



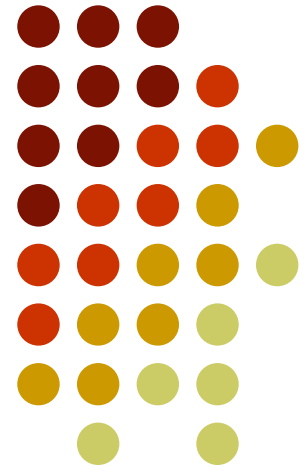
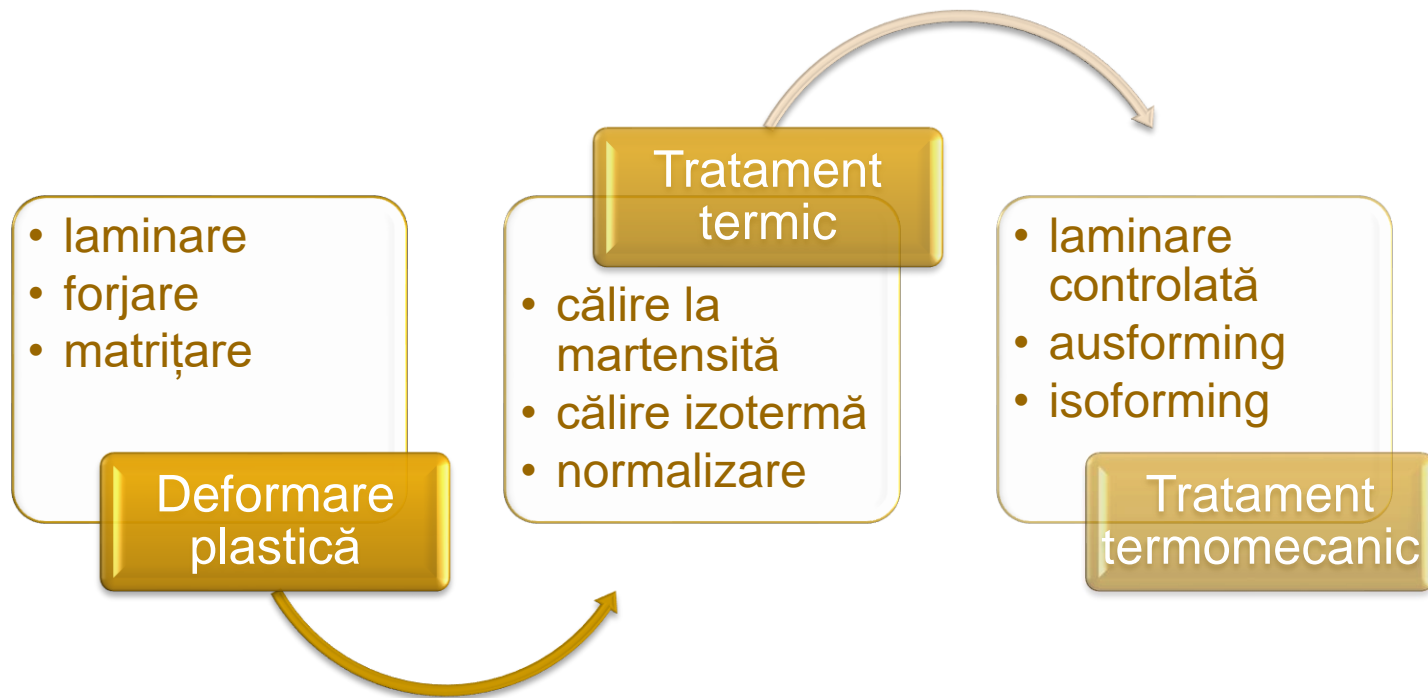
# **PROCEDEE NECONVENȚIONALE DE PROCESARE A MATERIALELOR**

# Cum putem obține materiale cu proprietăți mecanice superioare?

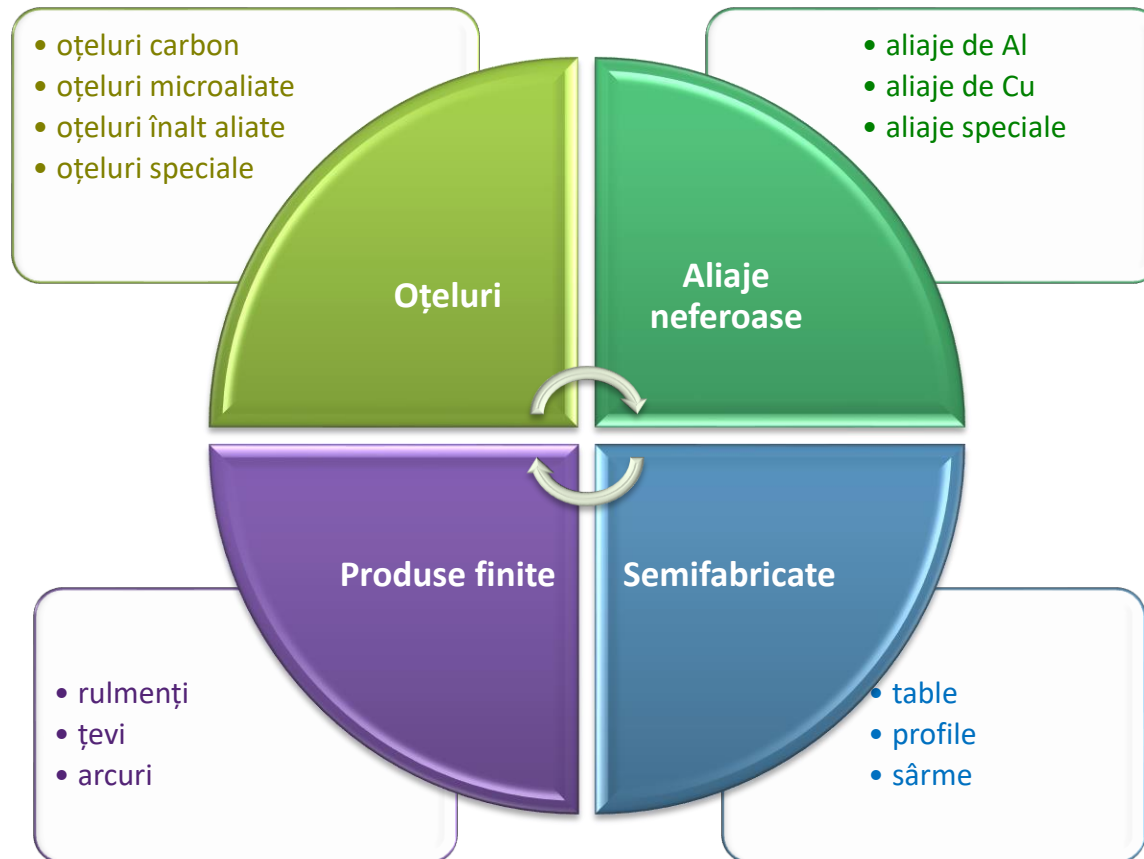
- Aliere
- Tratamente termice
- Deformare plastică



