

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



TRATAMENTE TERMOMECHANICE

conf. dr. ing. Radu Comaneci

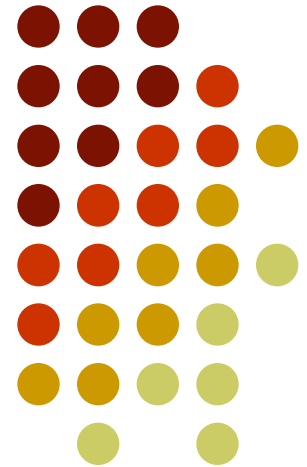
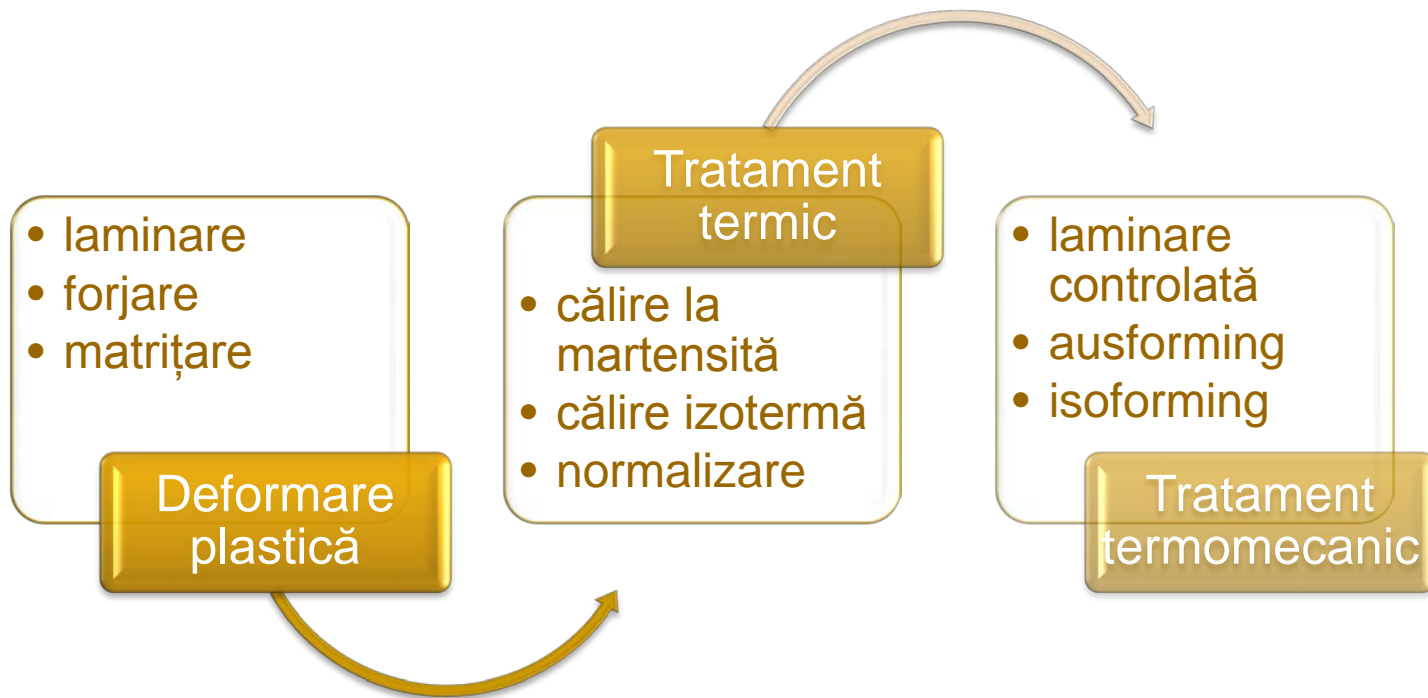
Departamentul de Tehnologii si Echipamente pentru Procesarea Materialelor

Cum putem obține materiale cu proprietăți mecanice superioare?

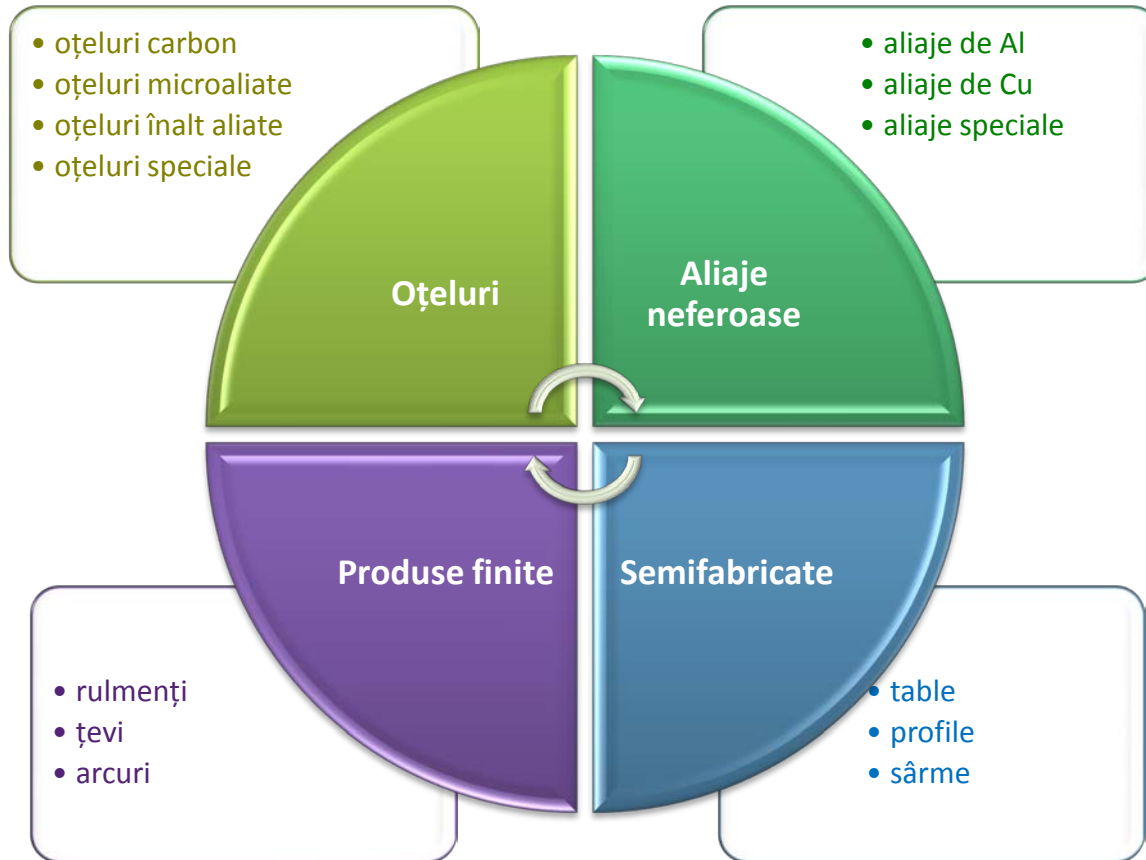
- Aliere
- Tratamente termice
- Deformare plastică



