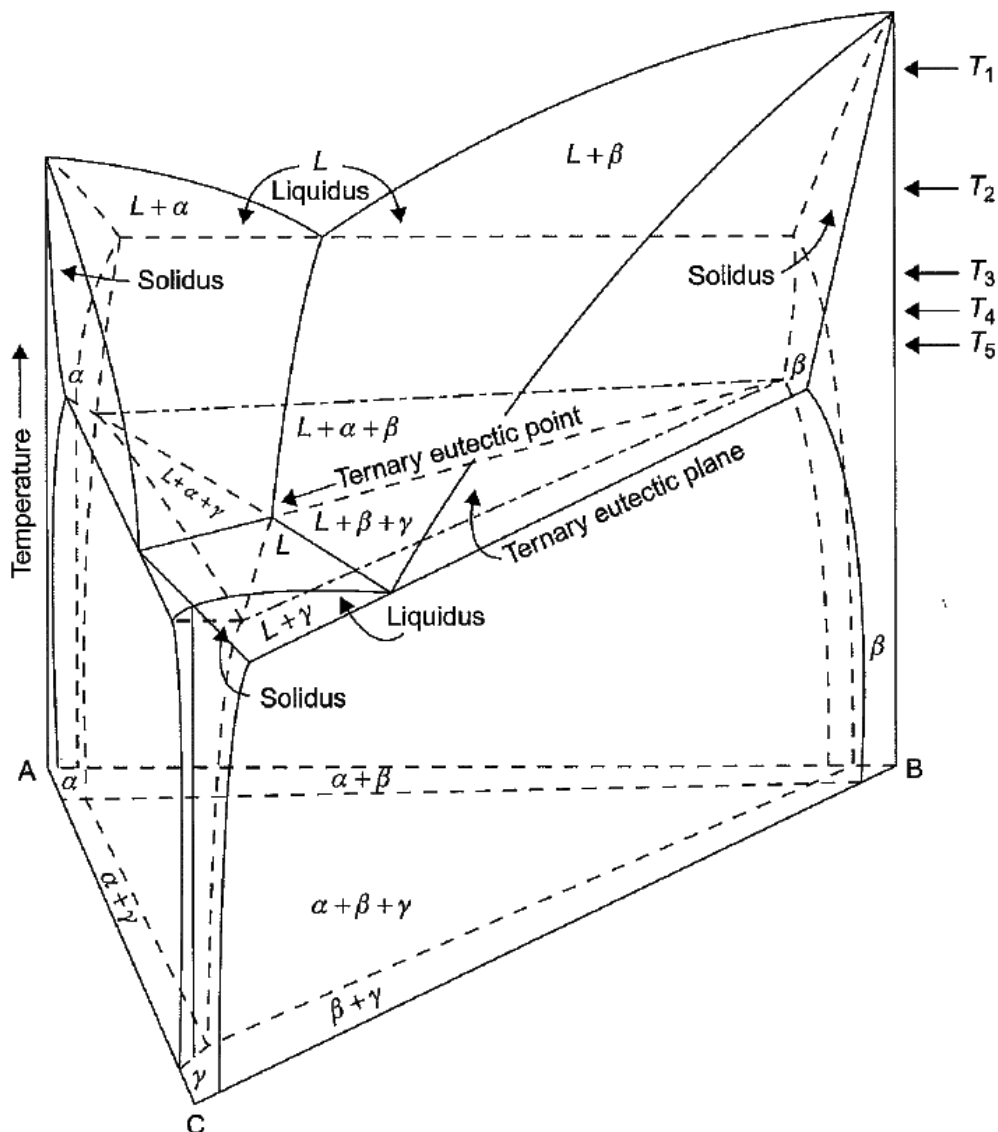


Fig. 120 Diagrame de echilibru ternare cu formare de eutectic ternar [după 8, 12].

## CURS 5 DIAGRAMA FIER-CARBON

### NOȚIUNI INTRODUCTIVE. CARBONUL

Din exemplele și studiile de caz prezentate până acum, s-a văzut că există o diversitate foarte mare de materiale folosite în aplicațiile ingineresti și cu o paletă foarte largă de proprietăți. Clasa materialelor metalice conține numeroase metale și aliaje ce sunt folosite în aplicațiile curente. Din această categorie, oțelurile ocupă un loc special, datorită caracteristicilor de rezistență foarte bune, formabilității lor ridicate și posibilităților nenumărate de a configura combinații de proprietăți. Așa după cum vom vedea mai detaliat în acest capitol, oțelurile sunt aliaje fier-carbon ce pot să conțină și o serie de elemente de aliere pentru îmbunătățirea proprietăților acestora.

Carbonul poate fi considerat un element metaloid, deși departajarea în [Tabelul Periodic al Elementelor](#) îl așează în grupa elementelor nemetalice, [Fig. 95](#). Ca și răspândire/abundență pe pământ ocupă locul 15 și locul 4 în univers după hidrogen, heliu și oxigen. Datorită capacității carbonului de a forma legături covalente cu alte numeroase elemente chimice, este esențial la toate clasele de materiale pe care le cunoaștem, dar și la formele de viață cunoscute. Carbonul reprezintă [18.5% din masa corpului uman](#), al doilea element ca și pondere după oxigen. Nu întâmplător se afirmă [viață pe bază de carbon](#) și există o departajare a compușilor în chimie în compuși organici și anorganici în funcție de prezența sau absența carbonului în structura compusului. Se cunosc mai multe structuri formate din carbon, acestea având proprietăți extrem de diferite, Fig. 121.

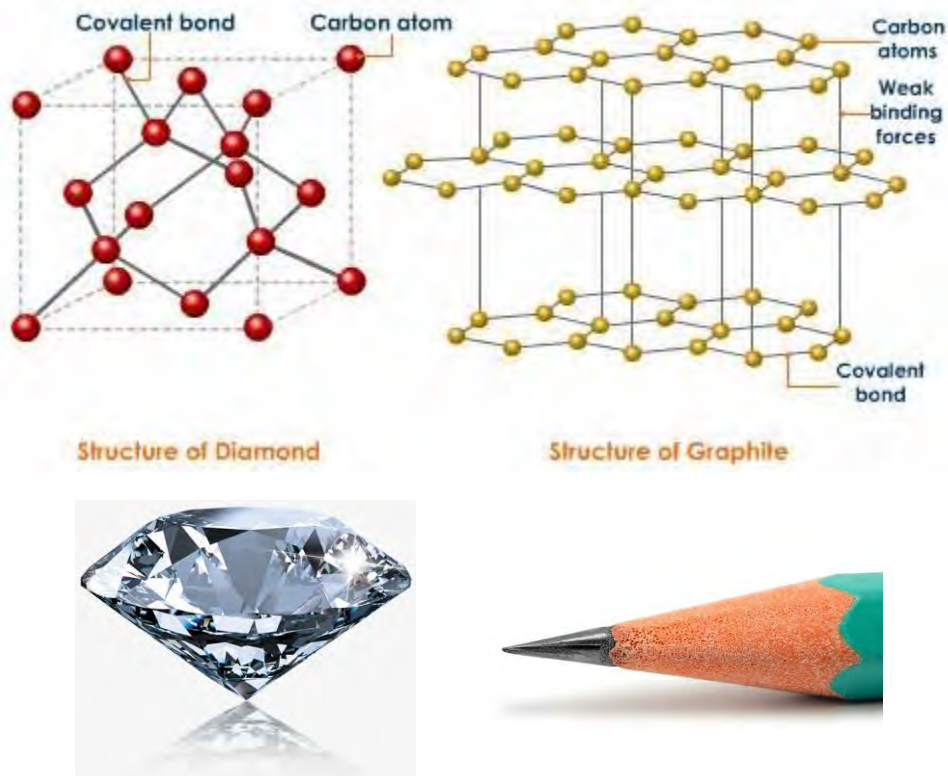


Fig. 121 Structura de diamant și de grafit. Carbon.

Diamantul are punct de topire foarte înalt ( $4000^{\circ}\text{C}$ ), sublimază la presiuni obișnuite, este foarte dur și nu conduce curentul electric (electronii sunt puternic legați prin legătura covalentă, structură tip diamant).



Poate cel mai cunoscut exemplu, este cel al diamantului și grafitului prezentat în Fig. 121. Ambele reprezintă structuri formate din atomi de carbon, dar cu proprietăți de rezistență, duritate extrem de diferite.

Grafitul este o formă alotropică a carbonului cu structură cristalină hexagonală, Fig. 121. Temperatura de topire este de cca.  $\sim 3.850^{\circ}\text{C}$ . Grafitul ca și diamantul, la presiune normală sublimază. Grafitul este moale, lipsit de rezistență, prezența sa într-o matrice metalică produce o întrerupere a continuității acesteia, generând efect specific de crestare, în vreme ce diamantul se află la polul opus, fiind extrem de dur [movie], confecționându-se o serie de scule diamantate ce lucrează în condiții de exploatare extrem de dificile. Grafitul este rezistent la șoc termic și are conductivitatea termică și electrică foarte bună, fapt ce-l recomandă de exemplu la construcția cuptoarelor cu arc electric în industria metalurgică [movie].



Fig. 122 Scule diamantate folosite în ingineria fabricației.

Până în anii 1980 se cunoșteau trei tipuri de structuri de carbon: grafit, diamant și carbon amorf. Ulterior, prin utilizarea microscopiei electronice au fost puse în evidență și alte structuri pe bază de carbon: molecula de fularenă  $\text{C}_{60}$ <sup>6</sup>, iar în anul 1991, cercetătorul japonez [Sumio Iijima](#) sintetiza pentru prima dată nanotuburi de carbon, fapt ce a condus la apariția de noi științe și tehnologii, precum nanotehnologia.

Forme alotropice ale carbonului: **Grafit și Diamant** (Fig. 121), **Fularena** (Fig. 123), **Nanotuburi de carbon** (Fig. 124) și **Grafena** (Fig. 125).

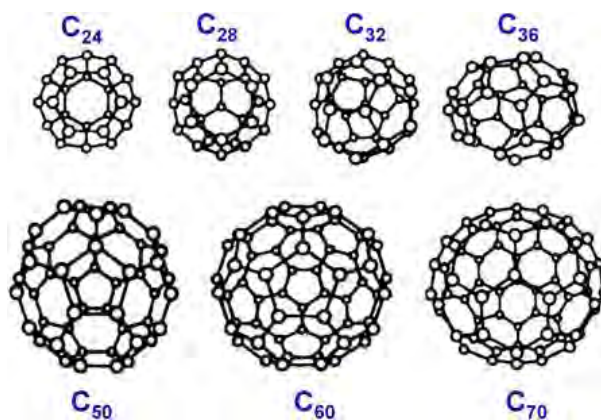


Fig. 123 Molecule de fularenă.

<sup>6</sup> În prezent există peste 30 de tipuri de molecule fularenă:  $\text{C}_{60}$ ,  $\text{C}_{70}$ ,  $\text{C}_{84}$ ..., ([A History of Carbon Nanotubes](#))

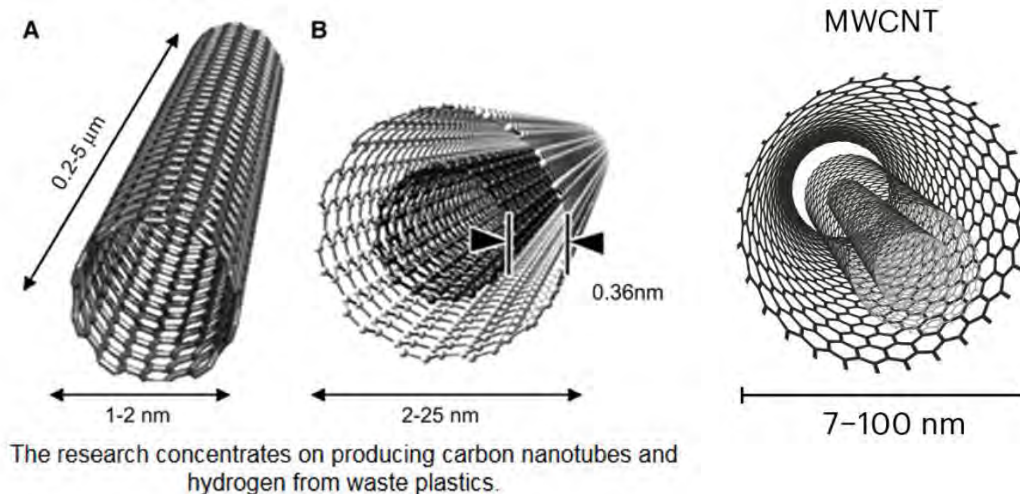


Fig. 124 Nanotuburi de carbon: A – single wall; B – multi-walled.

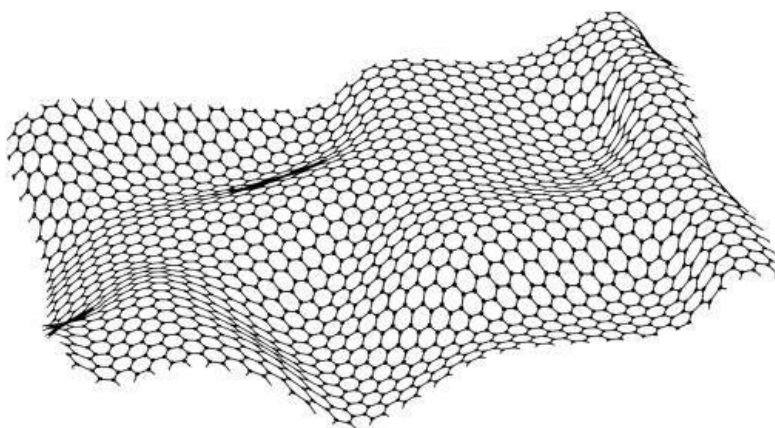


Fig. 125 Layer de grafenă. [Aplicații militare pentru materiale antioglont](#) (bullet proof).

Nanotuburile de carbon (NCT) sunt extrem de rezistente și foarte flexibile. Au proprietăți mecanice și electrice foarte bune, iar domeniul lor de aplicații este nelimitat. De exemplu se pot realiza display-uri flexibile care se pot deforma și integra în articole de îmbrăcăminte. NCT vor revoluționa industria electronică, înlocuind tranzistorii pe bază de Si în chip-uri, care în prezent se apropie de limita performanței fizice a acestor semiconductori (dimensiuni, disiparea căldurii, efecte cuantice).

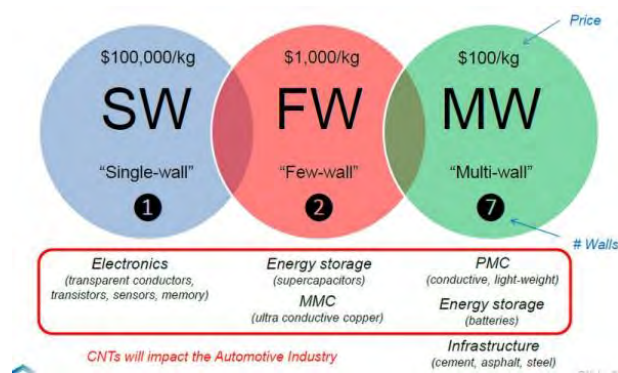


Fig. 126 Costul de producere a nanotuburilor de carbon: SW – single wall; FW – few wall; MW – multi wall.

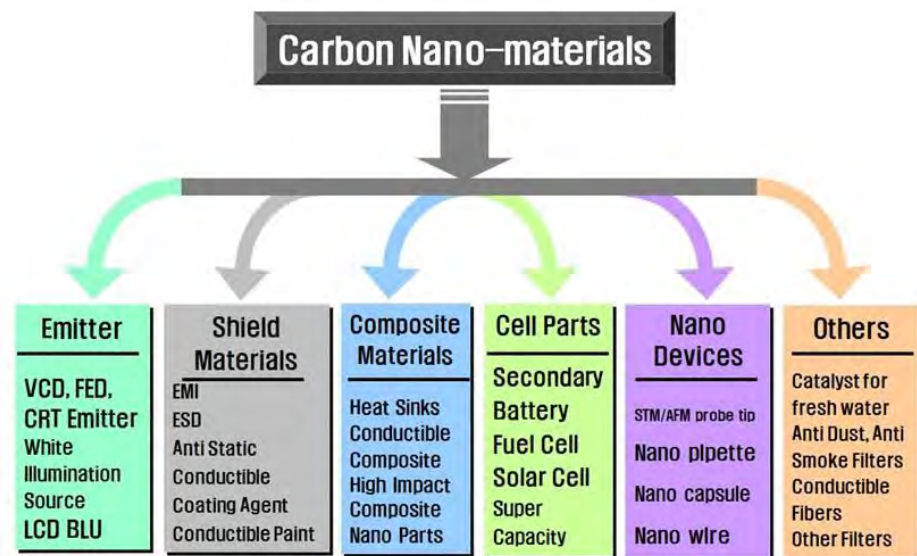
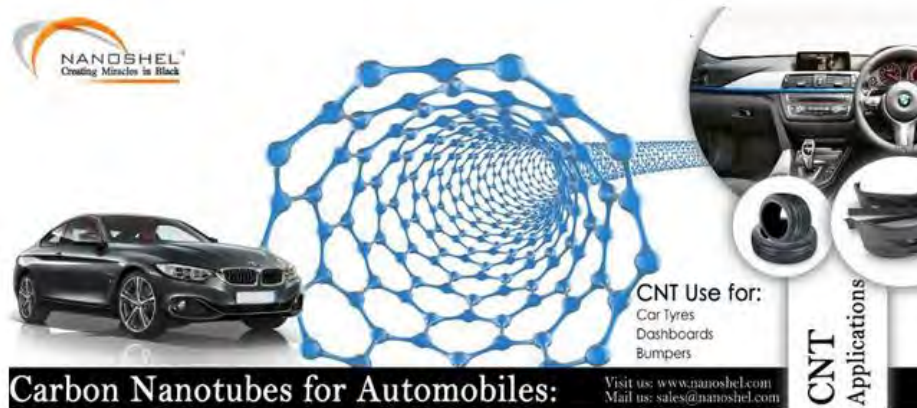


Fig. 127 Aplicații ale nanotuburilor de carbon în industria automotive [movie].

Nu este deloc lipsit de interes faptul că o [echipă de cercetători de la Universitatea din Dresden](#) au descoperit atât cementită, cât și nanotuburi de carbon în structura oțelului dintr-o sabie de Damasc din sec. XVII, ceea ce explică proprietățile remarcabile ale acestor oțeluri de înaltă rezistență [11].

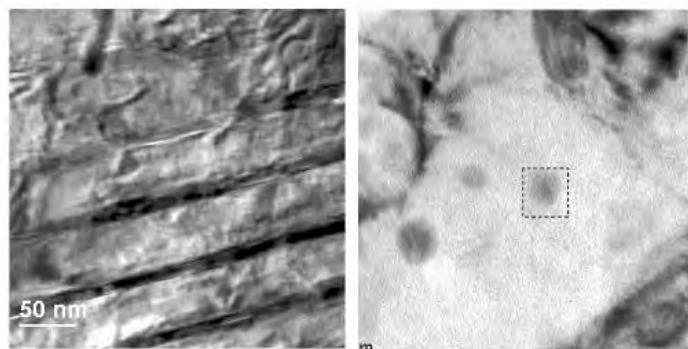


Fig. 1. TEM image of cementite nanowires in a Damascus sabre. Left panel: The dark stripes indicate wires of several hundreds nanometers in length. Right panel: View showing an almost circular cross section (dotted)

Fig. 128 Microscopie SEM de înaltă rezoluție ce ilustrează formațiuni nanometrice de cementită [11].



# DIAGRAMA Fe-Fe<sub>3</sub>C. OȚELURI

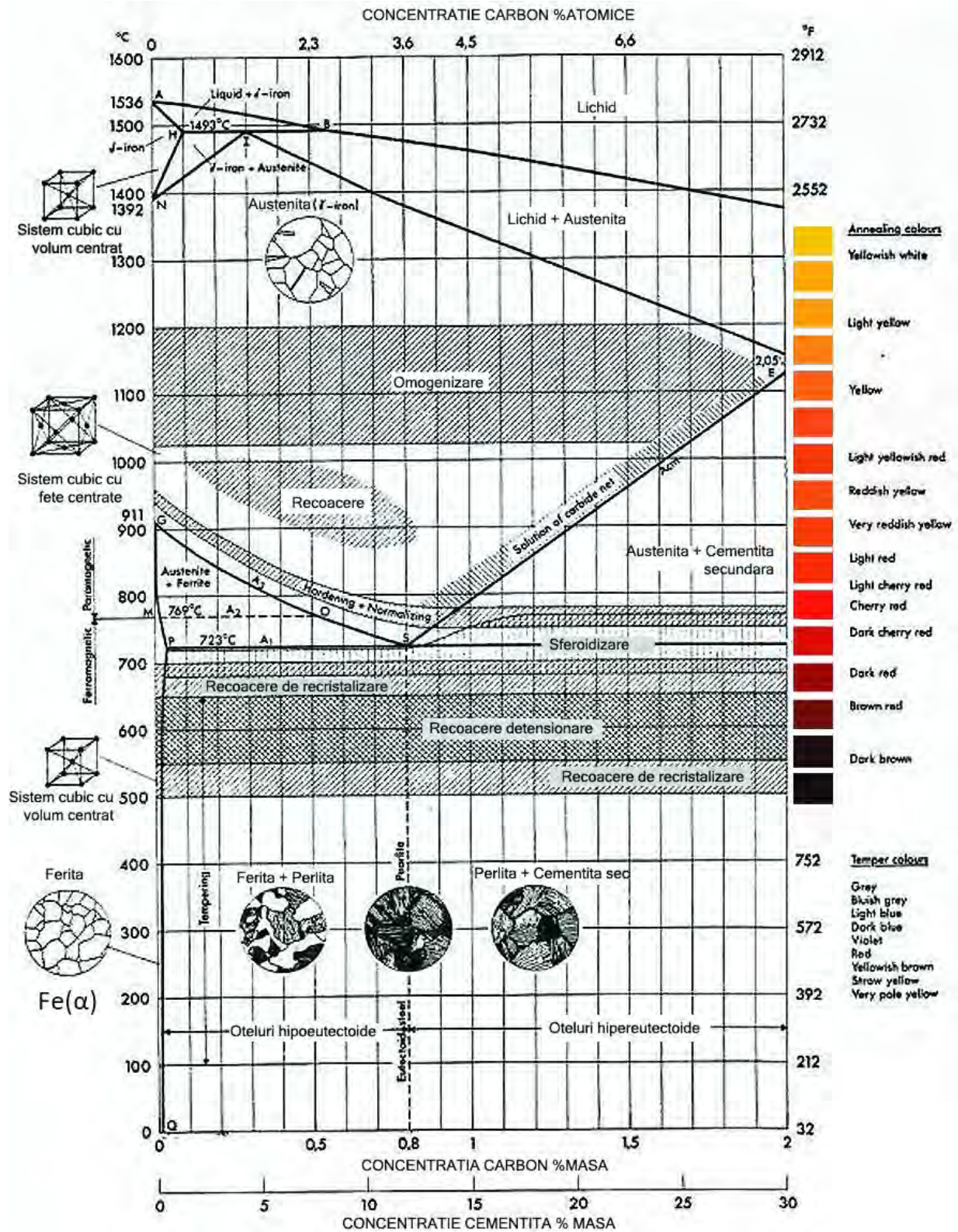


Fig. 129 Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C. Oțeluri.

Oțelurile sunt aliaje fier-carbon, cu max. 2,11% C care conțin impurități precum Si, Mn, P, S. În plus, pot să conțină și alte elemente de aliere Cr, Ni, V, Ti, Mo, etc. Caracteristica principală a oțelurilor este deformabilitatea plastică la rece și la cald prin diverse procedee de deformare plastică. Varietatea mare de proprietăți este determinată de compoziția chimică și de modul de procesare: plastică, termică sau termochimică. Comportarea oțelurilor la deformarea plastică, la tratamentul termic / termochimic sau la prelucrări mecanice, la sudare, este determinată de compoziția chimică și de modul de elaborare. Pentru a înțelege modul cum sunt controlate și obținute aceste proprietăți mecanice și tehnologice ale oțelurilor, trebuie să înțelegem înainte diagrama Fe-C.

Așa cum am văzut mai devreme în cazul carbonului și fierul prezintă mai multe stări alotropice în funcție de temperatură, aspect ilustrat în Fig. 130.

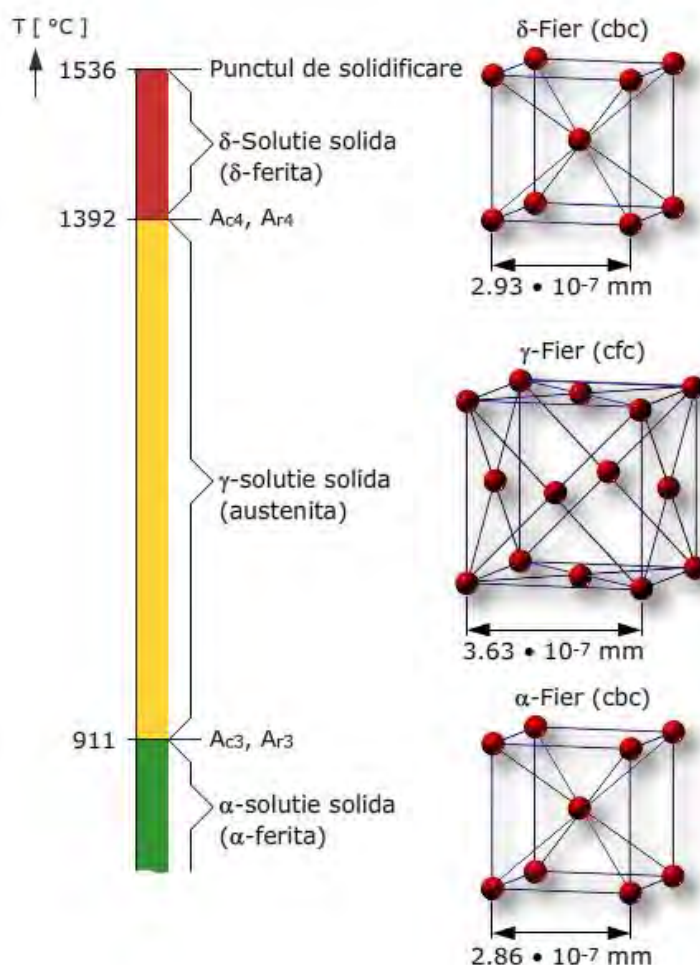


Fig. 130 Transformările alotropice ale fierului [8, 12].

Soluția solidă  $\alpha$  (ferita) este stabilă termodinamic de la temperatura camerei până la temperatura de 911°C. Ferita prezintă un sistem de cristalizare cubic cu volum centrat.

Soluția solidă  $\gamma$  (austenita) are o structură cubică cu fețe centrate pe intervalul de temperaturi cuprins între 911-1392°C.

Soluția solidă  $\delta$  prezintă o structură cubică cu volum centrat și cristalizează din fază lichidă, fiind stabilă termodinamic până la temperatura de 1392°C. Transformările alotropice sunt guvernate de variația energiei libere ale grăunților cristalini ce prezintă diferite structuri cristaline la un moment dat.



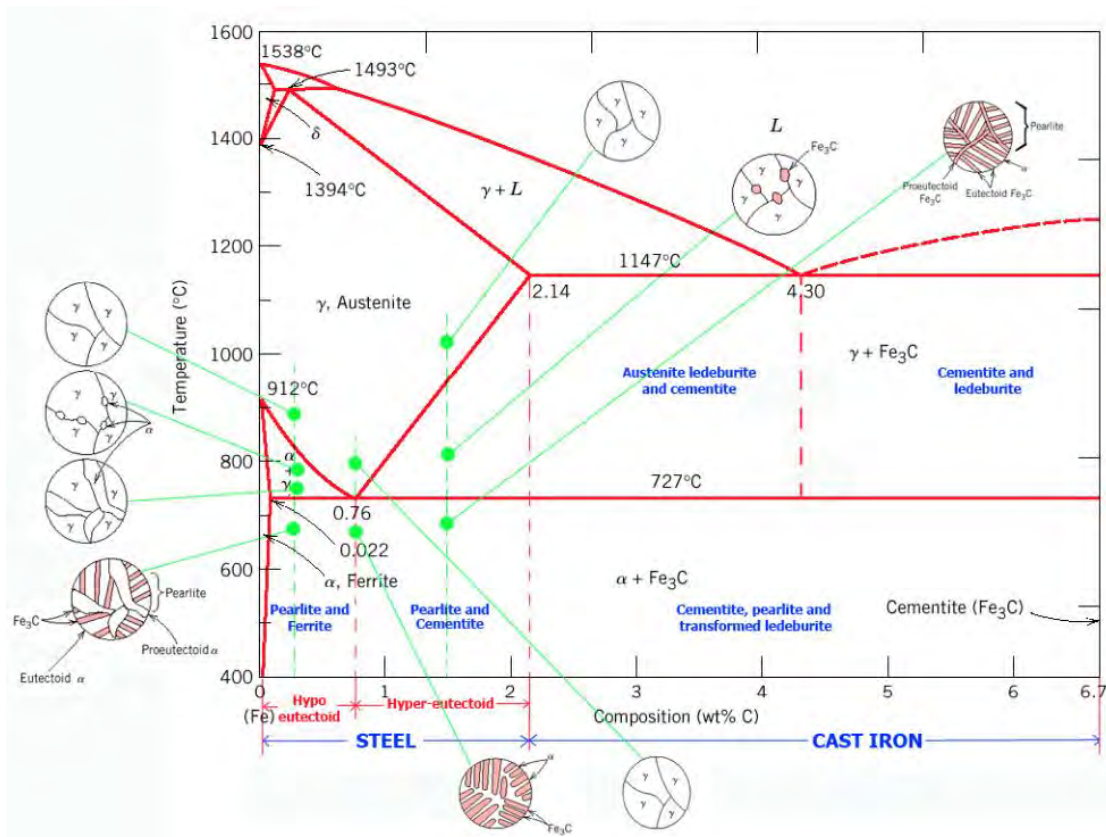


Fig. 131 Clasificare oțeluri, fonte. Constituienți microstructurali [8].

În diagrama Fe-C (Fig. 131) carbonul poate să se prezinte sub două forme elementare:

- carbon liber, sub formă de grafit, de ex. în cazul fontelor cenușii (de turnătorie);
- legat chimic, parte din compusul chimic ( $Fe_3C$ ), cunoscut sub denumirea de cementită.

Ca urmare se disting două diagrame de echilibru în sistemul Fe-C:

- diagrama de echilibru **stabilă** sau Fe-grafit ;
- diagrama de echilibru **metastabilă** sau diagrama Fe- $Fe_3C$  (Fig. 131).

Aliajele cu un conținut de carbon până la 2.11% se numesc oțeluri, iar cele cu conținut de carbon între 2.1 și 6,67% se numesc fonte. În funcție de conținutul de carbon, oțelurile se numesc:

- hipoeutectoide, cu conținut de C până la 0,8%;
- eutectoide, cu  $C = 0,8\%$  ;
- hipereutectoide, cu conținut de C peste 0,8% până la 2.1%.

Dacă privim cu atenție diagrama Fe- $Fe_3C$  din Fig. 131, putem remarca că este practic formată din trei tipuri de diagrame de echilibru pe care le-am studiat deja: diagrama cu peritectic ( $1493^\circ C$ ), diagrama cu eutectic ( $1147^\circ C$ ) și diagrama cu eutectoid ( $727^\circ C$ ).

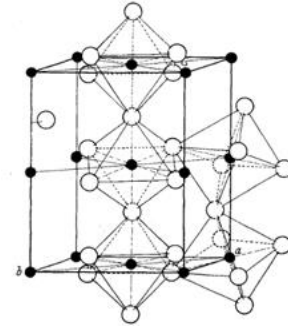
Constituții microstructurali ai aliajelor Fe-  $Fe_3C$  sunt :

- **Ferita** sau  $Fe(\alpha)$  este o soluție solidă de inserție a carbonului în rețeaua fierului, are rețea cristalină cubică cu volum centrat (cvc). La temperatura de  $727^\circ C$ ,  $Fe(\alpha)$  dizolvă  $0,02\% C$  și este feromagnetică până la  $770^\circ C$ . Este un constituent moale, cu plasticitate ridicată, având proprietăți aproape identice cu cele ale fierului tehnic pur;

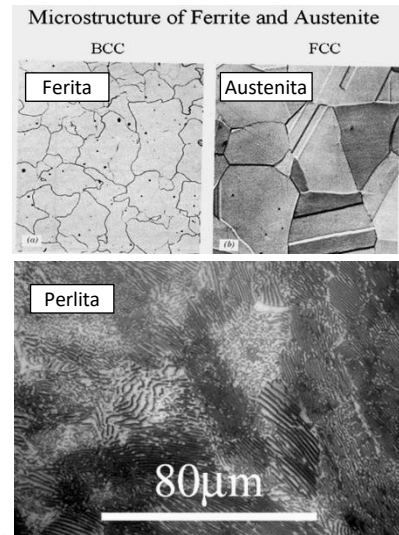
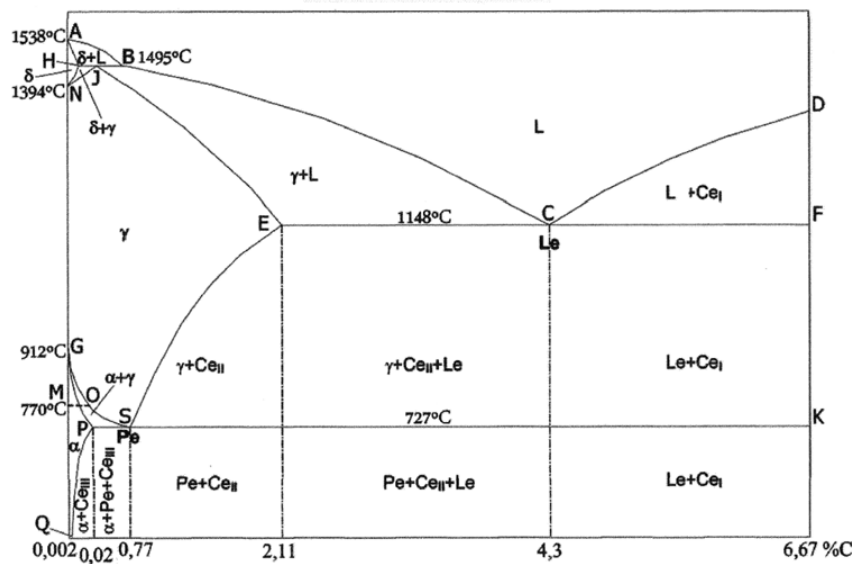


- **Austenita**,  $Fe(\gamma)$ , este o soluție solidă a carbonului în  $Fe(\gamma)$ , cu rețea cfc. Conținutul de carbon variază între 0-2,11% și este paramagnetică. Carbonul ocupă poziții interstițiale în rețeaua  $Fe\gamma$ ;
- **Cementita** ( $Fe_3C$ ) este un compus chimic cu rețea cristalină rombică, fiind un constituent dur și fragil. Este feromagnetică până la temperatura de 210°C (punctul  $A_0$ ). Cementita este o fază metastabilă, se formează la viteză de răcire relativ lente, dar mai mari comparativ cu cele aferente sistemului stabil Fe-Grafit. Prin menținere de lungă durată la temperaturi ridicate sau în prezența siliciului, cementita se descompune în fier și grafit (carbon liber). Formele distincte ale cementitei sunt:

- **Cementita primară** ( $Ce_I$ ) separată din fază lichidă de-a lungul curbei CD, cu conținut de  $C=4.3\%-6,67\%$ ;
- **Cementita secundară** ( $Ce_{II}$ ) formată la scăderea solubilității C în  $Fe\gamma$  de-a lungul curbei ES, cu conținut de  $C=0,8\%-2,11\%$ ;
- **Cementita terțiară** ( $Ce_{III}$ ) formată la scăderea solubilității C în  $Fe\alpha$  de-a lungul curbei PQ, cu conținut de  $C=0,002\%-0.02\%$ ;



- **Perlita** ( $P=Fe\alpha+Ce$ ) este un amestec eutectoid de ferită și cementită, caracteristicile ei mecanice fiind dependente de morfologia celor doi constituenți. Cu cât perlita este mai fină, cu atât caracteristicile ei mecanice sunt mai ridicate. Se formează la temperatura de 727°C și este feromagnetică.



Punctul	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	N	P	Q	S
% C	0	0.54	4.3	6.67	2.11	6.67	0	0.10	0.16	6.67	0	0.02	0.002	0.77
°C	1538	1495	1147	1250	1147	1147	910	1495	1495	727	1392	727	25	727

Fig. 132 Reprezentare simplificată a constituenților microstructurali din diagrama Fe- $Fe_3C$ .

Transformările în stare solidă care au loc la răcirea oțelurilor din domeniul austenitic joacă un rol cheie în controlul proprietăților acestora. De asemenea, aceste transformări sunt puternic influențate de viteza de răcire pe intervalul de temperaturi 900-500°C, motiv pentru care în cele ce urmează vom vedea mai în detaliu aceste procese și fenomene metalurgice. Exemple de aplicații: tratamente termice, sudarea etc.

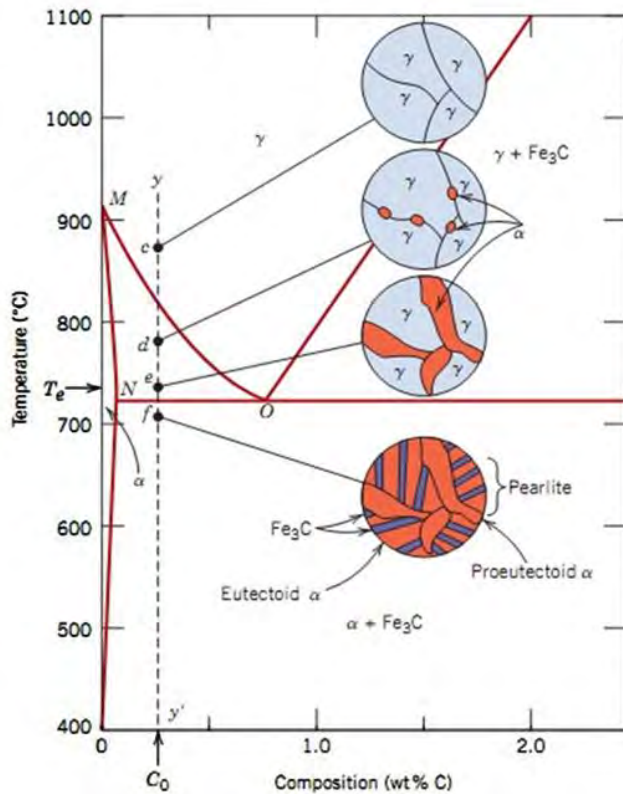


Fig. 133 Transformarea austenitei la răcire pentru oțelurile hipoeutectoide [8].

În figura alăturată, în punctul c, oțelul are o structură austenitică, carbonul fiind repartizat uniform în interiorul grăunților de austenită  $\gamma$ .

La scăderea temperaturii, pe limitele grăunților  $\gamma$  de austenită, apar germeii unei noi faze cristaline, soluția solidă  $\alpha$ , punctul d.

Pe măsură ce temperatura scade în continuare, din faza  $\gamma$  se cuplează tot mai mulți atomi de Fe la cristalele  $\alpha$  formate (ferită alotromorfă), ceea ce face ca grăunții fazei  $\gamma$  să se îmbogățească relativ în carbon. Se observă că se formează o bandă de ferită alotromorfă pe limita grăunților de austenită.

La temperatura de 727°C, austenita ajunge la concentrația punctului eutectoid, adică la o concentrație de 0.77% carbon. La temperatură constantă, austenita rămasă netransformată se va descompune într-un amestec mecanic de ferită și cementită, denumit perlită (Fig. 134).

Toate aceste transformări necesită procese de difuzie între atomii de fier și carbon.

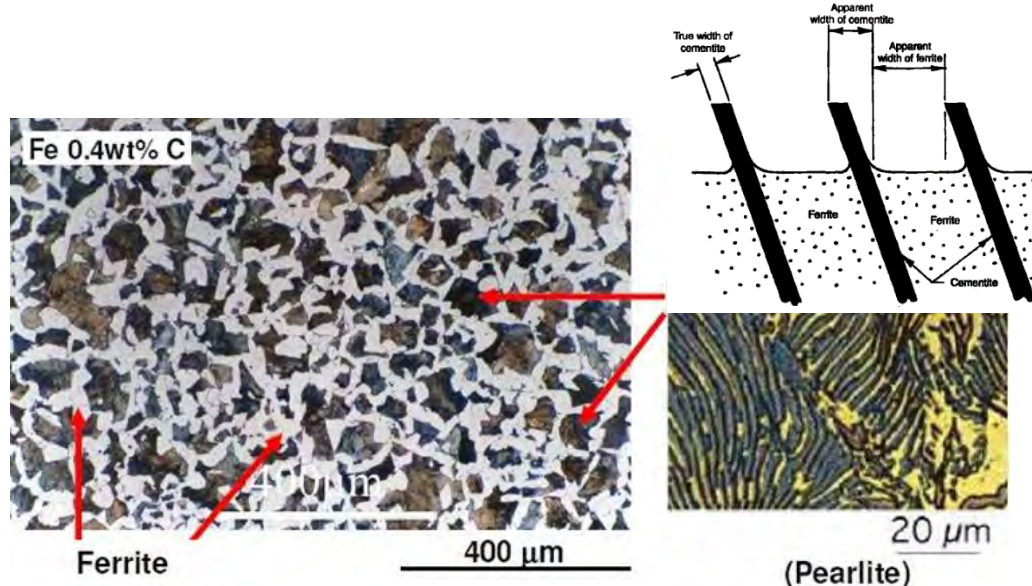


Fig. 134 Microstructura unui oțel hipoeutectoid cu 0.4% C [modificat după 16].

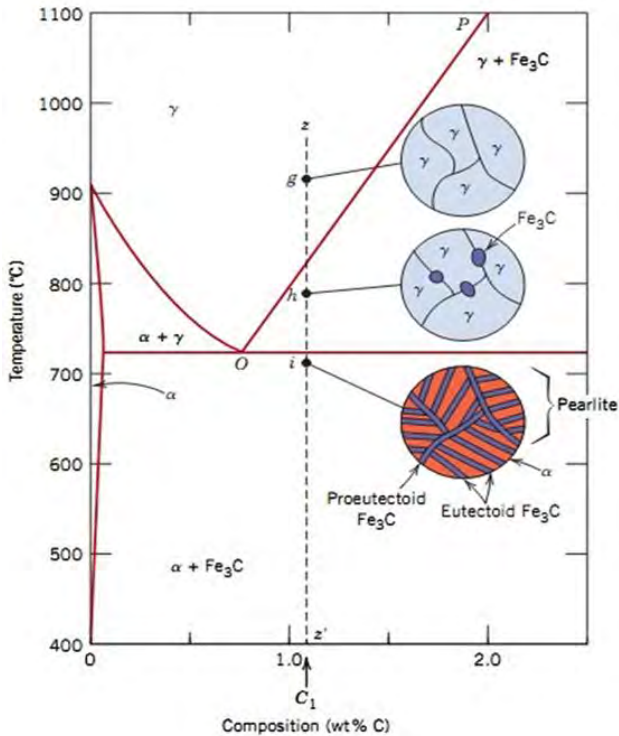


Fig. 135 Transformarea austenitei la răcire pentru oțelurile hipereutectoide [8].

În figura alăturată, în punctul g, oțelul are o structură austenitică, carbonul fiind repartizat uniform în interiorul grăunților de austenită  $\gamma$ .

La scăderea temperaturii, pe limitele grăunților  $\gamma$  de austenită apar germeii unei noi faze cristaline, cementita secundară  $\text{Fe}_3\text{C}$ , punctul h.

Pe măsură ce temperatura scade în continuare, din faza  $\gamma$  se separă prin difuzie atomi de carbon care formează treptat o rețea de cementită secundară, pe limitele grăunților de austenită din care s-a format.

Prin urmare, are loc o sărăcire relativă a fazei  $\gamma$  în carbon, a.î. la atingerea temperaturii de transformare eutectoidă,  $727^\circ\text{C}$ , faza  $\gamma$  ajunge la concentrația punctului eutectoid.

În continuare, faza  $\gamma$  rămasă netransformată se va descompune într-un amestec mecanic de ferită și cementită, adică în perlită.

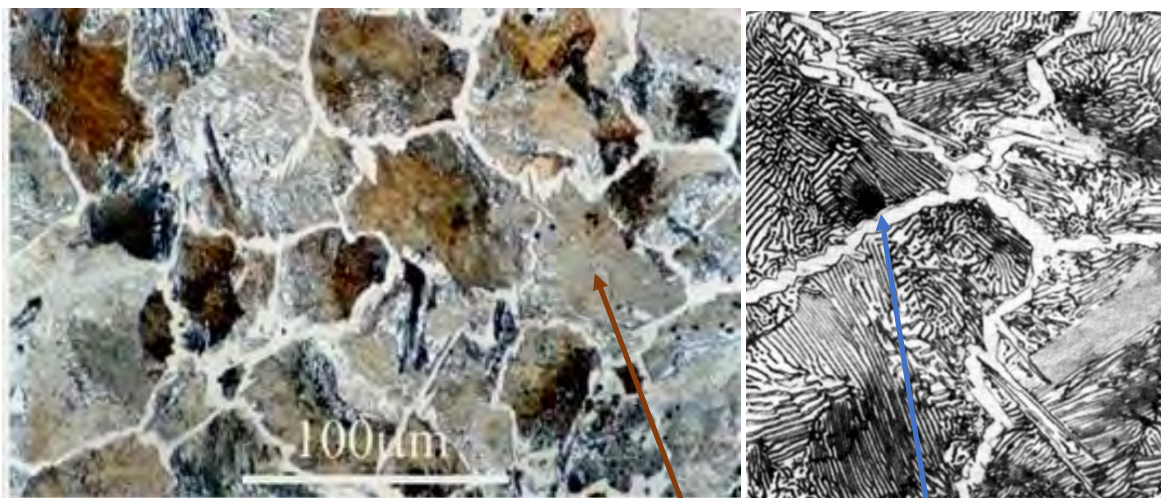


Fig. 136 Microstructuri oțel hipereutectoid cu 1.3% C. **Perlită** și rețea de **cementită secundară**.

La putere de mărituri mai reduse, aspectul lamelar al perlităi nu se poate evidenția, grăunții de perlită prezintă un aspect relativ compact, cu nuanțe mai deschise sau mai închise la culoare, datorită faptului că au o orientare diferită în spațiu. Acest aspect, modifică caracteristicile de reflexie ale luminii pe proba metalografică.

Proprietățile oțelurilor hipereutectoide sunt dependente de conținutul de carbon, dar și de caracteristicile morfologice ale perlităi și rețelei de cementită secundară. Îngroșarea rețelei de cementită, a spațiilor interlamelare ale perlităi ce conțin cementită, cresc duritatea și fragilitatea acestor oțeluri.



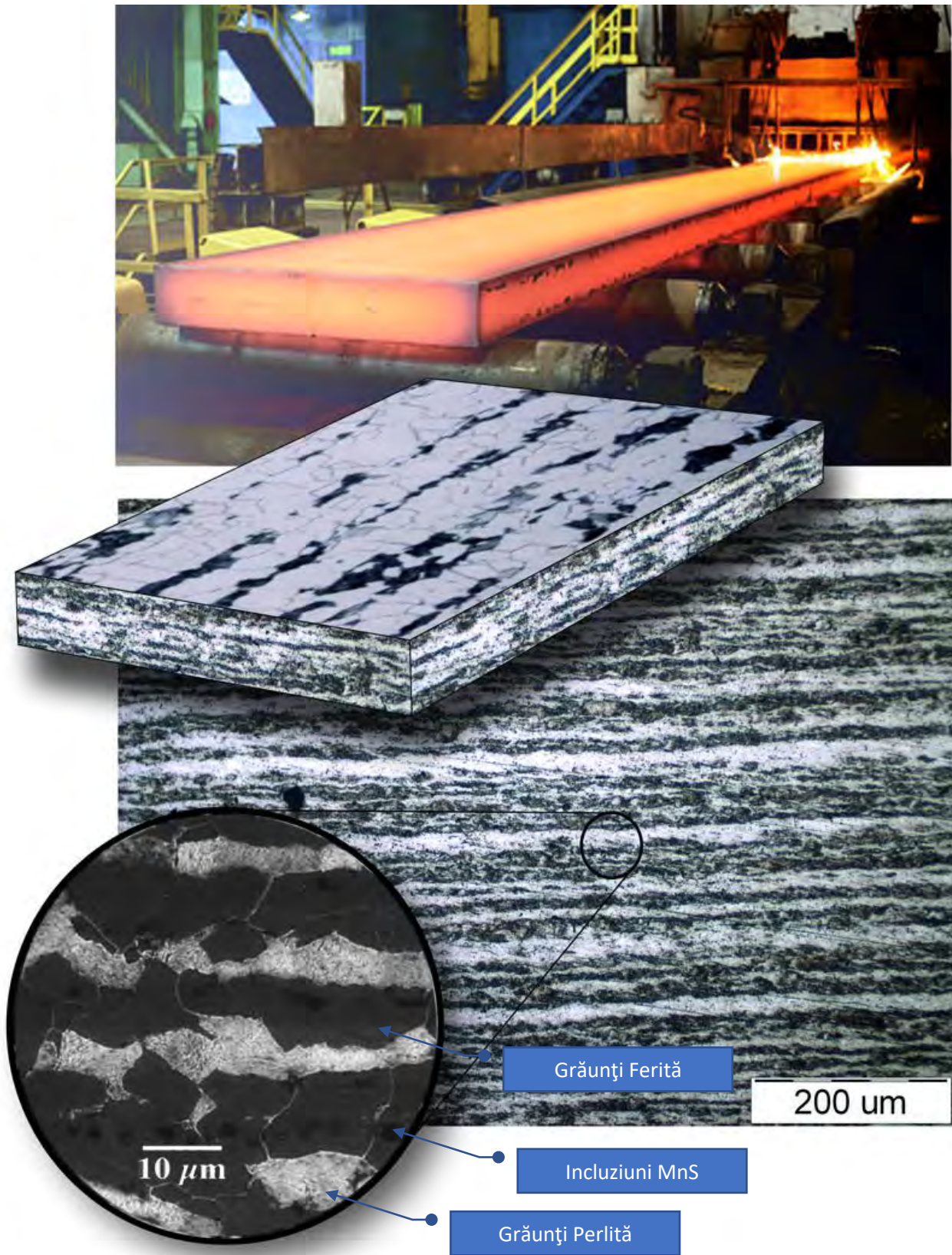


Fig. 137 Microstructura oțel structural S355. Microstructură în benzi datorită laminării la cald.

## ELEMENTE ÎNSOȚITOARE ÎN OȚELURI

Din perspectiva caracteristicilor funcționale, oțelurile se deosebesc între ele printr-o serie de proprietăți:

- **chimice:** rezistența la coroziune, la oxidare, etc.;
- **fizice:** densitatea, dilatarea termică, conductivitatea termică și electrică, proprietăți magnetice, etc.;
- **mecanice:** comportarea la diferite solicitări mecanice, elasticitate, plasticitate, tenacitate, reziliența, rezistența la oboseală etc.;
- **tehnologice:** comportare la sudare, turnare, maleabilitate, ductilitate etc.

Din perspectiva proprietăților (caracteristicilor) mecanice, cele mai importante sunt:

- plasticitatea
- elasticitatea
- rezistența la rupere
- duritatea
- rezistența la șoc.

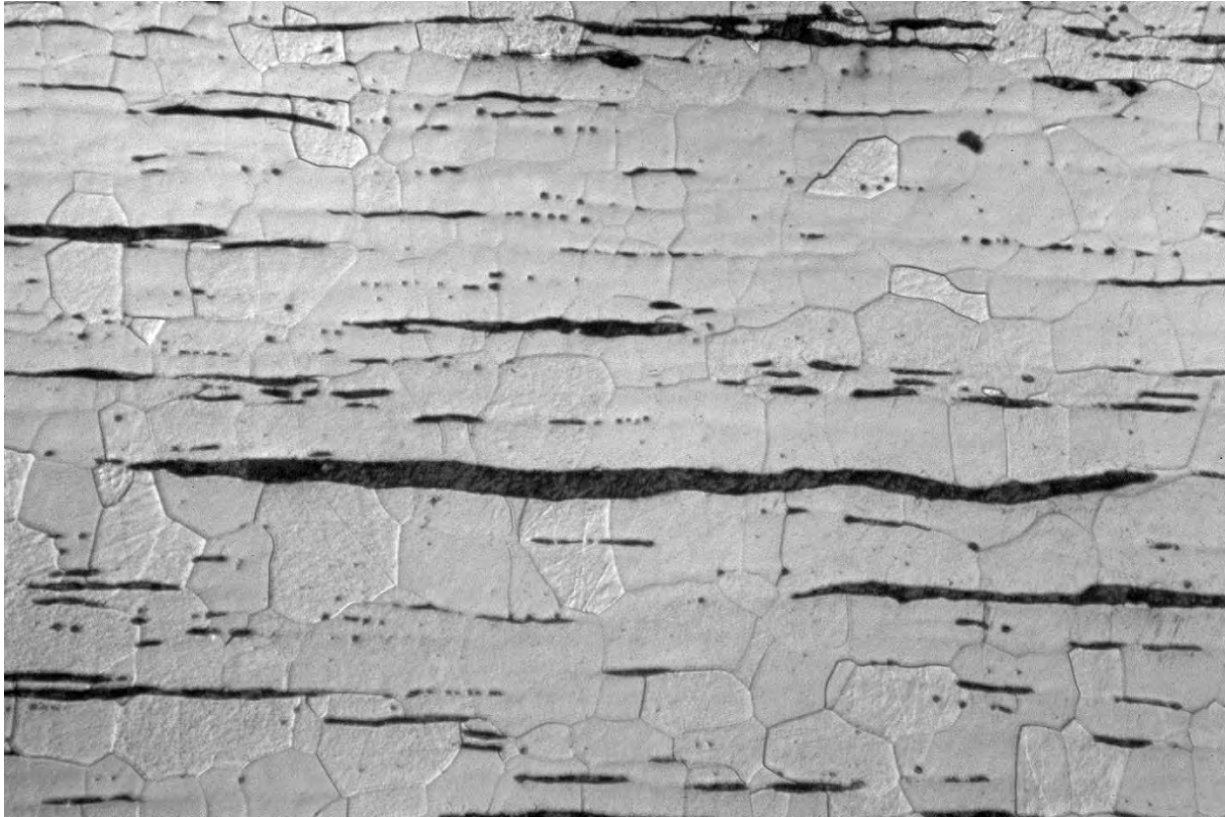
Această mică introducere a fost făcută pentru a sublinia **importanța proprietăților** pe care le deține un material în ceea ce privește modul de comportare în exploatare, dar și din perspectiva aspectelor de fabricație, de prelucrare mecanică, de comportare la sudare sau la tratamente termice.

**Elementele însoțitoare din oțeluri** controlează într-o foarte mare măsură aceste aspecte, precum și o serie de caracteristici tehnologice ale materialelor, prin urmare este foarte important să cunoaștem o parte a acestor influențe descrise mai jos, într-o manieră generală:

- **Si** este un bun dezoxidant, măbind rezistența la oxidare a oțelurilor. Siliciul se regăsește în concentrații uzuale de 0,5 – 1,25%, cel mai frecvent  $\leq 1$  %. În oțeluri, raportul Si/Mn = 1,2 influențează pozitiv tenacitatea și rezistența la fisurare. Siliciul are proprietăți similare cu cele ale manganului **Mn**, împiedică separarea carbonului sub formă de grafit, ajută procesul de îndepărtare a sulfului înainte și în timpul elaborării oțelului.
- **P** este un element dăunător calității oțelului și necesită cantități mari de var pentru defosforare. În fonta de afânare, P este  $\leq 0,5\%$ , iar pentru oțelurile de calitate 0,2-0,3%. Trebuie menționat că cea mai mare cantitate de P din oțel provine din fontă. Fosforul produce fragilizarea la rece a oțelurilor.
- **S** este un element dăunător calității oțelului, S este  $\leq 0,07\%$  pentru procedeele bazice și  $\leq 0,035\%$  pentru procedeele acide de elaborare. La sudarea structurilor metalice, atât S cât și P pot să conducă la fenomene de fisurare la cald (fragilitate la cald).
- **Mn** mărește limita de curgere, rezistența și reziliența oțelurilor, influențând pozitiv plasticitatea și comportarea la sudare. Are unele efecte similare cu ale Ni, dar este un material mult mai ieftin, spre deosebire de Ni. Mărește călibilitatea și coboară temperaturile de începere a transformării martensitice. În cazul răcirilor rapide, favorizează apariția austenitei reziduale. Cu creșterea %Mn, crește coeficientul de dilatare liniară și nivelul tensiunilor interne în timpul sudării.

Structura primară de solidificare a oțelurilor turnate influențează proprietățile materialului prin particularitățile micro și macrostructurale generate de eterogenitatea structurală (forma, mărimea și orientarea graunților în zonele de cristalizare, pentru diverse regimuri termice) și de eterogenitatea chimică. În cazul oțelurilor, eterogenitatea structurală este eliminată prin deformare sau tratament termic, dar influența ei se menține și în produsul finit; aceste efecte “ereditare” explicând diferența de calitate între oțeluri de aceeași compoziție, elaborate și turnate diferit. **Eterogenitatea chimică este produsă de elemente însoțitoare și de impurități.**





Incluziuni nemetalice în ferită sub formă de formațiuni alungite în direcția de laminare. După normalizare grăunții de ferită au căpătat o formă echiaxială, în vreme ce incluziunile nemetalice au rămas alungite.



Fig. 138 Incluziuni nemetalice MnS în oțeluri și efectul lor asupra comportării oțelurilor în exploatare.

Prezența incluziunilor nemetalice în oțeluri poate afecta durata de exploatare a unor construcții metalice, mașini sau echipamente, mai ales dacă sunt supuse la sarcini dinamice (la oboseală), în condiții de variații mari de temperatură și la temperaturi joase. În cazul îmbinărilor prin sudare, se produc modificări la nivel microstructural, au loc procese de difuzie a elementelor cu caracter puternic segregational (S, P, As, Sb, B) către limitele de grăunți pe care le fragilizează, măbind riscul de fisurare.

Este afectată rezistența la oboseală a materialului și dacă există și factori agravanți, precum alinierea nefavorabilă a incluziunilor nemetalice sau o stare de tensiuni ridicată și neuniformă, riscul producerii unor fisuri, ruperi de material crește substanțial [[video](#)].



