

Universitatea Tehnica “Gheorghe Asachi” din Iasi
Facultatea de Stiinta si Ingineria Materialelor

MATERIALE NANOSTRUCTURATE PRIN DEFORMARE PLASTICA SEVERA

conf. dr. ing. Radu Comaneci

Departamentul de Tehnologii si Echipamente pentru Procesarea Materialelor

Nanomateriale și nanotehnologii

Cât înseamnă nano?

De ce nano?

Cât mai aproape de nano!

Nanotehnologii - breviar



Nanoscară

Nanomateriale

Nanotehnologii

Prima utilizare a conceptului de nanotehnologie aparține lui *Richard Feynman* cu ocazia faimoasei comunicări științifice *There's Plenty of Room at the Bottom* de la American Physical Society, reunită la California Institute of Technology, SUA, la 29 decembrie 1959.

Norio Taniguchi de la Tokyo Science University enunță prima definiție a nanotehnologiei în 1974*: “Nanotehnologia constă în producerea, separarea, consolidarea și deformarea materialelor, atom cu atom sau moleculă cu moleculă”.

În 1985, *Robert Curl*, *Harold Kroto* și *Richard Smalley* au descoperit așa-numitele *Fullerene*** – familie de structuri moleculare C_{60} a carbonului, sub formă sferică (nanosfere), elipsoidală, cilindrică (nanotuburi) sau plană.

“Cea mai mare descoperire din istorie e pregătită să apară” K. Eric Drexler, “Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology”, Knopf Doubleday Publishing Group, 1986^[1]

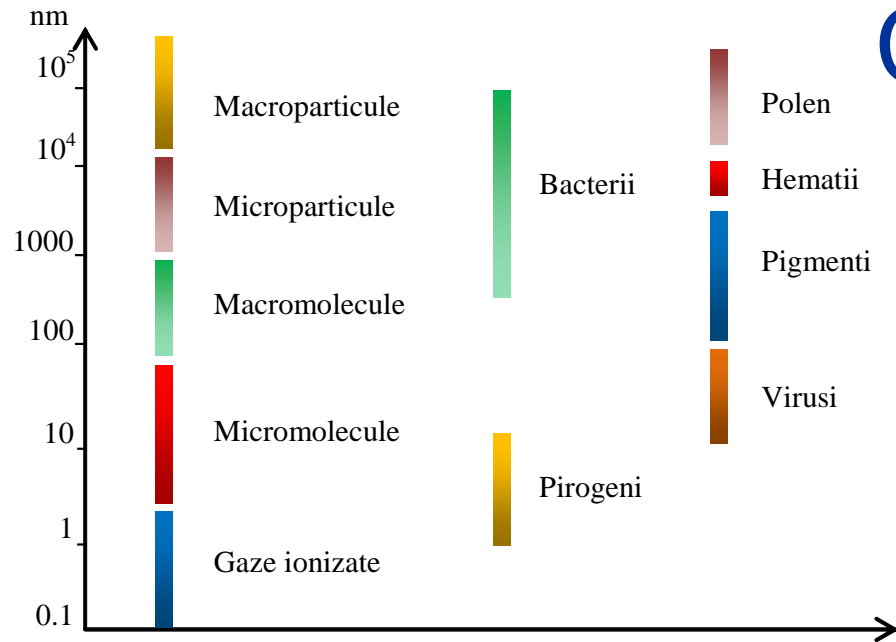
* On the Basic Concept of 'Nano-Technology', Proc. Intl. Conf. Prod. London, Part II, British Society of Precision Engineering, 1974.

** după numele autorului domului geodezic, Richard Buckminster Fuller.



<http://en.wikipedia.org>

Cât înseamnă nano?



- Nanostructurile** pot fi:
- zero-dimensionale – clusteri atomici și puncte cuantice;
 - unidimensionale – filme multistrat subțiri de grosimi nanometrice;
 - bidimensionale – nanofire și nanotuburi
 - tridimensionale – nanoparticule sau grăunți de dimensiuni nanometrice

1 nanometru (1nm) = 10⁻⁹m

1nm = lungimea unui lanț constituit din 3 molecule de apă

1nm = a 10000-a parte din diametrul unui fir de păr uman

Nanoscara definește dimensiuni cu valori cuprinse în domeniul 0.1 ... 1nm.

Nanostructura reprezintă o entitate (componentă) organizată și omogenă care are cel puțin o dimensiune nanometrică.

Nanomateriale și materiale nanostructurate - există diferență?

Nanomaterialele sunt materiale cu cel puțin o dimensiune nanometrică:
- nanosfere, nanotuburi, nanopulberi, nanofilme.

Materialele nanostructurate sunt materiale care sunt alcătuite din componente nanostructurale (cu cel puțin o dimensiune nanometrică):
- materiale din blocuri de construcție nanometrice.

Prin materiale nanostructurate înțelegem metale și materiale ceramice consolidate, de dimensiuni macroscopice, alcătuite din grăunți de dimensiuni nanometrice.

(www.nanowerk.com)

De ce nano?

“Nanotechnology ... promises more from less”

STRUCTURA
ULTRAFINA / NANOMETRICA

Rezistență & tenacitate

Fluaj

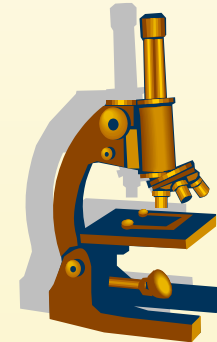
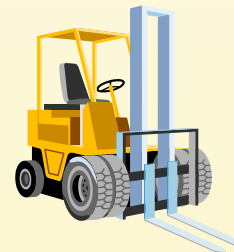
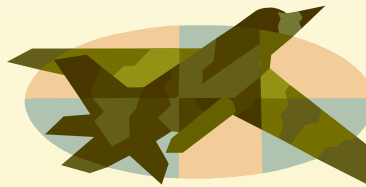
Coroziune

Oboseală

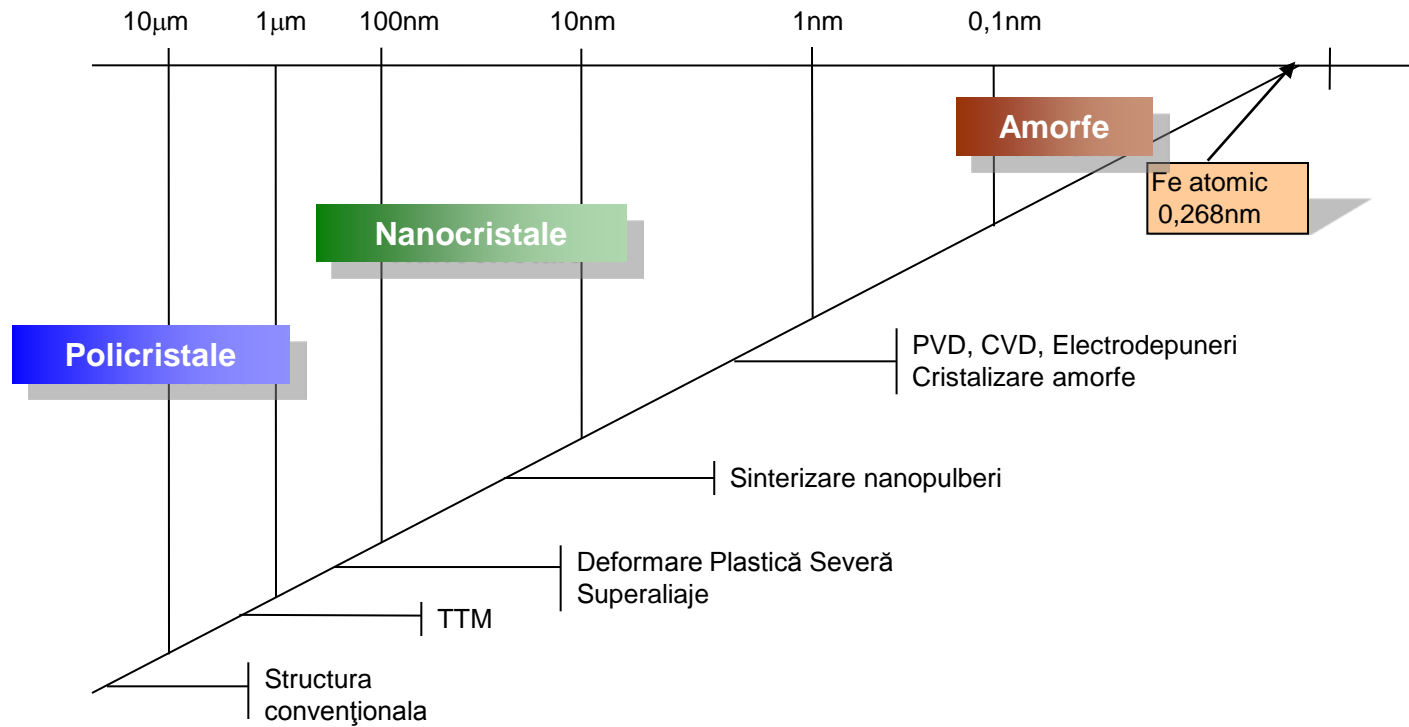
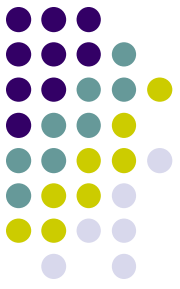
Superplasticitate

Stabilitate termică

MATERIALE MULTIFUNCTIONALE



Cât mai aproape de nano!



Materialele metalice în stare solidă pot fi amorfe sau cristaline. Cele cristaline se găsesc sub forma unui monocristal sau al unui policristal.

Din punct de vedere dimensional materialele metalice policristaline pot avea:

- **microstructură** (dimensiuni ale monocristalelor de până la 1 μm),
- **structură ultrafinisată** (dimensiuni ale monocristalelor cuprinse între 1 μm și 100 nm),
- **nanestructură** (dimensiuni ale monocristalelor mai mici de 100 nm).

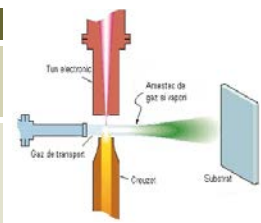
Tab.1.1. Nanotehnologii – Breviar

Procedeu	Principiu	Aplicații				Rezultat	Observații
		Me	Ci	Ce	Co		
Inert Gas Condensation	Vaporizare (Laser, Plasmă, Fascicul de electroni) + Condensare în gaz inert	✓	✓	✓	✓	Nanopulberi	Puritate chimică deosebită
Jet Vapor Deposition	Vaporizare + Atomizare în jet sonic inert + Depunere	✓	✓	✓	✓	Filme multistrat subțiri	Productivitate bună, echipamente comune
Chemical Vapor Deposition	Vaporizare prin reacție chimică + Depunere	✓	✓	✓	✓	Nanotuburi Filme subțiri	Proces de durată, rata depunerii scăzută
Thermal Spraying	Topire (Plasmă, Arc) + Pulverizare + Depunere	✓		✓		Acoperiri strat	Prezența porozită-ților în stratul depus
High Energy Ball Milling	Măcinare în mori cu bile planetare de mare viteză	✓	✓	✓		Nanopulberi	Granulație și compoziție chimică neuniforme
SOL-GEL	Separarea fazei solide dintr-o soluție omogenă de tip gel			✓	✓	Nanopulberi	Materiale scumpe. Excelent control al compoziției chimice
Chemical Vapor Condensation	Vaporizare+Supraîncălzire+ Condensare în incintă suprarăcită (N ₂ lichid)	✓	✓	✓	✓	Nanopulberi	Supraîncălzirea se realizează într-un reactor
Sputtering	Vaporizare prin împrăștiere cu plasmă + Depunere	✓	✓	✓		Filme subțiri	Depunerea este dificil de controlat
Severe Plastic Deformation	Deformație cumulativă cu grade mari de deformare, cu fragmentarea structurii	✓	✓	✓		Semifabricate industriale	Lipsa porozităților . Se menține aceeași formă geometrică

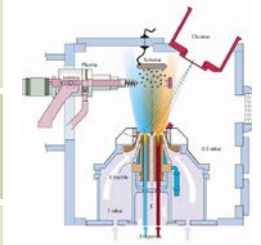
Legendă
 Me – Metale
 Ci – Compuși intermetalici
 Ce – Ceramice
 Co – Compozite ceramice

Notă: în prezentul breviar s-au utilizat denumirile consacrate la nivel internațional ale procedeelor, pentru a nu crea vreo confuzie legată de interpretări lingvistice.

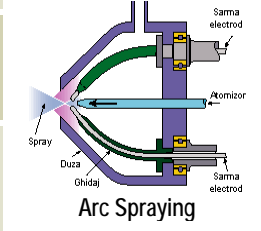
Nanotehnologiile se împart în două categorii:
Bottom-Up (de jos în sus) – în care nanomaterialul este realizat de la baza edificiului structural prin construcție atomică/moleculară. Se obțin nanopulberi sau depuneri.
Top-Down (de sus în jos) – în care materialul în întregul său suferă o restructurare completă, la scară nanometrică
 Cu excepția procedeeului *Severe Plastic Deformation* toate celelalte fac parte din categoria de tehnologii *Bottom-Up*.



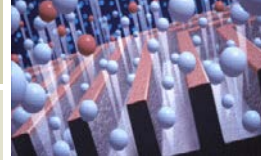
Direct Vapor Deposition



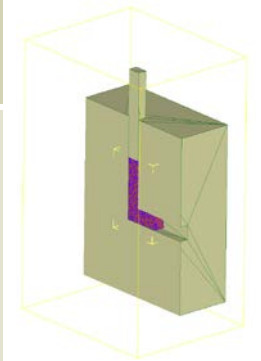
Vaporizare cu fascicul de electroni



Arc Spraying



Sputtering



Severe Plastic Deformation

- Nanotehnologia reprezintă modalitatea de a crea materiale (multi) funcționale, dispozitive și sisteme, prin controlul substanței la nivel nanodimensional (1-100nm) și exploatarea noilor proprietăți și fenomene dezvoltate la această scară (www.lanl.gov – Los Alamos National Laboratory, USA);

- Nanotehnologia reprezintă aria tehnologică în care dimensiunile și toleranțele ce se regăsesc în domeniul 0,1 – 1nm joacă un rol critic (în comportarea materialelor n.a.) (www.nano.org.uk – Institute of NanoTechnology, United Kingdom);

- Nanotehnologia reprezintă înțelegerea și controlul materiei la nivelul dimensiunilor între 1 – 100nm la care fenomene unice determină aplicații noi. Cuprinzând nanoștiința, tehnologia și ingineria, nanotehnologia implică vizualizarea, măsurarea, modelarea și manipularea materiei la dimensiuni nanometrice (www.nano.gov – USA National Nanotechnology Initiative);

- Nanotehnologia reprezintă proiectarea, caracterizarea, producerea și utilizarea structurilor, dispozitivelor și sistemelor, controlând forma și mărimea la nivel nanometric (www.answer.com).

[Deformarea Plastică Severă ⁽¹⁾]

Începută cu tratamente termomecanice (TTM) ce constau din laminări controlate și răciri accelerate, finisarea granulației nu a putut trece inițial de granița de $5\mu\text{m}$.

Implicarea în schemele TTM avansate a recristalizării dinamice combinată cu difuzia controlată și precipitarea fin dispersă a fazelor secundare asigurate de o compoziție chimică adecvată – chiar dacă uneori costisitoare (superaliaje) – a coborât limita dimensiunii grăunților până la valoarea excepțională de $1\mu\text{m}$.

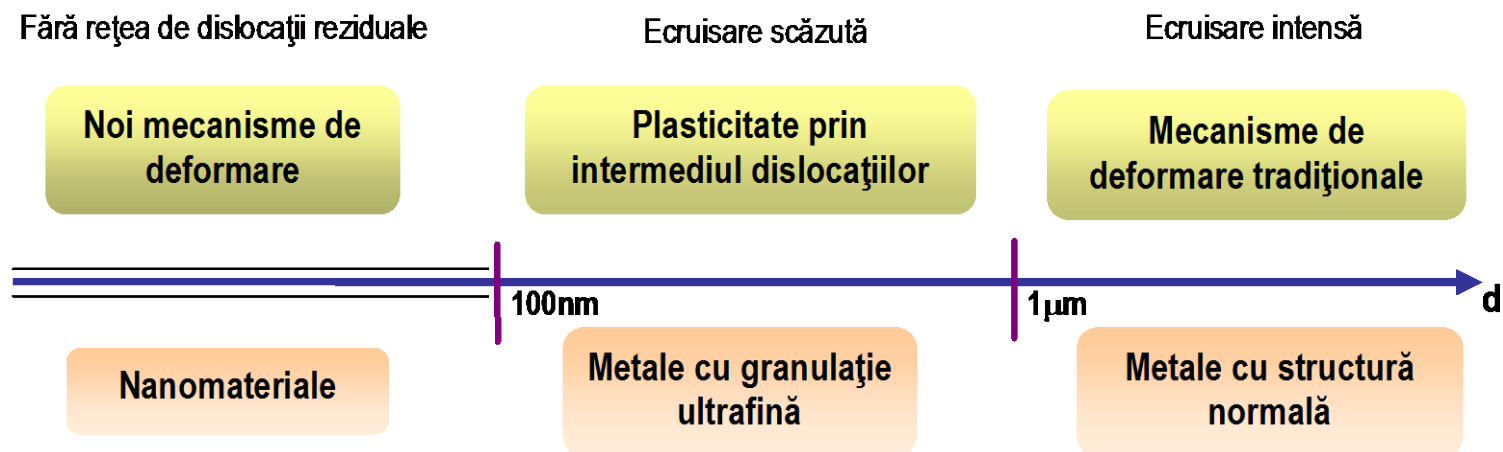
Finisarea în continuare a granulației presupune o fragmentare suplimentară care implică Deformarea Plastică Severă (DPS).

Deformarea Plastică Severă (2)

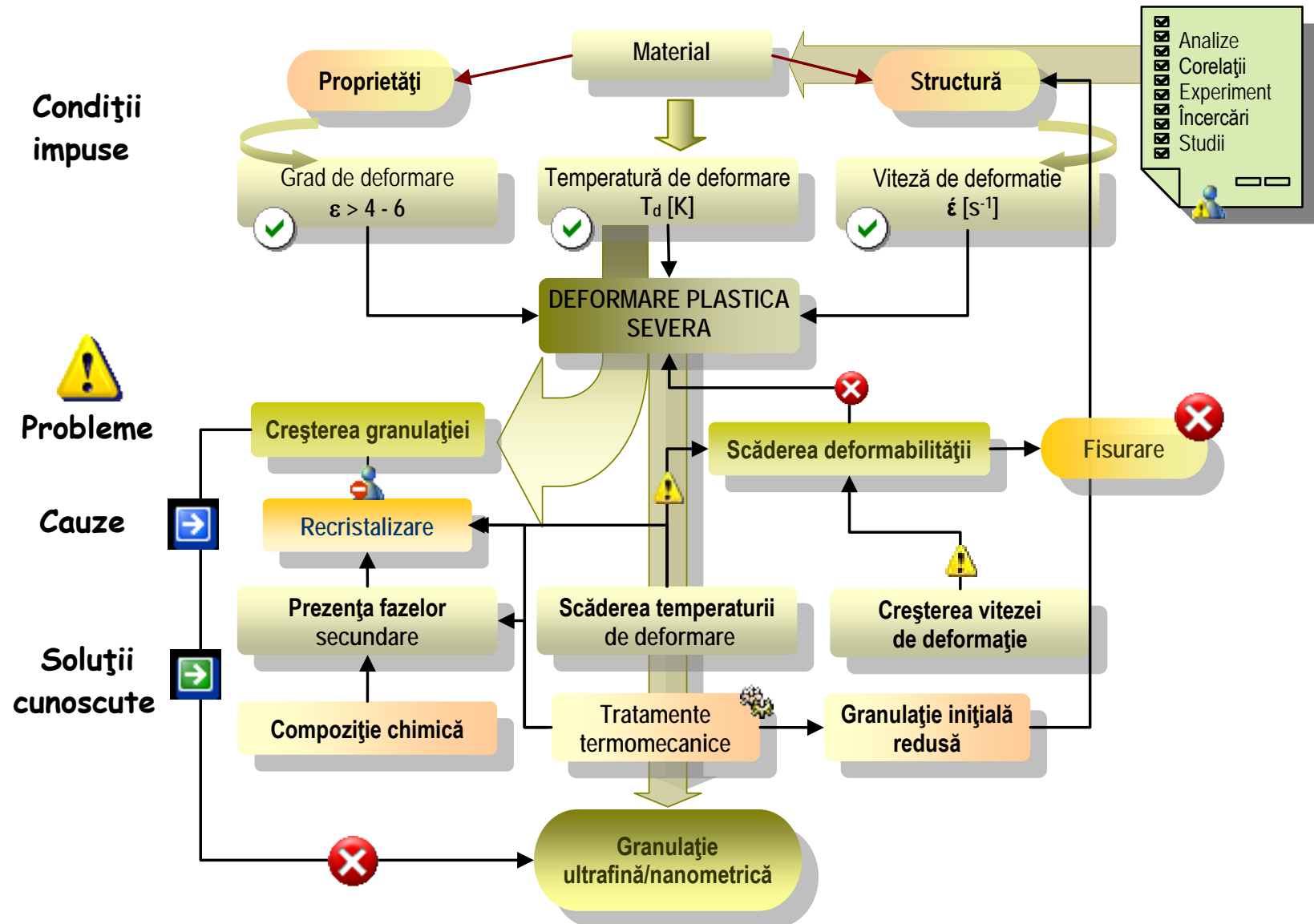
Pentru metalele cu structură normală ($d > 1\mu\text{m}$), alunecarea și maclarea sunt mecanismele tradiționale de deformare plastică.