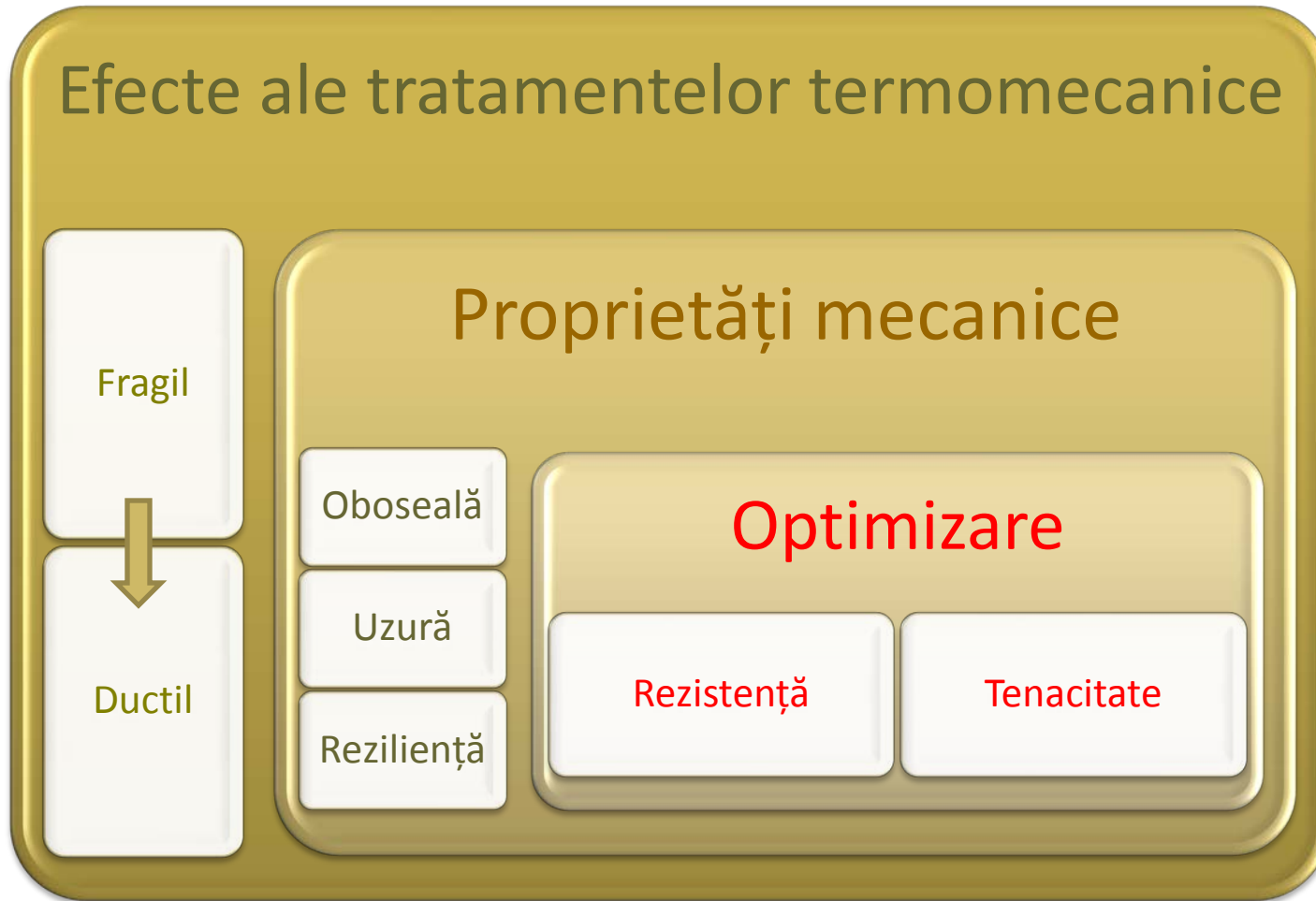
Definirea tratamentelor termomecanice



Aplicații ale tratamentelor termomecanice

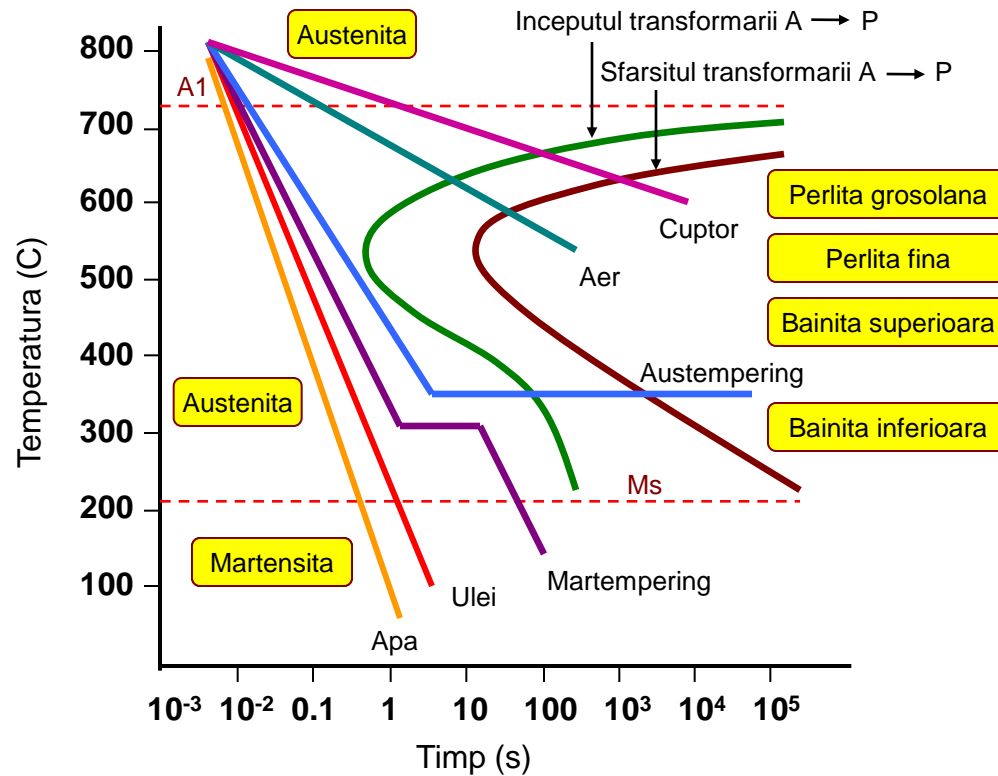


Efecte ale tratamentelor termomecanice

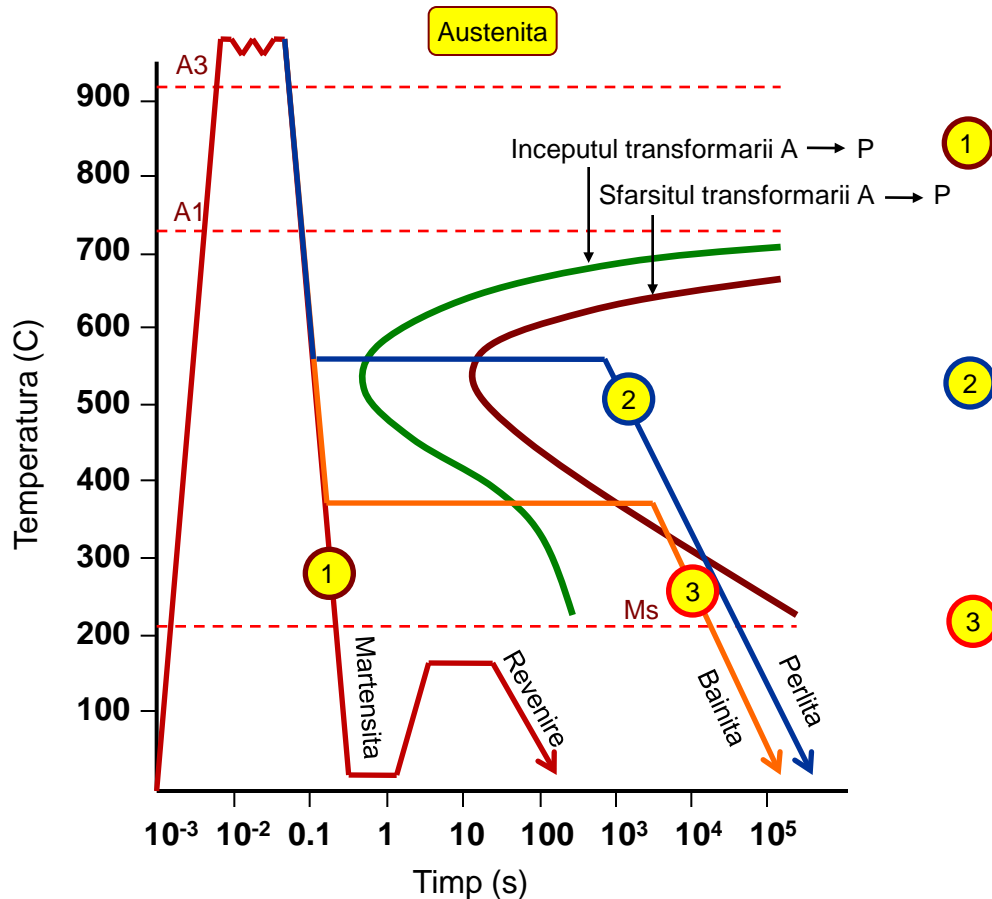


Scopul tratamentelor termomecanice este realizarea unui complex de proprietăți mecanice și tehnologice superior, altul decât cel obținut prin tratamente termice convenționale

