

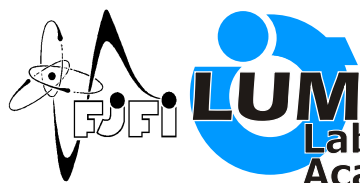
# Mechanika a termodynamika monokrystalů slitin s tvarovou pamětí

**Ing. Hanuš SEINER, Ph.D.**

**Katedra materiálů, FJFI, ČVUT v Praze  
Laboratoř ultrazvukových metod, ÚT AVČR**

**Seminář FZÚ, 14.10. 2008, společná přednáška  
s RNDr. Petrem ŠITNEREM, CSc.**

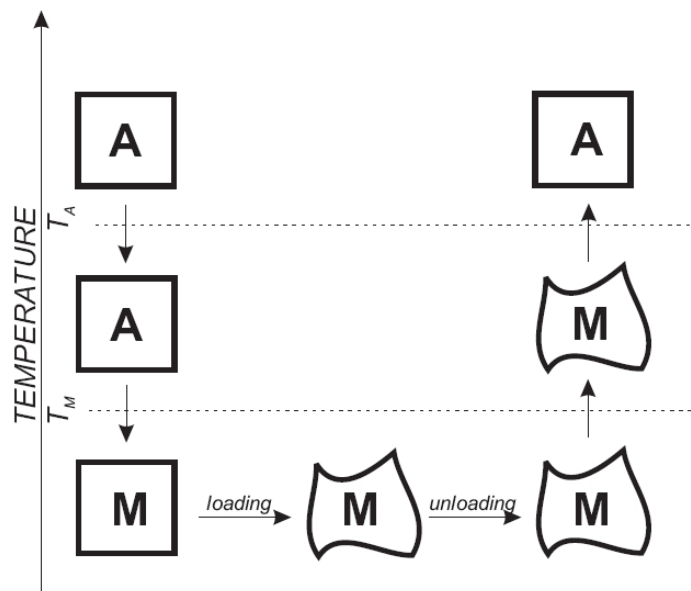
- Osnova:**
1. Úvod do teoretického popisu monokrystalů SMA
    - 1.1 Jev tvarové paměti
    - 1.2 Matematický popis martenzitických mikrostruktur
    - 1.3 Termodynamika monokrystalů SMA
  2. Mechanická stabilizace martenzitu
    - 2.1 Efekt stabilizace a rozhraňové mikrostruktury
    - 2.2 Experimentální pozorování
    - 2.3 Termodynamika mechanické stabilizace
    - 2.4 Teoretická interpretace pozorovaných mikrostruktur



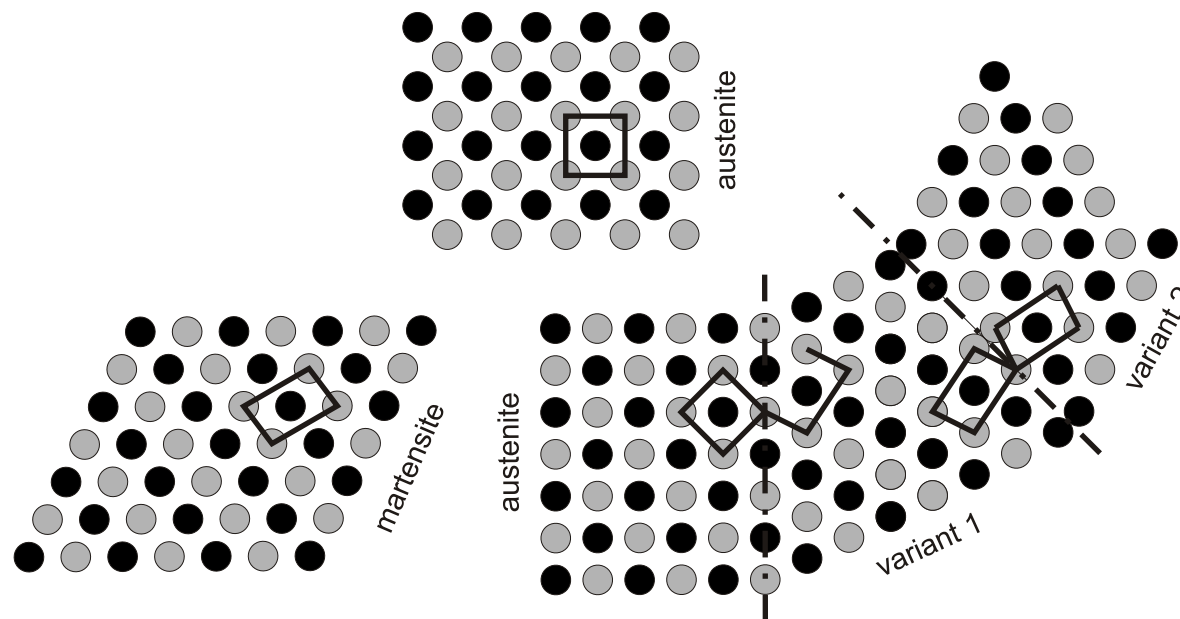
# 1. Úvod do teoretického popisu SMA

## 1.1 Jev tvarové paměti

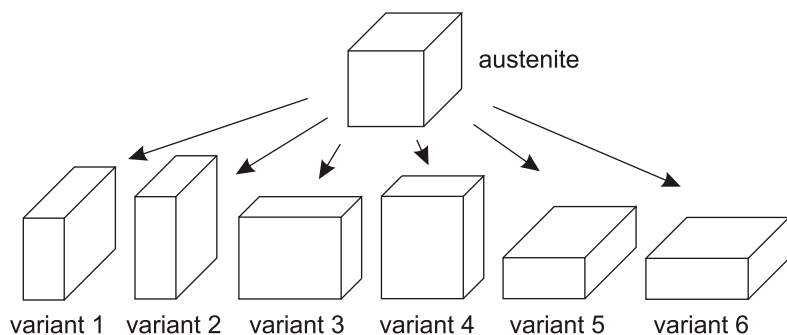
Makroskopický efekt:



Mikrostrukturní interpretace:



Relace grupa-podgrupa v symetriích A a M:



