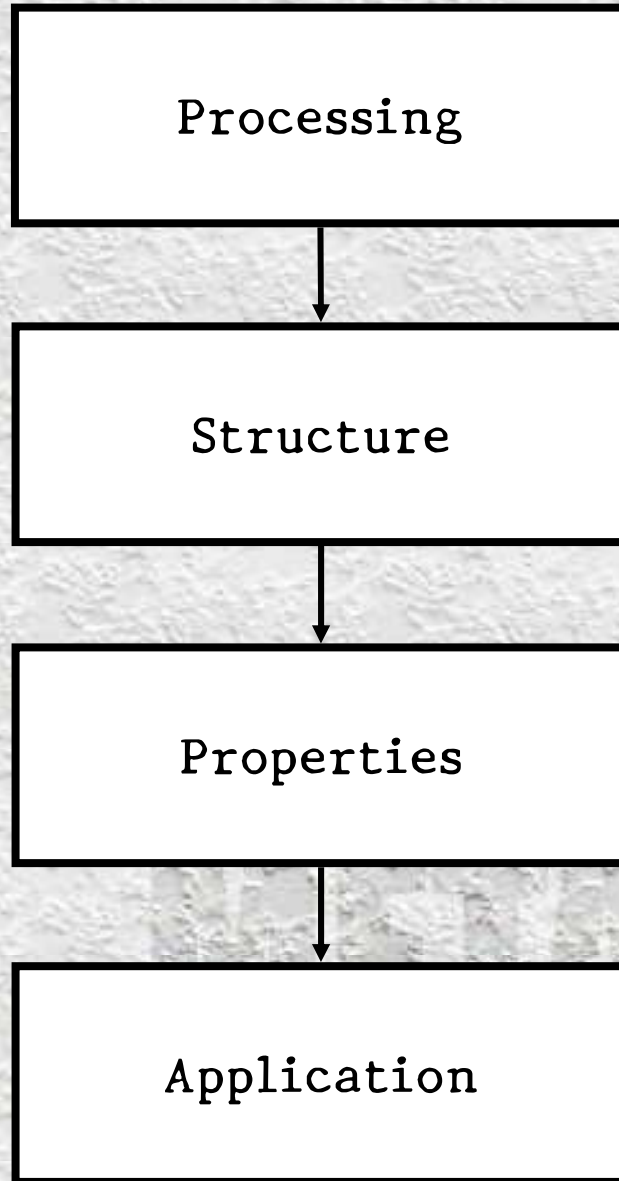


## กระบวนการอบชุบ โลหะด้วยความร้อน (Heat Treatment of Metals)

สมบัติเชิงกลของ โลหะและ โลหะผสมนอกจากจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี  
ซึ่งมีผลต่อ โครงสร้างจุลภาคแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่มีต่อ โครงสร้างจุลภาคของ  
โลหะก็คือการอบชุบด้วยความร้อนของโลหะ

เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกันแต่อาจมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน โดย  
สิ้นเชิงด้วยการอบชุบด้วยความร้อนของโลหะ



-วิธีการขึ้นรูป , วิธีการผลิต

-Heat treatment

-ส่วนผสมทางเคมี

-ปริมาณเฟส

-รูปร่างลักษณะของเฟส

-ความละเอียดของ โครงสร้าง

-Hardness

-Tensile Strength

-Ductility

กระบวนการ heat treatment สำหรับโลหะทั่วไป

- Process Annealing
- Stress Relief

กระบวนการ heat treatment สำหรับเหล็กกล้า

- Normalizing
- Full Annealing
- Spheroidizing
- Quenching and Tempering



## Process Annealing

- วัตถุประสงค์ : เพื่อปรับ โครงสร้างจุลภาคและเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับ โลหะของ โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา
- วิธีการ : นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิประมาณ  $300 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (สำหรับเหล็กกล้า) ในสายการผลิต โดยทำก่อนการขึ้นรูป
- ควบคุมอุณหภูมิและเวลา
  - อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดออกไซด์ที่ผิวโลหะมาก อาจต้องใช้บรรยากาศที่ไม่เกิด oxidizing ช่วย
  - อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้การ annealing เป็นไปได้ช้า
  - เวลาค่อนข้างนานเกินไปจะทำให้เกิดเกรนขยายตัว (grain growth) ซึ่งทำให้ได้เกรน ขนาดหยาบและสมบัติเชิงกลไม่ดี

## Stress Relief

- วัตถุประสงค์ : เพื่อคลายความเค้นในชิ้นงาน โลหะที่เกิดจาก
  - การขึ้นรูป เช่น การกลึง, การรีด, extrusion
  - การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (thermal stress) ทำให้แต่ละบริเวณในชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวไม่เท่ากัน เช่น จากการเชื่อม, การชุบแข็งผิวด้วยไฟฟ้า
  - การเปลี่ยนแปลงเฟสขณะที่โลหะเย็นตัว ซึ่งเฟสที่เปลี่ยนไปมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการยืดหรือหดตัวในชิ้นงาน → stress
- ถ้านำชิ้นงานที่มี residual stress ไปใช้งานอาจทำให้เกิดการบิดเบี้ยวแตกหักได้
- วิธีการ : ให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงานเป็นระยะเวลาจนทำให้อุณหภูมิภายในชิ้นงานสม่ำเสมอแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