Prima componentă: tratamentul termic



A doua componentă: deformarea plastică (I)



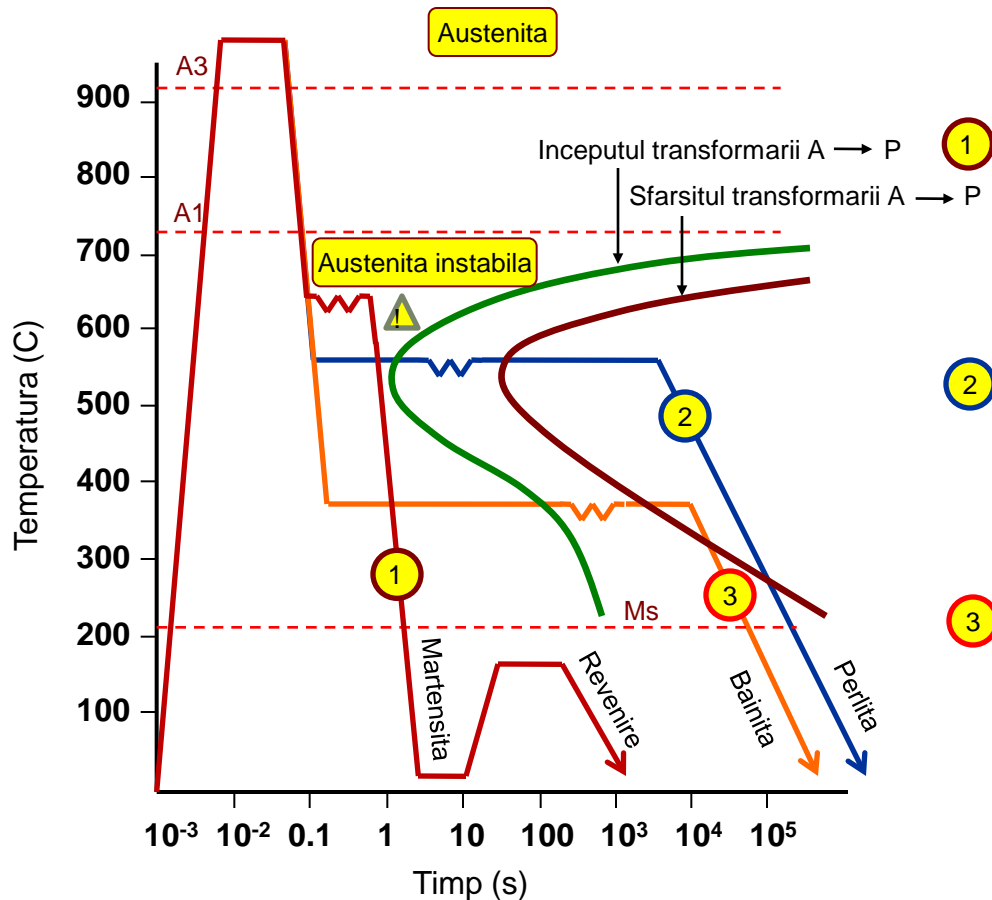
1 Tratament termomecanic de temperatură înaltă propriu-zis cu călire la martensită - TTMTI

2 Tratament termomecanic izoterm de temperatură înaltă la perlită - TTMIzTIP

3 Tratament termomecanic izoterm de temperatură înaltă la bainită - TTMIzTIB

Dacă deformarea plastică are loc în domeniul austenitei stabile
➡ un Tratament Termomecanic de Temperatură Înaltă (TTMTI)

A doua componentă: deformarea plastică (II)



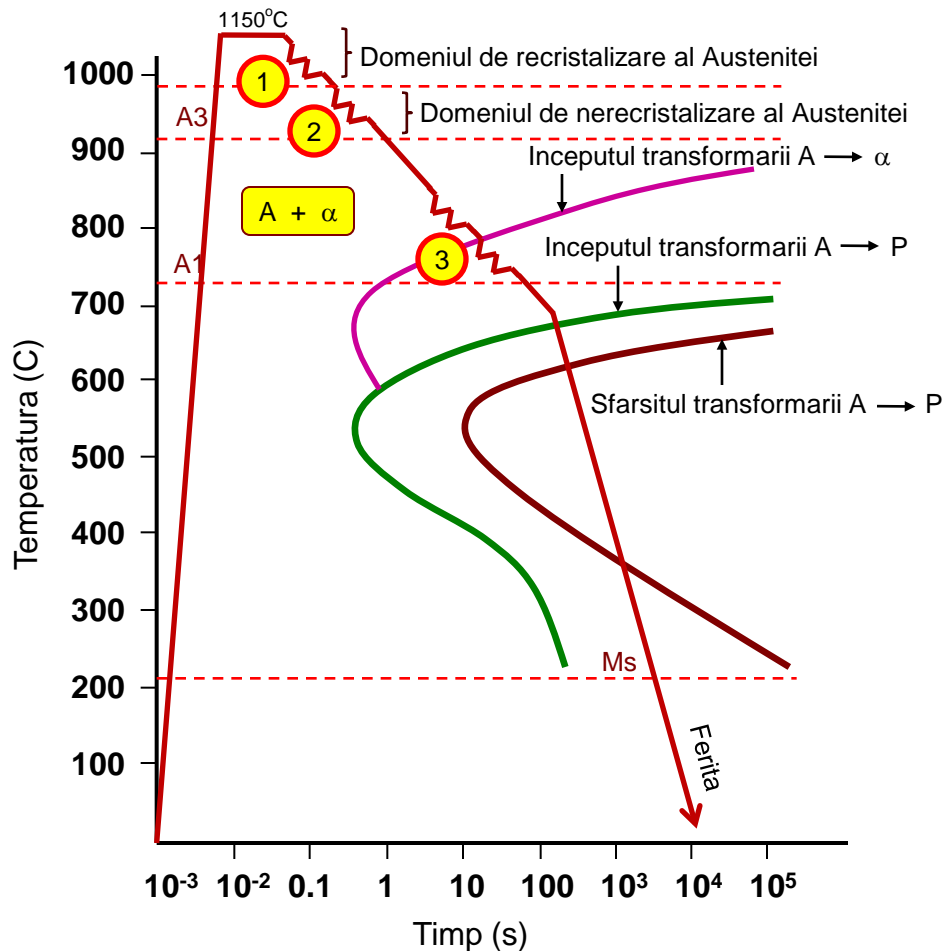
1 Tratament termomecanic de temperatură joasă propriu-zis cu călire la martensită - TTMTJ

2 Tratament termomecanic izoterm de temperatură joasă la perlită - TTMizTJP

3 Tratament termomecanic izoterm de temperatură joasă la bainită - TTMizTJB

Dacă deformarea plastică are loc în domeniul austenitei instabile
➡ un Tratament Termomecanic de Temperatură Joasă (TTMTJ)

A doua componentă: deformarea plastică (III)



1 Deformare plastică în domeniul de recristalizare al austenitei

2 Deformare plastică în domeniul de nerecristalizare al austenitei

3 Deformare plastică în domeniul bifazic Austenită + Ferită ($A + \alpha$)

⚠ Laminarea controlată se aplică numai oțelurilor feritice microaliate

Dacă deformarea plastică are loc atât în domeniul austenitei stabile cât și în domeniul bifazic $A + \alpha$ ➡ Laminare Controlată (LC)

ROLUL DEFORMĂRII PLASTICE

- × De a finisa structura prin mecanismele de restaurare si recristalizare (meta)dinamice si/sau statice
- × De a introduce defecte de structură – în special dislocatii - care să modifice cinetica transformării ulterioare din timpul tratamentului termic
- × De a modifica morfologia si proportia fazelor si constituentilor structurali (Austenită reziduală, Martensită, Perlită, Bainită, Carburi)

Principiul și mecanismul tratamentelor termomecanice

Definiție

- ansamblul operațiilor de deformare plastică, încălzire și răcire realizate în diferite succesiuni tehnologic posibile

Principiu

- crearea unei structuri de defecte corespunzătoare unei mari densități de dislocații distribuite specific prin deformare