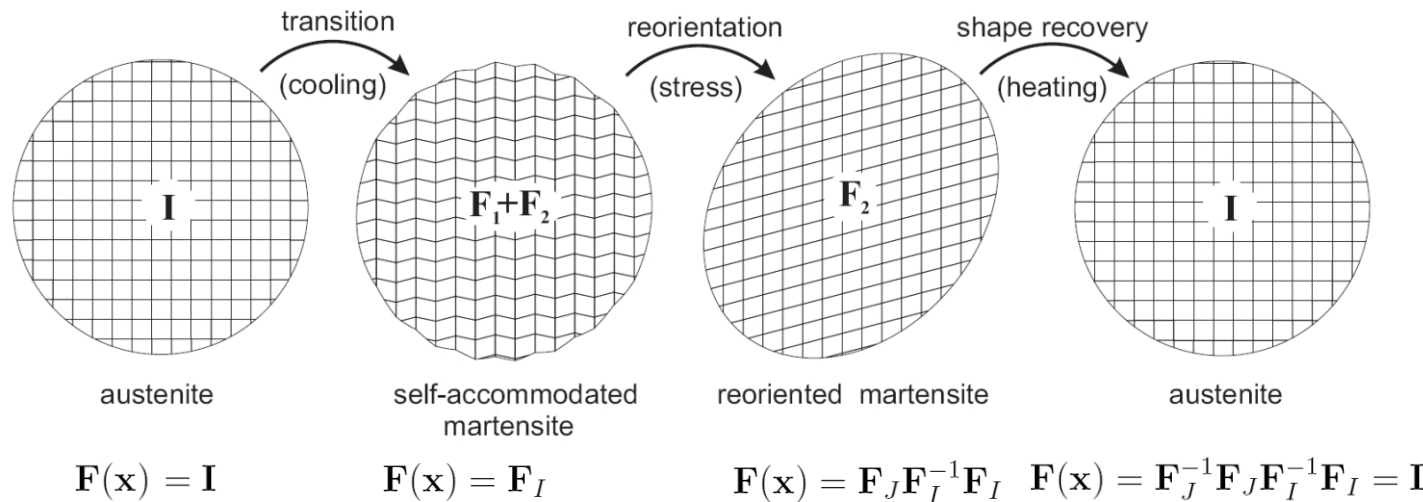
- makroskopická smyková deformace jako projev fázové transformace
- fázová rozhraní mohou existovat pouze v určitých předepsaných rovinách
- tvorba jemných mikrostruktur a jejich snadná pohyblivost
- složitost popisu, izotropní modely plasticity atd. nefungují

# I. Úvod do teoretického popisu SMA



## 1.2 Matematický popis martenzitických mikrostruktur

Teorie vyvinutá R.D. Jamesem a sirem J.M. Ballem v 80tých letech minulého století umožňující popis vratné martenzitické transformace pomocí mechaniky kontinua. (Funguje pouze díky tomu, že při vratné martenzitické transformaci nedochází k distorzi mřížky, pouze ke změně její geometrie.)



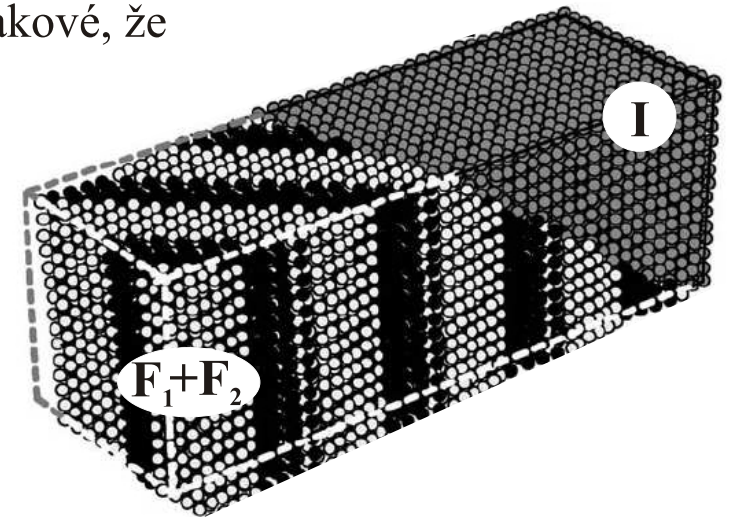
Tato teorie nám rovněž říká, kdy může existovat kompatibilní (geometricky přípustné) rozhraní. Je to tehdy a jen tehdy, když existuje vektor  $\mathbf{a}$  a normála k rozhraní  $\mathbf{n}$  takové, že

$$\mathbf{F}_I - \mathbf{F}_J = \mathbf{a} \otimes \mathbf{n}.$$

Speciální případ nastává, pokud se jedná o rozhraní mezi austenitem a martenzitem:

$$\mathbf{I} - \mathbf{M} = \mathbf{a} \otimes \mathbf{n}.$$

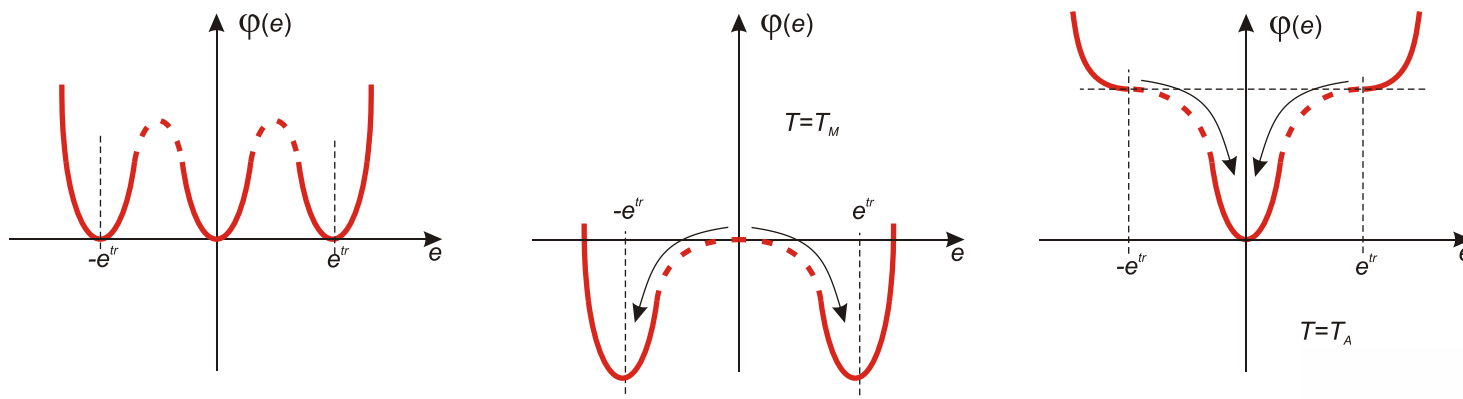
M je většinou laminát prvního řádu, ale existují i obecnější případy.



# 1. Úvod do teoretického popisu SMA

## 1.3 Termodynamika monokrystalů SMA

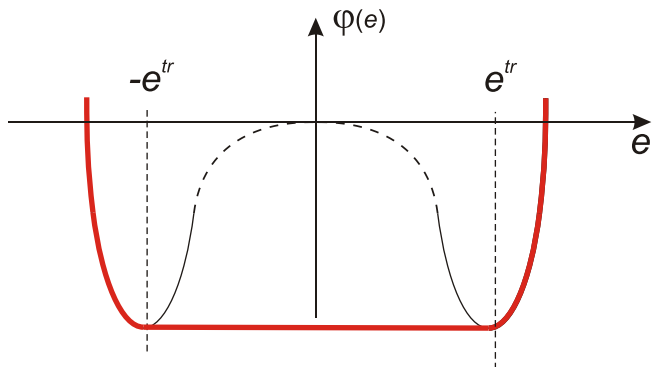
Vycházíme z předpokladu, že každá fáze, která může za dané teploty existovat je rovnovážná, tj. odpovídá jí minimum nějakého termodynamického potenciálu.