# Definirea procedeeelor neconvenționale de procesare a materialelor



# Aplicații ale procedeeilor neconvenționale de prelucrare

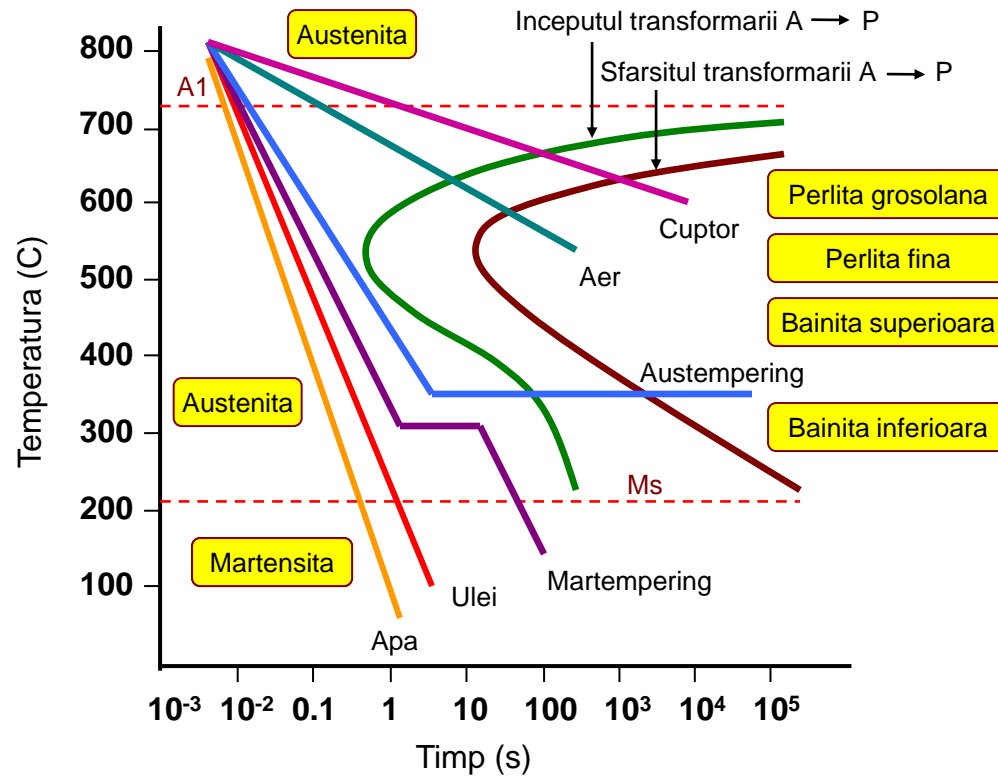


## Efecte ale procedeele neconvenționale de prelucrare a materialelor

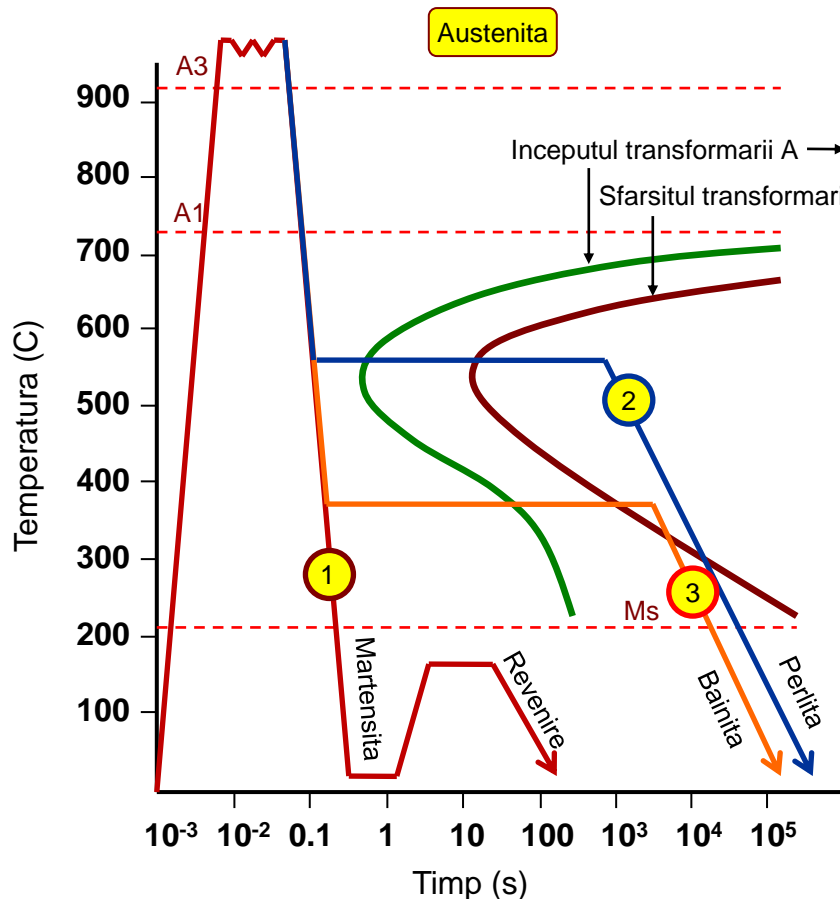


**Scopul tratamentelor termomecanice este realizarea unui complex de proprietăți mecanice și tehnologice superior, altul decât cel obținut prin tratamente termice convenționale**

# Prima componentă: tratamentul termic



# A doua componentă: deformarea plastică (I)



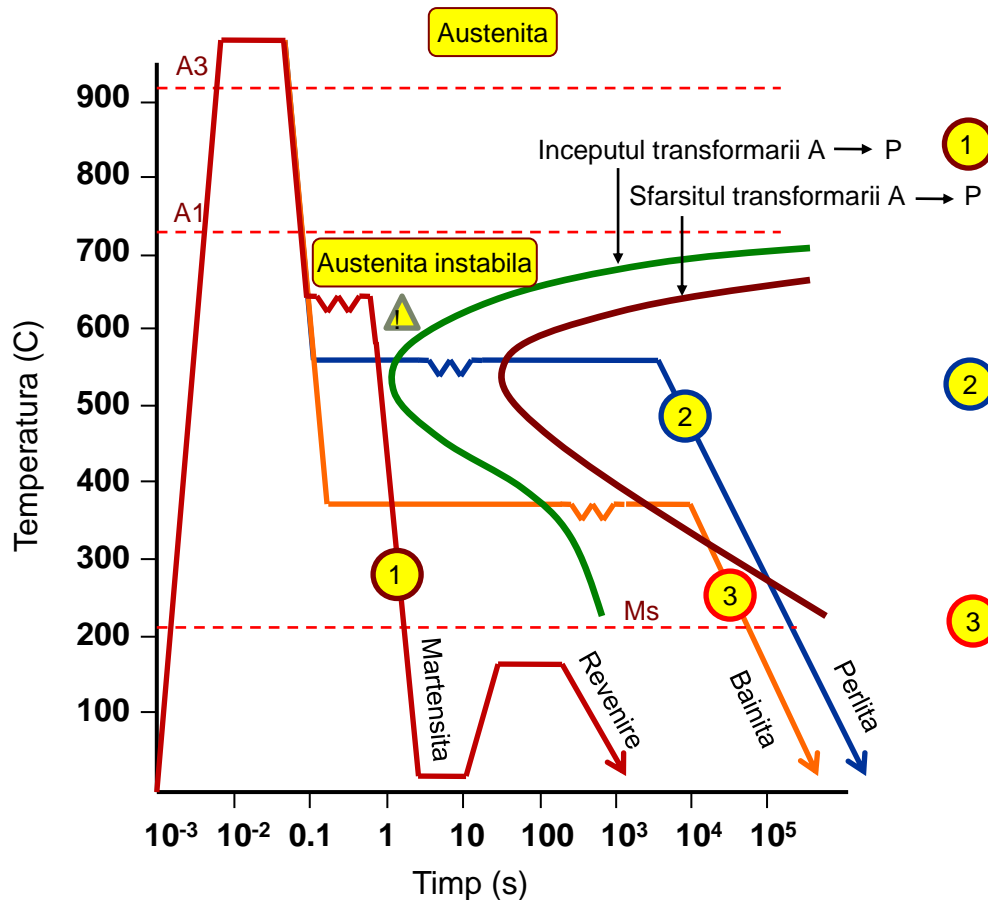
1 TTM de temperatură înaltă propriu-zis cu călire la martensită - TTMTI