Mecanism

- îmbunătățirea proprietăților mecanice ca rezultat al finisării structurale

Parametri tehnologici

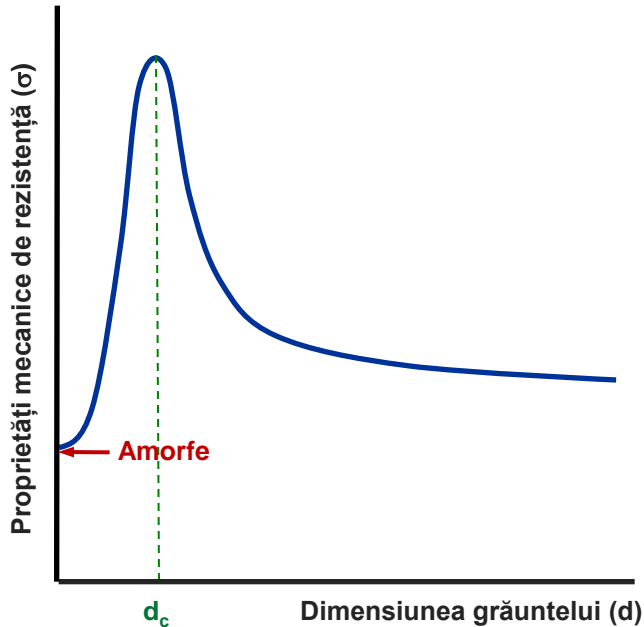
- temperatura de deformare T_d : gradul de deformare ε
- temperatura și timpul menținerii postdeformaționale τ

Imbunătățirea proprietăților prin finisare structurală

Creșterea proprietăților mecanice de rezistență are loc după legea Hall-Petch

$$\sigma_c = \sigma_{co} + \frac{K}{\sqrt{d}}$$

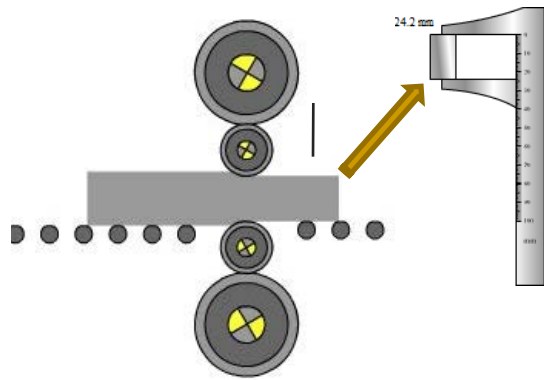
σ_c [MPa] este limita de curgere determinată de finisarea structurală
 σ_{co} [MPa] este limita de curgere inițială a materialului
 d [μm] este dimensiunea grăuntelui
K este o constantă de material determinată experimental



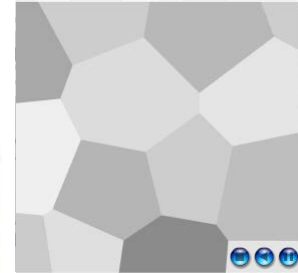
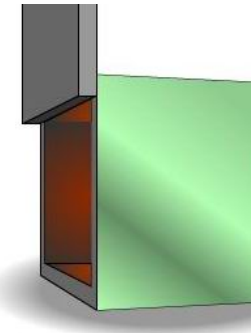
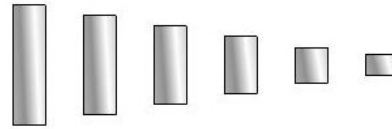
Finisarea granulației asigură nu numai creșterea proprietăților de rezistență (σ_r , σ_c , HV), ci și menținerea celor de plasticitate (A_u , Z)

Imbunătățirea proprietăților mecanice de rezistență are loc până la o valoare critică d_c a dimensiunii grăuntelui

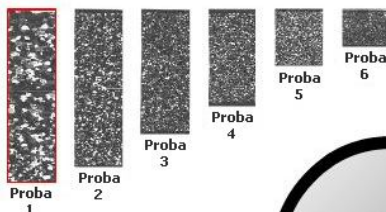
Experiment



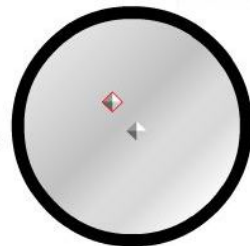
Laminare



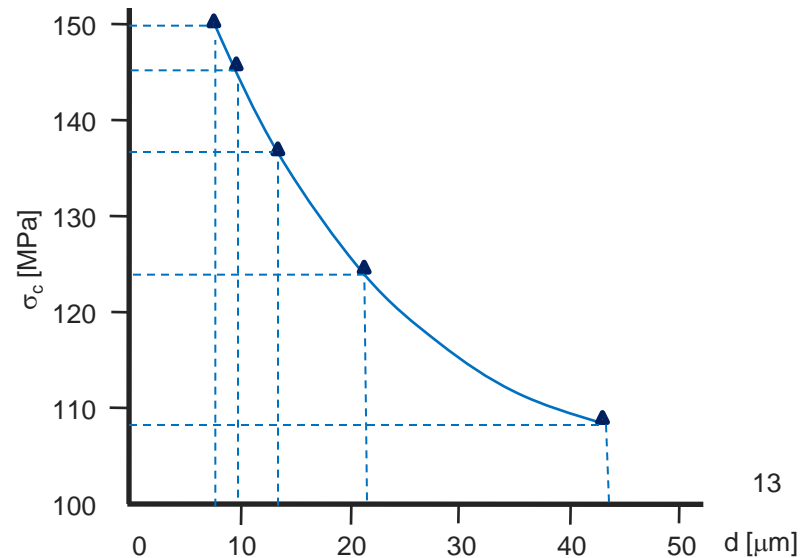
Recristalizare



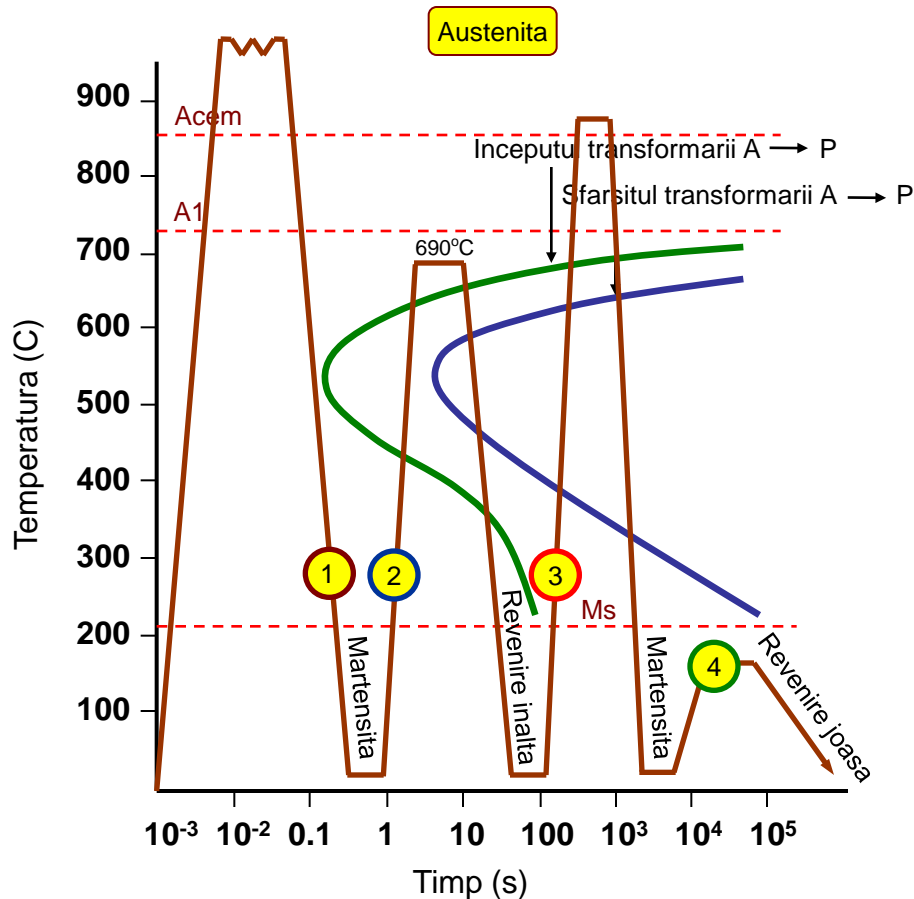
Duritatea urmei selectate: 34,4 HV



Duritate HV $\sim \sigma_c/3$



Aplicație: tratamentul termomecanic al oțelului de rulmenți



- 1 Călire la martensită din cald de deformare plastică
- 2 Revenire înaltă 690°C-8h pentru precipitarea fină dispersă a carburilor
- 3 Călire finală la martensită
- 4 Revenire finală