$$\Phi = \int_{\Omega} \varphi(\nabla \mathbf{y}(\mathbf{x}), T) dV$$

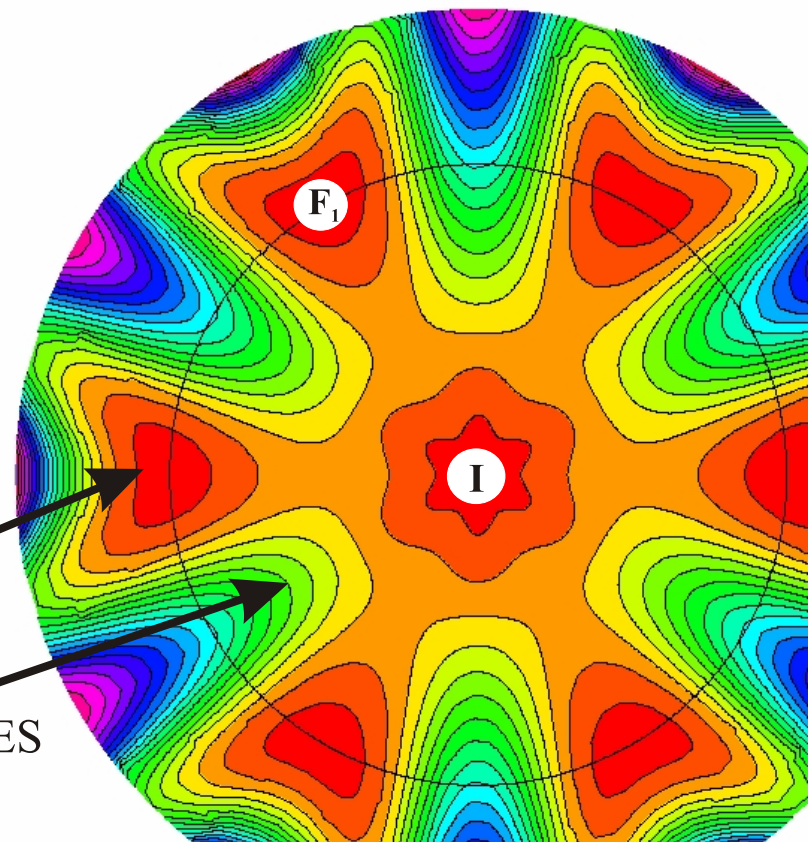
Materiál nemůže zůstat v oblasti s konkávní energií (spinodálním regionu) proto dochází k vytváření mikrostruktur - periodických uspořádání martenzitických variant.

Mikrostruktury jsou energeticky ekvivalentní jedné variantě => představa energie jako kvazikonvexní obálky minim



Jednotlivé jámy mají tvar a symetrii dány elastickými koeficienty...

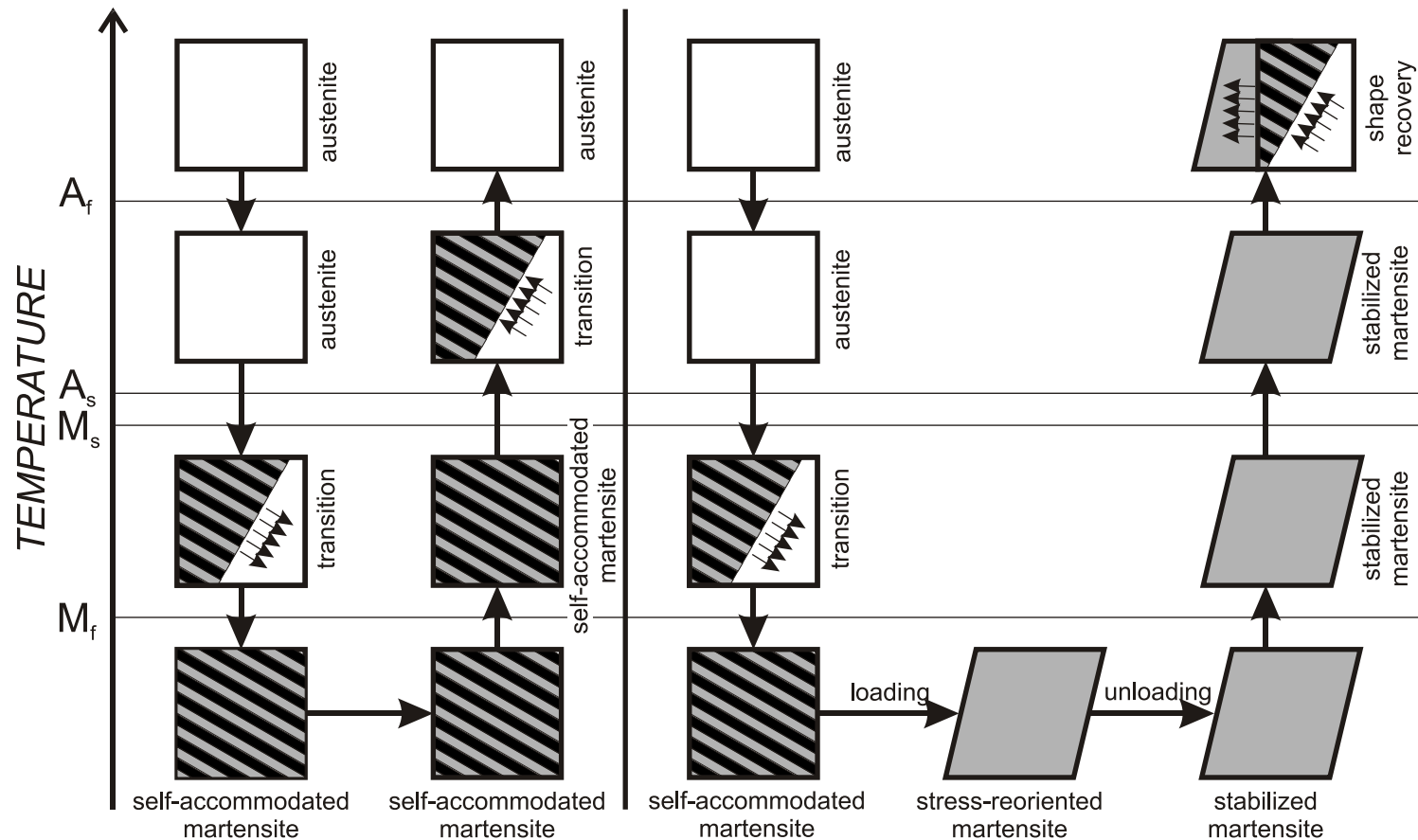
...ale HIC SUNT LEONES



# 2. Mechanická stabilizace martenzitu

## 2.1. Efekt stabilizace a rozhraňové mikrostruktury

Kritické teploty a kritická napětí pro jednotlivé transformace je teoreticky možno provázat Clapeyronovou relací. V realitě je však možno hýbat transformačními teplotami pomocí čistě geometrických efektů.