## CLASIFICAREA ȘI SIMBOLIZAREA OȚELURILOR

Oțelurile pot fi clasificate după mai multe criterii, Fig. 139:

- după conținutul de carbon
  - hipoeutectoide cu  $C < 0,77\%$ ,
  - eutectoide cu  $C = 0,77\%$ ,
  - hipereutectoide cu  $0,77\% < C < 2.1\%$
- după compoziția chimică
  - oțeluri nealiante (sau oțeluri carbon)
  - oțeluri aliate
- după destinație
  - oțeluri de uz general,
  - oțeluri cu destinație precizată,
  - oțeluri pentru scule
- după procedeul de elaborare
  - oțel elaborat în cuptor electric
  - oțel de convertizor

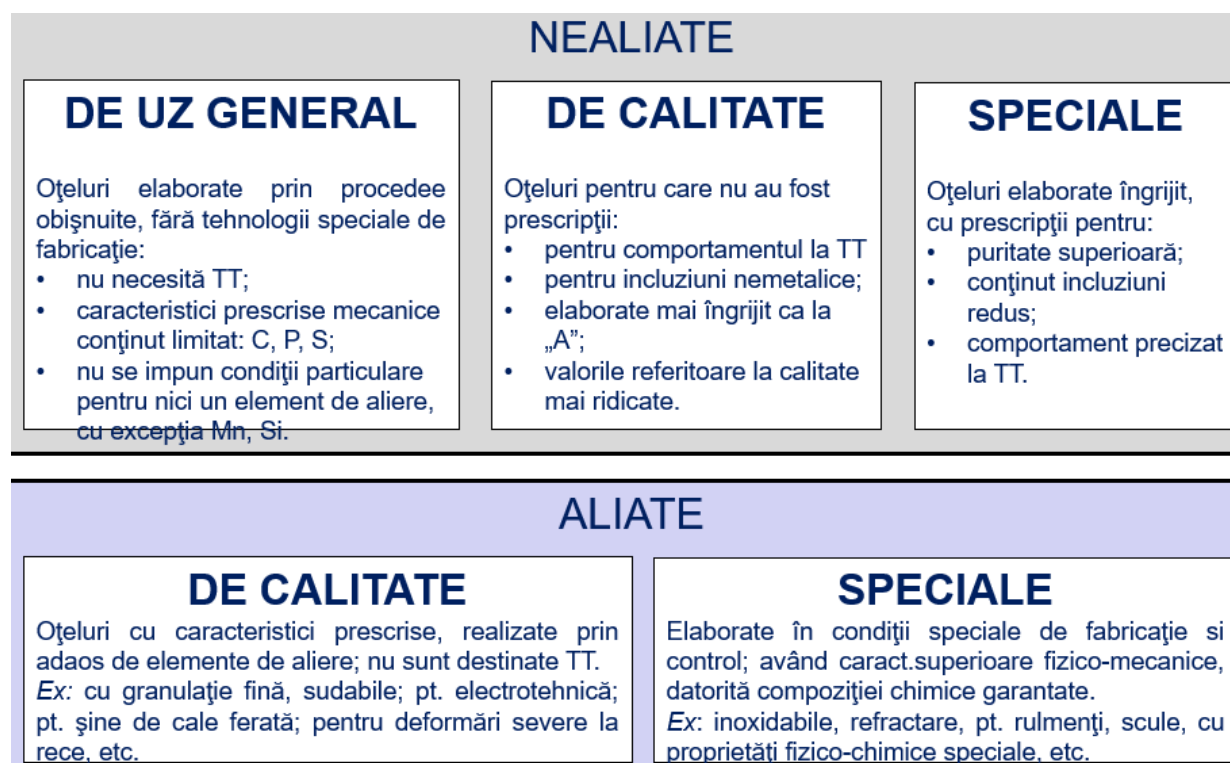


Fig. 139 Clasificarea oțelurilor.

Din perspectiva procedeului de elaborare a oțelurilor (procedee moderne, curent folosite):

- cuptor electric cu arc cu captușeală bazică sau acidă,
- cuptor electric cu inducție,
- convertizor cu oxigen.

Oțelurile nealiante conțin pe lângă fier și carbon, cantități mici de alte elemente ( $Mn \leq 0,8\%$ ,  $Si \leq 0,5\%$ ,  $P \leq 0,06\%$ ,  $S \leq 0,05\%$ ). Oțelurile cu  $\leq 0,3\%$  C se numesc **oțeluri moi**, cu  $0,3-0,6\%$  C se numesc **oțeluri semidure**, iar cele cu  $\geq 0,8\%$  C sunt **oțeluri dure**. Oțelul carbon cu  $\leq 0,08\%$  C poartă denumirea de fier tehnic.

**Oțelurile nealiat** sunt mărci de oțeluri în care niciuna dintre valorile limită din tabelul alăturat nu sunt depășite. Standardul [SR EN 10020: 2003](#) definește termenul de oțel și clasifică oțelurile după compoziția chimică în:

- oțeluri nealiat (de calitate și speciale)
- oțeluri aliat (de calitate și speciale)
- oțeluri inoxidabile.

**Oțelurile nealiat de calitate** sunt mărci de oțeluri care în general au exigențe pentru proprietăți specifice de tenacitate, controlul mărimii grăuntelui și deformabilitate.

**Oțelurile nealiat speciale** au un grad ridicat de puritate față de oțelurile de calitate, în special în privința incluziunilor nemetalice. În majoritatea cazurilor, aceste oțeluri sunt destinate tratamentului termic de călire și revenire sau de durificare superficială.

Determined element	Limit value Mass fraction in %
Al aluminium	0,30
B boron	0,0008
Bi bismuth	0,10
Co cobalt	0,30
Cr chromium	0,30
Cu copper	0,40
La lanthanides (rated individually)	0,10
Mn manganese	1,65*
Mo molybdenum	0,08
Nb niobium	0,06
Ni nickel	0,30
Pb lead	0,40
Se selenium	0,10
Si silicon	0,60
Te tellurium	0,10
Ti titanium	0,05
V vanadium	0,10
W tungsten	0,30
Zr zirconium	0,05
Others (with the exception of carbon, phosphorus, sulphur, nitrogen) (Each)	0,10

Oțelurile nealiat speciale satisfac una sau mai multe din următoarele condiții:

- rezistența la încovoiere prin șoc minimă specificată în stare călită-revenită;
- adâncimea de durificare prin călire superficială sau o duritate superficială specificată în stare călită-revenită sau durificată superficial;
- conținuturi maxime de fosfor și sulf de 0,025% pe produs;
- valori minime ale energiei de rupere prin șoc Charpy V de 27J la -50°C;

Condițiile tehnice de livrare pentru produsele laminate la cald din oțeluri pentru construcții. Partea 1: sunt specificate în standardul [SR EN 10025-1:2005](#), iar condițiile de livrare pentru oțelurile nealiat pentru construcții în standardul [SR EN 10025-2:2019](#).

Standardul [SR EN 10025-2:2019](#) precizează 8 mărci de oțel de calitate nealiat, marca de calitate se distinge prin energia garantată la rupere prin șoc și anume:

Marca de oțel	Condiții de livrare (de calitate)	Observații
S185		Limita de curgere minimă ( $R_{eH}$ ) în MPa la 16 mm JR –Energia de impact Charpy V longitudinal 27 J la +20°C J0 – Energia de impact Charpy V longitudinal 27 J la 0°C J2 – Energia de impact Charpy V longitudinal 27 J la -20°C K2 – Energia de impact Charpy V longitudinal 40 J la -20°C  Condiții de livrare: AR brut laminat +N laminare normalizantă
S235	JR, J0 și J2	
S275	JR, J0 și J2	
S355	JR, J0, J2 și K2	
S450	J0	
E295		
E355		
E360		

Opțiuni ale clientului:

- C – Grad recomandat pentru deformări la rece
- Z – Grad cu proprietăți îmbunătățite perpendicular pe suprafață (+Z15, +Z25 și +Z35). Caracteristică importantă pentru structuri sudate din oțel laminat la cald cu risc de destrămarea lamelară (îmbinări în T cu tensiuni perpendiculare pe direcția de laminare).

Tabel 3. Oțeluri structurale, [SR EN 10027-1:2017](#) Sisteme de simbolizare a oțelurilor (alfanumerice)

Simboluri principale		Simboluri suplimentare				
Simbol	Proprietăți mecanice	Pentru oțeluri				Pentru produse din oțel
		Grupa 1 <sup>b</sup>		Grupa 2 <sup>c d</sup>		
G = steel casting S = structural steel  G = oțel turnat  S = oțel structural	<p>nnn = specified minimum yield strength<sup>7</sup> in MPa<sup>8</sup> for the smallest thickness range</p> <p>Valorile numerice nnn indică limita de curgere valoare minimă pentru cea mai mică valoare a grosimii semifabricatelor (MPa)</p>	Energie la impact (Joule)		Test temperatură	<p>C – pentru deformări plastice severe la rece; D – acoperire la cald; E – emailare; F – piese forjate; H – secțiuni tubulare; L – rezistente la temperatură joasă; M – laminare termomecanică; N – normalizare sau laminare normalizantă; P – palplanșă<sup>9</sup>; Q – călire și revenire; S – construcții navale; T – țevi; W – rezistent la intemperii</p> <p>an = Simboluri elemente chimice din compoziția oțelului</p> <p>e.g. Cu, together, where necessary, with a single digit representing 10 × the average (rounded to 0,1 %) of that specified range of the content of that element</p>	Tabele 16, 17 și 18
27J	40J	60J	°C			
JR	KR	LR	20			
J0	K0	L0	0			
J2	K2	L2	-20			
J3	K3	L3	-30			
J4	K4	L4	-40			
J5	K5	L5	-50			
J6	K6	L6	-60			
A = Durificate prin precipitare M = Lamine termomecanic N = Normalizate, laminare normalizantă Q = Călite și revenite G = Alte caracteristici urmate de 1 sau 2 cifre						

<sup>7</sup> The term “yield strength” refers to upper or lower yield strength ( $ReH$ ) or ( $ReL$ ) or proof strength ( $Rp$ ), or proof strength total extension ( $Rt$ ) depending on the requirement specified in the relevant product standard

<sup>8</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

<sup>9</sup> Palplanșele metalice din oțel sunt materiale de construcție destinate reținerii apei și a solului pentru toate construcțiile subterane, indiguiri, fundații, baraje, porturi și căi navigabile.



**Tabel 3 (continuare). Oțeluri carbon, SR EN 10027-1:2017. Sisteme de simbolizare a oțelurilor (alfanumerice), cu un conținut de Mn mediu < 1 %**

Simboluri principale		Simboluri suplimentare		
Simbol	Conținut Carbon	Pentru oțel		Produce oțel
		Grupa 1 c, d	Grupa 2	
<p><b>G</b> = oțel turnat</p> <p><b>C</b> = oțel carbon</p>	<p><b>nnn</b> = 100 × valoarea medie a concentrației de carbon</p>	<p><b>C</b> = pentru deformări la rece, ex. pentru extrudare</p> <p><b>D</b> = pentru sârme (tragere)</p> <p><b>E</b> = cu limită max. de S</p> <p><b>R</b> = cu interval de S precizat</p> <p><b>S</b> = pentru arcuri</p> <p><b>U</b> = pentru scule</p> <p><b>W</b> = pentru vergele metalice de sudare</p> <p><b>G</b> = alte caracteristici urmate de 1 sau 2 cifre</p>	<p><b>an</b> = Simboluri elemente speciale adăugate în compoziția oțelului</p> <p>ex.: Cu, together, where necessary, with a single digit representing 10 × the average (rounded to 0,1 %) of that specified range of the content of that element</p>	

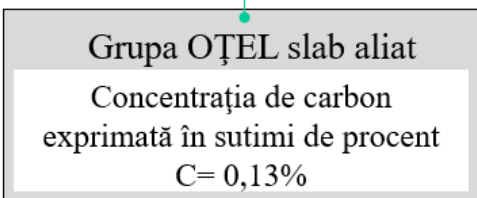
Exemple de simbolizări oțeluri carbon conform EN 10027-1:2017.

Standard	Simbolizare EN 10027-1	Observații
EN 10016-2	C20D	Oțel carbon cu 0,2% carbon pentru sârme obținute prin tragere
EN 10016-3	C2D1	Oțel carbon parțial dezoxidat cu 0,02% carbon pentru sârme (tragere)
EN 10016-4	C20D2	Oțel carbon cu 0,2% carbon pentru sârme obținute prin tragere, cu cerințe specifice privind nivelul de dezoxidare
EN 10083-1	C35E	Oțel carbon cu 0,35% carbon și $S_{max} = 0.035\%$
	C35R	Oțel carbon cu 0,35% carbon și $S = 0.02 - 0,04\%$
EN 10132-4	C85S	Oțel carbon cu 0,85% carbon pentru arcuri
EN 10263-2	C8C	Oțel carbon cu 0,08% carbon pentru deformări plastice la rece

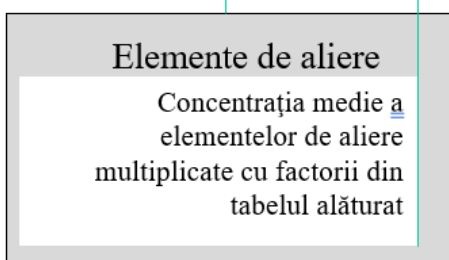
## EN-10027-1:2017

Oțeluri nealiat care au:  $Mn \geq 1\%$

Oțeluri aliate (excepție cele rapide) unde elementele de aliere luate individual  $< 5\%$



13CrMo4-5



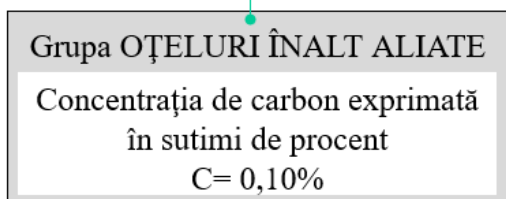
### Exemple:

Simbol oțel	Standard	Compoziție (concentrații medii)
13CrMo4-5	EN 10028-2003	C=0,13%; Cr=1%; Mo=0,5%
24CrMo13-6	EN 10085-2001	C=0,24%; Cr=3,25%; Mo=0,6%
41CrAlMo7-10	EN 10085-2001	C=0,41%; Cr=1,7%; Al=1%

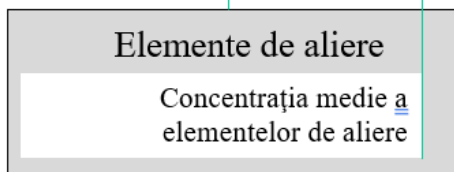
Element	Factor
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

## EN-10027-1:2017

Oțeluri înalt aliate (cu excepția celor rapide) unde cel puțin concentrația medie a unui element este  $\geq 5\%$



X10CrNi18-8



### Exemple:

Simbol oțel	Standard	Compoziție (concentrații medii)
X10CrNi18-8	EN 10088-2005	C=0.1%; Cr=18%; Ni=8%
X6CrMoNb17-1	EN 10088-2005	C=0.06%; Cr=17%; Mo=1%
X100CrMoV5	EN ISO 4957	C=1%; Cr=5%

### Prefixul

G – este pentru oțeluri turnate

PM – oțeluri obținute prin metalurgia pulberilor

Exemplu:

GX10CrNi18-8

Fig. 140 Simbolizarea oțelurilor aliate și înalt aliate conform [SR EN 10027-1:2017](#).

**Tabel 4. Exemple de simbolizări oțeluri structurale conform EN 10027-1:2017.**

Standard	Simbolizarea conform EN 10027-1	Observații
EN 10025-2	S235JR	S – oțel structural cu limita de curgere de 235 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la temperatura ambiantă (litera R)
	S355JR	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la temperatura ambiantă (litera R)
	S355J0	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la temperatura ambiantă (cifra 0)
	S355J2	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la -20°C (cifra 2)
	S355K2	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 40 J (litera K) la -20°C (cifra 2)
	S450J0	S – oțel structural cu limita de curgere de 450 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la temperatura ambiantă (cifra 0)
EN 10025-3	S355N	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, normalizat (litera N)
	S355NL	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, normalizat (litera N) și rezistent la temperaturi joase (litera L)
EN 10025-4	S355M	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, laminat termomecanic (litera M)
	S355ML	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, laminat termomecanic (litera M) și rezistent la temperaturi joase (litera L)
EN 10025-5	S235J0W	S – oțel structural cu limita de curgere de 235 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la temperatura ambiantă (cifra 0), rezistent la intemperii (litera W)
	S355J0WP	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la temperatura ambiantă (cifra 0), rezistent la intemperii (litera W) pentru palplanșă.
	S355J2WP	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la -20°C (cifra 2), rezistent la intemperii (litera W), pentru palplanșă (litera P).
	S355K2W	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 40 J (litera K) la -20°C (cifra 2), rezistent la intemperii (litera W).
EN 10025-6	S460Q	S – oțel structural cu limita de curgere de 460 MPa, călit și revenit (litera Q)
	S460QL	S – oțel structural cu limita de curgere de 460 MPa, călit și revenit (litera Q), rezistent la temperaturi joase (litera L)
	S460QL1	S – oțel structural cu limita de curgere de 460 MPa, călit și revenit (litera Q), rezistent la temperaturi joase, până la cel mult -60°C (simbolul L1)
EN 10149-2	S355MC	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, laminat termomecanic (litera M), pentru deformații plastice severe la rece (litera C).
EN 10149-3	S355NC	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, normalizat (litera N), pentru deformații plastice severe la rece (litera C).
EN 10210-1	S355J2H	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, energia garantată la impact este de 27 J (litera J) la -20°C (cifra 2), cu secțiune tubulară (litera H)
EN 10248-1	S355GP	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, pentru palplanșă (litera P).
EN 10346	S350GD	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, acoperit la cald prin galvanizare pe ambele fețe cu un aliaj Zn-Al-Mg pentru caracteristici superioare de rezistență la coroziune (litera D)
	S350GD+Z	S – oțel structural cu limita de curgere de 355 MPa, acoperit la cald prin galvanizare (litera D), cu prescripții suplimentare de calitate (simbolul +Z)



Palplanșele metalice din oțel sunt materiale de construcție destinate reținerii apei și a solului pentru toate construcțiile subterane, indiguiri, fundații, baraje, porturi și căi navigabile [video].

Oțeluri de calitate destinate tratamentelor termice (uz general)

- Oțeluri pentru carburare (cementare) - [SR EN 10084:2008](#)
- Oțeluri pentru călire și revenire - [SR EN 10343:2009](#)
- Oțeluri pentru niturare, [ISO 683-5:2017](#)
- Oțeluri care ating rezistențe mari prin tratamente termice

Oțeluri pentru scule [SR EN ISO 4957:2018](#) se clasifică în:

- oțeluri nealiat de scule pentru prelucrări la rece, Tabelul 5;
- oțeluri aliate de scule pentru prelucrări la rece, Tabel 6;
- oțeluri aliate de scule pentru prelucrări la cald, Tabel 7;
- oțeluri rapide, Tabel 8.

Tabelul 5. Oțeluri nealiat de scule pentru prelucrări la rece

Steel name	Chemical composition, (% m/m) <sup>a</sup>					Hardness (annealed) <sup>b</sup> +A HB max.	Hardening test			
	C	Si	Mn	P max.	S max.		Hardening temperature °C (± 10 °C)	Quenching medium	Tempering temperature °C (± 10 °C)	Hardness HRC min.
C45U	0,42 to 0,50	0,15 to 0,40	0,60 to 0,80	0,030	0,030	207 <sup>c</sup>	810	W	180	54
C70U <sup>d</sup>	0,65 to 0,75	0,10 to 0,30	0,10 to 0,40	0,030	0,030	183	800	W	180	57
C80U <sup>d</sup>	0,75 to 0,85	0,10 to 0,30	0,10 to 0,40	0,030	0,030	192	790	W	180	58
C90U <sup>d</sup>	0,85 to 0,95	0,10 to 0,30	0,10 to 0,40	0,030	0,030	207	780	W	180	60
C105U <sup>d</sup>	1,00 to 1,10	0,10 to 0,30	0,10 to 0,40	0,030	0,030	212	780	W	180	61
C120U <sup>d</sup>	1,15 to 1,25	0,10 to 0,30	0,10 to 0,40	0,030	0,030	217	770	W	180	62

Tabelul 6 Oțeluri aliate de scule pentru prelucrări la rece

Steel name	Chemical composition <sup>a, b</sup> , (% m/m)								Hardness (annealed) <sup>c</sup> +A HB max.	Hardening test			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W		Hardening temperature °C (± 10°C)	Quenching medium <sup>d</sup>	Tempering temperature °C (± 10°C)	Hardness HRC min.
105V	1,00 to 1,10	0,10 to 0,30	0,10 to 0,40	-	-	-	0,10 to 0,20	-	212	790	W	180	61
60WCrV8	0,45 to 0,55	0,70 to 1,00	0,15 to 0,45	0,90 to 1,20	-	-	0,10 to 0,20	1,70 to 2,20	229	920	O	180	56
60WCrV8	0,65 to 0,65	0,70 to 1,00	0,15 to 0,45	0,90 to 1,20	-	-	0,10 to 0,20	1,70 to 2,20	229	910	O	180	58
102Cr8	0,95 to 1,10	0,15 to 0,35	0,25 to 0,45	1,35 to 1,85	-	-	-	-	223	840	O	180	60
21MnCr5	0,18 to 0,24	0,15 to 0,35	1,10 to 1,40	1,00 to 1,30	-	-	-	-	217	e	e	e	e
70MnMoCr8	0,65 to 0,75	0,10 to 0,50	1,80 to 2,50	0,90 to 1,20	0,90 to 1,40	-	-	-	248	835	A	180	58
90MnCrV8	0,85 to 0,95	0,10 to 0,40	1,80 to 2,20	0,20 to 0,50	-	-	0,05 to 0,20	-	229	790	O	180	60
95MnWCr5	0,90 to 1,00	0,10 to 0,40	1,05 to 1,35	0,40 to 0,65	-	-	0,05 to 0,20	0,40 to 0,70	229	800	O	180	60
X100CrMoV5	0,95 to 1,05	0,10 to 0,40	0,40 to 0,60	4,80 to 5,50	0,90 to 1,20	-	0,15 to 0,35	-	241	970	A	180	60
X153CrMoV12	1,45 to 1,60	0,10 to 0,60	0,20 to 0,60	11,00 to 13,00	0,70 to 1,00	-	0,70 to 1,00	-	255	1020	A	180	61
X210Cr12	1,90 to 2,20	0,10 to 0,60	0,20 to 0,60	11,00 to 13,00	-	-	-	-	248	970	O	180	62
X210CrW12	2,00 to 2,30	0,10 to 0,40	0,30 to 0,60	11,00 to 13,00	-	-	-	0,60 to 0,80	255	970	O	180	62
35CrMo7	0,30 to 0,40	0,30 to 0,70	0,60 to 1,00	1,50 to 2,00	0,35 to 0,55	-	-	-	f				f
40CrMnNiMo9-6-4 <sup>g</sup>	0,35 to 0,45	0,20 to 0,40	1,30 to 1,60	1,80 to 2,10	0,15 to 0,25	0,80 to 1,20 <sup>g</sup>	-	-	f				f
45NiCrMo16	0,40 to 0,50	0,10 to 0,40	0,20 to 0,50	1,20 to 1,50	0,15 to 0,35	3,80 to 4,30	-	-	285	850	O	180	52
X40Cr14 <sup>h</sup>	0,26 to 0,42	≤ 1,00	≤ 1,00	12,50 to 14,50	-	-	-	-	241	1010	O	180	62
X38CrMo16 <sup>g</sup>	0,33 to 0,45	≤ 1,00	≤ 1,50	15,50 to 17,50	0,80 to 1,30	≤ 1,00	-	-	f				f

Tabel 7. Oțeluri aliate de scule pentru prelucrări la cald

Steel name	Chemical composition <sup>a, b</sup> , (% m/m)								Hardness (annealed) <sup>c</sup> +A HB max.	Hardening test			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Others		Hardening temperature °C (± 10°C)	Quenching medium <sup>d</sup>	Tempering temperature °C (± 10°C)	Hardness HRC min.
55NiCrMoV7 <sup>g</sup>	0,60 to 0,60	0,10 to 0,40	0,60 to 0,90	0,80 to 1,20	0,35 to 0,55	0,05 to 0,15	-	Ni: 1,50 to 1,80	248 <sup>f</sup>	850	O	500	42 <sup>g</sup>
32CrMoV12-28	0,28 to 0,35	0,10 to 0,40	0,15 to 0,45	2,70 to 3,20	2,50 to 3,00	0,40 to 0,70	-	-	229	1040	O	550	46
X37CrMoV5-1	0,33 to 0,41	0,80 to 1,20	0,25 to 0,50	4,80 to 5,50	1,10 to 1,50	0,30 to 0,50	-	-	229	1020	O	550	48
X38CrMoV5-3	0,35 to 0,40	0,30 to 0,50	0,30 to 0,50	4,80 to 5,20	2,70 to 3,20	0,40 to 0,60	-	-	229	1040	O	550	50
X40CrMoV5-1	0,35 to 0,42	0,80 to 1,20	0,25 to 0,50	4,80 to 5,50	1,20 to 1,50	0,85 to 1,15	-	-	229	1020	O	550	50
50CrMoV13-15	0,45 to 0,55	0,20 to 0,80	0,50 to 0,90	3,00 to 3,50	1,30 to 1,70	0,15 to 0,35	-	-	248	1010	O	510	56
X30WCrV9-3	0,25 to 0,35	0,10 to 0,40	0,15 to 0,45	2,50 to 3,20	-	0,30 to 0,50	8,50 to 9,50	-	241	1150	O	600	48
X35CrWMoV5	0,32 to 0,40	0,80 to 1,20	0,20 to 0,50	4,75 to 5,50	1,25 to 1,60	0,20 to 0,50	1,10 to 1,60	-	229	1020	O	550	48
38CrCoWV18-17-17	0,35 to 0,45	0,15 to 0,50	0,20 to 0,50	4,00 to 4,70	0,30 to 0,50	1,70 to 2,10	3,80 to 4,50	Co 4,00 to 4,50	260	1120	O	600	48

Tabel 8. Oțeluri rapide de scule.

Steel name	Chemical composition <sup>a, b, c</sup> , (% ni/m)							Hardness (annealed) <sup>d</sup> +A HB max.	Hardening temperature °C (±10°C)	Hardening test <sup>f</sup>		
	C	Co	Cr	Mo	V	W	Si			Quenching medium <sup>g</sup>	Tempering temperature °C (±10°C) min.	Hardness HRC min.
HS0-4-1	0,77 to 0,85	–	3,90 to 4,40	4,00 to 4,50	0,90 to 1,10	–	≤ 0,65	262	1120		560	60
HS1-4-2	0,85 to 0,95	–	3,60 to 4,30	4,10 to 4,80	1,70 to 2,20	0,80 to 1,40	≤ 0,65	262	1180		560	63
HS18-0-1	0,73 to 0,83	–	3,80 to 4,50	–	1,00 to 1,20	17,20 to 18,70	≤ 0,45	269	1260		560	63
HS2-9-2	0,95 to 1,05	–	3,50 to 4,50	8,20 to 9,20	1,70 to 2,20	1,50 to 2,10	≤ 0,70	269	1200		560	64
HS1-8-1	0,77 to 0,87	–	3,50 to 4,50	8,00 to 9,00	1,00 to 1,40	1,40 to 2,00	≤ 0,70	262	1190		560	63
HS3-3-2	0,95 to 1,03	–	3,80 to 4,50	2,50 to 2,90	2,20 to 2,50	2,70 to 3,00	≤ 0,45	255	1190		560	62
HS6-5-2	0,80 to 0,88	–	3,80 to 4,50	4,70 to 5,20	1,70 to 2,10	5,90 to 6,70	≤ 0,45	262	1220		560	64
HS6-5-2C <sup>g</sup>	0,86 to 0,94	–	3,80 to 4,50	4,70 to 5,20	1,70 to 2,10	5,90 to 6,70	≤ 0,45	269	1210		560	64
HS6-5-3	1,15 to 1,25	–	3,80 to 4,50	4,70 to 5,20	2,70 to 3,20	5,90 to 6,70	≤ 0,45	269	1200		560	64
HS6-5-3C	1,25 to 1,32	–	3,80 to 4,50	4,70 to 5,20	2,70 to 3,20	5,90 to 6,70	≤ 0,70	269	1180		560	64
HS6-6-2	1,00 to 1,10	–	3,80 to 4,50	5,50 to 6,50	2,30 to 2,60	5,90 to 6,70	≤ 0,45	262	1200		560	64
HS6-5-4	1,25 to 1,40	–	3,80 to 4,50	4,20 to 5,00	3,70 to 4,20	5,20 to 6,00	≤ 0,45	269	1210		560	64
HS6-5-2-5 <sup>g</sup>	0,87 to 0,95	4,50 to 5,00	3,80 to 4,50	4,70 to 5,20	1,70 to 2,10	5,90 to 6,70	≤ 0,45	269	1210		560	64
HS6-5-3-8	1,23 to 1,33	8,00 to 8,80	3,80 to 4,50	4,70 to 5,30	2,70 to 3,20	5,90 to 6,70	≤ 0,70	302	1180		560	65
HS10-4-3-10	1,20 to 1,35	9,50 to 10,50	3,80 to 4,50	3,20 to 3,90	3,00 to 3,50	9,00 to 10,00	≤ 0,45	302	1230		560	66
HS2-9-1-8	1,05 to 1,15	7,50 to 8,50	3,50 to 4,50	9,00 to 10,00	0,90 to 1,30	1,20 to 1,90	≤ 0,70	277	1190		550	66

**Observații:**

Hardening temperature – Temperatura la care se încălzește oțelul pentru operația de călire

Tempering temperature – Temperatura la care se încălzește oțelul pentru operația de revenire

Quenching medium – Mediul de răcire la călire (W)-apă, (O)-ulei, (A)-aer

Hardness (annealed) – Duritatea oțelului în stare de livrare recopt (structură de echilibru)

Hardness HRC – Duritatea oțelului pe scara Rockwell C (după călire în Tabelele 5-8)

Tabel 9. Oțeluri pentru niturare, condiții tratament termic, extras din SR EN 10085:2002.

Designation		Soft annealing	Hardening		Tempering	Nitriding
Steel name	Steel number	Temperature °C	Temperature <sup>a</sup> °C	Agent	Temperature <sup>b, c</sup> °C	Temperature <sup>d</sup> °C
24CrMo13-6	1.8516	650 to 700	870 to 970	Oil or water	580 to 700	480 to 570
31CrMo12	1.8515	650 to 700	870 to 930	Oil or water	580 to 700	480 to 570
32CrAlMo7-10	1.8505	650 to 750	870 to 930	Oil or water	580 to 700	480 to 570
31CrMoV9	1.8519	680 to 720	870 to 930	Oil or water	580 to 700	480 to 570
33CrMoV12-9	1.8522	680 to 720	870 to 970	Oil or water	580 to 700	480 to 570
34CrAlNi7-10	1.8550	650 to 700	870 to 930	Oil or water	580 to 700	480 to 570
41CrAlMo7-10	1.8509	650 to 750	870 to 930	Oil or water	580 to 700	480 to 570
40CrMoV13-9	1.8523	680 to 720	870 to 970	Oil or water	580 to 700	480 to 570
34CrAlMo5-10	1.8507	650 to 750	870 to 930	Oil or water	580 to 700	480 to 570

Tabel 10. Oțeluri de calitate pentru cementare, extras din SR EN 10084:2008.

Steel grade		End quench test Austenitizing temperature <sup>a</sup> °C	Carburizing temperature <sup>b</sup> °C	Core-hardening temperature <sup>c,d</sup> °C	Case-hardening temperature <sup>c, d</sup> °C	Tempering <sup>e</sup> °C
Name	Number					
C10E	1.1121	-	880 to 980	880 to 920	780 to 820	150 to 200
C10R	1.1207					
C15E	1.1141	-	880 to 980	880 to 920	780 to 820	150 to 200
C15R	1.1140					
C16E	1.1148	-	880 to 980	880 to 920	780 to 820	150 to 200
C16R	1.1208					
17Cr3	1.7016	880	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
17CrS3	1.7014					
28Cr4	1.7030	850	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
28CrS4	1.7036					
16MnCr5	1.7131	870	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
16MnCrS5	1.7139					
16MnCrB5	1.7160	870	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
20MnCr5	1.7147	870	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
20MnCrS5	1.7149					
18CrMo4	1.7243	880	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
18CrMoS4	1.7244					
22CrMoS3-5	1.7333	900	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
20MoCr3	1.7320	880	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
20MoCrS3	1.7319					
20MoCr4	1.7321	910	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
20MoCrS4	1.7323					
16NiCr4	1.5714	880	880 to 980	850 to 890	780 to 820	150 to 200
16NiCrS4	1.5715					
10NiCr5-4	1.5805	880	875 to 925	830 to 860	780 to 810	150 to 200
18NiCr5-4	1.5810	880	880 to 980	840 to 880	780 to 820	150 to 200
17CrNi6-6	1.5918	870	880 to 980	830 to 870	780 to 820	150 to 200
15NiCr13	1.5752	880	880 to 980	840 to 880	780 to 820	150 to 200
20NiCrMo2-2	1.6523	920	880 to 980	860 to 900	780 to 820	150 to 200
20NiCrMoS2-2	1.6526					
17NiCrMo6-4	1.6566	880	880 to 980	830 to 870	780 to 820	150 to 200
17NiCrMoS6-4	1.6569					
20NiCrMoS6-4	1.6571	880	880 to 980	830 to 870	780 to 820	150 to 200
18CrNiMo7-6	1.6587	860	880 to 980	830 to 870	780 to 820	150 to 200
14NiCrMo13-4	1.6657	880	880 to 980	840 to 880	780 to 820	150 to 200
20NiCrMo13-4	1.6660	850	880 to 980	825 to 880	800 to 850	150 to 200

NOTE The temperatures given for carburizing, core-hardening, case-hardening and tempering are for guidance; the actual temperatures chosen should be those that will give the properties required.



## CURS 6 DIAGRAMA FIER-CARBON

### FONTE

Fontele sunt aliaje ale fierului cu carbonul care conțin de la 2,11% până la 6,67% C, precum și o serie de elemente însoțitoare (Si, Mn, S, P) în concentrații mai reduse. În aliajele carbonului cu fierul, se poate găsi dizolvat în soluție solidă (ferrită, austenită), legat chimic în cementită ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) sau în stare liberă sub formă de grafit în fontele cenușii sau de turnătorie.

În oțelul hipereutectoid de Damasc au fost identificate formațiuni de nanotuburi de carbon [11], fapt ce asigură acestor materiale speciale proprietăți remarcabile de duritate și elasticitate simultan. Uzual, creșterea rezistenței mecanice, a durității determină o creștere a rigidității materialului, o scădere a caracteristicilor de deformabilitate și o creștere apreciabilă a fragilității materialului. Printr-o tehnică care s-a pierdut în prezent, fierarii din Damasc au reușit să combine excelent două proprietăți oarecum antagonice ale oțelurilor: duritatea și elasticitatea.

Fontele au plasticitate foarte redusă, datorită conținutului mare de carbon. Ca atare, sunt aliaje de turnătorie. În funcție de compoziția lor chimică, viteza de răcire la elaborare, tipul și cantitatea de inoculanți adăugați la elaborare, fontele pot fi clasificate în:

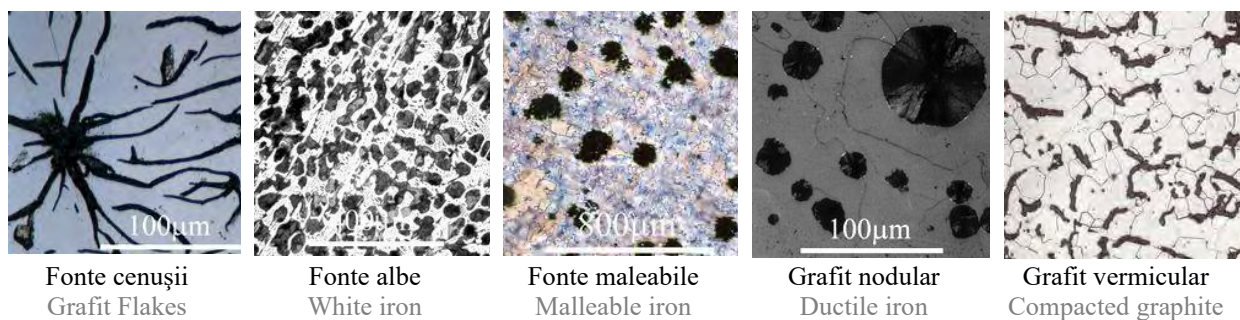


Fig. 141 Clasificare fonte după compoziție și forma incluziunilor de grafit.

După modul de repartizare al carbonului în structura fontelor, acestea se clasifică în:

- **Fonte albe** la care întreaga cantitate de carbon este legată chimic în cementită;
- **Fonte cenușii** la care carbonul este sub formă liberă total sau parțial. Carbonul liber este sub formă de grafit, iar restul este legat chimic sub formă de cementită  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

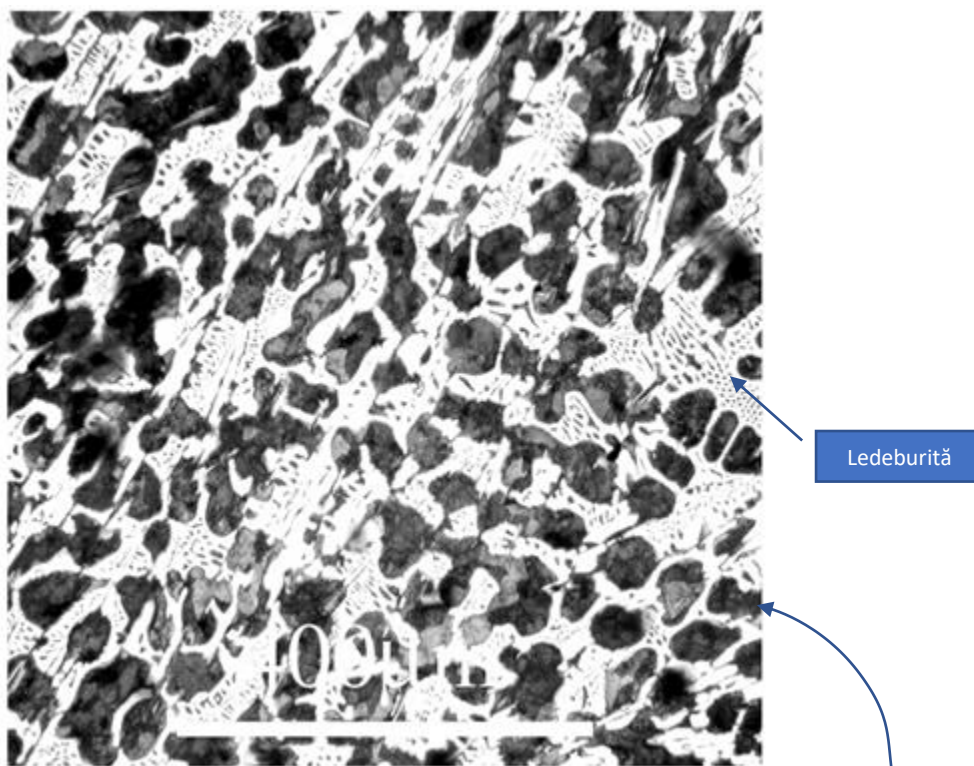
Obținerea fontei cenușii este favorizată de concentrația ridicată de C și Si în condițiile unei răciri lente. Deasemenea, prezența unor elemente de aliere poate influența structura fontelor cenușii. Cantitatea de grafit este determinată prin raportul Si (grafitizant)/Mn (antigrafitizant).

- Creșterea concentrației de Si (+↑ %C), favorizează structurile de tip ferrită + grafit;
- Creșterea concentrației de Mn, favorizează formarea cementitei (inclusiv din perlită) în detrimentul grafitului.

În funcție de caracteristicile masei metalice de bază, fontele cenușii pot fi cu masă:

- perlito-cementitică (fonte pestrițe)
- perlitică
- perlito-ferritică (descompunerea cementitei este parțială)
- ferritică (grafitizare totală)

În cazul fontelor albe, conținutul de carbon în exces se regăsește sub formă de cementită. Ca urmare, aceste fonte sunt foarte dure și extrem de fragile, având utilizări foarte limitate (cilindri de laminor). Fontele albe cristalizează după sistemul Fe-Fe<sub>3</sub>C, iar carbonul se separă sub formă de cementită.



Cu un conținut de carbon echivalent sub concentrația punctului eutectic de 4.3% C, din fază lichidă se formează cristale de austenită cu structură dendritică, iar la temperatura eutectică, faza lichidă rămasă se descompune într-un amestec mecanic de austenită și cementită (deschisă la culoare). La temperatura eutectoidă (727°C), austenita se va transforma în ferită și perlită (austenită transformată).

Fig. 142 Fontă albă cu 2.4% C [10].

Fontele albe sunt mult prea dure și fragile pentru a putea fi utilizate în această formă. Prin urmare, după elaborare, fontelor albe în stare solidă li se poate aplica un tratament termic de maleabilizare și obținem fonta maleabilă albă sau fonta maleabilă neagră, Fig. 143.

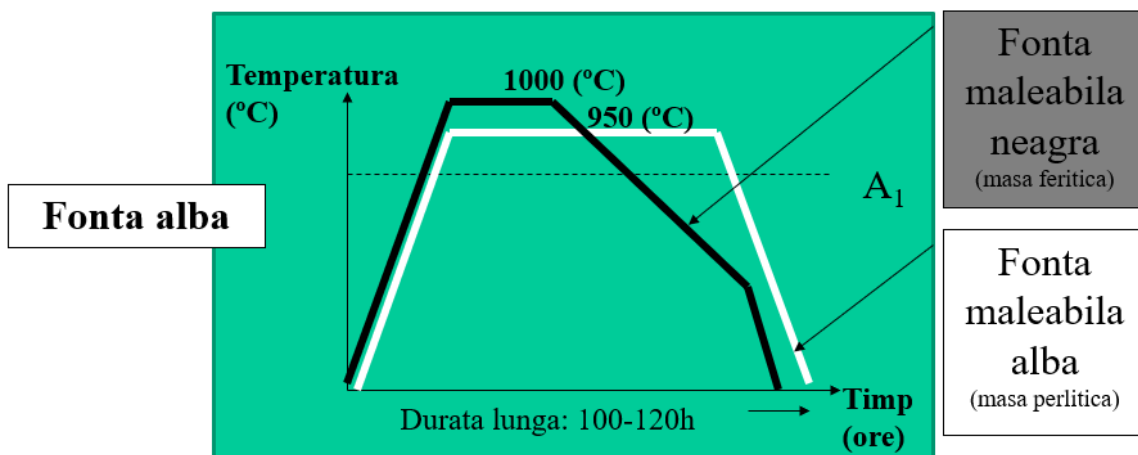
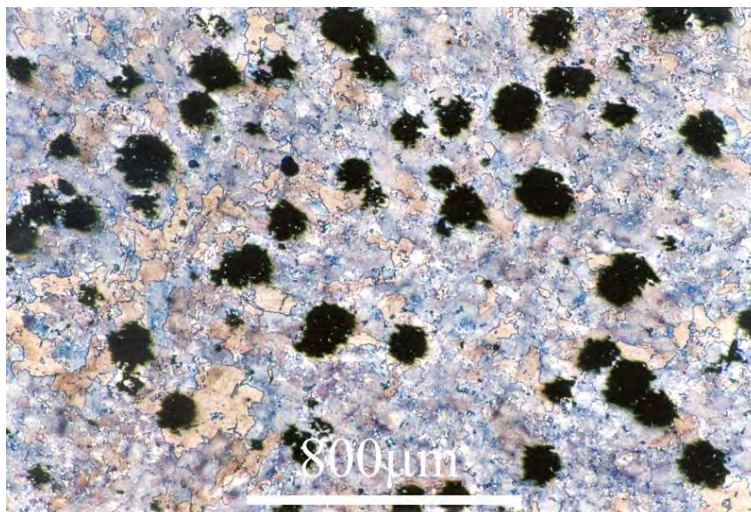


Fig. 143 Tratamentul termic de maleabilizare aplicat fontelor albe.

Procesul de descompunere a cementitei ( $Fe_3C$ ) necesită temperaturi ridicate și durate lungi de menținere. Prin procese lente de difuzie, carbonul din cementită difuzează pe distanțe relativ scurte și va forma o serie de formațiuni de grafit, denumite cuiburi, Fig. 144.



Tratament termic de maleabilizare la 900 °C timp de 72 ore  
Fig. 144 Fontă maleabilă albă cu grafit în cuiburi, masa de bază perlitică [10].

Denumirea de fontă maleabilă albă/neagră provine de la aspectul casurii (suprafeței de rupere). Cele cu miez alb sau mai deschis la culoare, au masa de bază perlitică, iar cele cu miez negru sau închis la culoare, au o masă de bază feritică.

Aspectul, distribuția și forma formațiunilor de grafit au o importanță majoră în determinarea proprietăților mecanice și tehnologice ale fontelor. Prin urmare, s-au dezvoltat tehnici de elaborare a fontelor prin care să putem controla eficient aspectul formațiunilor de grafit, precum și raportul dintre carbonul liber (grafit) și cel legat din cementită.

Tratamentul termic de maleabilizare este unul foarte lent, costisitor, fiind nevoie de cuptoare speciale și durate mari ale tratamentului (100-120 ore). Pentru producția de serie sau în masă, aceste inconveniente nu pot fi acceptate. Ca urmare, s-a văzut că este mult mai eficient să controlăm microstructura fontelor încă din fază lichidă de la elaborare, prin adăugarea unor elemente inoculante ce favorizează separarea carbonului sub formă de grafit (Si), sau a unor elemente ce inhibă creșterea grafitului (Mg).

Grafitul este moale și reprezintă o discontinuitate în interiorul matricei metalice. Formațiunile grosolane de grafit, cu vârfuri ascuțite, acționează ca și niște concentratori geometrici de tensiune, favorizând riscul de fisurare la vârful lamelelor de grafit. În figura alăturată se poate observa o stare de tensiuni neuniformă datorită unei discontinuități geometrice ovale cu lungimea  $2a$  și raza la vârf  $\rho_t$ .

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

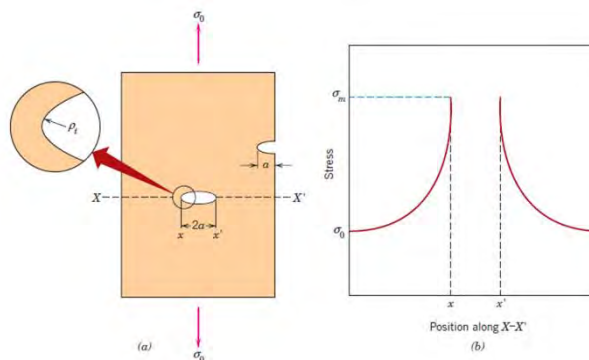


Fig. 145 Stare de tensiuni indusă de concentratori geometrici



Tenacitatea fontelor cenușii poate fi îmbunătățită prin procesul de modificare la elaborare. Forma alungită, grosolană a lamelor de grafit cu vârfuri ascuțite, produce un efect de crestătură, o stare de tensiuni ridicată la vârful formațiunilor de grafit, Fig. 146.

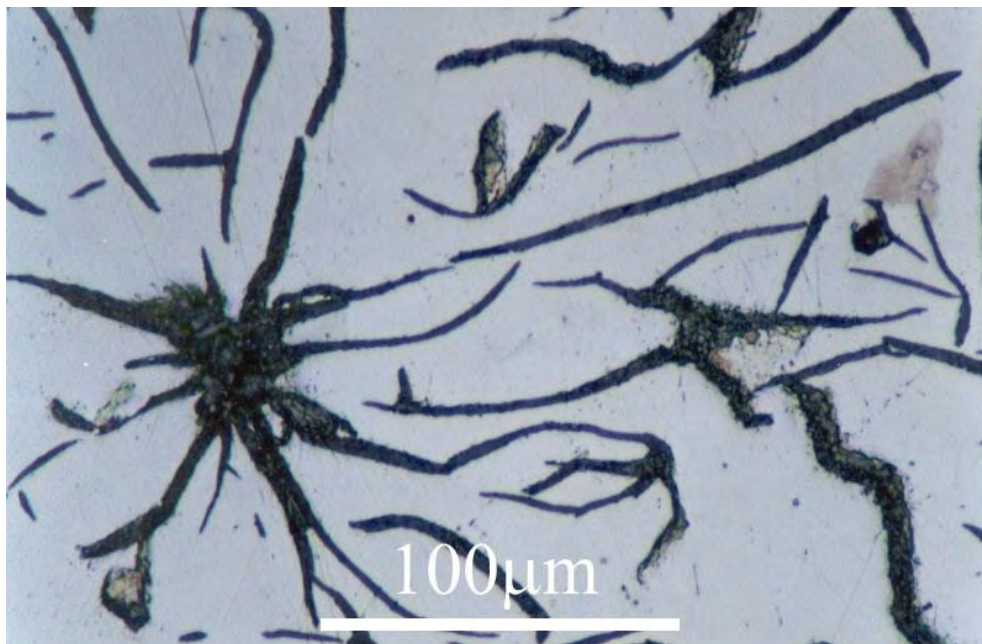


Fig. 146 Fontă cenușie cu grafit lamelar: 3.52 % C; 3.26 % Si; 0.47 % Mn (wt%) [10].

Adăugarea unei cantități infime de Mg (0.05 – 0.07%), îmbunătățește considerabil proprietățile dinamice de rezistență mecanică ale fontelor cenușii. Mg împiedică creșterea formațiunilor de grafit și permite o creștere izotropă a acestora, producând formațiuni de grafit echiaxiale, cu formă nodulară, Fig. 147.

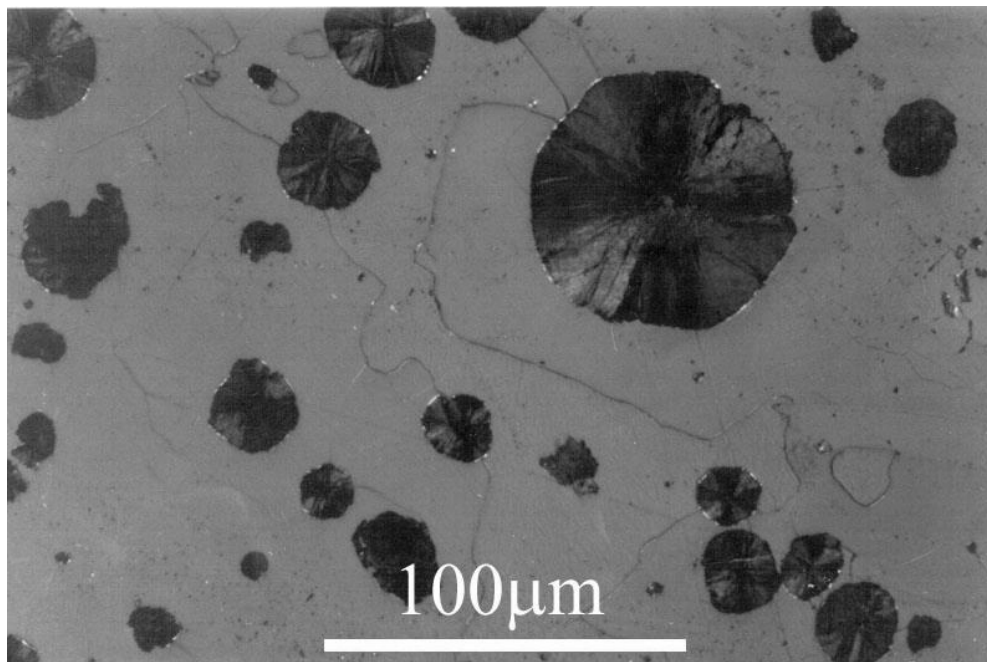


Fig. 147 Fontă modificată cu grafit nodular, concentrație de 2.4 % C, 0.05 % Mg [10].

În activitățile de producție sau în industriile extractive, în cazul prelucrărilor prin aşchiere etc, se lucrează cu maşini și echipamente grele ce preiau sarcini considerabile, în general care acţionează dinamic. Organele de maşini, părțile componente ale maşinilor au anumite jocuri, toleranțe de formă și dimensiuni, iar dacă aceste elemente mecanice execută mișcări cu anumită periodicitate (ex. rotirea pinioanelor, a roților dințate într-o cutie de viteză) generează vibrații mecanice cu amplitudini și frecvențe diferite.

Vibrațiile mecanice respective au efecte negative asupra calității suprafețelor prelucrate, asupra comportării la oboseală a acestor maşini și instalații, iar în timp se pot produce avarii majore datorită acestor fenomene dinamice. Din aceste motive, în funcție de particularitățile aplicațiilor considerate, se selectează materiale care au și o bună comportare la amortizarea vibrațiilor, pe lângă celelalte caracteristici mecanice necesare (ex. batiu la maşini unelte, blocuri motoare la autoturisme, carcase cutii viteze, reductoare, etc.).

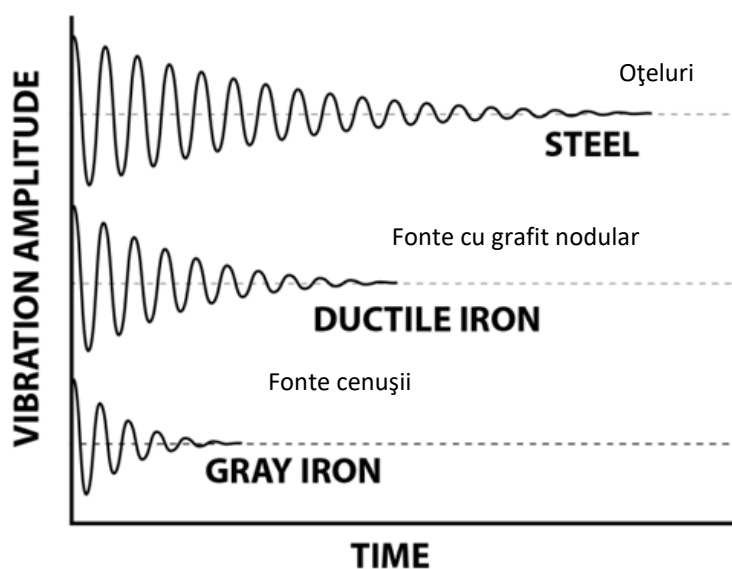


Fig. 148 Caracteristici de amortizare a vibrațiilor a materialelor feroase.

Analizând Fig. 148, se observă cu ușurință că fontele cenușii cu grafit lamelar au cele mai bune caracteristici de amortizare a vibrațiilor mecanice, mult superioare oțelurilor. Factorii principali care determină capacitatea unui material de a amortiza vibrații, sunt:

- vâscoelasticitatea (viscoelasticity),
- termo-elasticitatea (thermoelasticity),
- densitatea și viteza de propagare a sunetului în material (acoustic effects),
- proprietățile magnetice ale materialului (magnetism),
- starea de tensiuni din material (amount of mechanical stress),
- frecvența sarcinilor (load frequency),
- temperatura de exploatare (temperature).

În anumite situații, undele acustice în material pot ajunge la fenomenul de rezonanță și atunci riscul cedării materialului crește periculos. Situații similare s-au produs și în construcția unor poduri. Material video recomandat: [London Millenium Bridge](#). Explică fenomenul de rezonanță în construcții, poduri și cauzele care conduc la acest fenomen. Construcții cu probleme de design și de rezistență [[video](#)].

**Studiu de caz:** Vibrațiile generate de turboreactoarele avionului au condus la fenomene de oboseală mecanică în niturile de asamblare ale fuselajului avionului. La acest fenomen a contribuit și deformările repetate ale fuselajului datorită variațiilor de presiune pe durata zborului. În plus, s-au depistat fenomene de coroziune galvanică la nivelul îmbinărilor prin nituire. Toate aceste fenomene au dus în timp la slăbirea îmbinărilor între elementele de tablă ale fuselajului și în [cursa Aloha cu zborul 243](#) din 28 aprilie 1988, avionul a pierdut o parte din fuselaj în timpul zborului. În incident și-au pierdut viața și câțiva pasageri. [\[video\]](#)

The photograph is of a Boeing 737-200 commercial aircraft (Aloha Airlines flight 243) that experienced an explosive decompression and structural failure on April 28, 1988. An investigation of the accident concluded the cause was metal fatigue that was aggravated by crevice corrosion (Section 17.7) inasmuch as the plane operated in a coastal (humid and



salty) environment. Stress cycling of the fuselage resulted from compression and decompression of the cabin chamber during short hop flights. A properly executed maintenance program by the airline would have detected the fatigue damage and prevented this accident. (Photograph of the oil tanker by Neal Boenzi. Reprinted with permission from *The New York Times*. Photograph of the Boeing 737-200 courtesy of *Star Bulletin/Dennis Oda*/© AP/Wide World Photos.)

Fig. 149 Avarii la fuselajul unui avion Boeing de linie datorită fenomenelor de oboseală mecanică și coroziune [8].

Capacitatea de amortizare a vibrațiilor în cazul fontelor cenușii este direct legată de mărimea și forma formațiunilor de grafit din fonte. Energia absorbită la nivelul vibrațiilor mecanice crește odată cu creșterea grosimii pereților de fontă, iar forma alungită a grafitului ajută la fenomenul de amortizare a undelor acustice care se propagă prin material. Grafitul absoarbe aceste vibrații (raport optim  $\lambda_{undă} / L_{lamelă}$ ).

Fontele cu grafit vermicular, reprezintă o clasă de fonte cu proprietăți intermediare între cele ale fontelor cenușii cu grafit lamelar (mai grosolan) și cele ale fontelor modificate cu grafit nodular. Prin urmare, vom avea caracteristici și proprietăți intermediare de rezistență mecanică, conductivitate termică, care vor fi dictate de aspectul și distribuția formațiunilor de grafit ale fontelor, precum și de tipul matricei metalice.

Avantaje generale ale fontelor	Dezavantaje generale ale fontelor
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bune proprietăți de turnare: vâscozitate și segregare chimică redusă</li> <li>• Bune proprietăți de rezistență la uzare</li> <li>• Prelucrabilitate prin așchiere bună</li> <li>• Efect redus de concentratori geometrici</li> <li>• Costuri reduse de fabricație</li> <li>• Deformabilitate redusă</li> <li>• Rezistență la compresiune de 3-5 ori mai bună față de oțel</li> <li>• Comportare bună la vibrații mecanice</li> <li>• Proprietăți mecanice constante între 20 și 350°C</li> <li>• Formabilitate prin turnare foarte bună</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibile la fenomene de coroziune</li> <li>• Rezistență mică la tracțiune</li> <li>• Raport nefavorabil greutate/rezistență</li> <li>• Au caracter fragil de rupere</li> <li>• Rezistență mică la șocuri</li> <li>• Rămân tensiuni de la turnare, comportare diferită sub sarcină ale secțiunilor cu grosimi mari față de cele cu grosimi mici</li> <li>• Nu se îmbină prin sudare</li> <li>• Greu de recondiționat piese cu defecte</li> <li>• Fontele albe nu pot fi prelucrate, fiind extrem de dure.</li> </ul>



## SIMBOLIZAREA FONTELOR

Simbolizarea fontelor se face conform standardului [SR EN 1560:2011](#). Fontele se simbolizează printr-un set de 6 gruppuri de simboluri, unele dintre ele fiind opționale.