Tratamentul descris se numește tratament termomecanic ereditar - TTME

Rezultat: conținutul de A_{rez} a scăzut de la 14 - 16% la 3,5%; durabilitatea (L_{10}) a crescut cu 60%

Exemple

Oțel	TTM	σ_r (daN/mm ²)	A_u (%)	KCU (J/cm ²)	K_{pf} (J/cm ²)
55SiMnCr10	TTMTI	180 ↗ 214	4 ↗ 17	-	-
35CrVNi30	TTMTJ	180 ↗ 290	2 ↗ 6	-	-
36SiMn20	TTMIzTIP	78 ↗ 89	14 ↗ 22	79 ↗ 101	39 ↗ 60
36SiMn20	TTMIzTIB	93 ↗ 112	8 ↗ 14	66 ↗ 82	8 ↗ 14
38VCr10	TTMIzTJP	76 ↗ 98	25 ↘ 21	56 ↗ 117	10 ↗ 70
37CrNi30	TTMIzTJB	126 ↗ 142	7 ↗ 16	-	16 ↗ 23
08MoVNbMn20	LC	67	21	155	$T_k = -95^\circ\text{C} !!$
RUL1	TTME	$A_{rez} = 16 \searrow 3,5\%$		$L_{10} \nearrow 60\%$	

Finisarea grăuntelui de austenită prin procese de recristalizare

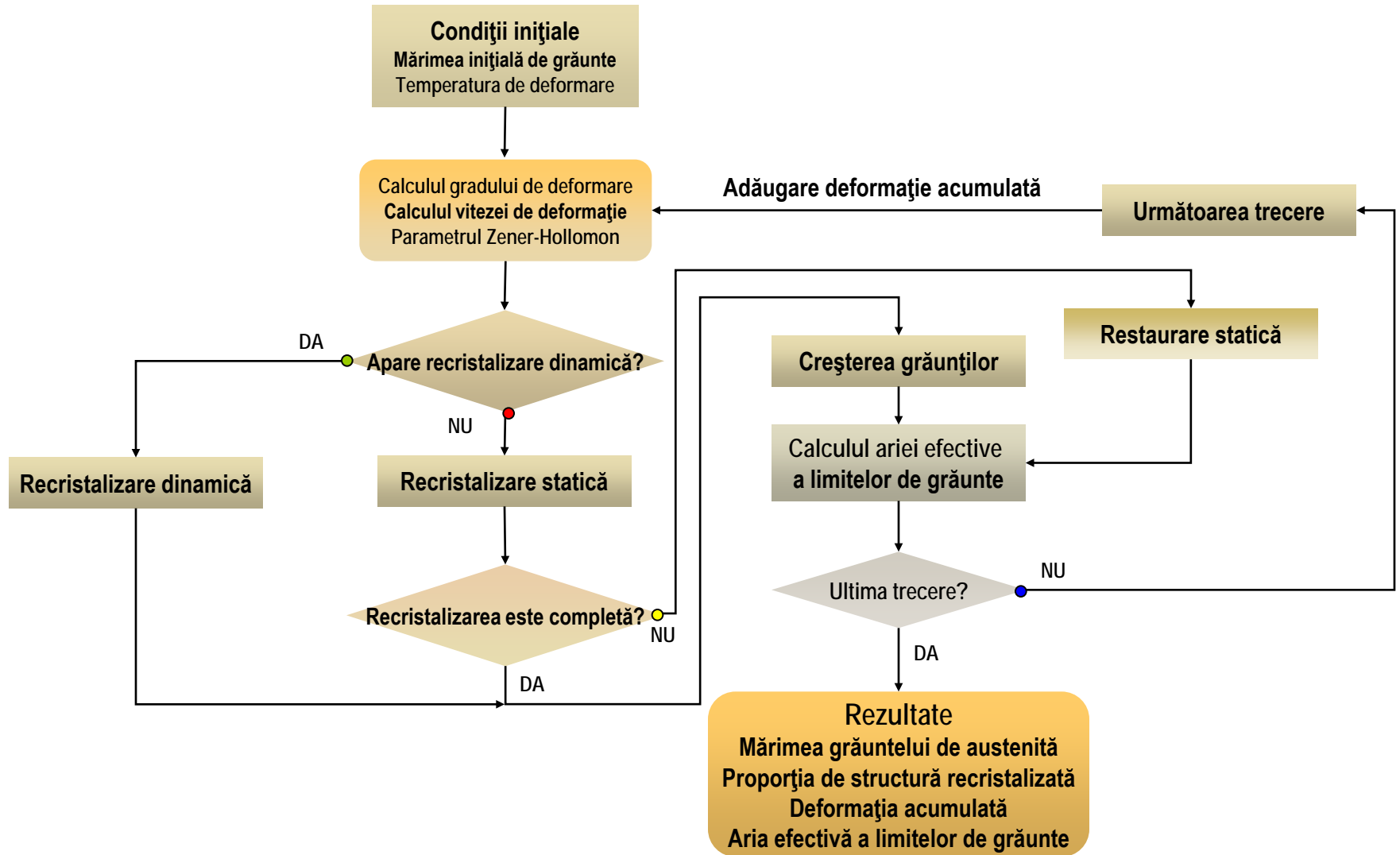
Grăuntele de austenită:

- **Determină fundamental desfășurarea transformărilor ulterioare**
- **Decide gradul de finisare al produșilor de transformare: α , P, B, M**
- **Contribuie la obținerea proprietățile mecanice finale**

Mecanismele finisării structurale

- **Restaurarea și recristalizarea dinamică ce au loc în timpul deformării plastice la cald**
- **Recristalizarea statică și metadinamică la menținerea postdeformațională**
- **Precipitarea fin dispersă a compușilor chimici care împiedică creșterea grăunților**

Algoritmul de calcul al mărimii grăuntelui austenitic în timpul laminării la cald



Poate fi controlată granulația?