Pentru metalele cu granulație ultrafină ($1\mu\text{m} < d < 100\text{nm}$) plasticitatea este indusă prin deplasarea dislocațiilor.

Pentru materialele cu granulație nanometrică ($d < 100\text{nm}$), deformarea plastică se produce după mecanismul alunecării limitelor de grăunte.



Condițiile deformării plastice severe



Clasificarea procedeeelor de deformare plastică severă

Procedeul HPT (High Pressure Torsion)

Procedeul CCDC (Cyclic Channel Die Compression)

Procedeul ARB (Accumulative Roll Bonding)

Procedeul RCS (Repetitive Corrugation and Straightening)

Procedeul ECAP (Equal Channel Angular Pressing)



Equal Channel Angular Pressing

High Pressure Torsion

Accumulative Roll Bonding

Deformarea repetată a unui metal printr-un canal unghiular la 90° , cu secțiunea constantă părea imposibilă și mai ales fără rost. *V.M. Segal* obține patentul no. 575892 în 1977, în URSS. Procedeul a devenit cunoscut sub denumirea Equal Channel Angular Pressing (ECAP).

Idea de a deforma un material prin refulare ciclică în canalul matriței după mai multe axe, dă rezultate spectaculoase. În 1988, *Ghosh* obține în SUA patentul no. 4721537 pentru procedeul Cyclic Close Die Forging, care avea să devină Cyclic Channel Die Compression (CCDC).

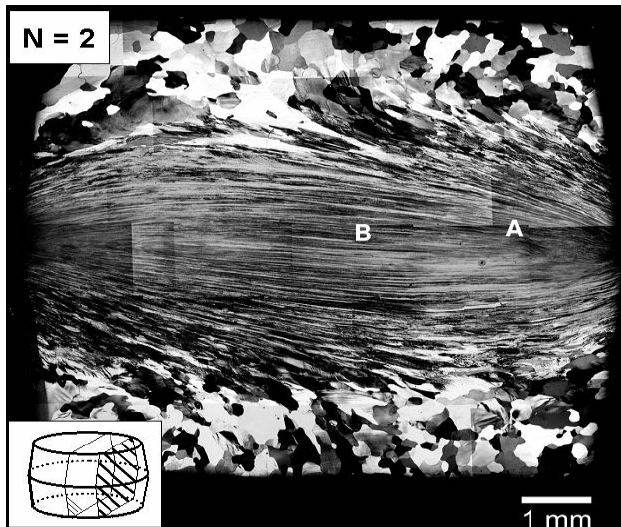
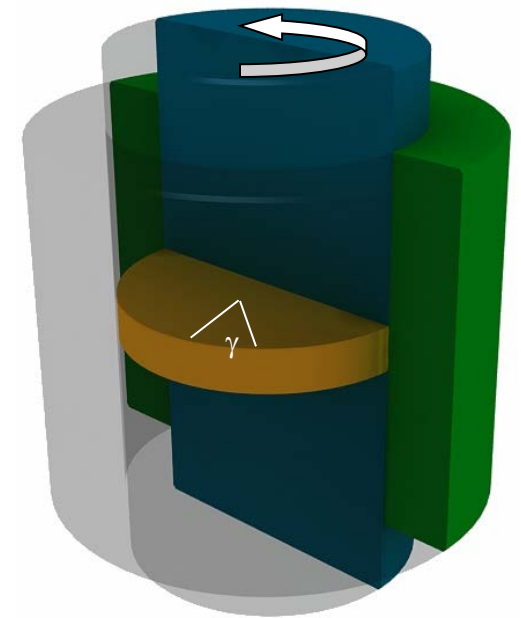
R.Z. Valiev prelucrează materiale dure între două discuri, utilizând torsiunea la presiune ridicată. În 1997 patentează procedeul de deformare High Pressure Torsion (HPT).

Y. Saito propune în 1998 finisarea structurală prin laminarea cumulativă a tablelor. Procedeul primește denumirea Accumulative Roll Bonding (ARB).

J. Richert, M. Richert, J. Zasadzinski și A. Korbel, obțin în Polonia, în 1979, patentul PL 123026 pentru procedeul de deformare plastică Reciprocating Extrusion-Compression care avea să primească denumirea consacrată Cyclic Extrusion Compression (CEC).

Procedeul HPT (High Pressure Torsion)

HPT este un proces continuu de deformare care constă în forfecarea prin torsiune a materialului între două nicovale – una fixă, iar cealaltă în mișcare de rotație, aflate sub presiune ridicată.



Microstructura după 2 rotații HPT

$$\text{Gradul de deformare } \varepsilon = \text{tg}\gamma/\sqrt{3}$$
$$p = 0,75 \dots 9 \text{ GPa}$$

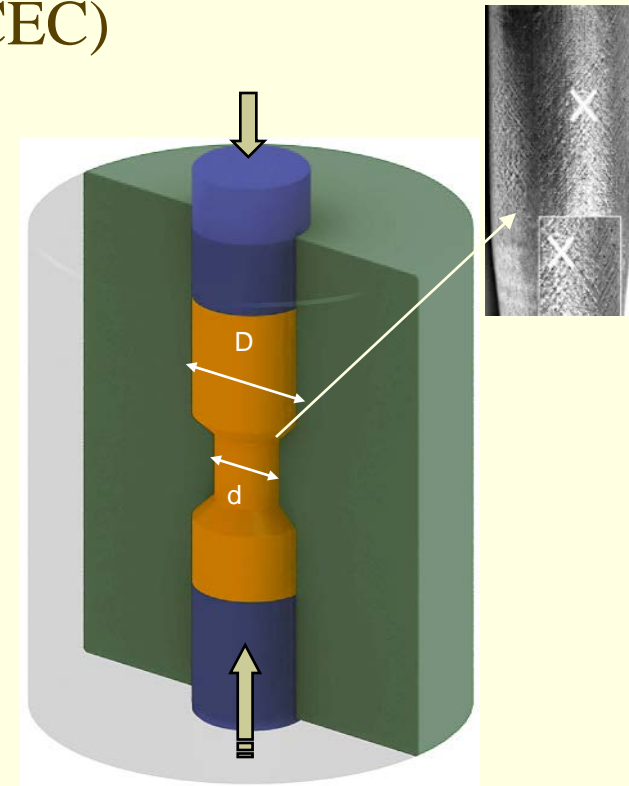
Procedeul CCDC (Cyclic Channel Die Compression)_I

Varianta Cyclic Extrusion Compression (CEC)

CEC este un procedeu discontinuu de deformare ce constă în extrudarea ciclică bilaterală a semifabricatului într-o matriță cu simetrie cilindrică și secțiune descrescândă.

Finisarea granulației se bazează pe forfecarea care se produce pe liniile de discontinuitate ale vitezei de curgere, determinate de schimbarea secțiunii. Structura de șah, în benzi de forfecare, se instalează după câteva treceri. Ecrusarea se plafonează și ea de asemenea după un număr relativ redus de treceri (4).

Procesul este posibil (100 de treceri!) în condițiile tensiunii hidrostatice de compresiune.

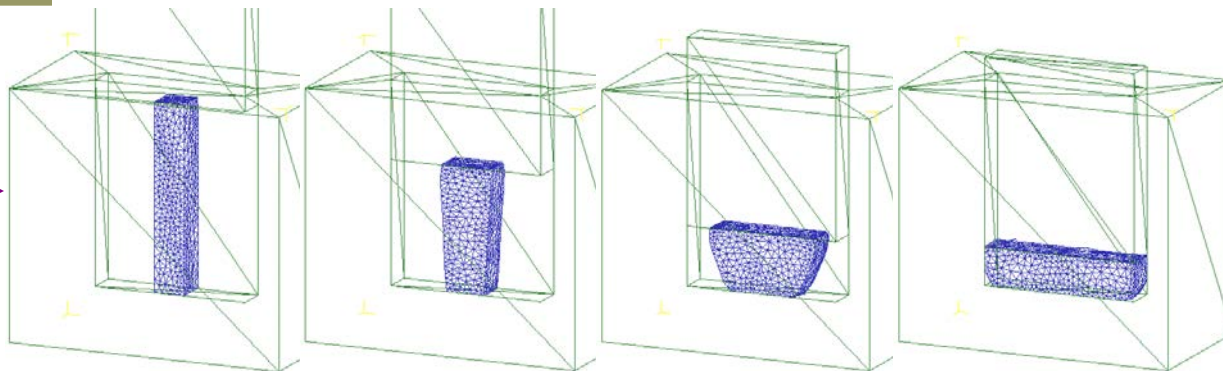
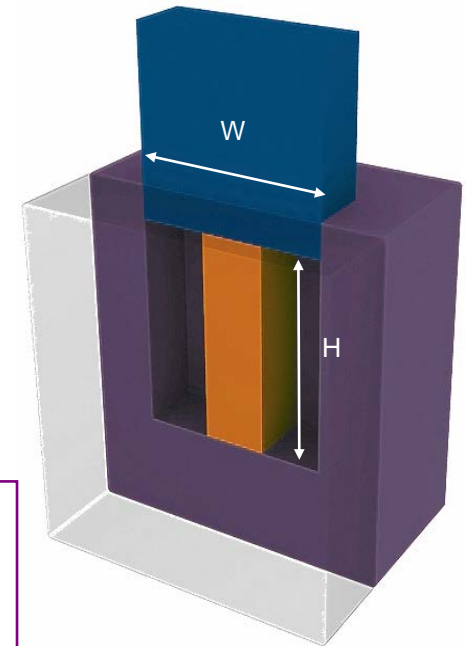


Gradul de deformare
 $\varepsilon = 4 \ln(D/d)$

Procedeul CCDC (Cyclic Channel Die Compression)_{II}

Varianta Multiaxial Forging (MF)

MF este un procedeu discontinuu de deformare în care materialul curge în procesul deformării prin compresiune, numai în direcția canalului matriței (normal pe direcția forței). Lungimea canalului matriței și înălțimea probei sunt echivalente, grosimea în adâncime a probei rămânând aceeași, procesul poate fi reluat.

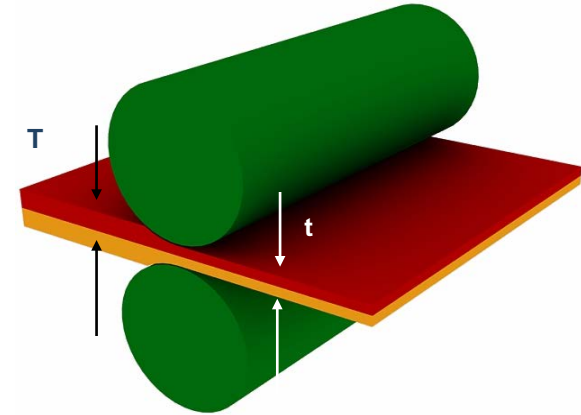


Gradul de deformare
 $\varepsilon = 2 / \sqrt{3} \cdot \ln(H/w)$

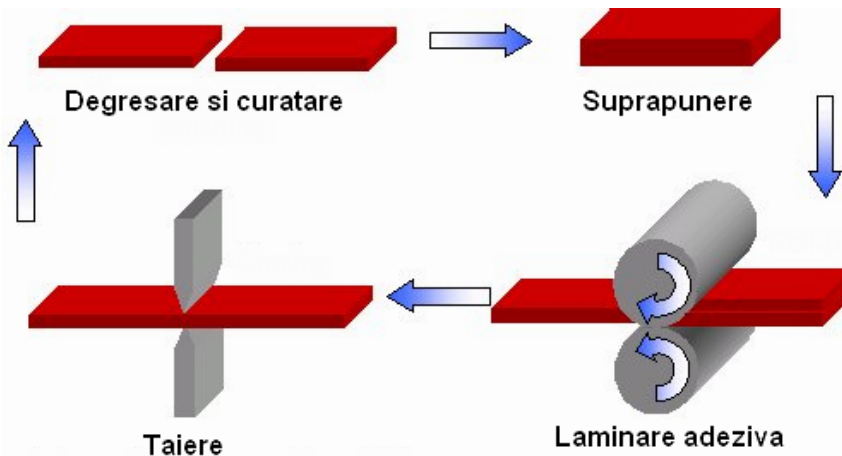
Y. Saito, 1998

Procedeul ARB (Accumulative Roll Bonding)

ARB este o tehnică de deformare plastică severă, care constă în laminări succesive, prin tăierea transversală a produsului laminat la o trecere anterioară, suprapunerea părților rezultate și relaminarea acestora cu grade de deformare $\geq 50\%$, fără modificarea distanței între cilindri.

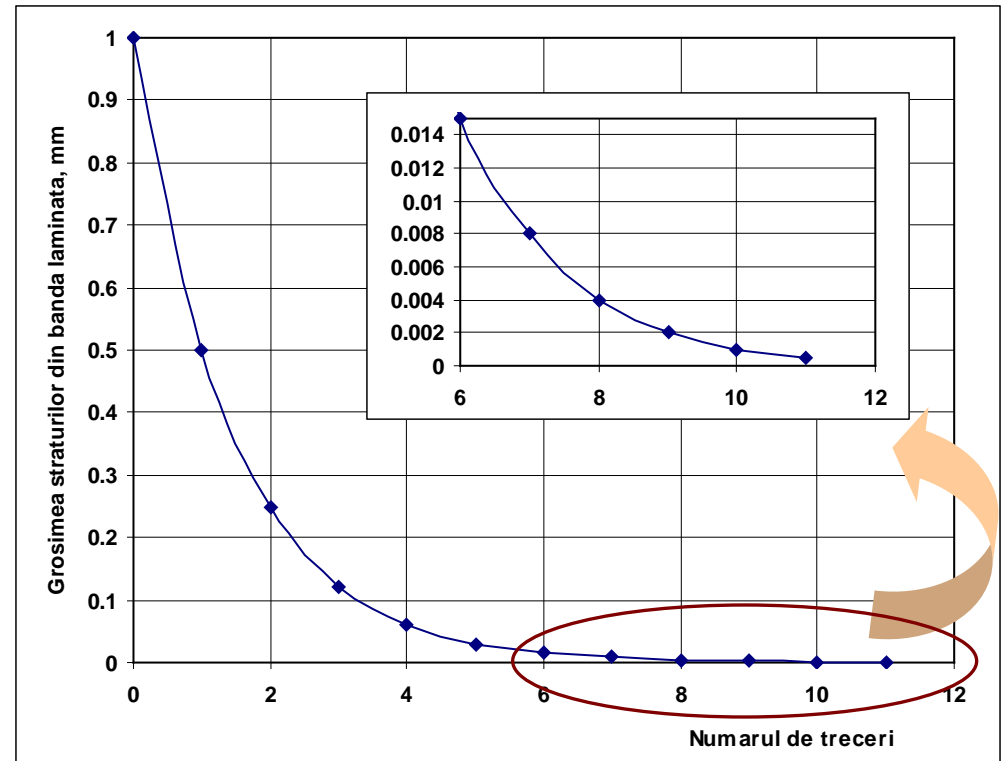
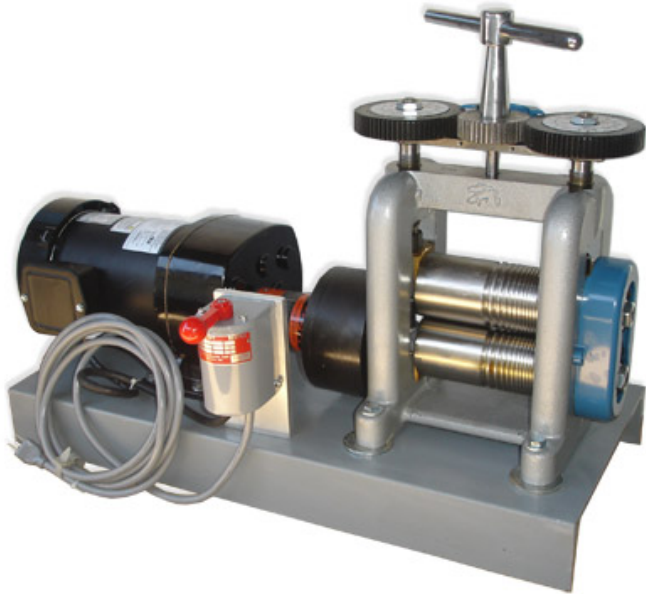


Gradul de deformare
$$\varepsilon = 2 / \sqrt{3} \cdot \ln(T/t)$$



Succesul laminării adezive cumulative este determinat de coeziunea straturilor de material.

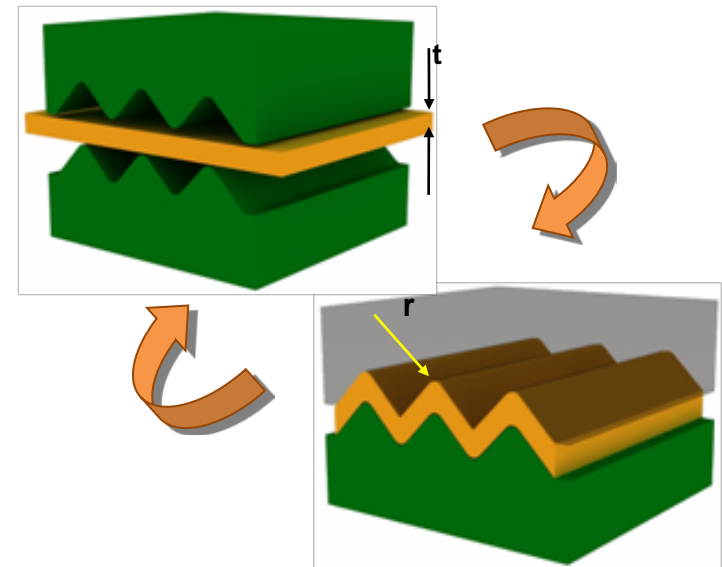
Experiment



Trecerea	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g [mm]	1,0	0,5	0,25	0,12	0,06	0,03	0,015	0,008	0,004	0,002	0,001	0,0005
ϵ , %	0	50	75	88	94	97	98,5	99,2	99,6	99,8	99,9	99,95
$\epsilon_{\text{von Mises}}$	0	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2	8,0	8,8

Procedeul RCS (Repetitive Corrugation and Straightening)

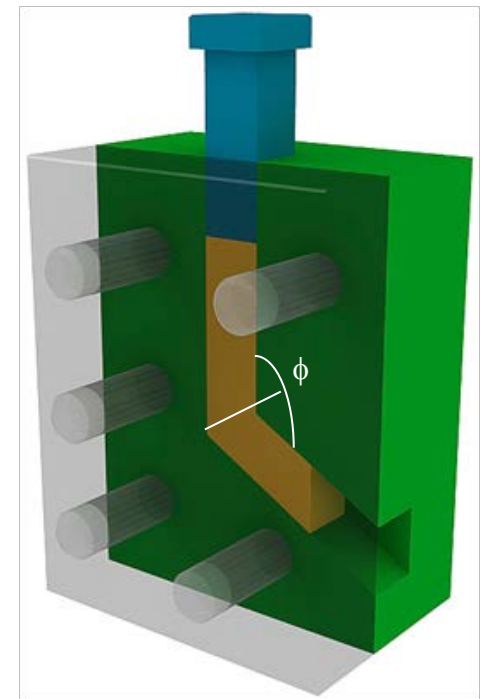
RCS este un procedeu discontinuu de deformare în care materialul este ondulat și îndreptat succesiv într-un ciclu repetitiv. Efectele procesului de deformare plastică severă depind în mod esențial de raza de racordare (r) a profilului după care este deformat semifabricatul.