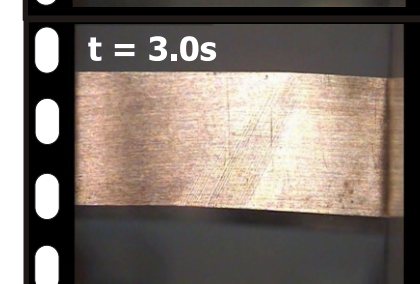
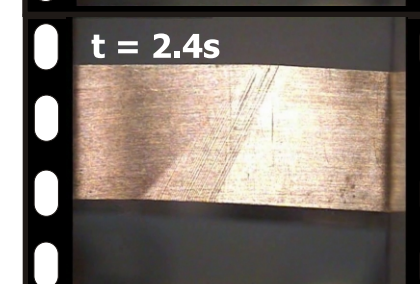
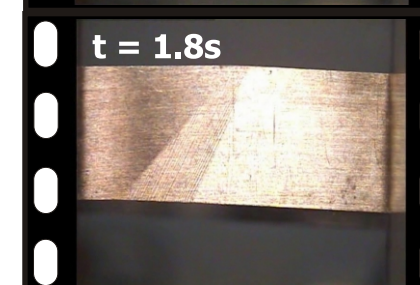
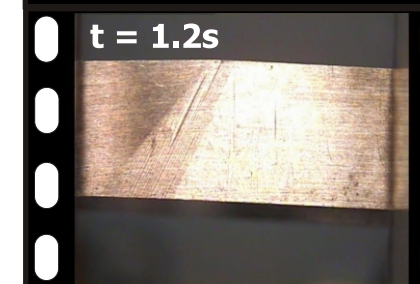
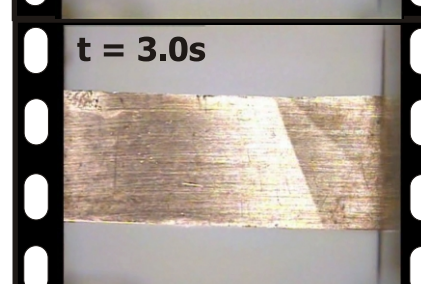
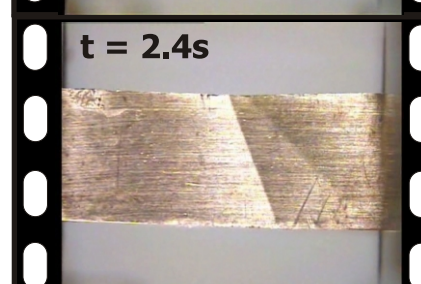
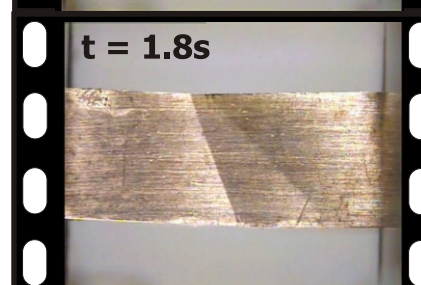
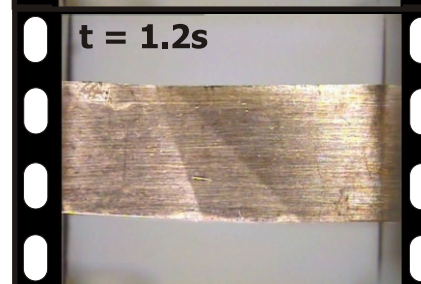
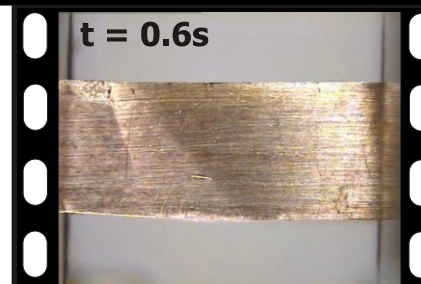
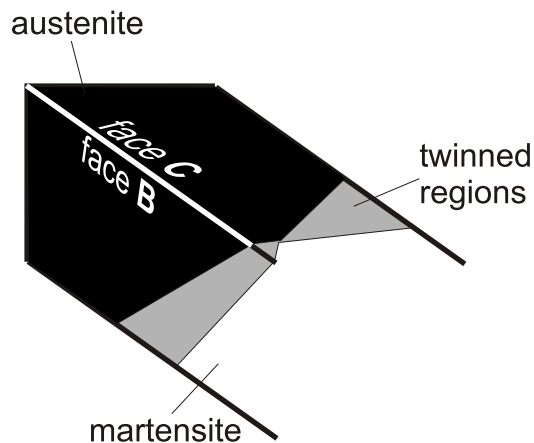
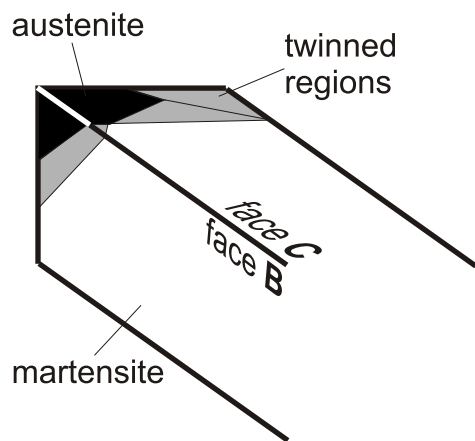
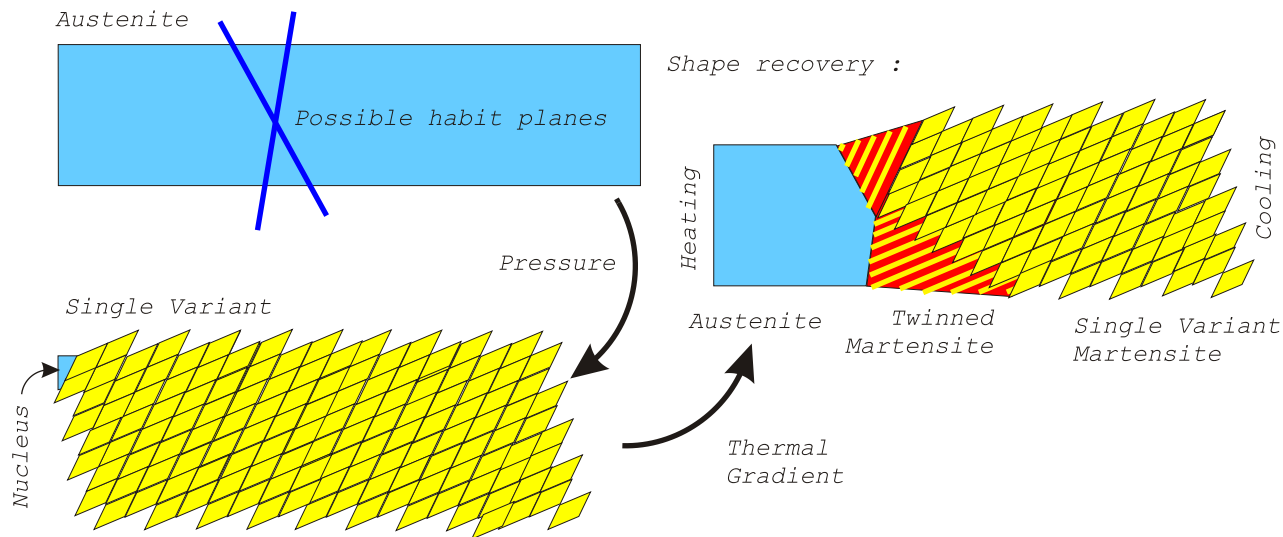
- tvorba a pohyb nové mikrostruktury jsou energeticky náročné (bohužel, zatím nikdo netuší jak)
- pro SMA neexistuje nic jako 'trasformační teplota' ve smyslu materiálové konstanty
- značnou roli sehrává elasticita