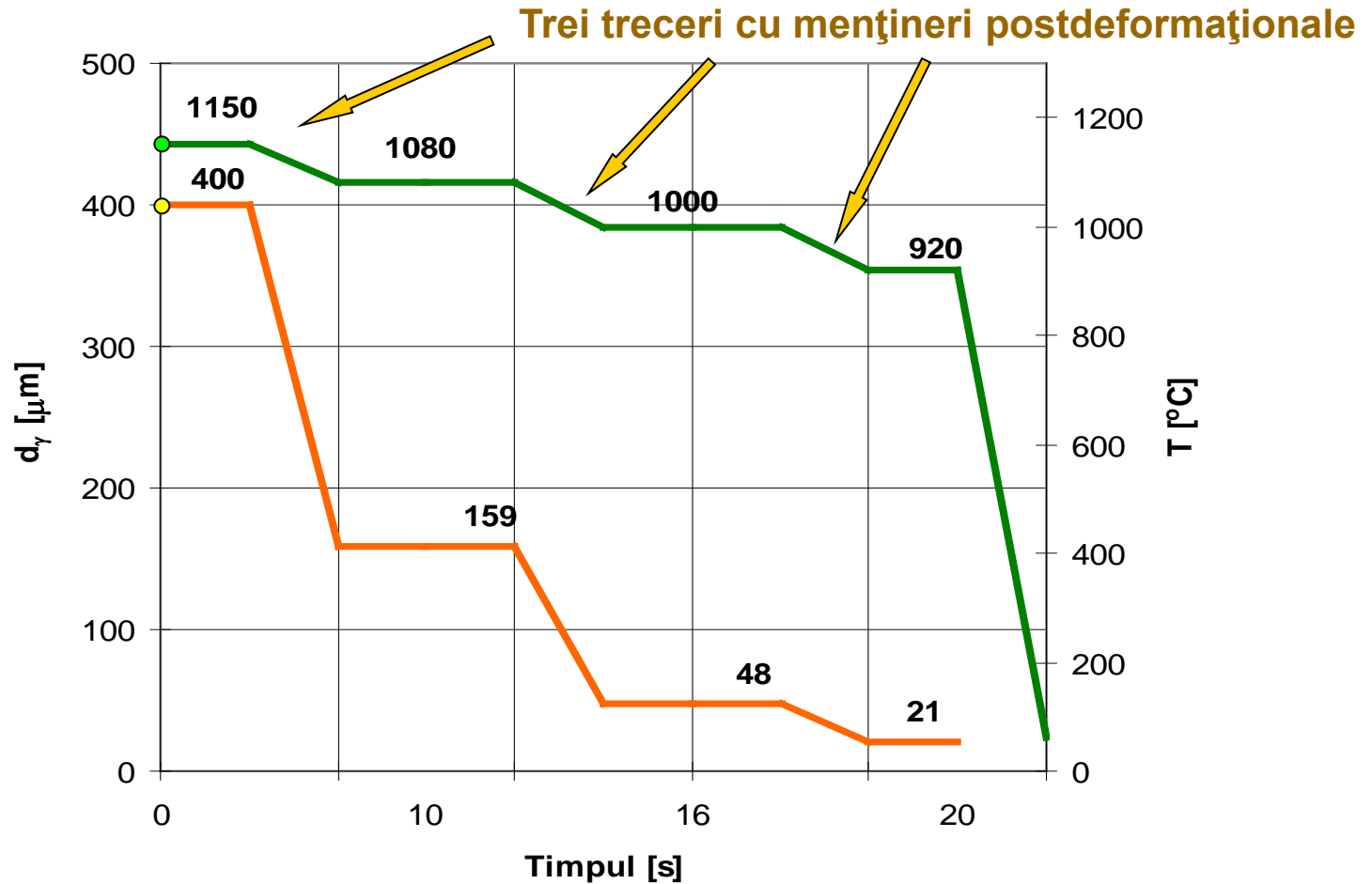
Oțel cu 0,12%C; 0,25%Si; 1,4%Mn

Exemplu de calcul

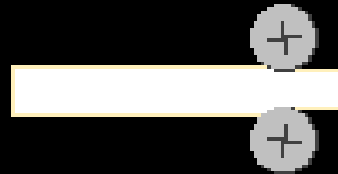
h _o [mm]	h [mm]	R [mm]	N [rot /min]	τ [s]	d _o [μm]	T _{IL} [°C]	T _{SL} [°C]	ε	ε [s ⁻¹]	Q _{def} [kJ/mol]	ε _p	ε _D (0,7ε _p)	ε* (0,8ε _p)	t _{0.5} [s] (ε<ε*)	d _{γRS} [μm] recr	t _{ment} [s]	X _{recr}	Δε	T _{ment} [°C]	K _{γcres}	d _c [μm]	d _{γ final} [μm]	S _g [μm ⁻¹]	
Uniformizare temperatura				0	400	1150																		
7.5	6.3	425	125	4	400	1150	1080	0.17	42.95	312	0.90	0.63	0.72	16.5	158.8	2	0.01	0.17	1080	3.9E+16	0	159	0.0057	
Mentineră																								
6.3	5.5	425	143	11	159	1080	1000	0.31	106.45	312	0.80	0.56	0.64	1.4	48.4	1	0.29	0.22	1000	1.7E+15	0	48	0.0256	
Mentineră																								
5.5	5	425	157	17	48	1000	920	0.31	150.72	312	0.60	0.42	0.48	0.8	21.4	0	0.00	0.31	920	1.7E+15	0	21	0.0562	
Mentineră																								
Racire				150		60																		



Simularea mărimii grăuntelui de austenită deformată plastic la cald prin laminare



Temperature = 1276°C



Grains flattened by plastic deformation

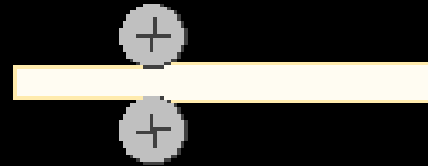
Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

Restart

Inceputul laminării la cald: $T_{IL} = 1300^{\circ}\text{C}$; grăunți se alungesc în direcția laminării

Temperature = 1236°C



Grains flattened by plastic deformation

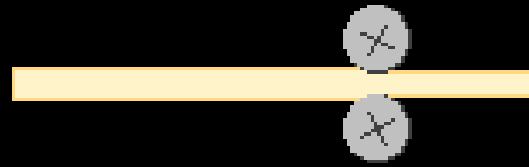
Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

Restart

A doua trecere: $T_L = 1236^\circ\text{C}$; structura prezintă grăunți alungiți

Temperature = 1202°C



Grains flattened by plastic deformation

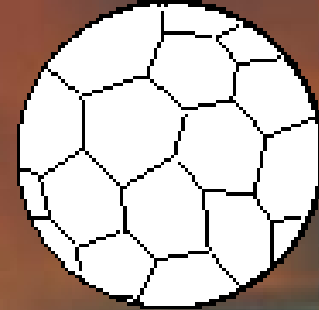
Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

Restart

Continuarea laminării la cald: $T_L \approx 1200^\circ\text{C}$; structura prezintă grăunți alungiți

Temperature = 1185°C



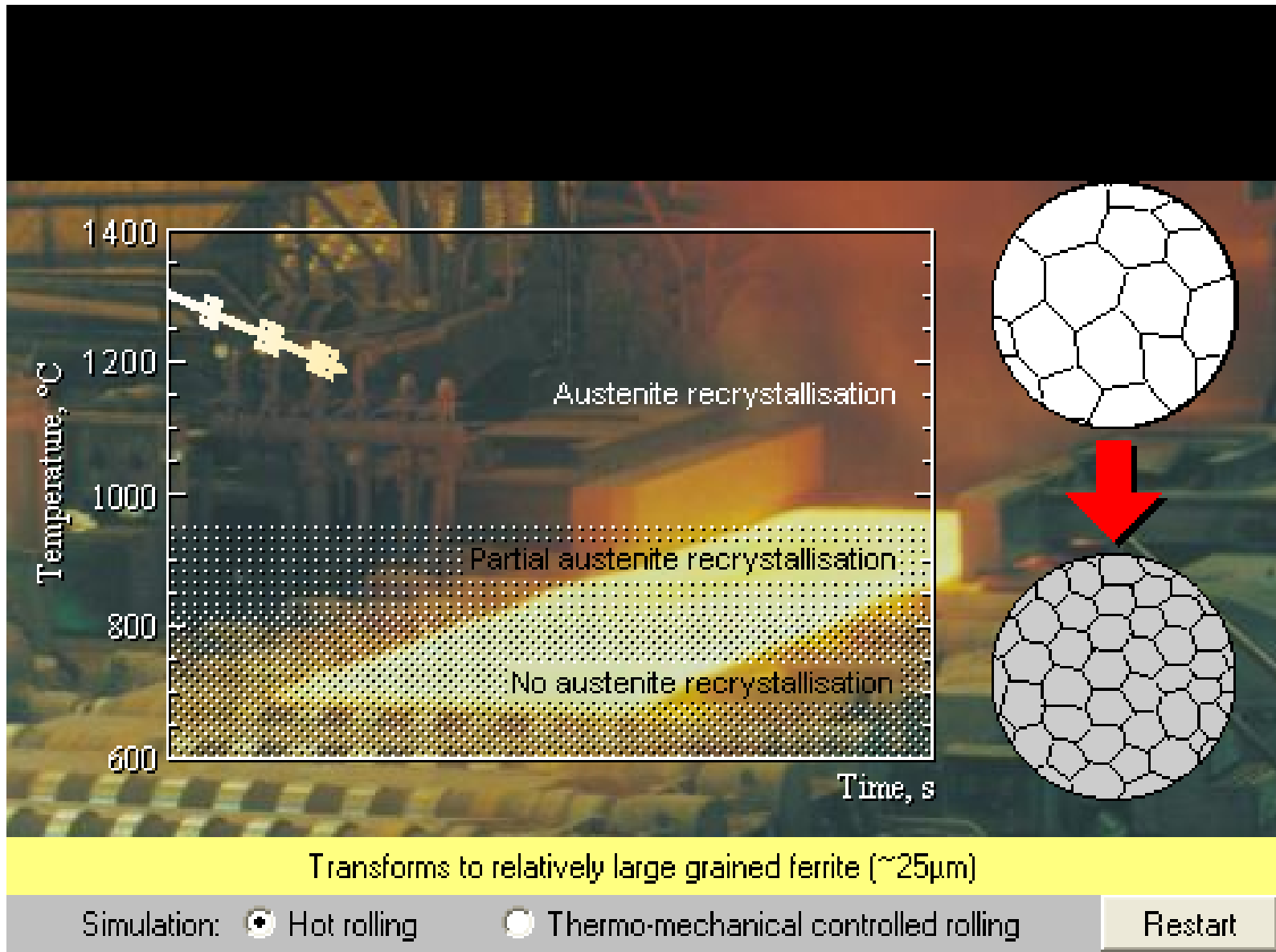
Recrystallisation

Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

Restart

Menținere postdeformațională, recristalizarea austenitei → grăunți echiacși (mari)