Gradul de deformare
 $\varepsilon = 4 / \sqrt{3} \cdot \ln(r+t/r+0.5t)$

Procedeul ECAP (Equal Channel Angular Pressing)

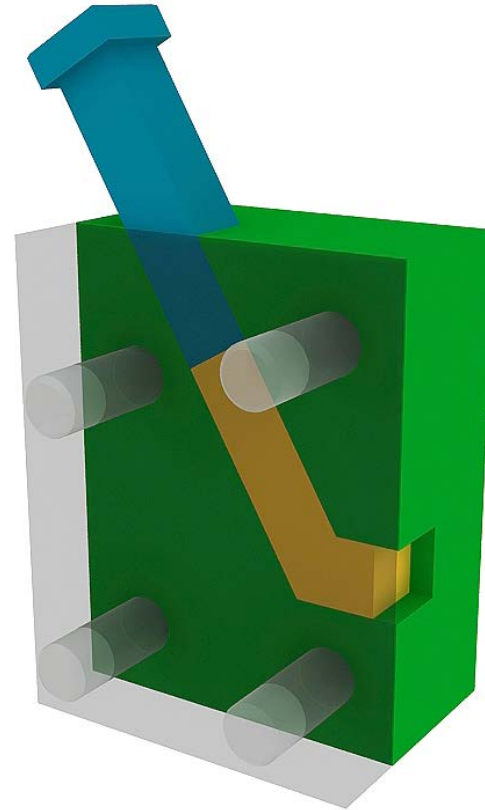
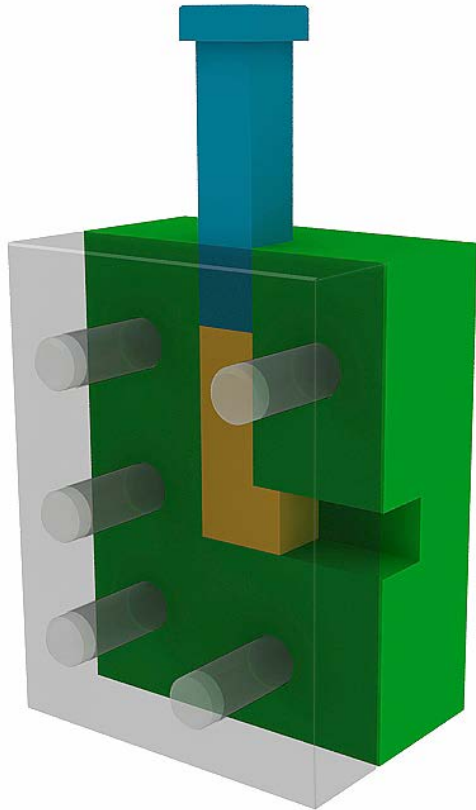
ECAP este un procedeu discontinuu de deformarea plastică a semifabricatului prin extrudarea într-o matriță cu canele unghiulare de secțiune constantă. Întrucât secțiunea transversală a semifabricatului rămâne aceeași, procesul poate fi reluat până la atingerea gradului de deformare impus. Finisarea granulației are loc prin forfecarea materialului în planul de intersecție al canalelor matriței.



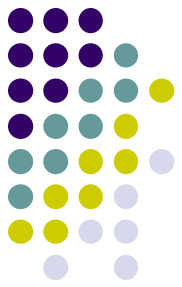
Gradul de deformare
 $\varepsilon = 2 / \sqrt{3} \cdot \text{ctg}(\phi/2)$



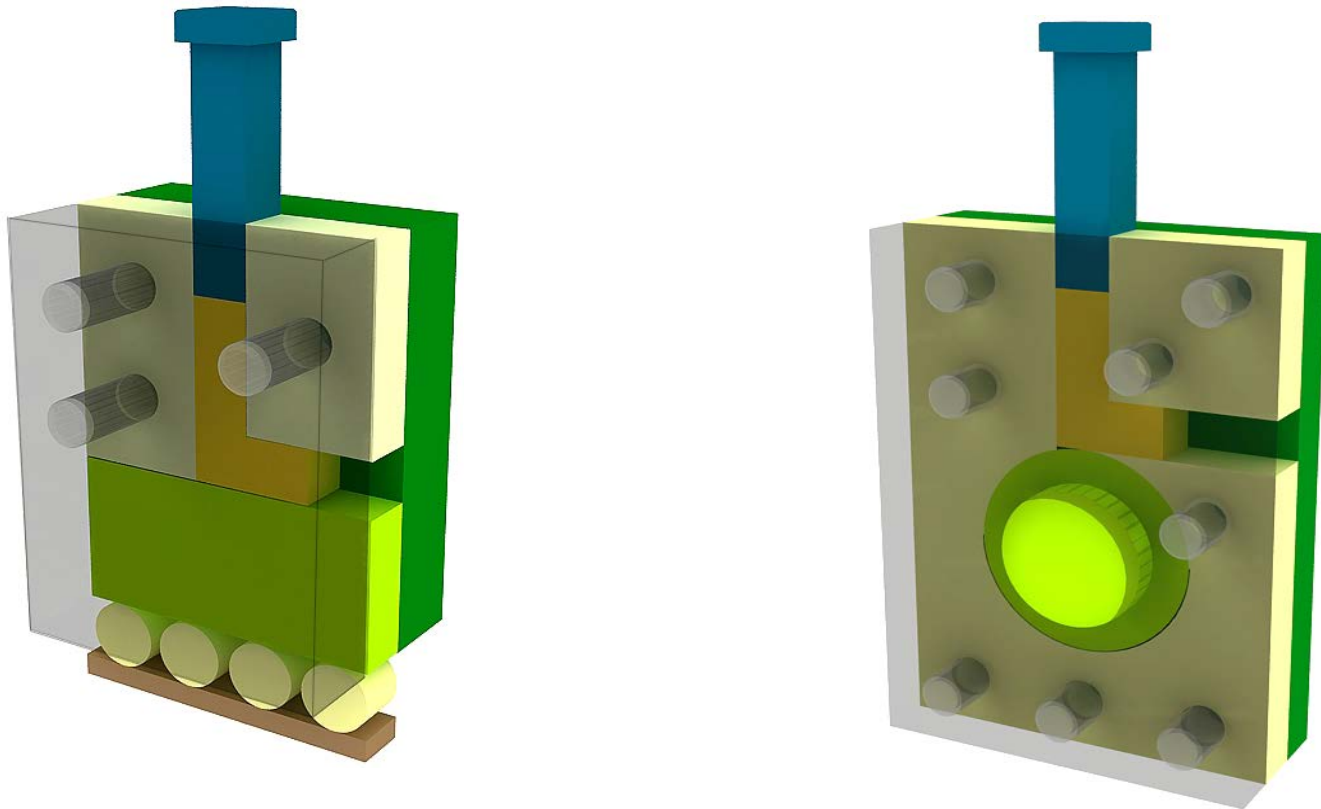
Variante tehnologice ECAP (1)



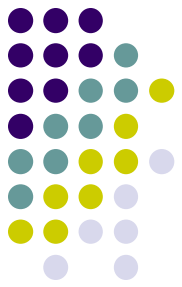
Devenit cel mai popular procedeu, ECAP a fost experimentat în cele mai multe variante constructive și tehnologice.



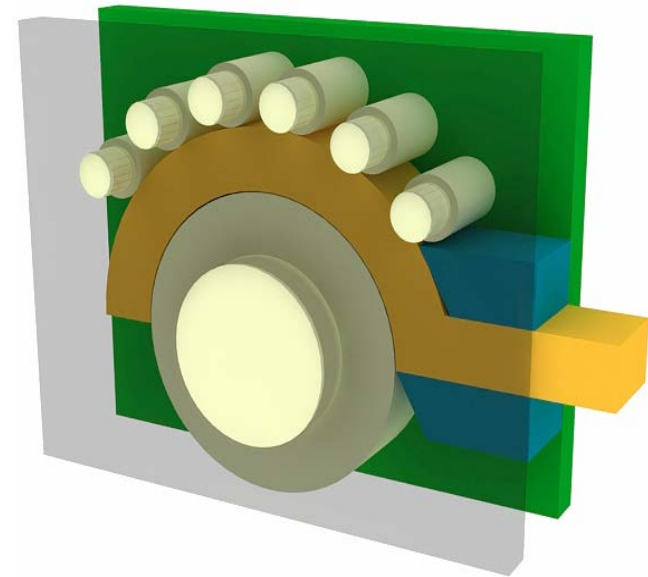
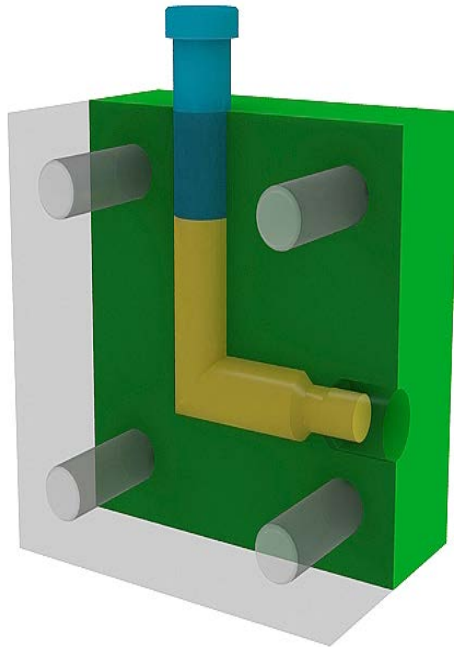
Variante tehnologice ECAP (2)



Micșorarea frecării prin utilizarea matrițelor cu pereți mobili sau cu elemente în mișcare de rotație a determinat noi soluții constructive



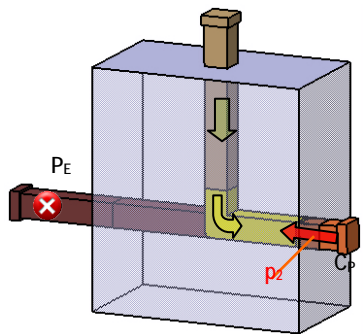
Variante tehnologice ECAP (3)



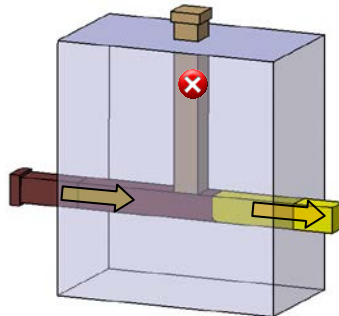
Tendința de a mări lungimea finală a semifabricatului a impus noi variante constructive ale procedului ECAP

Direcții de perspectivă

A1 Schema se bazează pe DPS în matriță *single pass* cu poanson pentru evacuarea probei P_E , ce elimină pierderea de material și un contra-poanson C_P care se deplasează odată cu materialul și care asigură echilibrarea tensiunilor de întindere prin contrapresiunea controlată p_2 .



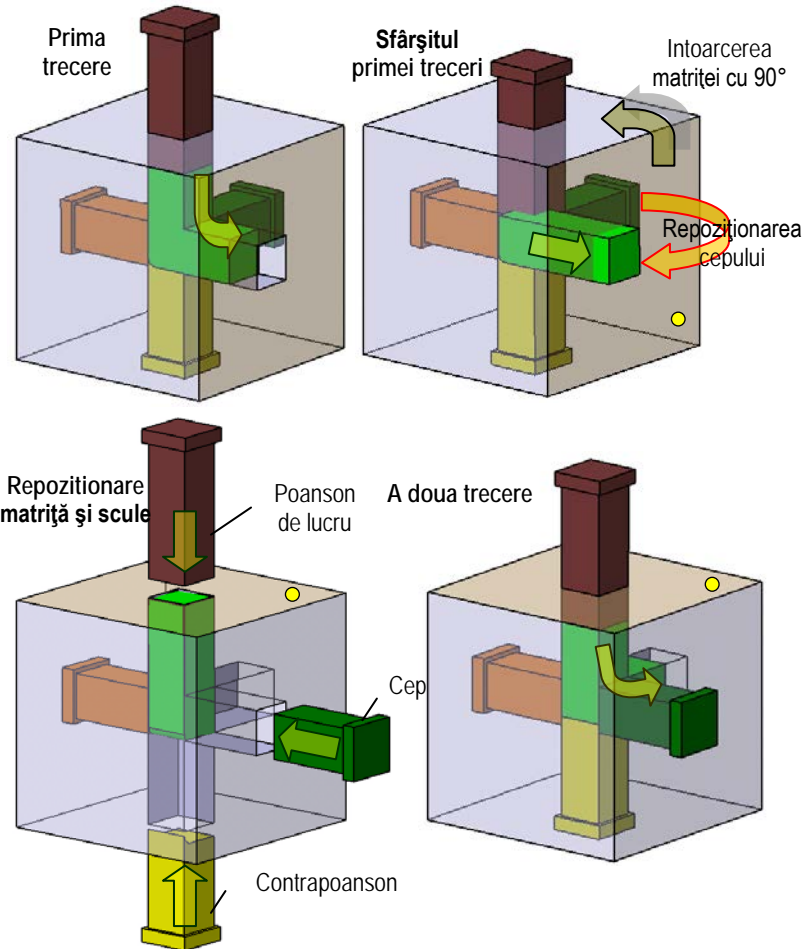
Faza deformării



Evacuarea semifabricatului

Matrița *single pass* cu piston de evacuare și contra-poanson

A2 Schema elimină operațiile între treceri: semifabricatul parcurge ciclul de deformare fără să părăsească matrița. Prin blocarea selectivă a canalelor se pot programa cicluri de deformare 4-8... treceri pentru toate variantele ECAP (A, B $\leq 90^\circ$, C $\leq 180^\circ$).



Matrița *multi-pass* pentru 4 treceri, B $\leq 90^\circ$ (ex: prima și a doua trecere)

ADOPTAREA VARIANTELOR SI SCHEMELOR DE DEFORMARE PLASTICA SEVERA



Proprietățile materialului

Plasticitate	Suficientă	CEC, stare de tensiune hidrostatică ⚠ forțe mari
	Bună	ECAP _{120°} , A, ARB, ⚠ grad redus pe trecere
	Foarte bună	ECAP _{90°} , B _C , matriță cu două coturi
Duritate	Ridicată	HPT ⚠ uzură mare a sculelor neuniformitate a deformației ➡

Condiții de deformare DPS

Proces continuu	O singură trecere	HPT ❌ doar discuri și inele
Proces discontinuu	Fără operații între treceri	ECAP _{90°,120°} , matriță cu două coturi ECAP _{90°,120°} , matriță fixă singlepass
	Cu operații între treceri	ECAP _{90°,120°} , matriță fixă multipass

Dimensiuni/tip semifabricat

O dimensiune > celelalte două (bare)	Secțiune circulară	ECAP _{90°,120°} , CEC ϕ 8 – 12mm
	Secțiune rectangulară	ECAP _{90°,120°} 8x8; 10x10; 12x12; 15x15mm
Două dimensiuni > a treia (table și discuri)	Secțiune rectangulară (table)	ARB, min 50%, g = 1 – 3mm
	Secțiune circulară (discuri)	HPT, d = 6-10mm, g = 0,8-1mm

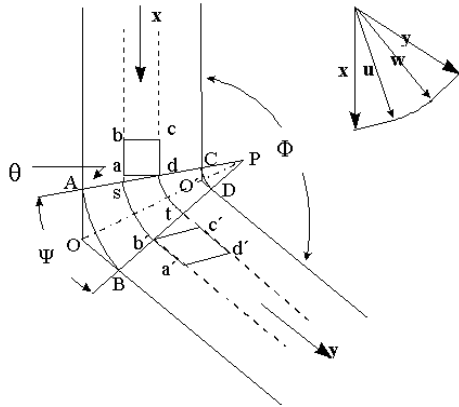
Scop/Nivelul finisării granulației

Proprietăți de rezistență ✓	$\epsilon_{min} = 4$	✓✓ ECAP _{90°,120°} , ARB, CEC, HPT
Superplasticitate	$\epsilon_{min} = 8$	✓✓ ECAP _{90°,120°} , ARB ➡, CEC, ⚠ HPT
Granulație nanometrică (d < 30nm)	$\epsilon_{min} = 12-16$	✓ CEC, HPT grade mari pe trecere

➡ mediu; ➡ acceptabil; ⬇ scăzut; ✓ bun; ✓✓ foarte bun; ⚠ cu precauție; ❌ interdicție.



Analiza procedeeului ECAP

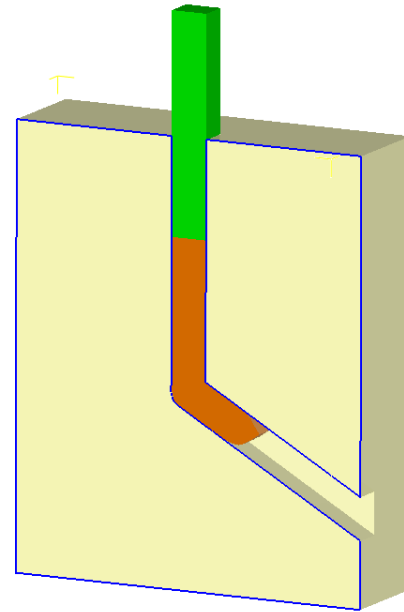


Gradul de deformare total

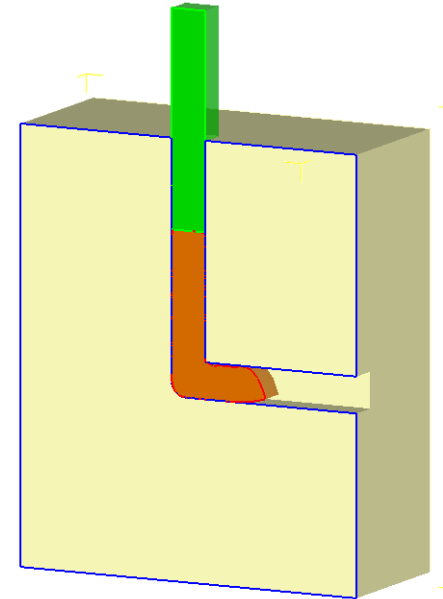
$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right]$$

Viteza de deformație

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \frac{l\sqrt{2}}{w\Psi}$$



Canale intersectate la 120°



Canale intersectate la 90°

Gradul și viteza de deformație depind fundamental de geometria matriței: ECAP₉₀ → ε = 1.15; ECAP₁₂₀ → ε = 0.67

MATERIALE DESTINATE DEFORMARII PLASTICE SEVERE PRIN PROCEDEUL ECAP

Al (Al-Cu, **Al-Mg**, Al-Zn)

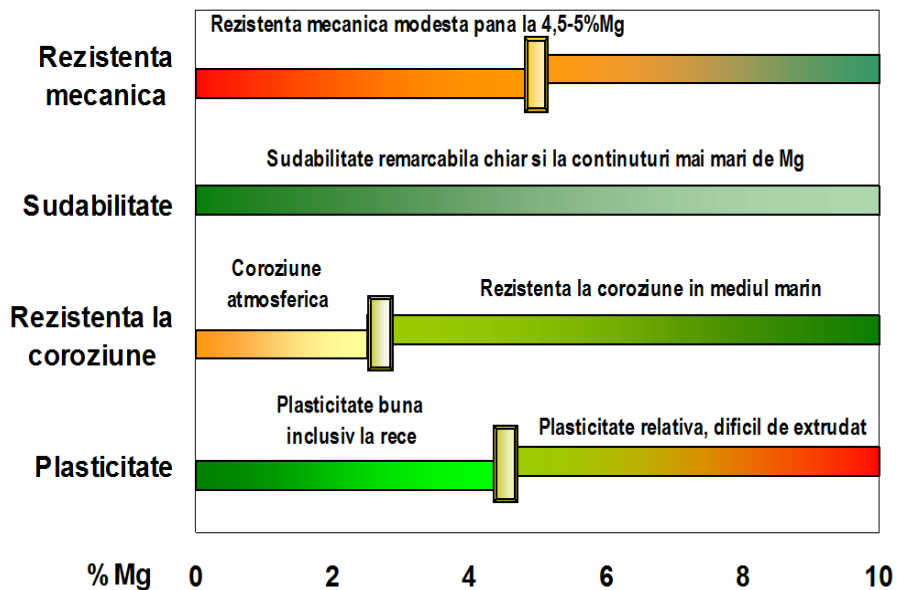
Cu (Cu-Zn Cu-Cr-Zn)

Mg (Mg-Zn, Mg-Al)

Zn (Zn-22Al)

Principalele criterii în stabilirea compoziției chimice

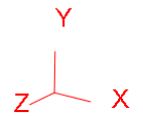
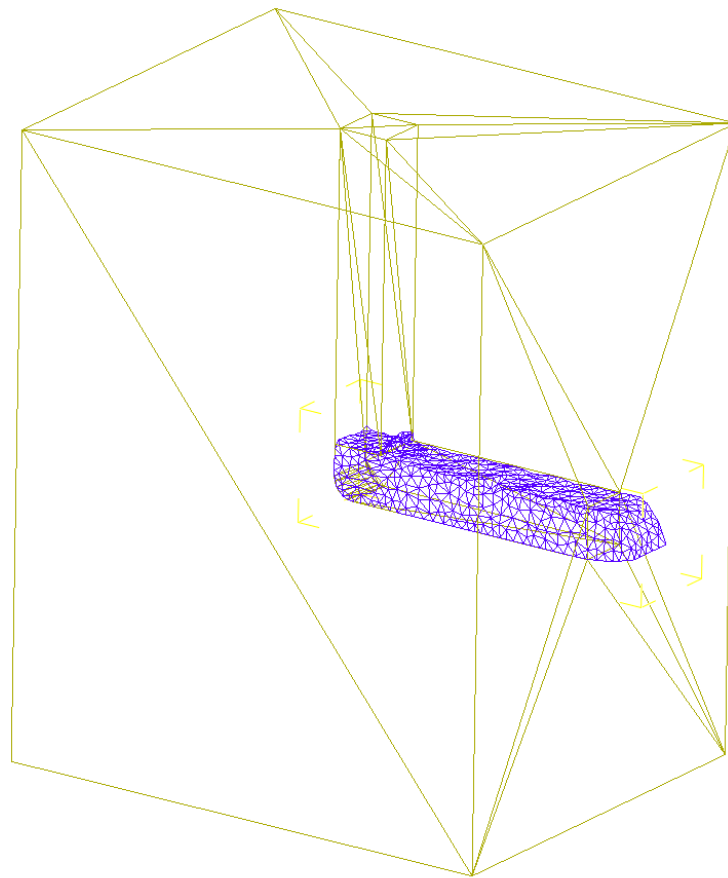
Aliajele Al-Mg constituie clasa 5xxx și nu pot fi durificate prin îmbătrânire.