2 TTM izoterm de temperatură înaltă la perlită - TTMIzTIP

3 TTM 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

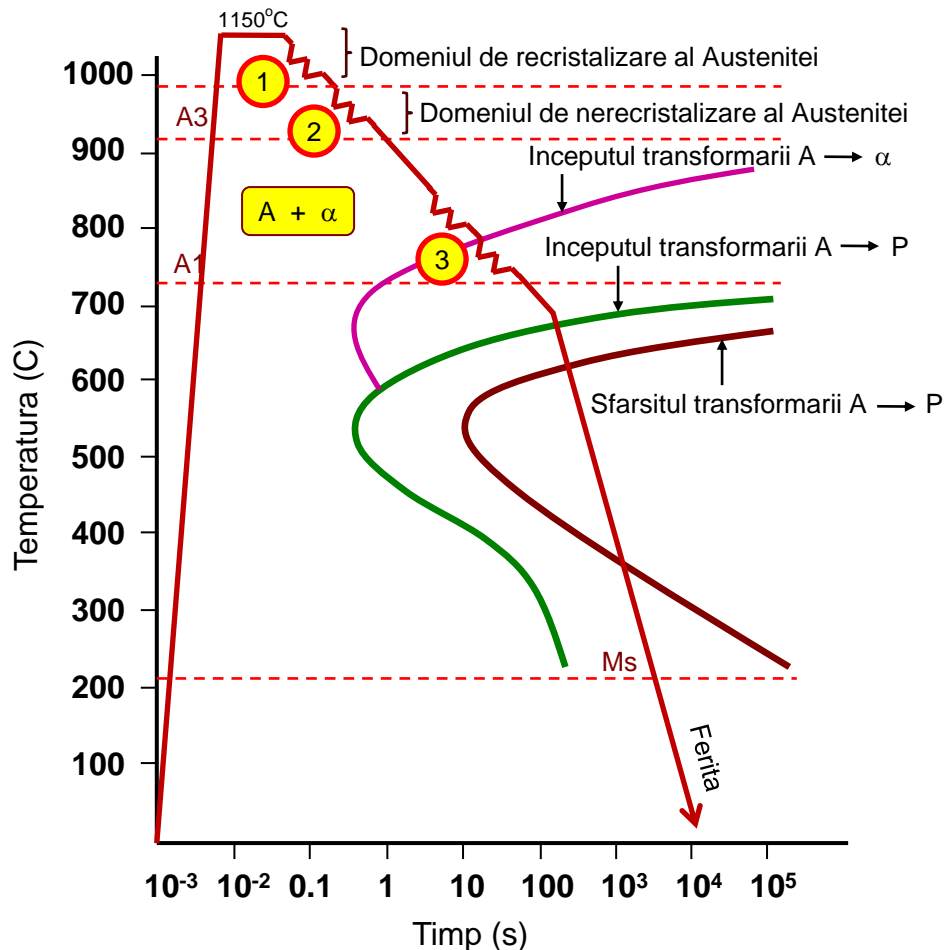
2 Tratament termomecanic izoterm de temperatură joasă la perlita - TTMizTJP

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 + α)

⚠ Laminarea controlată se aplică numai oțelurilor feritice microaliate

Dacă deformarea plastică are loc atât în domeniul austenitei stabile cât și în domeniul bifazic A + α → 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 TTM

## 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

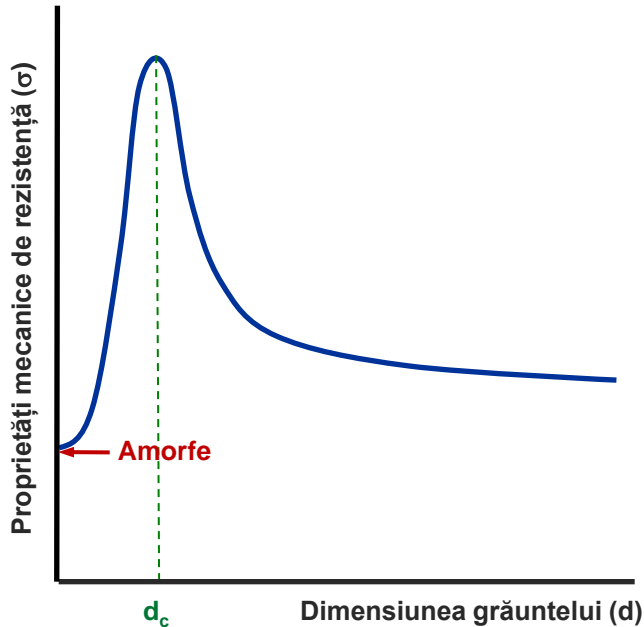
- temperatura de deformare  $T_d$  : gradul de deformare  $\varepsilon$
- temperatura și timpul menținerii postdeformaționale  $\tau$

# Imbunătățirea proprietăților prin finisare structurală

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

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

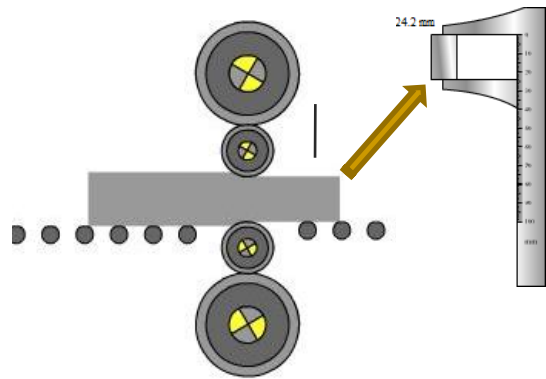
$\sigma_c$  [MPa] este limita de curgere determinată de finisarea structurală  
 $\sigma_{co}$  [MPa] este limita de curgere inițială a materialului  
 $d$  [ $\mu\text{m}$ ] este dimensiunea grăuntelui  
 $K$  este o constantă de material determinată experimental



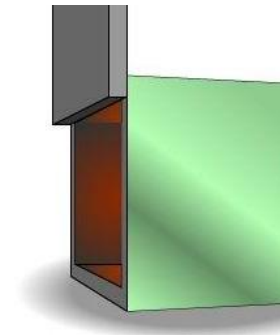
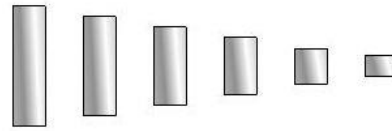
Finisarea granulației asigură nu numai creșterea proprietăților de rezistență ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_c$ , HV), ci și menținerea celor de plasticitate ( $A_u$ , Z)