Transformarea austenitei recristalizate într-o ferită relativ mare

LAMINAREA CONTROLATA

(Controlled Rolling)

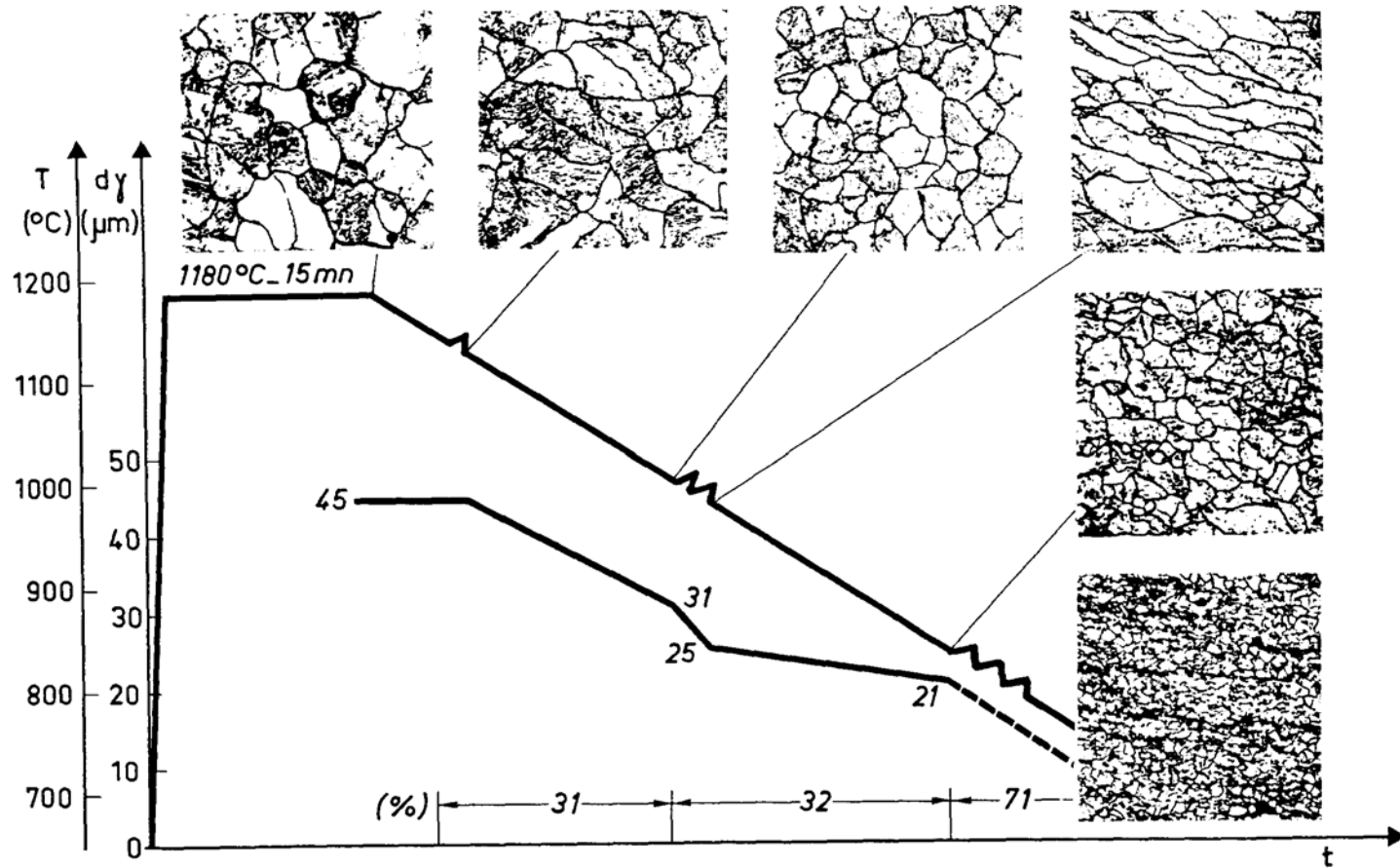
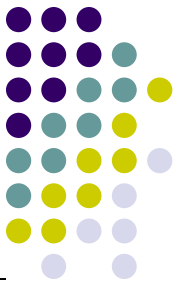
Ce este laminarea controlată?

- Un tratament termomecanic ce constă în laminarea la cald în domeniul de recristalizare al austenitei, răcire până în domeniul bifazic și laminare, urmată de transformarea austenitei la structură ferito-perlitică fină și uniformă
- Structura finală depinde de mărimea grăuntelui de austenită obținut după diferitele stadii ale laminării controlate

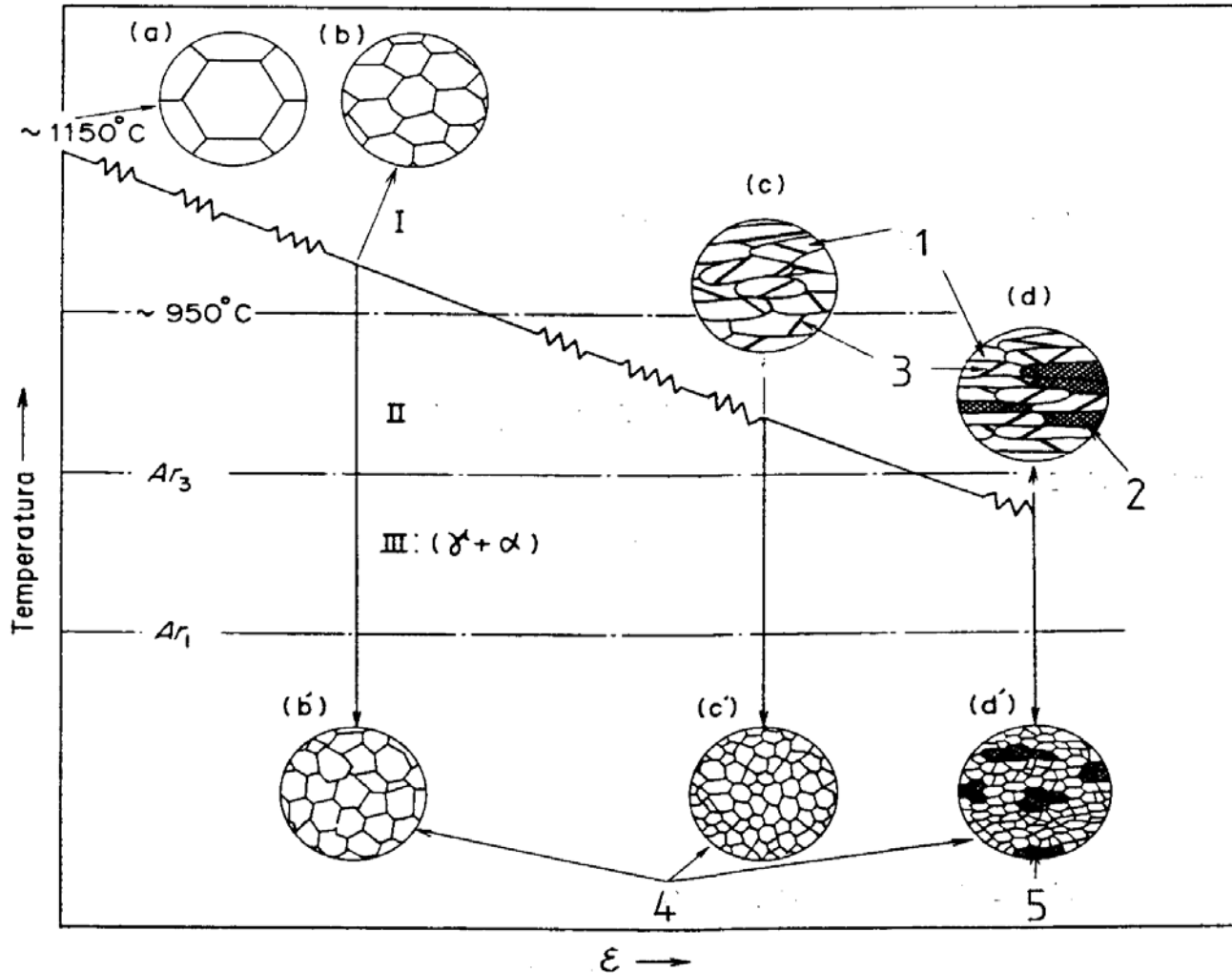
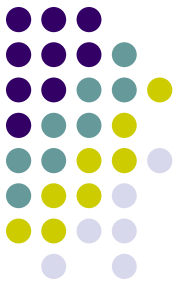
Scopul laminării controlate