# 2. Mechanická stabilizace martenzitu

## 2.2. Experimentální pozorování

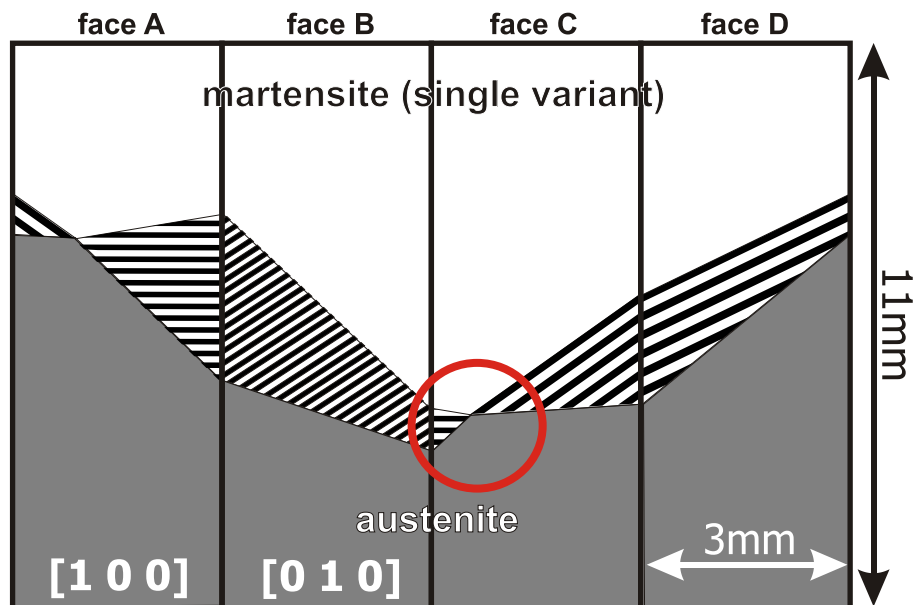
Austenit byl nejprve převeden do mechanicky stabilizovaného martenzitu aplikací vnějšího napětí.

Potom byla ohřevem vyvolána zpětná transformace.