Aliaje Al-Mg comerciale: caracteristici generale

Simbolizare	5005	5049	5052	5083/5086	5754
Proprietăți	0.8Mg	2Mg 0.8Mn	2.5Mg, Cr	4.5Mg0.7Mn/ 4Mg0.5Mn	3.1MgMnCr
Rezistență mecanică	↓	→	→	✓	✓
Sudabilitate	✓	✓	✓	✓	✓
Rezistență la coroziune	atm. ✓	✓	✓ ✓	✓ ✓ mediu marin	✓ ✓
Plasticitate	✓ ✓	✓ ! Mn	✓ ✓ la rece	→ ! extrudare	→
	→ mediu;	→ acceptabil;	↓ scăzut;	✓ bun;	✓ ✓ foarte bun

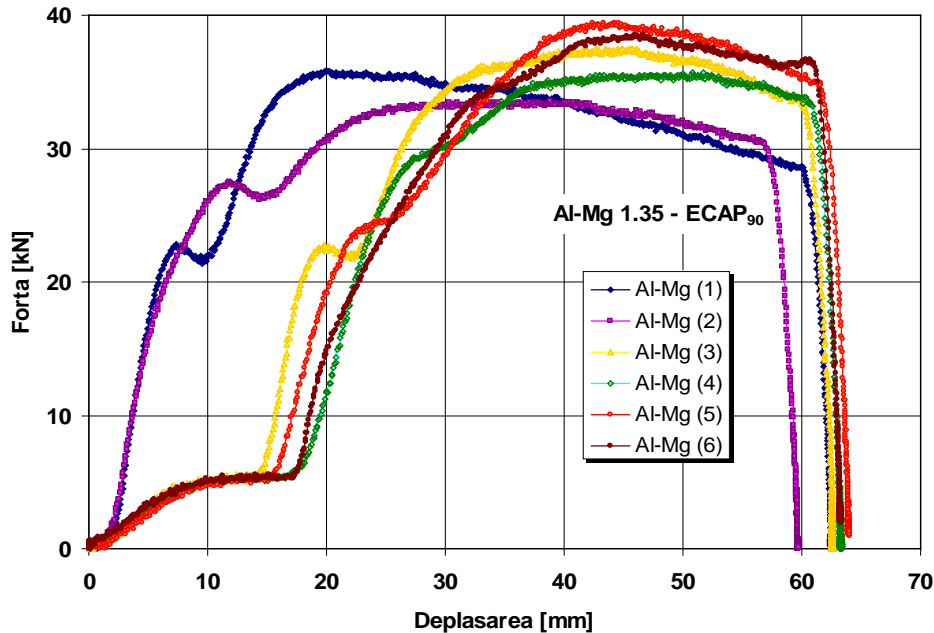
How it works?



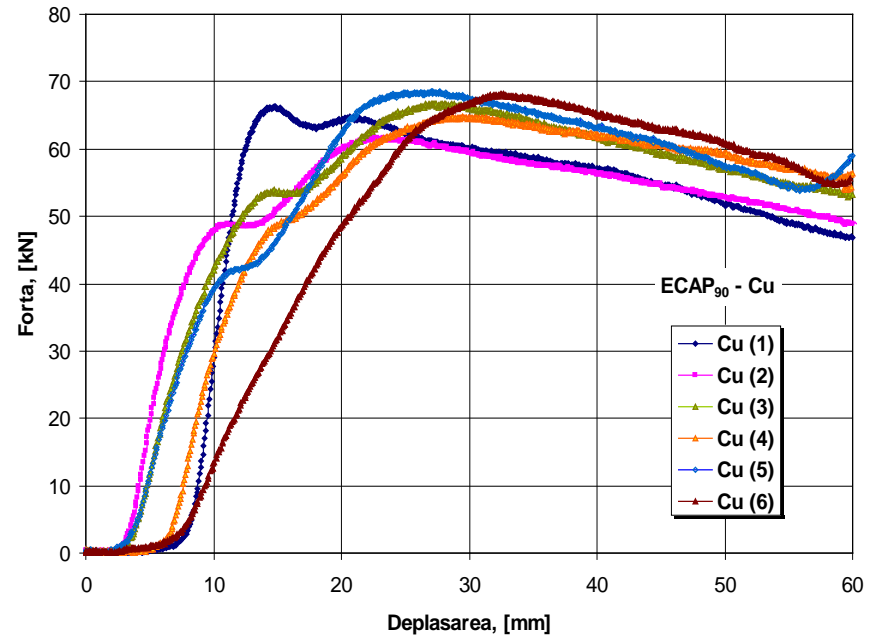
ECHIPAMENT SI SCULE DE DEFORMARE



Obsesia echipei: se ecrusează sau nu?



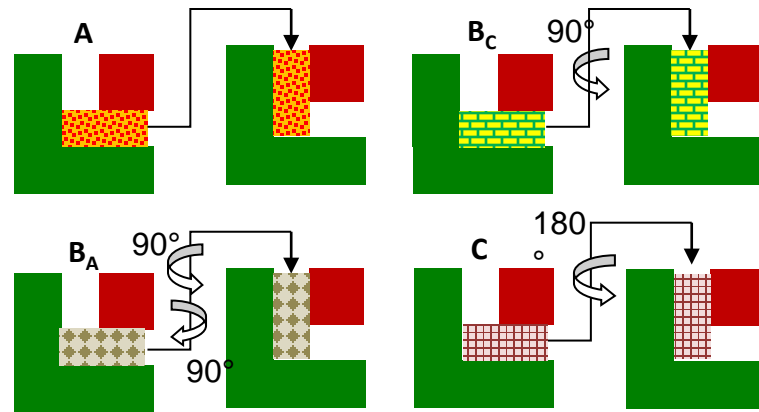
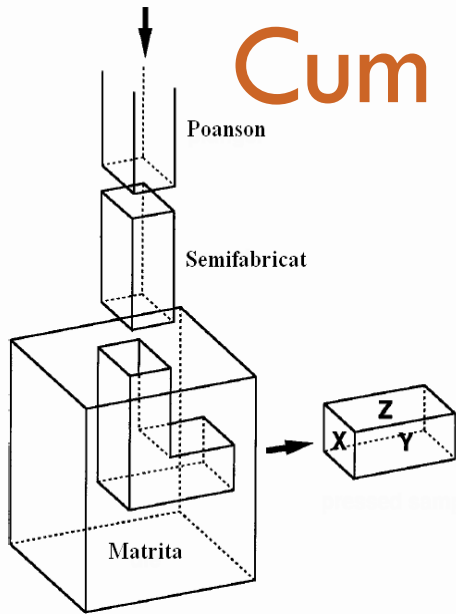
Aluminiu 1.35% - ECAP₉₀



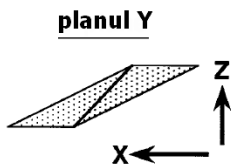
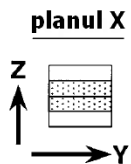
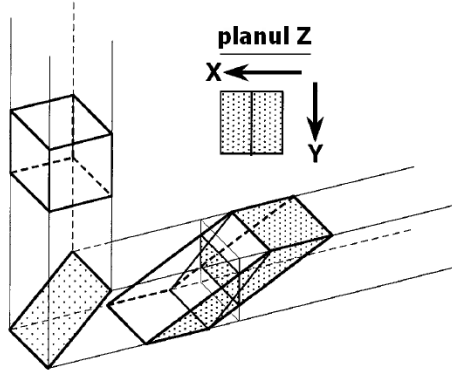
Cupru - ECAP₉₀

Plasticitate prin intermediul dislocațiilor: ecrusare scăzută

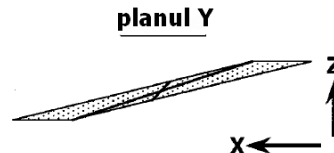
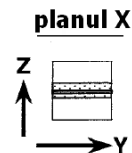
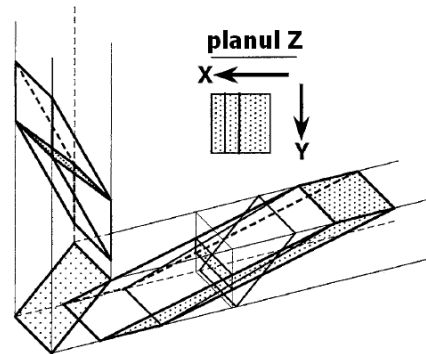
Cum are loc finisarea granulației



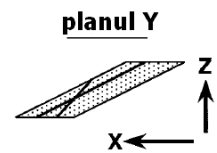
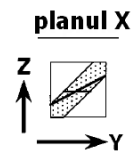
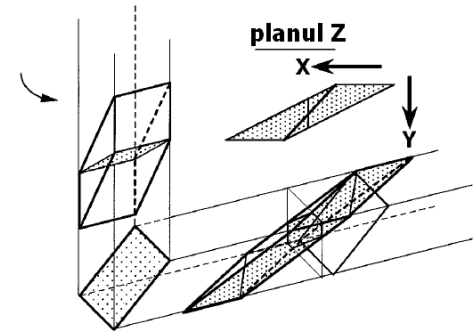
Prima trecere



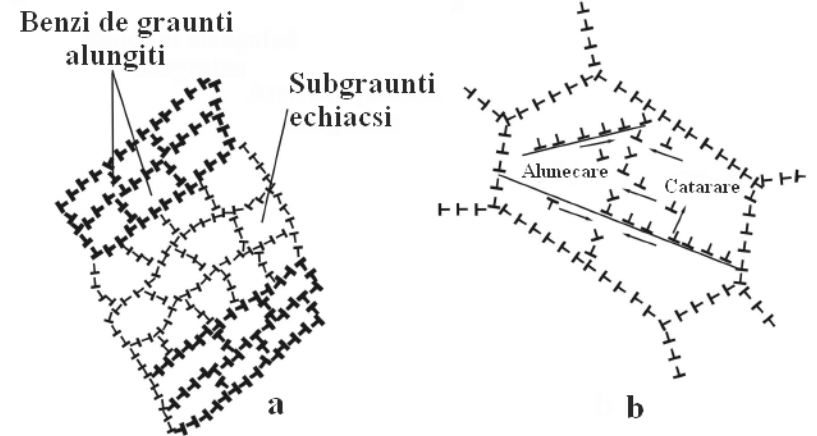
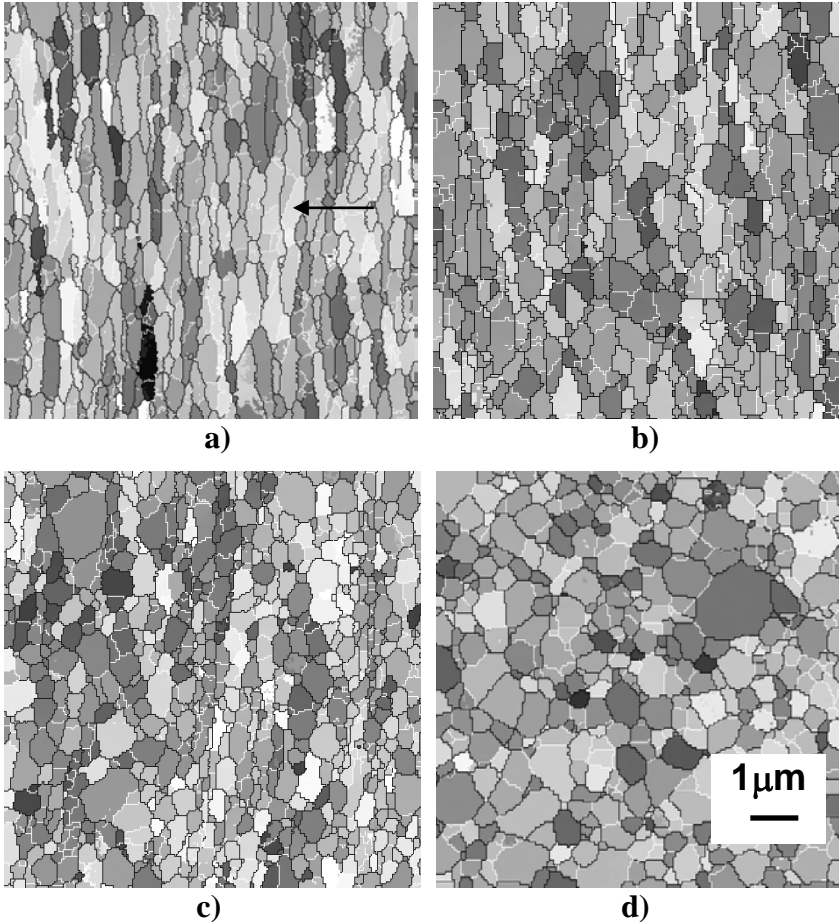
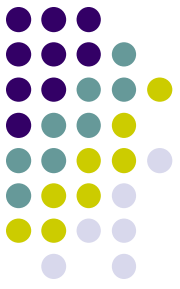
A doua trecere - schema A



A doua trecere - schema B

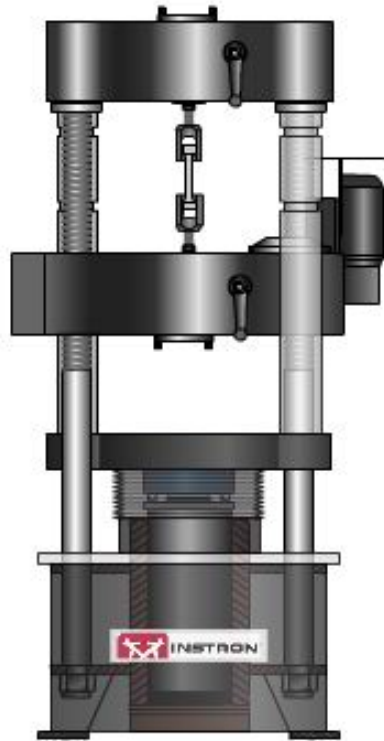


Stabilitatea granulației la cald



Structura aliajului Al-0,13%Mg prelucrat ECAP, 10 treceri și recopt 1h/125 – 300°C:
a) 125°C; b) 150°C; c) 175°C; d) 300°C.

Rezultate

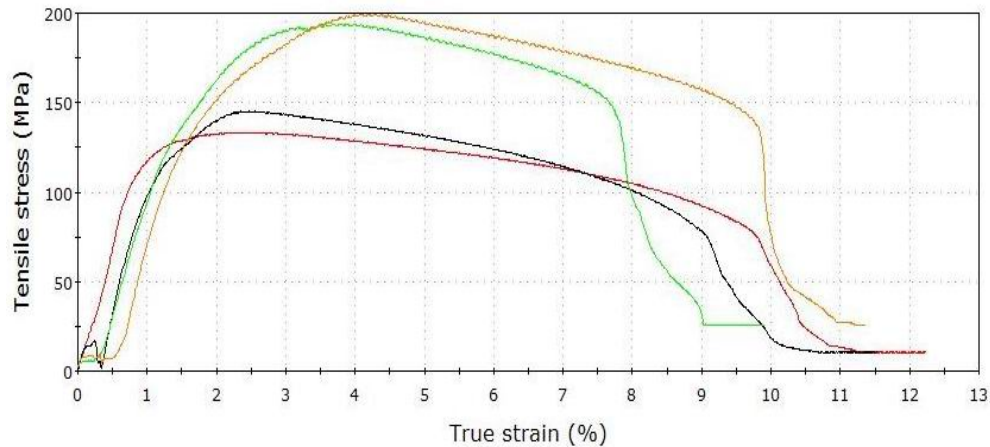


Limita la rupere poate crește în medie de trei ori, ca urmare a finisării granulației !!!

În același timp, alungirea la rupere și tenacitatea se păstrează în limite rezonabile.

Se obțin premisele superplasticității la viteză de deformare mare, ceea ce permite aplicații industriale cu grade de deformare deosebite.

Crește limita la oboseală de cca. două ori.

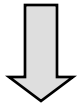


Al99.5% nedeformat:

$$R_m = 67,09 \text{ MPa}$$

$$R_{p0.2} = 49,32 \text{ MPa}$$

$$A_u = 33,63\%$$

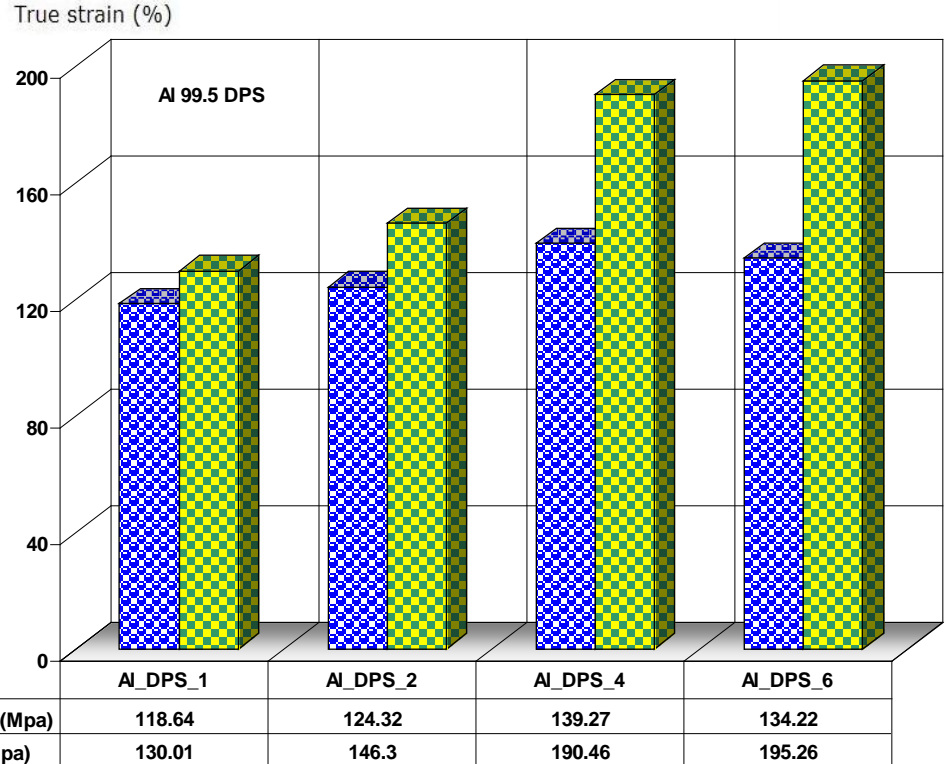


Al99.5% DPS_6 treceri:

$$R_m = 195,26 \text{ MPa}$$

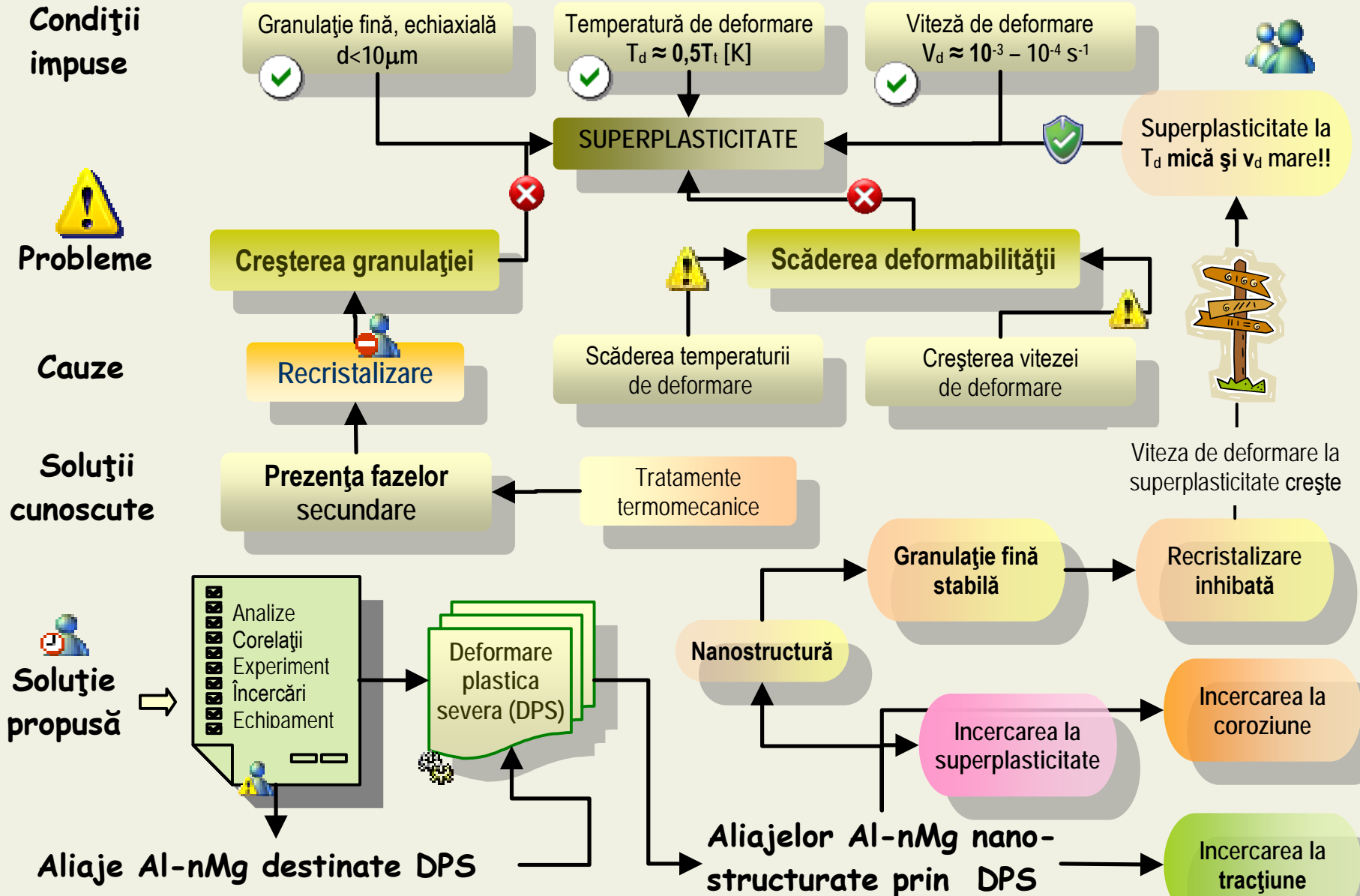
$$R_{p0.2} = 134,22 \text{ MPa}$$

$$A_u = 10,92\%$$



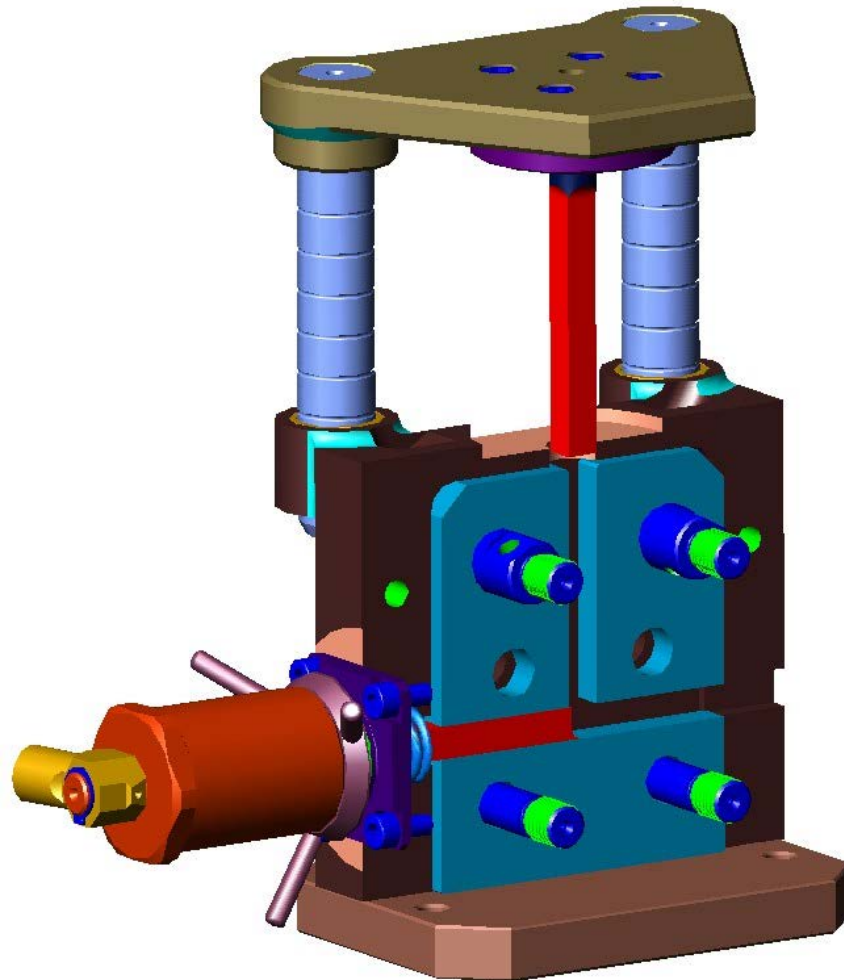
Rezultate experimentale – Al99,5%

SUPERPLASTICITATE

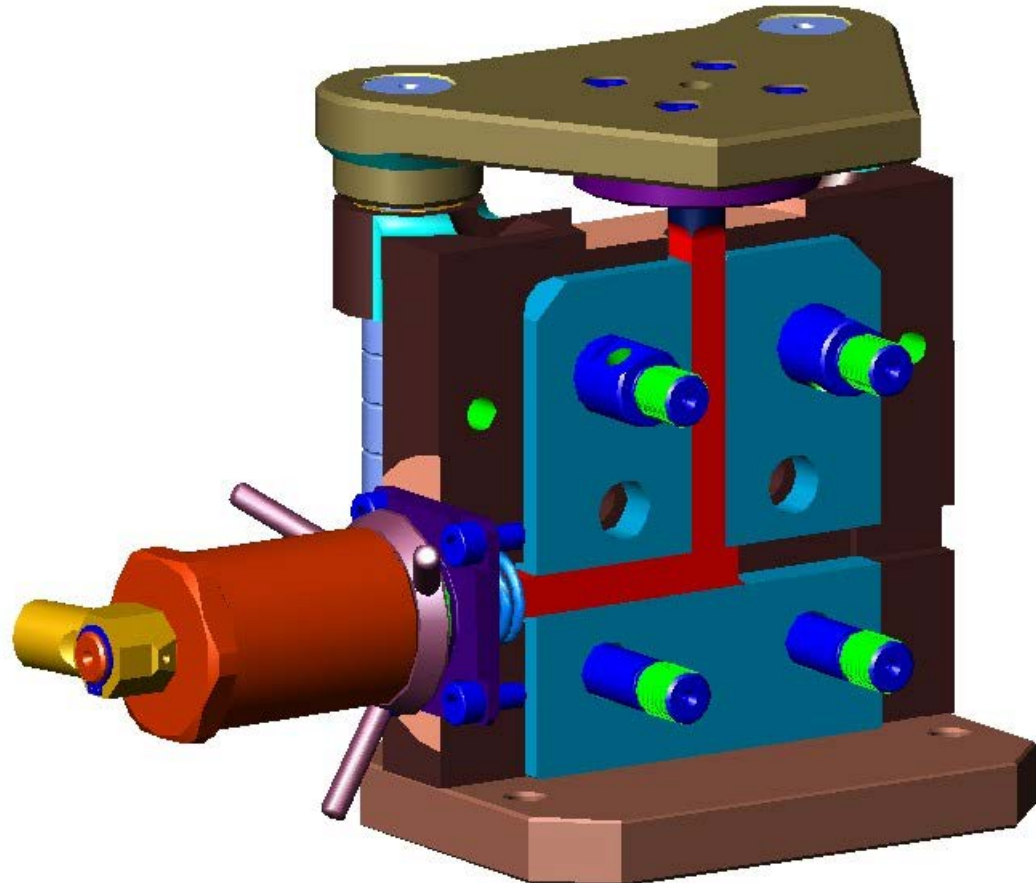


Inventie:

Matrița single-pass cu poanson de extragere



How it works?



Bibliografie

1. S.A., Burnhanettin, Severe Plastic Deformation: towards bulk production of nanostructured materials, 2006, Nova Science Publishers, New York, 612p
2. R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation, 2000, Logos Publisher, Moscow, 272 p
3. M. Furukawa, Z. Horita, T.G. Langdon, Processing by ECAP: applications to grain boundary engineering, Journal of Mat. Sci, 40, 2005, pp. 909-917
4. N. Tsuji, Y. Ito, Y. Sayto, Y. Minamino, Strength and Ductility of Ultra-fine Grained Aluminium and Iron produced by ARB and aneling, Scripta Mater. vol. 47, no.12, 2002, pp. 893-899
5. O. Sitdikov, A. Goloborodko, H. Miura, Grain Refinement in as-cast 7475 Al Alloy under Hot Multiaxial Deformation, 2003, Mater. Sci. Forum, Vols. 426-432, 381-386
6. G. Sakai, K. Nakamura, Z. Horita, T.G. Langdon, Application of High Pressure Torsion to Bulk Samples, Mater. Sci. Forum, 2006, Vols. 503-504, 391-398
7. Li, S., Bourke, M.A.M., Beyerlein, I.J., Finite element analysis of the plastic deformation zone and load in equal channel angular extrusion, 2004, Mater. Sci. Eng. A, 382, 217-236



CONTROLUL DEFORMARII PLASTICE PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT

Ce este metoda elementului finit?

- O metodă de evaluare a mărimilor de proces și a rezultatelor estimate
- Ce se poate afla din analiza cu element finit a unui proces de deformare plastică?

Forțe

Tensiuni

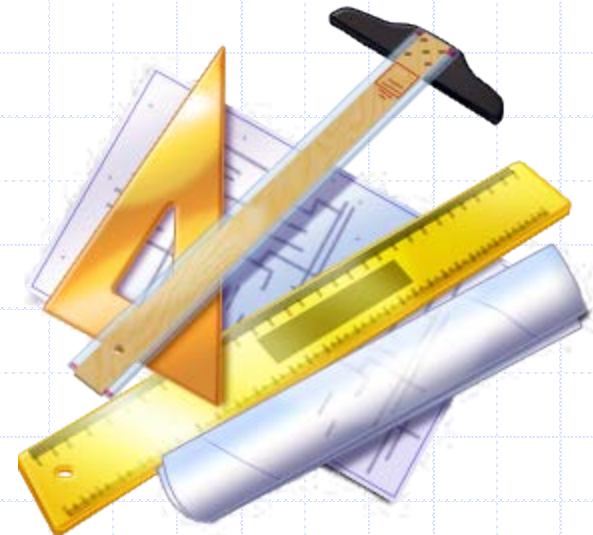
Viteze

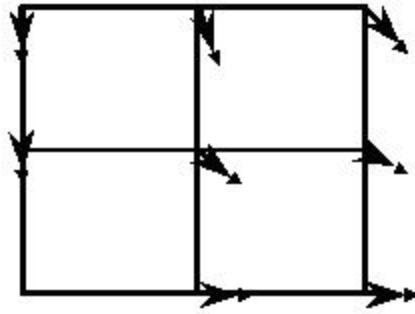
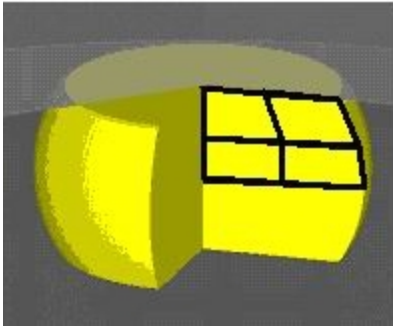
Deformații

Temperaturi

Mărimi de grăunte

Durități





Cum funcționează?

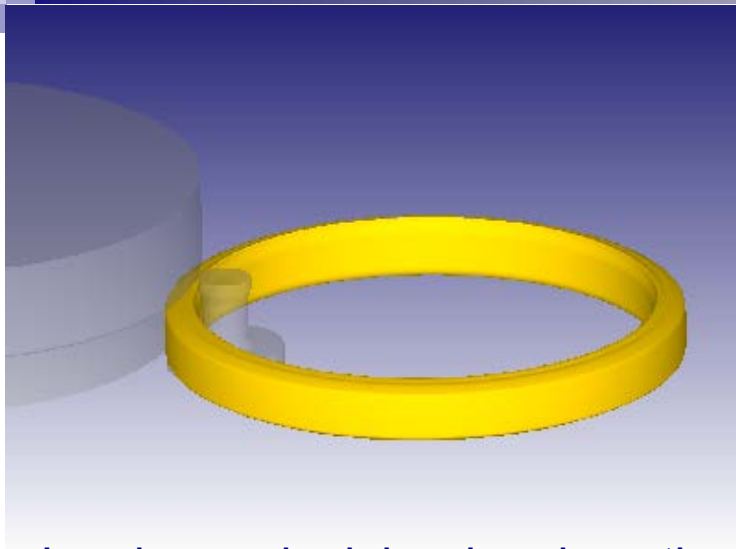


- Materialul este discretizat în elemente finite mărginite de muchii și noduri
- Fiecărui nod îi corespunde o deplasare (deformație) cu o anumită viteză (de deformație)
- Metoda elementului finit analizează deformarea plastică prin estimarea câmpurilor de deformații și viteze de deformații din material
- Tensiunile se calculează utilizând relațiile $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ în baza unor ipoteze de calcul și a proprietăților materialului

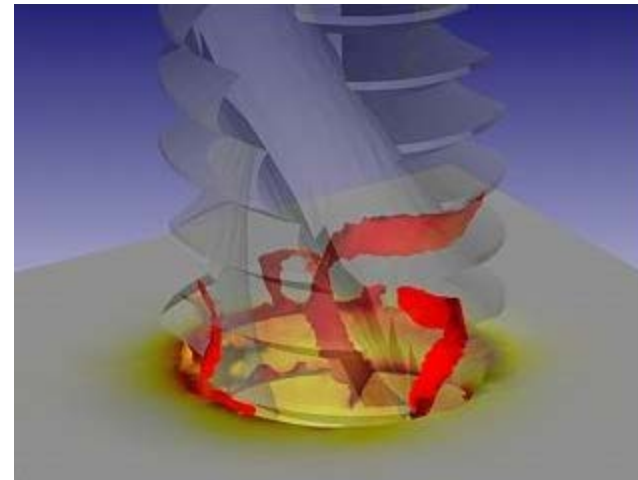
Ce trebuie știut?



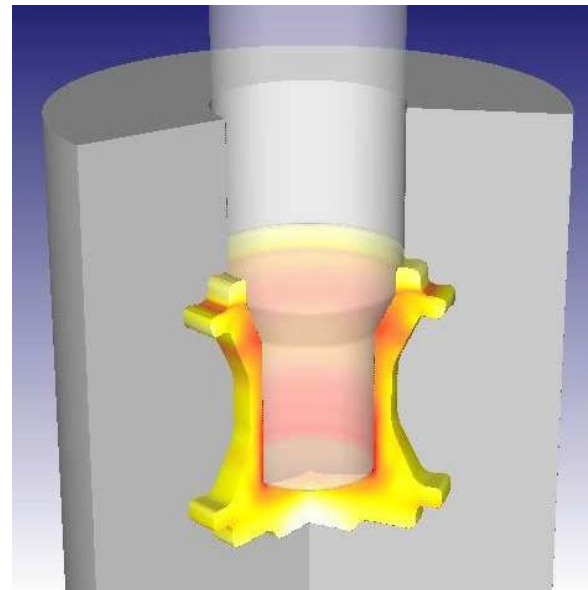
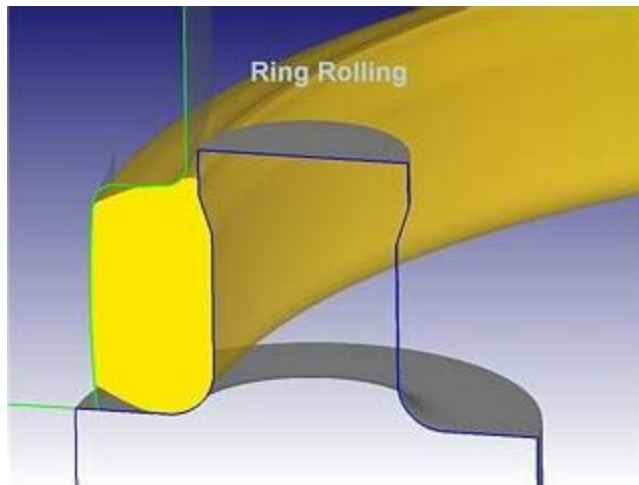
- ◆ Proprietățile materialului
- ◆ Parametrii tehnologici
- ◆ Schema de lucru
- ◆ Sculele de deformare
- ◆ Dimensiunile și forma piesei finite



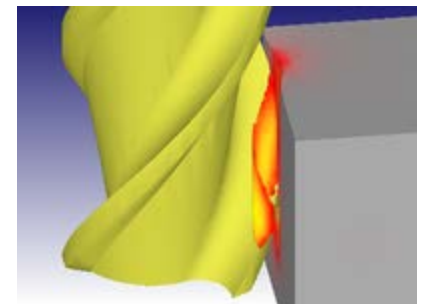
Laminarea inelelor de rulmenți

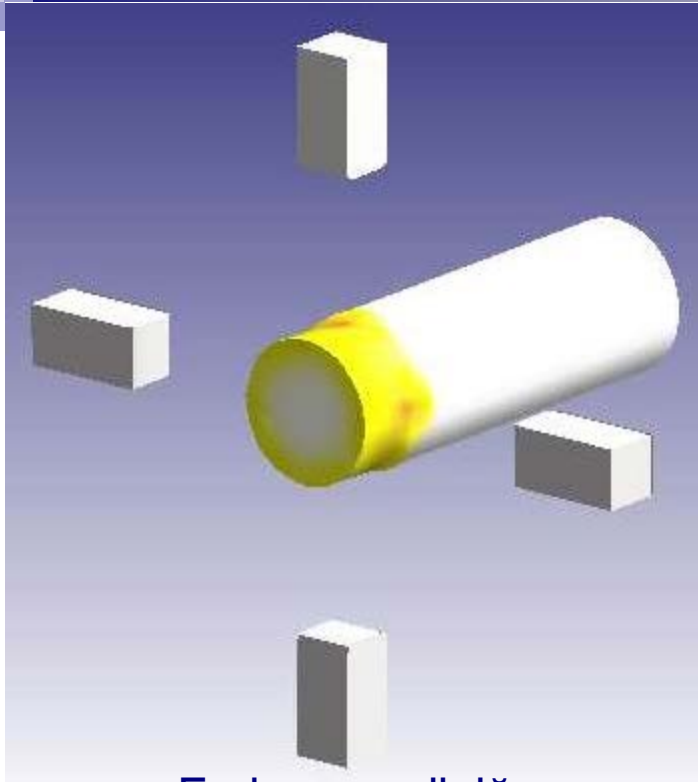


Prelucrări prin așchiere

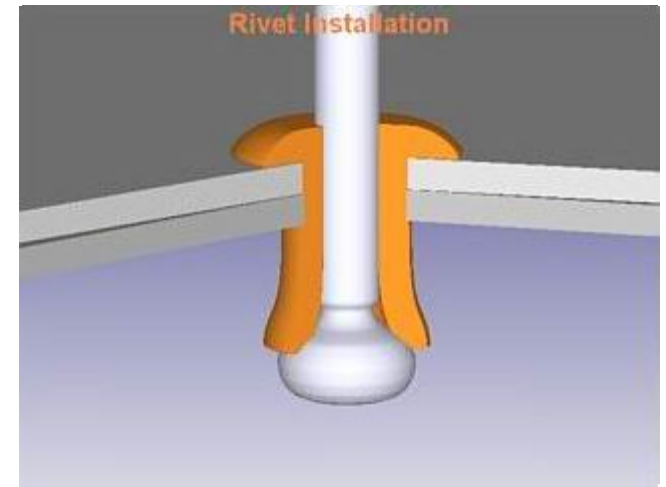


Forjarea în matriță

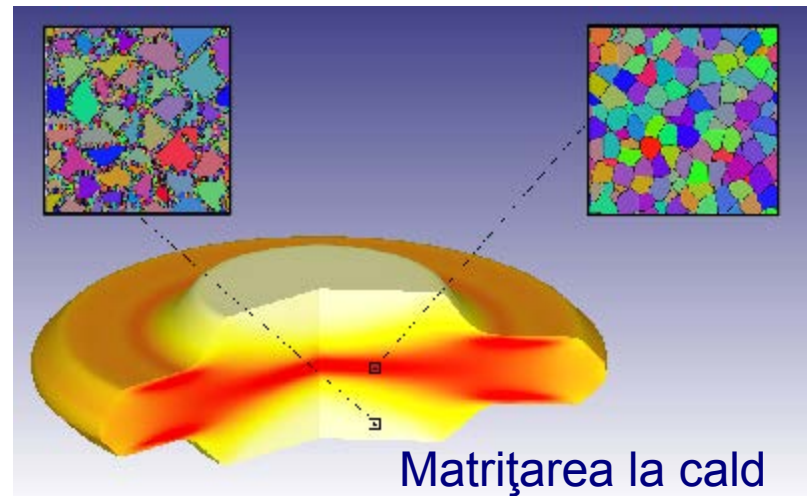
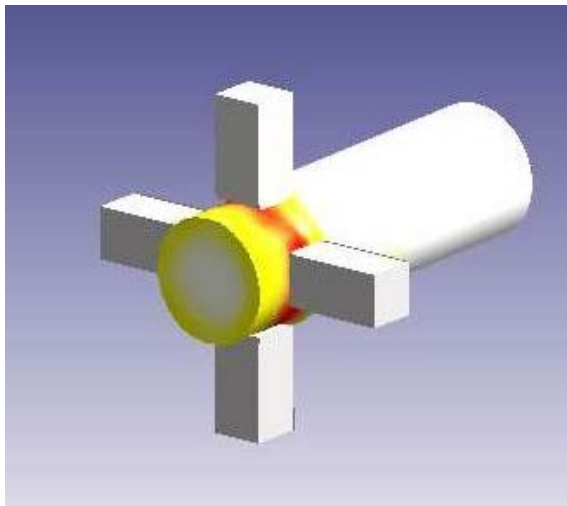




Forjarea radială



Nituirea



Matrițarea la cald

Ce programe de analiză cu element finit sunt cele mai potrivite?