**Grup 1:** EN – Normă europeană

**Grup 2:** Simbolul G (piesă turnată), iar J (piesă din fontă)

**Grup 3:** Simbol pentru forma grafitului

L – grafit lamelar, S – grafit nodular; M – maleabilă (în cuiburi), V – grafit vermicular, Y – specială

**Grup 4:** Simbol pentru microstructură

A-austenită; R-ausferită; F-ferită; P-perlită; M-martensită; L-ledeburită; Q-călită; T-călită și revenită; B-inimă (spărtură) neagră (numai la fonte maleabile); W-inimă sau spărtură albă (numai la fonte maleabile);

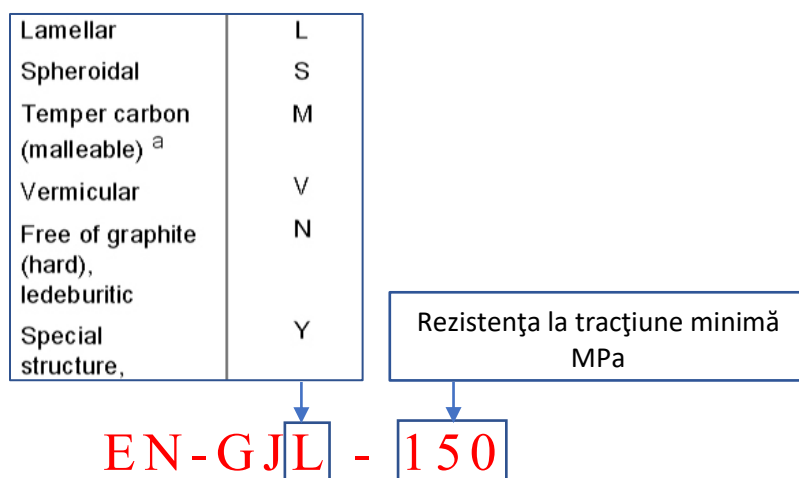
**Grup 5:** Simboluri pentru proprietăți mecanice sau pentru compoziția chimică. Trebuie optat pentru una dintre variante (fie Rezistența la tracțiune + Alungirea, fie Duritatea HB)

**Grup 6:** Simboluri suplimentare: (W-sudabilitate, D-piesă brut turnată, H-piesă supusă tratamentului termic, Z-condiții suplimentare indicate în comandă).

**Notă:**

Grup : informații obligatorii

Grup : informații opționale



Tabel 12. Exemple de simbolizare a fontelor cenușii cu grafit lamelar, [SR EN 1560:2011](#)

Simbolizare Fonte Cenușii			Rezistență tracțiune MPa	Limita curgere MPa	Duritate HB	Alungirea A(%)	Rezistență compresiune MPa
Alfanumeric	Numeric	După duritate					
EN-GJL-150	EN-JL 1020 <a href="#">5.1200</a>	EN-GJL-HB175	150-250	98-165	125-205	0,8 - 0,3	600
EN-GJL-200	EN-JL 1030 <a href="#">5.1300</a>	EN-GJL-HB195	200-300	130-195	150-230	0,8 - 0,3	720
EN-GJL-250	EN-JL 1040 <a href="#">5.1301</a>	EN-GJL-HB215	250-350	165-228	180-250	0,8 - 0,3	840
EN-GJL-300	EN-JL 1050 <a href="#">5.1302</a>	EN-GJL-HB235	300-400	95-260	200-275	0,8 - 0,3	960
EN-GJL-350	EN-JL 1060 <a href="#">5.1303</a>	EN-GJL-HB255	350-450	228-285	220-290	0,8 - 0,3	1080

**Notă:** Simbolizarea numerică cu font gri (ex. EN-JL 1020 conform EN 1560-1997) pentru fonte a fost înlocuită conform structurii și regulilor stipulate în EN 10027-2 ce corespunde sistemului European de codificare numerică a oțelurilor și altor materiale.

Pentru Grupul 5 de simboluri, dacă se indică caracteristicile mecanice, acestea pot fi rezistența la rupere  $R_m$  exprimată în MPa sau duritatea Brinell (HB).

**Simbolizarea după proprietățile mecanice:** Simbolizarea după rezistența mecanică minimă  $R_m$  (MPa) și poate fi urmată de alungirea procentuală după rupere, în funcție de tipul fontei (de exemplu la fontele maleabile). După numărul care indică rezistența mecanică minimă sau alungirea după rupere, poate fi indicată rezistența la încovoiere la șoc KV, în N/mm<sup>2</sup>. Aceste mărci se recunosc prin faptul că sunt urmate de literele RT, dacă încercarea s-a efectuat la temperatura ambiantă sau LT, pentru încercări efectuate la temperaturi scăzute.

Simbolizarea după duritatea HB, ia în considerare valoarea mediană a durităților din tabel pentru fiecare marcă de fontă. În situația în care caracteristica mecanică simbolizată este duritatea, atunci nu se mai indică rezistența mecanică la rupere, nici alungirea.

**Simbolizarea după compoziția chimică**, folosită la fonte aliate, începe cu litera X și se face cu sau fără indicarea conținutului de carbon. După litera X, se trece apoi conținutul de carbon în sutimi de procent (dacă acesta se indică), apoi simbolul elementelor de aliere, începând cu cel al cărui conținut este cel mai mare, și la final, conținutul corespunzător de elemente de aliere, rotunjite la un număr întreg și separate prin cratimă;

Tabel 13: Fonte cenușii cu grafit lamelar. Simbolizare conform SR EN 1560:2011

SR EN 1560:2011	Observații
EN-GJL-200 5.1300	Fontă cenușie cu grafit lamelar cu $R_m \geq 200$ N/mm <sup>2</sup> Echivalentă cu Fc 200 STAS 568-82 (anulat)
EN-GJL-150 U 5.1200	Fontă cenușie cu grafit lamelar cu rezistența la tracțiune $R_m \geq 150$ N/mm <sup>2</sup> din probă atașată la piesa turnată
EN-GJL-150 S 5.1200	Fontă cenușie cu grafit lamelar cu rezistența la tracțiune $R_m \geq 150$ N/mm <sup>2</sup> determinată pe probă turnată separat
EN-GJL-300 5.1302	Fontă cenușie cu grafit lamelar având $R_m \geq 300$ N/mm <sup>2</sup> Echivalentă cu Fc 300 STAS 568-82 (anulat)
EN-GJL-HB 175 5.1201	Fontă cenușie cu grafit lamelar cu duritatea medie de 175 HB
EN-GJL-HB 235 5.1306	Fontă cenușie cu grafit lamelar cu duritatea medie de 235 HB
EN GJL-XNiMn 13-7	Fontă cenușie aliată cu 13 % Ni și 7 % Mn
EN-GJL-X300CrNiSi9-5-2	Fontă cenușie aliată cu 3 % C, 9 % Cr, 5 % Ni și 2 % Si

Fonte maleabile, au calitatea reglementată prin SR EN 1562:2019, care prevede două tipuri de fonte:

- Fonte maleabile cu miez alb (decarburată), simbolizate prin grupul de litere EN-GJMW, urmat de rezistența la tracțiune minimă  $R_m$ , în MPa și de alungirea la rupere în %;
- Fonte maleabile cu miez negru (nedercaburată), simbolizate prin grupul de litere EN-GJMB, urmat de rezistența la tracțiune minimă  $R_m$ , în MPa și alungirea la rupere în %.

Tabel 14: Fonte maleabile SR EN 1562:2019. Simbolizare conform SR EN 1560:2011

SR EN 1562:2019	Observații
EN-GJMW-350-4	Fontă maleabilă cu miez alb cu $R_m \geq 350 \text{ N/mm}^2$ și $A \geq 4\%$ Echivalentă cu Fma 350 STAS 569-79 (anulat)
EN-GJMW-400-5	Fontă maleabilă cu miez alb cu $R_m \geq 400 \text{ N/mm}^2$ și $A \geq 5\%$ Echivalentă cu Fma 400 STAS 569-79 (anulat)
EN-GJMW-360-12S	Fontă maleabilă cu miez alb cu $R_m \geq 360 \text{ N/mm}^2$ și $A \geq 12\%$ din probă turnată separat
EN GJMB-300-6	Fontă maleabilă cu miez negru cu $R_m \geq 300 \text{ N/mm}^2$ și $A \geq 6\%$ Echivalentă cu Fmn 300 STAS 569-79 (anulat)
EN GJMB-450-6	Fontă maleabilă cu miez negru cu $R_m \geq 450 \text{ N/mm}^2$ și $A \geq 6\%$ Echivalentă cu Fmn 450 STAS 569-79 (anulat)
EN GJMB-600-3	Fontă maleabilă cu miez negru cu $R_m \geq 600 \text{ N/mm}^2$ și $A \geq 3\%$ Echivalentă cu Fmn 600 STAS 569-79 (anulat)

Tabel 15: Fonte cu grafit nodular (ductile) SR EN 1563:2019. Simbolizare conform SR EN 1560:2011

SR EN 1563:2019	Observații
EN-GJS-500-7	Fontă cu grafit nodular având $R_m \geq 500 \text{ MPa}$ și $A \geq 7\%$ Echivalentă cu Fgn 500 STAS 6071-82 (anulat)
EN-GJS-800-2	Fontă cu grafit nodular având $R_m \geq 800 \text{ MPa}$ și $A \geq 2\%$ Echivalentă cu Fgn 800 STAS 6071-82 (anulat)
EN-GJS-350-22C	Fontă cu grafit nodular având $R_m \geq 350 \text{ MPa}$ și $A \geq 22\%$ determinate pe probă prelevată din piesă
EN-GJS-800-8U	Fontă cu grafit nodular având $R_m \geq 800 \text{ MPa}$ și $A \geq 8\%$ determinate pe probă atașată la piesa turnată
EN-GJS-HB 230	Fontă cu grafit nodular având duritatea medie 230 HB
EN-GJS-350-22-LT	Fontă cu grafit nodular având rezistența la rupere $R_m \geq 350 \text{ MPa}$ , $A \geq 22\%$ la care se garantează energia la rupere $KV \geq 12 \text{ J}$ la $-40^\circ\text{C}$ ;
EN-GJS-350-22-RT	Fontă cu grafit nodular având rezistența la rupere $R_m \geq 350 \text{ MPa}$ , $A \geq 22\%$ la care se garantează $KV \geq 17 \text{ J}$ la $23^\circ\text{C}$ ;
EN-GJS-400-18-LT	Fontă cu grafit nodular având rezistența la rupere $R_m \geq 400 \text{ MPa}$ , $A \geq 18\%$ la care se garantează energia la rupere $KV \geq 12 \text{ J}$ la $-20^\circ\text{C}$ ;
EN-GJS-400-18-RT	Fontă cu grafit nodular având rezistența la rupere $R_m \geq 400 \text{ MPa}$ , $A \geq 18\%$ la care se garantează energia la rupere $KV \geq 14 \text{ J}$ la $23^\circ\text{C}$

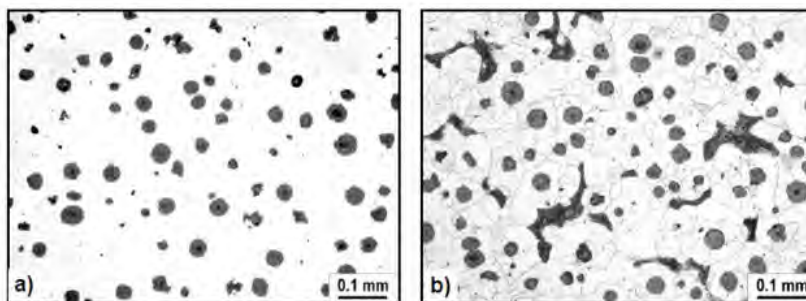
În locul rezistenței la tracțiune și alungirii la rupere se poate simboliza duritatea Brinell. Standardul SR EN 1563:2019 prevede pentru fontele nodulare feritice și posibilitatea garantării unei anumite energii la rupere KV, determinată fie la temperatura ambiantă, fie la temperaturi scăzute (până la  $-40^\circ\text{C}$ ); mărcile respective se recunosc după literele RT sau LT scrise la sfârșitul simbolului.



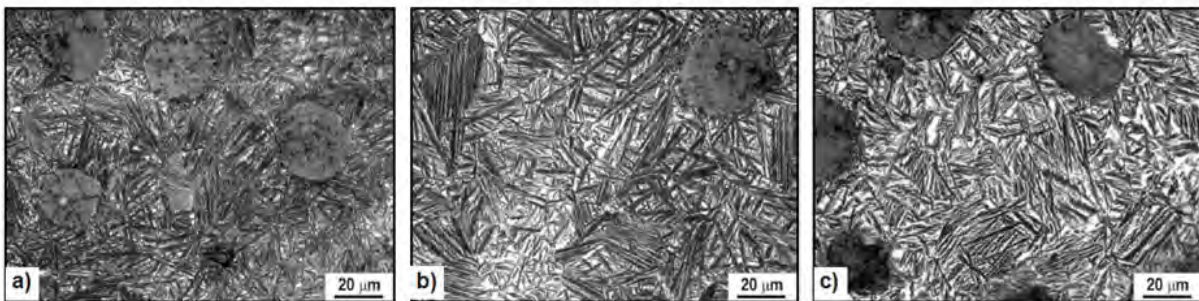
Fig. 150 Exemple de aplicații pentru piese turnate din fontă.



Studiu de caz: Un exemplu de aplicații în care s-au obținut o reducere a greutatei piesei cu 10% și o economie totală (material + prelucrări mecanice) de 30% este prezentat în imaginea de mai jos, Fig. 151. Arborele cotit transmite mișcarea de la pistoanele motorului termic la cutia de viteză a mașinii. Este o piesă importantă a motorului și este puternic sollicitată mecanic. Un colectiv de la Manchester (England) Materials Science Center a reușit aceste performanțe înlocuind materialul arborelui cotit cu ADI, respectiv cu fontă ductilă tratată termic (austempering), în literatura de specialitate acest tip de material se numește **Austempered Ductile Iron**.



Microstructure of as-cast ductile iron material: a) polished; b) etched



Microstructure of unalloyed ADI material austempered for 1 hour at: a) 300°C; b) 350°C; c) 400°C

Fig. 151 Austempered Ductile Iron. Domeniul automotiv [[video](#)].

În urma aplicării tratamentului termic de **austempering**, fonta cu grafit nodular va avea o matrice compusă din zone feritice și austenitice cu aspect acicular fin, care în literatura de specialitate se numește **ausferită**. Aceste **fonte se mai numesc ADI**<sup>10</sup> – fonte cu grafit nodular bainitice, datorită aspectului microstructurii matricei metalice fin acicular, ce se aseamănă ca și morfologie cu structurile bainitice. În realitate, **fontele ADI** nu conțin bainită în structură.

<sup>10</sup> Austempered Ductile Iron - ADI

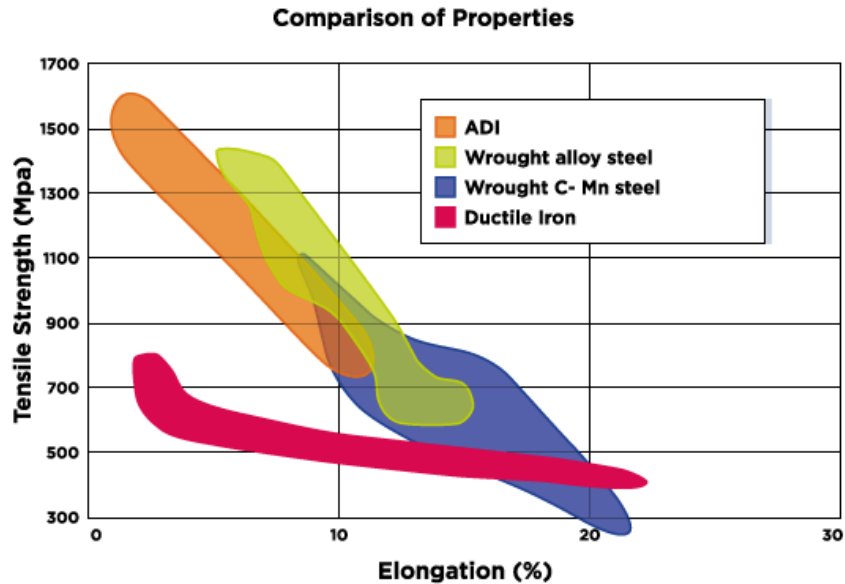


Fig. 152 [Proprietăți mecanice](#) pentru materiale folosite la construcția arborilor cotiți.

Inițial, fontele cu grafit nodular erau o alternativă acceptabilă pentru materialul din care erau realizați arborii cotiți, dar prin dezvoltarea fontelor ADI s-au obținut rezultate foarte bune pentru caracteristicile mecanice de rezistență, în condițiile în care fonta este cu 10% mai ușoară decât oțelul.

## CURS 7 METALE ȘI ALIAJE NEFEROASE

### NOȚIUNI INTRODUCATIVE

Aliajele neferoase reprezintă o categorie importantă de materiale utilizate în toate domeniile tehnice. Aliajele neferoase se pot clasifica după diferite criterii astfel:

- După numărul elementelor de aliere – se disting:
  - aliaje binare,
  - ternare,
  - cuaternare,
  - complexe;
- După conținutul elementelor de aliere – se grupează în:
  - Slab aliate (2-3 % elemente de aliere);
  - Mediu aliate (suma elementelor de aliere fiind de 3-10%)
  - Înalt aliate (cu peste 10% elemente de aliere);
- După natura elementului de bază – neferoasele se clasifică în aliaje cu bază de cupru, aluminiu, magneziu, staniu, plumb, etc

Aliajele neferoase mai conțin în afara metalului de bază și a elementelor de aliere și o anumită cantitate de elemente nedorite, respectiv o serie de impurități care pot fi metalice, nemetalice, gazoase. Aceste impurități micșorează valorile caracteristicilor fizice, chimice, mecanice și tehnologice ale aliajelor neferoase.

După tehnologiile de prelucrare aliajele neferoase se pot clasifica în :

- Aliaje de turnătorie
- Aliaje deformabile.

Domeniile de aplicare practică ale metalelor și aliajelor metalice neferoase sunt determinate în primul rând de proprietățile lor. De exemplu, pentru construcția motoarelor cu reacție sunt necesare aliaje neferoase refractare (aliaje cu titan, zirconiu, niobiu, etc.). În industria nucleară sunt folosite aliajele cu densitate ridicată, plumb, reniu, tantal. Pentru fabricarea cuzineților se utilizează aliajele antifricțiune cu bază de Pb, Sn, Al, etc. În aviație sunt folosite aliaje neferoase cu greutate specifică mică: aliaje cu aluminiu, magneziu, beriliu, titan, Fig.153.

## F/A22 Raptor



### Single-Crystal Titanium panels

The F-22 construction is 39% titanium, 24% composite, 16% aluminium and 1% thermoplastic by weight. Titanium is used for its high strength-to-weight ratio in critical stress areas, including some of the bulkheads, and also for its heat-resistant qualities in the hot sections of the aircraft. Carbon-fibre composites have been used for the fuselage frame, the doors, intermediate spars on the wings, and for the honeycomb sandwich construction skin panels [[Air force technology](#)].

Fig. 153 Materiale folosite în construcția avioanelor moderne de vânătoare.

## CUPRUL ȘI ALIAJELE SALE



Metalele au în general un aspect argintiu strălucitor. Excepție face cuprul, care este un metal de culoare roșiatică, aurul de culoare galbenă și Cesium. Cuprul, alături de argint are bune proprietăți [antimicrobiene](#), fapt ce-l recomandă în medii unde dorim să împiedicăm dezvoltarea bacteriilor. A fost folosit încă din epoca bronzului pentru confecționare de unelte, obiecte de uz personal precum vase, amfore, iar mai târziu pentru arme, tunuri etc.

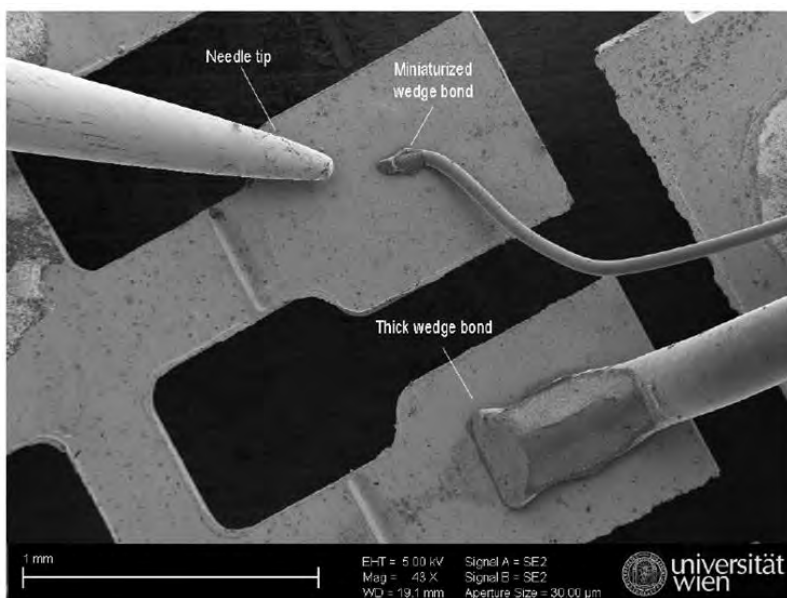


*The Tell al-'Ubaid Copper Lintel or Imdugud Relief is a large copper panel found at the ancient Sumerian city of Tell al-'Ubaid in southern Iraq. Excavated by the English archaeologist Henry Hall in 1919, the frieze is one of the largest metal sculptures to survive from ancient Mesopotamia and is now preserved in the [British Museum](#).*



Pe durata dinastiei lui Ur (cca. 2.650-2.500 î.e.n.) meșteșugarii în metale au făurit decorațiuni realizate din cupru, care au fost găsite în anul 1919 în sudul Irakului modern, la vremea respectivă orașul Sumerian Tell al-Ubaid și reprezintă printre puținele sculpturi din metal care au originea în Mesopotamia și au fost salvate. Această lucrare poate fi admirată [în Muzeul Istoric din Londra](#).

Dintre toate metalele industriale folosite, cuprul este cel mai bun conductor electric și termic. Rezistența cuprului este folosită ca valoare model de către Comisia Electrotehnică Internațională, iar conductivitatea electrică a cuprului este considerată indicator de 100% ca referință în sistemul **IACS (International Annealed Copper Standard)**. Conductivitatea electrică a celorlalte metale este comparată cu acest indicator.



Size comparison of a conventional needle tip with miniaturized wedge bonds occurring in microelectronic devices: Diameter of needle tip: 80 $\mu$ m, diameter of "thick" wedge bond wire: 250 $\mu$ m, diameter of miniaturized wedge bond wire: 50 $\mu$ m

Fig. 155 La 4500 de ani de la realizarea sculpturilor metalice *Imdugud Relief* din cupru și asamblate prin brazare de la **Tell al-'Ubaid Copper Lintel** este prezentată o îmbinare liptă la nivel microelectronic, folosind conectori de cupru cu grosimi de 50  $\mu$ m.

Cuprul și aliajele sale sunt clasificate în nouă grupe principale, astfel:

1. Cupru de puritate tehnica ce contine minim 99,3% Cu
2. Aliaje de cupru care contin pana la 5% elemente de aliere
3. Alame (aliaje de cupru cu zinc), care contin pana la 40% Zn
4. Bronzuri fosforoase (aliaje de cupru cu staniu), care contin pana la 10%, Sn si 0,2% P
5. Bronzuri de aluminiu (aliaje de cupru cu aluminiu), care contin pana la 10% Al
6. Bronzuri de siliciu (aliaje de cupru cu siliciu), care contin pana la 3% Si
7. Aliaje de cupru-nichel, care contin pana la 30% Ni
8. Aliaje cupru-zinc-nichel (alpaca), care contin pana la 7% Zn si 18% Ni
9. Aliaje speciale, care contin elemente de aliere introduse.

FIGURE 1: Periodic Table of Elements Showing Copper & Its Common Alloying Elements

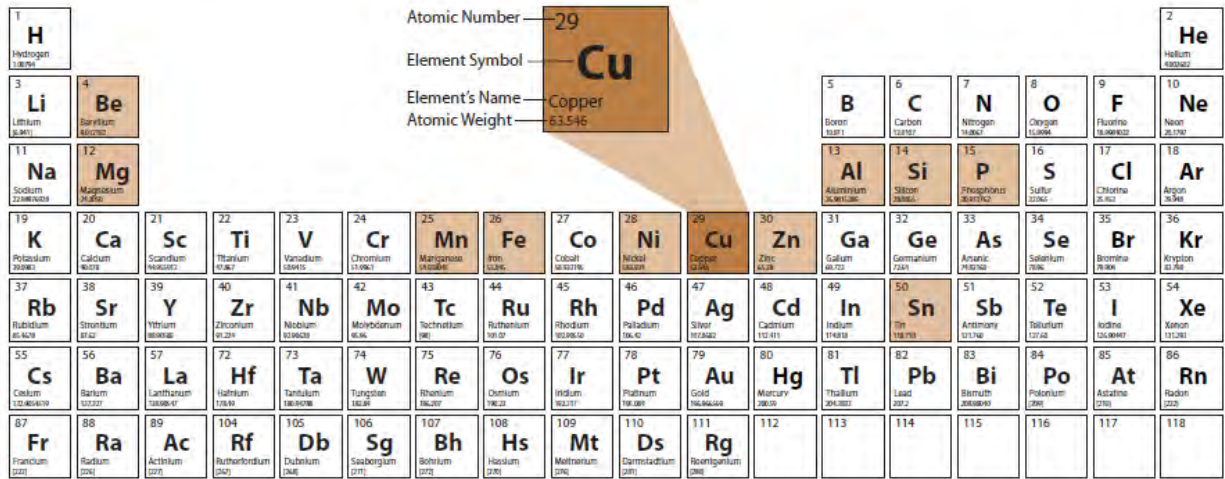


Fig. 156 Cuprul, element metallic cu numeroase [aplicații industriale](#).

Cuprul se laminează și se prelucrează foarte ușor atât la cald, cât și la rece (ductilitate și maleabilitate foarte bună). Cuprul posedă o conductivitate termică și electrică înaltă și are o rezistență la coroziune bună în diferite medii. Are o densitate mare, se poate turna, deforma plastic și trata termic. Principalele aliaje ale cuprului sunt **bronzurile** (Cu-Sn) și **alamele** (Cu-Zn).

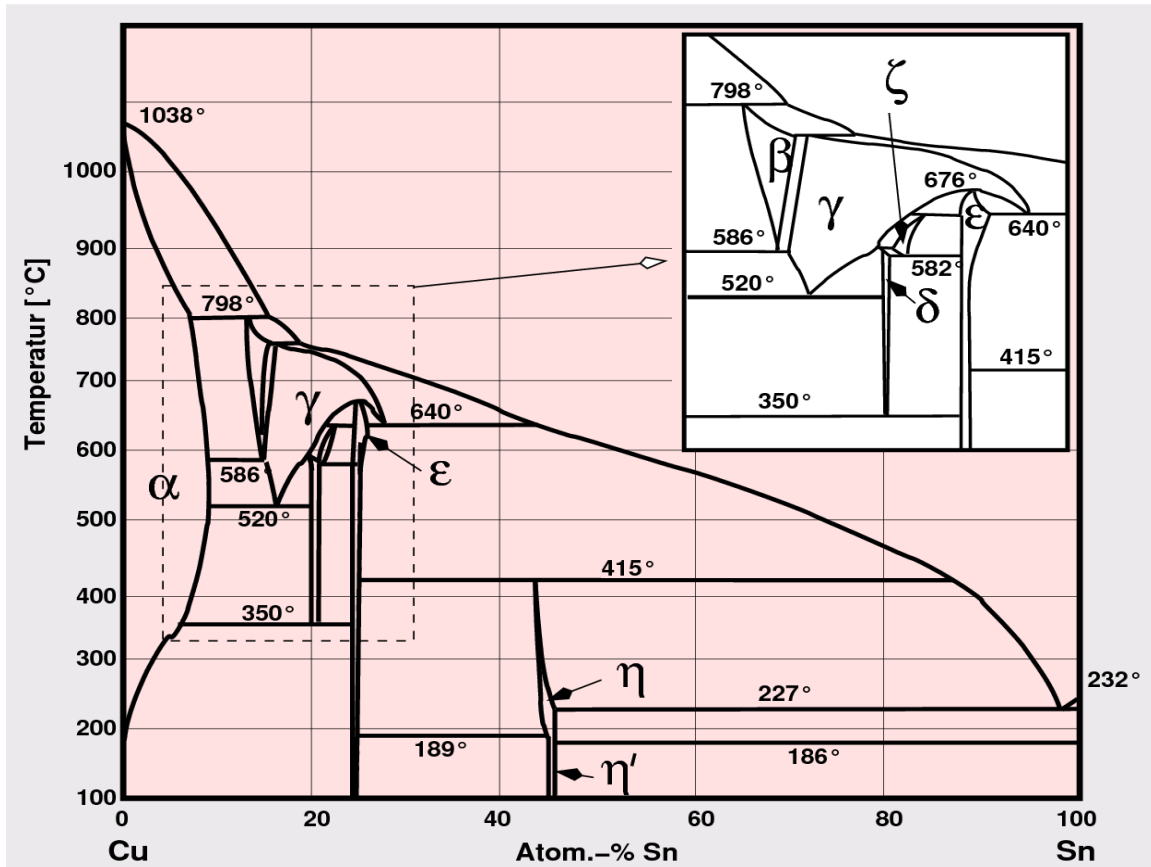


Fig. 157 Diagrama de echilibru [Cu-Sn](#). Bronzuri cu staniu.

## BRONZURI

Bronzurile se clasifică în două categorii:

- bronzuri cu Sn
- bronzuri fără Sn, speciale : CuAl, CuNi, CuBe, CuPb, etc. Se vor numi după principalul element de aliere: bronzuri cu aluminiu, bronzuri cu nichel, bronzuri cu beriliu etc.

După proprietățile pe care le dețin, respectiv după domeniul de utilizare, aliajele cu bază de cupru pot fi grupate în următoarele categorii : aliaje antifricțiune, refractare, criogenice, pentru organe de mașini, pentru îmbinări sudate, superconductoare, magnetice, rezistive, pentru turnare sub presiune, antiscântei, pentru ambutisare adâncă, cu modul de elasticitate ridicat, etc.

Diagrama de echilibru [Cu-Sn](#) prezintă 7 soluții solide, 3 peritectice, 1 eutectoid, Fig. 157.

- $\alpha$  – Cu(Sn) (max. 16% Sn / 586°C, scade la ~ 1.3% Sn la răcire f. lentă);
- $\beta$  – soluție solidă pe baza compusului  $\text{Cu}_5\text{Sn}$  (rap. electronic 3/2), rețea c.v.c.
- $\delta$  - soluție solidă pe baza compusului  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  (rap. electronic 21/13), rețea cubică complexă;
- $\epsilon$  - soluție solidă pe baza compusului  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (rap. electronic 7/4), rețea hexagonal compactă;
- $\eta$  – [compus CuSn]
- $\omega$  – soluție solidă Sn(Cu)

Bronzurile cu un conținut de până la 14% Sn au o structură monofazică – soluție solidă  $\alpha$  de Sn în Cu. În stare turnată aspectul este dendritic (Fig. 158), iar în stare recoaptă aspectul grăunților este poliedric, conform (Fig. 159). Se pot observa și macule de recoacere. Bronzurile cu un conținut de peste 14% Sn au o structură bifazică – soluție solidă  $\alpha$  și un amestec mecanic (eutectoid)  $\alpha + \delta$ . Aliajele industriale conțin max. 25-30% Sn; structură  $\alpha$  sau  $\alpha + (\alpha + \delta)$ . Eutectoidul apare peste 5% Sn.

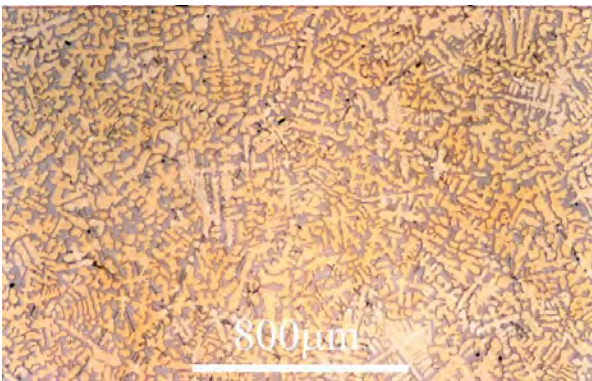


Fig. 158 Structură dendritică bronz turnat; Cu 80, Sn 20 (wt%) [10].

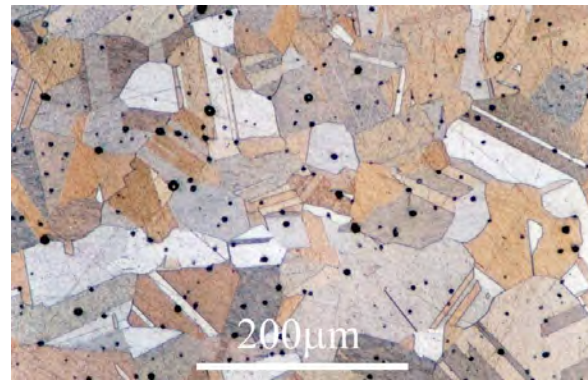


Fig. 159 Structură poliedrică bronz după recoacere: Cu 85, Sn 15 (wt%) [10].



Structura bronzurilor speciale depinde de elementele principale de aliere . Ea poate fi monofazică sau bifazică. Structurile monofazice sunt formate din soluții solide, iar cele bifazice dintr-o soluție solidă moale și unul sau mai mulți constituenți duri. Având bune proprietăți antifricțiune, din bronz se pot confecționa cuzineți, lagăre, roți dințate, roți melcate. O aplicație interesantă este confecționarea [eliceilor pentru nave maritime](#), unele modele ajungând la diametre până la 10.5 m și cu greutate peste 100 tone.

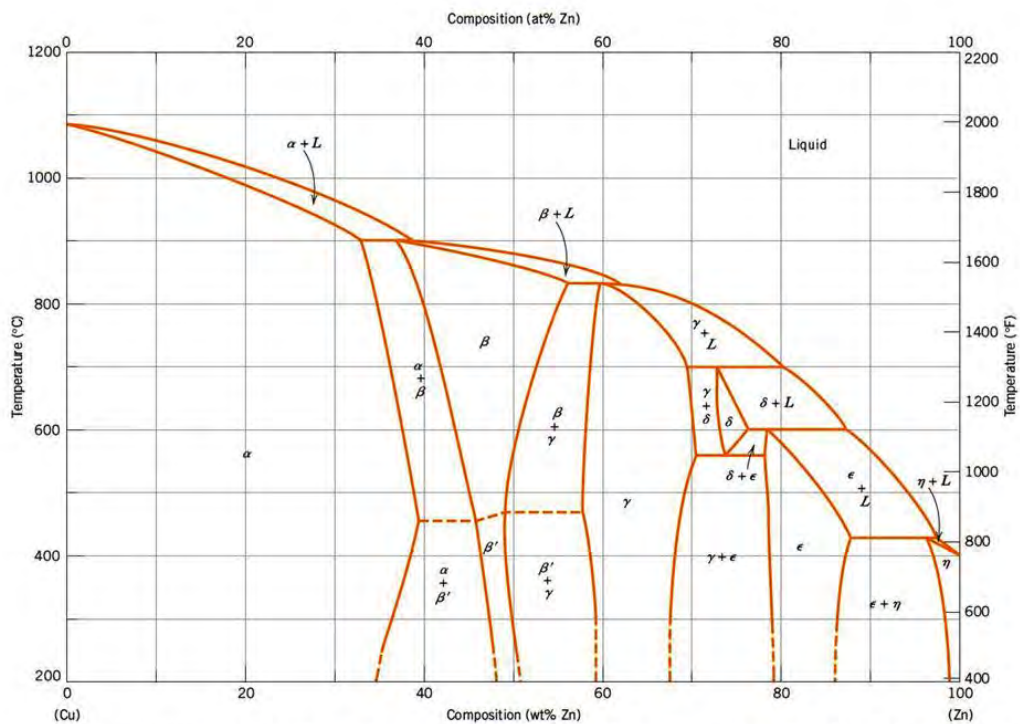




Fig. 158 Aplicații pentru piese realizate din bronz [video].

Studiu de caz: În economia globală mii de nave maritime străbat mările și oceanele lumii, transportând cantități impresionante de marfă și materii prime pe distanțe mari, inclusiv gaz natural lichefiat. O astfel de navă consumă cca. 100 tone de combustibil pe zi. Printr-un design optimizat și cu o calitate a suprafețelor elicelor realizate din bronzuri cu nichel, se pot obține economii importante. Datorită variațiilor de viteză și presiune pe suprafața elicelor, ia naștere fenomenul de cavitație care produce o serie de cavități pe aceste suprafețe. Ca urmare, cresc forțele de frecare la curgerea apei pe suprafețele atacate de cavitație și cresc vibrațiile, precum și puterea pe care motorul navei trebuie să o asigure la aceeași viteză de deplasare. Crește semnificativ consumul de combustibil și costurile de exploatare. Din aceste motive, pentru construcția elicelor se folosesc bronzuri cu proprietăți superioare de rezistență mecanică și la coroziune.

## ALAME



The copper-zinc phase diagram. [Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd edition, Vol. 2, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.]

Alamele sunt aliaje Cu-Zn și sunt cele mai răspândite aliaje ale cuprului. Se pot distinge două mari clase :

- alame simple binare Cu-Zn;
- alame speciale complexe, care pe lângă Cu și Zn mai conțin și alte elemente de aliere pentru a le îmbunătăți proprietățile;

Diagrama de echilibru a sistemului de aliaje Cu-Zn se compune din cinci diagrame peritectice simple din care rezultă șase faze distincte și anume :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\zeta$ , în ordinea crescândă a conținutului de zinc, Fig. 159. La temperatura ambiantă structura alamelor poate fi :

- monofazică până la 37% Zn – alcătuită din soluția solidă  $\alpha$  de Zn dizolvat în Cu. Structura poate să fie dendritică (la răcirea cu viteză mare) sau poliedrică (răcirea cu viteză mică). Aceste alame sunt plastice și se pot deforma la rece.
- bifazică (între 37-46 % Zn) – este alcătuită dintr-o soluție solidă  $\alpha$  și o soluție solidă intermediară  $\beta$  pe baza compusului electronic CuZn. Se pot prelucra numai la cald deoarece sunt dure și fragile.

Alamele cu peste 47% Zn nu mai prezintă interes din punct de vedere practic, deoarece din cauza compușilor intermediari ( $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\zeta$ ) au o fragilitate mare. Se folosesc pentru fabricarea pieselor care se prelucrează prin așchiere (șuruburi, roți dințate, etc.).

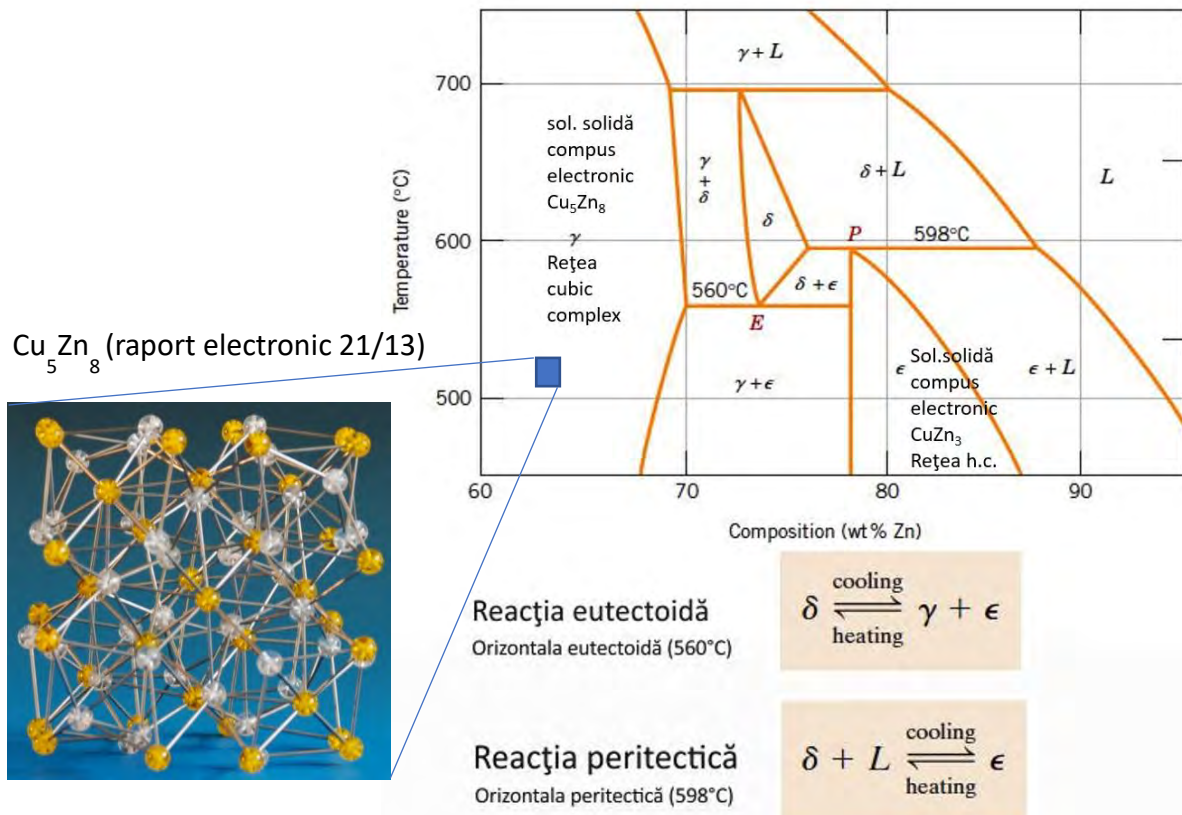


Fig. 160 Detaliu din diagrama de echilibru Cu-Zn ce prezintă reacția eutectoidă și peritectică.



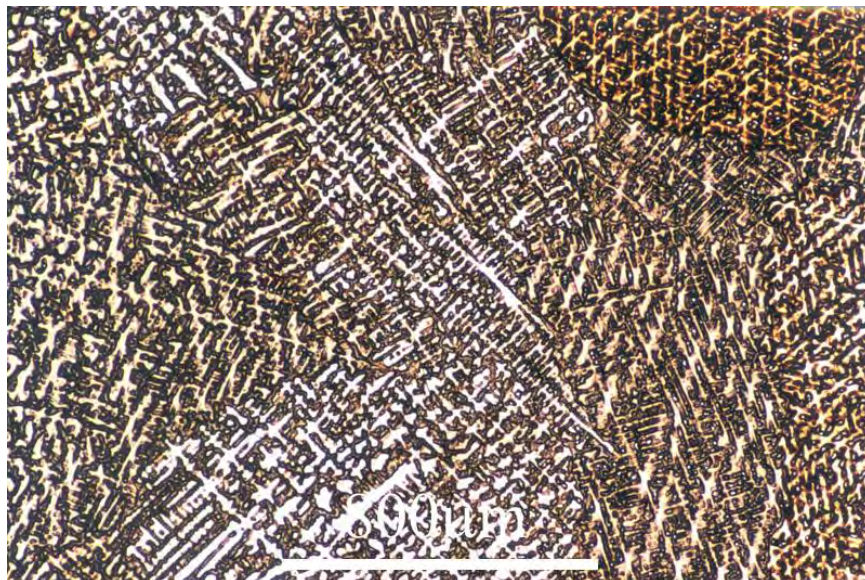


Fig. 161 Structură dendritică alamă Cu70Zn30 cu 1.3%Pb și 0.5% Sn [10]



Fig. 162 Aplicații pentru aliaje de lipire tare, lipire radiatoare (cu baghetă din alamă).



Fig. 163 Aplicații pentru alame: conectori electrici, pneumatici, fittinguri etc.





O aplicație mai specială a aliajelor Cu-Zn, respectiv a alamelor de tipul tombak, este [realizarea tuburilor metalice](#) (patroane) pentru muniția de război. Tombakul este un aliaj Cu-Zn ce conține 80-95% Cu și 5-20% Zn. Mai pot fi adăugate Sn, Pb, As ce modifică nuanța de culoare a aliajului. Aliajele mai vechi tombak se refereau la aliaje Cu-Zn cu un conținut de Zn până la 28-35%.

[[video](#)]

## ALUMINIUL ȘI ALIAJELE SALE



Aluminiul este unul dintre cele mai răspândite elemente din litosfera pământului cu o pondere de cca. 7,5 % situându-se pe locul al 3-lea după oxigen și siliciu. Aluminiul a fost descoperit de fizicianul danez [H.Cr. Oersted](#), care în anul 1825 a reușit să îl separe din minereu și să obțină o mică cantitate din acest metal.

În Europa, clasificarea aliajelor de aluminiu se face după normele [Asociației Internaționale a Aluminiului](#) (AA), care este alcătuit din opt grupe diferite, în funcție de principalele elemente de aliere, Fig. 164.

Simbolizare A.A Aluminium Association	Simbolizare I.S.O. aproximativa	Tipul de aliaj, elemente de aliere	Limita de curgere Rp0,2, MPa	
			Necălit	Supercălit
1XXX Electrice, termice, conductivitate	Al XX.X	Nealiat	< 40	-
2XXX Imbatrinire	AlCu XX	Cu	< 140	250 - 600
3XXX Deformabile	AlMn XX	Mn	< 60	-
4XXX Brazare, Mat. adaos	AlSi XX	Si	70 - 180	-
5XXX Rezistente dupa sudare	AlMg XX	Mg	35 - 125	-
6XXX Extrudare	AlMgSi XX	Si - Mg	< 110	150 - 400
7XXX Rezistente	AlZn XX	Zn	< 140	220 - 800
8XXX	AlSn XX	alte elemente (Fe, Ni)	-	-

■ **Tratabile termic**

Fig. 164 Clasificarea aliajelor de aluminiu după normele [Asociației Internaționale a Aluminiului](#).



St Mary Axe, London, United Kingdom



GT Tower East Location, Seoul, South Korea

Fig. 165 Utilizarea aliajelor de aluminiu în [construcția zgârie-norilor](#).

Datorită proprietăților sale remarcabile, aluminiul se situează pe primul loc în producția de metale neferoase la nivel mondial, cu o pondere de peste 40% din producția mondială totală. Durata minimă de serviciu a structurilor metalice realizate din aliaje de aluminiu este de 80 de ani, iar în această perioadă, aliajele de aluminiu nu-și pierd proprietățile fizico-mecanice în intervale de temperaturi cuprinse între  $-80^{\circ}\text{C}$  și  $300^{\circ}\text{C}$  în orice condiții climatice [17]. Din aceste motive, 25% din producția mondială de aluminiu se utilizează în construcții [17].



Linii de înaltă tensiune, [Construcții moderne](#), Cadre ferestre și construcții ușoare, Carcase produse electronice, Electrocasnice, Industria aeronautică, [Nave de luptă](#) și agrement, Industria aerospațială, [Trenuri de mare viteză](#), [Automotiv](#)

Fig. 166 Primele 10 aplicații de utilizare a aliajelor de aluminiu.

Datorită raportului foarte favorabil rezistență/greutate, a conductivității termice și electrice foarte bune, a rezistenței la coroziune și a factorilor atmosferici, a deformabilității foarte bune, aliajele de aluminiu sunt folosite într-o gamă foarte largă de aplicații, Fig. 166 ([Top Ten](#)). La acestea se adaugă faptul că aluminiul poate fi reciclat într-o proporție de aproape 100% cu un impact redus asupra mediului.



Începând cu anii 1980, aliajele de aluminiu au devenit materialul principal pentru construcția cadrelor pentru [trenurile de mare viteză](#). În anii 1996, trenurile TGV Duplex au implementat conceptul de tren de mare viteză cu capacitate optimă, fiind capabile să transporte cu 40% mai mulți pasageri, având o masă cu 12% mai redusă datorită structurii de aluminiu. Masa mai redusă, permite accelerări mai rapide și costuri de exploatare mai reduse.

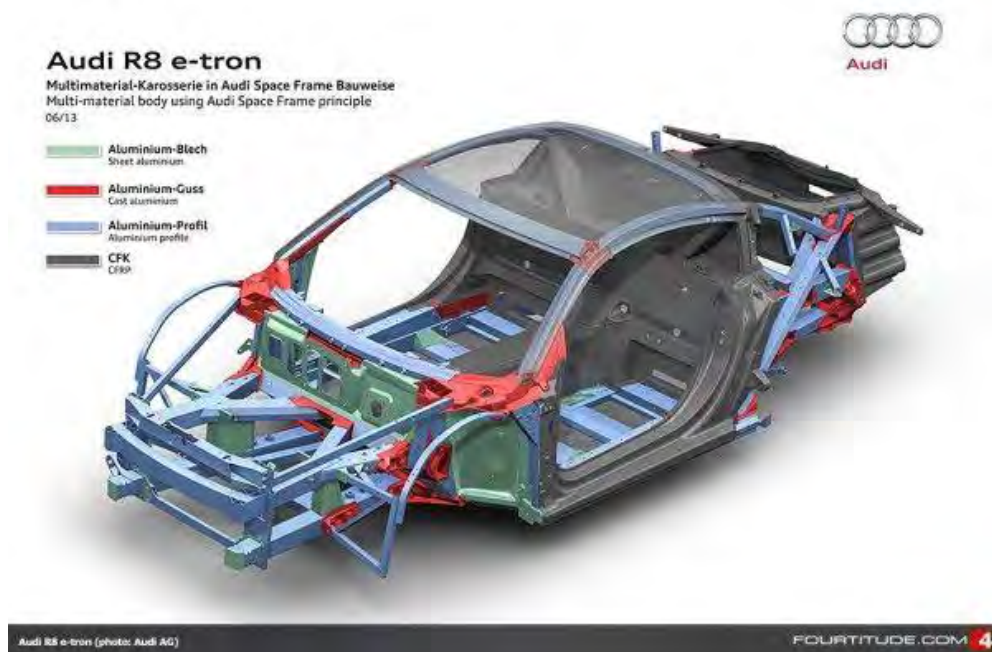


Fig. 167 Construcția caroseriei pentru Audi R8 e-tron, (full electric). Aluminiu și materiale compozite [\[video\]](#).

[Producătorii din industria automotive](#), folosesc tot mai mult aliajele de aluminiu în construcția de caroserii, având o greutate de 190 kg mai mică decât varianta anterioară, [Jaguar New XF](#) a reușit să reducă greutatea caroseriei cu 80 de kg față de alte modele de mașini sport ale concurenței.



Fig. 168 Aluminiul în construcția utilităților pentru pompieri, blocuri motoare, motociclete.



Aliajele de aluminiu se clasifică după modul de procesare în:

- **Aliaje deformabile**
  - **Nedurificabile** prin tratament termic
  - **Durificabile** prin tratament termic
    - Duraluminiu (elemente de aliere Cu, Mg, Mn)
    - Aliaje AlMgSi
    - Aliaje de înaltă rezistență (aliante cu Zn, Mg, Cu)
    - Aliaje rezistente la cald (aliante cu Cu, Mg, Ni, Fe, Si)
- **Aliaje pentru turnătorie**
  - Aliaje Al-Cu
  - Aliaje Al-Si (Siluminuri)
  - Aliaje Al-Mg
  - Aliaje Al-Zn
  - Aliaje rezistente la cald.

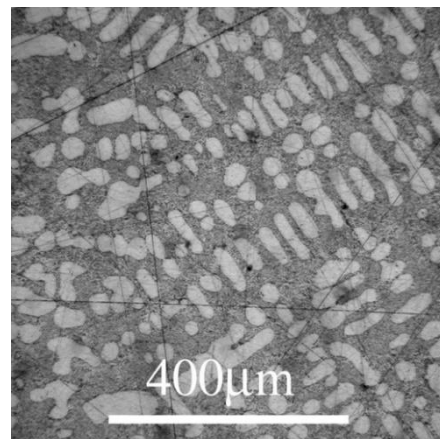
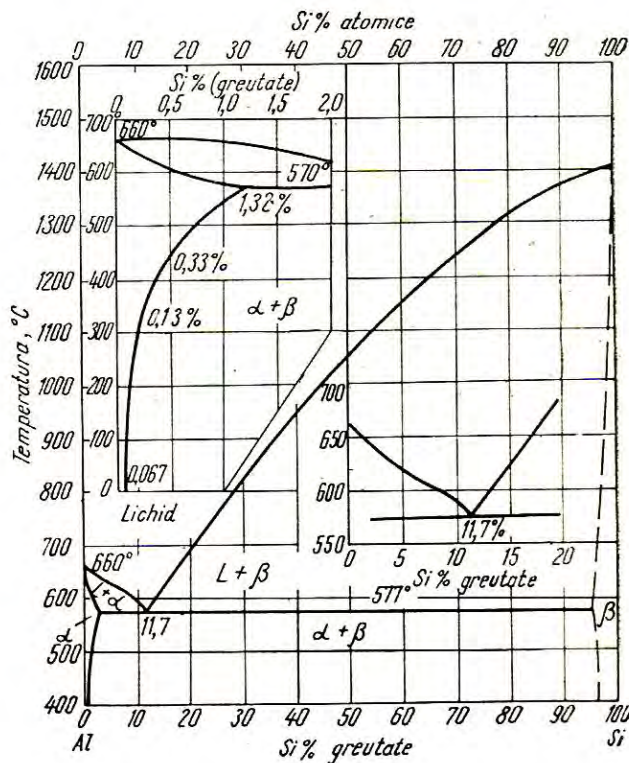


Fig. 169 Diagrama de echilibru Al-Si [10] (Siluminuri) și microstructura aliajului eutectic (11,7% Si + adaos de Na pentru rafinarea microstructurii). Se îmbunătățesc proprietățile mecanice și se reduce nivelul porozității în piesele turnate.

## SILUMINURILE

Sunt aliajele Al-Si conțin până la 20% Si și fac parte din clasa aliajelor de Al pentru turnătorie. Prezintă proprietăți foarte bune de turnare, sudabilitate oxiacetilenică bună, rezistă la coroziune mai bine decât aluminiul. Siluminurile pot fi:

- **hipoeutectice** cu conținut de 5-10% Si. Se folosesc mai rar ca și aliaje binare, fiind aliante în special cu Fe (0,8-2%). Au tenacitate bună și rezistență la coroziune bună.
- **hipereutectice** cu conținut de 11-13,5% Si. Acestea se utilizează pentru turnarea unor piese cum ar fi pistoanele pentru motoare.

Modificarea structurii aliajelor reprezintă schimbarea caracteristicilor structurii primare în vederea îmbunătățirii caracteristicilor mecanice de rezistență ale aliajelor, a proprietăților lor de rezistență la coroziune, a comportării la temperaturi înalte sau la temperaturi joase în domeniul criogenic. Există trei direcții prin care se poate interveni asupra structurii aliajelor de aluminiu:

- I. **Micșorarea dimensiunii grăunților dendritici.** Se aplică la aluminiul tehnic și la aliajele cu structură monofazică.
- II. **Schimbarea structurii interne a grăunților dendritici primari.** Se aplică prin accentuarea ramificării structurii dendritice și reducerea grosimii brațelor dendritice (ex. la aliajele Al-Mg)
- III. **Schimbarea morfologiei și fineții fazelor eutectice.** Se micșorează distanța interlamelară și grosimea lamelelor fazelor componente din amestecul mecanic de eutectic.

Structura unui silumin turnat nemodificat cu ~ 13% Si este formată din cristale de siliciu primar și o matrice eutectică. Dacă aliajul este modificat (în general cu Na) structura este formată din dendrite de culoare deschisă pe un fond globular fin eutectic, Fig. 169.

## DURALUMINIUL

este un aliaj de aluminiu rezistent, dur, ușor, utilizat pe scară largă în construcția de avioane, descoperit în 1906 și brevetat în 1909 de [Alfred Wilm](#), un metalurgist german. A fost fabricat inițial doar la compania Dürerer Metallwerke din Düren, Germania (numele aliajului este o combinație dintre Dürerer și aluminiu). După îmbunătățirile ulterioare, duraluminul a fost introdus pe piață în 1908. Prima sa utilizare a fost pentru construcția cadrului de [dirijabile rigide](#) (Zepelin). Compoziția și tratamentul termic al duraluminiului au fost considerate secrete de război [[video](#)].

Aliajele moderne de duralumin (AA2024) conțin 4,4% Cu, 1,5% Mg, 0,6% Mn și 93,5% Al în greutate. Datorită rezistenței sale, în curând a fost folosit și de industria aeronautică (începând cu anii 1930). [Zemaitis Guitar Factory](#) este populară pentru utilizarea acestui material în linia sa de chitare metalice.



Fig. 170 Chitară Zemaitis cu cadru metalic de duralumin.



Fig. 171 Exemple de aplicații duralumin.

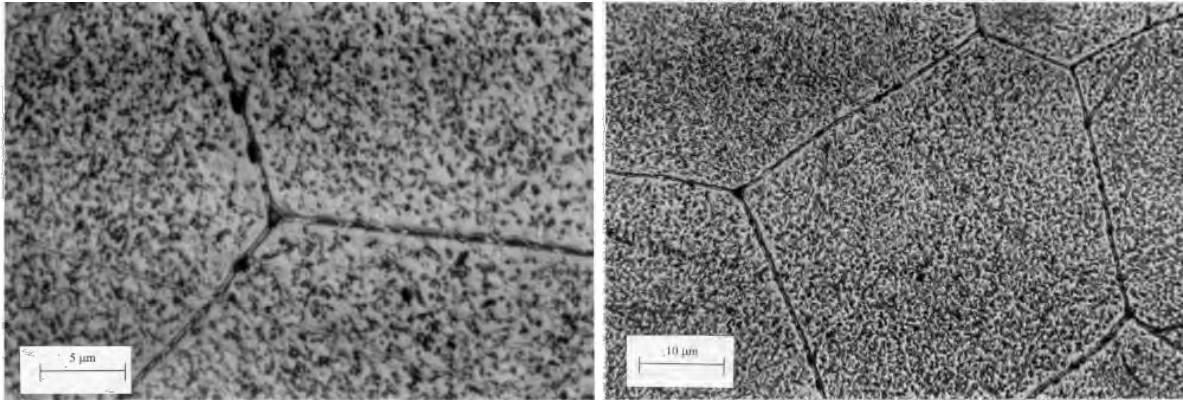


Fig. 172 Precipitate intermetalice  $\text{CuAl}_2$  formate prin tratament termic de [durificare prin precipitare](#).

Principiul tratamentului termic de durificare prin precipitare a fost descris mai devreme, în [Fig. 109](#). Aliajele de aluminiu cu rezistența mecanică cea mai ridicată sunt cele din seriile 2xxx, 6xxx și 7xxx care pot fi durificate prin precipitare (tratamentul termic se mai numește îmbătrânire). O condiție de aplicare a acestui tratament este ca soluția solidă de la temperatura ambiantă să prezinte o scădere importantă a solubilității cu temperatura. [Tratamentul termic de îmbătrânire](#), decurge în trei etape:

1. Călire de punere în soluție (încălzirea peste curba solvus și omogenizarea compoziției chimice)
2. Răcirea rapidă (pentru obținerea soluției solide suprasaturate)
3. Îmbătrânirea (precipitarea compușilor intermetalici din soluția solidă suprasaturată).

## CURS 8 TRATAMENTE TERMICE

### NOȚIUNI INTRODUCTIVE

Tratamentele termice sunt procedee tehnologice ce constau din **încălziri**, **mențineri** la anumite temperaturi și **răcirii** în anumite condiții pentru îmbunătățirea unor proprietăți ale materialelor metalice prin modificarea structurii.