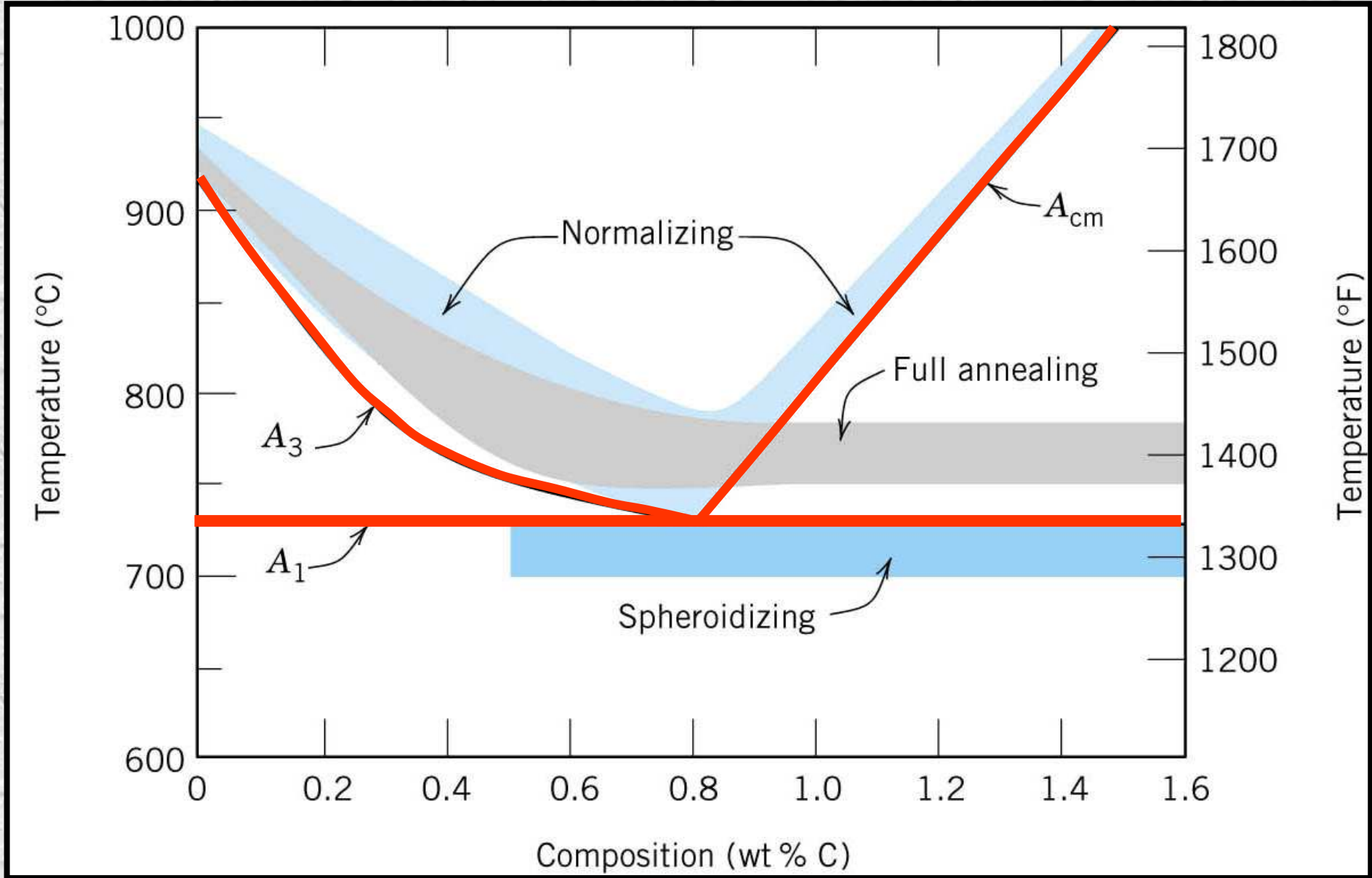
# Critical Temperature

$A_1$  = lower critical temperature

$A_3$  = upper critical temperature สำหรับ hypoeutectoid  
carbon steel

$A_{cm}$  = upper critical temperature สำหรับ hypereutectoid  
carbon steel

อุณหภูมิเหนือเส้น  $A_3$  และ  $A_{cm}$  จะประกอบไปด้วยเฟส austenite เท่านั้น



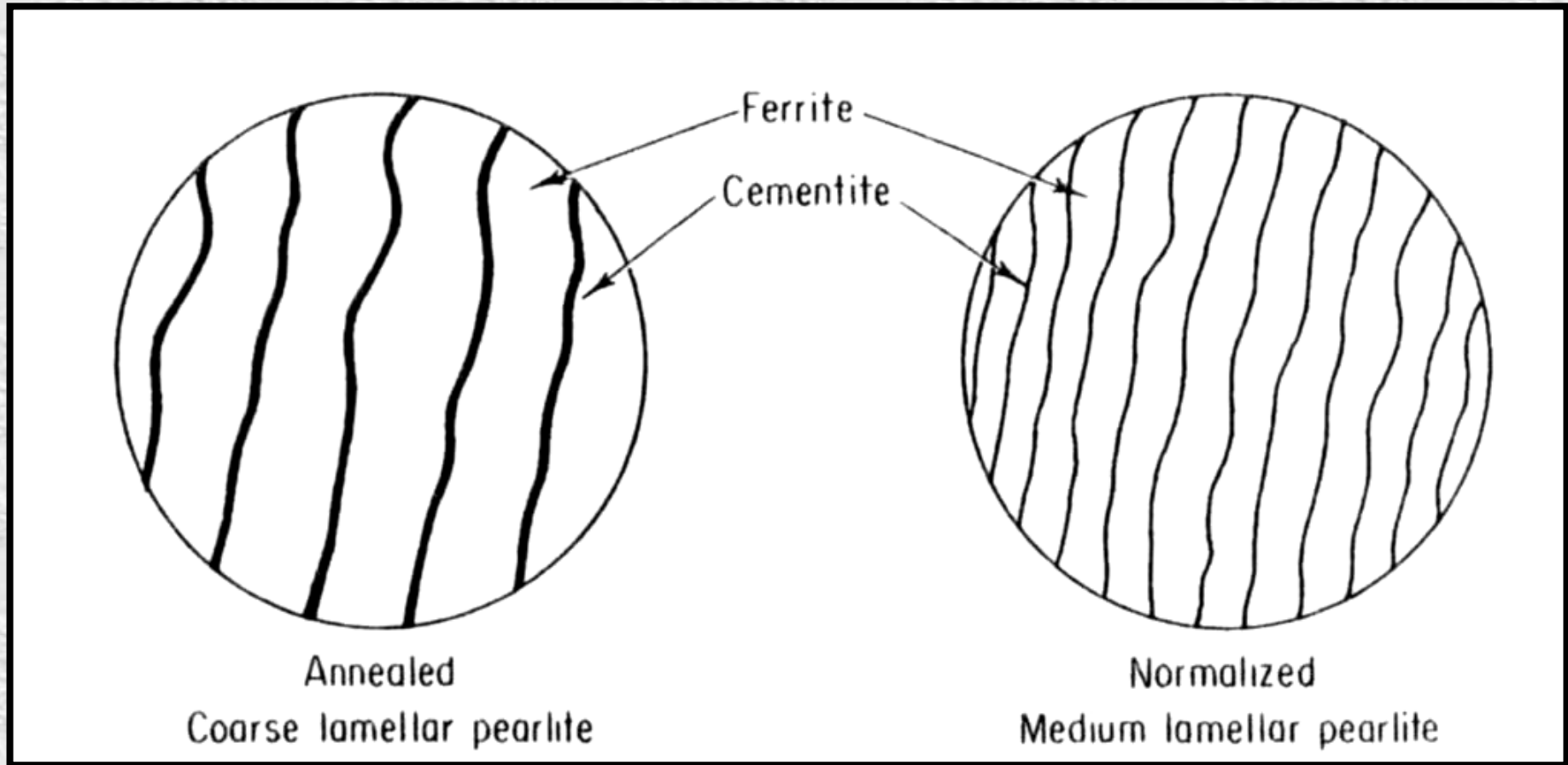
# Normalizing

- เหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูป เช่น การรีด, extrusion จะมีรูปร่างลักษณะเกรนที่ขึ้นอยู่กับทิศทางและมีขนาดหยาบ ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลไม่ดีและขึ้นอยู่กับทิศทาง
- วัตถุประสงค์ของ normalizing คือปรับโครงสร้างจุลภาคทำให้มีเกรนที่รูปร่างและการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ รวมทั้งทำให้ได้เกรนที่มีขนาดละเอียดขึ้น
- วิธีการ : อบชิ้นงานภายในเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า  $A_3$  หรือ  $A_{cm}$  ประมาณ 50 K ทิ้งไว้นานพอที่จะทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็น austenite ทั้งหมดแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



# Full Annealing

- วัตถุประสงค์ : ใช้สำหรับปรับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าให้พร้อมที่จะนำไปทำการกลึงหรือการขึ้นรูปที่มีการทำให้เกิด plastic deformation อย่างมาก
- วิธีทำ : อบชิ้นงานภายในเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า  $A_3$  หรือ  $A_1$  ( $A_3$  สำหรับ hypoeutectoid carbon steel และ  $A_1$  สำหรับ hypereutectoid carbon steel) ประมาณ 50 K ทิ้งไว้นานพอที่จะทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็น austenite ทั้งหมดแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในเตา
- เย็นตัวในเตาให้อัตราการเย็นตัวที่ต่ำกว่าเย็นตัวในอากาศของ normalizing