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

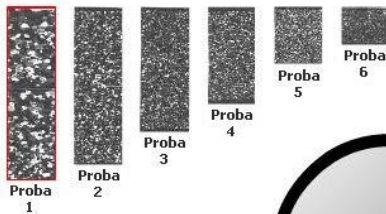
# Experiment



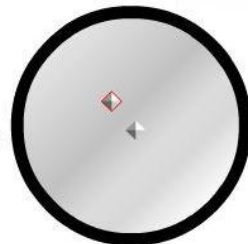
Laminare



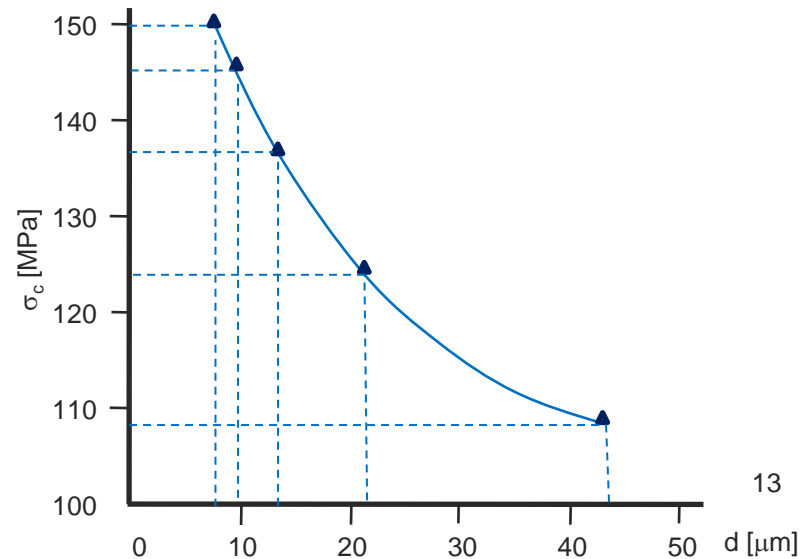
Recristalizare



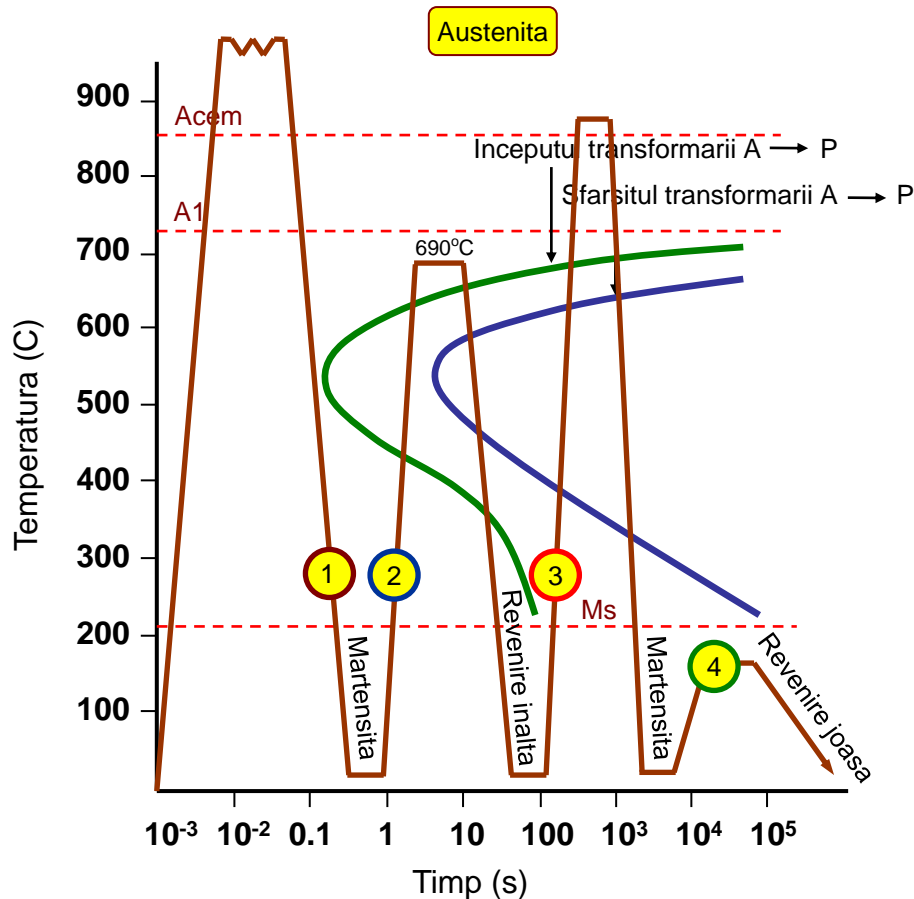
Duritatea urmei selectate: 34,4 HV



Duritate HV  $\sim \sigma_c/3$



# Aplicație: TTM al oțelului de rulmenți



- 1 Călire la martensită din caldul deformării plastice
- 2 Revenire înaltă 690°C-8h pentru precipitarea fin 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      | $\sigma_r$ (daN/mm <sup>2</sup> ) | $A_u$ (%) | KCU (J/cm <sup>2</sup> ) | $K_{pf}$ (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------|----------|-----------------------------------|-----------|--------------------------|-------------------------------|
| 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:

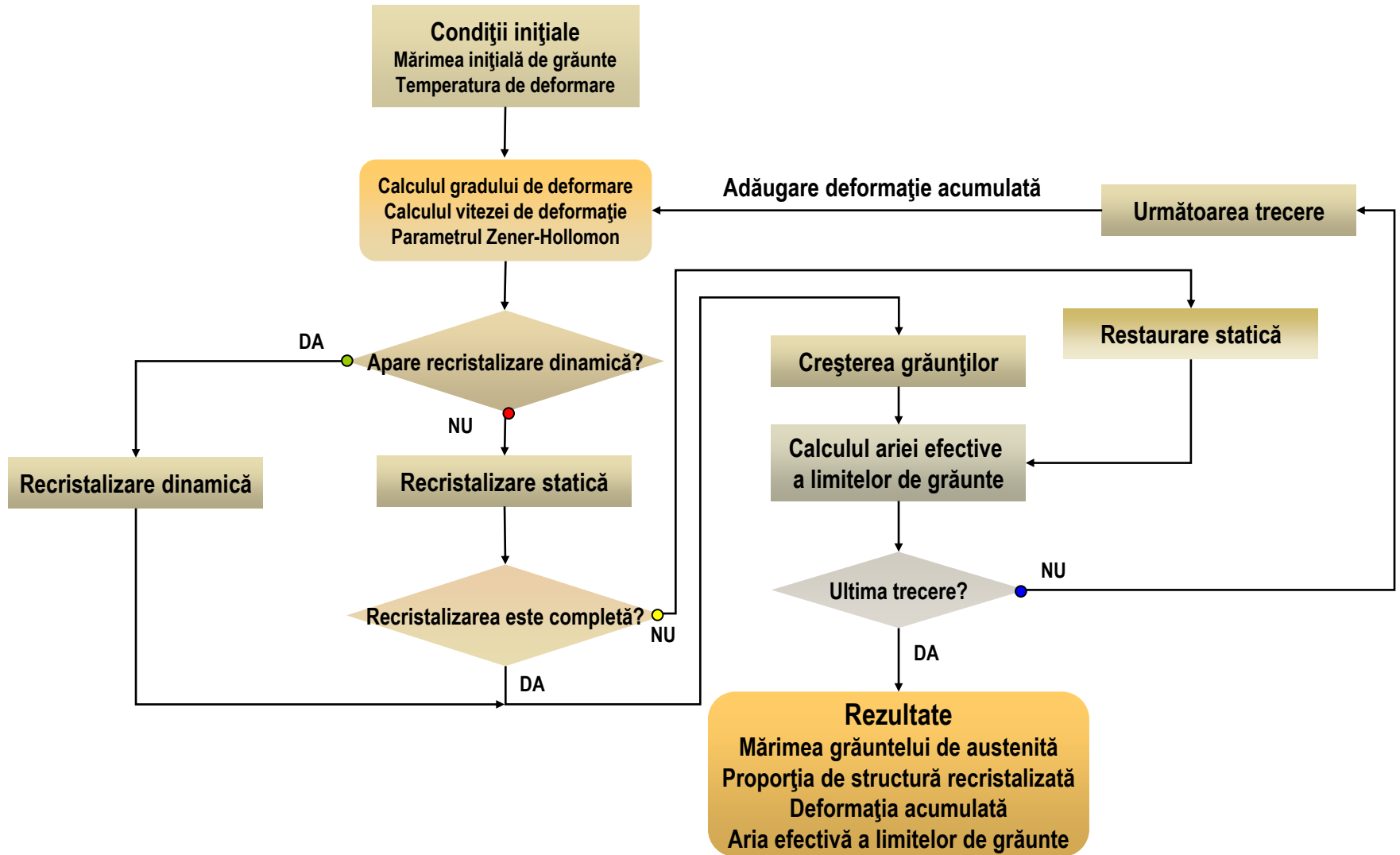
- **Determină fundamental desfășurarea transformărilor ulterioare**
- **Decide gradul de finisare al produșilor de transformare:  $\alpha$ , P, B, M**
- **Contribuie la obținerea proprietățile mecanice finale**