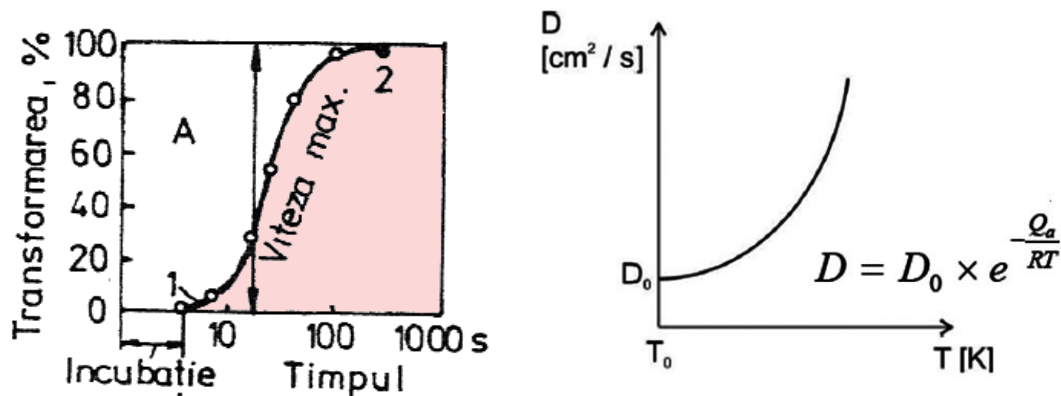


Fig. 173 Curba cinetică de transformare a unei faze și [legea Difuziei lui Fick](#).

Tratamentele termice se bazează pe transformările de fază în stare solidă care sunt guvernate de variația [energiei libere Gibbs](#) pentru un sistem termodinamic (ex. un aliaj). Similar diagramelor de echilibru care se construiesc pe baza curbelor de răcire pentru aliajele de diferite concentrații dintr-un sistem de aliaje, [diagramele Transformare-Temperatură-Timp](#) se construiesc cu ajutorul curbelor cinetice de transformare.



## DIAGramele TTT

O curbă cinetică de transformare este prezentată în Fig. 173 și exprimă procentul transformat din structura unui aliaj în funcție de timp, pentru o menținere izotermă la o anumită temperatură. La răcirea unui aliaj sub punctul critic, ce reprezintă temperatura la care începe transformarea în stare solidă, transformarea nu se inițiază instantaneu. Este nevoie de un anumit interval de timp, denumit **timp de incubație**, până când transformarea este detectabilă (prin măsurători de dilatometrie), Fig. 173.

Curba cinetică de transformare este de tip sigmoid, adică prezintă saturație la ambele capete pe domeniul de variație al timpului, Fig. 173. Deasemenea, viteza de transformare care este tangenta la curba cinetică de transformare, nu este constantă pe tot intervalul de timp. Transformarea începe lent, ulterior crește viteza de transformare, iar pe finalul transformării viteza de transformare scade din nou.

Altfel spus, aceste fenomene metalurgice trebuie privite la scară atomică pentru a înțelege procesele care au loc. Schimbarea sistemului de cristalizare presupune o nouă structură cristalină, cu aranjamente diferite ale atomilor din rețea. Aceste noi poziții ale atomilor, rearanjarea acestora conform structurilor cristaline nou formate, necesită desfășurarea unor procese de difuzie și un interval de timp aferent.

Procesele de difuzie necesită timp, dar și o energie de activare  $Q_a$ , fiind fenomene activate termic, Fig. 173. Legea de variație a difuziei  $D$ , este de tip Arrhenius.

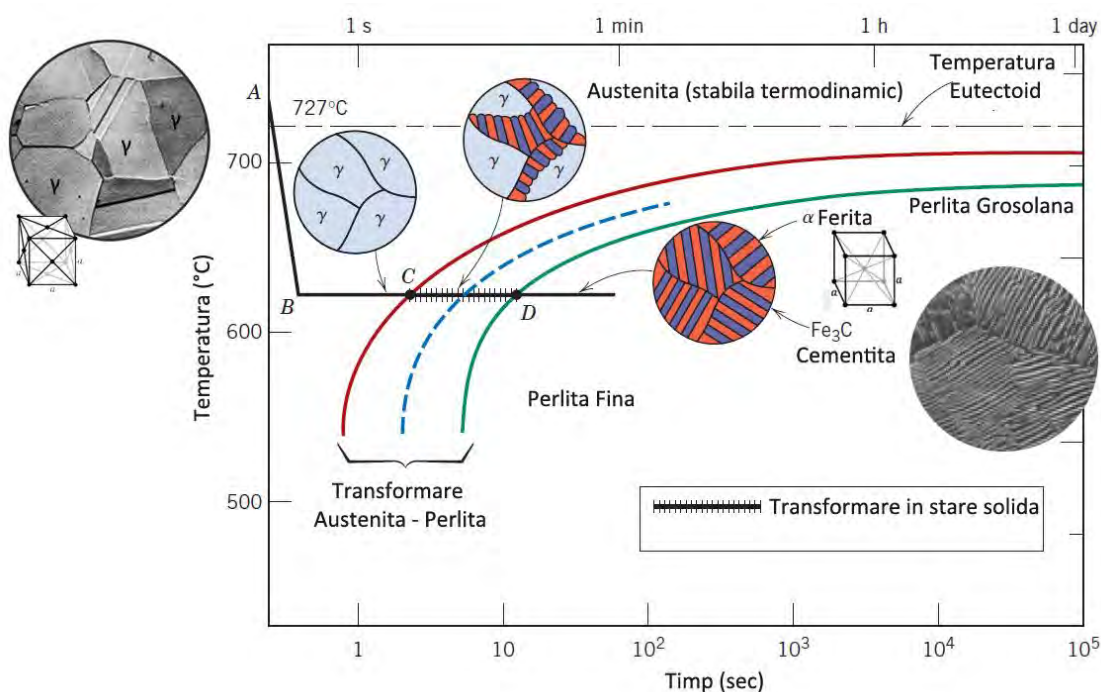


Fig. 174 Principiul transformărilor în stare solidă la transformările izoterme (TTT). Modificat după [8].

Pentru simplificare s-a ales un oțel eutectoid, dar mecanismul de transformare este similar și în cazul oțelurilor hipoeutectoide sau hipereutectoide, cu observația că în curbele de transformare TTT mai apare o curbă aferentă separării feritei proeutectoide în cazul oțelurilor hipoeutectoide, iar în cazul oțelurilor hipereutectoide, curba suplimentară corespunde separării de cementită secundară. În cazul oțelurilor eutectoide, deoarece toată austenita se transformă integral în perlită, avem doar curba de început/sfârșit a acestei transformări.

Conform Fig. 174, din domeniul austenitic (punctul A pe axa temperaturii) oțelul eutectoid se răcește rapid până la temperatura de cca. 620°C, după care se menține la această temperatură până la finalizarea transformării austenitei la răcire. Transformarea austenitei începe în punctul C situat pe curba de început de transformare (culoare roșie) și se încheie în punctul D, situat pe curba de sfârșit de transformare (curba de culoare verde), Fig. 174. Curba punctată de culoare albastră reprezintă curba de transformare în proporție de 50% din structura inițială de austenită. Se poate observa deasemenea, că transformarea completă a austenitei în acest caz durează ușor peste 10 secunde, cu un timp de incubație inclus de 2-3 secunde.

În acest caz, structura finală a oțelului eutectoid este tot perlitică, doar că este o perlită mult mai fină față de cea obținută în condiții de echilibru termodinamic (răcire lentă, timp lung de transformare). Mai mult, în condițiile în care vitezele de răcire sunt mai mari și variază continuu, adică în cazurile cele mai frecvente din practică, se obțin structuri metastabile mult diferite față de cele obținute în condiții de echilibru pentru viteze lente de răcire, Fig. 175.

## DIAGramele CCT

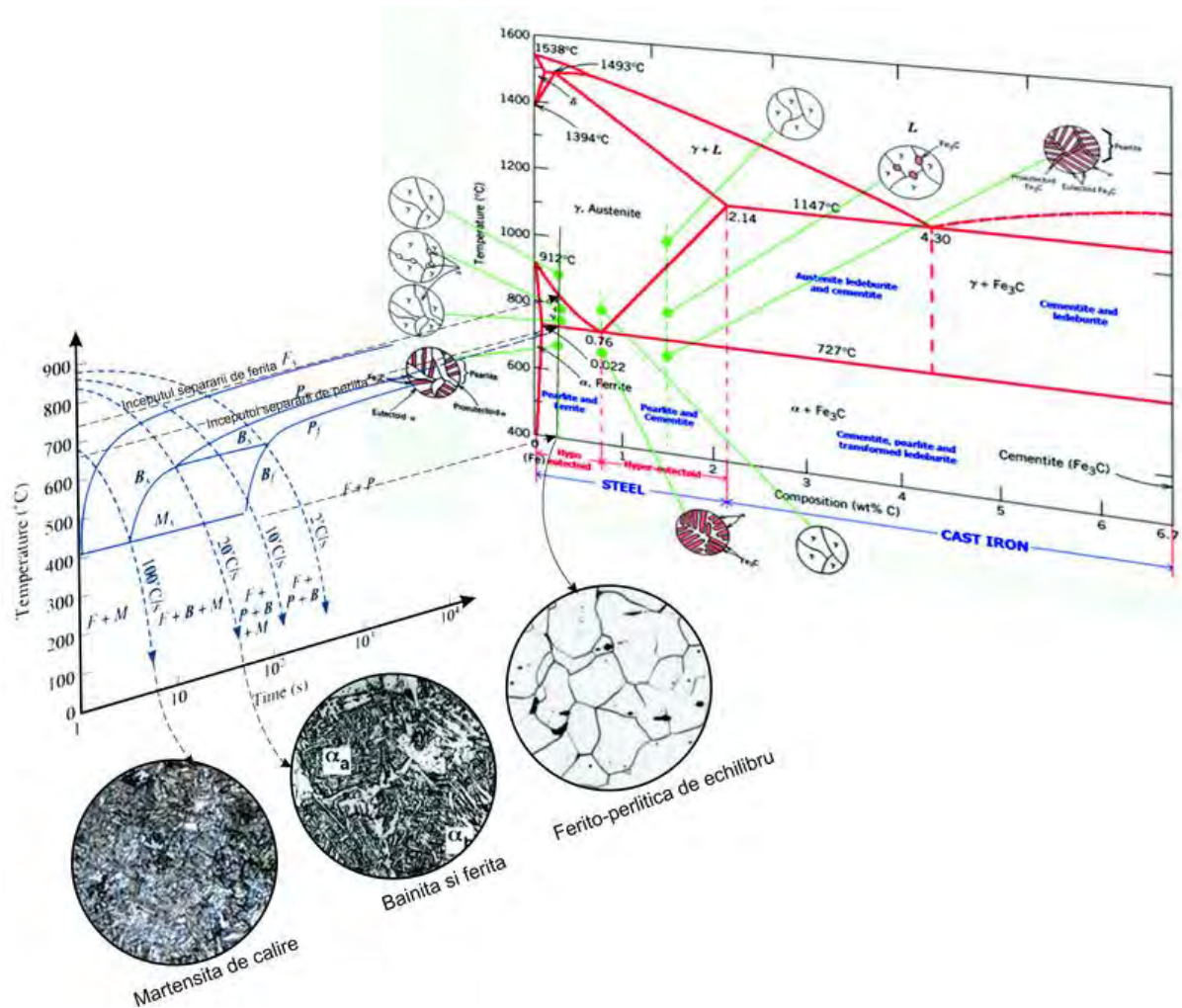
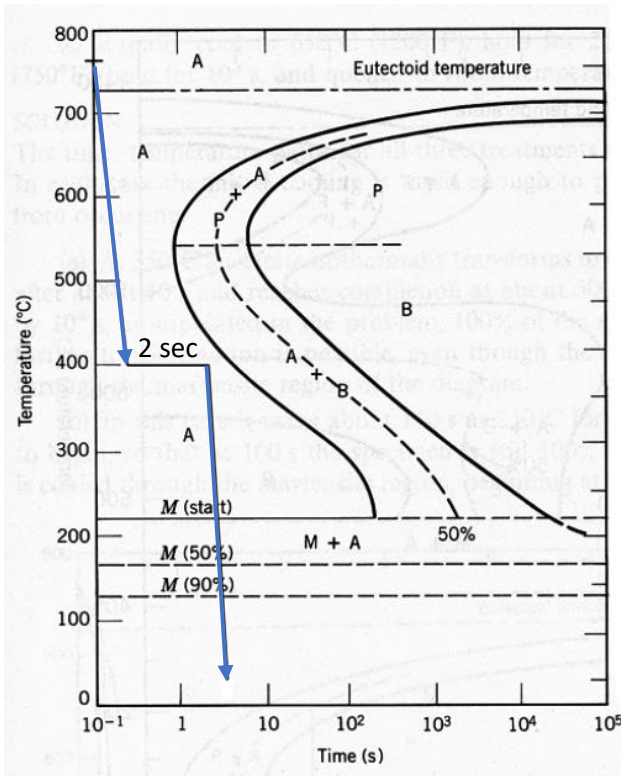


Fig. 175 Diagrama la răcire continuă a unui oțel hipoeutectoid (0.2% C).

Ca urmare, același oțel cu compoziție chimică identică, dar supus la viteze diferite de răcire din domeniul austenitic, poate prezenta structuri ce conțin: perlită fină, bainită și martensită în diferite proporții.

Studiu de caz: **Scenariul 1** (oțel eutectoid cu 0.8% C)



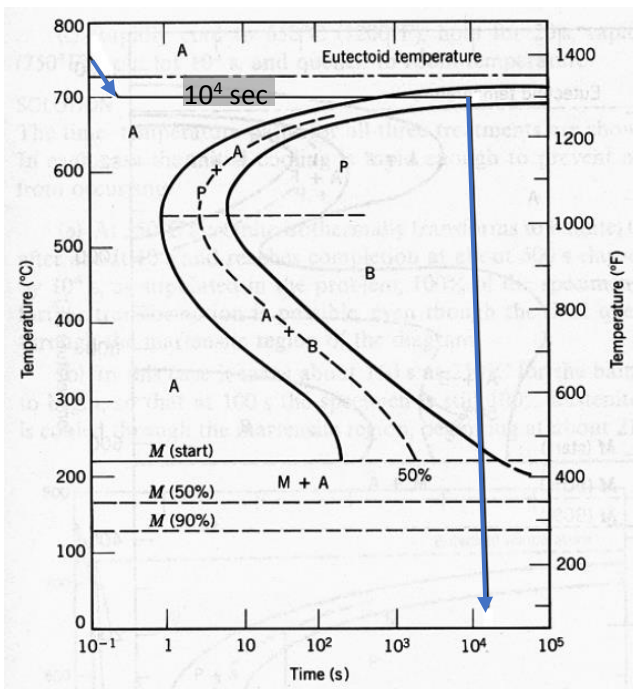
După răcirea la 400°C, menținere pentru 2 s, curba de răcire nu intersectează nici o curbă de transformare, structura oțelului rămâne 100% austenită.

După răcirea bruscă la temperatura ambiantă, toată structura se transformă în martensită.

**Structura finală: 100% martensită.**

Fig. 176 Răcire rapidă la 400°C, menținere 2 sec, răcire rapidă la temperatura ambiantă.

Studiu de caz: **Scenariul 2** (oțel eutectoid cu 0.8% C)



Răcire urmată de menținere la 700°C pentru 10<sup>4</sup> s, cca. 50% din probă s-a transformat în perlită grosolană (de echilibru).

În continuare, urmează o răcire bruscă la temperatura ambiantă, iar austenita rămasă netransformată (adică 50% din structura inițială), va suferi o transformare martensitică.

Structura finală:

**50% perlită grosolană + 50% martensită.**

Fig. 177 Răcire rapidă la 700°C, menținere 10<sup>4</sup> sec, răcire rapidă la temperatura ambiantă.



Studiu de caz: **Scenariul 3** (oțel eutectoid cu 0.8% C)

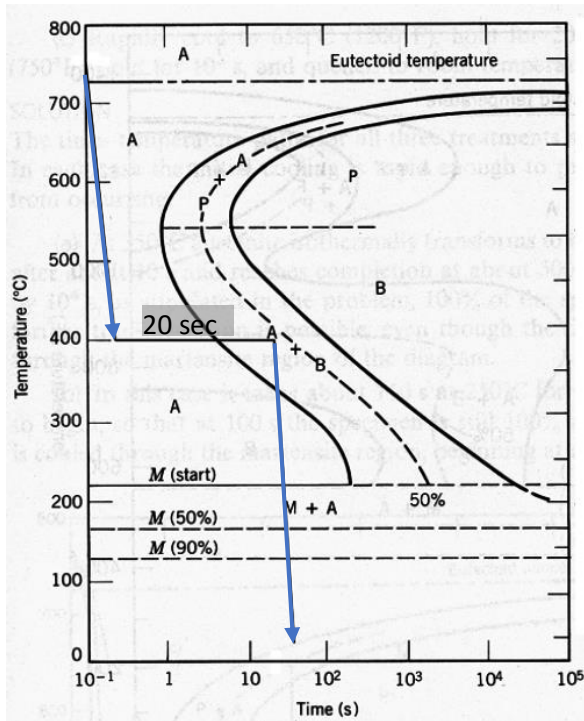


Fig. 178 Răcire rapidă la 400°C, menținere 20 sec, răcire rapidă la temperatura ambiantă.

După răcirea la 400°C și menținere pentru 20 sec, cca. 40% din austenită va suferi o transformare bainitică.

Mai departe, ca urmare a răcirii bruște la temperatura ambiantă, diferența de 60% din austenită (rămasă netransformată), va suferi o transformare martensitică.

Structura finală:

**40% bainită + 60% martensită**

Studiu de caz: **Scenariul 4** (oțel eutectoid cu 0.8% C)

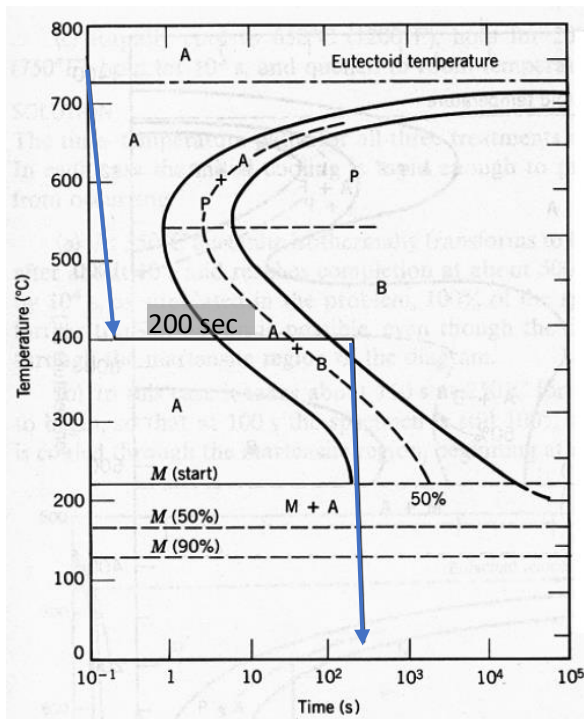
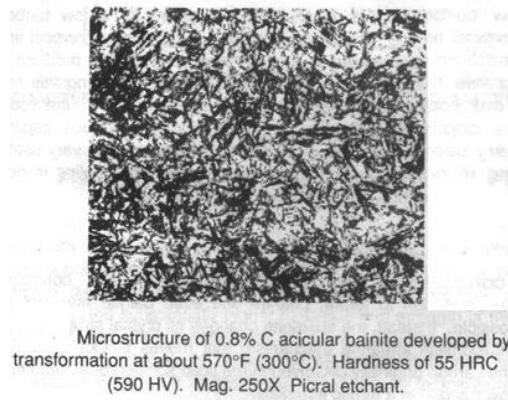


Fig. 179 Răcire rapidă la 400°C, menținere 200 sec, răcire rapidă la temperatura ambiantă.

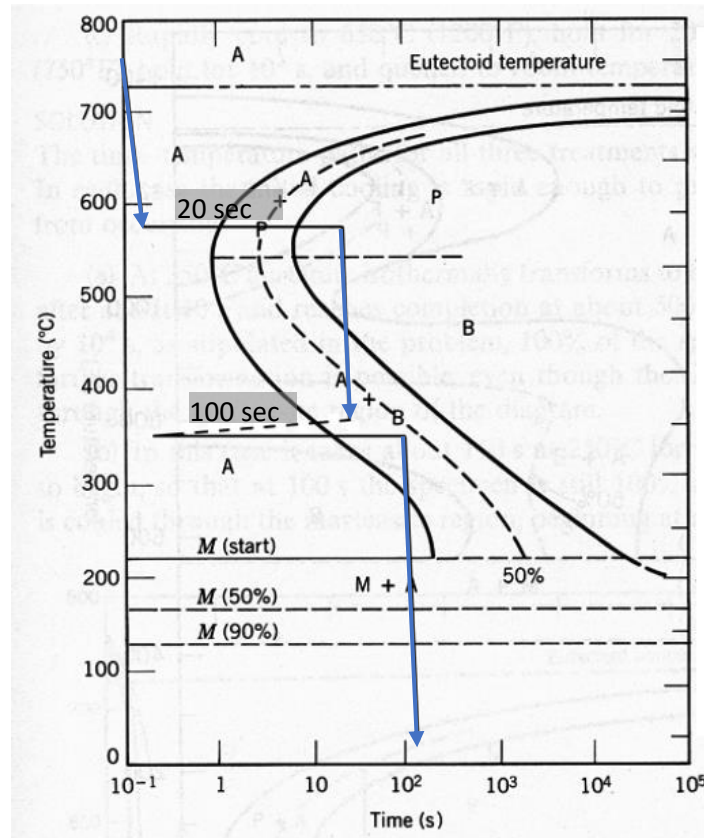


După răcirea la 400°C, menținere pentru 200 s, proba va avea integral o structură bainitică.

Mai departe, nu se mai produc transformări structurale, chiar dacă oțelul a fost supus la o răcire accelerată, transformarea austenitei la răcire fiind completă.

**Structura finală: 100% bainită.**

Studiu de caz: **Scenariul 5** (oțel eutectoid cu 0.8% C)



După răcirea la 575°C și menținere pentru 20 s, oțelul va avea integral o structură perlitică fină. Întreaga cantitate de austenită s-a transformat la răcire în perlită fină.

Secvența de răcire la 350°C, nu va mai produce alte transformări, deoarece austenita s-a transformat integral în perlită fină, în etapa anterioară.

**Structura finală: 100% perlită fină**

Fig. 180 Răcire rapidă la 575°C și menținere 20 sec, răcire rapidă la 350°C și menținere 100 sec, răcire rapidă la temperatura ambiantă.

Studiu de caz: **Diagrama la răcire continuă a unui oțel cu 0.2% C, 1.2% Mn, 1% Cu și 0.6% Ni**

În Fig. 181 este prezentată o diagramă la răcire continuă a unui oțel hipoeutectoid ce conține 0.2% C și alte elemente de aliere (Mn, Cu și Ni). Oțelurile pentru tratamente termice sunt elaborate foarte îngrijit, compoziția chimică fiind foarte importantă în aceste cazuri. Variații mici în concentrația elementelor de aliere, pot să conducă la modificări importante asupra rezultatului tratamentelor termice aplicate.

Se poate observa ușor că odată cu creșterea vitezei de răcire, structurile devin din ce în ce mai bogate în structuri bainitice și martensitice, iar caracteristicile de rezistență mecanică cresc (duritatea și rezistența la tracțiune). Pe diagramă sunt trecute pentru fiecare curbă de răcire, proporțiile și tipul constituenților microstructurali, împreună cu valoarea durității aferente aliajului respectiv (uzual în HB sau HV).

În practică, trebuie ținut cont că piesele înregistrează viteze de răcire diferite la exterior față de interiorul acestora. Diferențele în viteza de răcire vor fi cu atât mai mari, cu cât cresc grosimile de material. Fenomenul este relativ ușor de înțeles și are legătură cu mecanismele de transfer termic, precum și cu coeficientul de conducție termică a materialului. Straturile exterioare de material pierd căldura prin radiație, convecție și conducție, în vreme ce straturile interioare doar prin conducție. Pierderile prin radiație la interior sunt relativ mici, deoarece gradientul de temperatură este redus (distribuție a temperaturii relativ uniformă, comparativ cu gradientul termic mai mare de la suprafața materialului). Asta înseamnă că și microstructurile după tratamentul termic vor fi puternic dependente de adâncimea din material.



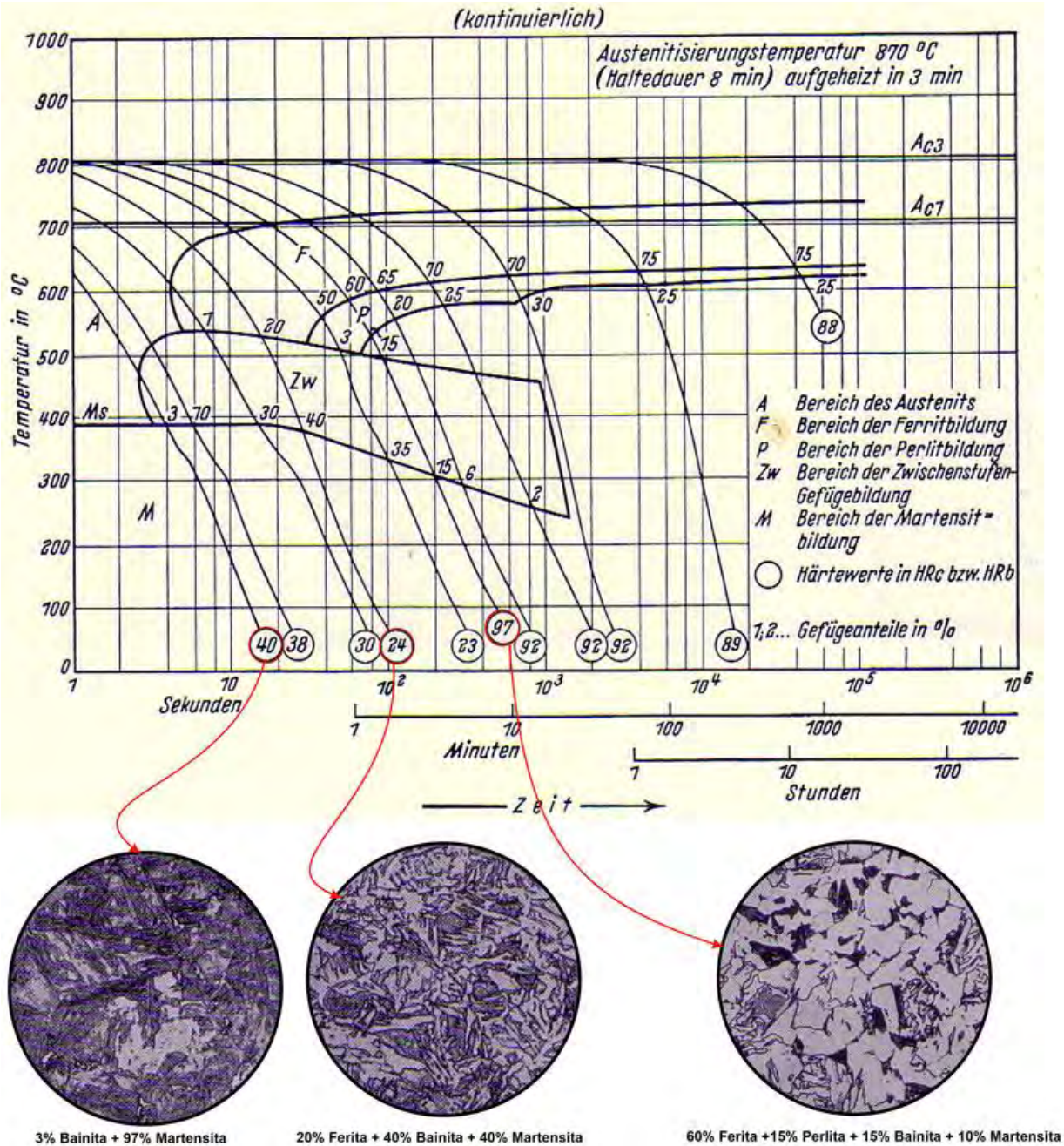


Fig. 181 Diagrama la răcire continuă a unui oțel cu 0.2%C, 1.2% Mn, 1% Cu și 0.6% Ni [sursa]

### Studiu de caz: Defecte apărute în construcții metalice ca urmare a fenomenului de durificare.

Din exemplele prezentate până acum s-a observat un fenomen de călire al oțelurilor în raport cu viteza de răcire a acestora din domeniul austenitic. Dacă în unele situații este ceea ce ne dorim să obținem, în alte situații acest fenomen devine foarte periculos. Un exemplu în acest sens este cazul construcțiilor metalice sudate. De la poduri, clădiri, hale industriale, instalații energetice sau de ridicat, la multe alte tipuri de construcții structurale, durificarea oțelurilor ca urmare a ciclului termic de la sudare este un fenomen nedorit și foarte periculos, mărind riscul de fisurare și de rupere a îmbinărilor sudate.





Fig. 182 Fenomene de fisurare în construcții metalice sudate [poduri de oțel].

În Fig. 182 este prezentată o fisură de cca. 3 m lungime apărută într-un pod cu structură metalică, inițiată prin fenomene de oboseală în cusătura metalică. Fenomenele de fisurare la oboseală au ca și factori de inițiere o serie de cauze, dintre care unele sunt de natură metalurgică. Fenomenul de durificare a materialului ca urmare a ciclului termic de la sudare, este un factor important. Incluziunile nemetalice, porozitatea, fenomene de coroziune localizată, fazele secundare cu morfologie grosolană sunt câțiva factori frecvent responsabili de astfel de probleme.

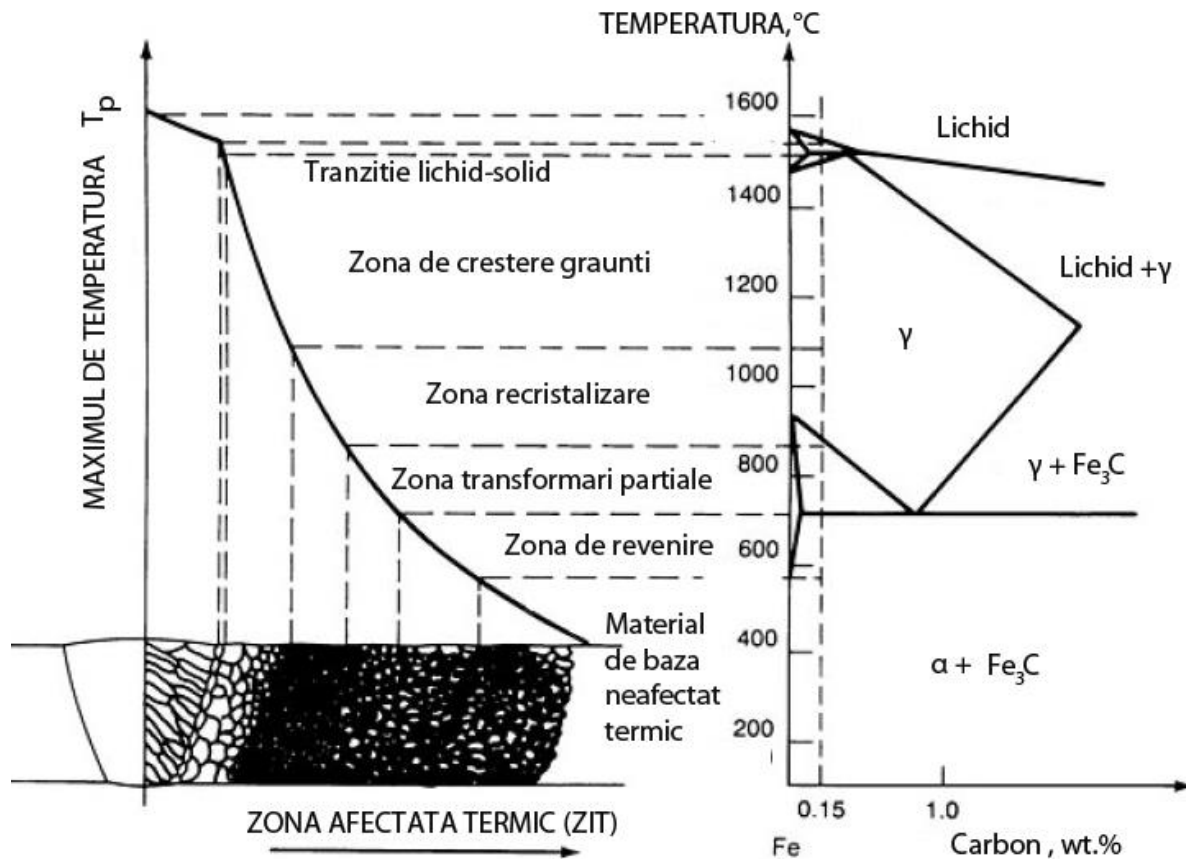


Fig. 183 Zona afectată termic (ZIT) la sudare.

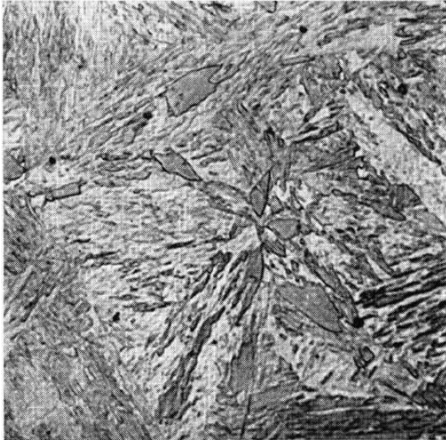


Fig. 184 Martensită de călire, X1000. Duritate foarte mare după călire, 550HV10.

Așa cum se poate observa în figurile 184-186, martensita conduce la o densitate mare de dislocații vizibile sub formă de ace sau plăci, ce ies în relief din matricea metalică [8].

Transformarea martensitică se face fără difuzie, carbonul rămâne prins în interstițiile octaedrice ale  $Fe(\alpha)$ , care în condiții de echilibru (răcire lentă) poate dizolva maxim doar 0,02% C la 727°C. La oțeluri carbon, martensita se formează sub 220°C la răcire continuă, viteza de formare este foarte ridicată și se obține o soluție solidă ( $\alpha$ ) suprasaturată în carbon cu rețeaua cristalină puternic deformată și tensionată.

În aceste condiții, fragilitatea materialului crește foarte mult și totodată, crește și susceptibilitatea de fisurare la rece, sau fisurarea asistată de hidrogen [36].

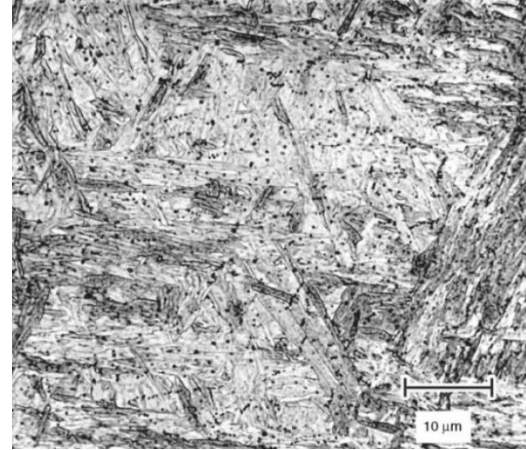


Fig. 185 Martensită de revenire, X1000. Se pot observa precipitări foarte fine de carburi de culoare închisă.

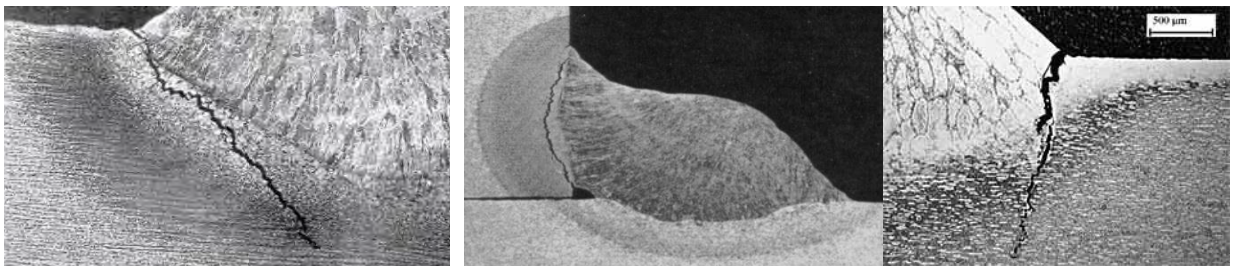
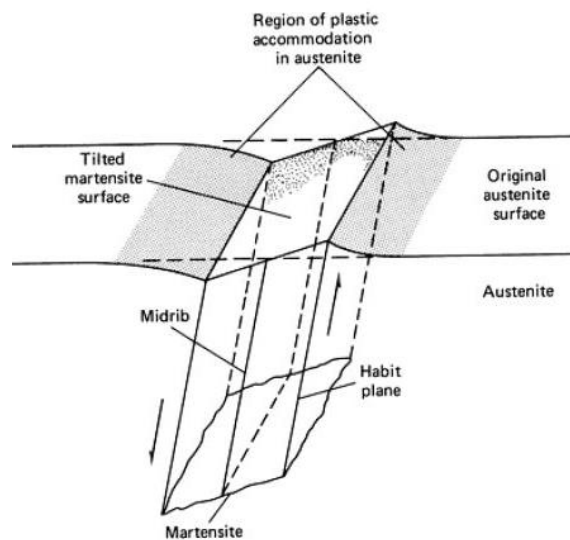
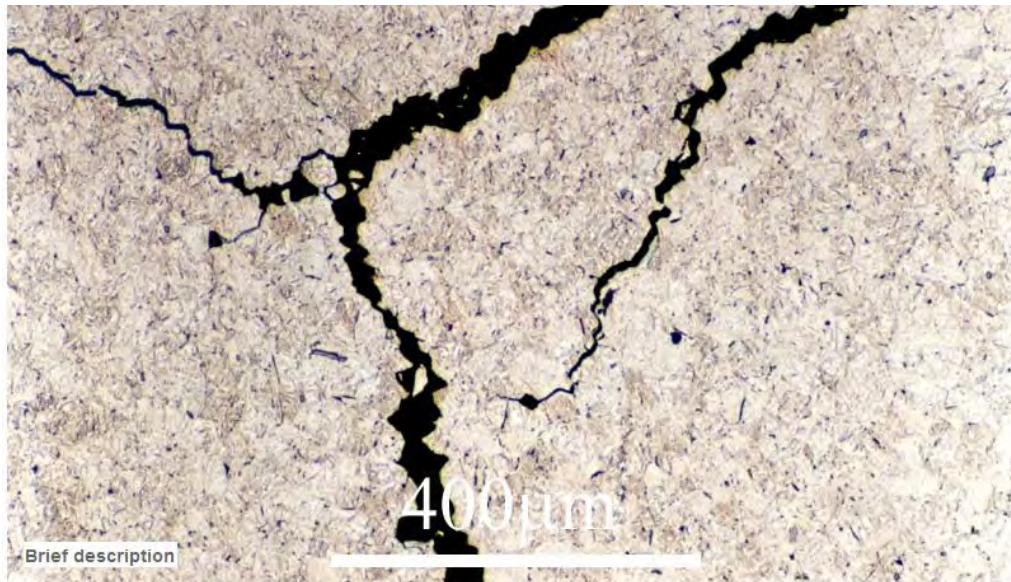


Fig. 187 Îmbinări sudate fisurate la rece, fisurare asistată de hidrogen [36].

În Fig. 188 este prezentată o piesă din oțel cu 0.4% C, care după operația de călire a fisurat. Matricea metalică este formată din martensită de călire ce prezintă fragilitate ridicată și o capacitate aproape nulă de acomodare deformații plastice. Ca urmare a creșterii de dislocații pe limita grăunților, dacă se atinge o tensiune critică, materialul nu se poate deforma având plasticitate extrem de redusă și se fisurează. Din acest motiv, la operațiile de călire este extrem de importantă viteza și mediul de răcire.





Fe, C 0.4 (wt%) steel, quenched, martensitic and quench cracks

Fig.188 Fisură după călire, oțel cu 0.4% carbon, structură martensitică [10].



Fig.189 Transformarea austenitei la răcire pentru un oțel eutectoid. Viteze de răcire și microstructuri.



# CURS 9 OȚELURI ÎNALT ALIATE. OȚELURI INOXIDABILE

## NOȚIUNI INTRODUCATIVE

Conform definiției EN10020:2003, **oțelul inoxidabil** este un aliaj de Fe, ce conține min. 10,5% Cr și max. 1,2% C. Cromul determină formarea unei pelicule aderente de oxid  $Cr_2O_3$ , ce asigură rezistența oțelului la coroziune (prin pasivare).

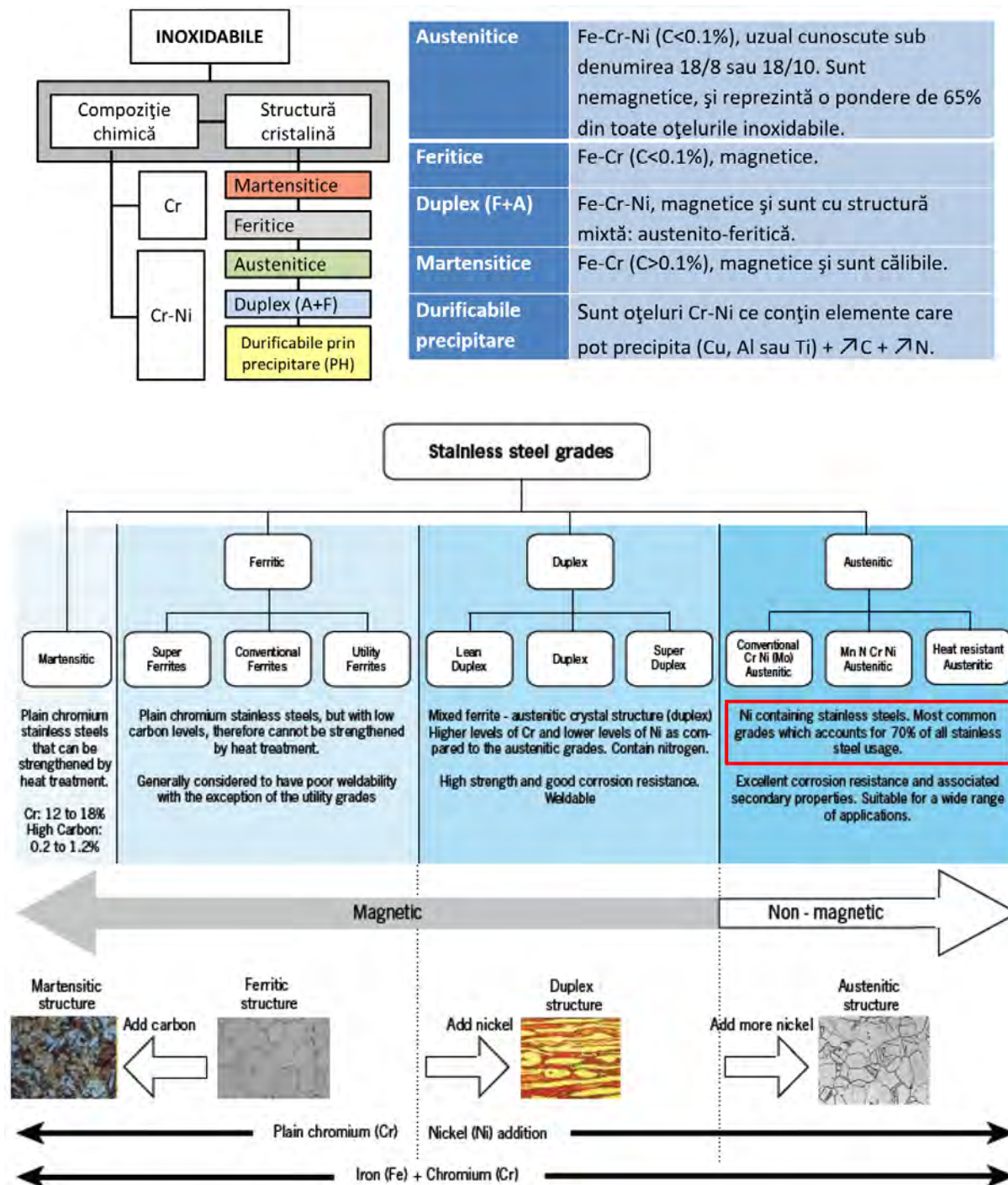
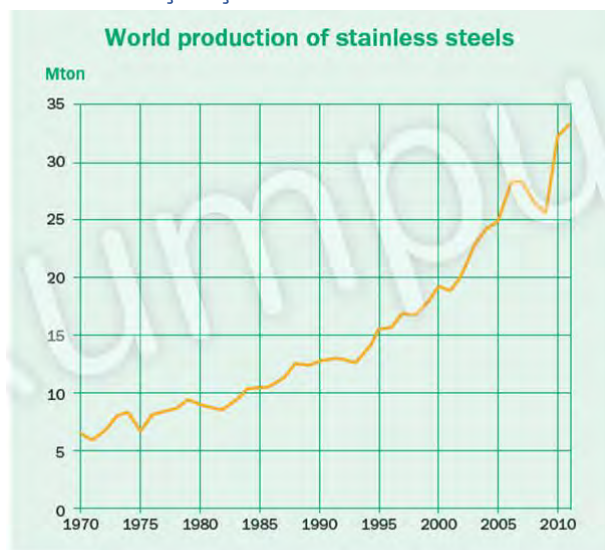
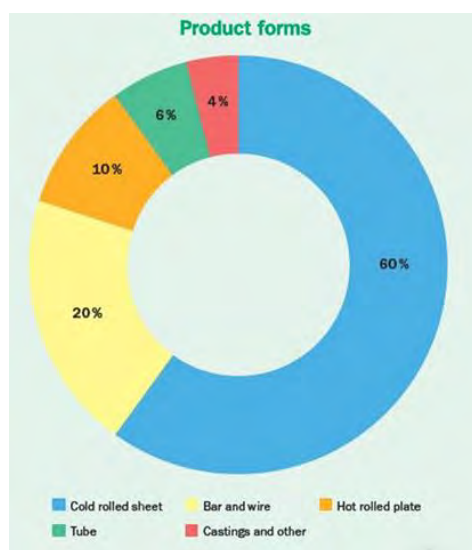


Fig. 190 Clasificare și proprietăți oțeluri inoxidabile [Euro Inox Publications].

## PROPRIETĂȚI OȚELURI INOXIDABILE



World stainless steel production 1970-2010.



## Strength vs. corrosion resistance

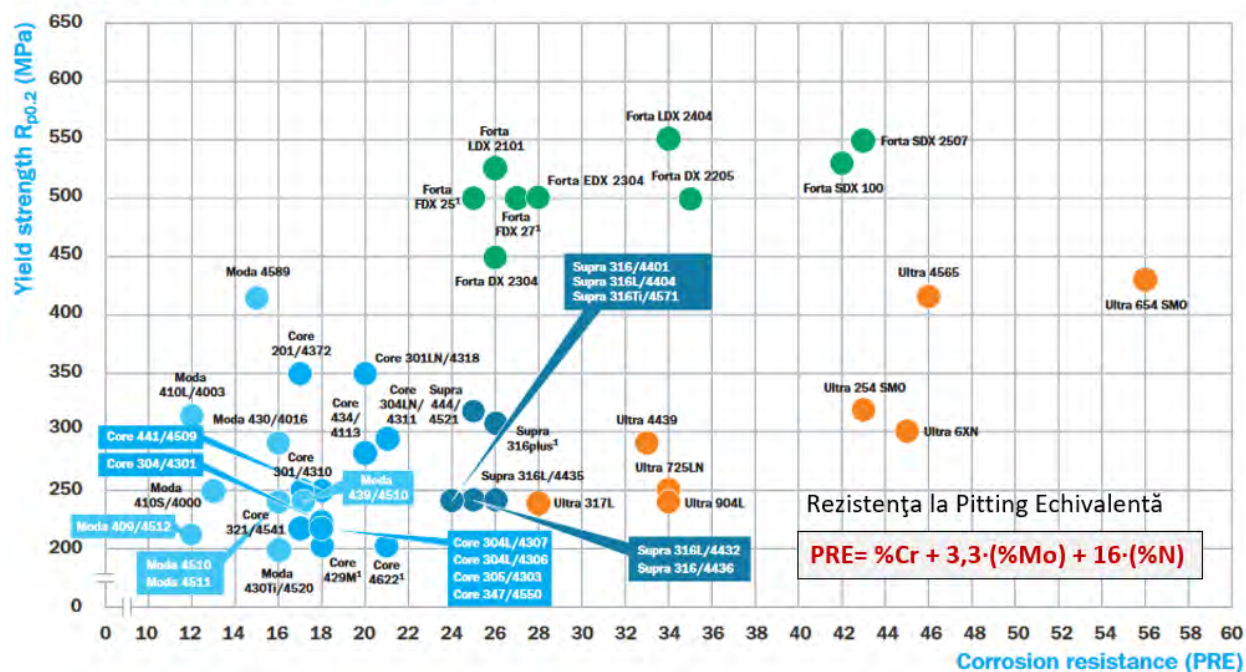


Fig. 191 Rezistența la coroziune. Rezistența la Pitting echivalentă [Outokumpu].

Principala caracteristică a oțelurilor inoxidabile este rezistența la coroziune. Există mai multe mecanisme prin care se produce fenomenul de coroziune: în crevasă, intercristalină, prin pitting, tenso-fisurantă, galvanică, selectivă, prin cavitație și microbiologică. Dacă aceste fenomene nu sunt detectate, monitorizate și nu se intervine când coroziunea atinge un nivel critic, instalația respectivă mai are un timp relativ scurt până când va suferi o avarie cauzată de coroziune. Aceste fenomene sunt extrem de periculoase, deoarece în astfel de aplicații se manipulează uzual substanțe inflamabile (rafinării), chimice periculoase (combinat chimice) sau vapori de apă sub presiune în instalațiile termoelectrice.



## OȚELURILE INOXIDABILE MARTENSITICE

Oțelurile martensitice sunt ieftine, conțin Cr (10,5-18%), C (max.1.2%) și au cea mai mică rezistență la coroziune din familia oțelurilor inoxidabile. Sunt tratabile termic (răcire în aer), tratamentul de revenire se conduce a.î. să obținem raportul dorit între duritate/tenacitate. Au rezistență la fluj superioară oțelurilor carbon.

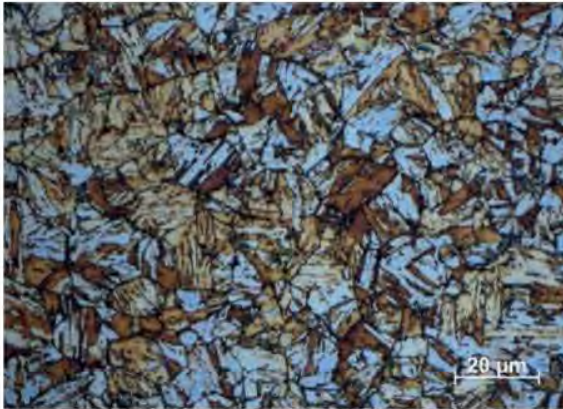
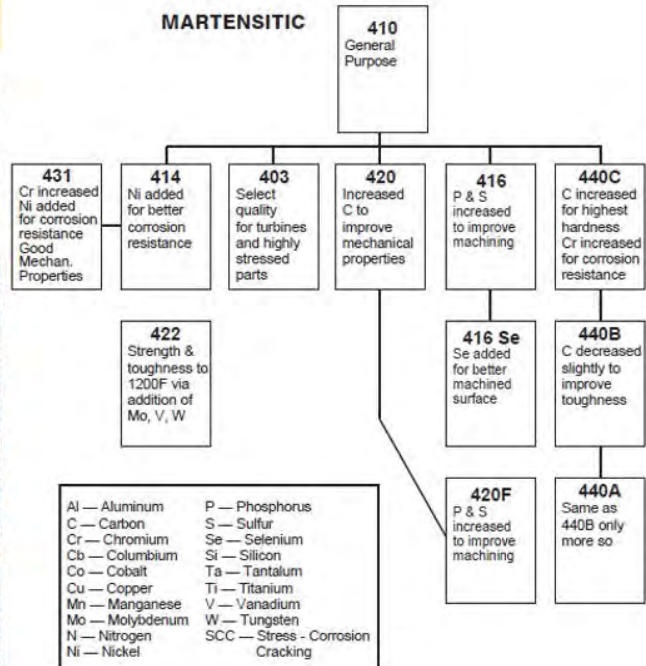


Figure 2:2. Martensitic microstructure showing fine-scale martensite which has formed within the prior austenite grains. Smaller dark carbides can also be observed.



Al — Aluminum  
C — Carbon  
Cr — Chromium  
Cb — Columbium  
Co — Cobalt  
Cu — Copper  
Mn — Manganese  
Mo — Molybdenum  
N — Nitrogen  
Ni — Nickel  
P — Phosphorus  
S — Sulfur  
Se — Selenium  
Si — Silicon  
Ta — Tantalum  
Ti — Titanium  
V — Vanadium  
W — Tungsten  
SCC — Stress - Corrosion Cracking

Application and Characteristics of Low-Carbon Martensitic Stainless Steels on Turbine Blades

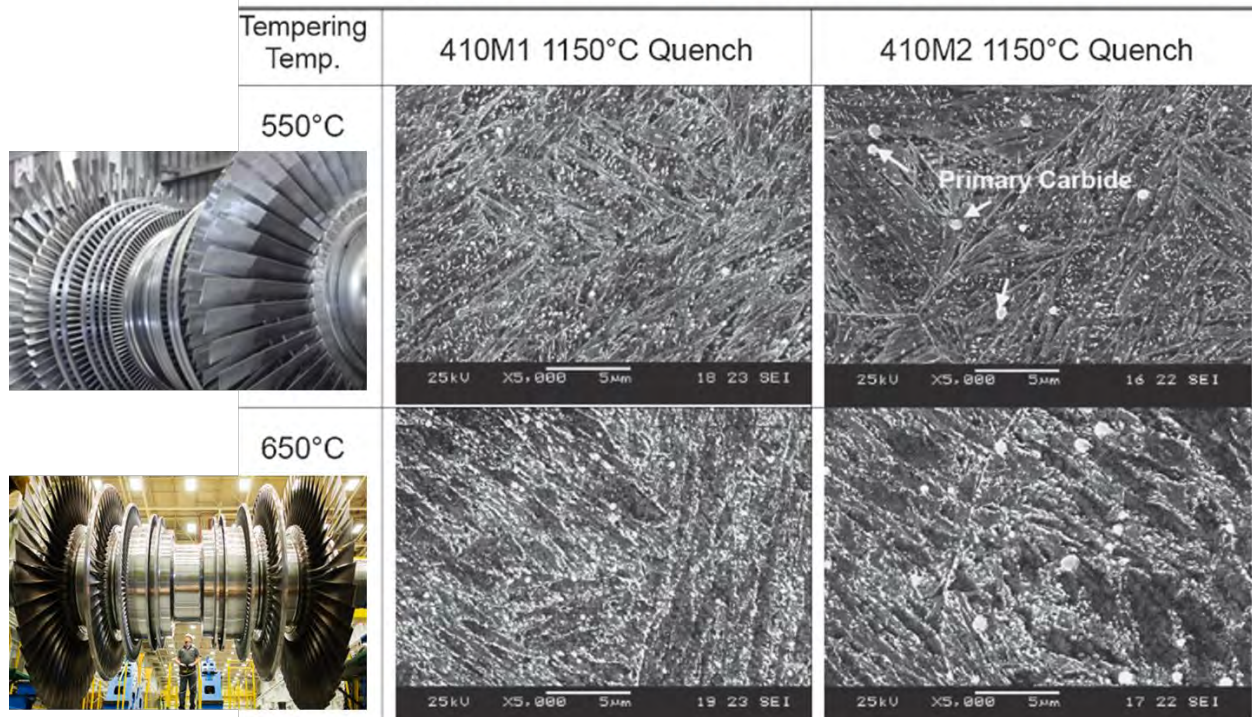


Fig. 192 Microstructura și aplicații ale oțelurilor inoxidabile martensitice [Euro Inox Publications].

Din aplicațiile comune ale oțelurilor inoxidabile martensitice pot fi amintite: cuțite și instrumentar medical, carcase și echipamente în industria farmaceutică, palete de turbină în industria termoelectrică etc.



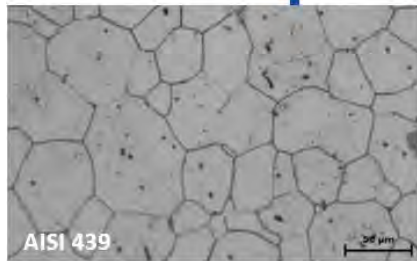
## OȚELURILE INOXIDABILE FERITICE

Marca de oțel cea mai uzuală este AISI 430, conține 17% Cr.

Cr și Mo măresc rezistența la coroziune.

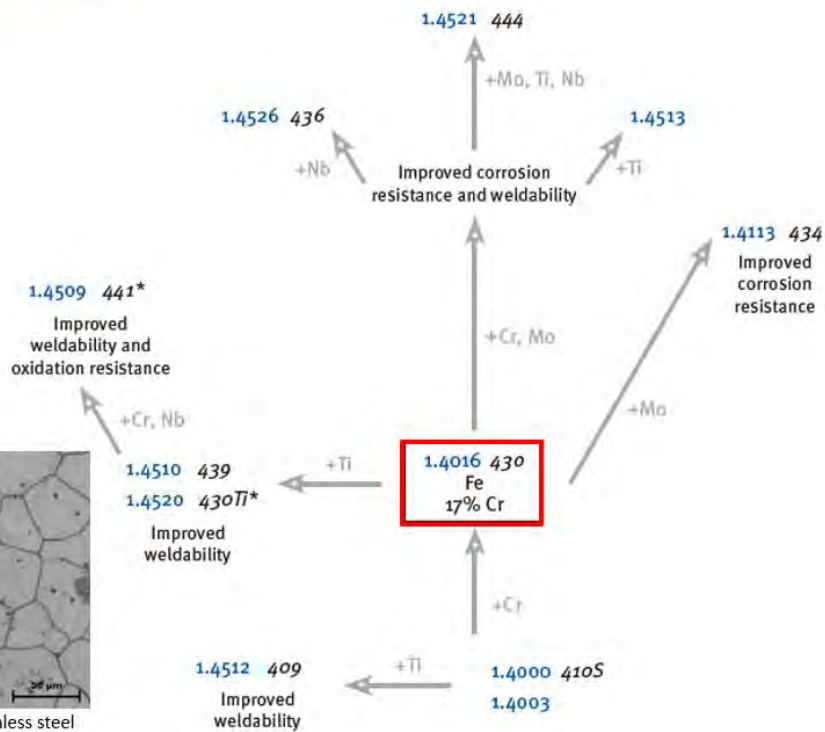
Ti și Nb îmbunătățesc sudabilitatea (stabilizează soluția solidă feritică în care este dizolvat Cr).

Relative corrosion resistance ↑



AISI 439

Ti-stabilized 17% chromium ferritic stainless steel with improved weldability, AISI 439.



### FERRITIC



**430**  
General Purpose



Figure 25. Ferritic stainless steel is commonly used for e.g. washing machine drums.



Group 1: content of Cr 10%-14% AISI 409, 410, 420  
Figure 2 automotive exhaust system silencers made of AISI 409

Fig. 193 Microstructura și aplicații ale oțelurilor inoxidabile feritice [Euro Inox Publications].

Oțelurile feritice sunt folosite pentru construcția boilerelor, ornamente și tobe de eșapament în industria automotive, cuve mașini spălat, elemente de design interior construcții moderne, lifturi etc.

## OȚELURILE INOXIDABILE AUSTENITICE

Marca de oțel cea mai uzuală este AISI 304, care conține 18% Cr și 8%Ni.

Cr și Mo, Ni măresc rezistența la coroziune.

Ti și Nb îmbunătățesc sudabilitatea (stabilizează soluția solidă feritică în care este dizolvat Cr, Mo.