SuperForm – www.mscsoftware.com

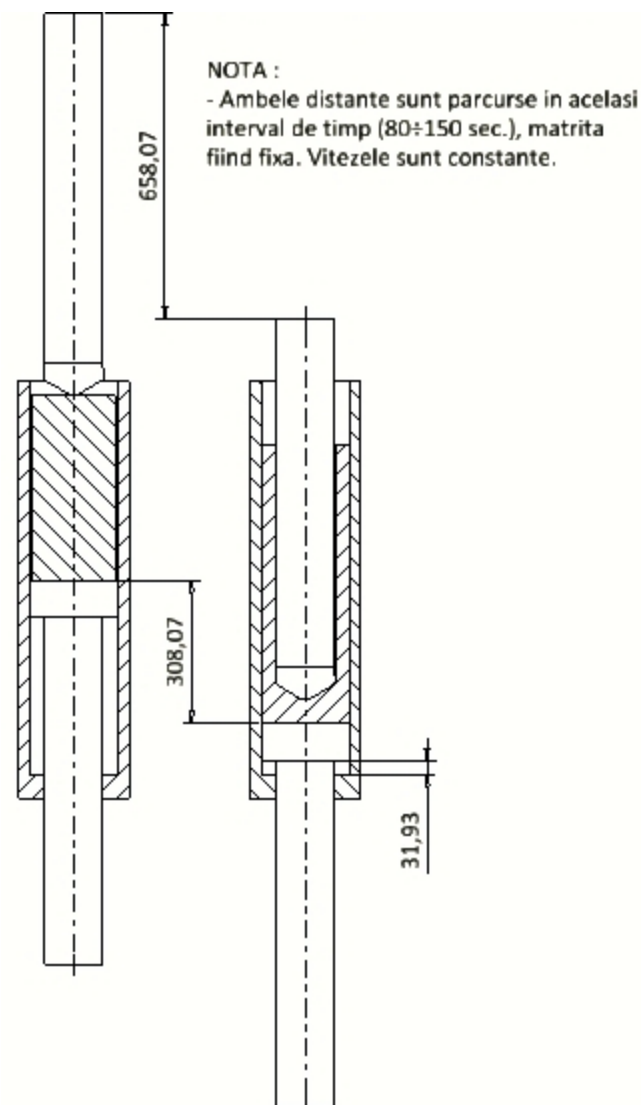
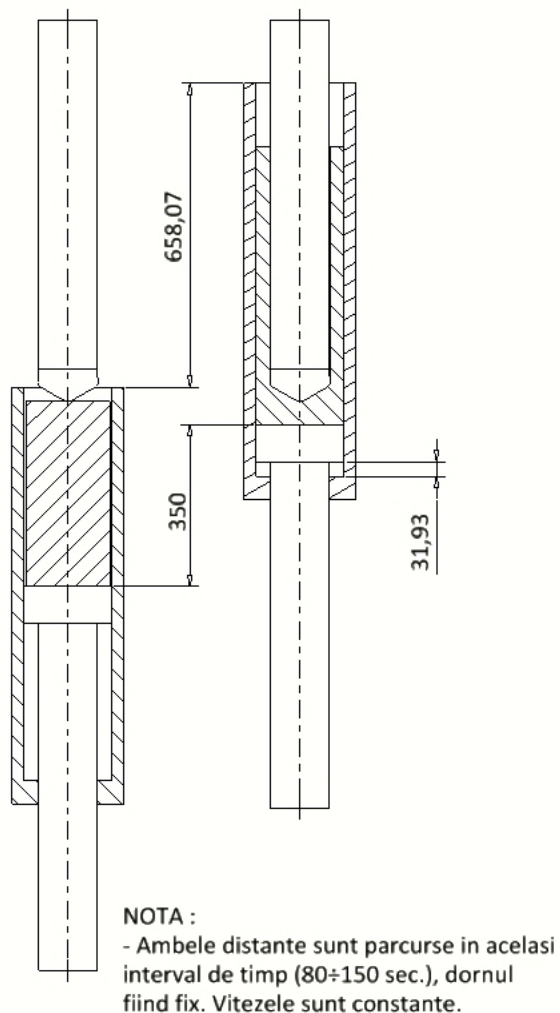
Deform 3D – www.deform.com

SimuFact – <http://simufact.de/en>

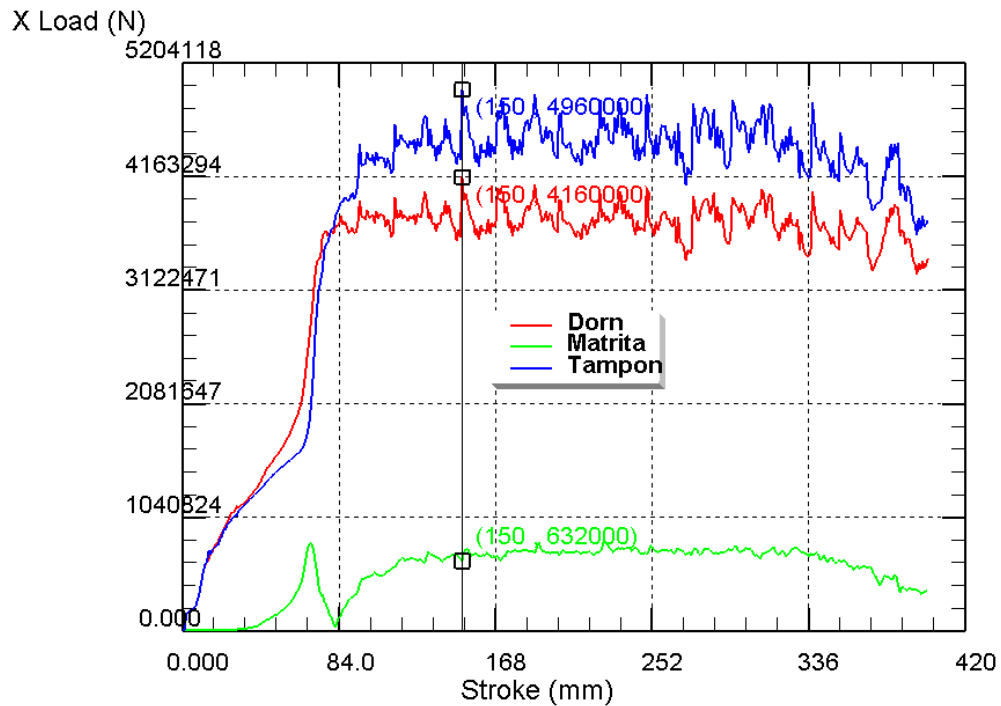
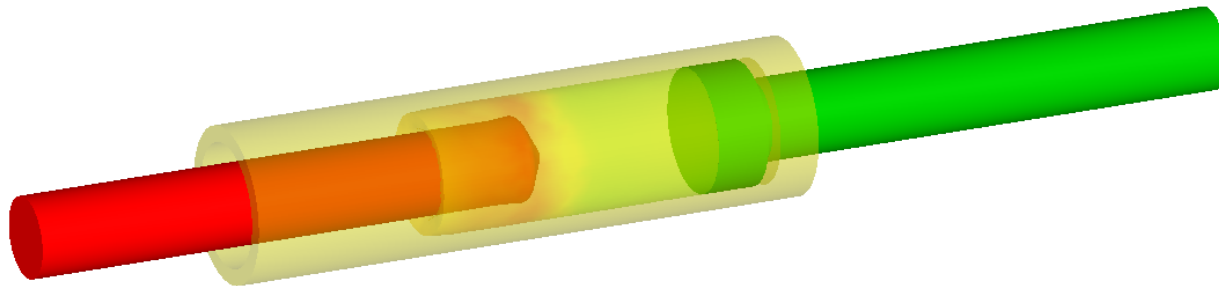


Programele menționate sunt dedicate
îndeosebi prelucrării prin deformare plastică

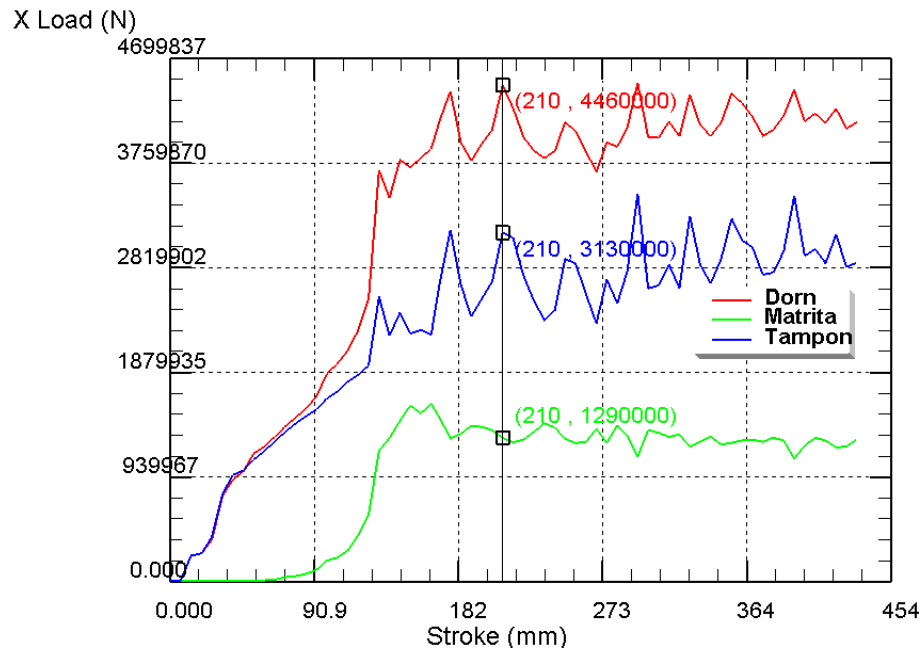
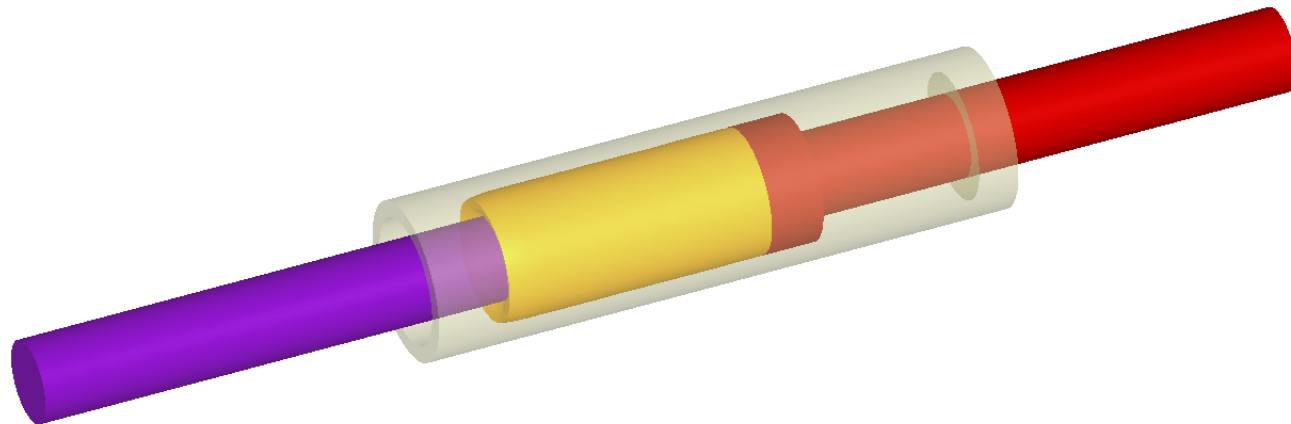
De la idee la proiect



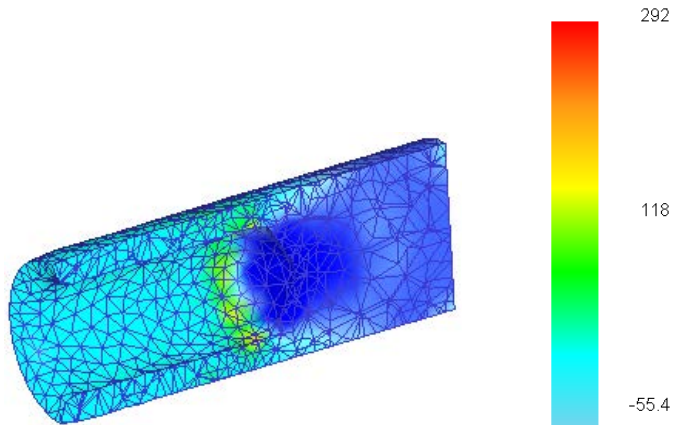
Forța de extrudare/dorn mobil/matriță fixă (1)



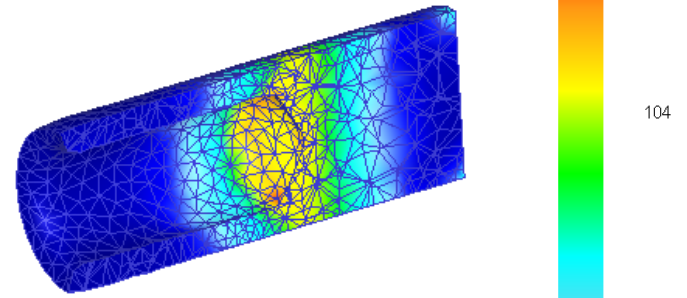
Forța de extrudare/dorn fix/matriță mobilă (2)



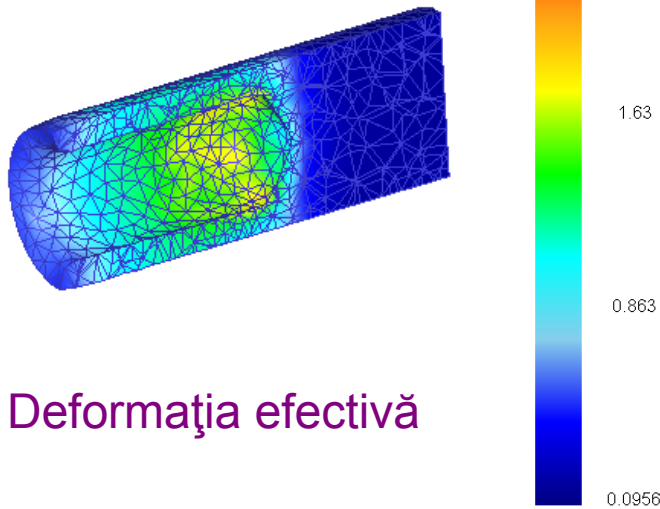
Analiza procesului de deformare



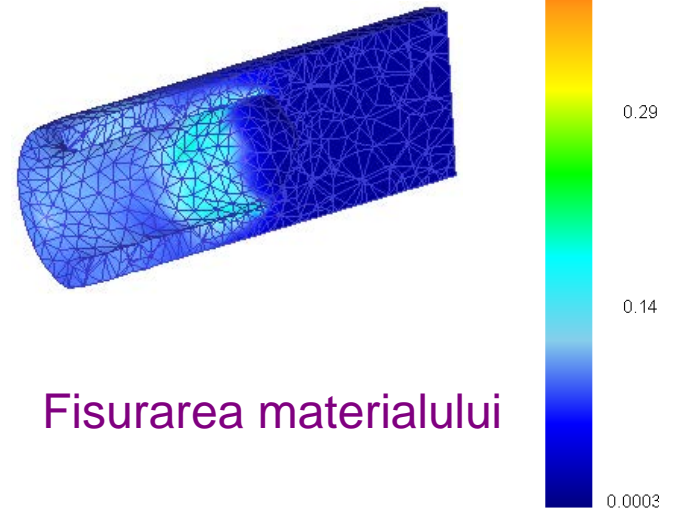
Tensiunea max. princ.