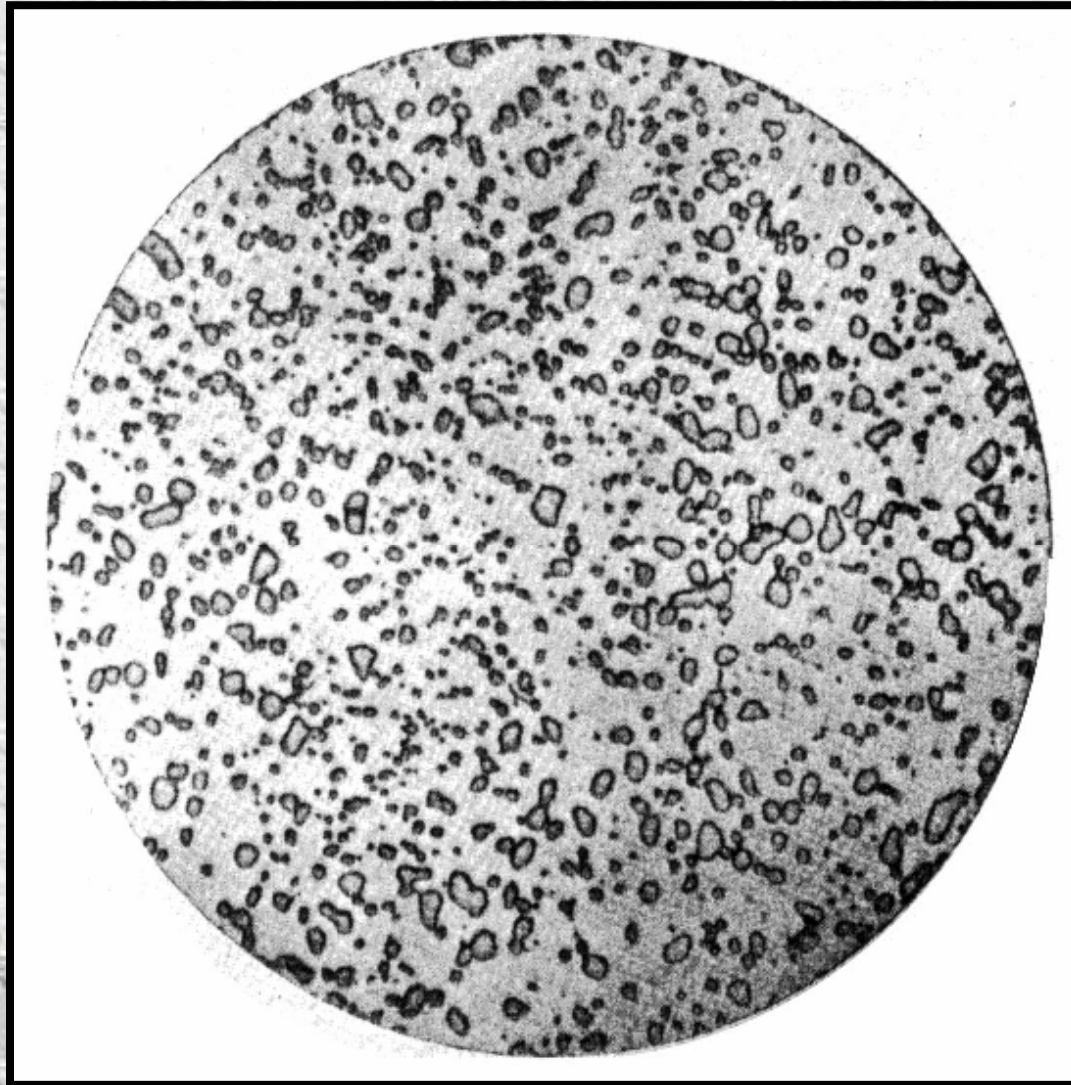


Normalizing มีอัตราการเย็นตัวสูงกว่า Full Annealing  
ทำให้ได้ pearlite ที่ละเอียดกว่า

# Spheroidizing

- โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนสูง (0.25-1.1%C) จะประกอบไปด้วย pearlite ในปริมาณพอสมควร ซึ่งถ้า pearlite เหล่านี้มีขนาดที่หยาบ จะทำให้ขึ้นรูปได้ยาก (กลึง, โส, กัด, เจาะ, คว้าน)
- วัตถุประสงค์ : เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น โดยเปลี่ยน  $Fe_3C$  ใน pearlite ให้เปลี่ยนไปมีลักษณะกลมขึ้น ทำให้มีความเหนียว และกลึงได้ง่ายขึ้น
- วิธีการ : อบชิ้นงานภายในเตาที่อุณหภูมิต่ำกว่า eutectoid temperature เล็กน้อย (ประมาณ  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) เป็นเวลาประมาณ 15 - 25 ชั่วโมง