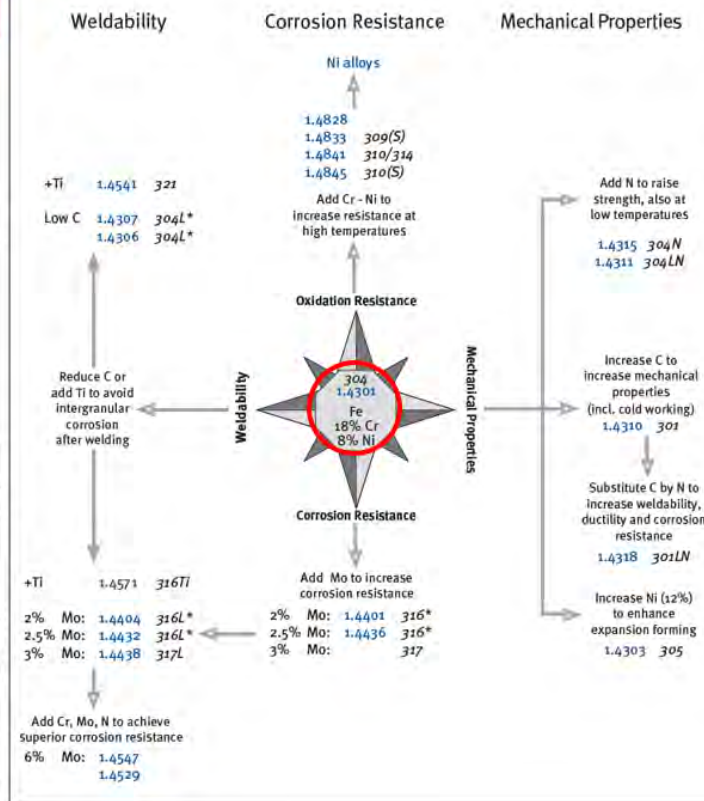
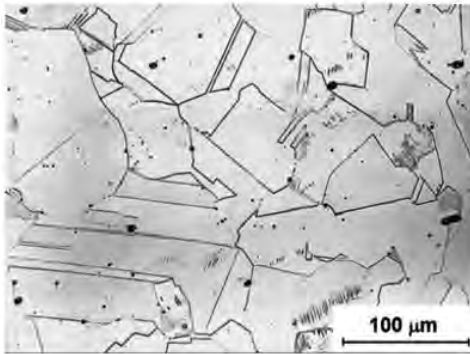


Figure 2.8: Lloyd's Building, London, completed 1986. Cladding in the austenitic Cr-Ni-Mo stainless steel 316 with HyClad® Linen surface finish.



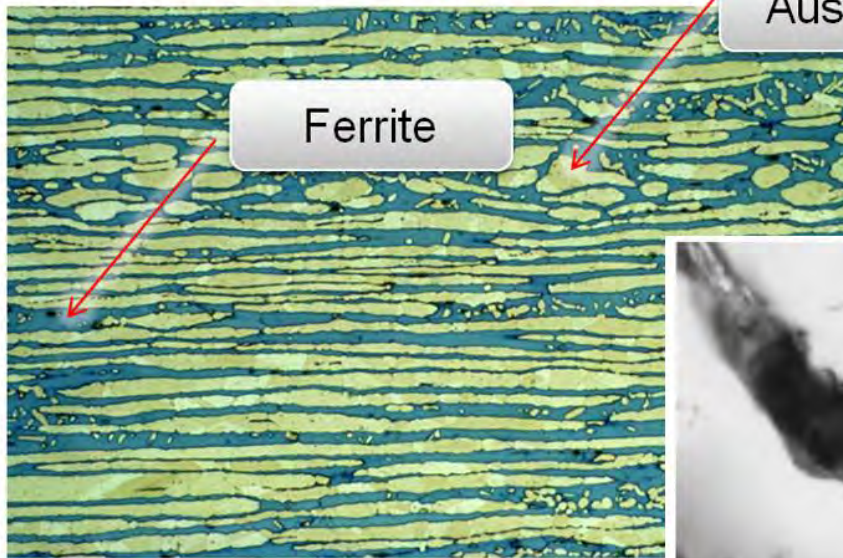
Figure 8.2: Austenitic stainless façade which has buckled under intense sunlight. Unless this is desired as an architectural feature, a duplex or ferritic grade with lower thermal expansion may be preferred.

Fig. 194 Microstructura și aplicații ale oțelurilor inoxidabile austenitice [Euro Inox Publications].

Oțelurile austenitice sunt cele mai numeroase și mai utilizate din familia de oțeluri inoxidabile. Prezintă proprietăți remarcabile de rezistență la coroziune și la temperaturi înalte (sunt oțeluri refractare), dar și la temperaturi foarte joase, în domeniul criogenic. Oțelurile austenitice se mai utilizează în construcții, în industria alimentară, pentru realizarea recipientelor de material nuclear în industria energetică etc.



## OȚELURILE INOXIDABILE DUPLEX



La temperaturi înalte, inferioare valorii de 900°C, se pot forma faze secundare, precipitate precum carbura  $Cr_{23}C_6$

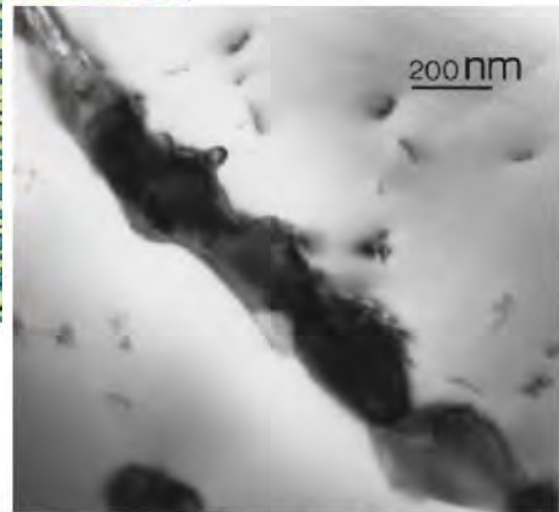


Figure:  $M_{23}C_6$  on grain boundary.



Hamad International Airport in Doha, Qatar has a duplex stainless steel roof. © Hamad International Airport

Fig. 195 Microstructura și aplicații ale oțelurilor inoxidabile austenitice [[Euro Inox Publications](#)].

Oțelurile inoxidabile duplex au o structură mixtă formată din ferită și austenită în proporții relativ egale. În clasa oțelurilor duplex de înaltă performanță, superduplex există mărci de oțeluri ultrarezistente cu concentrații ridicate de Ni (28 %) și cu o comportare foarte bună la coroziune în medii foarte agresive. Datorită proprietăților foarte bune de rezistență mecanică combinat cu cele de coroziune, aceste oțeluri se utilizează pentru construcția podurilor metalice [[video](#)], în rafinării, combinate chimice, diverse instalații tehnice supuse la coroziune.



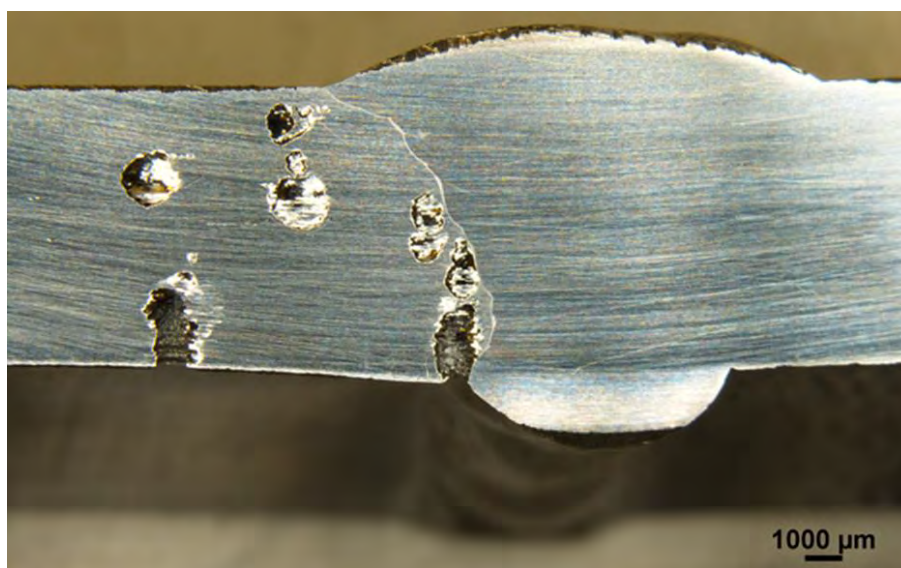
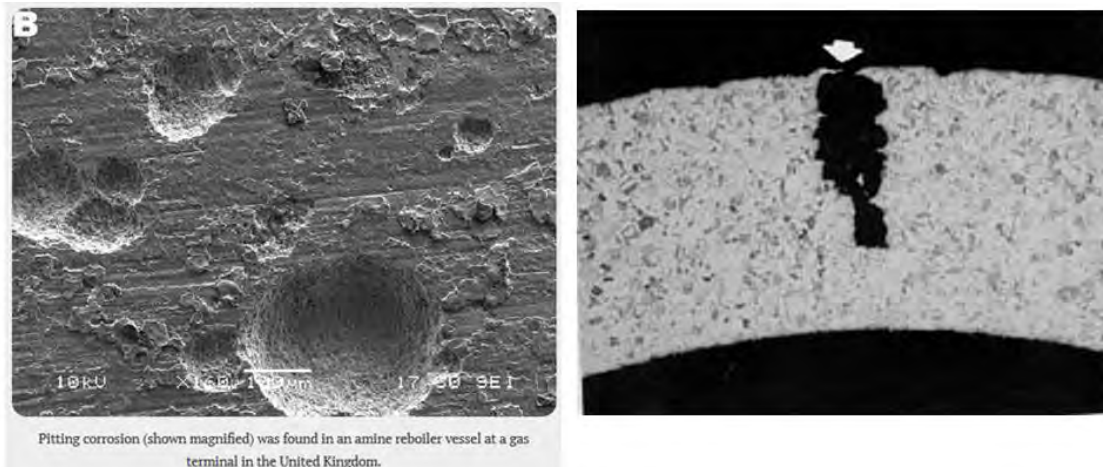


Fig. 196 Fenomene de coroziune prin pitting [36].

**Pitting**-ul este o formă de atac coroziv localizat în care se pot observa niște puncte mici sau microcavități. Se produce în zone de interfață, la limita unor compuși chimici sau în zone unde stratul de pasivare este compromis și se dezvoltă în profunzime/secțiune. Este un tip de coroziune extrem de perfidă, trecând deseori neobservată și cu pierderi foarte reduse de material până când are loc cedarea materialului, Fig. 196. **Rezistența la coroziune** se bazează pe formarea la suprafață a unei pelicule pasive, a cărei stabilitate crește cu conținutul de crom și poate fi mărită în continuare prin aliere cu Mo, Ni.

**Pasivitatea** este asigurată de pelicula subțire de oxid de metal-hidrat, în care se produce o îmbogățire în crom față de metalul de bază. Pelicula formată este capabilă să păstreze o stare de echilibru cu mediul de lucru, și devine greu sau deloc penetrabilă pentru alte medii. Odată cu atingerea stării de echilibru, procesul de coroziune se va opri. Dacă nu se formează o peliculă pasivă de grosime corespunzătoare sau dacă acesta se străpunge sau se distruge complet, atunci apare pericolul coroziunii.

Oțelurile inoxidabile vor avea proprietățile cele mai favorabile atunci când cromul și molibdenul se găsesc dizolvate în soluții solide, respectiv când nu se formează faze secundare bogate în crom și molibden. Cu cât structura cristalină a oțelurilor inoxidabile este mai omogenă, cu atât proprietățile lor vor fi mai bune.

## CURS 10 ALIAJE CU NICHEL. SUPERALIAJELE

### NOȚIUNI INTRODUCTIVE

**Superaliajele** reprezintă o clasă specială de aliaje cu caracteristici superioare de rezistență mecanică, la fluaj, la oxidare, respectiv la temperaturi înalte de exploatare și la oboseală termică. În cazul superaliajelor cu baza nichel, temperatura de serviciu a acestora depășește pragul de 650°C.

Piesele metalice care sunt exploatate la temperaturi înalte, au în general o durată de exploatare mult mai redusă comparativ cu durata de exploatare în condiții de temperaturi uzuale. Totodată, proprietățile mecanice de rezistență ale aliajelor vor fi diminuate în cazul unor temperaturi ridicate de serviciu. Dacă sarcinile preluate au un caracter dinamic, dacă există variații mari de temperatură sau dacă mediul de exploatare conține compuși ce afectează rezistența la oxidare a materialului, aceste situații reprezintă factori suplimentari de risc, care trebuie luați în considerare încă din etapa de proiectare a produsului final.

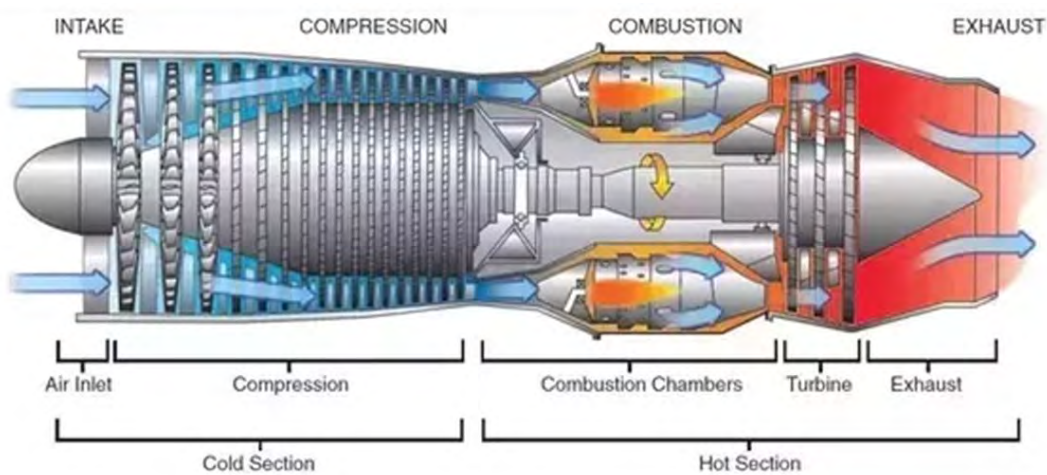


Fig. 197 Principiul constructiv al unui turboreactor [video].

În figura 197 este ilustrat principiul constructiv al unui turboreactor de avion. În partea de admisie a turboreactorului, aerul este aspirat de o turbină cu mai multe trepte, realizând o comprimare a aerului dirijat spre camera de combustie. Datorită compresiei, aerul se încălzește la o temperatură de cca. 400°C, iar în camera de combustie este amestecat cu combustibil și are loc aprinderea amestecului. Se ating temperaturi ce pot depăși 2.000°C, cu mult peste limita de topire a majorității metalelor. Gazele arse, extrem de fierbinți părăsesc exaustorul turboreactorului la temperaturi ce pot atinge 1.600°C. În aceste condiții extrem de dificile datorită temperaturilor înalte de serviciu, trebuie asigurate și proprietățile mecanice de rezistență, dar și stabilitatea microstructurală a materialului, respectiv rezistența la oxidare.

Termenul de superaliaj a fost introdus după cel de-al doilea Război Mondial, pentru a descrie un grup de aliaje utilizate la turbocompresoare și motoare de tip turbină, cărora li se impunea o performanță ridicată la temperaturi înalte de serviciu [18].

În funcție de compoziția lor chimică, superaliajele pot fi pe bază de Fe, Ni, Co și Cr, și conțin elemente de aliere precum W, V, Ta, Nb, Ti, Al, dar și mici cantități de B, Zr, Hf care măresc rezistența la fluaj și tenacitatea aliajului prin finisarea granulației.

Aceste aliaje cu proprietăți speciale asigurate la temperaturi înalte se utilizează frecvent în industria energetică, nucleară, militară, aerospațială sau în alte aplicații speciale, Fig. 198.



Fig. 198 Schimbătoare de căldură realizate din superaliaje [[aplicații](#)].

Schimbătoarele de căldură sunt niște instalații statice care asigură răcirea/încălzirea unor fluide tehnice necesare în diverse procese industriale: ex. în industria energetică – condensarea vaporilor de apă după destinderea lor din turbină, în fabricarea cauciucului sau în industria chimică, petrochimică, Fig. 198. Aceste instalații se execută din diverse tipuri de superaliaje, precum Incoloy, Hastelloy, Inconel, oțeluri austenitice, oțeluri duplex etc.

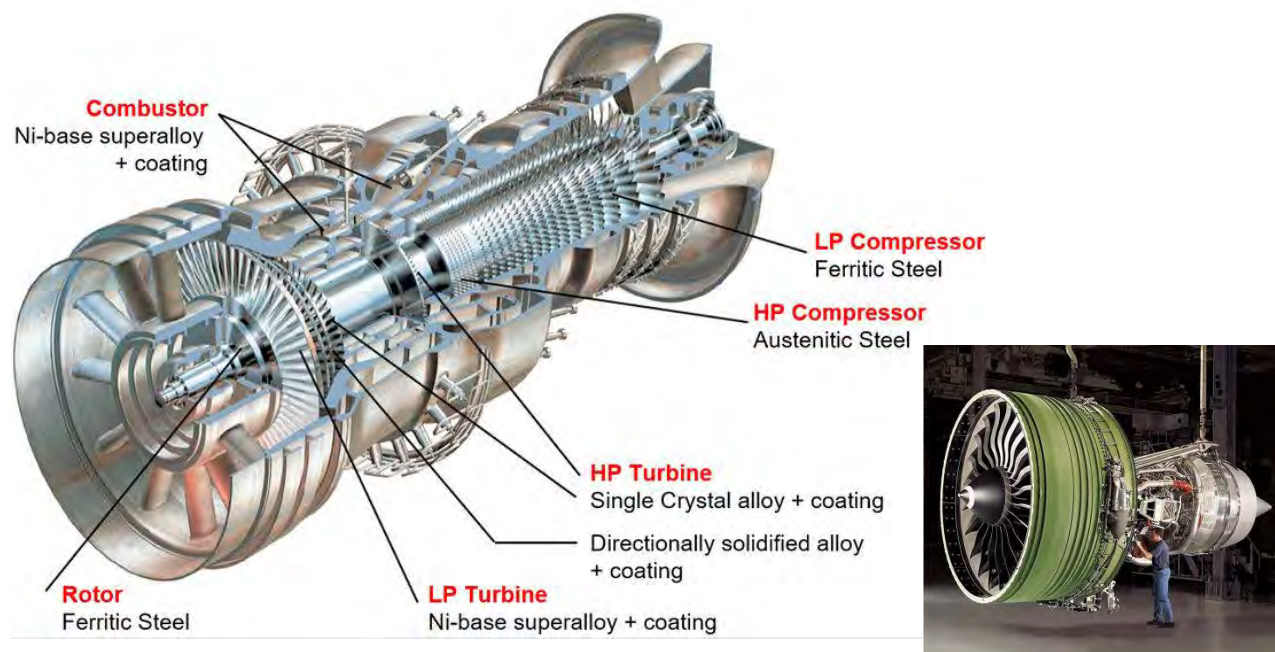
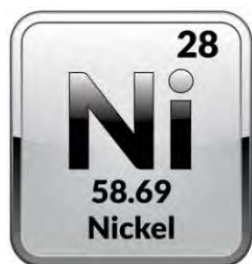


Fig. 199 Diverse componente ale turboreactorului realizate din superaliaje [[video](#)].



## NICHELUL



Nichelul este un metal scump, prezintă un sistem de cristalizare cubic cu fețe centrate și nu suferă transformări alotropice de la răcirea din fază lichidă, la temperatura camerei. Prin urmare, nichelul și aliajele sale nu pot fi durificate prin călire, fapt pentru care este recomandat în aplicațiile criogenice, unde își păstrează tenacitatea și la temperaturi extrem de scăzute. Totodată, nichelul este utilizat în aliaje care sunt supuse la temperaturi foarte înalte și conferă o rezistență la oxidare foarte bună, dar și o rezistență la coroziune excelentă în medii acide.

Nichelul poate fi utilizat în stare tehnic pură **Nichel 200** și **Nichel 201** (clasificare în funcție de nivelul de puritate, Nichel 201 conține mai puțin carbon). La temperaturi de serviciu peste 315°C, carbonul trebuie limitat datorită susceptibilității de fragilizare a materialului. Conform normelor americane ASME pentru recipienti și vase sub presiune, Secțiunea VIII, Nichel 201 poate fi utilizat în astfel de aplicații până la temperaturi de serviciu de 680°C [[Corrosion Materials](#)].

Nichel 200/201 este utilizat pe scară largă în industria electronică și chimică. Mai este utilizat în industria aerospațială, petrochimică, energetică și petrol/gaze, precum și în domeniul maritim. Se realizează o serie de metalizări sau placări cu nichel a unor aliaje precum oțelurile carbon și a celor slab aliate ce prezintă caracteristici de rezistență la coroziune mai reduse. Exemple: tubulaturi pentru condensatoare în producția de hidrogen, instalații de pompare alcali în industria chimică, instrumente medicale, pulbere pentru catalizatoare în industria chimică, filtre poroase pentru gaze sau combustibili, etc.

Nichelul este utilizat în cadrul unor două clase de aliaje, Fig. 200:

- durificate prin soluție solidă
- durificate prin precipitare.

Ni - Cu	N04400 N04404 N04405	Monel 400	Monel K - 500  Monel 502
Ni - Cr	N06	Inconel	N07
Ni - Cr - Fe	N06600	Aliaj 600	N07718
Ni - Cr - Fe - Mo	N06002		N07080
Ni - Cr - Fe - Mo - Nb	N06625	Aliaj 625	N07750
Ni - Cr - Fe - Nb - Mo	N06102		N07500
- W	N06690 N06337	Aliaj 690	N07252
	Alte Inco 601, Inco 617, etc		N07001
			Alte aliaje
Ni - Cr - Fe	N08	Incoloy	
Ni - Cr - Fe - Mo - Cu	N08825	Aliaj 825	
Ni - Fe - Cr - Mo	N08700		
Ni - Fe - Cr - Mo - Co	N08925		
Ni - Cr - Fe	N08800 N08810	Aliaj 800 Aliaj 800H	
	N10	Hastelloy	
Ni - Mo			
Ni - Mo	N10001 N10665	Hastelloy B Hastelloy B -2	
Ni - Mo - Cr - Fe	N10003		
Ni - Mo - Cr - Fe - W		Hastelloy G	
Ni - Mo - Cr - W		Hastelloy C	

Fig. 200 Aliaje cu baza nichel utilizate în aplicații industriale [[video extracție nichel Norilsk Rusia](#)]

În industrie se utilizează mai mult de 3000 aliaje cu Ni, ca metal de bază sau ca element de aliere, datorită proprietăților speciale conferite de nichel (electrice, magnetice, rezistență la temperaturi înalte, la agenți chimici agresivi, la coroziune, la oxidare, refractaritate ș.a.). Costul nichelului a fost și rămâne și în prezent destul de ridicat comparativ cu cel al altor elemente metalice de importanță industrială. Deși consumul anual, la nivel mondial, al nichelului reprezintă doar o fracțiune din consumul total de oțel, extinderea aplicațiilor bazate pe aliajele sale continuă datorită performanțelor deosebite pe care acestea le posedă.

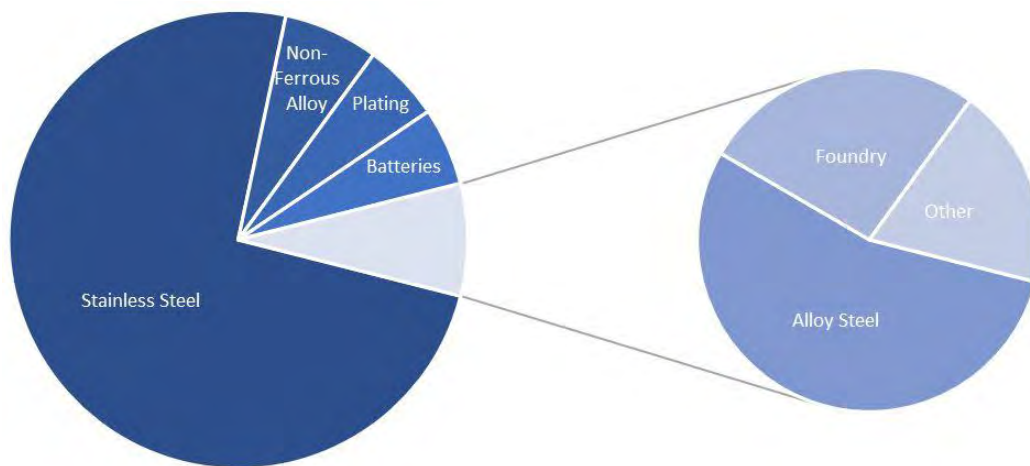


Fig. 201 Utilizarea nichelului în aplicații industriale [data INSG].

Deși sunt mult mai scumpe decât alte aliaje industriale, caracteristicile speciale mecanice și de rezistență la coroziune le fac să fie o investiție rentabilă pe termen lung, iar în perioada următoare sunt estimări că cererea de nichel va crește cu cca. 8-10 milioane de tone în fiecare an, până în anul 2050, Fig. 202. În prezent, cea mai mare parte a producției de nichel este utilizată la obținerea oțelurilor inoxidabile, Fig. 201.

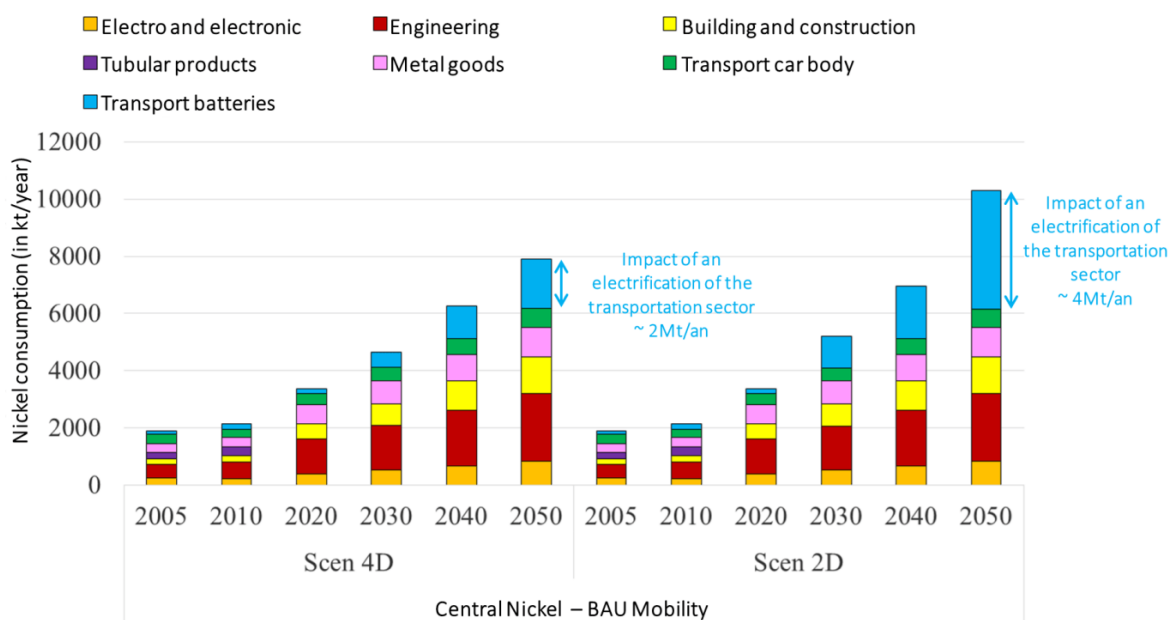


Fig. 202 Estimări privind creșterea cererii de Ni pe diverse domenii până în anul 2050 [IFP data].

## FLUAJUL ȘI CURBA DE FLUAJ

Sub acțiunea sarcinilor mecanice în regim static la temperaturi înalte, materialul suferă în timp o serie de modificări la nivel microstructural, care cumulate peste o perioadă lungă de timp conduc la deformății macroscopice și ulterior la rupere. Acest mecanism de deformare și de rupere se numește **rupere prin fluaj**.

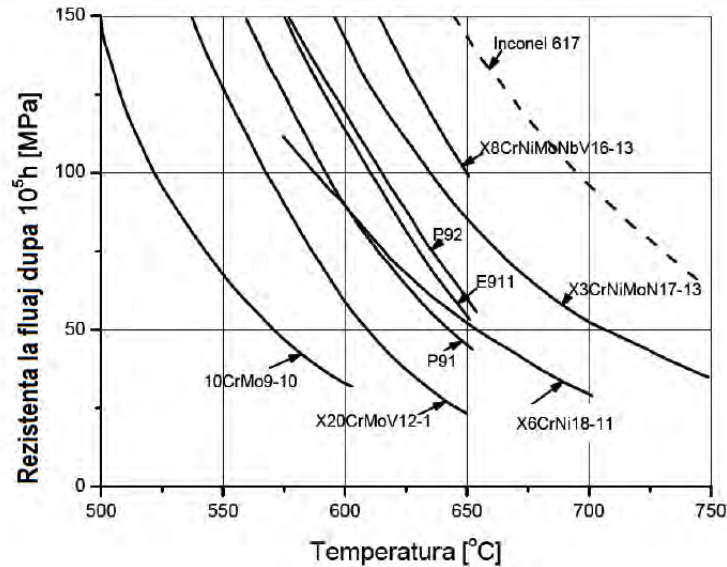


Fig. 203 Rezistența la fluaj a unor oțeluri refractare și superaliaje ([Inconel 617](#)) după  $10^5$  ore de funcționare.

Din diagrama prezentată în Fig. 203 se poate observa cu ușurință că rezistența la fluaj a aliajelor este puternic afectată de creșterea temperaturii de serviciu. Dintre aliajele prezentate în diagramă, cea mai bună comportare la fluaj o prezintă superaliajul Inconel 617 care își menține rezistența la fluaj chiar și la temperaturi de peste  $700^\circ\text{C}$ .

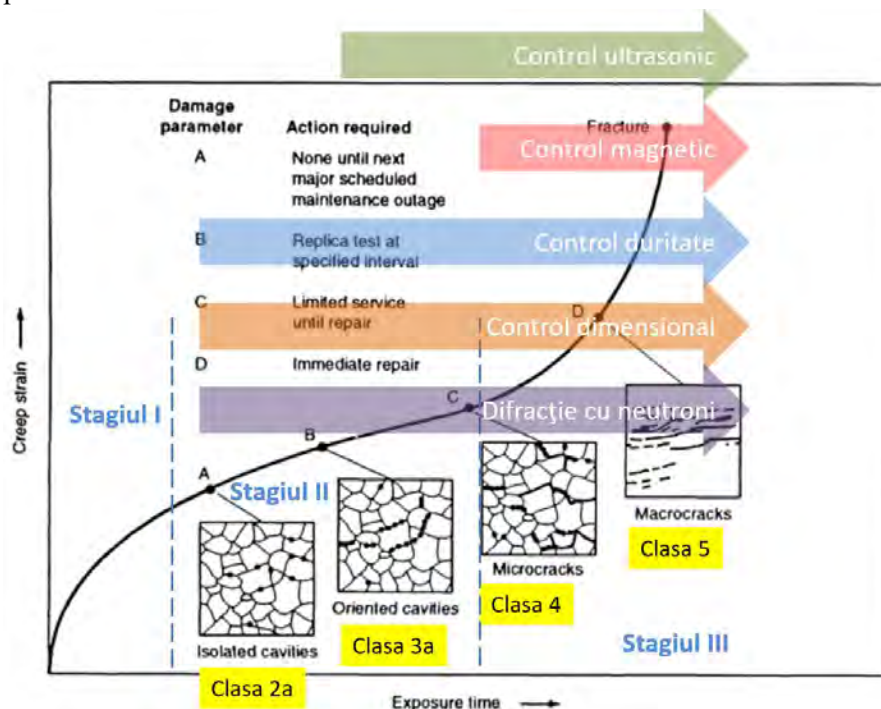


Fig. 204 Curba de fluaj și clasificarea Neuberger privind stadiile evolutive ale fluajului [36].



În prezent este acceptat modelul propus de Neubauer în anii 1970 privind evoluția fluajului în raport cu modificările ce pot fi evidențiate la nivel microstructural în material.

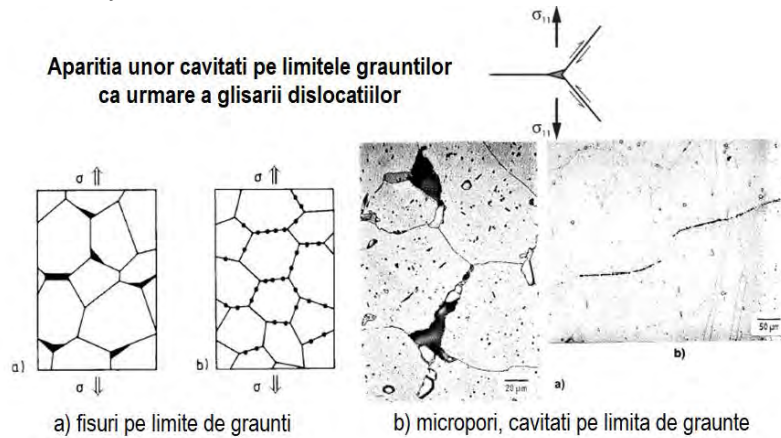
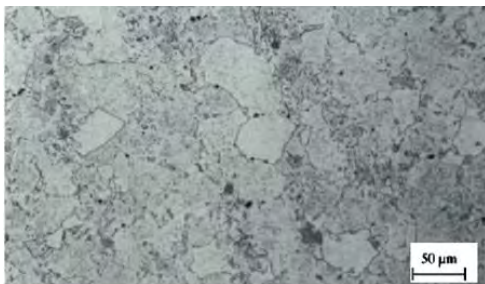


Fig. 205 Formarea la fluaj de micropori, cavități, pe limitele de grăunți.

Tabel 16. [Clasificarea Neubauer](#) a stadiilor de evoluție la fluaj, vezi și Fig. 204.

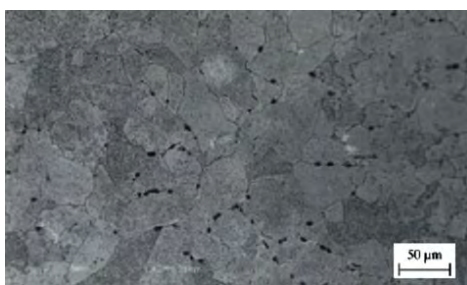
Nivelul	Modificări microstructurale la fluaj
0	Material recepționat fără exploatare la temperaturi înalte
1	Expus la fluaj, fără microporozitate sau cavități
2a	Expus la fluaj, apariția unor microcavități izolate
2b	Expus la fluaj avansat, apariția numeroasă de microcavități ce nu prezintă o orientare preferențială
3a	Nivel avansat la fluaj, numeroase cavități cu orientare
3b	Nivel avansat la fluaj, șiruri de cavități cu orientare, fisuri pe limite de grăunți rezultate prin unirea cavităților
4	Nivel avansat de degradare la fluaj, microfisuri numeroase
5	Nivel foarte avansat de degradare la fluaj, macrofisuri. Rupere iminentă a materialului



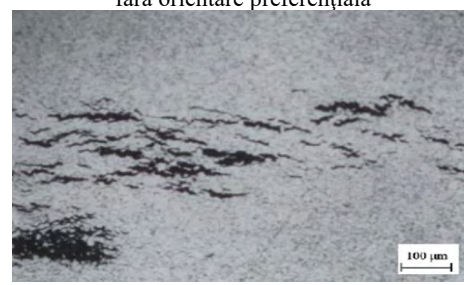
Nivel 2a: Expus la fluaj, apariția unor microcavități izolate



Nivel 2b: Fluaj avansat, apariția numeroasă de microcavități fără orientare preferențială



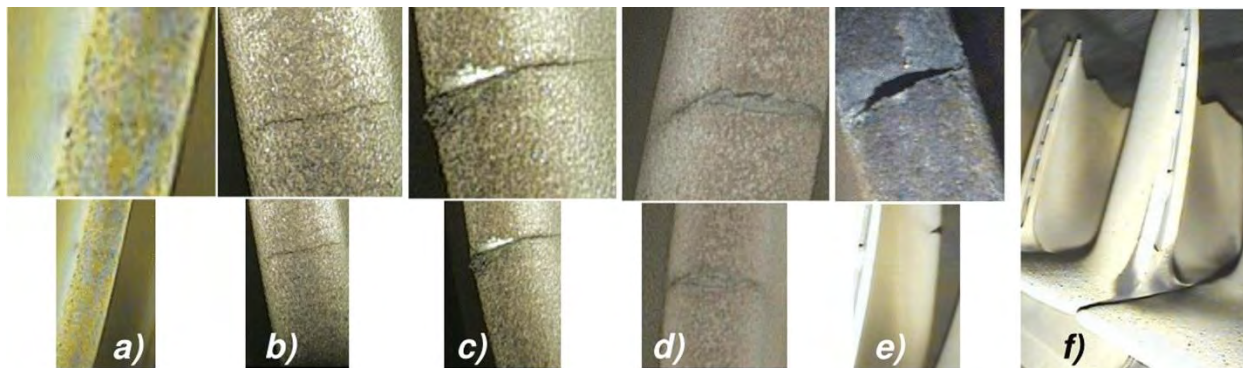
Nivel 3a: Fluaj avansat, numeroase cavități cu orientare



Nivel 4: Fluaj avansat, numeroase microfisuri

O formă particulară de oboseală la temperaturi înalte este reprezentată prin oboseala termică. Aceasta constă din cicluri de încălzire sau răcire neuniformă, în urma cărora în material iau naștere tensiuni interne. După încălzirea neuniformă, aceste tensiuni sunt de compresiune în zonele mai calde și de întindere în zonele mai reci. După răcirea neuniformă tensiunile își schimbă semnul. Atunci când tensiunile ating o valoare suficient de ridicată, după repetarea lor de un număr suficient de mare, se produce o rupere localizată inițiată printr-un fenomen de fisurare la oboseală termică.

Palele de turbine de la motoarele de aeronave sunt componente expuse la oboseală termică. În timpul accelerării turboreactorului, extremitățile palelor se încălzesc mai rapid și se dilată mai puternic decât regiunea centrală apropiată de axul turbinei. La decelerare, extremitățile palelor se răcesc mai rapid decât zonele centrale. Acest ciclu alternant duce adesea la fisurare prin oboseală termică a zonelor care au înregistrat dilatări și contracții repetate, respectiv o stare ciclică de tensiuni mai ridicată.



a) possible crack, b) evident crack, c) crack and coating chipping, d) crack opening, e) open crack, f) chipped tips of two blades.

Fig. 207 Fisuri de oboseală termică și degradări ale paletelor într-un turboreactor de avion de vânătoare [sursa].



Fig. 208 Turboreactor avion Boeing 777 de la United Airlines care s-a dezintegrat datorită ruperii a două pale din turbină ca urmare a fenomenelor de oboseală termică [video].

# CURS 11 TITAN ȘI ALIAJE DE TITAN

## NOȚIUNI INTRODUCATIVE



Titanul a fost descoperit de către William Gregor în anul 1790, dar denumirea sa a fost propusă de către Klaproth în 1795. Titanul este un metal ușor, rezistent, non-magnetic cu densitate redusă având aproximativ 60% din densitatea oțelului și rezistență mecanică comparabilă cu cea a oțelurilor. Proprietățile titanului: rezistență mecanică raportată la densitate este ridicată, densitatea titanului comercial variază între 4420 kg/m<sup>3</sup> și 4850 kg/m<sup>3</sup>, iar rezistența la rupere variază între 172 MPa pentru tipul comercial (CP) calitatea 1, până la peste 1380 MPa pentru aliajele tratate termic.

Titanul este al patrulea cel mai răspândit element structural din scoarța terestră, după Al, Fe și Mg și apare în depozite minerale precum rutilul (TiO<sub>2</sub>) și ilmenitul (FeTiO<sub>3</sub>). Combinația dintre densitatea redusă și raportul foarte bun între rezistența mecanică și greutatea specifică mică a Ti, rezistența foarte bună la coroziune și caracteristicile bune de deformabilitate, recomandă titanul și aliajele de titan în sectoare de vârf, precum: industria aeronautică, aerospațială, militară, automotive, energetică, construcții maritime de performanță, arhitectură și construcții, dar și ca și biomaterial în implanturi medicale.

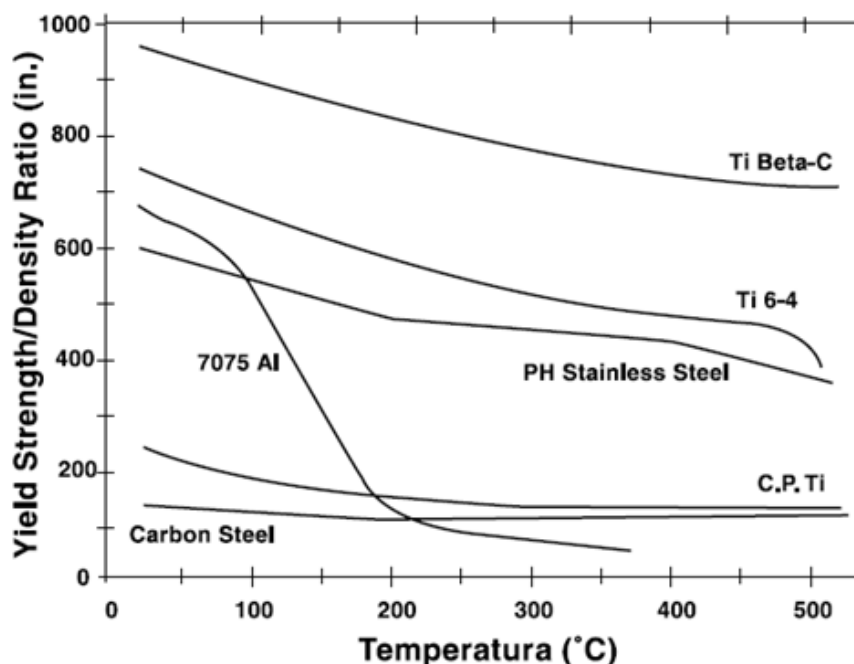


Fig. 209 Raportul dintre limita de curgere/densitate pentru aliajele de titan vs. oțeluri carbon și inoxidabile.

*Prețul titanului în comparație cu al altor metale*

Metal	Fe	Zn	Al	Cu	Mn	Ni	Sn	Ti	W	Au	Platină
Preț (Unitate)	1	3	6	7.5	8	17	22	40	300	11000	15000

Dacă se consideră prețul fierului ca și valoare de referință, titanul este de 40 X mai scump, însă acest aspect este compensat de proprietățile absolut remarcabile ale aliajelor de titan.



Rezistența superioară a Ti la oxidare, coroziune, oboseală și propagarea fisurilor recomandă utilizarea acestuia în industria aerospațială și militară. De ex. la avionul de vânătoare F22 Raptor 39% din structura acestuia o reprezintă aliajele de titan, în vreme ce pentru avionul F35 Joint Strike cantitatea de aliaje de titan este și mai mare, vezi [Fig. 153](#). În aviația civilă, modelul Boeing 787 Dreamliner folosește mai mult titan decât toate modelele Boeing precedente la un loc.



Vacuum stress relieving – to reduce residual stresses developed during fabrication. This titanium nosecone is stress relieved to minimize or eliminate forming and electron-beam welding stresses.

Fig. 210 Porțiuni din fuselajul unui avion de vânătoare supusă unui tratament de detensionare după sudare [[sursa](#)].



RCW-Aerospace - Specialist Welding Systems offer a range of welding chambers and ancillary equipment for the production of X-Ray quality welded components in Titanium, Stainless Steel & other Oxygen sensitive materials. The welding chambers offer a consistent Inert Gas (Argon) atmosphere with [Oxygen contamination levels as low as 10 Parts Per Million](#). Gas flow control is extremely effective and will create significant cost-savings compared with standard flood boxes and other wasteful processes / devices.

Fig. 211 Aspecte privind sudarea unor componente din titan în [industria aerospațială](#).

## ALIAJE DE TITAN

Aliajele de titan conțin mici adaosuri de Al, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Mn, Fe, Cr, Co, Ni și Cu. În funcție de gradul de aliere și constituienții microstructurali se disting patru clase de aliaje cu baza titan:

1. Titan tehnic pur, comercial
2. Aliaje cu structură  $\alpha$  și cvasi-alfa
3. Aliaje cu structură  $\alpha+\beta$
4. Aliaje cu structură  $\beta$  și cvasi-beta

Aliaje $\alpha$	Aliaje $\alpha + \beta$	Aliaje $\beta$
Au o rezistență la rupere de 700-900 MPa, se remarcă prin stabilitate termică bună, dar plasticitate relativ scăzută Exemplu de aliaj $\alpha$ : Ti-5Al-2,5Sn	Sunt călibile ajungând la o rezistență la rupere de 900-1.200 MPa, sunt sensibile la fragilizare, la răcire rezultă o structură asemănătoare cu martensita la oțeluri - soluția suprasaturată $\alpha + \beta$ Exemplu de aliaj $\alpha + \beta$ : Ti-6Al-4V	Au o structură cubică cu volum centrat, de aceea se remarcă prin plasticitate bună; rezistența la rupere ajunge la 1.500 MPa. Sunt mai sensibile la impurificare Exemplu de aliaj $\beta$ : Ti-13V-11Cr-3Al

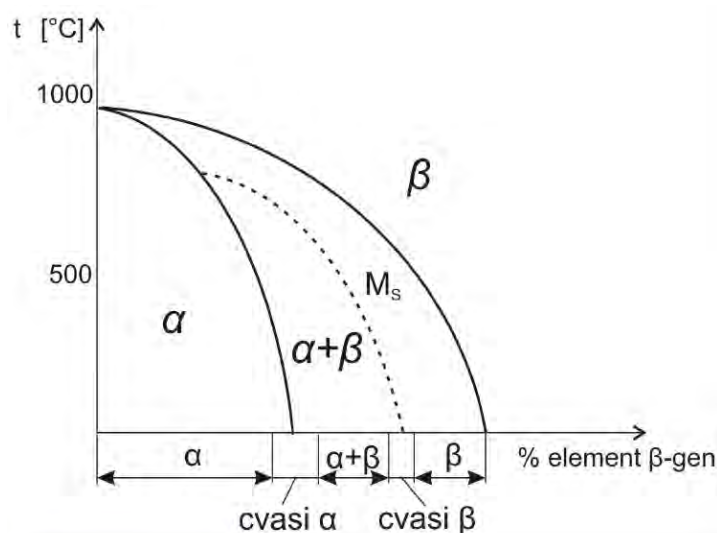


Fig. 212 Departajarea aliajelor de titan în funcție de microstructură.

La temperatura ambiantă titanul pur are structura hexagonală (faza  $\alpha$ ), iar la temperatura de 885°C are loc transformarea alotropică într-o structură cubică cu volum centrat (faza  $\beta$ ). Temperatura de transformare este modificată în sus de elementele de aliere  $\alpha$ -gene: Al, O, N, C, B sau în jos de elementele  $\beta$ -gene: Cr, Fe, Mo, V, Mn.

Aliajele titanului pot fi împărțite în două categorii: rezistente la coroziune (în special aliaje cu conținut scăzut de Ti) și aliaje utilizate ca materiale structurale (în cazul celor cu conținut ridicat de Ti, care au o rezistență mecanică mai ridicată, dar care își păstrează și alte proprietăți mecanice precum ductilitatea).

Titanul face parte împreună cu zirconiu, beriliu, tantal și hafniu din grupa metalelor active, caracterizate printr-o afinitate mare față de gaze (oxigen, azot, hidrogen), fiind considerate metale refractare datorită punctului ridicat de topire.

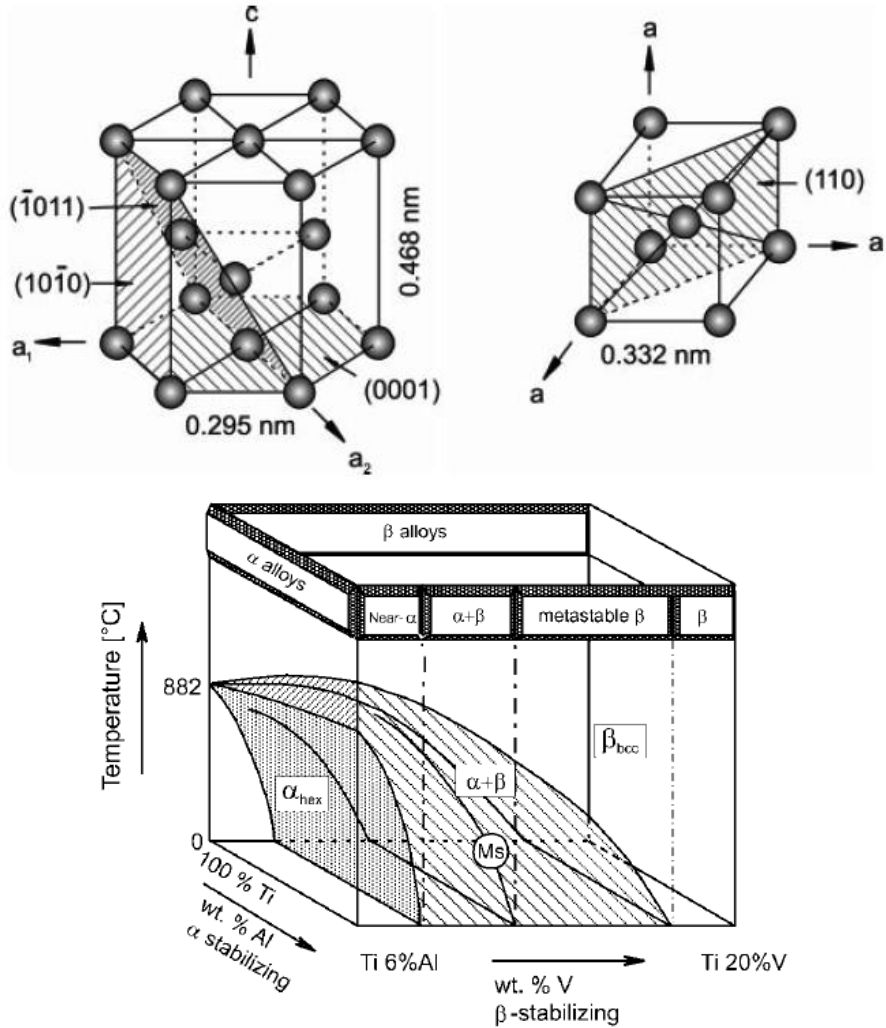


Fig. 213 Structura cristalină hep a fazei  $\alpha$  și cubică cu volum centrat a fazei  $\beta$  a titanului [19].

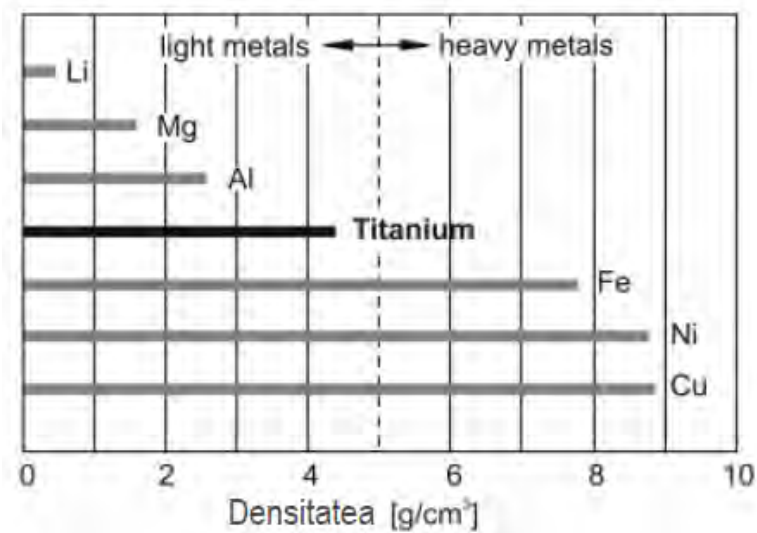


Fig. 214 Densitatea titanului comparativ cu a altor metale uzuale [19].



Tabel 17. Aliaje de titan. Structură și simbolizare.

<b>Alpha Alloys</b>	Commercially Pure – ASTM grades 1,2,3 and 4 Ti/Pd Alloys – ASTM grades 7 and 11
<b>Alpha + Compound</b>	Ti-2.5%Cu – IMI 230
<b>Near Alpha Alloys</b> (cvasi-alfa)	Ti-8%Al-1%Mo-1%V Ti-6%Al-5%Zr-0.5%Mo-0.2%Si – IMI 685 Ti-6%Al—2%Sn-4%Zr-2%Mo-0.08%Si Ti-5.5%Al-3.5%Sn-3%Zr-1%Nb-0.3%Mo-0.3%Si – IMI 829 Ti-5.8%Al-4%Sn-3.5%Zr-0.7%Nb-0.5%Mo-0.3%Si – IMI 834 Ti-6%Al-3%Sn-4%Zr-0.5%Mo-0.5%Si – Ti 1100 Utilizate pentru aplicații în care se cere o rezistență la fluaj la temperaturi peste 450°C. Unele dintre aliaje cu structură cvasialfa, pot fi utilizate până la temperaturi de serviciu de 600°C.
<b>Alpha-Beta Alloys</b> ( $\alpha+\beta$ )	Ti-6%Al-4%V Ti-4%Al-4%Mo-2%Sn-0.5%Si Ti-4%Al-4%Mo-4%Sn-0.5%Si – IMI 551 Ti-6%Al-6%V-2%Sn Ti-6%Al-2%Sn-4%Zr-6%Mo Elementele de aliere V, Mo, Fe, Cr stabilizează faza beta. Aceste aliaje au o rezistență medie spre mare (620 – 1250 MPa) și o rezistență la fluaj până la temperaturi cuprinse între 350 – 400°C. Tratamentul termic joacă un rol esențial pentru a obține combinația de proprietăți mecanice, rezistență la oboseală și tenacitate necesară în diverse aplicații.
<b>Metastable Beta Alloys</b> (cvasi-beta)	Ti-3%Al-8%V-6%Cr-4%Zr-4%Mo – Beta C Ti-15%Mo-3%Nb-3%Al-0.2%Si – Timetal 21 S Ti-15%V-3%Cr-3%Sn-3%Al Aceste aliaje cu structură metastabilă, pot fi tratate termic pentru obținerea de valori superioare ale rezistenței la tracțiune și prezintă și caracteristici bune de rezistență la coroziune.

Rezistența excelentă la coroziune a aliajelor de titan se datorează prezenței unei pelicule de oxid protector pe suprafața metalică, având caracteristici de aderență, continuitate și stabilitate termică foarte bune. Deasemenea, titanul și aliajele de titan se comportă excelent în medii marine, acide, alcaline sau în prezența unor substanțe chimice industriale.

Prin aliere cu fier, aluminiu, vanadiu, molibden, dar și cu alte elemente, se obțin o serie de aliaje ușoare și cu bune caracteristici mecanice necesare în industria aeronautică pentru componente de motoare cu reacție, rachete, nave spațiale, aeronave și rachete pentru industria militară, sateliți și echipamente de comunicație satelitară, industria chimică și petrochimică, instalații pentru desalinizarea apei, industria hârtiei, automotive, echipamente sportive de performanță, implanturi și proteze medicale, implanturi dentare și ortopedice și multe alte aplicații de înaltă performanță.

Tabelul 18. Medii corozive și comportarea aliajelor de titan în mediile respective.

Mediul coroziv	Comportarea aliajelor de titan în medii corozive
Clor și alți halogeni	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență foarte bună la clor și compuși chimici ce conțin clor: clorați, hipoclorati, perclorați și dioxid de clor.</li> <li>• Rezistență foarte bună la gaze umede de bor, iod și compușii chimici ai acestora.</li> </ul>
Apă	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență foarte bună corozivune în ape naturale, marine sau poluate industrial</li> <li>• Rezistență foarte bună la corozivunea microbiologică</li> </ul>
Acizi minerali oxidanți	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență excelentă la acizi: azotic, cromic, percloric, hipocloros</li> </ul>
Gaze	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență foarte bună la dioxidul de sulf, dioxidul de carbon, amoniu, hidrogen sulfurat și azot</li> </ul>
Soluții anorganice de sare	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență foarte bună la amoniac și cloruri: de calciu, cupru, mangan și nichel</li> <li>• Rezistență foarte bună la săruri de brom</li> <li>• Rezistență foarte bună la sulfuri, sulfați, carbonați, nitrați, clorați și hipocloriți.</li> </ul>
Acizi organici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență bună la acid acetic, teraflatic, adipic, formic, lactic, stearic, tartric și tanic</li> </ul>
Produse chimice organice	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență foarte bună la corozivune în procesarea alcoolului, aldehide, cetone, esteri, ketone și hidrocarburi.</li> </ul>
Medii alcaline	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezistență bună în medii cu hidroxizi de sodiu, potasiu, calciu, magneziu și amoniu.</li> </ul>

Aliajele de titan pot fi clasificate și după caracteristicile mecanice de rezistență, care este utilă în mod special inginerilor proiectanți ce selectează materialele pe baza rezistenței la tracțiune sau a limitei de curgere, în baza cărora se fac calculele de rezistență structurale. În Tabelul 19 sunt prezentate cele mai utilizate aliaje de titan împreună cu rezistența la tracțiune și simbolizarea acestora.

Tabel 19. Aliaje de titan și rezistența lor la tracțiune.

Clasificare aliaje	Rezistența minimă la tracțiune (MPa)	Simbolizare aliaje de titan
Rezistență mică	500	ASTM grades 1,2,3,7 and 11
Rezistență moderată	500-900	ASTM grades 4,5, and 9 Ti-2.5%Cu Ti-8%Al-1%Mo-0.1%V
Rezistență medie	900-1000	Ti-6%Al-2%Sn-4%Zr-2%Mo Ti-5.5%Al-3.5%Sn-3%Zr-1%Nb-0.3%Mo-0.3%Si
Rezistență mare	1000-1200	Ti-3%Al-8%V-6%Cr-4%Zr-4%Mo Ti-4%Al-4%Mo-2%Sn-0.5%Si Ti-6%Al-6%V-2.5%Sn Ti-15%V-3%Cr-3%Sn-3%Al Ti-5%Al-2%Sn-4%Mo-2%Zr-4%Cr Ti-6%Al-5%Zr-0.5%Mo-0.2%Si Ti-6%Al-2%Sn-4%Zr-6%Mo Ti-11%Sn-5%Zr-2.5%Al-1%Mo Ti-5.8%Al-4%Sn-3.5%Zr-0.7%Nb-0.5%Mo-0.3%Si
Rezistență foarte mare	1200	Ti-10%V-2%Fe-3%Al Ti-4%Al-4%Mo-4%Sn-0.5%Si

Tabel 20. Titan comercial și aliaje de titan conform unor specificații internaționale: UNS, AMS  
Commercially Pure Grades

MIDHANI alloy Name	Trade name	UNS No	British Specs	American Specs	German /Russian Specs	French Specs
Titan 12	Ti - 0.2Fe - 0.1C - 0.03N - 0.18O CP Grade 1	R50250	IMI 115 BS TA1	AMS 4940 ASTM B265 Gr1	3.7024 GOST 23755-79	AIR9182-T35 CP Grade 1
Titan 15	Ti - 0.3Fe- 0.1C - 0.05N - 0.25O CP Grade 2	R50400	IMI 125 BS TA2	AMS 4902 ASTM B265 Gr2	3.7034 GOST 23755-79	AIR 9182 T40- CP Grade 2

### Alpha Titanium Alloys

MIDHANI alloy Name	Trade name	UNS No	British Specs	American Specs	German /Russian Specs	French Specs
Titan 22A	Ti-8Al-1Mo-1V	R54810		AMS 4972	3.7134	T-A8DV

### Alpha-Beta Titanium Alloys

MIDHANI alloy Name	Trade name	UNS No	British Specs	American Specs	German /Russian Specs	French Specs
Titan 31 Titan 31ELI	Grade 5 Ti-6Al-4V BT6C VT6S LT 31	R56400	IMI 318 BS TA10 TA11	AMS 4928 AMS 4965 AMS 4967 ASTM B265 Gr5 ASTM B348 Gr5 ASTM B367 Gr5 ASTM B381 Gr5 ASTM F136 Gr5 ASTM F467 Gr5 ASTM F468 Gr5	3.7164	T-A6V T-A6VE (6Al-4V ELI)
Titan 32	Grade 9 3Al-2.5V	R56620		ASTM B265 Gr6		
Titan 26A	Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si LT 26		BS TA 43 44;IMI 685		3.7155 3.7154	AIR TA6Zr5D

### Other alloys

Other Alloys
OT 4-1, BT 20, BT 3-1, BT 5-1, BT 1-00, PT 1M, PT 7M, PT 3B, PT 3V, Beta 21S

## BIOMATERIALE

Medicina modernă folosește o serie de materiale cu proprietăți speciale de biocompatibilitate cu organismul uman, pentru a realiza o serie de implanturi în cazul unor persoane cu afecțiuni medicale, ortopedice, dentare, Fig. 215. Aceste materiale sunt denumite generic **biomateriale**.