## 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?

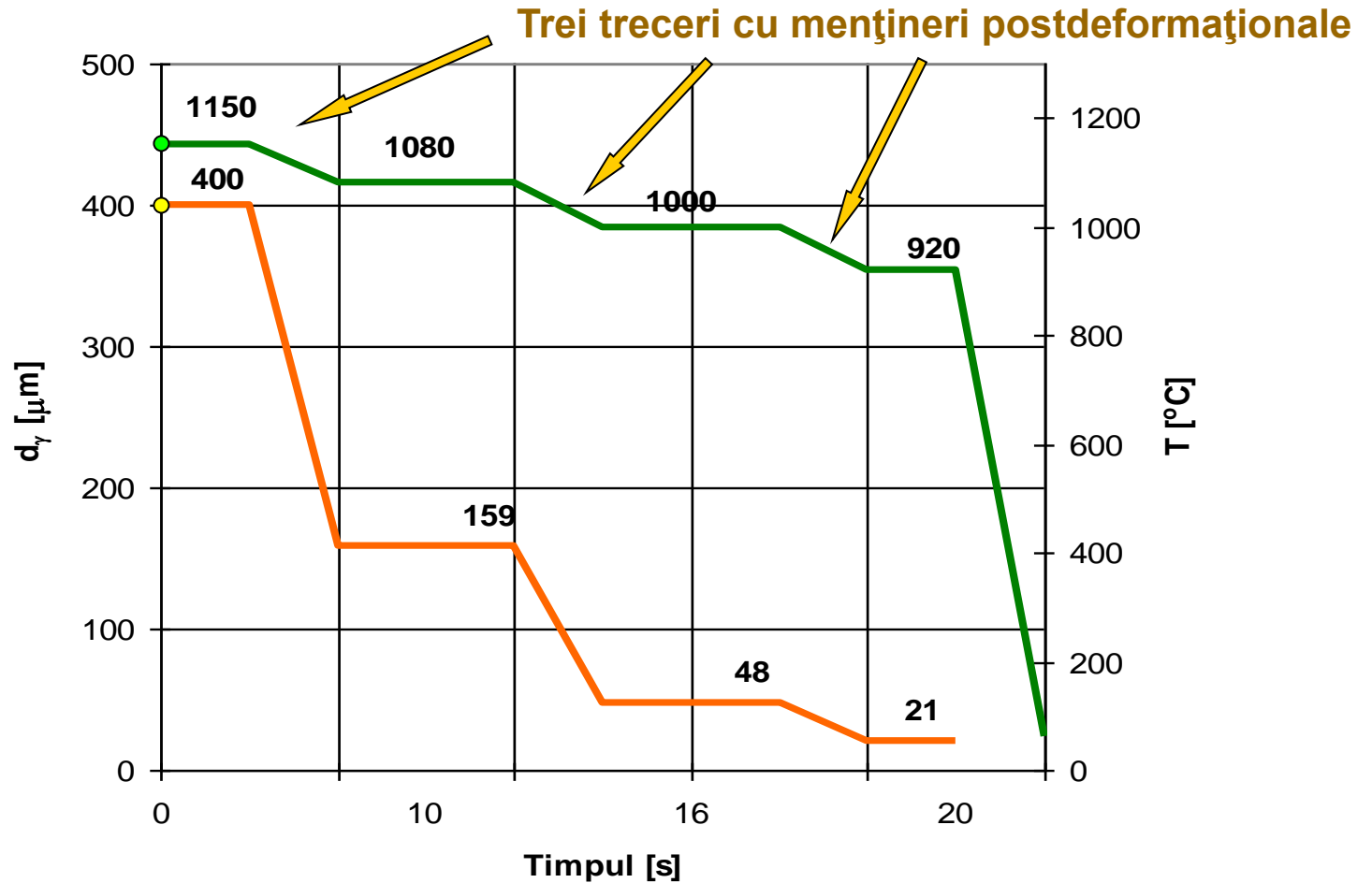
Oțel cu 0,12%C; 0,25%Si; 1,4%Mn

Exemplu de calcul

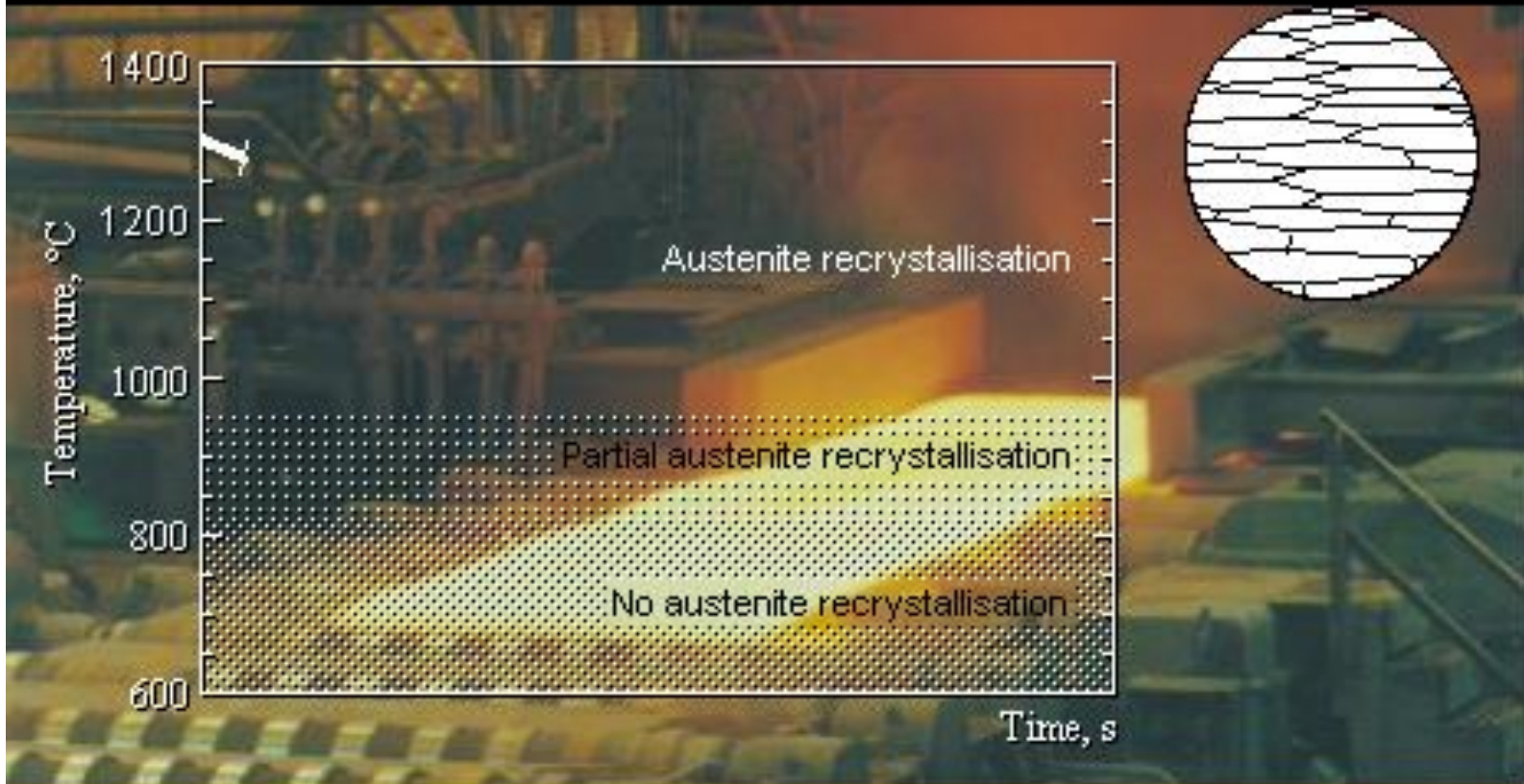
| h <sub>o</sub> [mm]      | h [mm] | R [mm] | N [rot/min] | τ [s] | d <sub>o</sub> [μm] | T <sub>IL</sub> [°C] | T <sub>SL</sub> [°C] | ε    | ε [s <sup>-1</sup> ] | Q <sub>def</sub> [kJ/mol] | ε <sub>p</sub> | ε <sub>D</sub> (0,7ε <sub>p</sub> ) | ε* (0,8ε <sub>p</sub> ) | t <sub>0.5</sub> [s] (ε<ε*) | d <sub>γRS</sub> [μm] recr | t <sub>ment</sub> [s] | X <sub>recr</sub> | Δε   | T <sub>ment</sub> [°C] | K <sub>γcres</sub> | d <sub>c</sub> [μm] | d <sub>γ final</sub> [μm] | S <sub>g</sub> [μm <sup>-1</sup> ] |  |
|--------------------------|--------|--------|-------------|-------|---------------------|----------------------|----------------------|------|----------------------|---------------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|------|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------|--|
| 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                   |                      |      |                      |                           |                |                                     |                         |                             |                            |                       |                   |      |                        |                    |                     |                           |                                    |  |