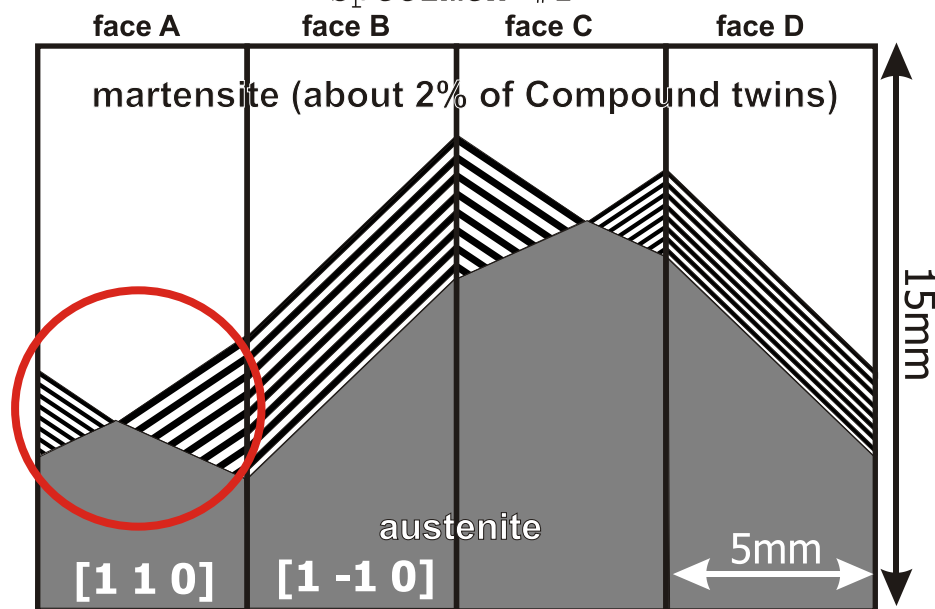


# 2. Mechanická stabilizace martenzitu

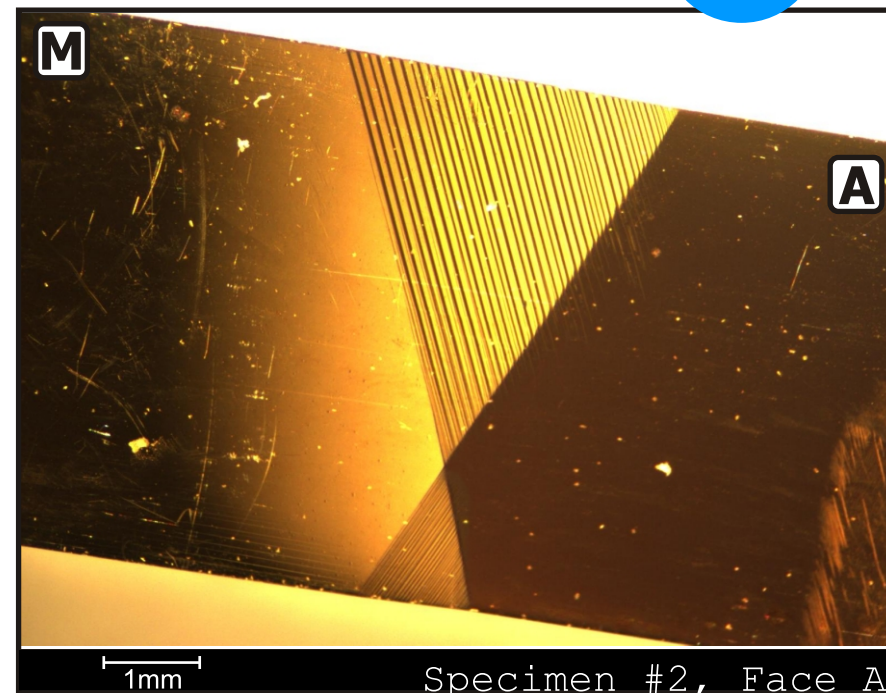
## 2.2 Experimentální pozorování



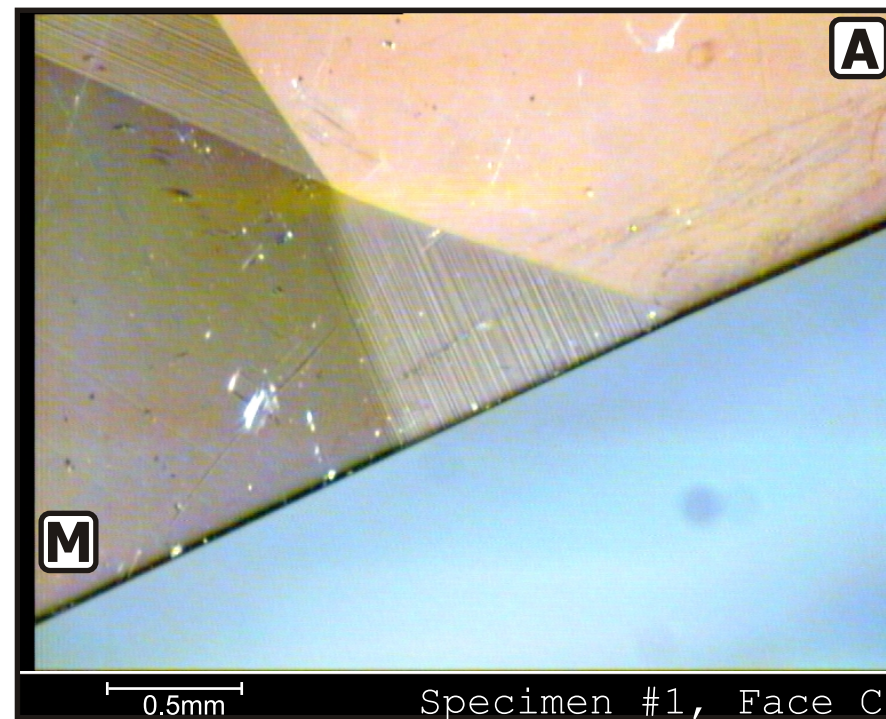
Specimen #1



Specimen #2



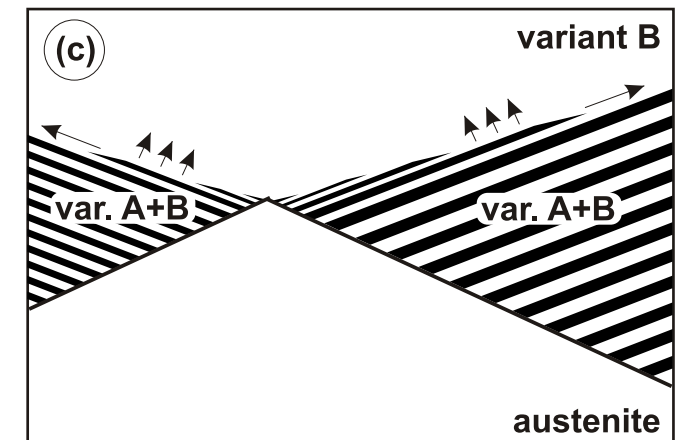
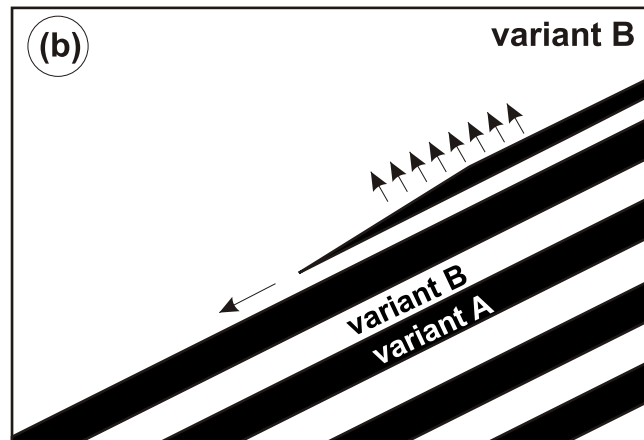
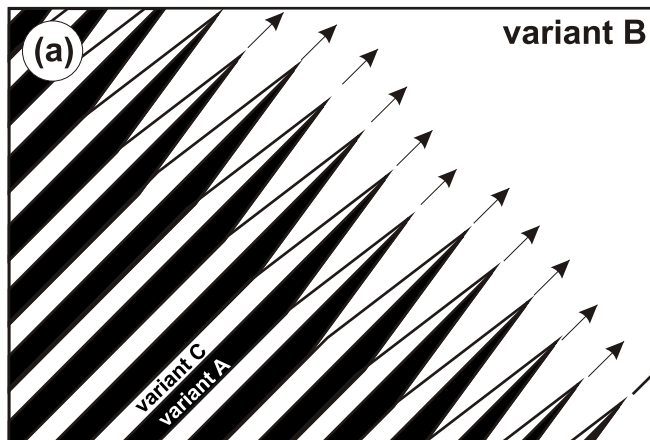
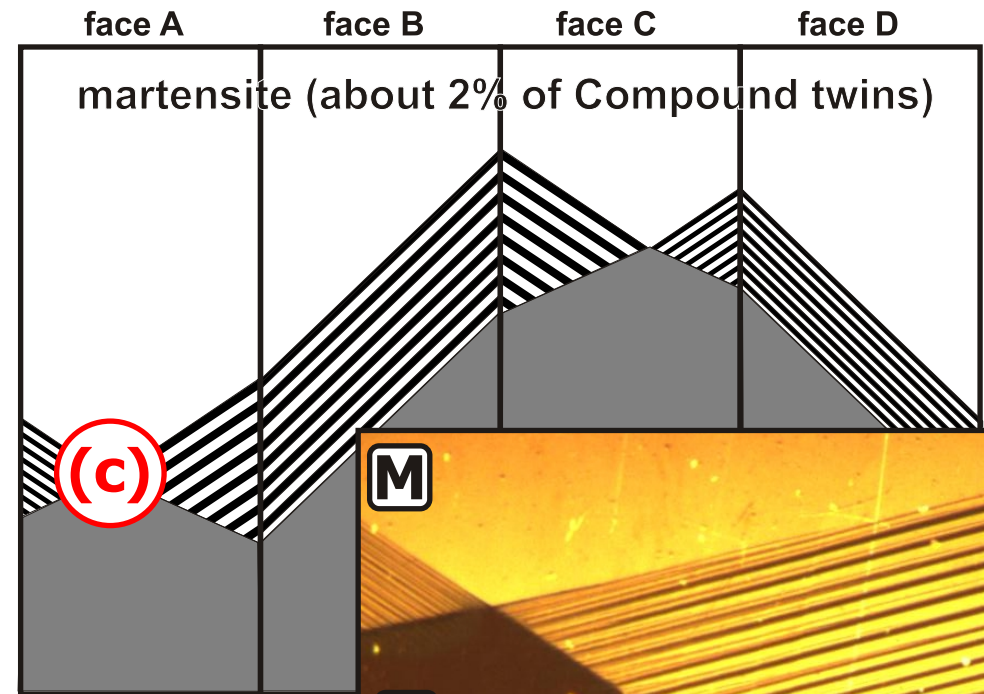
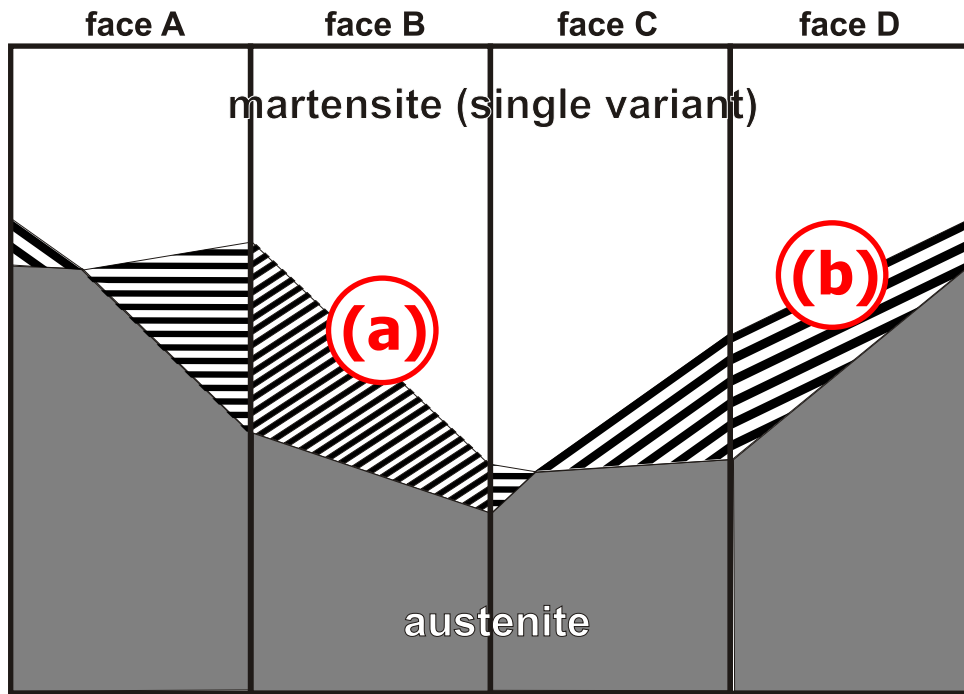
Specimen #2, Face A