Principalele caracteristici ale unui biomaterial sunt cele legate de biocompatibilitate pentru evitarea sensibilității/inflamării țesuturilor<sup>11</sup> din jurul implantului, limitarea genotoxicității<sup>12</sup>, a citotoxicității<sup>13</sup>, a toxicologiei sistemice<sup>14</sup>, asigurarea hemocompatibilității<sup>15</sup>, prevenirea iritațiilor, asigurarea osteosintezei, comportarea la coroziune, dar și unele proprietăți mecanice de rezistență, rezistență la abraziune etc.

Sumarizând aceste cerințe, biomaterialele nu trebuie să producă reacții alergice sau inflamatorii la nivelul țesuturilor și să nu prezinte toxicitate. În funcție de răspunsul organismului la aceste materiale, Heimke a propus o departajare a acestora în trei grupe: **biotolerante**, **bioinerte** și **bioactive** (pentru implanturi ortopedice).

<sup>11</sup> Sensitization (lb.eng.)

<sup>12</sup> Genotoxicity (lb.eng.)

<sup>13</sup> Citotoxicity (lb.eng.)

<sup>14</sup> Systemic toxicity (lb.eng.)

<sup>15</sup> Hemo compatibility (lb.eng.)



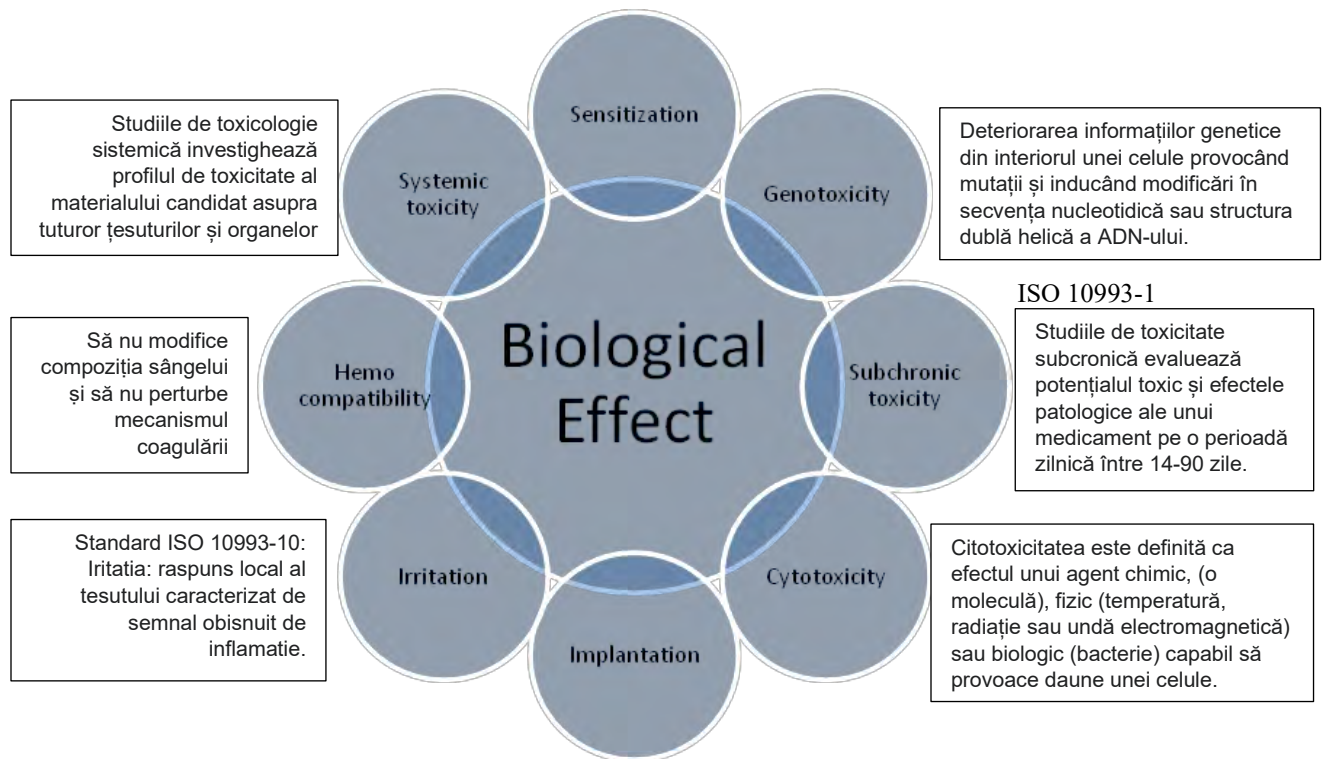


Fig. 215 Principii de biocompatibilitate și de testare a biomaterialelor, ISO 10993.

Indiferent de aplicația medicală, un material biocompatibil trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- să nu fie toxic și să nu conțină produși filtranți
- să nu provoace efecte alergice, cancerigene, teratogene (generate de anomalii morfologice)
- să nu provoace fenomene de respingere de către organism
- să nu modifice compoziția sângelui și să nu perturbe mecanismul coagulării (să fie hemocompatibil)
- să nu modifice pH-ul biologic
- să nu provoace sedimentări în țesuturi și biodegradări
- să nu conțină site hidrofile sau hidrofobe care să favorizeze pătrunderea și aderența celulară.

Cele mai utilizate materiale pentru implanturile endoosoase sunt aliajele metalice, deoarece au proprietăți mecanice superioare (rezistența la compresiune, tracțiune, etc.), fapt ce permite transferul și preluarea forțelor fiziologice de către sistemul osos. Dintre acestea, titanul, pur 99.85% este materialul ideal pentru implanturi dentare și cel care se folosește în diverse tipuri de implanturi endoosoase.

Calitățile titanului în implantologie sunt:

- **punctul de topire** – titanul se topește la 1660°C, putând fi sterilizat fără riscuri la 300°C;
- **rezistența** – implanturile sunt fabricate dintr-o singură bară de titan pur prin prelucrări mecanice, conferindu-le rezistență maximă;
- **duritatea** – titanul are duritate comparabilă cu cea a oțelului;
- **rigiditatea** – implanturile nu se deformează la aplicarea forțelor de montare sau de frezare și nici în biomecanica masticației;
- **amagnetismul** – titanul nu are nici un efect magnetic, rezultând o bună suportabilitate tisulară;

- **acțiunea regeneratoare și terapeutică** – cercetările și experiența practică au evidențiat calitățile cicatrizante ale oxidului de titan
- **pH-ul neutru** – dioxidul de titan,  $TiO_2$  care se formează în jurul implanturilor metalice are un pH cu valoarea 7, adică complet neutru;
- **imunitatea biologică** – implantul poate fi stimulat în contact cu osul, cu țesuturile din jur și cu mediul cavității bucale;
- **rezistența excelentă la șocul electric** – titanul are o conductibilitate termică foarte scăzută;
- **greutate redusă** – densitatea titanului este apropiată de cea a aliajelor ușoare.

Proteza de sold



Proteza pentru genunchi



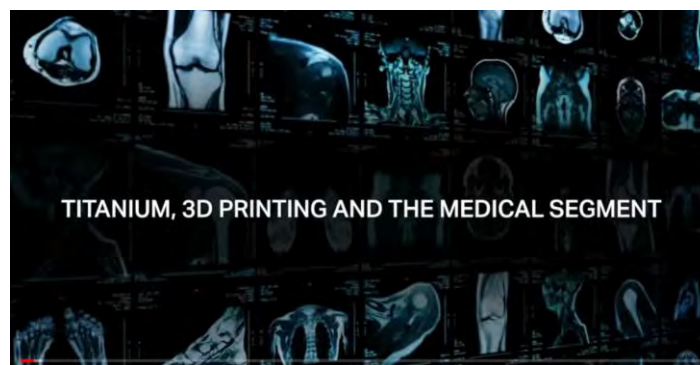
Șuruburi pentru fixare tije



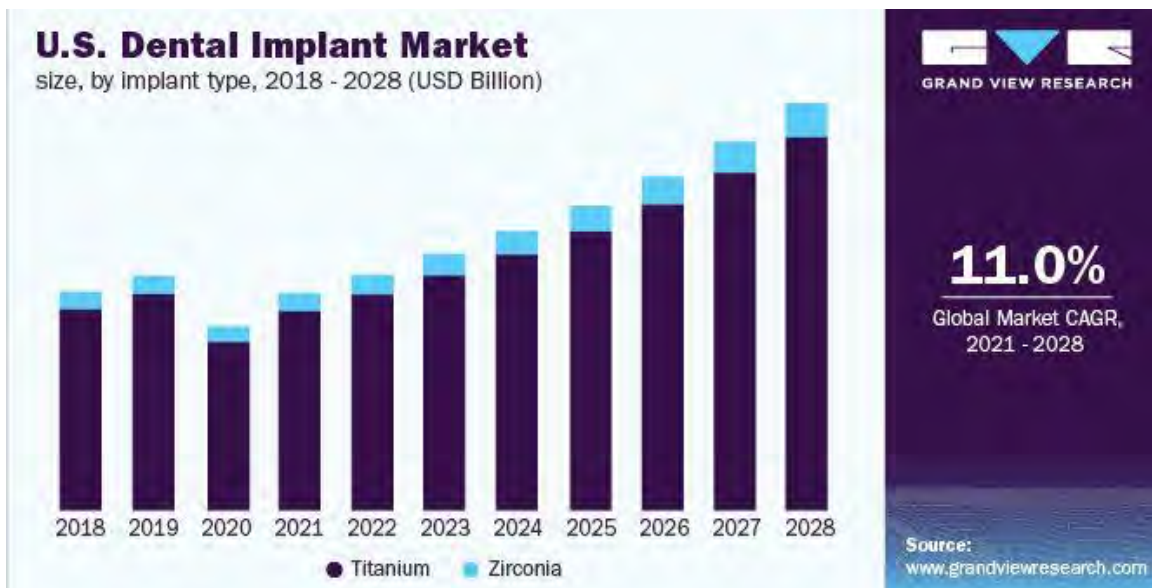
Implanturi dentare



Fig. 216 Proteze din Titan Grade 5 [20].



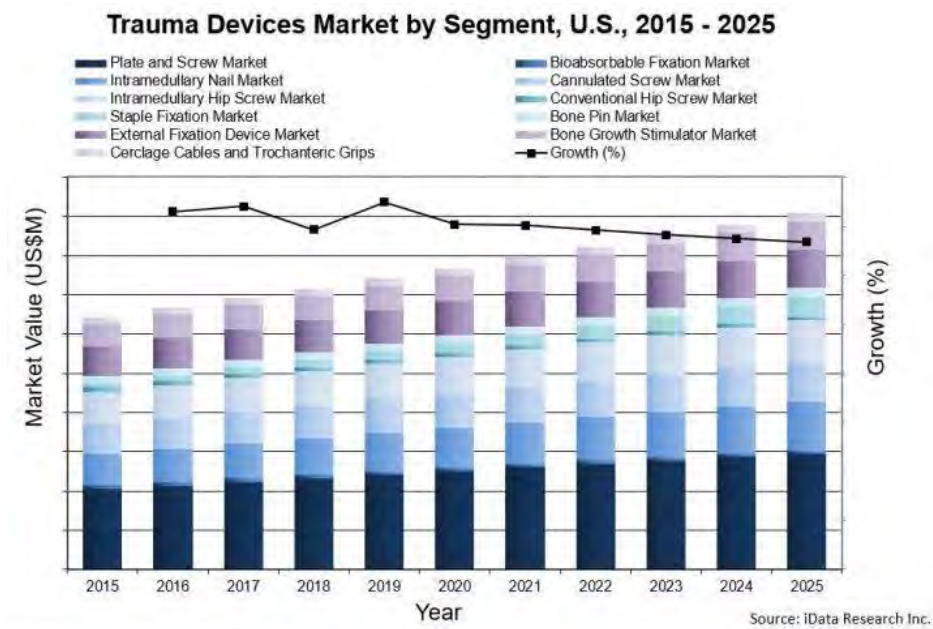
Recomandare material video: [Titanium, 3D printing and the medical segment](#). Presenting Additive By Sandvik: Material Matters. Join this interactive webinar where we dive into the scientific depths of titanium powder and 3D printing for the medical segment. Meet our leading experts, interact with industry frontrunners, and access Sandvik's 158 years of leading material expertise and additive know-how.



The global dental implant market size was valued at USD 3.6 billion in 2020 and is expected to expand at a compound annual growth rate (CAGR) of 11.0% from 2021 to 2028.

Fig. 217 Piața de implanturi medicale dentare la nivelul USA (3.6 miliarde dolari în anul 2020).

Conform raportului întocmit de [Grand View Research](#)<sup>16</sup> și Organizației Mondiale a Sănătății OMS (WHO lb.eng.) anual doar la nivelul USA, cca. 10 milioane de persoane suferă accidente pe șosele, în competiții sportive, parcour, box, karate, skateboard etc. ce necesită implanturi dentare. La acestea, se adaugă alte 15 milioane de persoane anual ce necesită înlocuirea unor dinți, proteze, coroane dentare, evoluție ce este estimată în creștere cu o rată de 11% anual, indicele CAGR (compound annual growth rate, lb.eng.).



<sup>16</sup> Grand View Research database is used by the world's renowned academic institutions and Fortune 500 companies to understand the global and regional business environment. Our database features thousands of statistics and in-depth analysis on 46 industries in 25 major countries worldwide.



## CURS 12 MATERIALE COMPOZITE

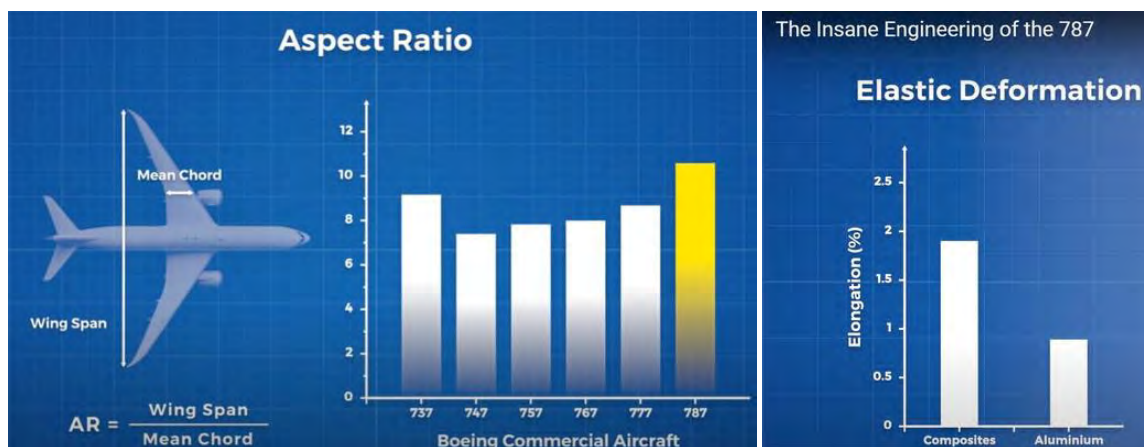
### NOȚIUNI INTRODUCATIVE

Materialele compozite sunt o clasă modernă de materiale cu proprietăți extrem de diferite, cu structură multifazică formată prin combinarea a cel puțin două materiale diferite. Materialul rezultat denumit pe scurt compozit, combină proprietățile materialelor componente într-un set unic de proprietăți. În general, se obțin materiale ușoare cu rigiditate/elasticitate ridicată, rezistente la coroziune, la agenți chimici, la regimuri de temperaturi foarte diferite, de la temperaturi joase, la temperaturi foarte înalte (ex. [discurile de frână](#) de la mașini performante). Se pot obține piese cu dimensiuni mici, până la componente cu gabarit foarte ridicat (ex. [pale pentru eoliene](#), fuselaj avioane sau [vehicule pentru misiuni spațiale](#)).



Material video recomandat: [How Wind Turbine Technicians Risk Their Lives to Keep Blades Spinning](#)

Fig. 219 Palete turbină eoliană.



Material video recomandat: [The Insane Engineering of the 787](#)

Fig. 220 Performanțe avion Boeing 787 Dreamliner datorită materialelor compozite.

Palele turbinelor eoliene, aripile avioanelor comerciale trebuie să suporte sarcini ridicate și în același timp să posede o elasticitate ridicată, să prezinte o bună comportare la solicitări ciclice, la oboseală, să fie rezistente la fenomene de coroziune atmosferică, să-și păstreze aceste caracteristici la temperaturi scăzute și foarte important, să aibă o greutate redusă.

Toate aceste proprietăți diferite trebuie îndeplinite simultan, la care se pot adăuga și alte caracteristici funcționale. De exemplu, la avioane sunt foarte importante caracteristicile suprafețelor care pot genera fenomene de rezistență aerodinamică (prezența niturilor de îmbinare la modelele de avioane mai vechi construite cu panouri de aluminiu), Fig. 221.

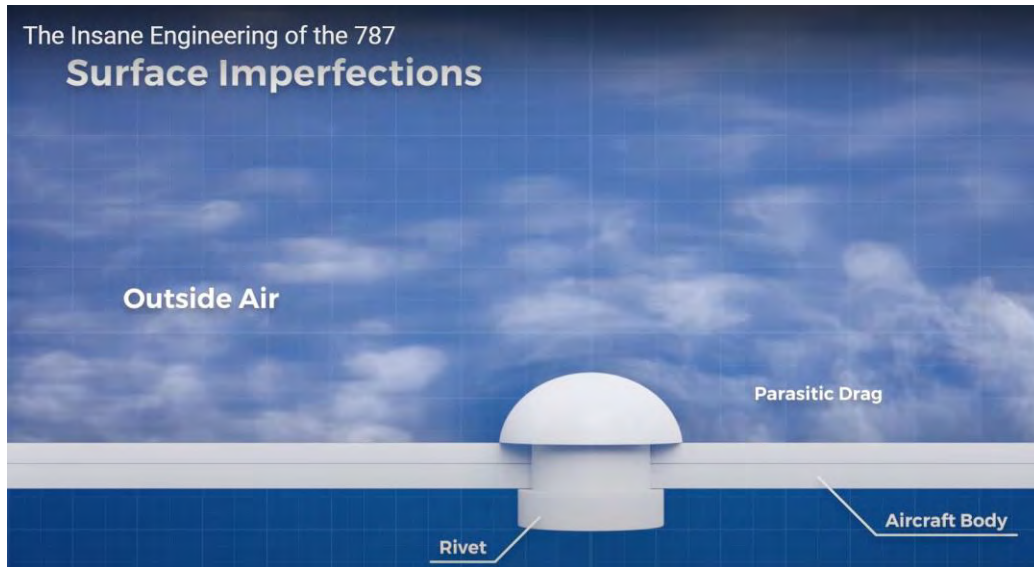


Fig. 221 Denivelări constructive ce măresc rezistența aerodinamică la aripile de avion [video].

Modelul Boeing 787 lansat în anul 2007 este primul avion de pasageri construit în principal din materiale compozite (50%), mai conține titan (15%), aluminiu (20%), alte materiale (15%), Fig. 222.

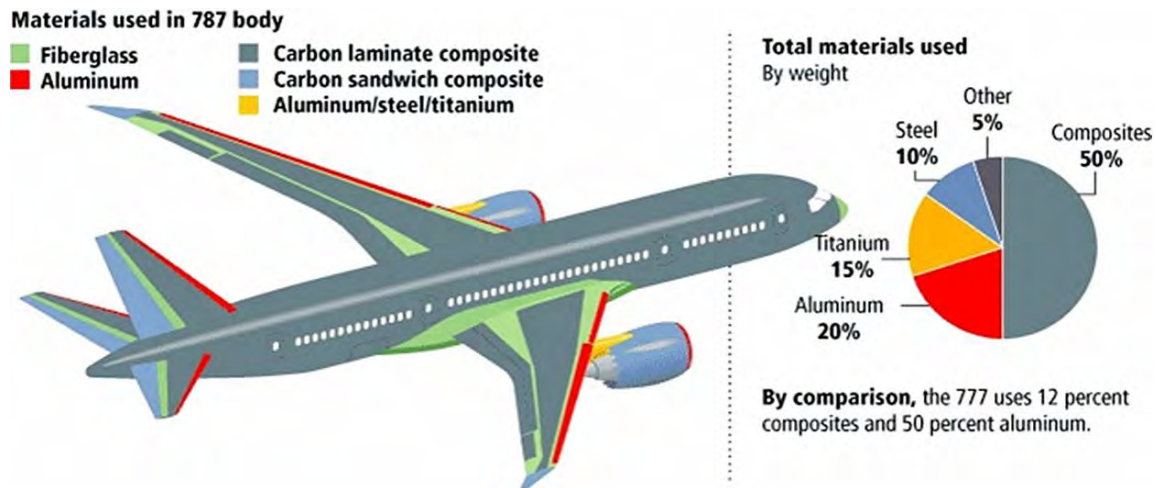


Fig. 222 Materiale utilizate la construcția avionului [Boeing 787 Dreamliner](#).

Deschiderea între vârfurile aripilor (wing span lb.eng.), Fig. 220 este cea mai mare dintre toate modelele Boeing construite până în prezent, permite creșterea autonomiei de zbor (peste 13.000 km), reducerea consumului de combustibil și a emisiilor de carbon. Aceste performanțe sunt posibile datorită utilizării unor materiale compozite performante, precum CFRP – fibre de carbon ranforsate cu polimeri, foarte rezistente și cu flexibilitate ridicată, având o greutate foarte redusă.



În zbor, aripile se pot curba 3 m ca urmare a susținerii greutatei avionului. La limită se pot curba cu 7.9 m  
 Fig. 223 Flexibilitatea superioară a aripilor de avion Boeing 787 [22].

La modelele de avioane mai vechi, construite cu panouri de aluminiu, în jurul ferestrelor apar în structurile metalice de aluminiu fenomene de microfisurare ca urmare a solicitărilor ciclice de deformare la presurizare/depresurizare datorită variațiilor de presiune în funcție de altitudinea de zbor, Fig. 224.



Fig. 224 Fenomene de [microfisurare la oboseală](#) în structura de aluminiu din jurul ferestrelor la avioane.

Fenomenele de microfisurare la oboseală apar în zonele cu gradient mare de tensiuni, în jurul niturilor de fixare la elementele de fuselaj și sunt extrem de periculoase, limitând durata de exploatare a aeronavelor. La aceste aspecte pot contribui în mod negativ și fenomene de coroziune localizată de tip galvanic (de contact), coroziune în crevasă sau coroziune selectivă. În anul 1988, o cursă de la Aloha Airlines, la un model Boeing 737 a pierdut în zbor o parte din fuselajul avionului, datorită microfisurilor existente în jurul niturilor de fixare din structura fuselajului, Fig. 225. Modelele noi de aeronave construite cu materiale compozite au înlăturat aceste deficiențe, îmbunătățind și aerodinamica de zbor, datorită lipsei niturilor de îmbinare, aripile și fuselajul având suprafețe mai netede și raze de curbă mai line.





Fig. 225 Coroziune Selectivă Aluminiu: 1988, Boeing 737, Aloha Airlines [cited].

Producția de materiale compozite susține și contribuie la dezvoltarea economiilor țărilor puternic dezvoltate. La nivelul USA, piața end-product de materiale compozite este estimată să atingă suma de 113.2 miliarde de dolari până la sfârșitul anului 2022 și se prognozează o creștere anuală a indicelui CAGR de 6.4% până în anul 2028 , Fig. 226 [21].



Fig. 226 Piața de materiale compozite în USA [21].

Creșterea cererii de materiale compozite este predominant în industria automotive, transporturi, producția de energie electrică eoliană, industria aerospațială și sectorul militar. O cotă importantă din piața de materiale compozite este prezentă și în sectorul maritim și construcții. Ponderea majoritară de materiale compozite este deținută de materialele compozite cu fibră de carbon și fibră de sticlă, Fig. 226.

### CLASIFICARE ȘI CARACTERISTICI

Materialele compozite deși le considerăm moderne (pe cele de sinteză), ele au fost utilizate încă din cele mai vechi timpuri. Unele construcții din Egiptul antic au fost realizate din blocuri confecționate din argilă amestecată cu cereale, soluție care s-a păstrat în diverse forme până în sec. XX (casele țărănești), romanii au amestecat tuful vulcanic cu var și nisip, obținând un compozit similar cu al betonului folosit în epoca modernă. Regăsim materiale compozite în construcția corăbiilor, scuturi din piele și elemente metalice, elemente de îmbrăcăminte realizate din piele și țesături, etc. În natură regăsim materiale compozite în structura lemnului (fibre de celuloză consolidate cu lignină, care este un polimer organic format din compuși fenolici), în structura osoasă a mamiferelor (cristale de hidroxiapatită și colagen, care este o proteină), în structura cartilajului rechinilor, ciocul păsărilor etc.

Structura materialelor compozite este formată în principiu dintr-o **matrice** ce poate fi **organică**<sup>17</sup>, **metalică ceramică** și **carbonică**<sup>18</sup>, în care sunt distribuite **elemente de armare** sau de **ranforsare**. Și acestea pot fi clasificate după mai multe criterii: **tip de material** (fibre, particule, whiskers<sup>19</sup>), după **orientare** și **dispunerea** elementelor de armare (țesătură, mănunchi, bare, grilă, împletituri toroidale etc) cu caracter unidirecțional, multidirecțional izotrop. O clasificare a materialelor compozite este prezentată în Fig. 228.

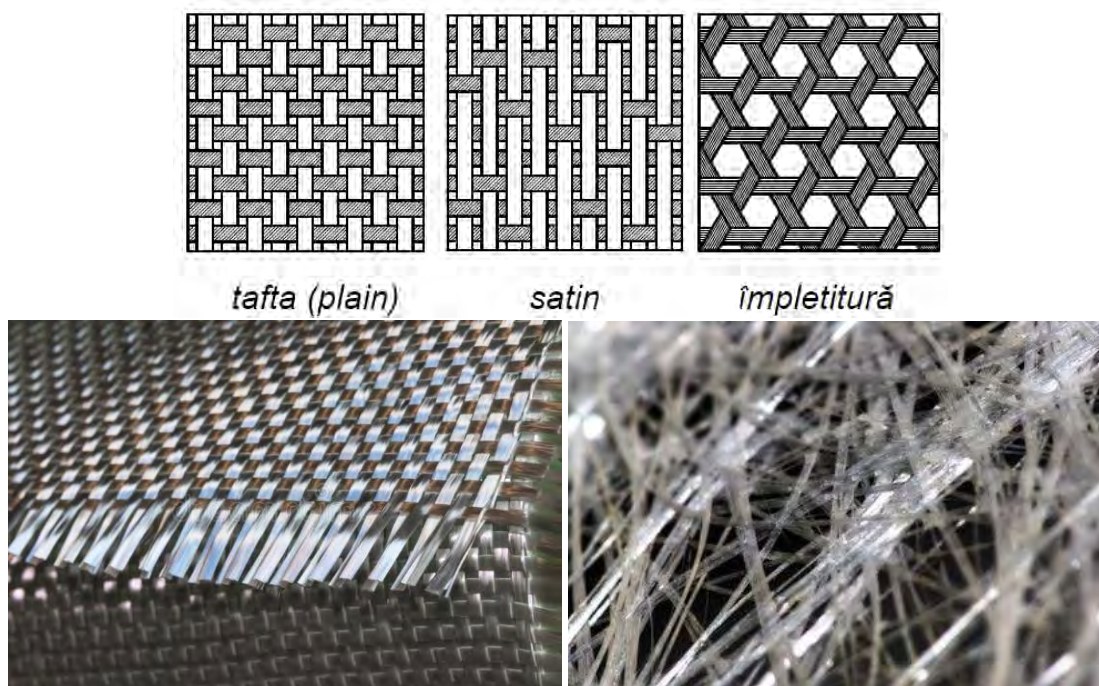


Fig. 227 Exemple de țesături din fibră de sticlă pentru materiale compozite.

<sup>17</sup> Matrice organică sau polimerică

<sup>18</sup> Matrice pe bază de carbon sau grafit pentru temperaturi înalte

<sup>19</sup> Fibre scurte – whiskers (lb.eng.)

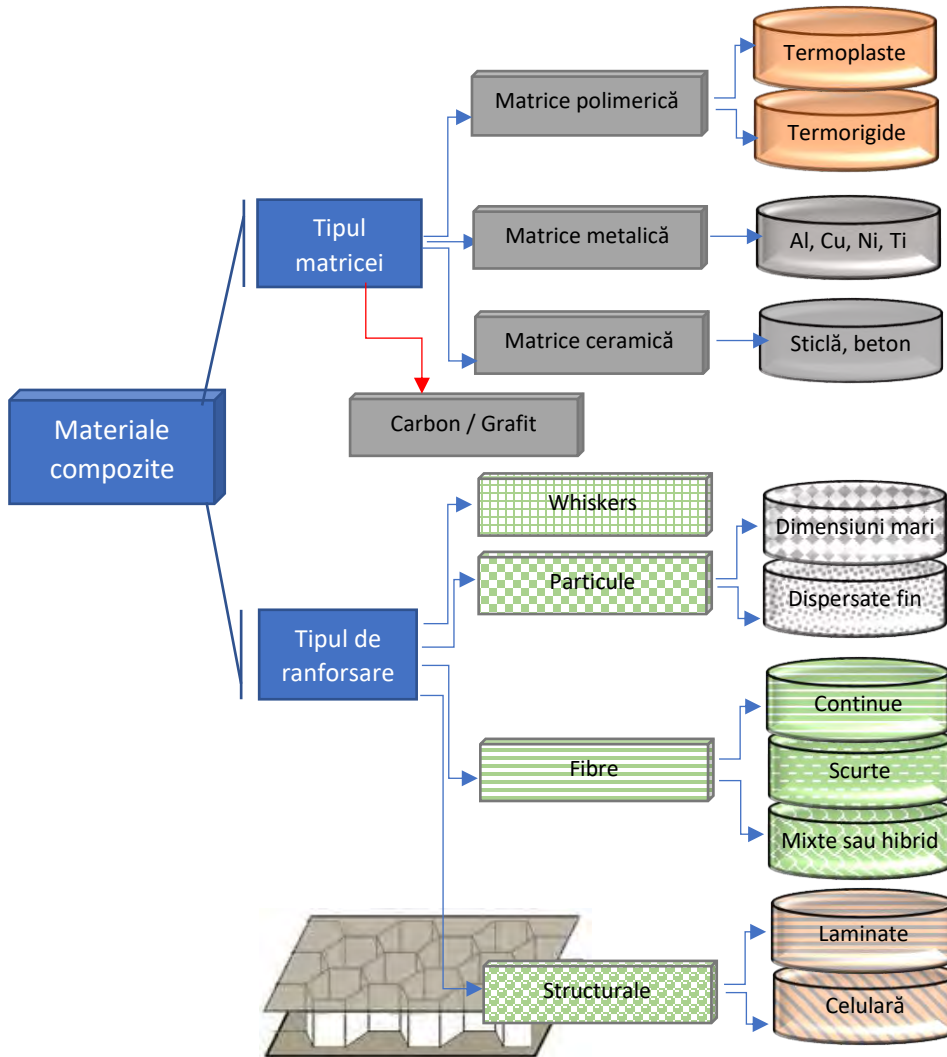


Fig. 228 Clasificarea materialelor compozite în funcție de tipul matricei și elementelor de ranforsare.

Materialele compozite cu matrice polimerică (PMC<sup>20</sup>) sunt cele mai frecvent utilizate datorită costurilor reduse de fabricație și a tehnologiilor mai simple de execuție. În funcție de caracteristicile matricei polimerice (termoplaste sau termorigide) se utilizează diferite tipuri de rășini ce se întăresc și consolidează elementele de armare (uzual diferite tipuri de țesături din fibră de sticlă, Fig. 227).

Rășinile termorigide necesită cuptoare speciale unde au loc reacții de polimerizare sub influența căldurii și presiunii. Rășina fenolică este una dintre cele mai vechi rășini termorigide și au prețuri de achiziție rezonabile. Rășinile fenolice polimerizate sunt rezistente la foc, fără utilizarea de aditivi sau filleri minerali ignifuganți. În Fig. 229 este prezentată o instalație de polimerizare (cuptor) de dimensiuni foarte mari pentru fabricația unor structuri de fuselaj ale avioanelor Boeing 787 Dreamliner.

Calitatea, geometria, tipul țesăturii fibrelor, proprietățile lor de rezistență reprezintă un factor foarte important pentru proprietățile finale ale materialului compozit în care sunt încorporate. În Fig. 230 sunt prezentate o serie de fibre obținute sintetic pentru ranforsarea materialelor compozite.

<sup>20</sup> PMC – Polymer Matrix Composites





Material video recomandat: [The Insane Engineering of the 787](#)

Fig. 229 Cuptor special pentru consolidarea materialelor compozite utilizate la structurile de aeronave Boeing.



Carbon

Basalt

Glass

Kevlar

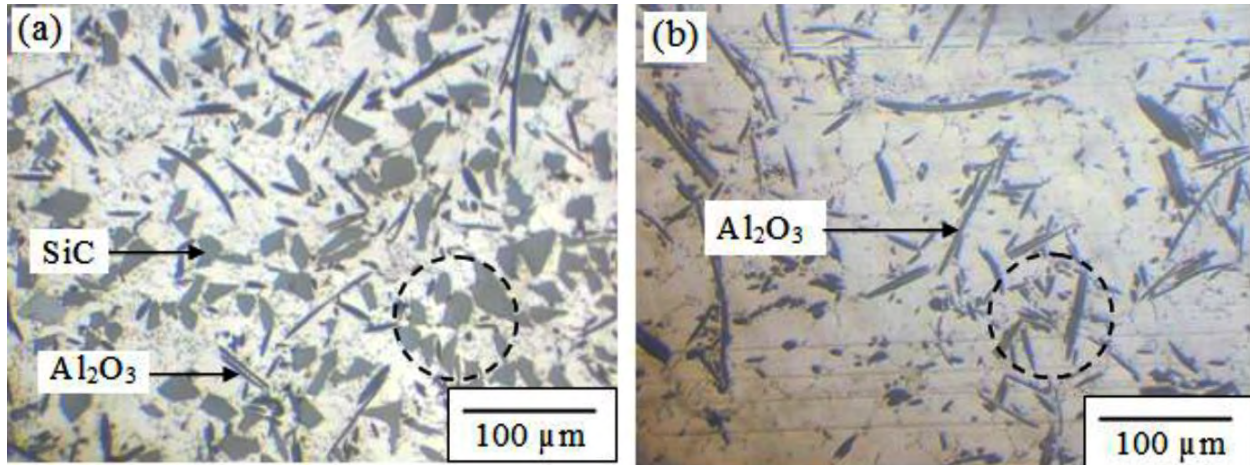
Fig. 230 Fibre sintetice pentru ranforsarea materialelor compozite.

**Materialele compozite cu matrice metalică (MMC<sup>21</sup>)** sunt materiale structurale ce conțin o matrice metalică (Al, Cu, Ni, Ti, Mg) ranforsată cu elemente nemetale. Aceste materiale se utilizează în domeniul de temperaturi cuprinse între 250 și 750°C. Rezistența mecanică, tenacitatea ridicată și rigiditatea materialelor compozite cu matrice metalică sunt mai ridicate comparativ cu caracteristicile similare ale altor materiale compozite. Necesită elemente de ranforsare pasive față de matricea metalică (non reactive chimic), uzual acestea sunt de natură ceramică (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC) sau B, Mo, Fig. 231. Dacă există activitate chimică între elementele de ranforsare și matricea metalică, atunci fibrele sau particulele de armare se acoperă cu un strat de material inert prin metode fizico-chimice.

**Materialele compozite cu matrice ceramică (CMC<sup>22</sup>)** similar materialelor ceramice, posedă puncte înalte de topire, rezistență la coroziune foarte bună, rezistență la compresiune excelentă și caracteristici ce se mențin până la temperaturi de 1500°C. În general, aceste materiale sunt destinate să lucreze la temperaturi înalte, elementele de ranforsare uzuale fiind carbonul, cuarț (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Zr, B.

<sup>21</sup> MMC – Metallic Matrix Composites

<sup>22</sup> CMC – Ceramic Matrix Composites



(a) Hybrid MMC, (b) MMC with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  whiskers

Fig. 231 Microstructuri materiale compozite cu matrice metalică [23].

Materialele compozite cu matrice de carbon ( $\text{C}/\text{Cs}^{23}$ ) sunt o clasă avansată de materiale compozite utilizate în industria spațială și militară. Acestea sunt realizate dintr-o matrice de carbon sau grafit ce conțin fibre de carbon ce conferă o rezistență foarte bună la temperaturi foarte înalte, rezistență la șoc termic, sunt foarte ușoare, cu coeficient mic de dilatare termică și cu excelente proprietăți de rezistență la oboseală termică și la fluaj. Mai mult, proprietățile de rezistență mecanică cresc odată cu creșterea temperaturii, evoluție contrară față de restul materialelor, a căror caracteristici de rezistență variază invers proporțional cu creșterea temperaturii.

Carbon fibre reinforced carbon (CFRC), carbon-carbon ( $\text{C}/\text{C}$ ), sau reinforced carbon-carbon (RCC) sunt materiale compozite cu matrice de carbon sau grafit. Au fost dezvoltate special pentru vehicule spațiale<sup>24</sup> puternic solicitate termic la reintrarea în atmosferă, pentru rachetele balistice și ulterior au fost folosite pentru discurile de frână de la Formula 1 (1976).



Fig. 232 Disc de frână de la Chevrolet Corvette, compozit carbon-ceramic [video].

<sup>23</sup>  $\text{C}/\text{Cs}$  – Carbon Matrix Composites

<sup>24</sup> Nose cone and wing leading edges of the Space Shuttle orbiter

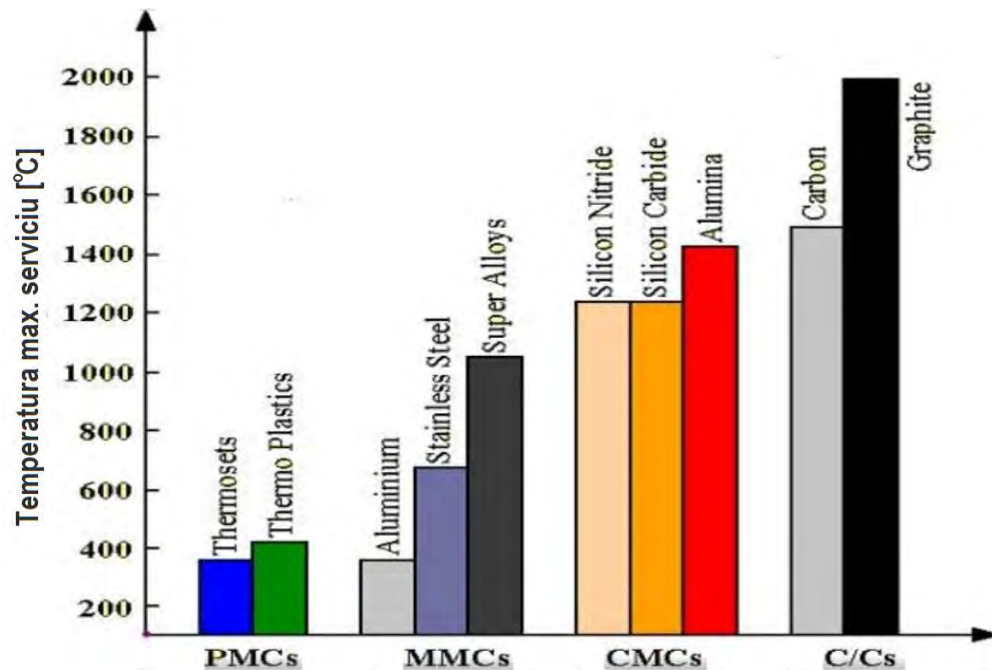


Fig. 233 Temperatura maximă de serviciu pentru materiale compozite.

Materialele compozite structurale laminat sunt realizate din mai multe straturi de materiale dispuse alternativ (de ex. schiurile), fiecare strat având anumite caracteristici funcționale. Dacă se utilizează straturi din diferite tipuri de materiale, se obține un compozit laminat hibrid. Proprietățile materialului compozit laminat depind de proprietățile straturilor independente, de modul de asamblare a acestora, de caracteristicile de anizotropie a materialelor utilizate.

Studiu de caz: Placajul stratificat TEGO, reprezintă una dintre formele cele mai stabile și durabile ale plăcilor aglomerate din lemn, fiind construite din straturi succesive de furnir din lemn, cu grosimi mici și fibrele dispuse perpendicular față de straturile adiacente, lipite între ele cu adezivi rezistenți la apă. Rezultatul este un material rezistent, cu schimbări de dimensiuni reduse la schimbări de temperatură sau umiditate. Poate fi folosit în construcții, plăcări de pereți, pardoseli ca suport pentru viitorul parchet, ambarcațiuni, fiind deosebit de elastic și ușor.

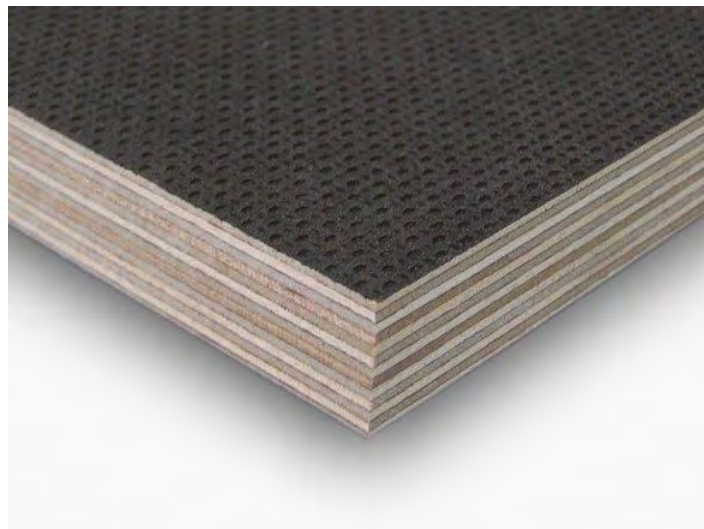


Fig. 234 Placajul stratificat TEGO utilizat în construcții. Material compozit laminat.



Studiu de caz: Sticla antiglonț (bulletproof – lb.eng.) a fost inventată de chimistul francez Édouard Bénédictus, care a patentat ideea în anul 1909. Prima versiune de sticlă antiglonț a fost realizată dintr-un sandwich format din două foi de sticlă, între care s-a introdus un strat de celuloid (precursorul plasticului). Ulterior, în anul 1936 ideea a fost îmbunătățită de Earl Fix de la compania Plate Glass din Pittsburgh, care a înlocuit foaia de celuloid cu polivinil, un plastic transparent. În anul următor, 1937, s-a dotat [primul camion de Poliție cu geamuri antiglonț](#).

## BULLETPROOF POLICE PATROL BUS IS ROLLING FORTRESS

The **bulletproof** shield shown below is a part of the equipment carried in the patrol bus



From this fort on wheels, Milwaukee, Wis., police can battle with rioters



Guns are fired through slots which close automatically when weapons are withdrawn

resisting aluminum, while the windows are **bulletproof** glass. Steel-mesh shields which protect the tires can be lowered flush with the ground, if desired, and the motor is so installed that it can be repaired from inside the car. Slots and gun holes close automatically when-

Fig. 235 Primul camion de Poliție dotat cu geam antiglonț, realizat din material compozit laminat, [1937](#).



928 Cadillac V-8 "Al Capone" Town Sedan, \$341,000 USD | Sold

Fig. 236 Prima mașină cu geamuri antiglonț vândută la [licitație Sotheby's](#) cu 341.000 dollari a aparținut lui Al Capone în anul 1928. A fost dotată cu sticlă foarte groasă (un inch grosime) pentru a oferi protecție antiglonț.

Material video recomandat: [Just how tough is Security Glass?](#)

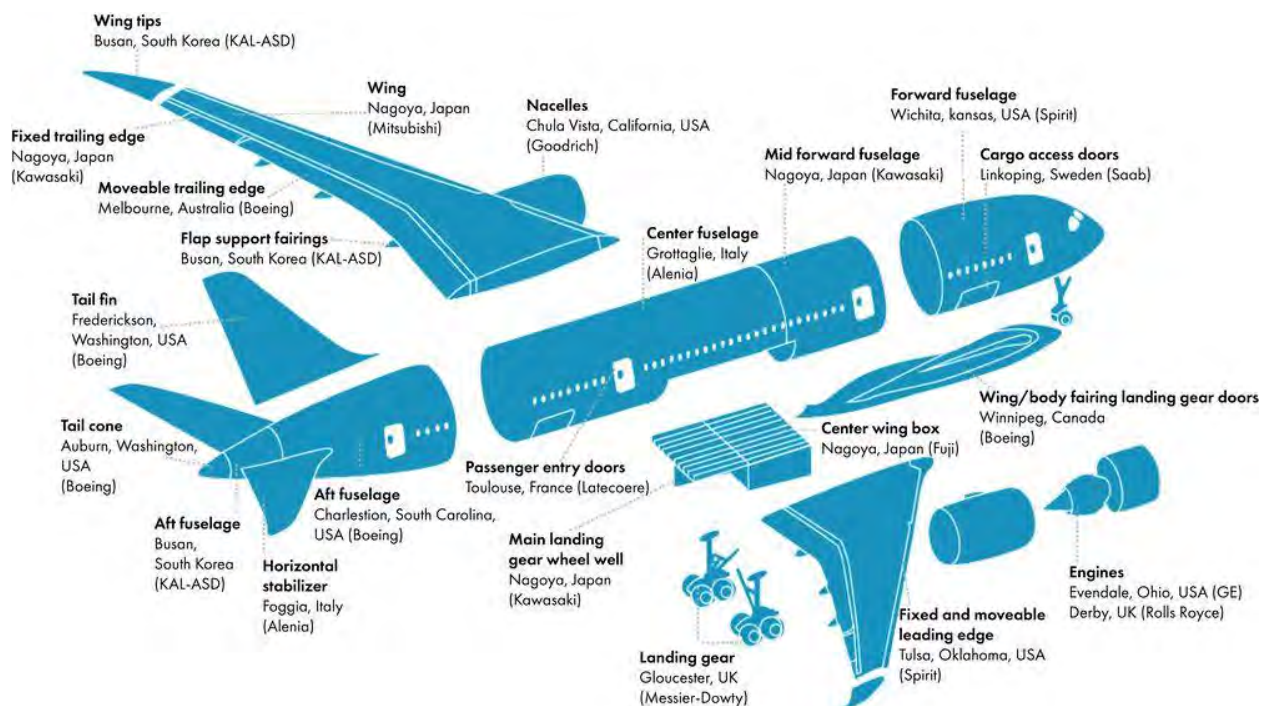
## CURS 13 CONTROLUL CALITĂȚII MATERIALELOR

### NOȚIUNI INTRODUCATIVE

Performanța, fiabilitatea și caracteristicile funcționale ale unei mașini, construcții, instalații etc. reprezintă un aspect esențial pe toată durata de exploatare a sa. Aceste caracteristici depind direct de calitatea materialelor utilizate, dar și de tehnologiile de prelucrare, asamblare și control utilizate în procesul de fabricație. Dacă în urmă cu câteva decenii, companiile încercau să producă cât mai multe componente din produsul final, strategia s-a schimbat și în prezent prin dezvoltarea economiei de piață la nivel global companiile au păstrat la nivel intern, doar producția unor componente critice, de obicei pentru care dețin o serie de patente și pentru care asigură un nivel foarte înalt a calității. Totodată, în acest fel păstrează și secretul pentru anumite aspecte critice în asigurarea performanțelor unor produse cheie din produsul final.

Această politică de apelare la furnizori externi are și o altă explicație legată de faptul că pentru o singură companie este din ce în ce mai dificil să rămână competitivă în toate aspectele, pe o gamă foarte largă de materiale, tehnologii de procesare etc. Efortul devine unul colectiv, fiecare furnizor se implică individual în aspecte legate de cercetare și dezvoltare de noi materiale, achiziții de echipamente ultramoderne, investiții, lucru pe care o singură companie nu le mai poate asigura.

În Fig. 237 sunt prezentate principalele componente, diverse ansamble din structura avionului Boeing 787 Dreamliner care la ora actuală sunt fabricate pe patru continente, de către 135 de companii din lume, reprezentând 70% din totalul componentelor necesare pentru a asambla un avion Boeing 787.



### Boeing: From Never Outsourcing to Global Outsourcing

Fig. 237 Rețeaua de furnizori pentru avionul Boeing 787 Dreamliner [Whitehorn].

O situație similară se întâlnește și în domeniul automotive, unde mari companii din Europa și din lume și-au construit o rețea de furnizori la nivel global. De exemplu, grupul german Daimler și-a extins portofoliul de produse din cadrul fabricii de la Sebeș, România cu noua [cutie de viteze automată cu opt trepte 8G-DCT](#). Motoarele și ansamblurile principale sunt produse și în afara Germaniei.

Asemenea locații includ unitățile Daimler din România, Star Transmission și Star Assembly, pentru asamblarea transmisiilor și producția de piese și componente. Pentru fabricarea noii transmisii, Daimler a construit la Sebeș două noi hale de producție.

Această abordare nouă în strategia de fabricație, presupune și un mecanism diferit, mai avansat de asigurare a calității produselor, care acum pot fi livrate în orice colț al lumii. Începând cu materialele utilizate, continuând cu asigurarea managementului calității din companiile furnizorilor până la ultima componentă dintr-un subansamblu, trebuie să existe proceduri de lucru, de control și de asigurare a calității la fiecare nivel, la fiecare structură implicată în lungul proces de fabricație și montaj al produsului final.

În anul 1975, Comisia Comunităților Europene decidea demararea, în baza articolului 95 al Tratatului, a unui program de acțiune în domeniul construcțiilor. Obiectivul programului era **eliminarea barierelor tehnice în schimburile comerciale și armonizarea specificațiilor tehnice**. În cadrul acestui program de acțiune, comisia a luat inițiativa stabilirii unui ansamblu de reguli tehnice armonizate pentru proiectarea construcțiilor, care vor înlocui regulile/standardele existente în diferite state membre. Înaintea înființării UE, fiecare țară avea propriul său sistem de standardizare, cu reguli și specificații diferite, lucru care făcea extrem de dificil colaborarea dintre specialiști, asigurarea mentenanței produselor și echipamentelor livrate, înlocuirea componentelor defecte sau uzate, etc.

Organisme naționale de standardizare sunt, de exemplu: **ASRO** (Asociația de Standardizare din România), **BS** în Regatul Unit; **UNI** în Italia, **DIN** în Germania, **AFNOR** în Franța, **ASTM** American Society for Testing and Materials în USA, este una dintre cele mai mari organizații profesionale cu membri în peste 140 de țări. Aceste organizații și altele, asigură și coordonează activitățile de standardizare, de armonizare a standardelor la nivel internațional.

Tot la nivel internațional<sup>25</sup>, există standardele ISO (**International Organization for Standardization**), organizație care are sediul central în Geneva și a dezvoltat cca. 10.000 de standarde pe parcursul a peste 50 de ani de activitate și are peste 160 de membri. Cel mai cunoscut standard internațional este **standardul Sistemului de Management al Calității ISO 9001**.

Conceptul de asigurarea calității a fost lansat în anul 1950 în SUA și a fost aplicat în primul rând în industria spațială și în cea nucleară, ulterior fiind extins și în alte domenii, prin apariția familiei de standarde ISO 9000.

---

<sup>25</sup> **SAE International**, initially established as the **Society of Automotive Engineers**, is a U.S.-based, globally active professional association and standards developing organization for engineering professionals in various industries. Principal emphasis is placed on transport industries such as automotive, aerospace, and commercial vehicles.

**AISI** = the **American Iron and Steel Institute** is an association of North American steel producers. AISI members make over 80% of the steel produced in North America.

**ANSI** = The **American National Standards Institute**, ANSI is a private, non-profit organization that administers and coordinates the U.S. voluntary standards and conformity assessment system.

**UNS** = **Unified Numbering System** for Metals and Alloys provides a means of correlating many internationally used metal and alloy numbering systems administered by societies, trade associations, and individual users and producers of metals and alloys. Jointly developed by SAE International and the American Society for Testing and Materials (ASTM), it provides the uniformity necessary for efficient indexing, record keeping, data storage and retrieval, and cross-referencing. UNS is an alloy designation system widely accepted in North America.

**CEN** = the **European Committee for Standardization**, is an association that brings together the National Standardization Bodies of 33 European countries. CEN is one of three European Standardization Organizations (together with CENELEC and ETSI) that have been officially recognized by the European Union and by the European Free Trade Association (EFTA) as being responsible for developing and defining voluntary standards at European level.



Asigurarea calității reprezintă ansamblul activităților planificate și sistematice implementate în cadrul unui sistem al calității și demonstrate ca fiind necesare pentru asigurarea calității/încrederii unui produs, serviciu, proces, organizație, persoană și care satisface cerințele pentru calitate conform [SR ISO 9000:2015](#).

Dacă inițial asigurarea calității s-a aplicat doar în anumite sectoare, precum industria militară, spațială, nucleară, de avioane, electronică, informatică etc., odată cu apariția standardelor ISO 9000, în 1987, asigurarea calității se aplică în orice domeniu, inclusiv în cel al serviciilor.

Standardul ISO 9001 este unul dintre factorii care favorizează comerțul internațional cu bunuri și servicii; dovada o reprezintă numărul de țări care au adoptat acest standard și sutele de mii de firme care au obținut certificare ISO 9001. Standardul ISO 9001 a fost elaborat pentru o certificare oferită clienților a faptului că societatea în cauză funcționează în acord și pe baza unui sistem de calitate recunoscut internațional și care este reprezentativ atât pentru calitatea produselor și a serviciilor, cât și a managementului organizației respective.

## SISTEME DE ATESTARE A CONFORMITĂȚII

Certificarea conformității la producător pentru produsele utilizate în construcții, garantează asigurarea premiselor pentru respectarea condițiilor esențiale prin Directiva 89/106/CEE, Legea 10/1995 și Legea 608/2001, HG 622/2004 precum și pentru **aplicarea mărcii CE pentru produse**.

**Marcajul CE** este un indicator cheie al conformității unui produs cu legislația UE și permite libera circulație a produselor pe piața europeană. Prin aplicarea marcajului CE pe un produs, un producător declară pe propria răspundere, conformitatea produselor sale cu toate normele juridice de obținere a marcajului CE. Se asigură astfel validitatea comercializării aceluși produs în Zona Economică Europeană (EEA, cele 27 state membre ale UE și țările EFTA – Islanda, Norvegia, Liechtenstein, precum și Turcia).

Aceasta se aplică și produselor fabricate în țări terțe care sunt vândute în EEA și Turcia. Aceasta înseamnă că produsul poate fi comercializat în mod liber pe piața Uniunii Europene. Atunci când un produs este proiectat și apoi fabricat în conformitate cu cerințele de bază ale unei directive a CE, pentru a fi comercializat în mod legal, produsul trebuie să poarte marcajul CE. **Marcajul CE nu reprezintă o certificare a calității**, ci este o condiție prealabilă obligatorie de liberă circulație a produselor, vizând sănătatea sau siguranța publică. Marcajul CE arată că un produs, indiferent unde este fabricat, este conform unei reglementări ale CE.

## DECLARAȚIE DE CONFORMITATE

Declarația conformității (declarație de conformitate) reprezintă declarația unui producător care exprimă pe propria răspundere că un anumit produs este în conformitate cu un standard sau cu o specificație tehnică.

## CERTIFICATUL DE INSPECȚIE

Standardul [SR EN 10204:2005](#) stabilește diferitele tipuri de documente de inspecție care pot fi solicitate la plasarea unei comenzi de către cumpărător pentru produsele metalice care urmează să fie prelucrate, asamblate în diferite tipuri de aplicații industriale.

Furnizorii vor achiziționa semifabricate metalice (table, profile, țevi, bare etc.) din rețele de distribuție autorizate, agreeate de parteneri, produsele achiziționate fiind însoțite de **Declarație de Conformitate**, **Certificat de Inspecție** 3.1 sau **Raport de Încercări** 2.2, vezi Tabelul 21.

Astfel, există garanția că se vor folosi materiale care au fost supuse unor procese de control și de asigurare a calității la producătorii de materiale, reducându-se considerabil riscul ca să apară defecte, neconformități de calitate a produselor ca urmare a folosirii unor materiale improprii, ce nu satisfac condițiile de formă, rezistență, calitate pe care proiectantul le-a luat în considerare în etapa de proiectare a aplicațiilor respective.

Tabelul 21 Documente de atestare a conformității, [SR EN 10204:2005](#).

Tipul certificatului	Denumirea documentului		Conținutul documentului
2.1	RO	Declarație de conformitate	Stabilește conformitatea produsului cu comanda (CPC). Nu se prezintă rezultatul testelor în urma analizelor chimice, proprietăți mecanice, etc.
	EN	Declaration of compliance with the order	
	Eliberat de	Producător materiale	
2.2	RO	Raport de încercări	Stabilește CPC, cu indicarea rezultatelor unor teste nespecifice (inspecție nespecifică). Se acceptă teste pe un lot anterior.
	EN	Test Report	
	Eliberat de	Producător materiale	
2.3	RO	Raport de încercări specific	Stabilește CPC, cu indicarea rezultatelor unor teste specifice (inspecție specifică), ex. anumite proprietăți mecanice, compoziție chimică, etc.
	EN	Specific test report	
	Eliberat de	Producător materiale	
3.1	RO	Certificat de inspecție 3.1	Stabilește CPC, cu indicarea rezultatelor unor teste specifice. Certificatul este emis și semnat de reprezentantul autorizat al producătorului, care este extern departamentului de producție.
	EN	Inspection certificate 3.1	
	Eliberat de	Producător materiale	
3.2	RO	Certificat de inspecție 3.2	Stabilește CPC, cu indicarea rezultatelor unor teste specifice. Certificatul este emis și semnat de reprezentanții autorizați ai producătorului și ai clientului sau de un inspector extern numit.
	EN	Inspection certificate 3.2	
	Eliberat de	Inspector extern autorizat Producător materiale	

Sistemele de atestare a conformității codificate A(1+); B(1); C(2+); D(2); E(3); F(4) exprimă în ordine descrescătoare nivelul de exigență în evaluarea conformității produsului.