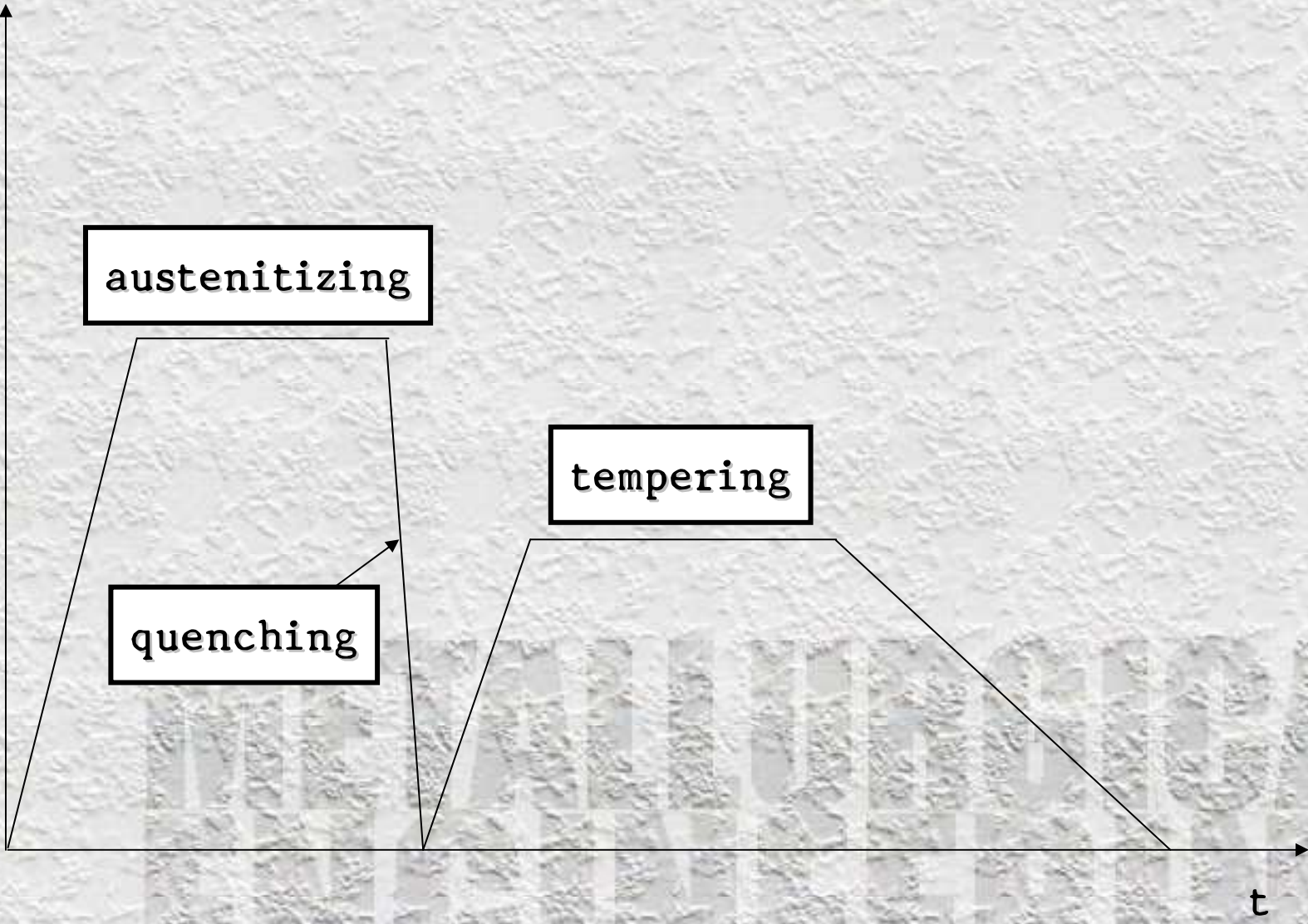
Spheroidized 1.1%C steel 1000x



# Quenching and Tempering

- เป็นเทคนิคในการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนสูง ( $>0.3\%C$ )
- วิธีการ : นำชิ้นงานเหล็กกล้าไปอบที่อุณหภูมิสูงกว่า upper critical temperature เป็นระยะเวลาสั้นพอที่จะทำให้โครงสร้างเป็น austenite ทั้งชิ้น (กระบวนการนี้เรียกว่า "Austenitizing") หลังจากนั้นทำการชุบลงในของเหลวทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (กระบวนการนี้เรียกว่า "Quenching") หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิประมาณ  $100 - 500\text{ }^{\circ}C$  (กระบวนการนี้เรียกว่า "Tempering")

T



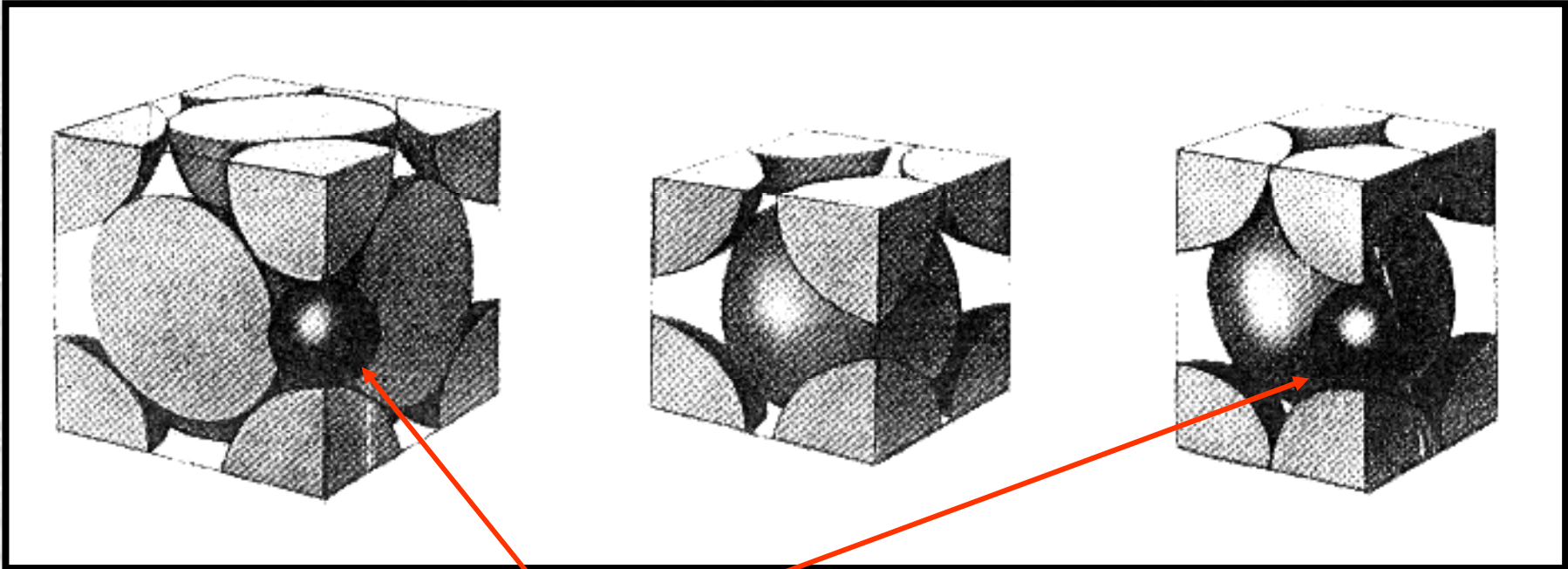
- เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนละลายอยู่ที่อุณหภูมิสูงเหล็กมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ซึ่งจะทำให้อะตอมคาร์บอนแทรกอยู่ในลักษณะหนึ่ง เมื่อลดอุณหภูมิเหล็กจะมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เมื่อทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้คาร์บอนไม่สามารถแพร่ออกจากเหล็กเกิดเป็น eutectoid mixture ได้ทันที และเกิดเฟสอื่นขึ้นมาแทนมีลักษณะเป็นแท่ง, เข็ม ฟุ้งไปมาในทิศทางต่างๆ กัน โครงสร้างนี้เรียกว่า "Martensite" (มาร์เทนไซต์)
- โครงสร้างมาร์เทนไซต์เป็น โครงสร้างที่มีความแข็งสูงแต่ขาดความเหนียวและทนการสึกหรอได้ไม่ดี ชิ้นงานที่ผ่านการ quench จะมีความเค้นเนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหักเมื่อนำไปใช้งาน จึงต้องมีการทำ Tempering เพื่อลดความเค้นภายในชิ้นงานและเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงานเล็กน้อยก่อนนำไปใช้งาน