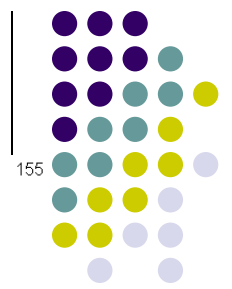
Tensiunea efectivă



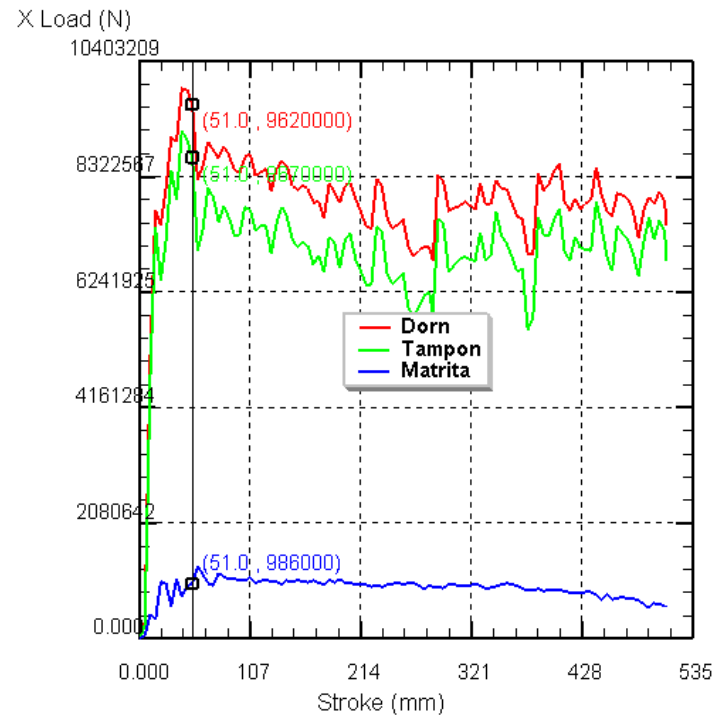
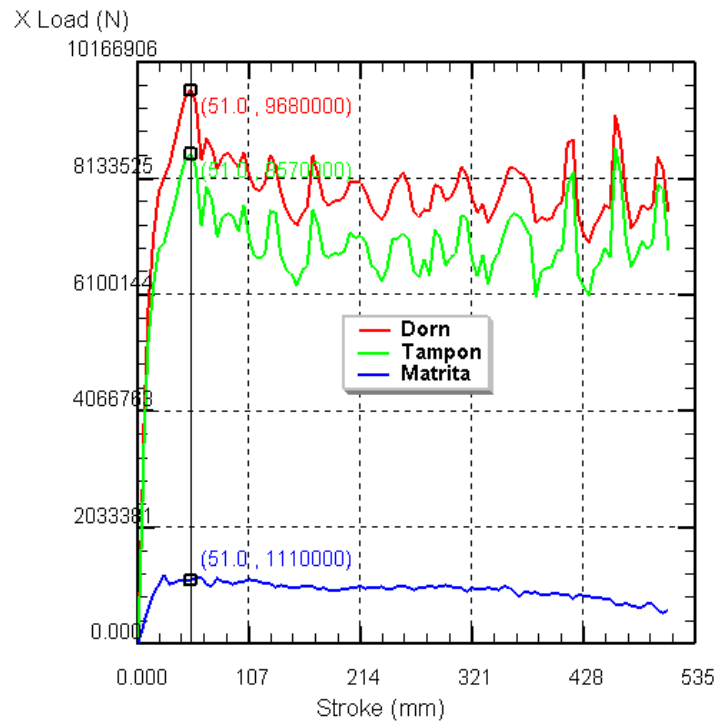
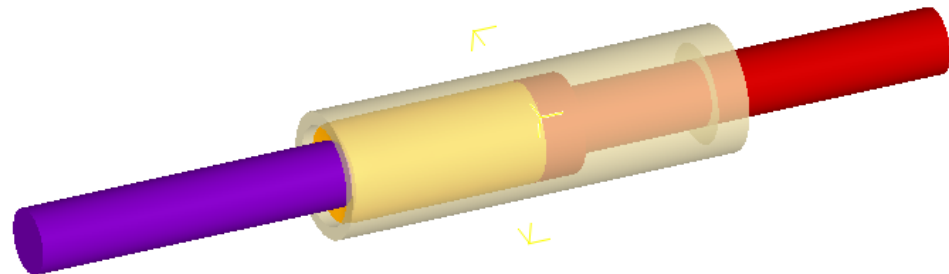
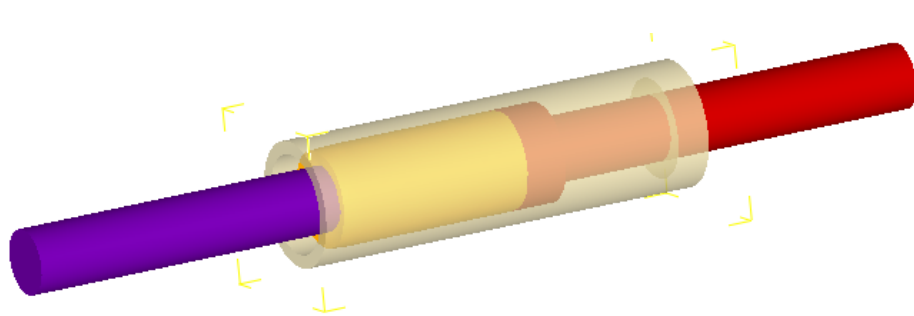
Deformația efectivă



Fisurarea materialului

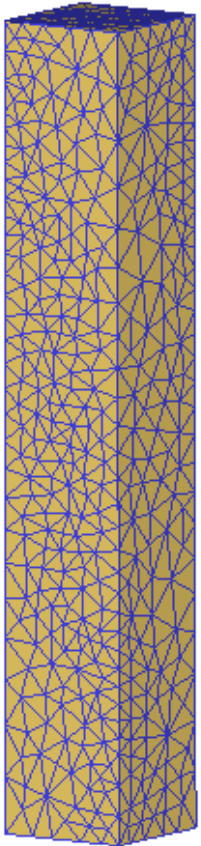


Analiza parametrilor de proces



Practica analizei cu element finit

Execuția 3D a ansamblului de deformare și discretizarea în elemente finite a semifabricatului

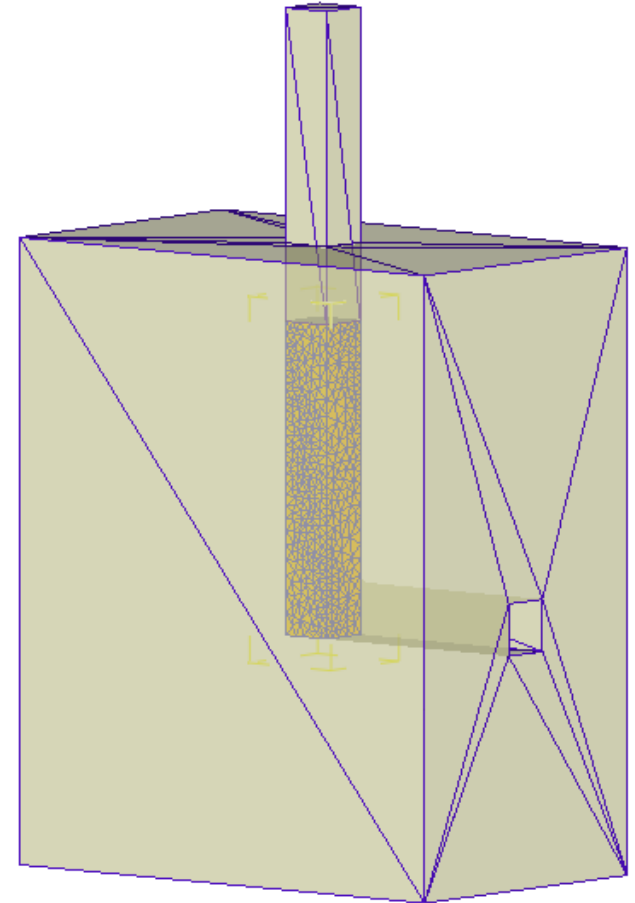


Summary

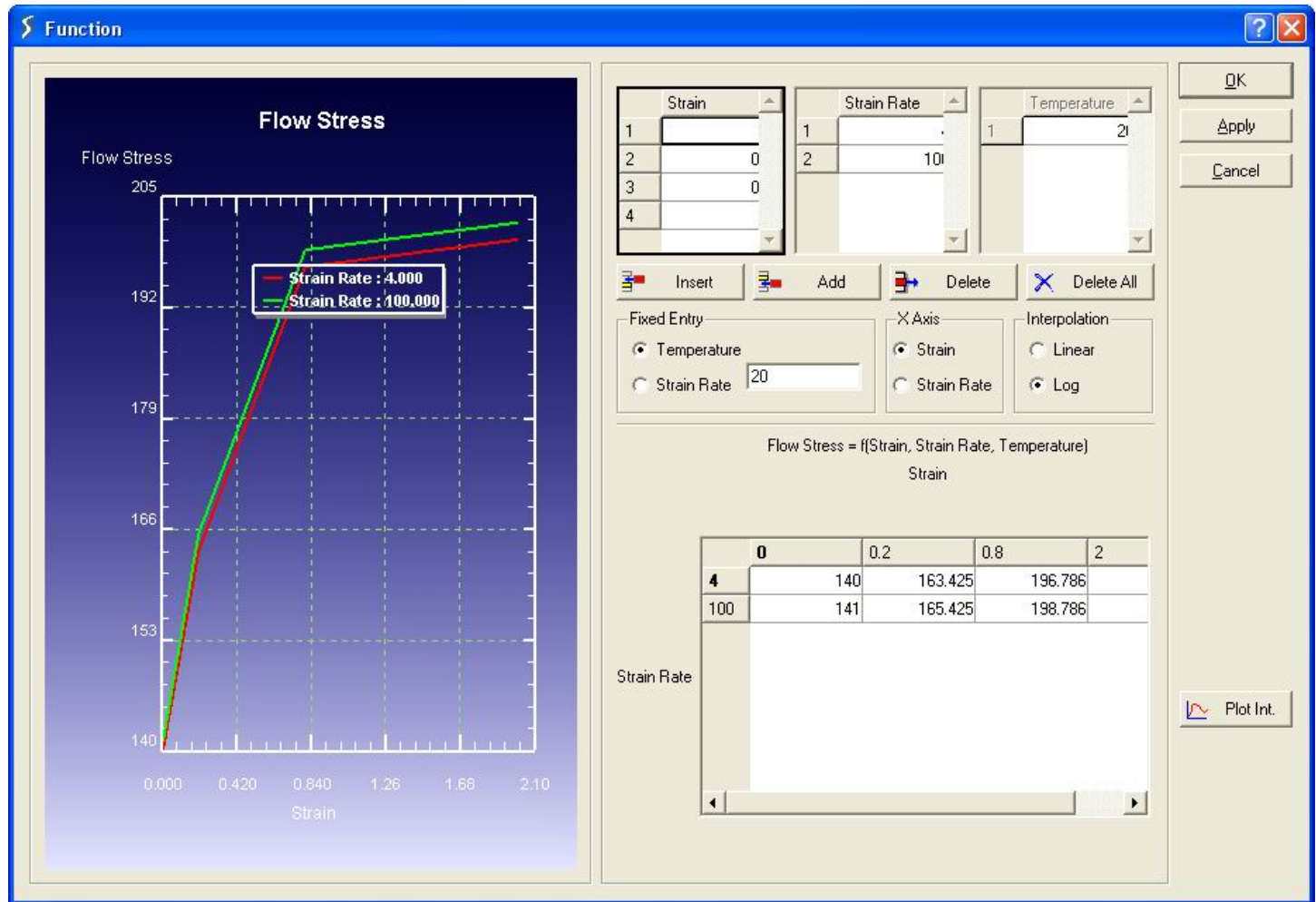
Number of: Nodes	1278	Elements	4930
Surface Polygons	1624		

Number of Elements

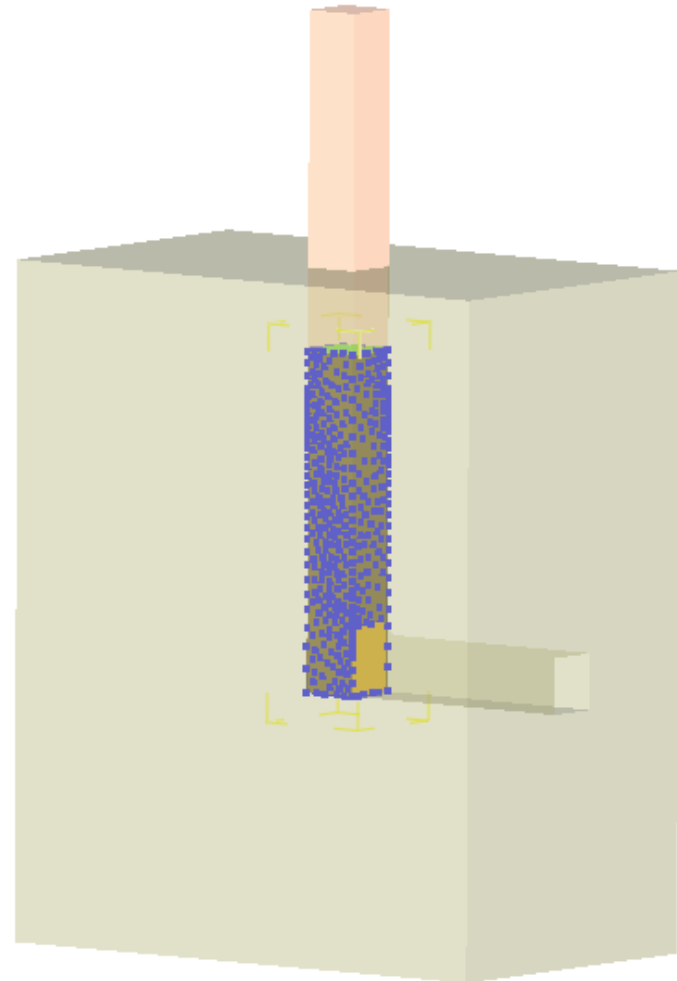
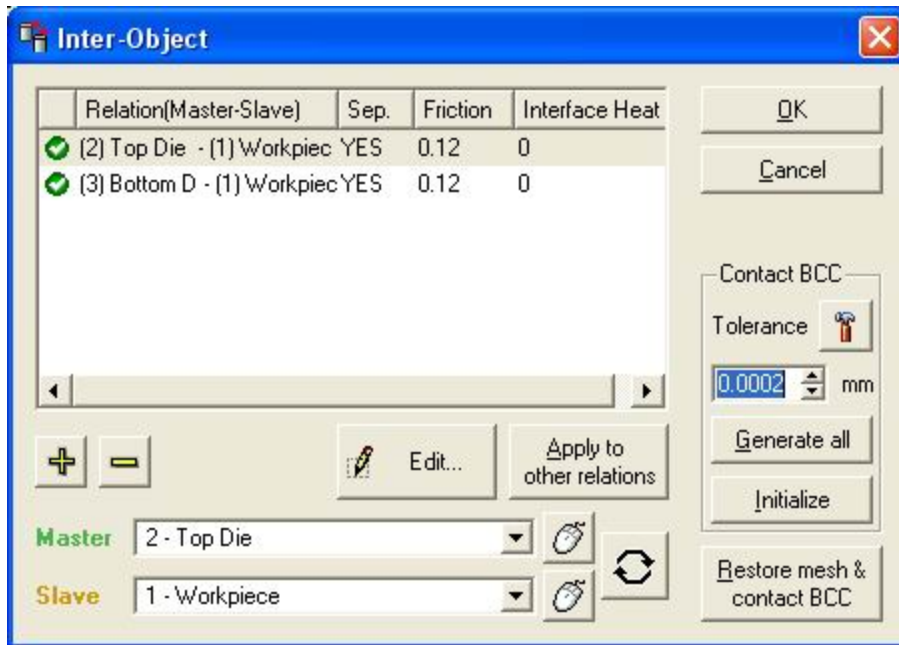
1000 200000



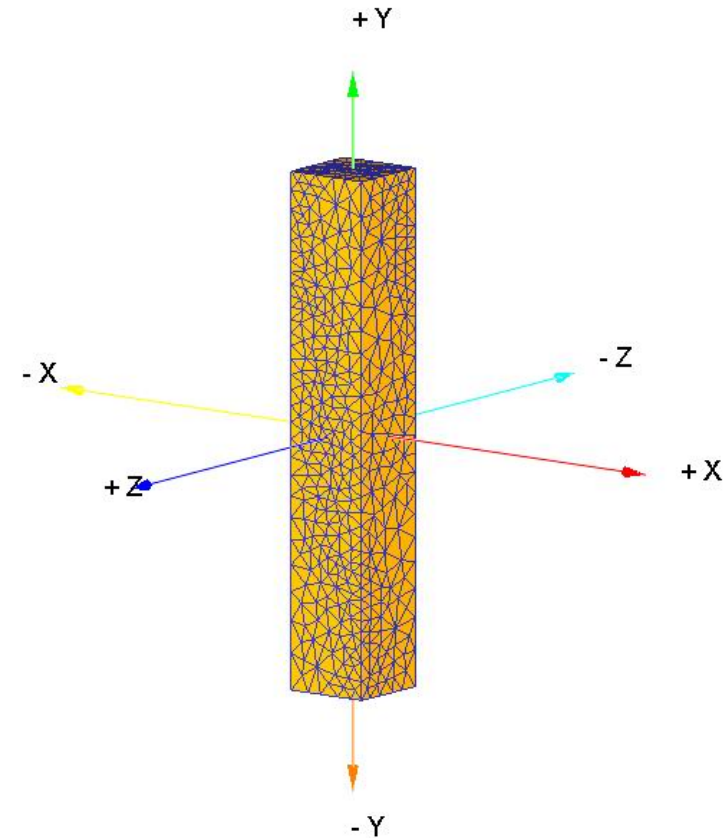
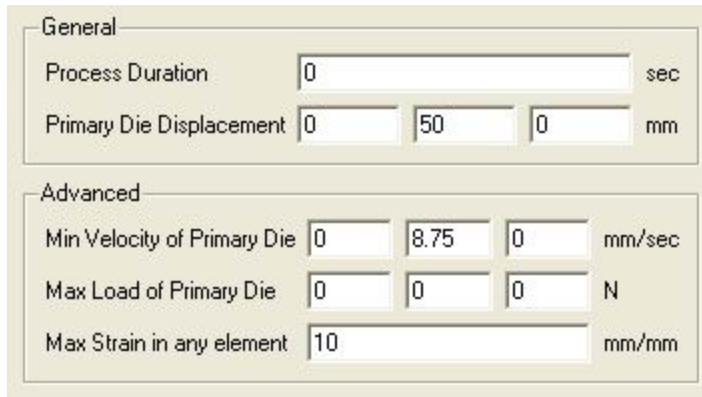
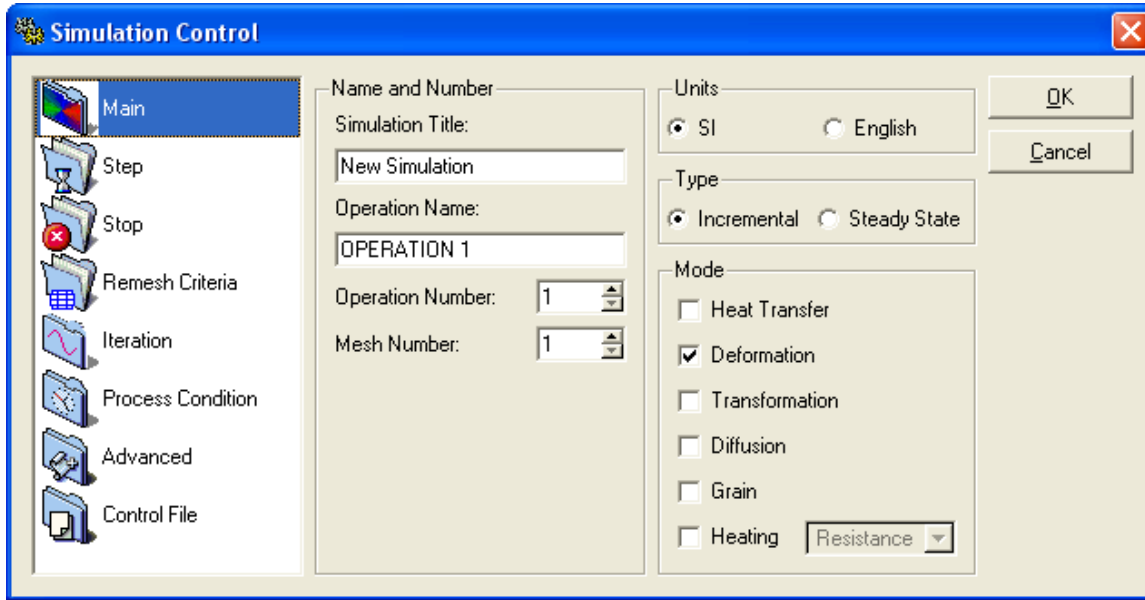
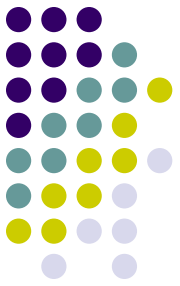
Desemnarea materialului și a proprietăților sale



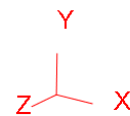
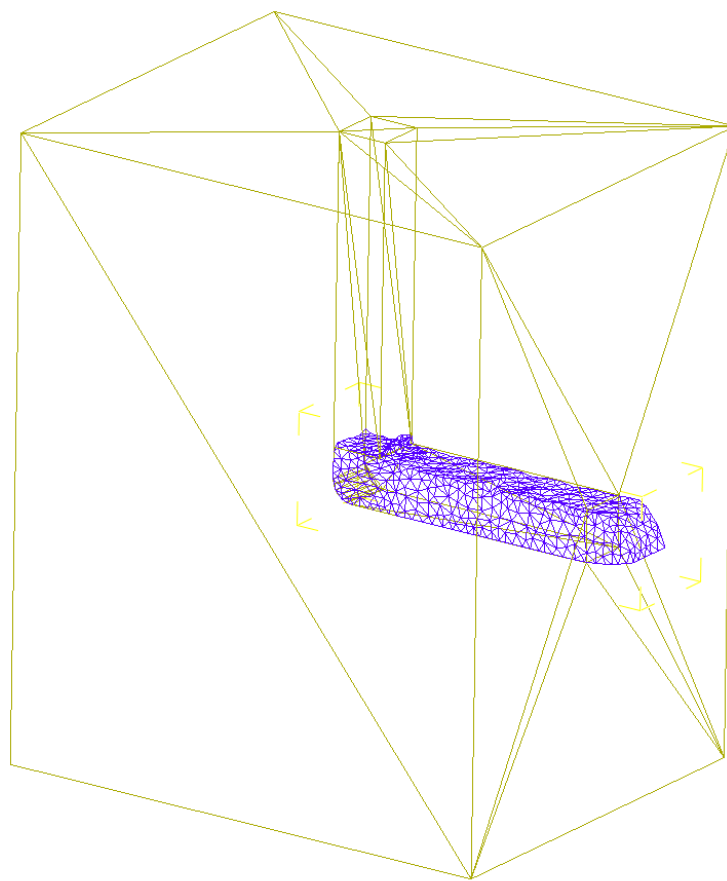
Stabilirea condițiilor de contact între obiecte