COD	METODA (SARCINA). Finalizare sistem	EXECUTANT
A(1+)	a) controlul producției în fabrica	Producator
	b) incercari pe esantioane prelevate de la locul producției după un plan prestabilit	
	c) incercari initiale de tip ale produsului	Organism notificat
	d) inspectia initiala a locului de productie și a controlului producției în fabrica	
	e) supravegherea, evaluarea și acceptarea controlului producției în fabrica	
	f) incercari prin sondaj pe esantioane prelevate de la locul producției, de pe piata sau de pe santiere	
	<b>CERTIFICAT DE CONFORMITATE</b>	

COD	METODA (SARCINA). Finalizare sistem	EXECUTANT
B(1)	a) controlul producției în fabrica	Producator
	b) incercari pe esantioane prelevate de la locul producției după un plan prestabilit	
	c) incercari initiale de tip ale produsului	Organism notificat
	d) inspectia initiala a locului de productie și a controlului producției în fabrica	
	e) supravegherea, evaluarea și acceptarea controlului producției în fabrica	

Măsurătorile de control ale calității sunt specificate în înregistrări referitoare la controale, încercări și măsurători, într-un format corespunzător pentru comparare și analiză. Aceste înregistrări includ următoarele categorii de documente:

- rapoarte de control și încercări ale materialelor;
- rapoarte de control și încercări efectuate în diferite etape ale procesului de producție;
- înregistrări ale neconformităților depistate etc.

Standardele ISO seria 9000 sunt standarde care conțin recomandări privind managementul calității și cerințele pentru asigurarea calității în general. Sunt descrise elementele sistemului calității, fără să fie specificate cum să fie implementate de către o anumită firmă. Modalitatea concretă de proiectare și aplicare a unui sistem al calității depinde de obiectivele, produsele, procesele și practicile specifice ale fiecărei firme.

Calitatea reprezintă ansamblul de proprietăți și caracteristici ale unui produs sau ale unui serviciu, care îi conferă acestuia aptitudinea de a satisface necesitățile exprimate sau implicite. Aprecierea calității se face pe baza unui ansamblu de caracteristici, esențiale fiind următoarele:

- constructive (dimensiuni, masă etc);
- funcționale (viteză, randament, productivitate, fiabilitate, mentenabilitate etc);
- economice (consumuri specifice, cheltuieli de exploatare, cheltuieli de întreținere etc);
- estetice (grad de finisare, cromatică etc);
- ergonomice (confort, securitate de utilizare etc);
- ecologice (formă, durată și grad de poluare);
- sanogenetice.





Calitatea are un caracter dinamic relativ și complex, ce contribuie direct sau indirect, la mărirea cifrei de afaceri, la păstrarea sau cucerirea a noi nișe de piață, la îmbunătățirea imaginii firmei, la creșterea încrederii clienților și a furnizorilor în serviciile și în produsele oferite de firmă etc.

Din perspectiva materialelor, conceptul de calitate poate cuprinde cerințe privind:

- asigurarea compoziției chimice în limitele prescrise de standard;
- limitarea impurităților la nivelurile maxime precizate de standard;
- asigurarea toleranțelor de dimensiuni, grosimi, formă pentru semifabricate;
- asigurarea caracteristicilor de rezistență mecanică și de deformabilitate;
- asigurarea unor factori de calitate (factorul Z);
- asigurarea caracteristicilor microstructurale precizate de starea de livrare;
- acoperiri, rezistență la coroziune, etc.
- comportarea la tratamentul termic;
- alte caracteristici specifice.

Mai jos este prezentat un **Certificat de Inspecție 3.1** conform SR EN 10204:2005 de la firma UGITECH din Italia, pentru o bară de oțel inoxidabil austenitic cu secțiune hexagonală, marca internă UGIMA®-X 4404. Conform [fișei tehnice de produs](#) disponibilă pe web, materialul este X2CrNiMo17-12-2 (EN 10272 : 2016-11), adică bare de oțel inoxidabil pentru instalații sub presiune. Pe certificat sunt menționate standarde echivalente din alte țări, ex: [ASME SA479/479M-17 Sec.II, PartA TYPE 316L](#), care se referă la boilere și instalații sub presiune conform normelor americane. Pe certificat apar informații despre compoziția chimică, proprietăți mecanice, comportare la coroziune, lotul de produs, metodă elaborare, nr. comandă.



Manufacturer <b>UGITECH ITALIA S.r.l</b> Via G. Di Vittorio, 34/36 20068 Peschiera Borromeo Italy <a href="http://www.ugitech.com">www.ugitech.com</a>		<b>INSPECTION CERTIFICATE 3.1</b> <b>EN 10204 / 3.1</b>			UGITECH 						
Certificate : All UGITECH products were produced according to the certified quality system (at least ISO 9001) and according to customer requests on purchase orders, as per requirements in standards ISO/TS 16949, EN 9100/EN9120, ISO 13485, code RCCM and/or ASME section III, PED 2014/68/EU, AD2000 W0.				Supplier's mark : 							
				Inspector's stamp : 							
Purchase : 12816 DAMSTAHL A/S		Purchase order reference : PO: 652318	Order number : 968386 40	Certificate : 82082696 000010							
Product : UGIMA-X 4404 bar Drawn Solut <sup>®</sup> annealed & cold worked h11 hexagonal 32,000MM LONG. 3,000M +200,0 00MM -0,000MM <span style="float: right;">10018529</span>											
Melting process : EAF + AOD + CC		Batch : 2020091300	Heat n° : 020082	Weight : 1957 kg							
Pieces Nbr : 4	Shape : hexagonal	Dimension : 32,000 mm	Forging ratio : 0								
Standard : PED 2014/68/EU - A1 - P4.3    ASTM A484/A484M-18											
Standard : EN 10272 : 2016-11 1.4404 ASME SA479/479M-17 Sec.II PartA TYPE 316L			AD 2000 W10 ED 05.2016 1.4404 AD 2000 W2 ED 09.2016 1.4404								
<b>CHEMICAL ANALYSIS</b> <span style="float: right;">Test n° : KXZS</span>											
%	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	N		
Min				10,0000	16,5000	2,0000					
Max	0,0300	1,0000	2,0000	13,0000	18,0000	2,5000	0,0300	0,0450	0,1000		
Heat	0,0220	0,4230	1,4210	10,0740	16,6900	2,0450	0,0269	0,0300	0,0400		
Product											
<b>MECHANICAL CHARACTERISTICS</b>											
<b>Result as delivered : Solut<sup>®</sup> annealed &amp; cold worked</b>											
Tensile test <span style="float: right;">Hardness</span>											
Test N°	T°C	Marker n°	Type	Yield strength	Yield strength	Tensile strength	Elongation	Elongation	Red. Area	HBW	HRC
	°C	Direction		Rp 0.2%	Rp 1%	RM	5D	4D	Z	2,5/187,5	Ave
		Min		MPa	MPa	MPa	%	%	%	Ave	Ave
		Max									
KXZS	20	1 L		200	235	500	20	30	40	235	22
				549	604	685	39	41	73	230	20
<b>Notch Toughness</b>											
Test N°	T°C	Direction	Type	Min	Individual values		Average	Lateral Expansion		Cristallinity level	
	°C			J	J		J	mm			
KXZS	20	L	KISOV	100	164 166 169		166				
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>											
Corrosion : INTERCRYSTALLINE CORROSION RESISTANT ACC. TO ISO 3651-2-1998 PRACTICE A											
Others : STRAIGHTNESS MAX1 1MM/M TÜV LETTER OF APPROVAL IN OUR POSSESSION. WE ABSTAIN OF A COUNTERSIGNATURE EN 10278 ISSUED IN AGREEMENT WITH TÜV SÜD INDUSTRIE SERVICE GMBH (DRG-0036-QS-W 391/2007/MUC)											
We declare that the mentioned product is in compliance with the requirements of the contract and that, after checks and tests, it meets in all respects the specified requirements and applicable standards and regulations, except reservations or exceptions as listed in this declaration of conformity (NF L 00-015 C); Document validated by electronic signature. Material manufactured in the REACH regulation respect.										UGITECH ITALIA S.r.l the 24.08.2020 The quality manager  L. DIFRAIA	
										040001414256 <span style="float: right;">Page 1/1</span>	

## ELEMENTE DE MICROSCOPIE OPTICĂ

Examinarea metalografică este o tehnică de analiză și de caracterizare a materialelor, prin care se obțin informații despre microstructura materialului, porozitate, morfologia fazelor secundare și a grăunților cristalini ai matricei metalice, a incluziunilor nemetalice sau a altor constituienți microstructurali, de ex. în cazul materialelor compozite – elementele de ranforsare. Se pot evidenția o serie de imperfecțiuni sau neconformități de material, fisuri, pori, delaminări, cavități, incluziuni, exfolieri, etc.

În general se utilizează microscopia distructivă, care se realizează pe probe prelevate din materiale, coroborând analiza metalografică optică cu încercări mecanice, de duritate, microduritate eventual și cu alte analize de material. Astfel, metalografia optică este o metodă principală de analiză a materialelor, fiind relativ ușor de aplicat, spre deosebire de microscopia electronică de înaltă rezoluție care este o metodă mai avansată de analiză, folosită cu precădere în cercetare și expertize juridice.

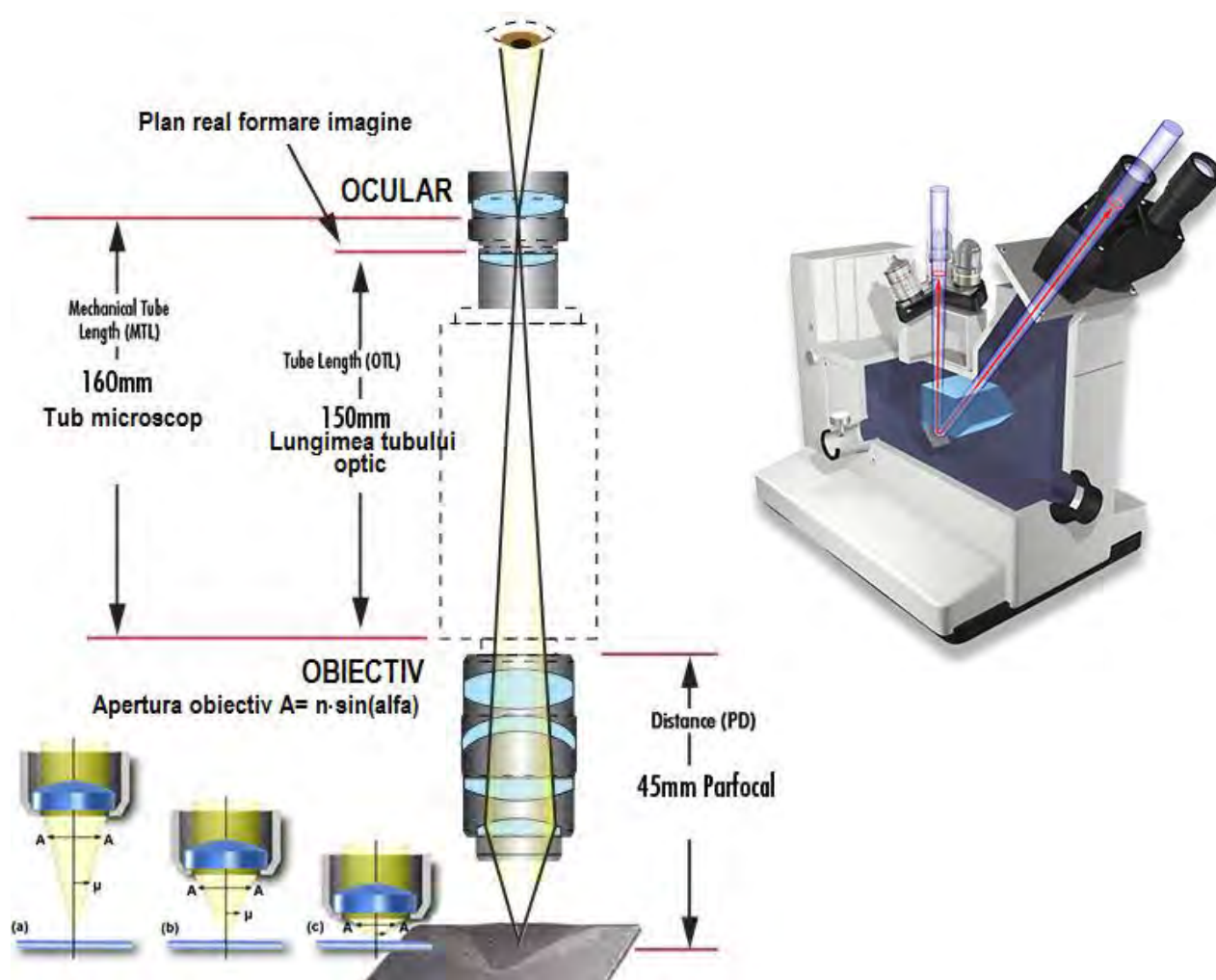


Fig. 238 Principiul de lucru al unui microscop metalografic.

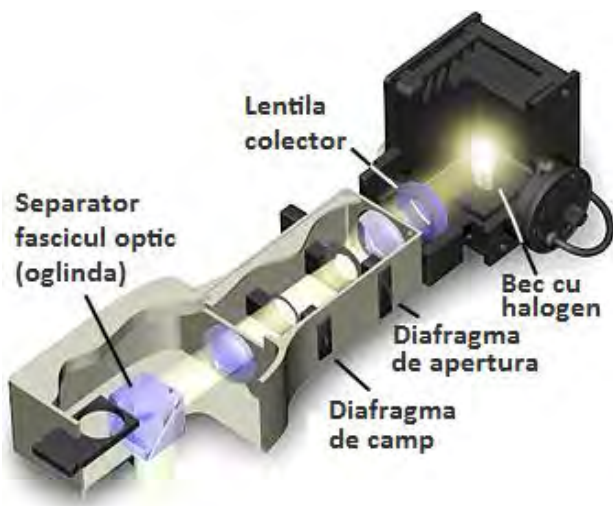
Microscopul metalografic este un instrument optic care permite analiza suprafeței unei probe metalografice pregătite în prealabil în vederea examinării prin metode specifice, la factori de mărire sub 1500X, uzual până în 1000X.

Pregătirea probelor înainte de examinare este un aspect esențial de care depinde calitatea, claritatea, contrastul și rezoluția caracteristicilor morfologice ale constituenților microstructurali prezenți în microstructura materialelor examinate. Probele neatacate chimic pot furniza informații despre porozitate, fisuri și incluziuni nemetalice, iar cele atacate chimic pun în evidență caracteristici morfologice la o rezoluție de max. 0,2-0,3  $\mu\text{m}$  pentru forma și mărimea grăunților, segregării, distribuția fazelor și incluziunilor la nivel microstructural.

Constructiv, microscopul optic metalografic se compune din următoarele părți, Fig. 238:

- corpul microscopului;
- sistemul de iluminare;
- dispozitivul de înregistrare imagini cu cameră foto sau cameră digitală;
- sistemul mecanic de reglare și măsura cu sistem de prindere probă cu deplasare după două axe;

Partea optică a microscopului este formată din ocular, obiectiv, prisme și oglinzi și un sistem de reglare care determină caracteristicile principale ale puterii de mărire și de rezoluție, Fig. 238. Sistemul de iluminare cuprinde sursa de lumină, lentila colector, diafragma de apertură, diafragma câmp și filtrele de lumină, Fig. 239.



Diafragma de apertură. Reglează unghiul de deschidere a conului de lumină ce pătrunde în obiectiv.

Diafragma de câmp. Reglează fluxul de lumină care pătrunde în obiectiv. Pe măsură ce se închide, se reduce luminozitatea și puterea separatoare de rezoluție laterală. La deschideri prea mari a diafragmei, se pierde din claritate din cauza razelor de lumină marginale, fenomen denumit aberație de sfericitate.

Filtrele de lumină. Permit trecerea doar a unor raze de lumină cu anumite lungimi de undă. Se reduc fenomenele de interferență datorate aberației cromatice.

Fig.239 Sistemul de iluminare a microscopului metalografic [24, 25].

În planul real de formare a imaginii, obiectivul formează o imagine răsturnată și mărită, care este mărită în continuare de ocular, Fig. 240. Această imagine poate fi observată direct sau poate fi înregistrată cu o cameră foto/digitală.

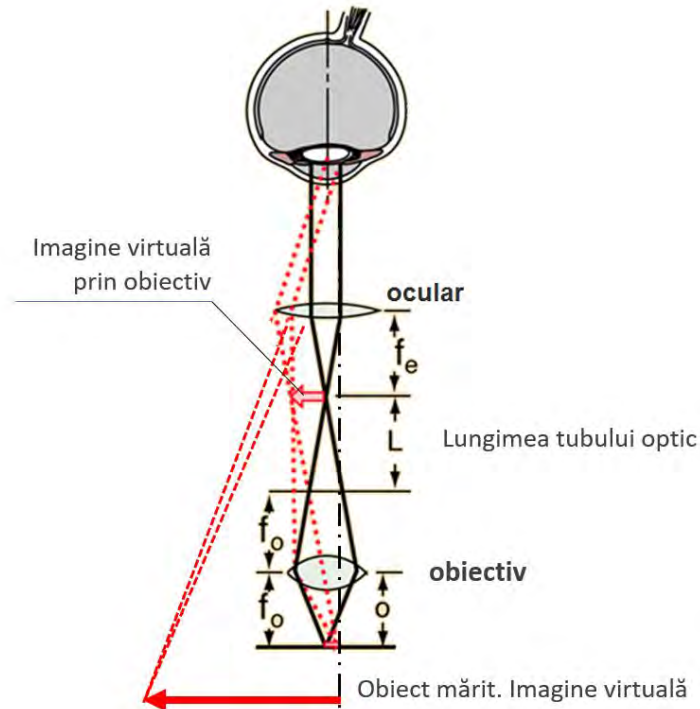
Ocularele sunt formate dintr-un sistem de lentile și măresc imaginea obținută de la obiectiv, îndeplinind și un rol de corecție optică. Există mai multe tipuri constructive [24-26]:

- simple (Ramsden și Huyghens) care se utilizează cu obiective acromate;
- de compensație care se utilizează cu obiective apocromatice;
- de proiecție pentru fotografiere. Se obțin imagini fără aberații de sfericitate;
- speciale: ortoscopice, cu cuarț pentru raze ultraviolete, homale pentru fotografiile speciale cu corecții cromatice și perfect plane.



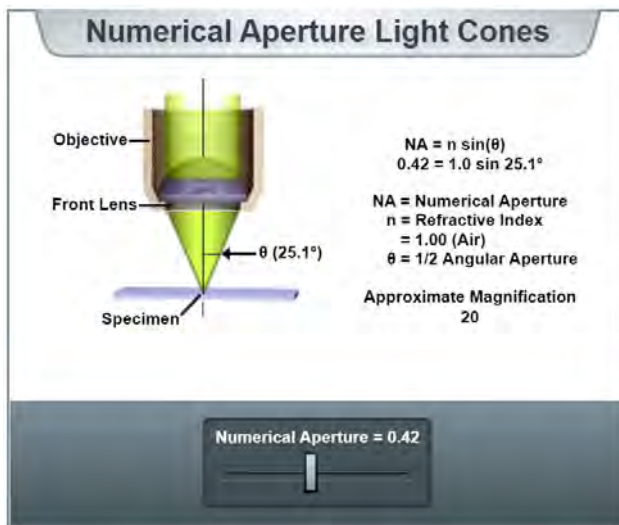
Cele mai importante caracteristici ale unui microscop optic metalografic sunt:

- puterea de mărire și apertura;
- puterea de separare sau rezoluție laterală;
- rezoluția de adâncime;
- planeitatea imaginii câmpului.



**Puterea de mărire microscop = Putere mărire ocular x Putere mărire obiectiv**

Fig.240 Sistemul optic al microscopului metalografic.



Apertura numerică caracterizează capacitatea obiectivului de a capta lumina reflectată de suprafața probei și de a diferenția detaliu cu o anumită rezoluție laterală.

Valori mai ridicate ale aperturii numerice permit razelor oblice de lumină să pătrundă în lentila obiectiv, ceea ce mărește cantitatea de detalii ce pot fi observate cu claritate.

Dacă obiectivele sunt uscate (mediu aer), apertura numerică maximă este de (0,95), iar în imersie de ulei mineral poate ajunge până la 1,5.

$$\text{Apertura obiectiv } A = n \cdot \sin(\alpha)$$

(cu  $n$  s-a notat indicele de refracție pentru mediul dintre obiectiv și suprafața probei, pentru aer  $n=1$ , iar pentru ulei  $n=1.51$ ).

Fig. 241 Apertura numerică [26].

În Fig. 241 este prezentată legătura dintre apertura numerică (A) și conul de lumină ce pătrunde în obiectiv, respectiv corelația cu puterea de mărire a obiectivului. Pe site-ul web [26], există tutoriale ce folosesc scripturi și animații macromedia flash object care sunt interactive, utilizatorul poate modifica anumiți parametri în timp real și să observe astfel efectul asupra imaginii rezultate la microscop.

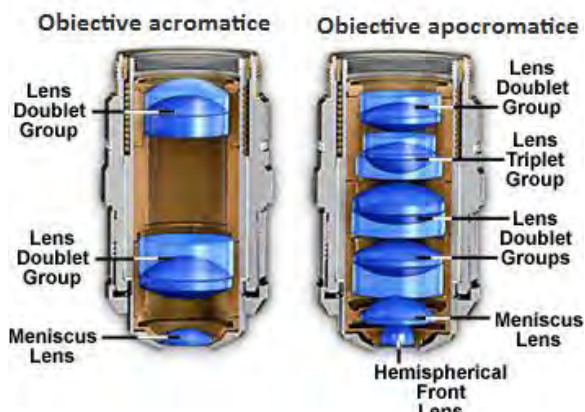


Fig. 242 Obiective acromatice și apocromatice [24].

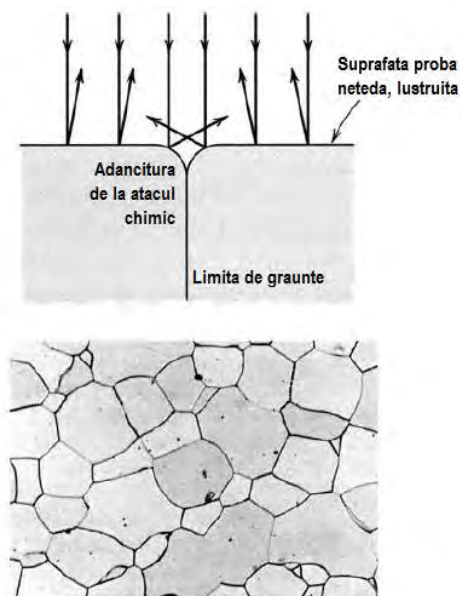
Obiectivele acromatice sunt construite pentru utilizarea luminii din partea centrală a spectrului vizibil (galben-verde), iar obiectivele apocromatice se utilizează la mărimi mari și au corecții pentru întreg spectrul vizibil, Fig. 242.

Rezoluția laterală a unui microscop optic este definită ca fiind cea mai mică distanță dintre două puncte care pot fi observate distinct pe suprafața probei examinate. Când imaginea este mărită peste acest prag de rezoluție, nu se mai obțin informații peste acel nivel de rezoluție. Din acest motiv, **mărirea optică este limitată la max. 1000 de ori valoarea aperturii numerice a obiectivului** [24]. Există o serie de obiective speciale cu imersie în ulei, la care indicele de refracție  $n=1.51$  și pot ajunge astfel la o putere de mărire de 100X, cu o apertură numerică de 1.30, conform Tabel 22.



Factor de mărire	Obiective acromate	Obiective Plan Fuorit	Obiective apocromate
4X	0,10	0,13	0,20
10X	0,25	0,30	0,45
20X	0,40	0,50	0,75
40X	0,65	0,75	0,95
40X (ulei)	n/a	1,30	1,00
60X	0,75	0,85	0,95
60X (ulei)	n/a	n/a	1,40
100X (ulei)	1,25	1,30	1,40

Tabel 22. Apertura numerică și puterea de mărire pentru diverse obiective [24-26].



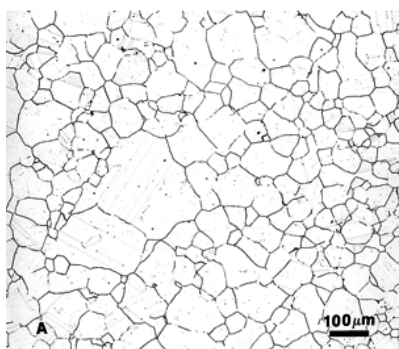
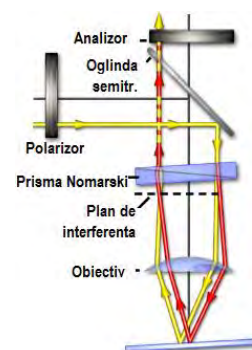
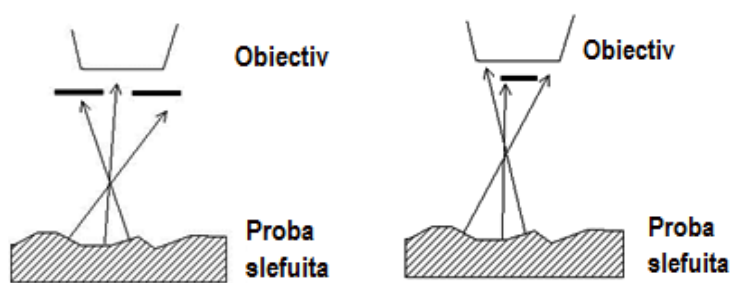
Topografia suprafeței probelor metalografice se obține prin reflexia luminii, detaliile de rezoluție înaltă fiind puse în evidență prin diferite tehnici de iluminare: în câmp luminos, în câmp întunecat, contrast de fază și contrast de interferență diferențială, Fig. 244.

Iluminarea în câmp luminos se face în plan vertical, zonele plane, netede apar luminoase, iar cele înclinate apar întunecate (ex. limitele de grăunți, deoarece razele reflectate nu intră în obiectiv).

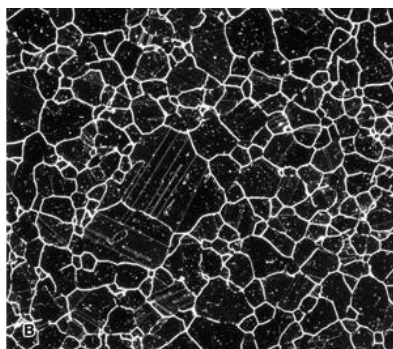
Este cazul cel mai frecvent întâlnit în analizele metalografice uzuale și este cea mai simplă tehnică de iluminare. Cu cât proba prezintă o suprafață mai lucioasă cu grad mai ridicat de reflexie a luminii incidente, cu atât se vor putea distinge detalii mai fine.

Fig. 243 Principiu de lucru în câmp luminos [24-26].

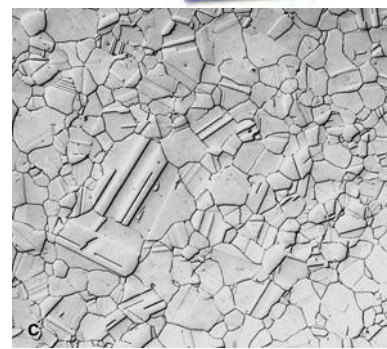
Iluminarea în câmp întunecat conduce la obținerea negativului imaginii obținute în câmp luminos. Schema de iluminare și traiectoria fasciculelor de lumină reflectate este prezentată în Figura 5 și Figura 6 (contrast foarte bun).



a) Superaliaj de Ni examinat în câmp luminos, (Bright Field Image, lb.eng).



b) Aceeași probă examinată în câmp întunecat, (Dark Field Image, lb.eng).



c) Aceeași probă examinată în contrast diferențial de interferență, DIC

Fig. 244 Tehnici de iluminare și examinare DIC [24-26].



**Iluminarea prin contrast diferențial de interferență**<sup>26</sup> (Microscopie Nomarski) îmbunătățește vizibilitatea detaliilor provenite din diferențele de nivel foarte mici, care prin iluminare în câmp luminos sunt foarte puțin vizibile sau chiar deloc. Astfel, diferențe de nivel de 20Å (0,002 μm) pot fi decelate, în timp ce în condiții de iluminare în câmp luminos, limita de decelare este de 0,5 μm [26]. O soluție utilizată în trecut pentru a evidenția diferențele de nivel pe suprafața probei a fost prin iluminare oblică, Fig. 245.

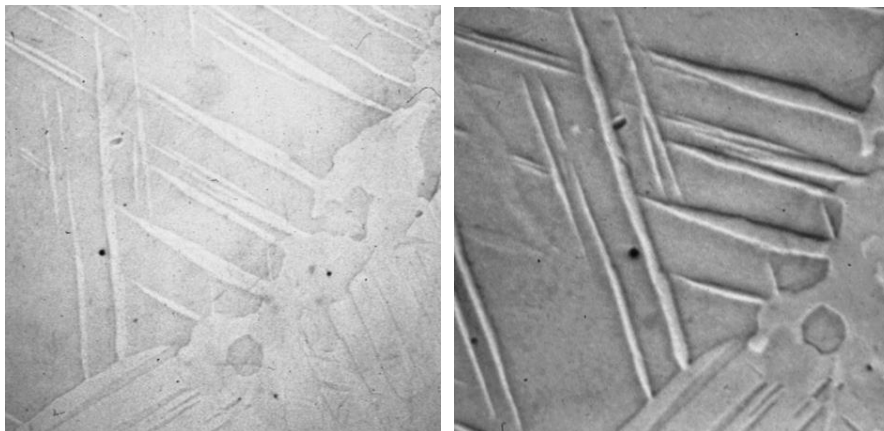


Fig. 245 Tehnica de îmbunătățire contrast prin iluminare oblică.

Iluminarea oblică conduce la o luminozitate neuniformă a câmpului luminos și afectează rezoluția imaginii în zonele umbrite. Prin urmare, microscopia Nomarski sau examinarea DIC îmbunătățește contrastul de observație a unor detalii provenite din diferențe de nivel foarte mici, creând un efect topografic 3D de adâncime, în condiții de rezoluție laterală identice.

Materialele metalice care au o matrice metalică mai moale în care se găsesc distribuite faze mai dure (carburi, boruri, nitruri, oxizi), după procesul de șlefuire, lustruire, vor prezenta diferențe de nivel, fazele dure fiind situate deasupra matricei metalice, iar cele moi sub nivelul matricei metalice (ex. grafitul).

Examinarea DIC (contrast diferențial de interferență) utilizează o lumină polarizată care traversează o prismă Nomarski sau Wollaston, unde se dedublează în două fascicule polarizate la 90° unul față de altul și care parcurg traiectorii optice ușor diferite, datorită diferențelor de nivel învecinate în zona examinată. După reflexia luminii pe probă, la recombinația celor două fascicule de lumină, se produce fenomenul de interferență, conferind un efect de profunzime 3D a imaginii, Fig. 244 (c). Astfel, se mărește contrastul dintre cele două zone de material aflate la diferențe foarte mici de nivel, variind amplitudinea sau intensitatea de variație a luminii în zonele marginale ale fazelor prezente în microstructură. Materialele metalice care au o structură cristalină diferită de cea cubică, pot fi examinate în lumină polarizată (ex. Be, Cd, Mg, Tiα, Zn, Zr) fără ca să mai fie necesar atacul chimic [26].

## ELEMENTE DE MICROSCOPIE ELECTRONICĂ

Spre deosebire de microscopia optică unde informația topografică se obține din lumina reflectată de probă, în cazul microscopiei electronice, topografia probei și alte caracteristici suplimentare se obțin cu ajutorul unui fascicol de electroni. Diferența constă în rezoluția imaginii, care în microscopia optică este limitată de lungimea de undă a luminii în spectrul vizibil (0,4-0,7 μm sau 400-700 nm), în vreme ce prin microscopie electronică rezoluția poate ajunge la 3-4 nm sau chiar mai ridicată în cazul unor microscopie speciale.

<sup>26</sup> DIC - Differential Interference Contrast (lb.eng.)

Adâncimea de profunzime a imaginii în microscopia electronică este cu mult superioară celei obținute prin microscopie optică, ceea ce permite analiza unor suprafețe de rupere, fisuri, porozitate sau alte caracteristici în relief ale probelor examinate, Fig. 246.

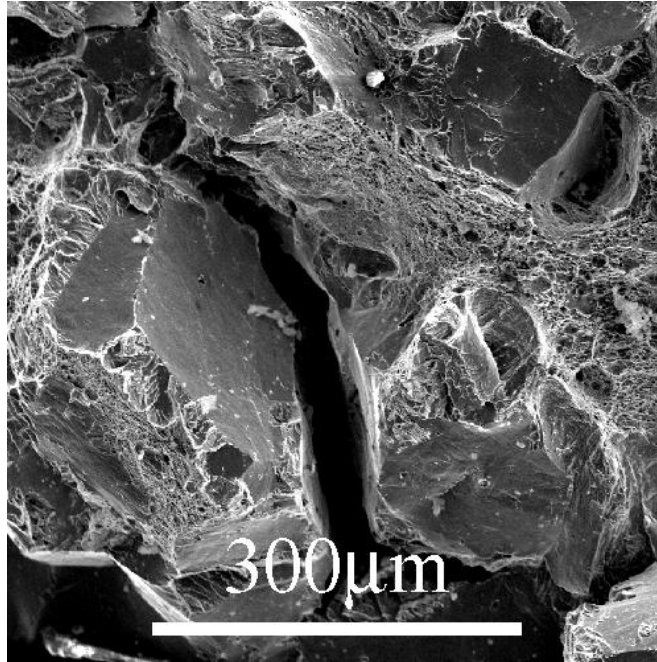


Fig.246 Fisură intercristalină a unei piese sudate survenită după tratamentul termic de detensionare. S-a produs fragilizarea limitei de grăunte austenitic, ca urmare a segregățiilor de S, P în urma ciclului termic de la sudare [27]<sup>27</sup>.



Microscopul electronic utilizează lentile electromagnetice pentru a accelera, colima sau baleia fasciculul de electroni pe suprafața probei cu ajutorul unor câmpuri magnetice. Lentilele optice de la microscopul optic sunt înlocuite cu bobine, care joacă rol de lentile electromagnetice.

În [cele mai performante microscopie electronice](#) la nivelul anului 2015, s-au atins rezoluții de 36 pm (sau 0,036 nm, respectiv 0,000036  $\mu\text{m}$  pentru a avea un termen de comparație cu microscopul optic unde rezoluția maximă este de 0,2-0,3  $\mu\text{m}$ ). Într-un astfel de microscop electronic sunt 65 lentile electromagnetice, puterea de mărire este 2 milioane X și [rezoluția maximă este echivalentă cu 1/10 din diametrul unui atom obișnuit](#).

Fig.247 Microscop electronic HITACHI [[video](#)].

<sup>27</sup> Material licensed for re-use under the [Creative Commons licence "Attribution-Non-Commercial-Share Alike 2.0 UK"](#): England & Wales, DoITPoMS Teaching and Learning Packages, Cambridge University.

## CURS 14 PRINCIPII DE SELECȚIE A MATERIALELOR

În partea finală a cursului de ingineria materialelor sunt prezentate o serie de principii de bază care stau la baza selecției materialelor pentru o aplicație dată. S-a văzut deja din studiile de caz prezentate pe parcursul cursului și din noțiunile teoretice introduse, că materialele utilizate în aplicațiile ingineresti sunt extrem de diverse, cu proprietăți fizice, chimice, mecanice, tehnologice care sunt esențiale pentru a asigura aspectele funcționale, de performanță și calitate pentru mașinile, instalațiile sau construcțiile din diverse sectoare industriale.

În prezent, numărul de materiale disponibile pentru aplicații ingineresti este estimat între 40.000 și 80.000 [29]. Este evident că selecția unui material pentru o anumită componentă dintr-un subansamblu, este matematic vorbind o problemă cu foarte multe variabile. Se poate merge pe o soluție anterioară, conservatoare, însă această abordare scoate din ecuație inovația, creșterea potențială a performanței, selecția pe baza unor criterii de optimizare, de reducere a costurilor de fabricație, de creștere a nivelului de siguranță în exploatare, reducerea costurilor cu mentenanța, reducerea emisiilor de carbon și desigur că mai sunt și multe alte oportunități care sunt pierdute printr-o astfel de opțiune. Nu în ultimul rând, anual apar noi materiale, cu proprietăți îmbunătățite, evoluție ce se produce cu viteză tot mai mare, pe piață apărând tot mai multe astfel de materiale. Soluția clasică de selecție este deja depășită de aceste realități tehnice.

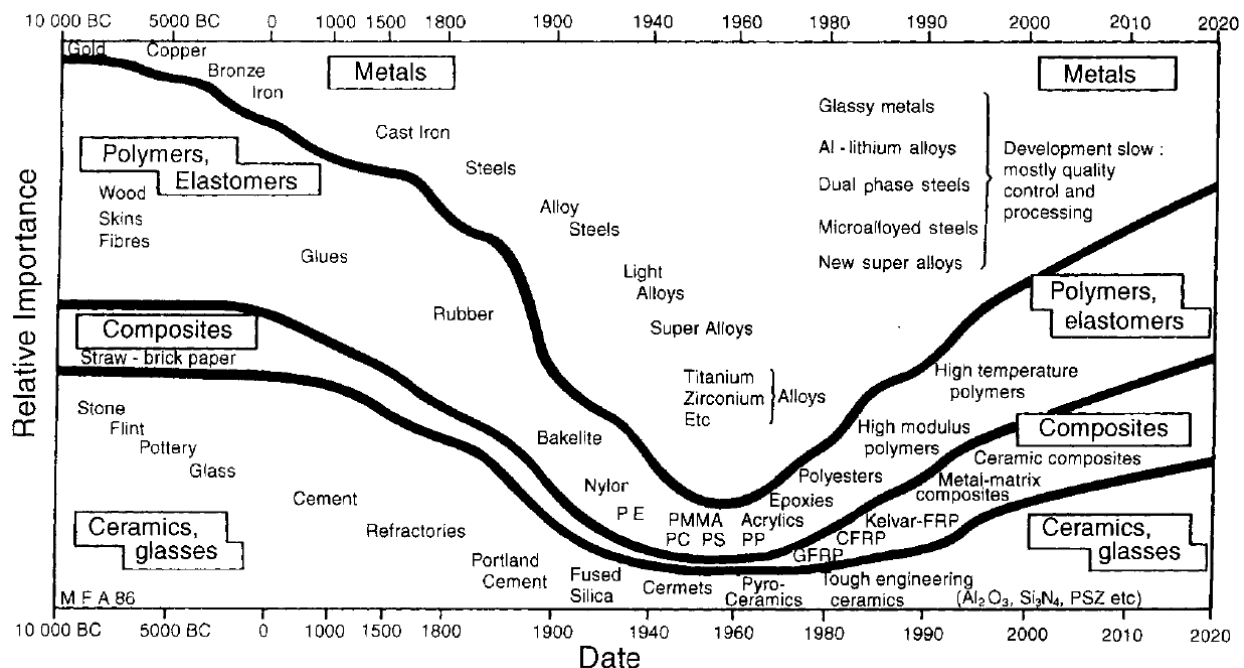


Fig. 248 Evoluția istorică a unor materiale ingineresti [29].

În Fig. 248 este prezentat grafic și sintetic principalele repere temporale privind elaborarea și utilizarea unor materiale care au contribuit esențial la dezvoltarea modernă a societății. Scara timpului nu este liniară și se poate observa cu ușurință apariția numeroasă de noi materiale performante, în partea a doua a sec. XX.

Performanțele superioare de elaborare a unor materiale cu puritate ridicată, cum este Si, Ge a permis apariția materialelor semiconductoare care au condus la dezvoltarea tehnologiilor informaționale, a epocii digitale. Sticla de înaltă puritate a permis obținerea fibrelor optice, dezvoltarea internetului, creșterea puterii de calcul, apariția roboților industriali care au revoluționat alte domenii industriale.



Dezvoltarea unor sectoare sau industrii a condus la o cerere foarte mare pentru noi materiale cu performanțe îmbunătățite, de exemplu industria energetică nucleară a stimulat elaborarea unor aliaje noi cu baza Zr, industria spațială și aeronautică au determinat dezvoltarea materialelor compozite ultraușoare, turbinele și turboreactoarele avioanelor au stimulat dezvoltarea de superaliaje și materiale ceramice.

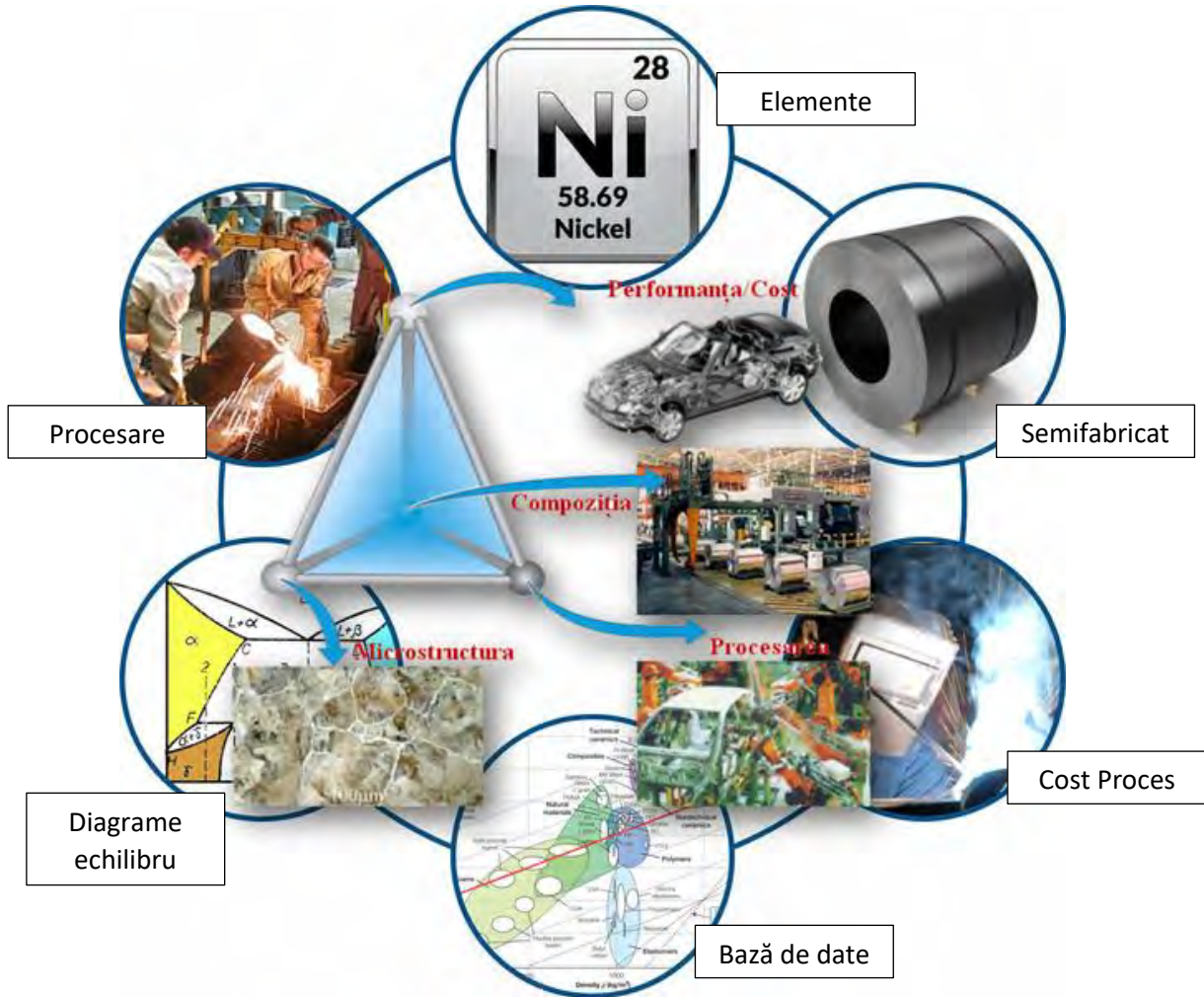


Fig. 249 Principii de selecție a materialelor pentru aplicații ingineresti. Corelații informații profil material.

Alegerea unui material nu se poate face independent de tehnologia de procesare prin care materialul este obținut, proprietățile sale sunt puternic dependente de tehnologia de procesare. Costurile de material sunt de asemenea puternic dependente de aceste tehnologii, dar și de compoziția materialelor considerate.

Selecția materialului pentru o aplicație este întotdeauna o problemă de optimizare. Se consideră gama de proprietăți pe care le posedă, ele pot fi conectate cu forma și dimensiunile semifabricatelor alese și aproape întotdeauna performanța materialului ales nu depinde doar de o singură proprietate, ci de o combinație de proprietăți, ca de ex: raportul dintre rezistență și greutate ( $\sigma/\rho$ ), sau dintre rigiditate și greutate ( $E/\rho$ ) sau alte combinații dintre proprietăți fizice, mecanice, dimensiuni, temperatură etc.

Bazele de date de materiale conțin astfel de informații, inclusiv cele legate de cost de procesare, emisiile de CO<sub>2</sub> raportat la masa de 1 kg material, toată gama de proprietăți și constante fizice ale materialelor utilizate.

Practic, fiecare material prezintă un profil complex, definit de aceste dimensiuni și informații înregistrate în baze de date foarte mari. Modul cum sunt utilizate aceste informații în procesul de selecție al materialelor, este adevărata putere informațională prin care se interoghează baza de date, pentru a îndeplini o funcție obiectiv, ținând seama de anumite limitări, condiții de încărcare, temperatură, mediu, comportare la coroziune, la oboseală, la fluaj, forme semifabricat, etc. care sunt specifice aplicației analizate.

Softul de selecție materiale CES EduPack [31] permite construcția grafică a unor hărți de selecție în funcție de diverse coordonate (proprietăți), în care se pot introduce filtre de selecție specifice: clase de material, diverse limitări (guide lines) care filtrează înregistrările din baza de date conform unor criterii exprimate matematic. În acest fel, din volumul imens de date sunt afișate grafic doar înregistrările care satisfac toate condițiile selectate [video].

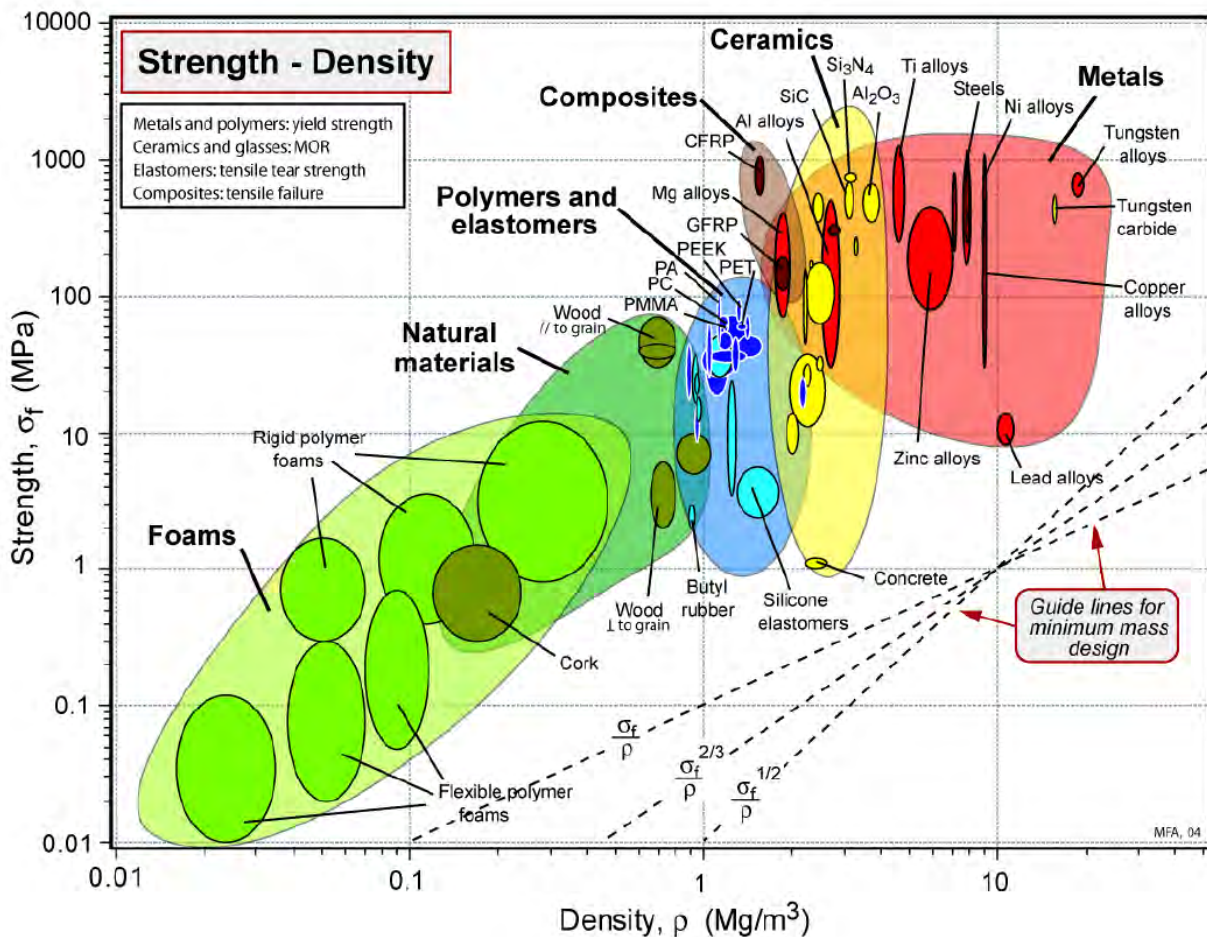


Fig. 250 Hărți de selecție în coordonate rezistență la tracțiune (MPa) vs. densitate (mii kg/m<sup>3</sup>) [29].

Hărțile de selecție în coordonate rezistență la tracțiune ( $\sigma_f$ ) vs. densitate ( $\rho$ ) sunt utile la proiectarea structurilor rezistente ușoare (automotive, transporturi, aeronautică etc.). Limitările (guide lines) prezentate pe diagramă (Fig. 250) ne delimitează materialele care satisfac condiții de masă minimă și rezistență la tracțiune pentru următoarele tipuri de semifabricate:

- $\sigma_f / \rho = C$       tije, conectori metalici, discuri rotative;
- $\sigma_f^{2/3} / \rho = C$       grinzi metalice, arbori, axe;
- $\sigma_f^{1/2} / \rho = C$       table laminate, plafoane, tablriere;

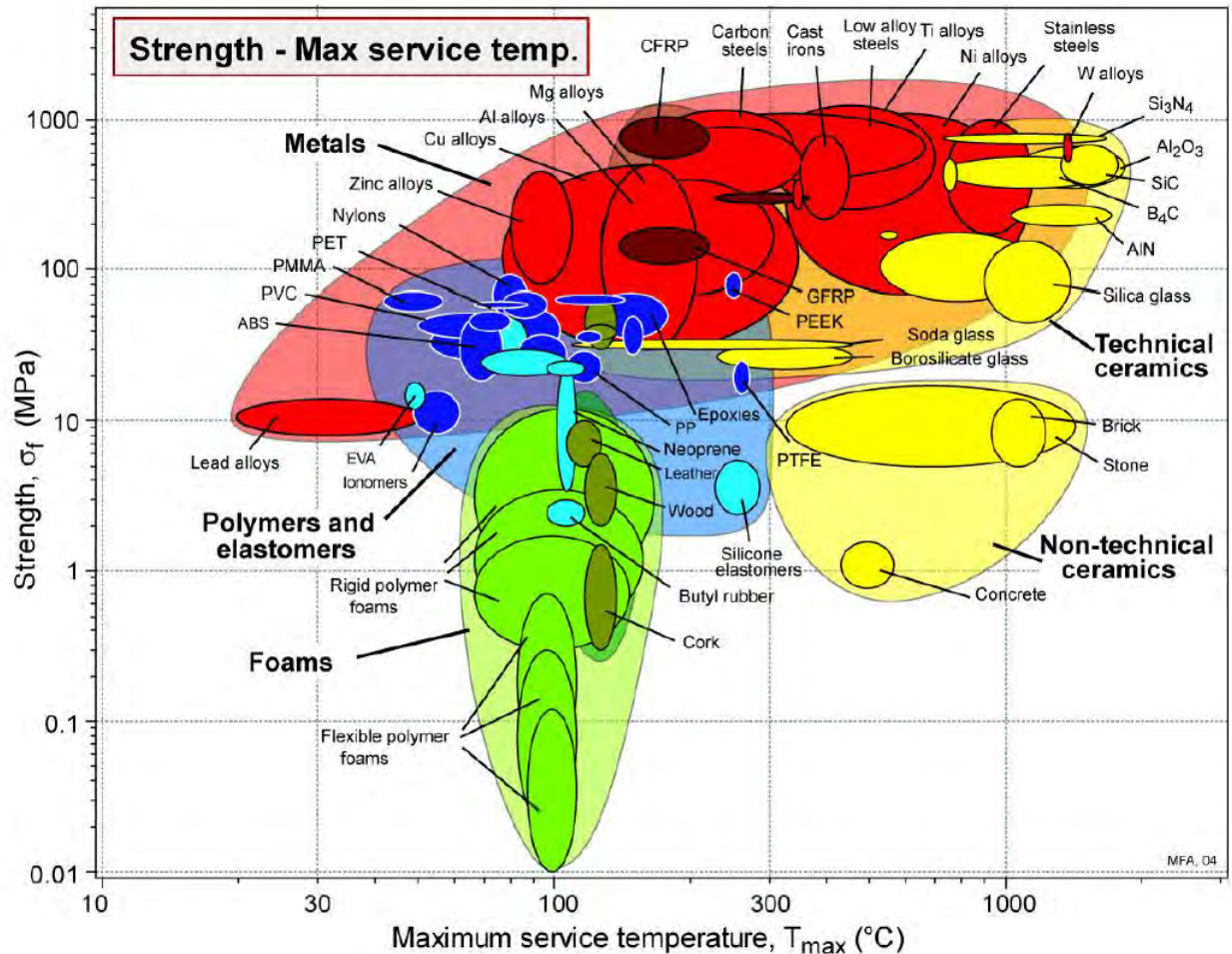


Fig. 251 Hărți de selecție în coordonate rezistență la tracțiune (MPa) vs temperatura de serviciu [31].

Temperatura este o variabilă importantă care afectează caracteristicile de material și modul cum se comportă acestea în exploatare. Pe măsură ce crește, afectează rezistența la fluaj a materialului și limitează sarcinile pe care de exemplu o instalație sub presiune le poate prelua (industria energetică). Creșterea temperaturii poate induce fenomene precum segregarea impurităților pe limita de grăunte cristalin, poate determina formarea unor compuși intermetalici, fenomene de deformare la fluaj, apariția de microcavități pe limite de grăunți, reducerea rezistenței mecanice, a rezistenței la coroziune etc.

Temperatura la care apar astfel de fenomene nedorite se numește **temperatura maximă de serviciu**. Aceasta este specifică fiecărui material în parte și constituie o limitare importantă în procesul de selecție al materialelor. Din diagrama prezentată în Fig. 251, se poate observa că rezistența polimerilor scade puternic la temperaturi peste 200°C, marea majoritate a metalelor devin moi, ușor deformabile peste 800°C și doar materialele ceramice oferă rezistență mecanică peste 1500°C.

Fiecare componentă dintr-un subansamblu mecanic îndeplinește una sau mai multe funcții, preia sarcini, presiuni de lucru, reduce vibrațiile, transferă căldură etc. Prin urmare, în proiectarea componentei respective se asumă un obiectiv: să fie ușoară, rezistentă (poate simultan cele două proprietăți), să fie ieftină, rigidă sau elastică, să funcționeze între anumite limite de temperatură, într-un mediu oxidant sau unul în care trebuie să aibă o bună comportare la coroziune, etc.



Hărțile de selecție sunt instrumente foarte utile în procesul de selecție al materialelor și oferă o perspectivă detaliată a unor proprietăți de material pentru diferite clase de materiale. Prin selectarea axelor de reprezentare se pot obține informații utile în diverse scenarii de funcții obiectiv:

- $E / \rho$  viteza de propagare a undelor longitudinale într-un material;
- $E^{1/2} / \rho$  rigiditate grinzi cu greutate redusă;
- $K_{IC} / E$  energia de rupere;
- $K_{IC}^{1/2} / \sigma_f$  materiale pentru instalații sub presiune;
- $\lambda / \alpha$  conductivitate termică vs. coef. dilatare liniară, descrie căldura specifică  $C_p$ ;
- $\alpha / E$  rezistența la șoc termic.

Cu ajutorul softului CES EduPack de la Ansys Granta [31] se pot realiza o serie de analize avansate privind selecția materialelor care îndeplinesc anumite caracteristici funcționale, dar și o serie de condiții, limitări care sunt specifice aplicației analizate. Se mai pot face cu ajutorul CES EduPack:

- Vizualizarea proprietăților de materiale;
- Navigarea prin baza de date în mod interactiv;
- Conține suport teoretic pentru diverse noțiuni de ingineria materialelor;
- Conține metodologia de selecție a materialelor propusă de Asby [29];
- Conține baza de date cu materiale ingineresti (peste 4.000 de materiale);
- Conține baze de date ce permit selecția de materiale pe principii Eco-design;
- Se pot integra criterii economice, de costuri, informații despre tehnologii de procesare, sudabilitate.

În prezent, softul CES EduPack de la Ansys Granta este utilizat în peste 1.000 de universități, colegii la nivel mondial, fiind un instrument foarte util în activitatea de proiectare în aplicații ingineresti [31].

#### Studiu de caz: Selecția optimă de materiale pentru recipiente sub presiune (industria energetică)

Recipientele sub presiune, de la instalații mici la boilere industriale, în prezent sunt proiectate să satisfacă criteriile de siguranță în exploatare. Mai precis, pentru condiții de siguranță, recipientele sub presiune ar trebui să prezinte scăpări (de fluide), înainte de a ceda prin explozie.

Revoluția industrială din partea a doua a secolului XIX era alimentată de puterea aburului. Boilerele și vasele sub presiune erau instalații esențiale care susțineau industria la momentul respectiv. Acestea necesitau o atenție și o mentenanță continuă datorită calității inferioare a oțelurilor folosite în acea perioadă, dar și datorită tehnologiilor de îmbinare, care erau încă într-o etapă inițială de dezvoltare. Tehnologiile de sudare au apărut mai târziu, având și ele provocări legate de calitatea materialelor folosite, fenomene de fisurare, conținut ridicat de incluziuni, microstructură grosolană, aspecte care s-au înțeles și s-au corectat ulterior pe parcursul a mai multor decenii de cercetare și dezvoltare tehnologică.