# Evoluția 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



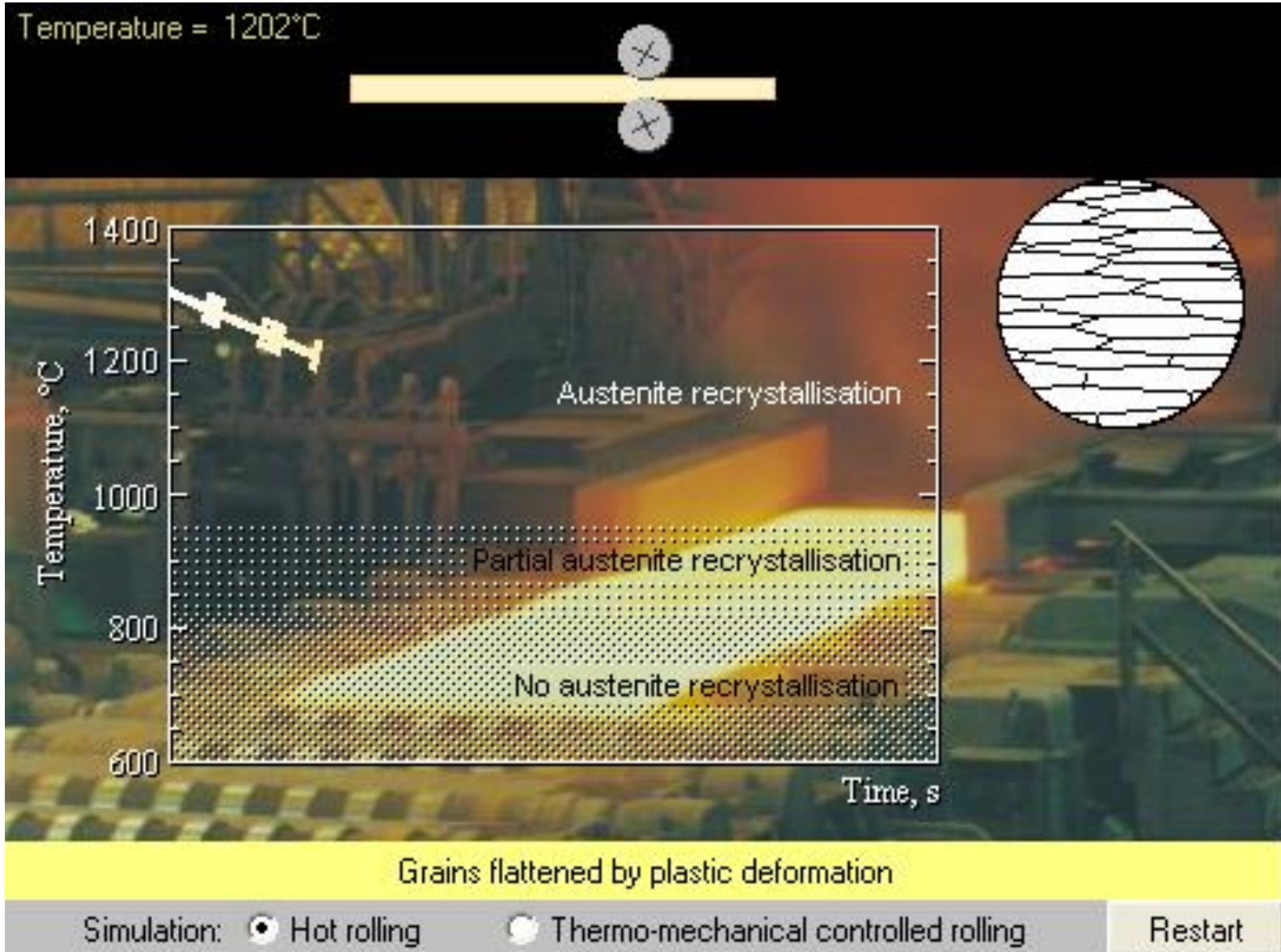
Grains flattened by plastic deformation

Simulation:  Hot rolling

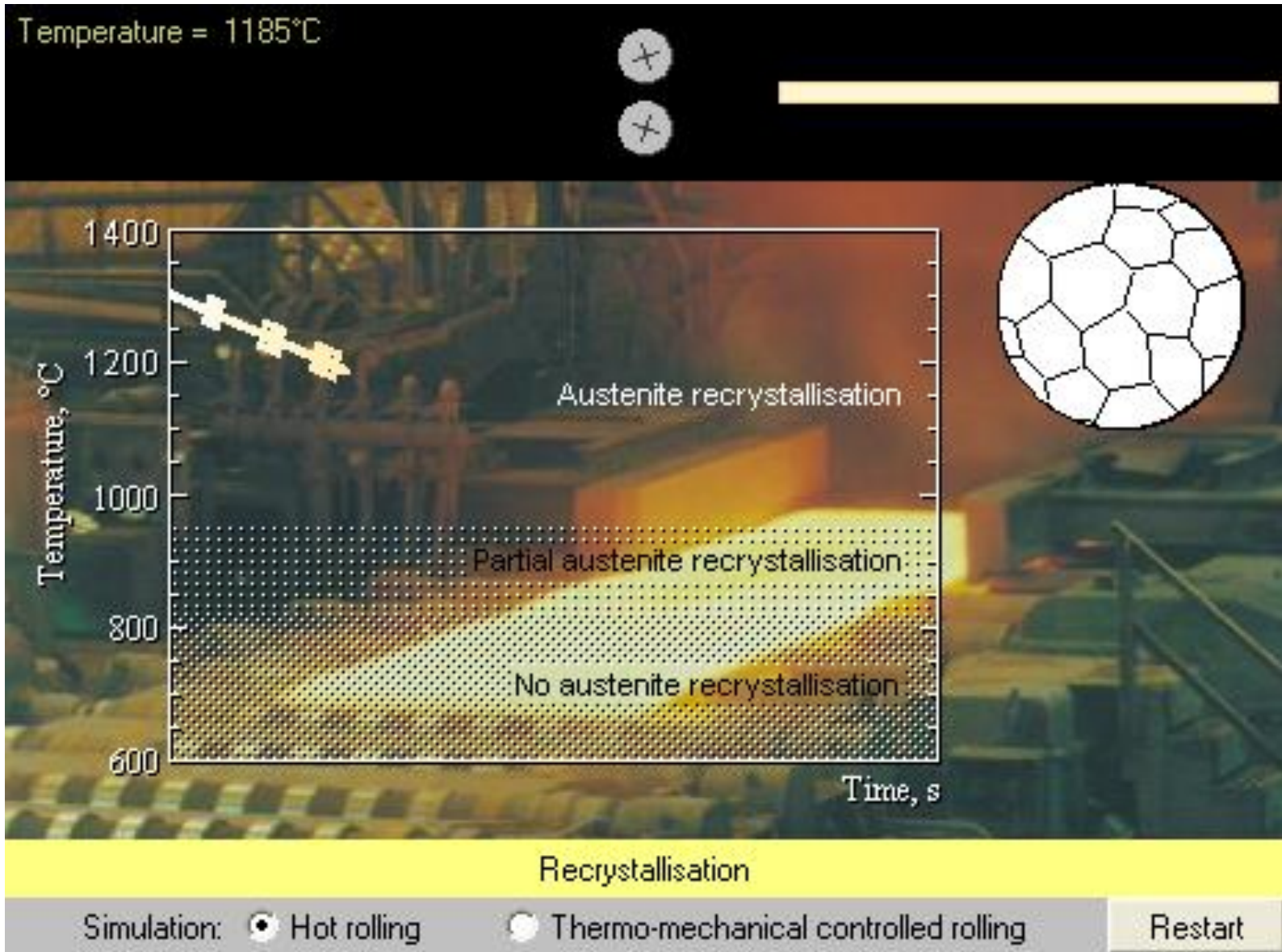
Thermo-mechanical controlled rolling

Restart

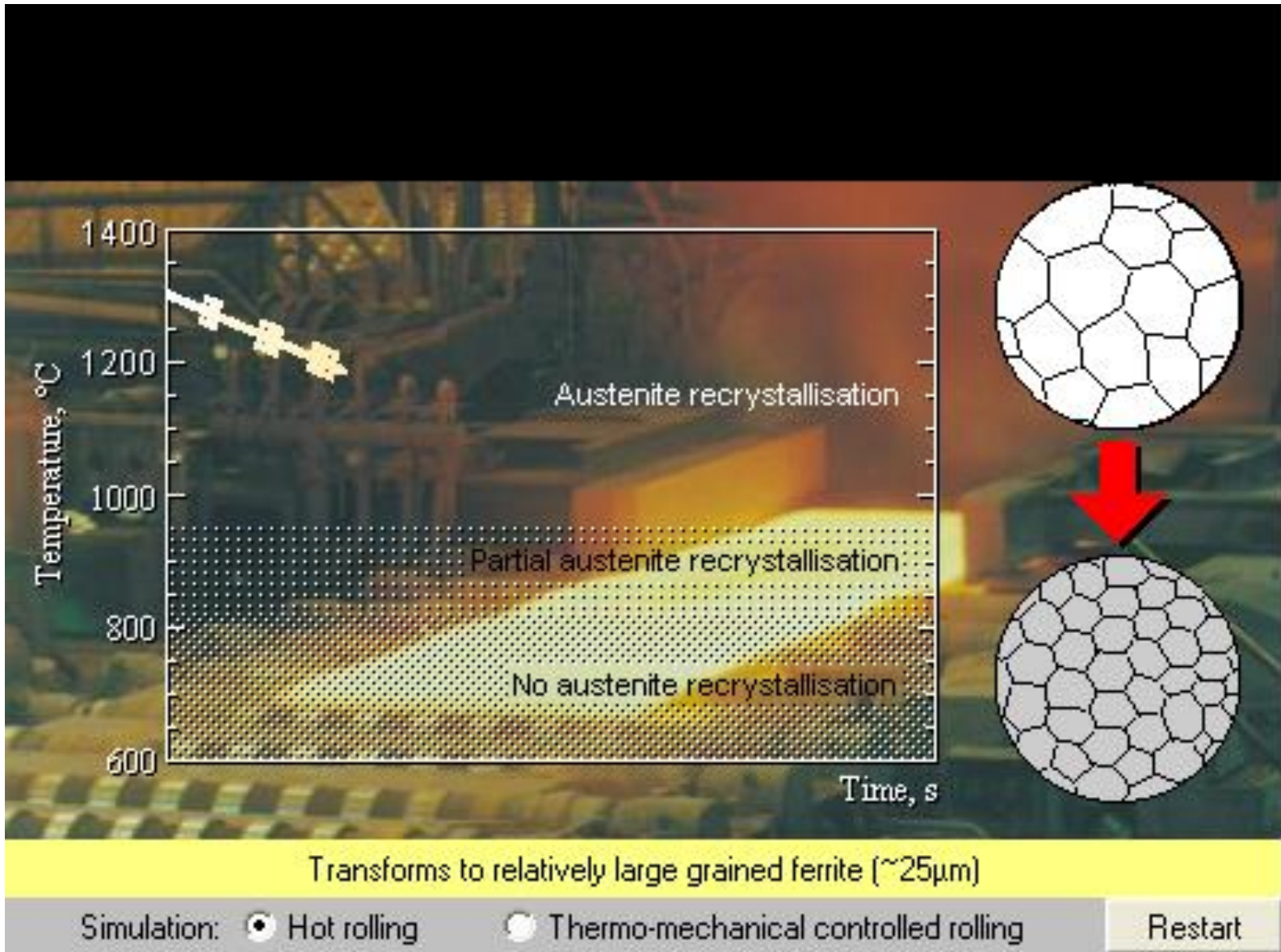
**A doua trecere:  $T_L = 1236^\circ\text{C}$ ; structura