Specimen #1, Face C

# 2. Mechanická stabilizace martenzitu

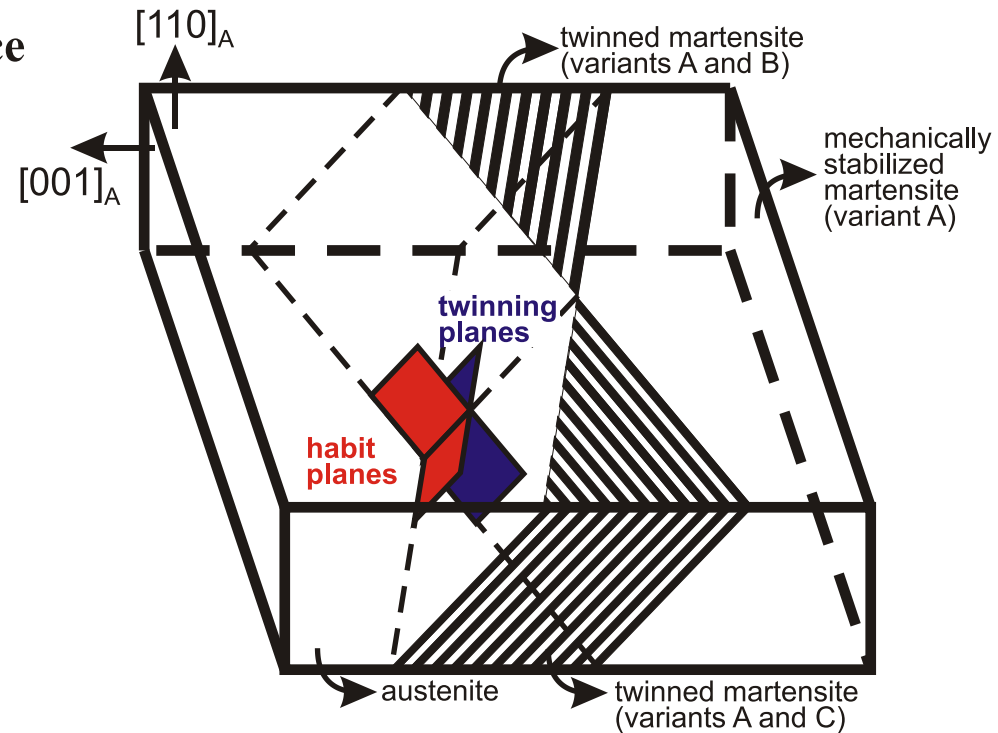
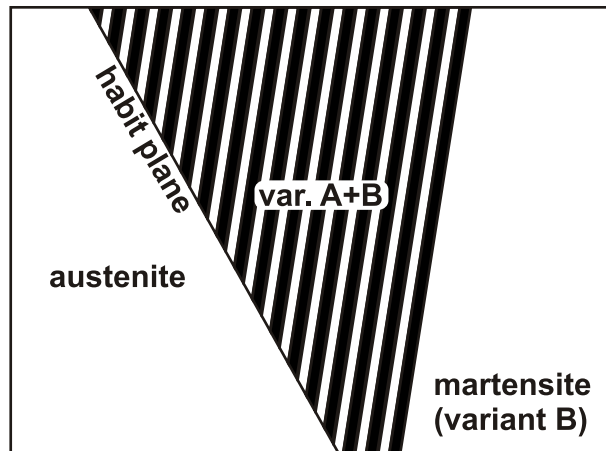
## 2.2 Experimentální pozorování





# 2. Mechanická stabilizace martenzitu

## 2.3 Termodynamická mechanické stabilizace



The **Clausius inequality** (the 2nd law of thermodynamics, consequence of  $\delta Q \leq TdS$ )

$$dU \leq TdS - dW$$

is valid for every irreversible proces. (For reversible processes, the equality sign is valid.)

For isothermal processes

$$d\Phi = dU - TdS \leq -dW$$

Hypothesis:

**During the transition, the released Helmholtz free energy must be larger or equal to the mechanical work being done by the transition front.**

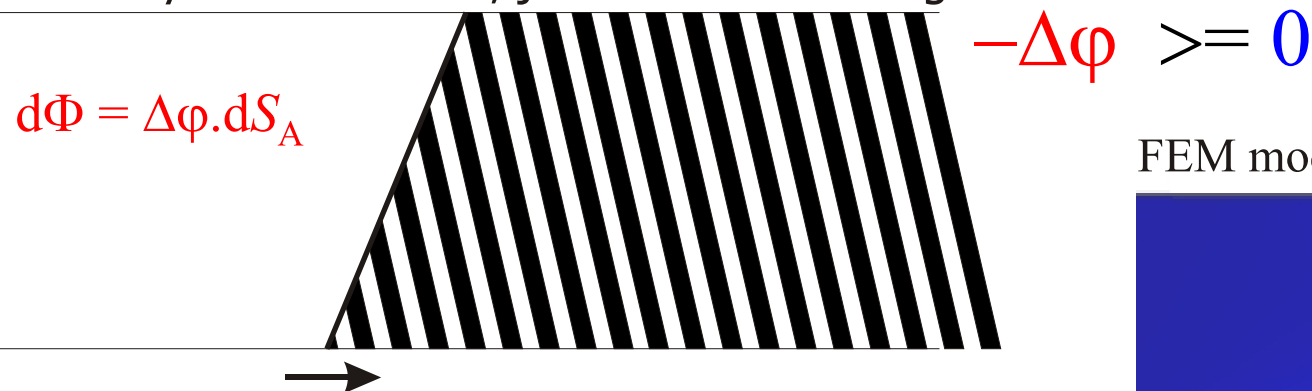
# 2. Mechanická stabilizace martenzitu



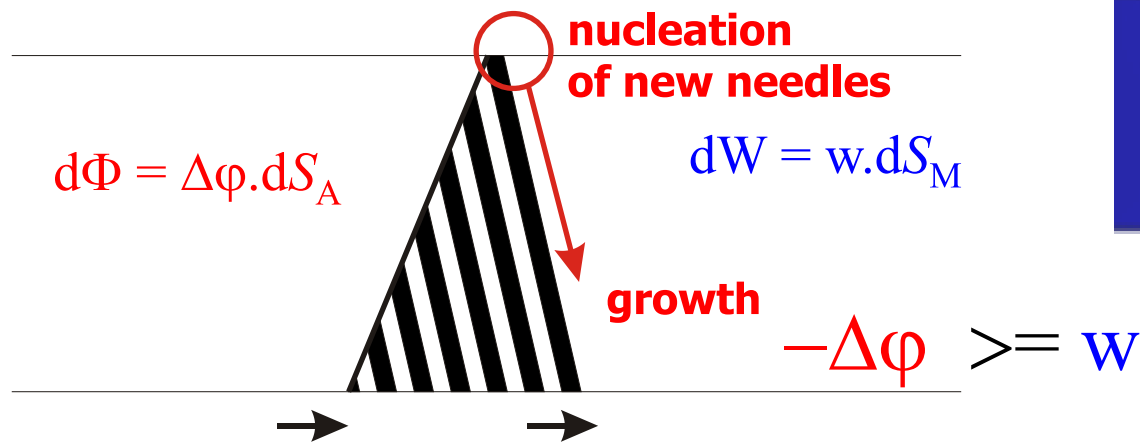
## 2.3 Termodynamická mechanické stabilizace