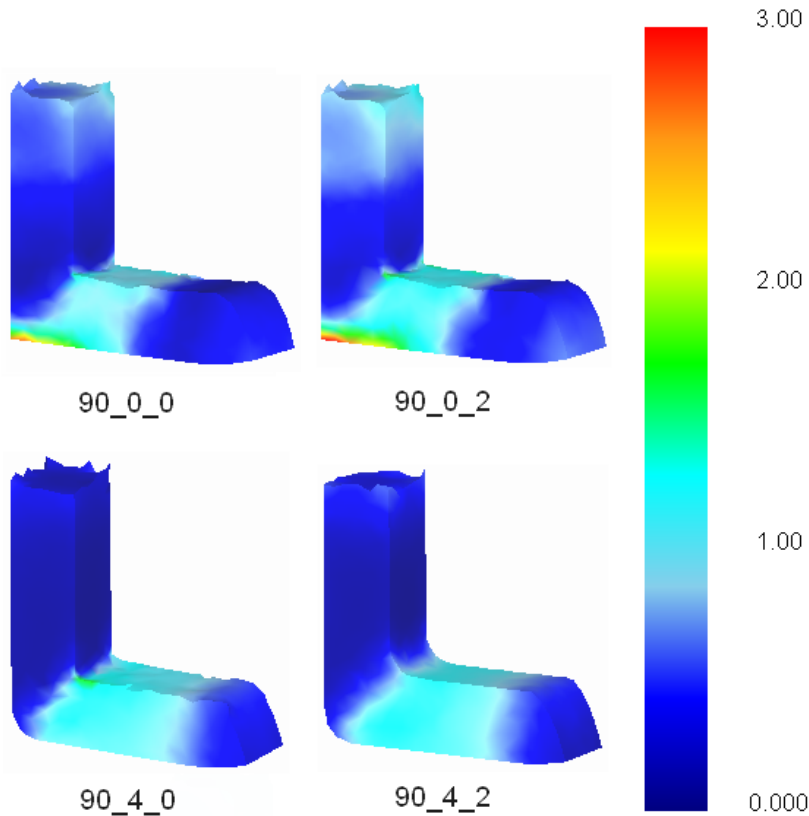
Controlul simulării



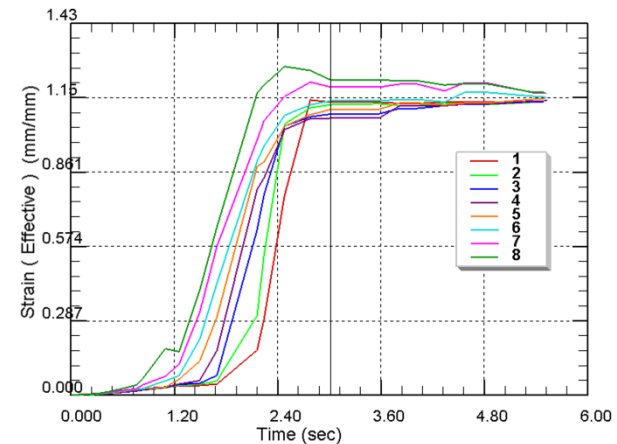
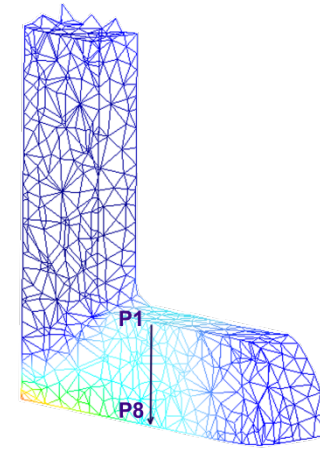
Rularea programului și selectarea rezultatelor



Analiza deformației

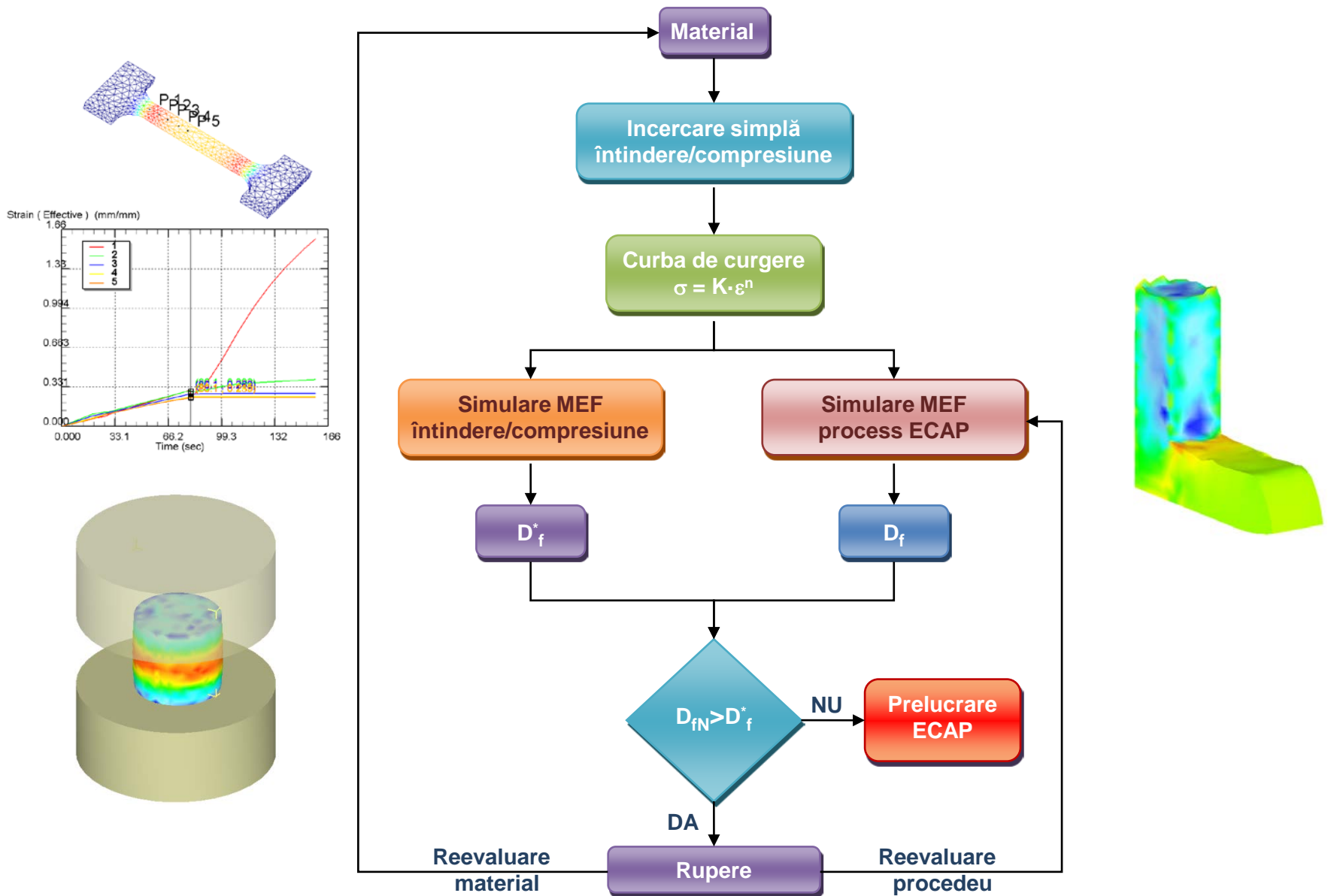


Deformația reprezentată cromatic
poate decide soluția optimă



Distribuția deformației poate
fi selectată în orice secțiune

Estimarea pericolului de fisurare⁽¹⁾



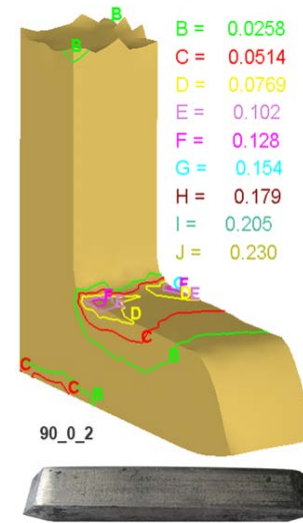
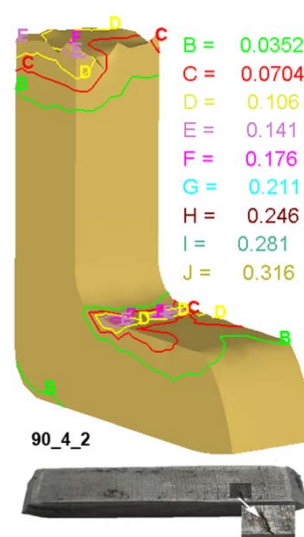
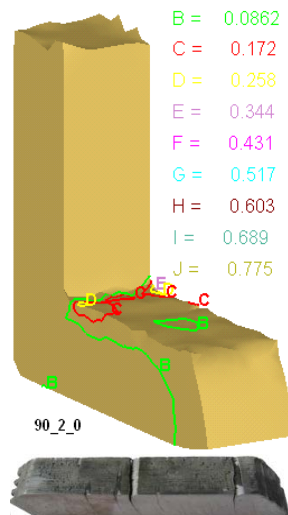
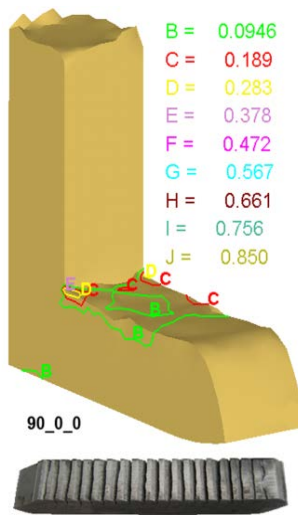
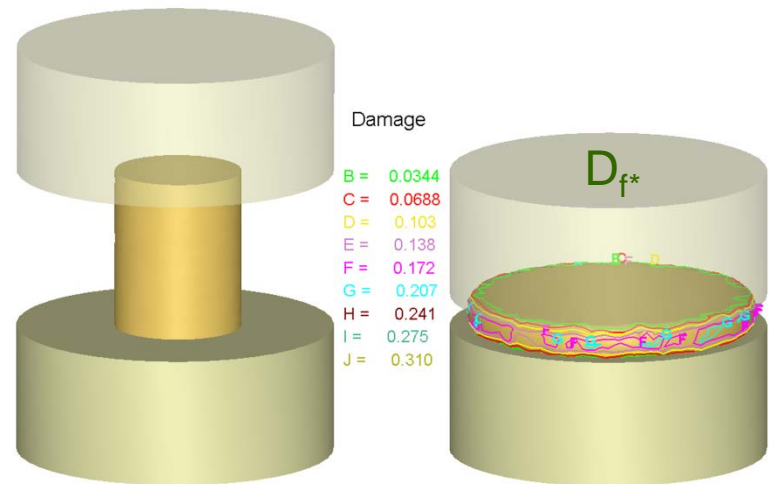
Estimarea pericolului de fisurare⁽²⁾

Modelul Cockcroft-Latham definește

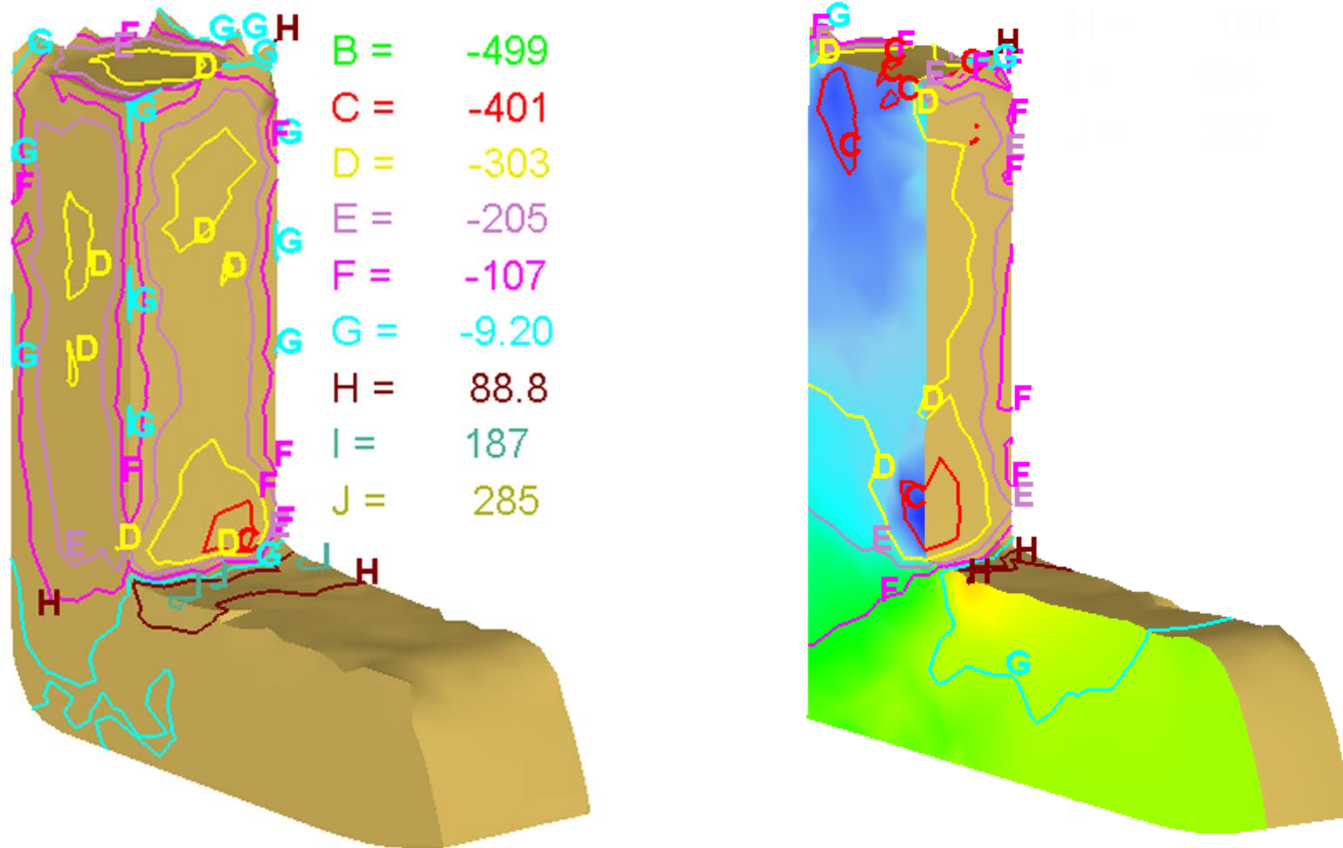
factorul de fisurare:
$$D_{fN} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_T}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}$$

Fiecărei solicitări îi corespunde un factor de fisurare critic D_{f*}

Când $D_{fN} > D_{f*}$ materialul fisurează

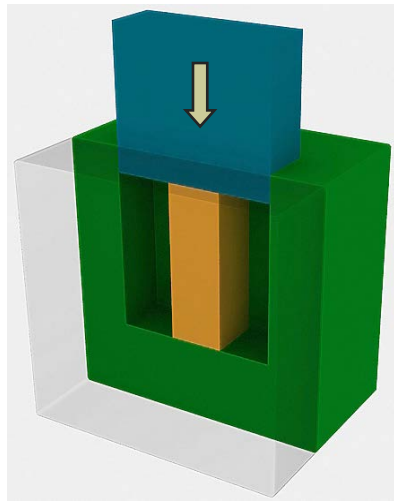


Evaluarea tensiunilor din material



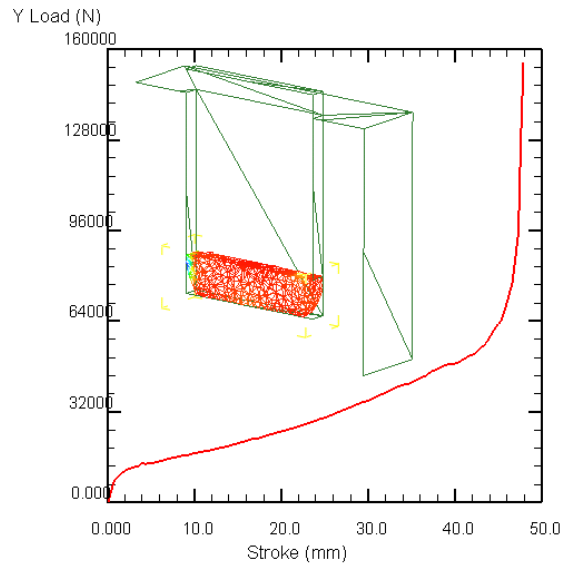
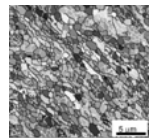
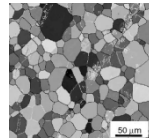
Estimarea tensiunilor din material determină măsura eforturilor unitare ce apar în timpul deformării. Distribuția și semnul tensiunilor decid comportarea materialului la deformare.

Cel mai scurt drum de la idee la prototip

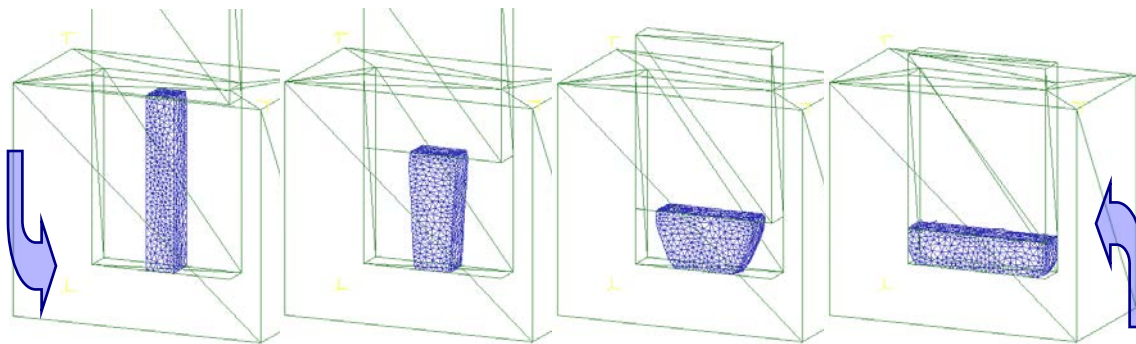
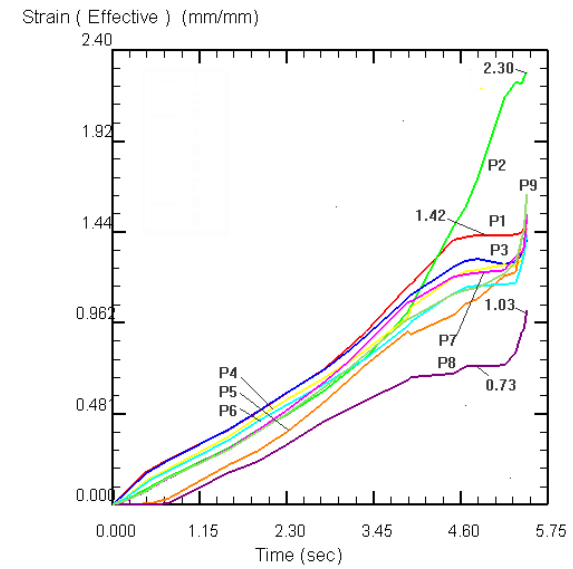


Schema de lucru

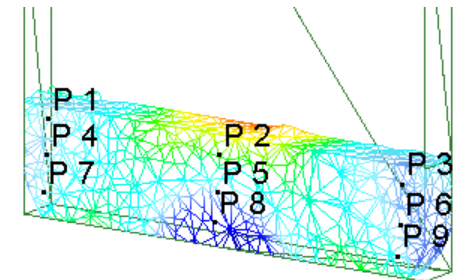
Ideea



Parametri de proces



Semifabricat și scule



Efecte



Bibliografie

- Giuseppe Pelosi, The finite-element method, Part I: R. L. Courant: Historical Corner, Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49 (2), 180-182
- E. Stein, Olgierd C. Zienkiewicz, a pioneer in the development of the finite element method in engineering science. Steel Construction, 2009, 2 (4), 264-272
- Strang, G., Fix, G., An Analysis of The Finite Element Method, Ed. Prentice Hall, 1973, ISBN 0130329460
- Babuska, Ivo, Uday Banerjee, John E. Osborn, Generalized Finite Element Methods: Main Ideas, Results, and Perspective, 2004, International Journal of Computational Methods 1(1), 67-103
- L. Zaharia, C. Bejinariu, R. Comaneci, Analiza deformarii plastice cu metoda elementului finit, 2002, Ed. Tehnopress, Iasi, 166 p., ISBN 973-8048-21-4