prezintă grăunți alungiți**



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



**Menținere postdeformațională, recristalizarea austenitei ⇒ grăunți echiacși (mari)**



**Transformarea austenitei recristalizate într-o ferită relativ mare**



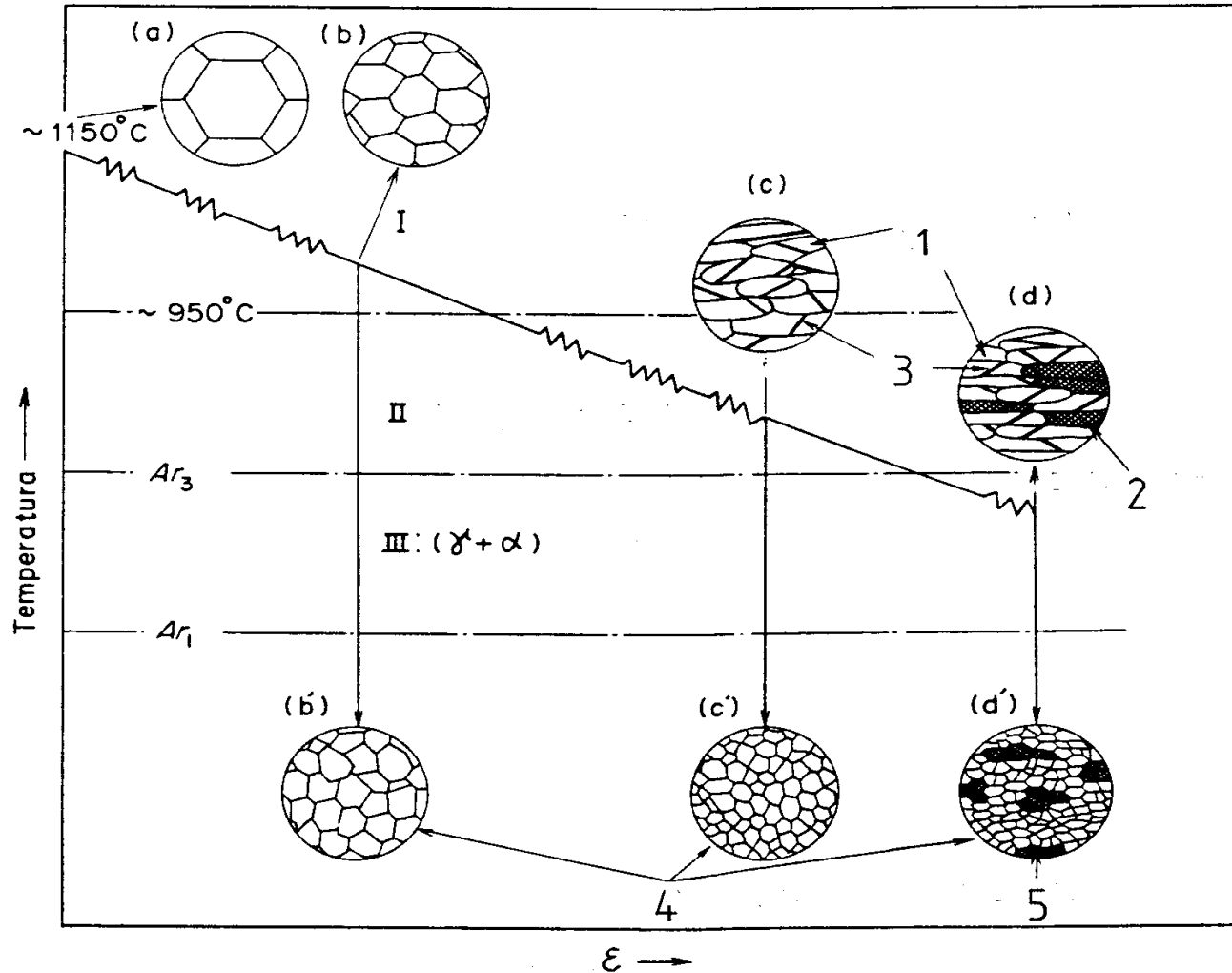
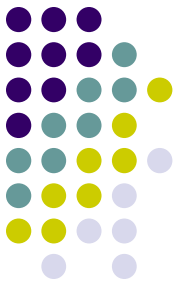
# Laminare controlată