Consider two infinite rods of SMA single crystal (2D), and increase slowly the temperature from  $T_C$

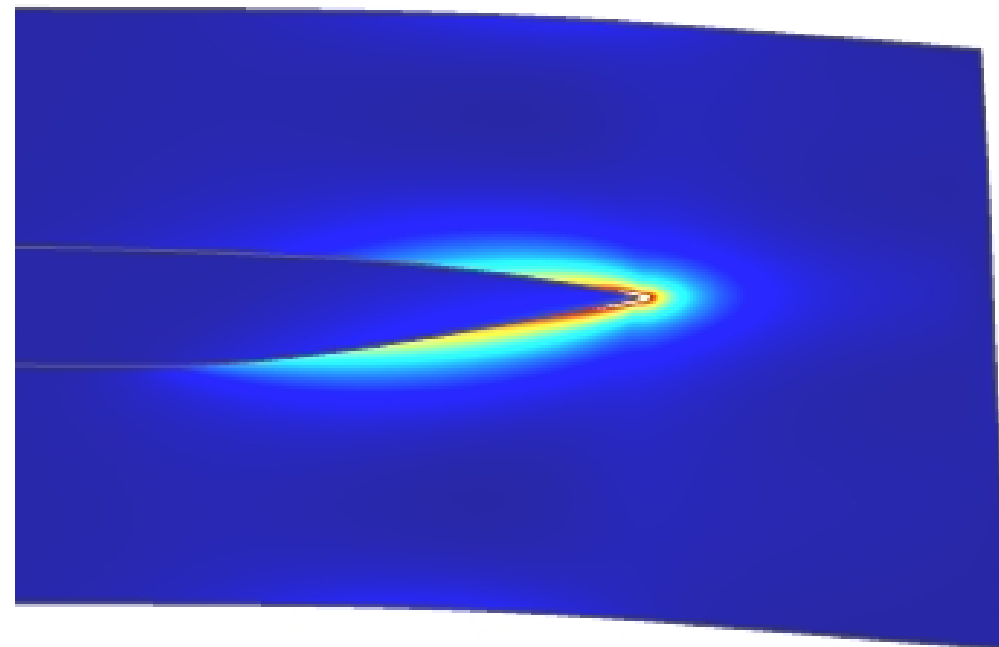
1. Self-accommodated ( $S_A$  = area of austenite,  $\Delta\phi$  = difference in free energy density)  
nearly no work done, just some branching



2. Stabilized ( $S_M$  = area of stabilized martensite,  $w$  = density of work being done)



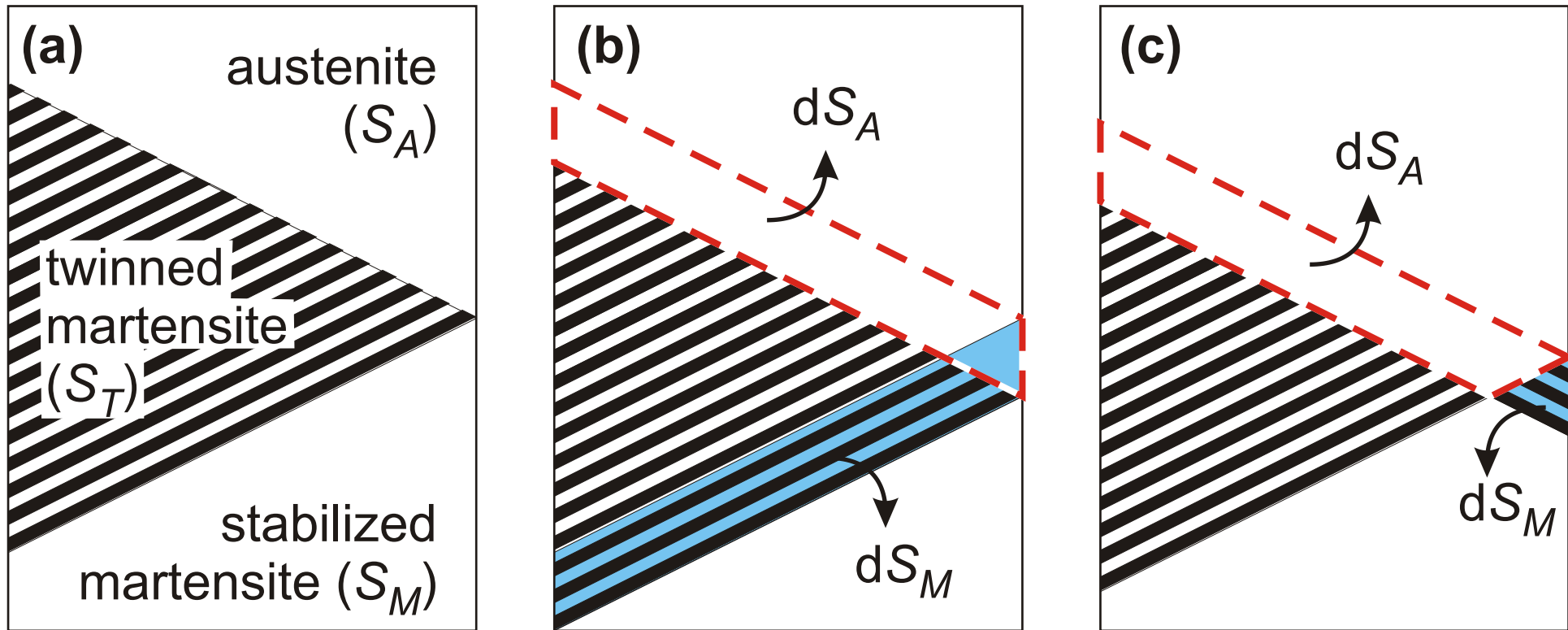
FEM modelování napěťového pole na čele jehlice:



# 2. Mechanická stabilizace martenzitu

## 2.4 Teoretická interpretace pozvaných mikrostruktur

Growth from a fully compatible starting configuration



Critical condition for activation of one of the propose mechanisms of the transition:

$$d\Phi^{(b)} = \Delta\varphi^{(b)} dS_A^{(b)} = \underbrace{dW_N}_{\text{nucleation}} + \underbrace{wdS_M^{(b)}}_{\text{growth}} \quad d\Phi^{(c)} = \Delta\varphi^{(c)} dS_A^{(c)} + \underbrace{d\Phi_E^{(c)}}_{\text{elasticity}} = dW_N + wdS_M^{(c)}$$

It can be easily shown that the X-interface is activated at lower temperatures for any reasonable  $\Phi_E$ .