- Obținerea unei structuri feritice finisate care să determine creșterea rezistenței mecanice și a tenacității, cu ameliorarea fragilității la temperaturi negative a oțelurilor feritice
- Laminarea controlată se aplică oțelurilor feritice de înaltă rezistență slab aliate – High Strength Low Alloys (HSLA), cu $< 0,1\%C$, aliate cu Si și Mn și microaliate cu Nb, V, Al

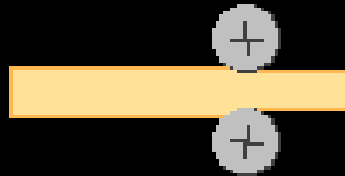
Schema tehnologică a LC



Evolutia structurii in timpul laminarii controlate



Temperature = 1174°C



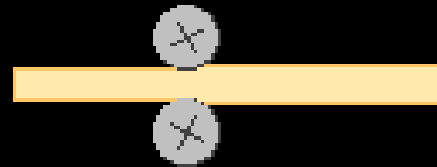
Grains flattened by plastic deformation

Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

Inceputul laminării controlate: $T_{IL} = 1200^{\circ}\text{C}$; grăunți se alungesc

Temperature = 1135°C



Grains flattened by plastic deformation

Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

A doua trecere: $T_L = 1135^\circ\text{C}$; structura prezintă grăunți alungiți

Temperature = 1030°C



Holding period...

Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

Menținere postdeformațională, recristalizarea austenitei → grăunți grosolani

Temperature = 787°C

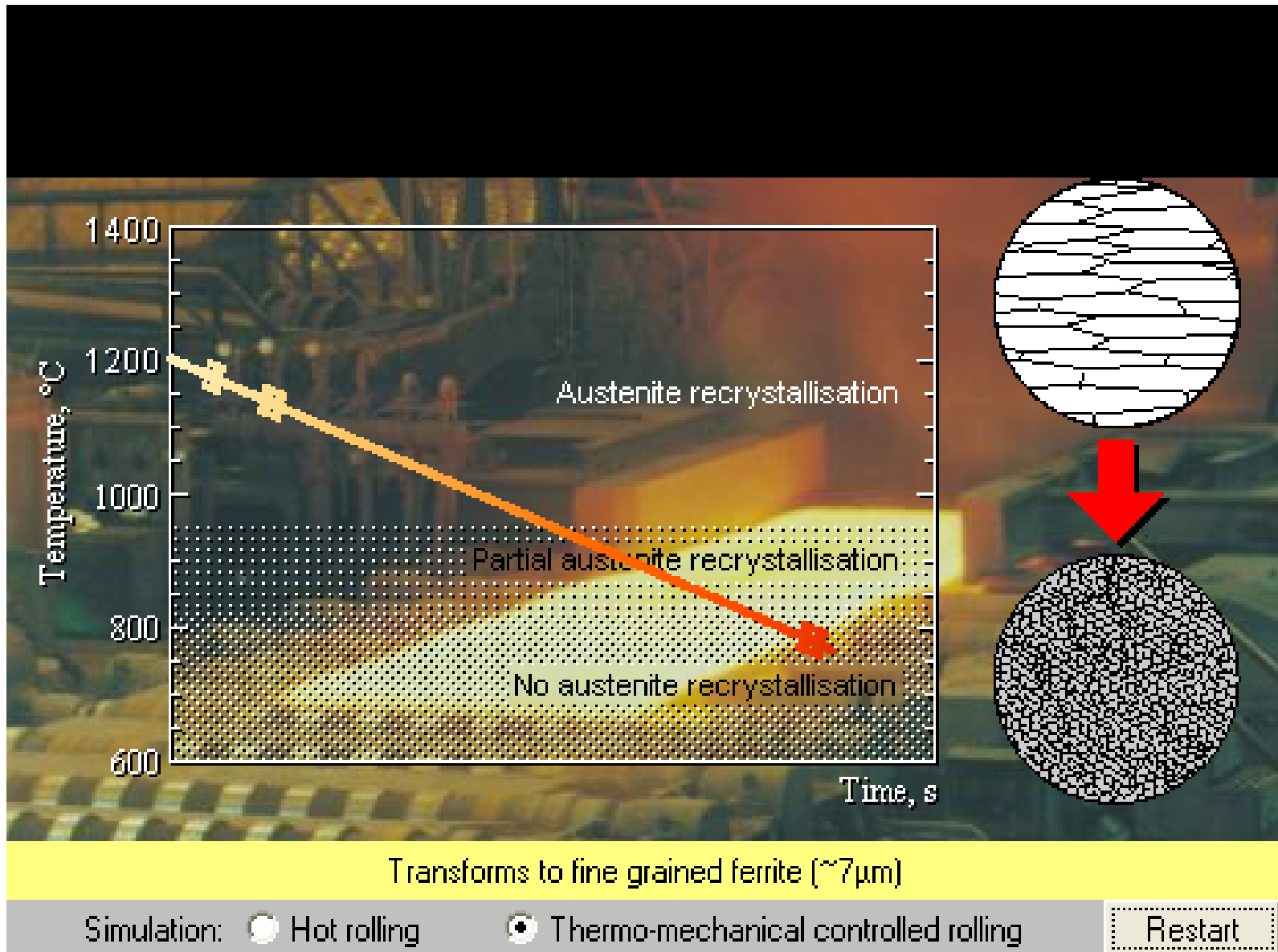


Grains flattened by plastic deformation

Simulation: Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

Răcire controlată până în domeniul de nerecristalizare al austenitei ($\approx 820^{\circ}\text{C}$)



Sfârșitul laminării ($\approx 780^\circ\text{C}$) și transformarea austenitei într-o ferită finisată

Laminarea clasică vs. laminarea controlată

- Laminarea clasică începe și sfârșește în domeniul de recristalizare al γ ; ca urmare se obține un grăunte austenitic mare care trece într-un grăunte de ferită relativ mare
- Laminarea controlată începe în domeniul de recristalizare al austenitei, dar se termină în domeniul bifazic $\gamma + \alpha$; transformarea ulterioară $\gamma \rightarrow \alpha$ determină un grăunte de ferită finisat

Cap sau pajură?



Laminarea clasică se aplică:

- Când proprietățile de rezistență se obțin după un tratament termic final
- Când se impune o precizie dimensională deosebită
- Când proprietățile mecanice variază într-un spectru mai larg

Laminarea controlată se aplică:

- Oțelurilor feritice de înaltă rezistență microaliate cu Nb, V, Al
- Când proprietățile de rezistență nu se pot obține prin aliere, întrucât se deteriorează alte caracteristici (ex: sudabilitatea)
- Când după laminarea la cald nu se mai aplică nici un tratament termic



Bibliografie

- I. Tamura, H. Sekine, C. Ouchi, Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy (HSLA) Steels, Butterworth, London, 1988, p. 248, ISBN 978-0408110341
- K. Mazanec, E. Mazancova, Physical Metallurgy of Thermomechanical Treatment of Structural Steels, Cambridge International Science, 2007, p.130, ISBN 1898326436
- B. Castor, Automotive Engineering: Lightweight, Functional, and Novel Materials, 2008, Taylor & Francis, p. 296, ISBN 978-0750310017
- E.P. Degarmo, J.T. Black, R.A. Kohser, Materials and Processes in Manufacturing (9th ed.), 2003, Wiley, p. 388, ISBN 0-471-65653-4
- D.G. Galusca, R. Comaneci, Tratamente termomecanice, 2001, Ed. Tehnica-Info, 168 p., ISBN 9975-63-051-0
- A. Doniga, E. Vasilescu, A. Udvuleanu, Bazele teoretice ale tratamentelor termomecanice, 2004, E.D.P. Bucuresti, ISBN 973-30-2802-9