Deși în partea doua a secolului XIX s-au înregistrat multe incidente și explozii de boilere, încă nu existau coduri și proceduri tehnice care să reglementeze fabricația acestor instalații foarte periculoase. Unul dintre cele mai importante incidente care au condus la schimbarea reglementărilor în domeniu, a fost explozia unui boiler de la o fabrică de pantofi din [Brockton, Massachusetts pe data de 20 Martie 1905](#). În acest incident, explozia boilerului a ucis 58 de persoane și a rănit alte 150, clădirea cu patru etaje s-a prăbușit și a prins sub dărâmături alți muncitori care au murit în incendiul ce a urmat exploziei.



a) R.B. Grover Shoe înainte de explozie



b) R.B. Grover Shoe după explozia boilerului

Fig. 252 Explozia unui boiler în anul 1905 la o fabrică de pantofi din [Brocktown, Massachusetts](#).

Explozia boilerului cu diametrul de 1.8 m și lungime de 5.2 m l-a propulsat pe o distanță de câteva sute de metri, aterizând în final pe o casă, a împrăștiat cărbuni aprinși pe o rază largă provocând incendii printre resturile construcțiilor de lemn din zonă.

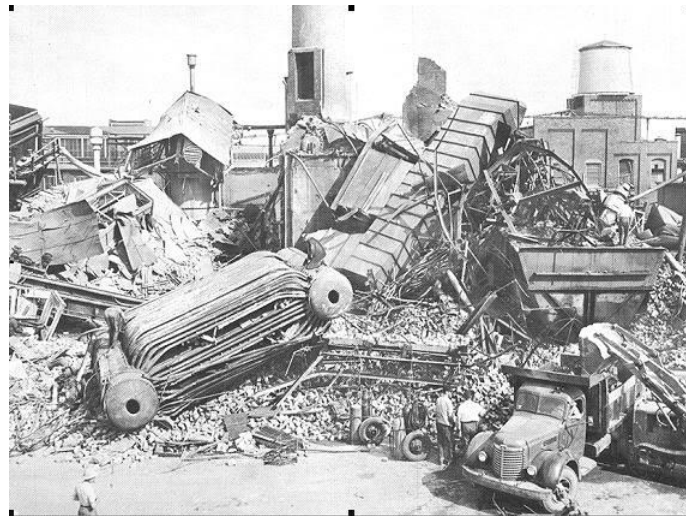


Fig. 253 Resturi de materiale, construcții și instalații după explozia boilerului din [Brocktown, Massachusetts](#)

În cazul boilerelor de mari dimensiuni, designul acestora se face a.î. microfisurile instabile din material să se propage pe distanțe mai mari decât grosimea pereților boilerului, producând scăpări care dacă sunt detectate la timp, previn explozia boilerului<sup>28</sup>.

Regulile de proiectare pentru siguranța boilerelor de mici dimensiuni este ca acestea să se deformeze înainte de a ceda, iar pentru boilerelor de mari dimensiuni este ca acestea să prezinte scăpări de fluid, înainte de a ceda prin explozie.

Efortul unitar de întindere  $\sigma$  într-un recipient sub presiune de rază  $R$  și cu grosimea pereților  $t$  este :

$$\sigma = \frac{p \cdot R}{2t} \quad (1)$$

<sup>28</sup> leak before break – lb. eng.

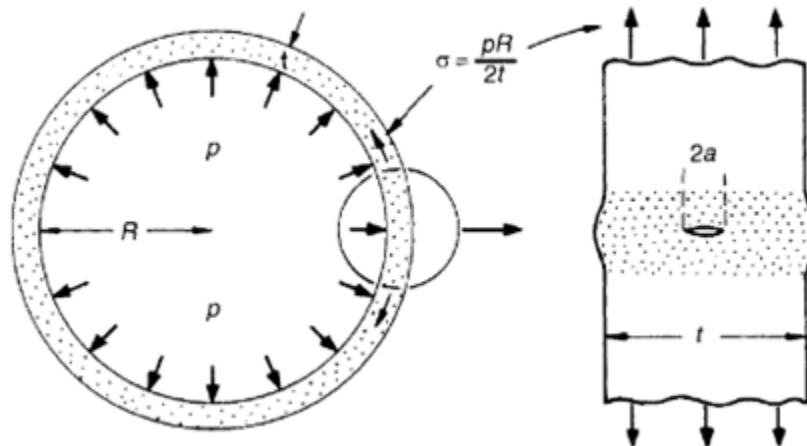


Fig. 254 Model de calcul pentru prevenirea exploziei boilerelor sub presiune [31].

Criteriul de siguranță pentru proiectarea boilerului este ca la presiunea de lucru  $p$ , tensiunea efectivă  $\sigma$  să fie mai mică decât limita de curgere a materialului  $\sigma_f$  (MPa). Constrângerile pentru selecția de material sunt:

- îndeplinirea criteriilor de siguranță;
- recipientul trebuie să prezinte scăpări înainte de a ceda;
- masă minimă, pentru a reduce greutatea boilerului și costurile de material/fabricație.

Propagarea în peretele boilerului a unei fisuri cu dimensiunea  $2a$ , (Fig. 254) se va face dacă efortul unitar de întindere  $\sigma$  (datorită presiunii din boiler) depășește valoarea calculată cu relația de mai jos, unde  $C$  este o constantă de material:

$$\sigma = \frac{CK_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} \quad (2)$$

Condițiile de siguranță sunt respectate dacă efortul unitar din material  $\sigma$  este mai mic decât această valoare, dar pentru un nivel superior de siguranță, fisura nu ar trebui să se propage în material chiar dacă efortul efectiv  $\sigma$  atinge limita de curgere a materialului. În această situație, pereții boilerului s-ar deforma vizibil și ar exista timpul necesar pentru intervenție, respectiv pentru reducerea presiunii din boiler, prevenind astfel explozia acestuia. Matematic, această condiție de siguranță suplimentară se face prin înlocuirea lui  $\sigma$  cu  $\sigma_f$  relația (2) devenind:

$$\pi a = C^2 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_f} \right)^2 \quad (3)$$

Prin urmare, din baza de date CES Edupack ar trebui selectat un material pentru care  $M_I$  este maxim.

$$M_1 = \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_f} \right) \quad (4)$$

Recipientii sub presiune de dimensiuni mari sunt greu de verificat cu raze X sau ultrasonic, iar testarea etanșității acestora poate fi dificil de aplicat. Fisurile se pot devolta lent în material datorită fenomenelor de oboseală termică/mecanică, încărcărilor ciclice sau fenomenelor de coroziune și fluaj.



În acest caz, criteriile de siguranță pentru recipientele sub presiune de dimensiuni mari, prevăd ca fisurile produse în pereții boilerului să fie stabile (să nu se propage rapid în material, a.î. scăpările de fluid să devină vizibile și să poată fi detectate la timp. Matematic, această condiție se exprimă prin relația (5), unde efortul unitar  $\sigma$  trebuie să fie întotdeauna mai mic sau cel mult egal cu valoarea din expresie:

$$\sigma = \frac{CK_{Ic}}{\sqrt{\pi \cdot t/2}} \quad (5)$$

Grosimea  $t$  a peretului boilerului a fost aleasă a.î. la presiunea de serviciu maximă  $p$  să nu se producă curgerea materialului. Din relația (1), prin înlocuirea lui  $\sigma$  cu  $\sigma_f$  și a lui  $a$  cu  $t$ , se obține condiția (6):

$$t \geq \frac{p \cdot R}{2\sigma_f} \quad (6)$$

Înlocuind valoarea lui  $t$  din relația (6) în relația (5), se obține funcția obiectiv de selecție (7):

$$C^2 \frac{\pi \cdot p \cdot R}{4} = \left( \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_f} \right) \quad (7)$$

Prin urmare, condițiile de siguranță sunt îndeplinite pentru materialele pentru care raportul  $M_2$  este maxim:

$$M_2 = \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_f} \quad (8)$$

În același timp, se pot elimina din materialele candidate cele cu valori mici  $\sigma_f$ , deoarece maximizarea limitei de curgere  $\sigma_f$  va conduce la reduceri de grosimi de material pentru aceleași valori ale presiunii de serviciu  $p$ , boilerelor fiind mai ușoare. Prin urmare, ce-a de-a treia limitare de selecție a materialelor este  $M_3$ :

$$M_3 = \sigma_f \text{ (valori maximale)} \quad (9)$$

Criteriile de selecție  $M_1$ ,  $M_2$  și  $M_3$  sunt prezentate în harta de selecție din Fig. 255 în coordonate  $K_{Ic}$  și  $\sigma_f$

Aceste condiții sau limitări apar sub formă de linii cu panta 1,  $\frac{1}{2}$  și linii verticale. Dacă considerăm criteriul “yield before break”, adică scăpări de fluid înainte de cedare, o linie înclinată cu panta  $M_1 = \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_f} \right) = C$ , indică materiale de performanță egală în baza acestui criteriu. Toate materialele aflate deasupra acestei linii de referință, corespund acestui criteriu și sunt superioare din această privință.

În mod similar, criteriul  $M_3$  care maximizează limita de curgere a materialului (limita inferioară 100 MPa), reduce considerabil numărul de materiale care satisfac această condiție. Zona de materiale care satisface simultan cele trei condiții  $M_1$ ,  $M_2$  și  $M_3$  este reprezentată de un triunghi colorat cu roșu, conform Fig. 255.

Din exemplul prezentat reiasă modul de utilizare a datelor din baza de date a programului CES Edupack, în mod similar se pot construi funcții obiectiv pentru alte tipuri de aplicații, cu încărcări specifice sau alte condiții de exploatare: temperatură, mediu, vibrații etc.

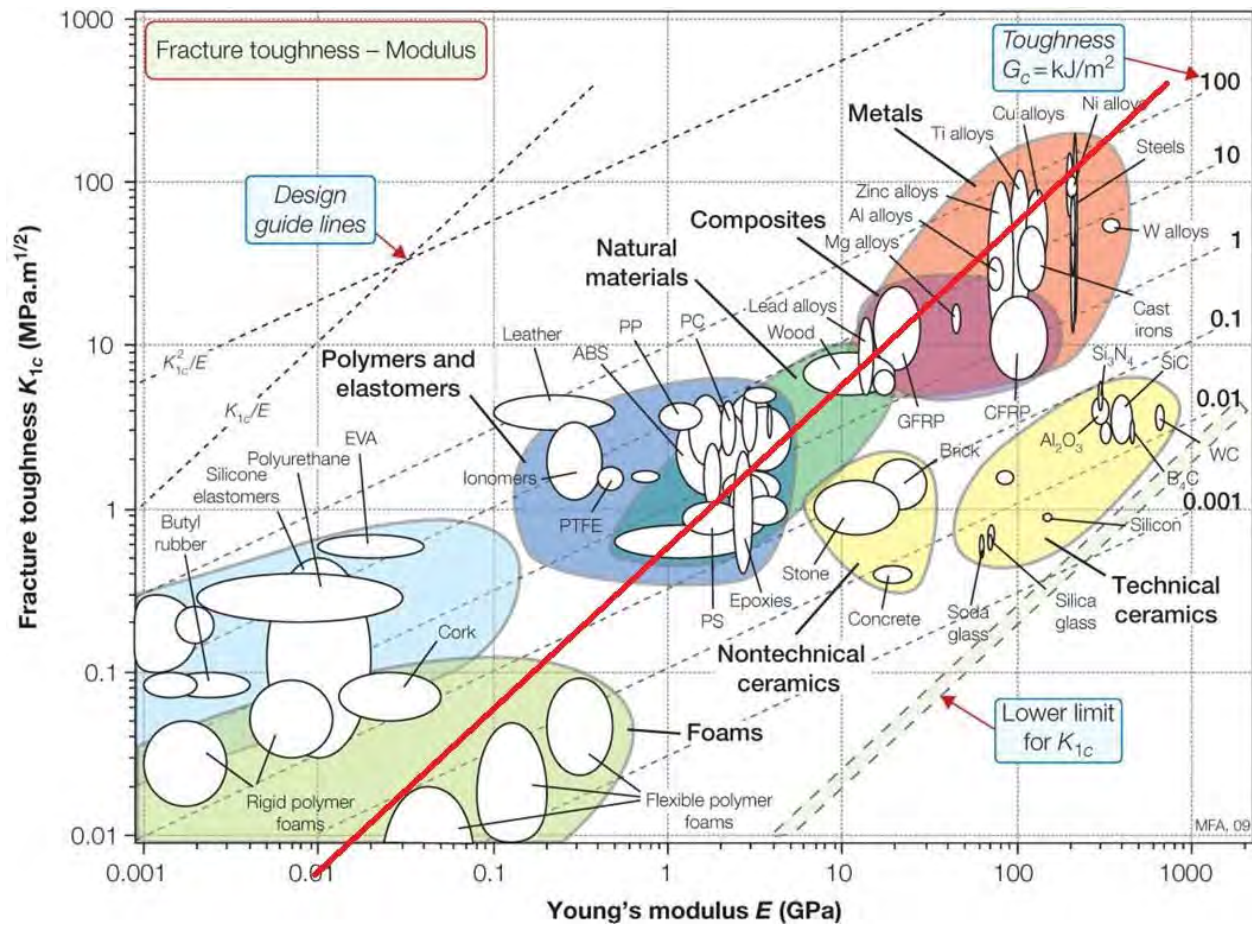
Astfel, se pot selecționa materiale care răspund la o serie de condiții specifice, optimizând procesul de selecție pe diferite criterii, inclusiv cele de natură economică, legate de costuri sau elemente de fabricație, disponibilitate semifabricate, furnizori, etc.



## Exercises With Worked Solutions

Professor Mike Ashby

Department of Engineering  
University of Cambridge



[Redesigned Airplane Tray Tables \(exemplu de proiect selecție material măsură pasager în avion\).](#)



# MINI ATLAS METALOGRAFIC

FONTE

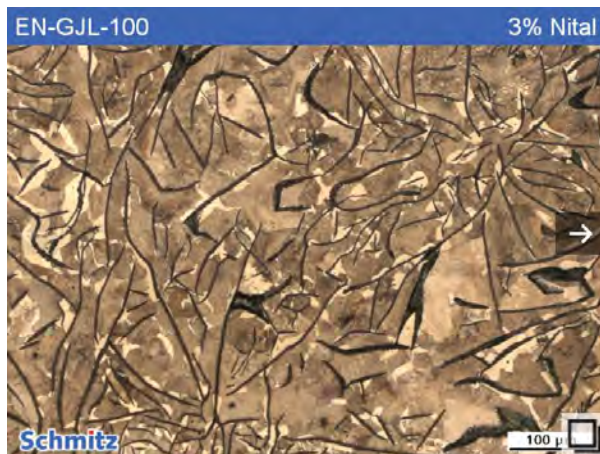
[[album complet](#)]



## EN-GJL-300 | 5.1302

<b>Numeric designation</b>	5.1302
<b>Chemical designation</b>	EN-GJL-300
<b>State</b>	phosphide eutectic (steadite)
<b>Etching</b>	3 % Nital

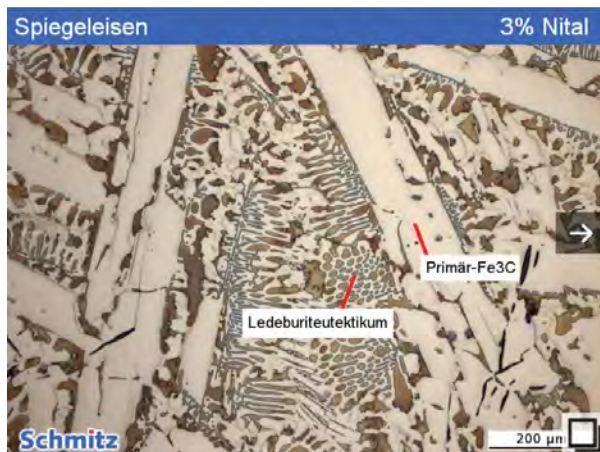
Pearlitic cast iron with lamellar graphite. The micrographs show a spot with phosphide eutectic (steadite) in usual formation during slow solidification. The very hard steaditic phase solidifies at 952 °C and is therefore arranged interdendritically. A network-like phosphide arrangement is undesirable (except for wear-resistant cast iron).



## EN-GJL-100 | 5.1100

<b>Numeric designation</b>	5.1100
<b>Chemical designation</b>	EN-GJL-100
<b>Etching</b>	3 % Nital

Lowest possible (standardized) strength grade of cast iron with lamellar graphite. Predominantly pearlitic matrix with lamellar graphite. Measured tensile strength is 110 MPa. There is no measurable elongation at fracture. The purely pearlitic matrix is rather unusual for a GJL-100 and would tend to indicate a higher strength class. However, the tensile specimen form was not carried out according to DIN 1561, since our client assumed a nodular graphite cast iron.

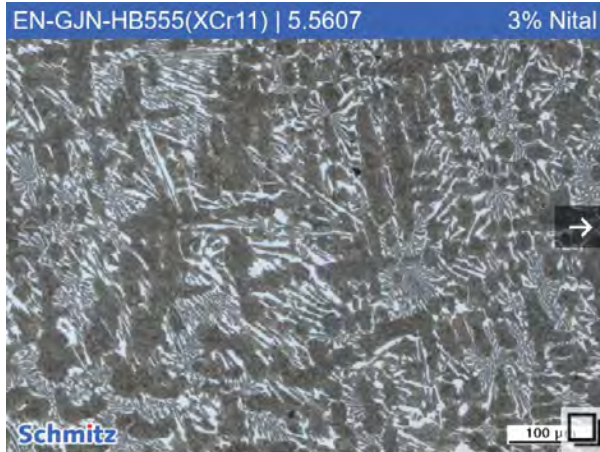


## Spiegel iron | white cast iron

<b>Chemical designation</b>	Spiegeleisen
<b>Etching</b>	3 % Nital

The microstructure consists of primary cementite in ledeburite eutectic. The microhardness of Fe<sub>3</sub>C is 1200 HV0.2.

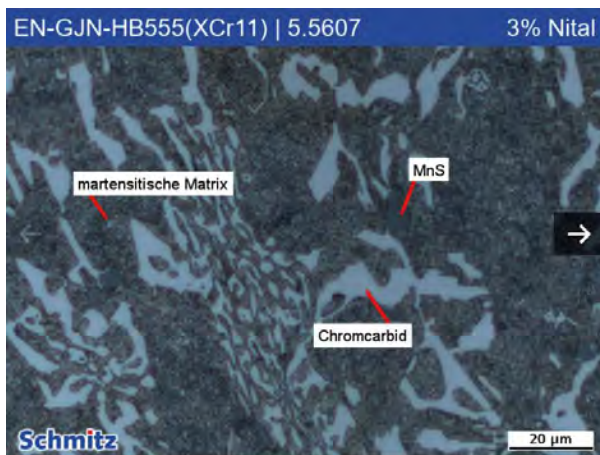




## EN-GJN-HB555(XCr11) | 5.5607 Wear-resistant white cast iron

<b>Numeric designation</b>	5.5607
<b>Chemical designation</b>	ehem. EN-GJN-HV600(XCr11)   EN-JN3019
<b>State</b>	Wear-resistant white cast iron gem. DIN EN 12 513
<b>Etching</b>	3 % Nital

This cast iron with tendency to chilling contains 10-13% chromium. The hardness is 66 HRC. The microstructure consists of a martensitic matrix with finely dispersed chromium carbide precipitations and (primary) interdendritic chromium carbide precipitations. This is used, among other things, to produce grinding balls for ball mills.



## EN-GJN-HB555(XCr18) | 5.5609 Wear resistant white cast iron

<b>Numeric designation</b>	5.5609
<b>Chemical designation</b>	ehem. EN-GJN-HV600(XCr18)   EN-JN3039
<b>State</b>	Verschleißbeständiges weißes Gusseisen gem. DIN EN 12 513
<b>Etching</b>	3 % Nital

This cast iron with tendency to chilling contains 18-23% chromium, which gives it its high minimum hardness of 600 HV. The hardness here is 60 HRC. The microstructure consists of a martensitic matrix with interdendritic chromium carbide precipitations. This is used, among other things, to produce grinding balls for ball mills.

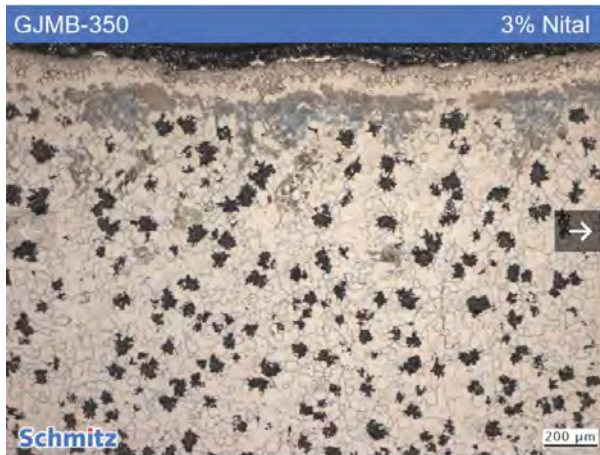


## Gaphite corrosion (spongiosis) lamellar gray cast iron

<b>Chemical designation</b>	GJL
<b>State</b>	spongiosis
<b>Etching</b>	3 % Nital

Spongiosis (spongy dissolution) is a form of selective corrosion of cast iron in which the corrosive attack progresses along graphite-matrix interfaces and dissolves the iron matrix. In the case of long graphite lamellae, as in this pearlitic lamellar gray cast iron, deep penetration of the corrosion is thus possible. The graphite is retained and holds the corrosion product together. The original shape of the casting is retained, but the black "iron sponge" (mainly FeOOH) no longer has strength.

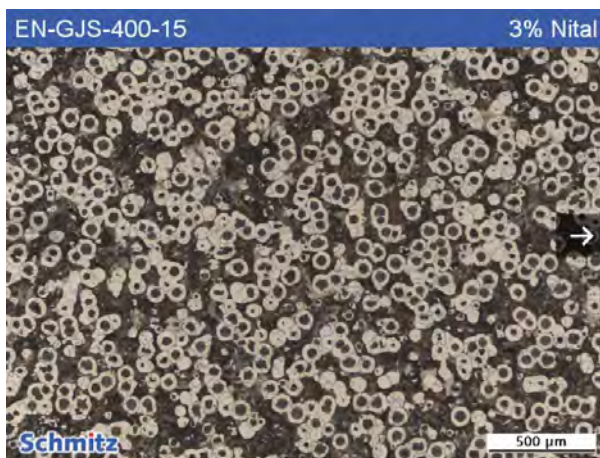




## EN-GJMB-350 | 5.4101 Ferritic black heart malleable cast iron

<b>Numeric designation</b>	5.4101
<b>Chemical designation</b>	EN-GJMB-350
<b>State</b>	Ferritic black heart malleable cast iron
<b>Etching</b>	3 % Nital

Malleable cast iron initially solidifies without graphite as a hard, brittle white cast iron. Long annealing subsequently transforms the microstructure and causes the cementite to decompose, in the case of black heart malleable cast iron into ferrite and flake- or nodule-shaped graphite. This graphite form has a lower notch effect than lamellar graphite, which makes the malleable cast iron tougher than normal cast iron with lamellar graphite. The matrix of black heart malleable cast iron is predominantly ferritic due to slow cooling between 700 and 800 °C.



## EN-GJS-400-15 | 5.3106 Nodular graphite cast iron

<b>Numeric designation</b>	5.3106
<b>Chemical designation</b>	EN-GJS-400-15
<b>Etching</b>	3 % Nital

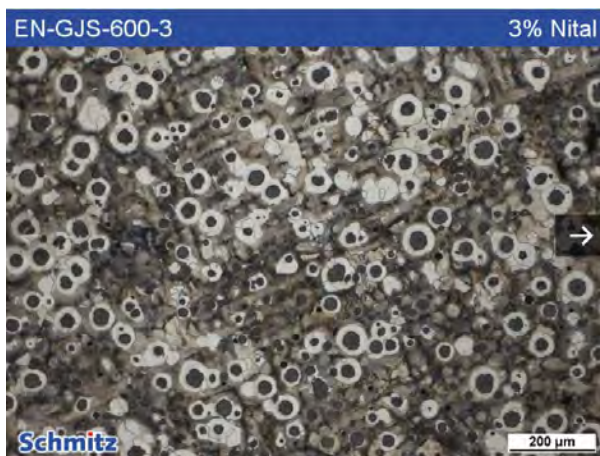
Nodular graphite cast iron with a ferrite/pearlite content of 50:50.

Determined mechanical properties in tensile test:

Rp0.2: 325 MPa

Rm: 480 MPa

A: 16.5%



## EN-GJS-600-3 | 5.3201 Cast iron with nodular graphite

<b>Numeric designation</b>	5.3201
<b>Chemical designation</b>	EN-GJS-600-3
<b>Etching</b>	3 % Nital

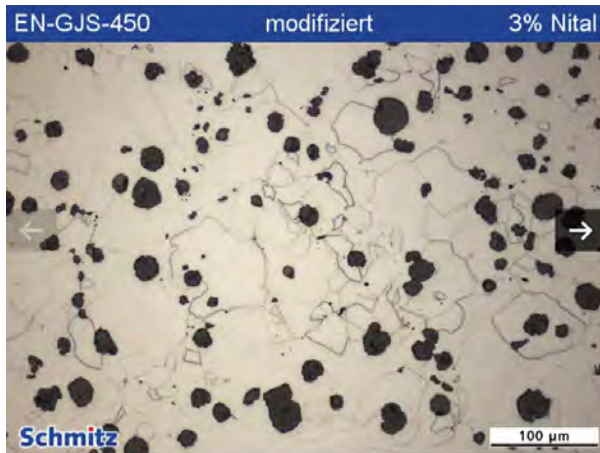
Cast iron with nodular graphite in predominantly pearlitic matrix. The graphite pebbles are surrounded by ferritic halos.

Determined mechanical properties in tensile test:

Rm: 615 MPa

A: 8.7%.

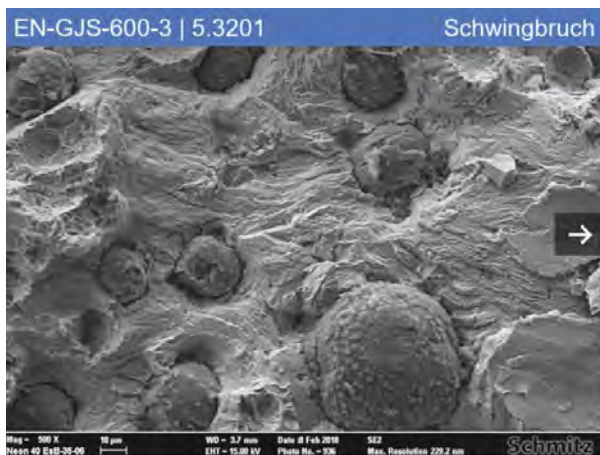




## EN-GJS-450 | 5.3107 modified nodular graphite cast iron

<b>Numeric designation</b>	5.3107
<b>Chemical designation</b>	EN-GJS-450
<b>State</b>	modified nodular graphite cast iron
<b>Etching</b>	3 % Nital

The micrographs show a GJS with a purely ferritic matrix. It was modified to 17 % elongation at fracture (instead of the usual A = 10%).



## EN-GJS-600-3 | 5.3201 Vibration fracture and ductile fracture

<b>Numeric designation</b>	5.3201 Schwingbruch und Wabenbruch
<b>Chemical designation</b>	EN-GJS-600-3
<b>State</b>	Vibration fracture and ductile fracture

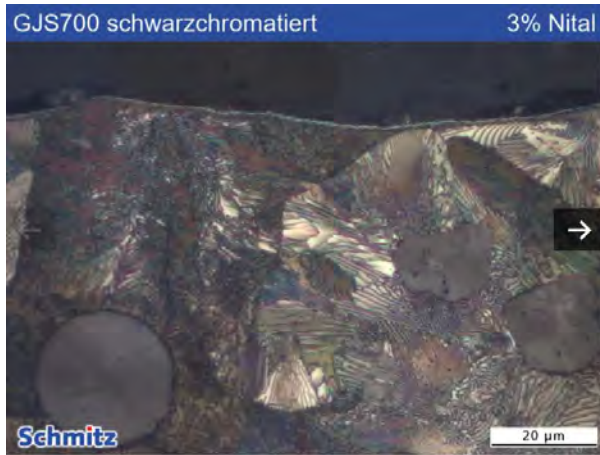
In pearlitic cast iron grades, fatigue striations are only very rarely detectable, because the fine cementite lamellae of the pearlite determine the fracture pattern. The nodular graphite cast iron here has a pearlitic matrix, but ferrite seams around the graphite spheres, in which fatigue striation can be seen. The ductile residual violent fracture is clearly different from this.



## EN-GJS-600-3 | 5.3201 with tendency to chilling

<b>Numeric designation</b>	5.3201
<b>Chemical designation</b>	EN-GJS-600-3
<b>State</b>	Tendency to chilling
<b>Etching</b>	3 % Nital

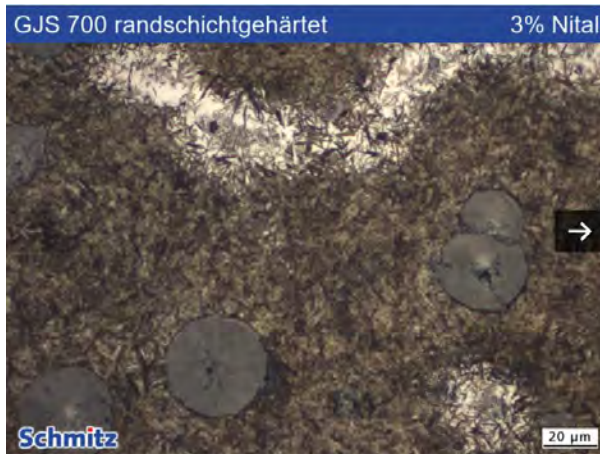
EN-GJS-600-3 is a nodular graphite cast iron with a tensile strength of at least 600 MPa and 3% elongation at break. The typical microstructure consists of a pearlitic matrix with ferrite halos around the graphite pebbles. Here, the carbon is only partially solidified in the form of graphite pebbles (stable), with cementite (Fe<sub>3</sub>C, metastable) found in between instead. There, residual melt has initially solidified in the form of the so-called ledeburite eutectic (austenite and cementite); during further cooling, the austenite has then transformed into pearlite. The tendency to chilling can basically be triggered by too rapid cooling and/or, for example, a too low silicon content. It has a strong embrittling effect and is therefore normally undesirable unless it is specifically adjusted for particularly high hardness and wear resistance at surfaces (chill casting).



## EN-GJS-700-2 | 5.3300 Black chromate coating

<b>Numeric designation</b>	5.3300
<b>Chemical designation</b>	EN-GJS-700-2
<b>State</b>	Black chromate coating
<b>Etching</b>	3 % Nital

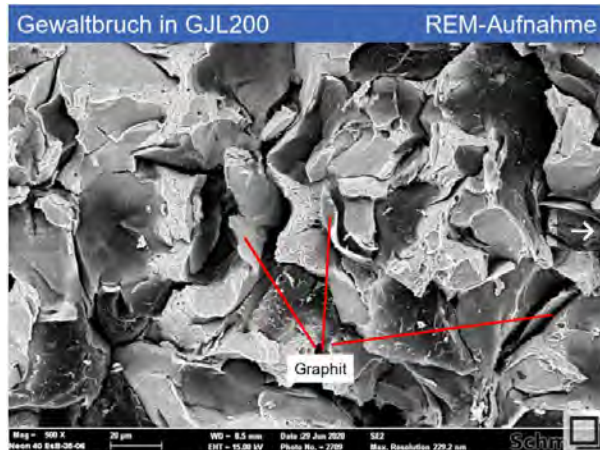
Chromium coatings on metals are formed by treatment with chromic acid and are applied as corrosion protection. The color depends on the thickness (here approx. 1 µm).



## EN-GJS-700-2 | 5.3300 surface hardened with residual austenite

<b>Numeric designation</b>	5.3300
<b>Chemical designation</b>	EN-GJS-700-2
<b>State</b>	surface hardened with residual austenite
<b>Etching</b>	3 % Nital

Residual austenite appears white in the martensitic surface zone. The inhomogeneous distribution is due to carbon gradients.



## GJL-200 | 5.1300 Overload fracture in gray cast iron

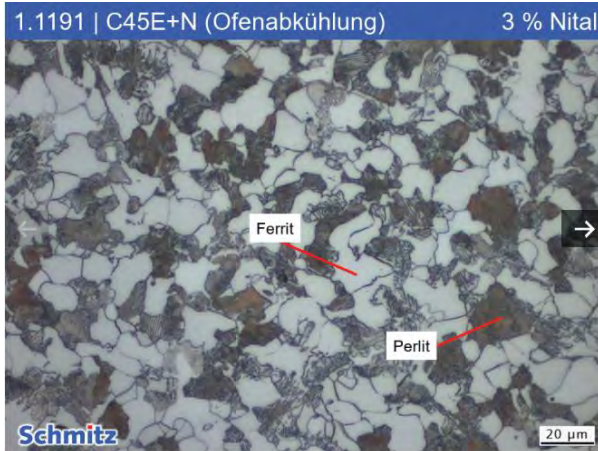
<b>Numeric designation</b>	5.1300
<b>Chemical designation</b>	GJL-200
<b>State</b>	Gewaltbruch
<b>Etching</b>	3% Nital

Cracking occurs preferentially along the graphite lamellae, which act as internal notches in the microstructure. In SEM images of the fracture surface, the structure of the graphite lamellae dominates, with overload fracture of the pearlitic matrix in between.



## OJELURI

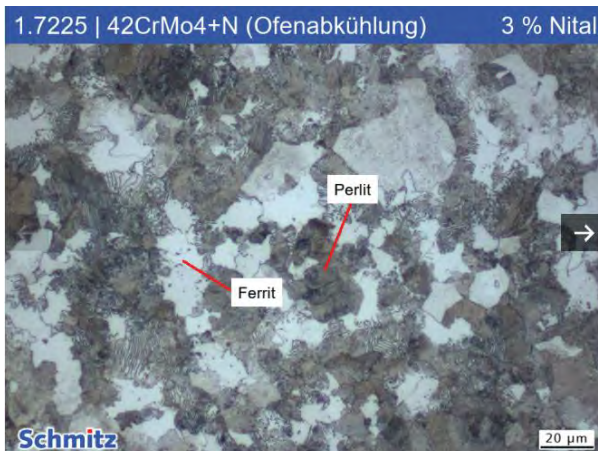
[album complet]



### 1.1191 | C45E +N Normalised at 850 °C (furnace cooling)

<b>Numeric designation</b>	1.1191
<b>Chemical designation</b>	C45E
<b>State</b>	Normalised at 850 °C (furnace cooling)
<b>Etching</b>	3% Nital

This hypoeutectoid steel (bar material with  $\phi = 20$  mm) with 0.43% carbon (measured with OES) was normalised at 850 °C and then slowly cooled in the furnace. The microstructure, typical for this material and heat treatment condition, consists of ferrite and fine- and ultra-fine-grained pearlite. The surface layer is covered with scale (dark gray) and shows a surface decarburisation of approx. 150 µm. The average core hardness is 174 HV5.



### 1.7225 | 42CrMo4 +N Normalised at 850 °C (furnace cooling)

<b>Numeric designation</b>	1.7225
<b>Chemical designation</b>	42CrMo4
<b>State</b>	Normalised at 850 °C (furnace cooling)
<b>Etching</b>	3% Nital

This hypoeutectoid steel (bar material with  $\phi = 28$  mm) with 0.38 % carbon (measured with OES) was normalised at 850 °C and then slowly cooled in the furnace. The microstructure consists, typical for this material and heat treatment condition, of ferrite and fine and ultra-fine-grained pearlite. The average core hardness is 207 HV5.



### Dislocations in ferrite

<b>State</b>	Versetzungen in Ferrit
<b>Etching</b>	3 % Nital

In an old water pipe made of a practically pure ferritic construction steel, abundant dislocations were etched in the banding structure ("whiskers" in the grains).





## 1.0143 | S275J0 Steel beam with fire damage

<b>Numeric designation</b>	1.0143
<b>Chemical designation</b>	S275J0
<b>State</b>	Stahlträger mit Brandschaden
<b>Etching</b>	3% Nital

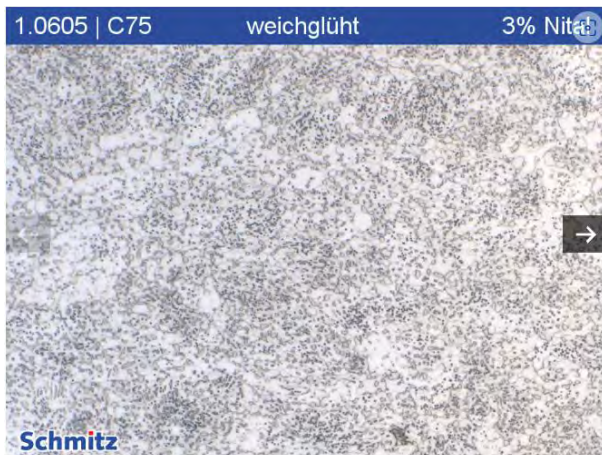
After a fire in a hall, the aim was to check whether the steel beams had been damaged by the effect of heat. The sampling locations were determined by the fire expert. The average yield strength of 285 MPa is above the required minimum value. No impairment (e.g. grain growth, spheroidization of the pearlite, surface decarburization) can be detected in the microstructure even under the scale layer. The supporting beam structure can therefore continue to be used.



## 1.0503 | C45 welded

<b>Numeric designation</b>	1.0503
<b>Chemical designation</b>	C45
<b>State</b>	welded
<b>Etching</b>	3 % Nital

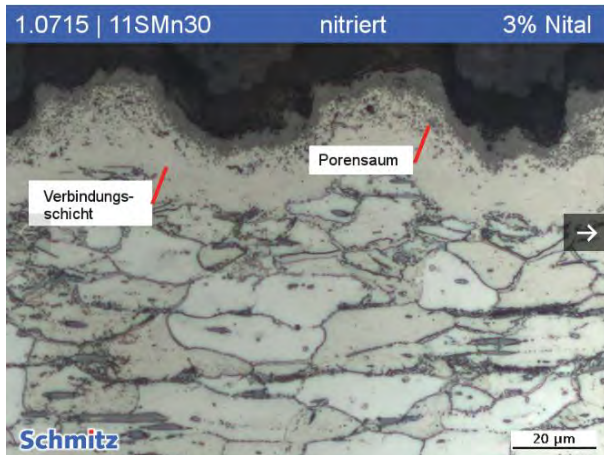
In addition to the obviously larger pore in the weld seam, a large number of different phases are found on the way towards the base metal. In addition to the martensitic hardened area directly below the fusion zone (mechanism: self-quenching), pearlite (different states) and ferrite are also present in addition to martensite as the cooling rate continues to decrease.



## 1.0605 | C75 soft annealed

<b>Numeric designation</b>	1.0605
<b>Chemical designation</b>	C75
<b>State</b>	soft annealed
<b>Etching</b>	3 % Nital

C75 in a soft annealed condition. Spheroidal cementite in a ferritic matrix.



## 1.0715 | 11SMn30 nitrided

<b>Numeric designation</b>	1.0715
<b>Chemical designation</b>	11SMn30
<b>State</b>	nitrided
<b>Etching</b>	3 % Nital

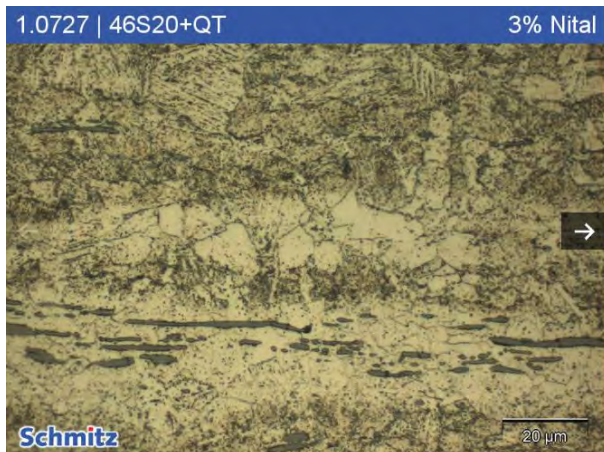
Nitrided free machining steel, which was subsequently oxidized. The compound layer and the porous zone can easily be recognized.



## 1.0718 | 11SMnPb30 Free machining steel, case hardened

<b>Numeric designation</b>	1.0718
<b>Chemical designation</b>	11SMnPb30
<b>State</b>	case hardened
<b>Etching</b>	3 % Nital

In the unetched state, the typical manganese sulfides can be seen, which facilitates tooth production (slotting or milling) due to short-breaking chips. To produce a wear resistant tooth flank, the component was case-hardened. The CHD = 0.1 mm was not achieved here. The hardness at 0.1 mm depth was only approx. 450 HV0.5.



## 1.0727 | 46S20+QT

<b>Numeric designation</b>	1.0727
<b>Chemical designation</b>	46S20
<b>State</b>	QT
<b>Etching</b>	3 % Nital

Sulfur is added to free machining steels to improve machinability (here 0.15-0.25%). Long MnS lines are formed, which break the chips. Despite hardening and tempering, free ferrite is present in the pronounced segregation lines. This is inadmissible.

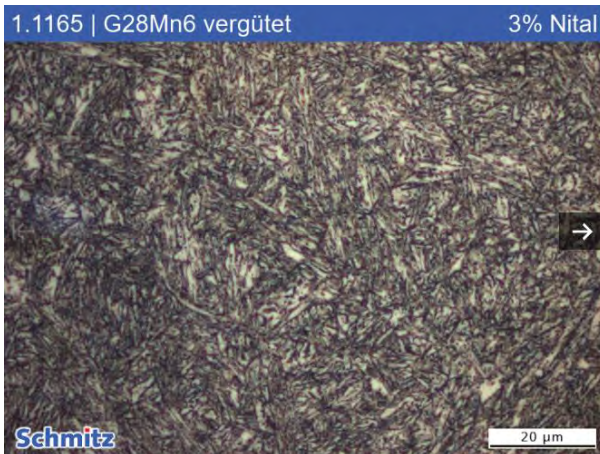




## 1.1133 | 20Mn5 Rolled thread

<b>Numeric designation</b>	1.1133
<b>Chemical designation</b>	20Mn5
<b>State</b>	Rolled thread
<b>Etching</b>	3 % Nital

The thread profile shows the deformation from rolling and the typical "rabbit ears" in the cone point. The core structure is ferritic-pearlitic and slightly strain-hardened. The core hardness is 250 HV0.5.



## 1.1165 | G28Mn6 quenched and tempered

<b>Numeric designation</b>	1.1165
<b>Chemical designation</b>	G28Mn6
<b>State</b>	quenched and tempered
<b>Etching</b>	3 % Nital

Cast steel in the quenched and tempered condition.



## 1.1165 | G28Mn6 with hard facing

<b>Numeric designation</b>	1.1165
<b>Chemical designation</b>	G28Mn6
<b>State</b>	hard facing
<b>Etching</b>	3 % Nital

Carbide-rich hard facing (18% Cr, 6% Nb) on an excavator bucket of 1.1165. The microstructure contains NbC and M7C3 primary carbides in M7C3 austenite eutectic. A soft interlayer has been omitted, and the lighter zone on the right (perhaps an arc strike) is merely remelted and finely solidified. The cracks in the hard facing do not continue into the base metal.



Nietverbindung

Grün QT



Schmitz

## Rivet (wrought iron) from the supporting structure of a church, year of construction ca. 1900

<b>Chemical designation</b>	Niet (Puddeleisen) aus dem Tragwerk einer Kirche, Baujahr ca. 1900
<b>Etching</b>	3 % Nital und grün QT

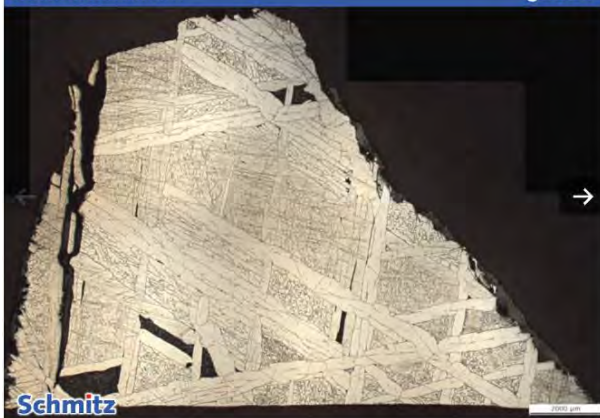
The riveted joint from the massively rusted supporting structure of an approx. 120-year-old church was ground in the center. The fiber flow is more prominent after etching with Green QT than with Nital.

The rivet contains approximately 0.2% C, 1.5% Si, 2% Mn, 0.2% P, and 0.1% S, and the microstructure consists of Widmannstätten ferrite. The abundant inclusion lines are two-phase solidified slag: FeO (light) in an Fe-Mn silicate (dark), which also contains phosphorus and traces of Al, S and Ca. Presumably, the rivet with its high slag content was still made from wrought iron (puddling).

The carrier plates contain about 0.03% carbon and much less non-metallic impurities, the mechanical properties correspond to a modern S275JR. The microstructure is ferritic with very little pearlite.

Meteoriteneisen

geätzt



Schmitz

## Meteoric iron

<b>Numeric designation</b>	Meteoriteneisen
<b>Chemical designation</b>	Meteoriteneisen
<b>Etching</b>	3 % Nital

The meteoric iron contains about 7% nickel in the matrix. Due to the very slow cooling, an extremely coarse Widmannstätten microstructure visible to the naked eye has formed. Nickel-rich austenitic rims remain at grain boundaries and in the most recently solidified areas, while the structure in between consists of differently formed austenite and ferrite. The  $\alpha$ - $\gamma$  equilibrium with 29.7% nickel indicates a microstructure formed during cooling up to about 500 °C.



Schmitz

## 1.8928 | S690QL Welding seam characterization / hardness increase

<b>Numeric designation</b>	1.8928
<b>Chemical designation</b>	S690QL
<b>State</b>	Welding seam characterization / hardness increase
<b>Etching</b>	5 % Nital

Macro etching of a welded joint made of S690QL. In addition to the weld formation, the objective was to characterize the maximum hardness increase in the HAZ.

# TITAN

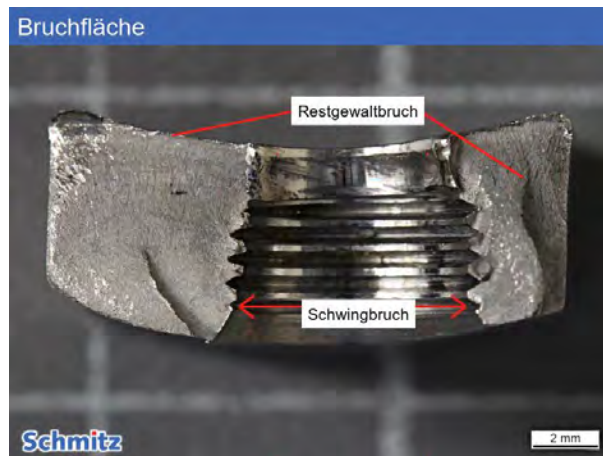
[album complet]



## Fatigue fracture of an osteosynthesis plate

<b>Numeric designation</b>	Titan Grade 5   R56400
<b>Chemical designation</b>	TiAl6V4
<b>State</b>	Schwingbruch

The implant made of TiAl6V4 was used to screw a fracture of the femur and fractured after 12 weeks due to fatigue. Normally, a fracture should be healed after 6 weeks so that the bone can bear weight again, thus plates of this type are not designed to be to be fatigue resistant. In the present case, however, bone healing was delayed due to the patient's advanced age. The fatigue fracture started in the first thread and occupies almost the entire cross-section to the left of the hole. On the right side, the presumed secondary fatigue fracture only traversed approximately 1/3 of the wall thickness before the ductile overload fracture occurred. Whether the mechanical damage in the area where the fracture started was caused by rough handling e.g. during installation and served as a crack initiation or was caused by subsequent hammering, could not be clarified in the end.





## BIBLIOGRAFIE

1. Jochem Wolters, The Origins of Gold Brazing Zur Geschichte der Löttechnik, Degussa, Frankfurt, 1976 ([accesat iulie 2022](#)).
2. Kenneth Newell Ph.D., A Brief History of Steel & The Mysterious Eutectic, ([accesat iulie 2022](#)).
3. Wikipedia, Moore's Law, [Moore's law - Wikipedia](#) ([accesat iulie 2022](#)).
4. INTEL, Ann Kelleher, CEO, Moore's Law – Now and in the Future, ([accesat iulie 2022](#)), <https://download.intel.com/newsroom/2022/manufacturing/Intel-Moores-Law-Investor-Meeting-Paper-final.pdf>
5. APPLE, [Apple unveils M1 Ultra, the world's most powerful chip for a personal computer - Apple](#), Press release 8 martie 2022. ([accesat iulie 2022](#)).
6. Eric Beckman, Professor of Chem/Petroleum Engineering, University of Pittsburgh, The world of plastics, in numbers, [The world of plastics, in numbers](#), ([accesat iulie 2022](#)).
7. Namazi H., Polymers in our daily life, BioImpacts, 2017, 7(2), 73-74, doi: 10.15171/bi.2017.09.
8. William D. Callister, David G. Rethwisch, Materials Science and Engineering, 8<sup>th</sup> Edition, Wiley, ISBN 978-0-470-41997-7 ([accesat iulie 2022](#)).
9. Gh. Bădărău, Proprietățile materialelor metalice, Note de curs, Facultatea SIM Iași [accesat 2022](#).
10. University of Cambridge, DoITPoMS Micrograph Library, [accesat iulie 2022](#).
11. M. Reibold, P. Paufler, Aleksandr A. Levin, W. Kochmann, N. Pätzke & Dirk C. Meyer, (2009), Discovery of Nanotubes in Ancient Damascus Steel. In: Cat, D.T., Pucci, A., Wandelt, K. (eds) Physics and Engineering of New Materials. Springer Proceedings in Physics, vol 127. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88201-5\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88201-5_35)
12. M. Boniardi, A. Casaroli, Steel metallurgy vol.I , Politecnico Milano, [Ed. Lucefin](#), 2017.
13. Gh. Zecheru, Gh. Drăghici, Elemente de Știința și Ingineria Materialelor, Ed.ILEX și Editura Universității din Ploiesti, 2001.
14. D. Ponge, Max Planck Institut fur Eisenforschung GmbH, Structural Materials Steels, Marie Curie Summer School, Hürtgenwald, 2005.
15. Shrikant P. Bhat, Advances In High Strength Steels for Automotive Applications, Automotive Product Applications ArcelorMittal Global R&D –East Chicago ([accesat iulie 2022](#)).
16. H. K. D. H. Bhadeshia, Interpretation of the Microstructure of Steels, Cambridge University, ([accesat iulie 2022](#)).
17. All about Aluminium, Aluminium in Construction, on-line Journal, [accesat iulie 2022](#).
18. Leandru-Gheorghe BUJOREANU, Superaliaje, Note de curs ([accesat iulie 2022](#)).
19. A.El-Chaikh\*, A.Danzig and D. Muentner, Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, Pfaenderstrasse 50-52, 88161 Lindenberg, Germany, Effect of Microstructure on Fatigue Properties of Several Ti-Alloys for Aerospace Application, <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032104015>
20. A.Dziubińska, K.Majerski, G.Winiarski, Investigation of The Effect of Forging Temperature on the Microstructure of Grade 5 Titanium ELI, Advances in Science and Technology, Vol.11, Issue 4, 2017, pages 147–158, DOI: [10.12913/22998624/76488](https://doi.org/10.12913/22998624/76488).
21. Grand View Research, Composites Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Carbon, Glass), By Manufacturing Process (Layup, Filament, RTM), By End Use, By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028, ([accesat august 2022](#)).
22. Rocco Bombardieri, Aerostructural optimization and aeroelasticity of new generation aircraft, Universidad Carlos III de Madrid, Thesis for the degree of Doctor in Programa Interuniversitario en Mecanica de Fluidos 2021 ([accesat august 2022](#))



23. AKM Asif Iqbal, Yoshio Arai Analysis of fatigue crack propagation behaviour in SiC particulate Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> whisker reinforced hybrid MMC, Materials Science and Engineering 114 (2016) 012115 [doi:10.1088/1757-899X/114/1/012115](https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012115).
24. OLYMPUS, Microscopy Resource Center, ([acesat august 2022](#)).
25. EDMUND OPTICS, Understanding Microscopes and Objectives, ([acesat august 2022](#)).
26. NIKON, MICROSCOPY U. The source for Microscopy Education, Introduction to Microscope Objectives, ([acesat august 2022](#)).
27. DoITPoMS Teaching and Learning Packages, Cambridge University, ([acesat august 2022](#))
28. Advanced Microscopy Facility University of Victoria, The Scanning Transmission Electron Holography Microscope (STEHM), ([acesat august 2022](#)).
29. M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, 2nd Edition, ISBN 0750643579, ([acesat august 2022](#)).
30. D. Cebon and M.F. Ashby, The Optimal Selection of Engineering Entities, Technical Report CUED/C-EDC/TR 59, November 1997, ISSN 0963-5432 ([acesat august 2022](#)).
31. GRANTA, CES EduPack, Material and Process Selection Charts, 2022.
32. Mike Ashby, CES 2010 Edupack, Exercises with worked solutions, Department of Engineering University of Cambridge, ([acesat august 2022](#)).
33. Schmitz-Metallographie GmbH, [Schmitz Metallographie GmbH \(schmitz-metallographie.de\)](http://schmitz-metallographie.de), ([acesat august 2022](#)).
34. Donald R. Askeland University of Missouri—Rolla, Emeritus Pradeep P. Fulay University of Pittsburgh, Wendelin J. Wright Bucknell University, The Science and Engineering of Materials, Sixth Edition, ISBN-13: 978-0-495-29602-7, 2010.
35. Ș. Domșa, M. Bodea, C. Prică, Baze de Date. Studii de Caz. Proiectarea Materialelor, Casa Cărții de Știință, 2005, ISBN 973-686-688-2.
36. M. Bodea, [Sudare și Procedee Conex](#)e, Editura UT Press ISBN 978-606-737-143-7, 2016.
37. M. Bodea, [Sudură și Procedee Conex](#)e, Îndrumător Lucrări de Laborator, UT Press, ISBN 978-606-737-354-7, 2019.
38. C. Popa, V. Cândea, V. Șimon, D. Lucaciu, O. Rotaru - Știința biomaterialelor. Biomateriale metalice, UT Press, ISBN 978-973-662-372-1, 2008.
39. Outokumpu Stainless AB, Handbook of Stainless Steel, Sweden, 2013 ([acesat august 2022](#)).

<b>CURS 1. SCURT ISTORIC AL MATERIALELOR .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCERE ÎN ȘTIINȚA MATERIALELOR .....</b>	<b>9</b>
<b>CLASIFICAREA MATERIALELOR.....</b>	<b>13</b>
MATERIALELE METALICE. ALIAJE .....	14
MATERIALE CERAMICE.....	18
MATERIALE SEMICONDUCTOARE .....	20
MATERIALE POLIMERICE.....	23
MATERIALE COMPOZITE .....	27
<b>CURS 2. PROPRIETĂȚILE MATERIALELOR.....</b>	<b>29</b>
PROPRIETĂȚI INTRINSECI .....	29
PROPRIETĂȚI TEHNOLOGICE.....	30
STRUCTURA ATOMICĂ A MATERIALELOR.....	31
LEGĂTURI CHIMICE (INTERATOMICE) .....	36
REȚELE CRISTALINE .....	41
DEFECTE ÎN REȚELE CRISTALINE.....	43
TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII.....	45
MECANISMUL DE DEFORMARE PRIN ALUNECARE .....	46
MECANISMUL DE DEFORMARE PRIN MACLARE .....	48
CURBA CARACTERISTICĂ A MATERIALELOR.....	48
MECANISME DE RUPERE. CLASIFICARE.....	50
TENACITATEA MATERIALELOR .....	53
<b>CURS 3. TEORIA ALIAJELOR .....</b>	<b>55</b>
CRISTALIZAREA METALELOR .....	55
STRUCTURA ȘI DEFECTELE LINGOULUI DE TURNARE .....	58
ALIAJE. NOȚIUNI GENERALE.....	61
<b>CURS 4 DIAGrame DE ECHILIBRU BINARE .....</b>	<b>63</b>
NOȚIUNI INTRODUCTIVE.....	63
DIAGrame CU FORMARE DE EUTECTIC.....	69
DURIFICAREA PRIN PRECIPITARE .....	71
DIAGrame CU FORMARE DE PERITECTIC.....	73
DIAGrame CU FORMARE DE EUTECTOID.....	76
DIAGrame CU FORMARE DE PERITECTOID .....	77

DIAGrame TERNARE .....	78
<b>CURS 5 DIAGRAMA FIER-CARBON .....</b>	<b>79</b>
NOȚIUNI INTRODUCATIVE. CARBONUL.....	79
DIAGRAMA Fe-Fe <sub>3</sub> C. OȚELURI .....	83
ELEMENTE ÎNSOȚITOARE ÎN OȚELURI .....	90
CLASIFICAREA ȘI SIMBOLIZAREA OȚELURILOR.....	92
<b>CURS 6 DIAGRAMA FIER-CARBON .....</b>	<b>101</b>
FORTE.....	101
SIMBOLIZAREA FONTELORE.....	107
<b>CURS 7 METALE ȘI ALIAJE NEFEROASE .....</b>	<b>111</b>
NOȚIUNI INTRODUCATIVE.....	111
CUPRUL ȘI ALIAJELE SALE .....	112
BRONZURI .....	115
ALAME.....	116
ALUMINIUL ȘI ALIAJELE SALE .....	119
SILUMINURILE .....	122
DURALUMINIUL .....	123
<b>CURS 8 TRATAMENTE TERMICE .....</b>	<b>124</b>
NOȚIUNI INTRODUCATIVE.....	124
DIAGrameLE TTT .....	125
DIAGrameLE CCT.....	126
<b>CURS 9 OȚELURI ÎNALT ALIATE. OȚELURI INOXIDABILE .....</b>	<b>134</b>
NOȚIUNI INTRODUCATIVE.....	134
PROPRIETĂȚI OȚELURI INOXIDABILE.....	135
<b>CURS 10 ALIAJE CU NICHEL. SUPERALIAJELE .....</b>	<b>141</b>
NOȚIUNI INTRODUCATIVE.....	141
NICHELUL .....	143
FLUAJUL ȘI CURBA DE FLUAJ.....	145
<b>CURS 11 TITAN ȘI ALIAJE DE TITAN .....</b>	<b>148</b>
NOȚIUNI INTRODUCATIVE.....	148
ALIAJE DE TITAN .....	150
BIOMATERIALE .....	154
<b>CURS 12 MATERIALE COMPOZITE.....</b>	<b>158</b>



NOȚIUNI INTRODUCTIVE.....	158
CLASIFICARE ȘI CARACTERISTICI .....	162
<b>CURS 13 CONTROLUL CALITĂȚII MATERIALELOR .....</b>	<b>168</b>
NOȚIUNI INTRODUCTIVE.....	168
SISTEME DE ATESTARE A CONFORMITĂȚII .....	170
ELEMENTE DE MICROSCOPIE OPTICĂ.....	174
ELEMENTE DE MICROSCOPIE ELECTRONICĂ.....	179
<b>CURS 14 PRINCIPII DE SELECȚIE A MATERIALELOR .....</b>	<b>181</b>
<b>MINI ATLAS METALOGRAFIC.....</b>	<b>191</b>
FONTE.....	191
OȚELURI.....	196
TITAN.....	201
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>202</b>