- Un TTM 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

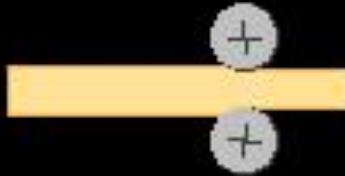
# Scopul laminării controlate

- 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

# Evolutia structurii in timpul laminarii controlate



Temperature = 1174°C



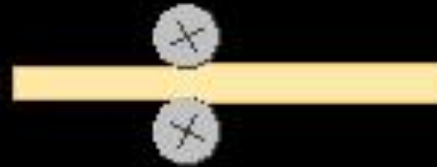
Grains flattened by plastic deformation

Simulation:  Hot rolling

Thermo-mechanical controlled rolling

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

Temperature = 1135°C



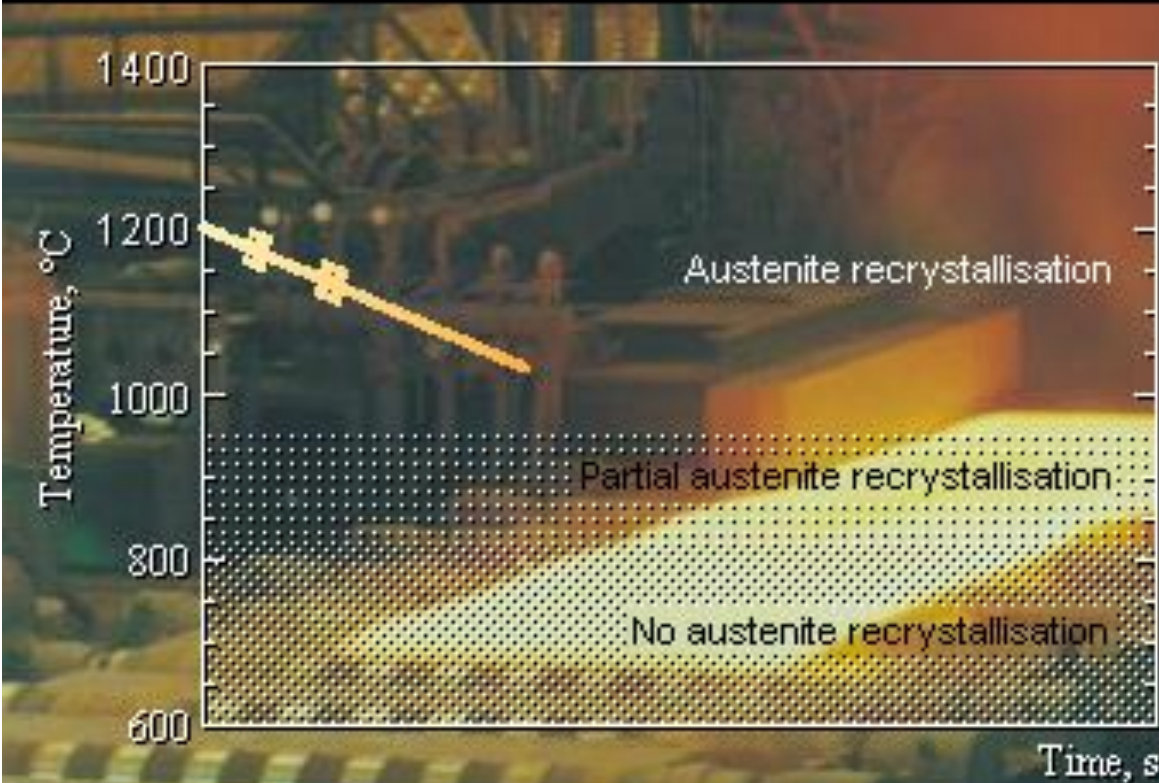
Grains flattened by plastic deformation

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

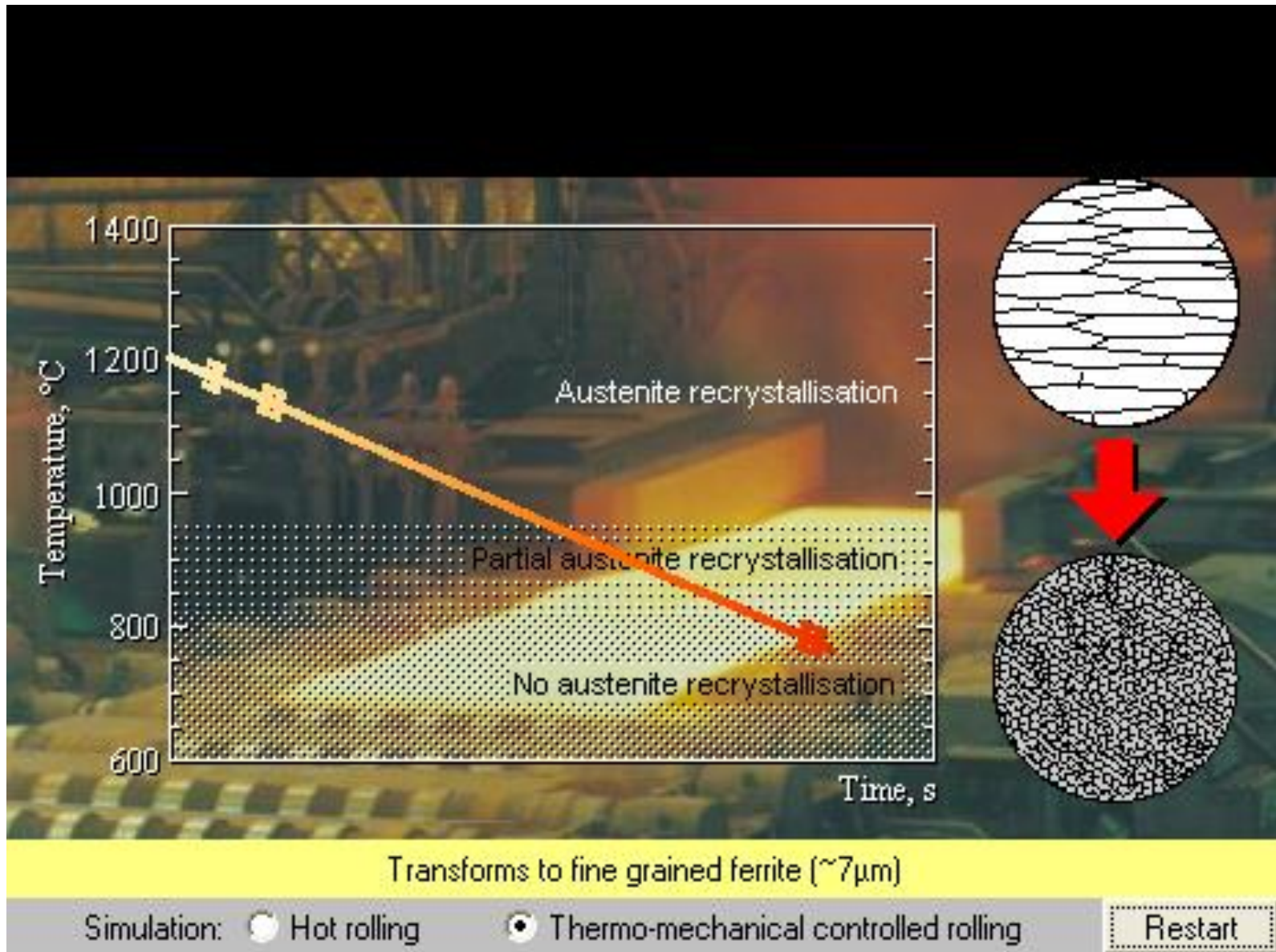


Grains flattened by plastic deformation

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  $\gamma$ ; 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**