FCC with C atom

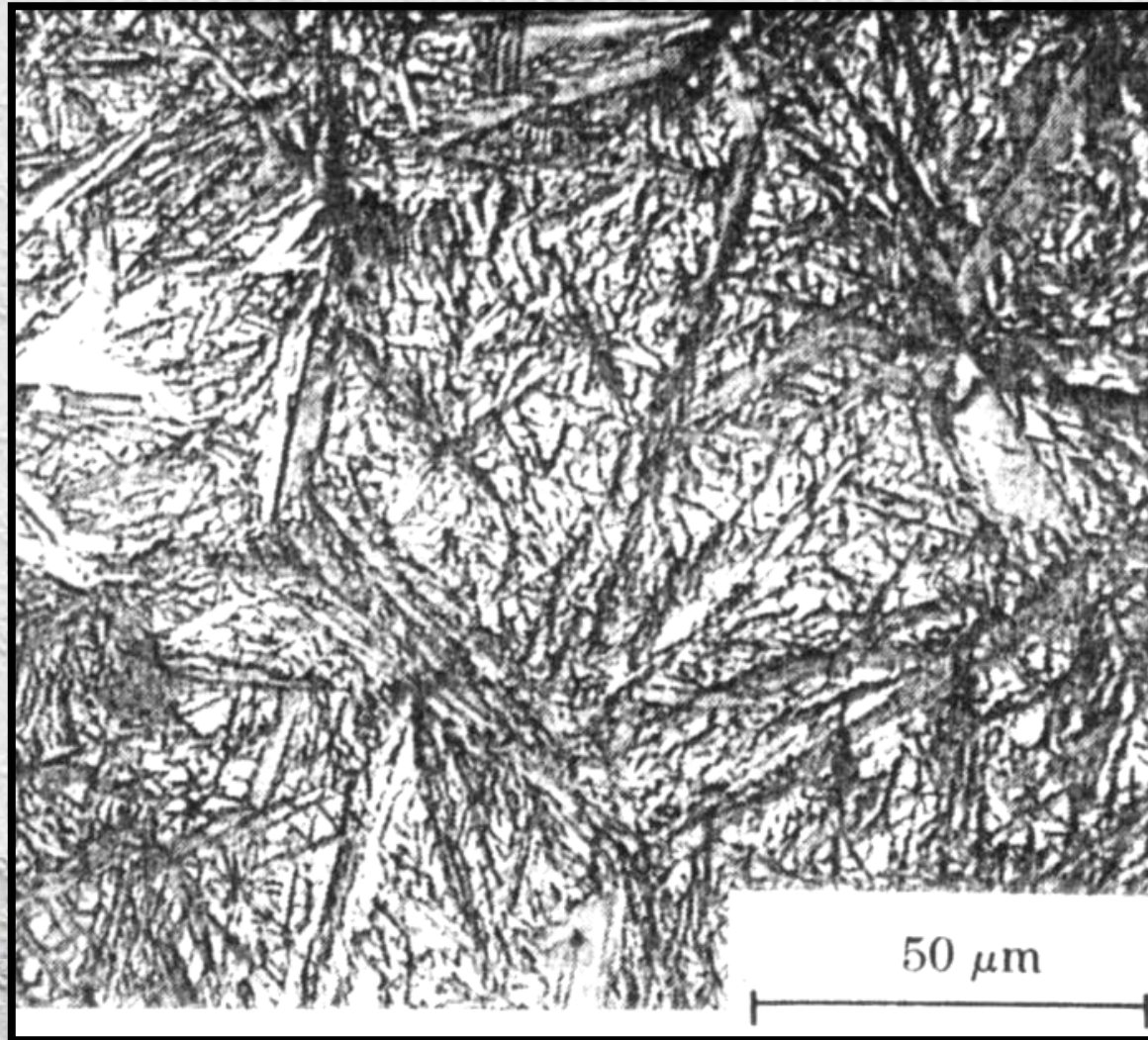
BCC w/o C atom

BCC with C atom

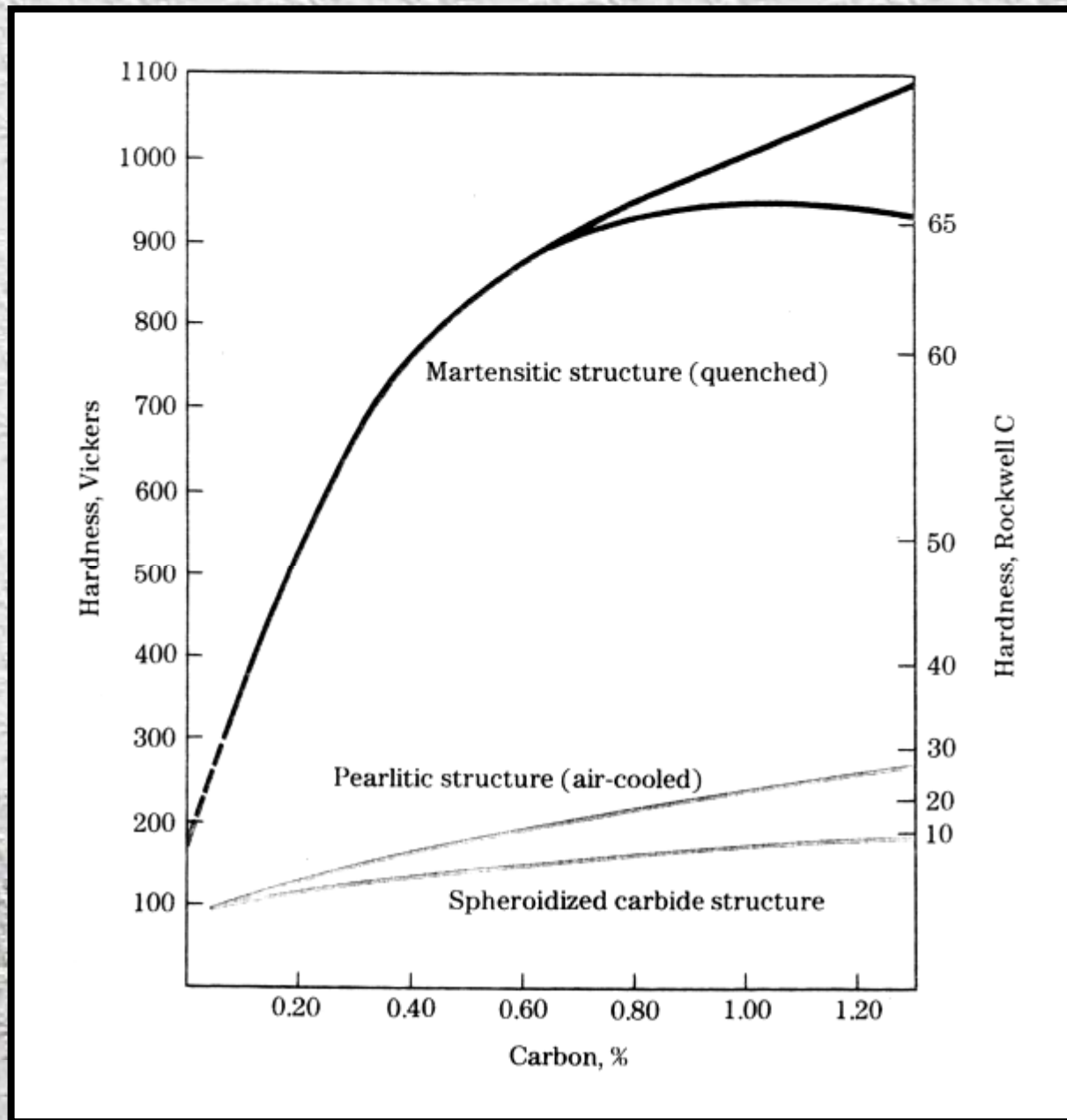


C





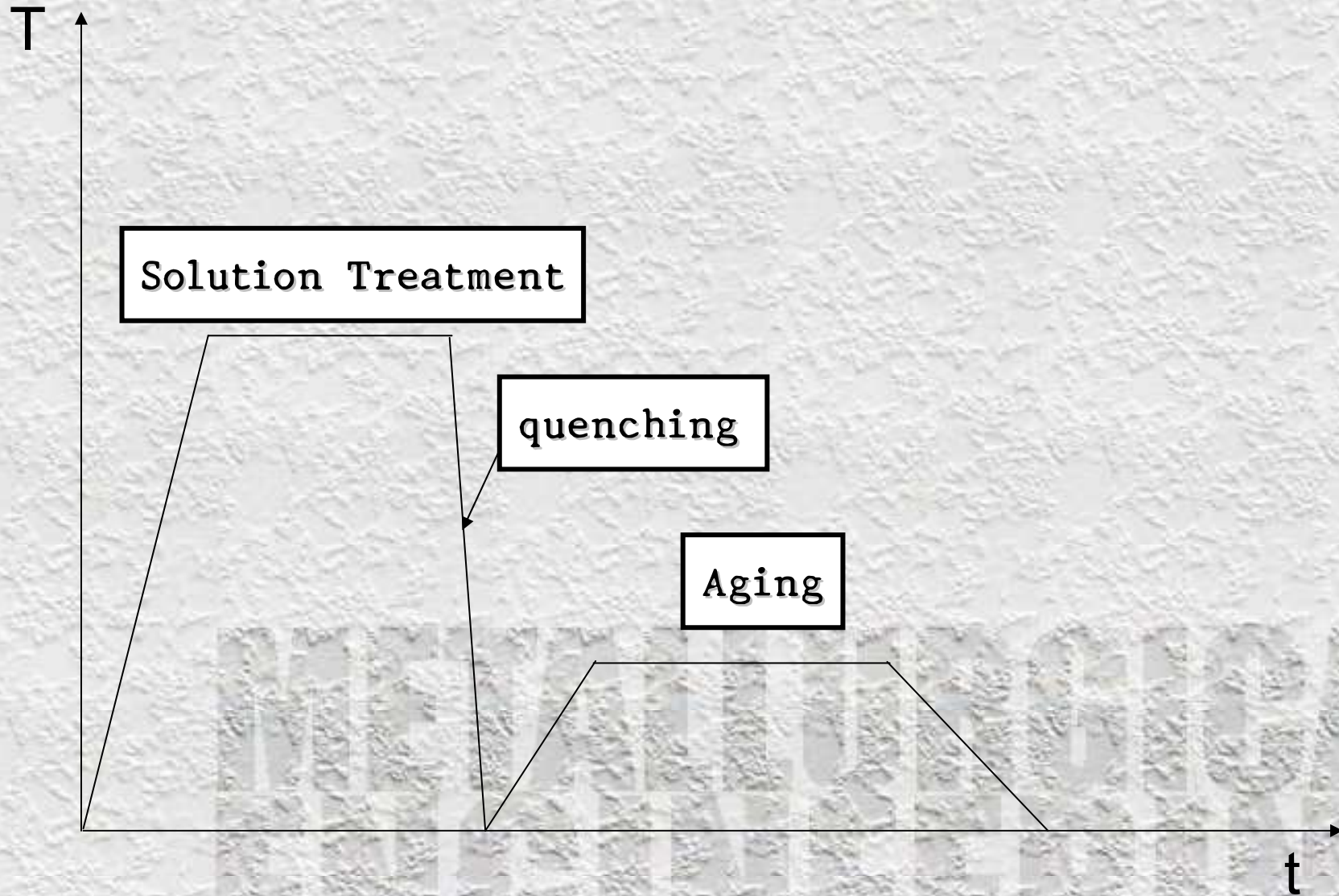
ลักษณะโครงสร้าง Martensite



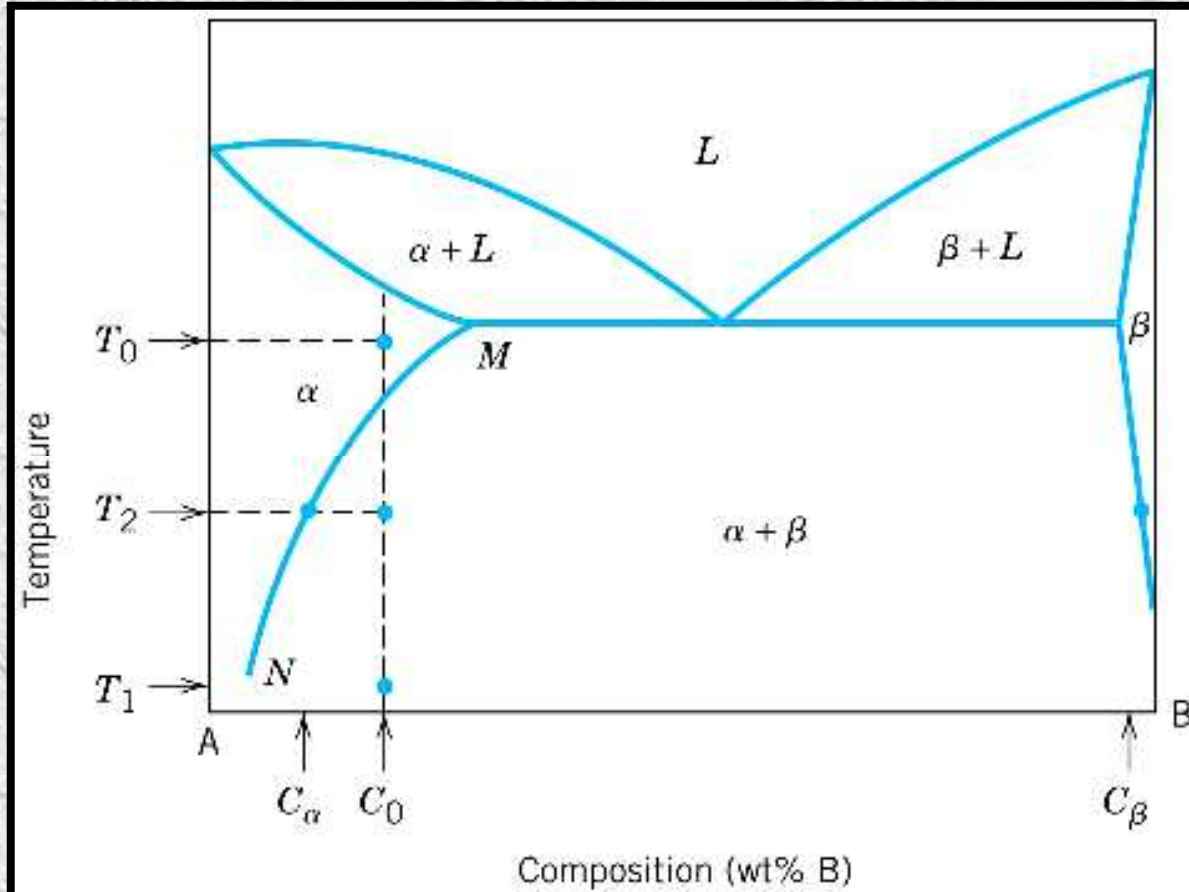


# Precipitation Hardening

- เป็นเทคนิคที่อาศัยความสามารถการละลายที่น้อยลงของธาตุผสมมาเพิ่มความแข็งแรงให้กับ โลหะผสม
- วิธีการ : ออบชิ้นงานในเตาที่อุณหภูมิสูงทิ้งไว้เป็นระยะเวลานานพอที่ second phase จะละลายใน solid solution ได้หมด ขั้นตอนนี้เรียกว่า "Solution treatment" หลังจากนั้นทำการชุบลงในของเหลวให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการ quench ไปอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม ขั้นตอนนี้เรียกว่า "Aging"

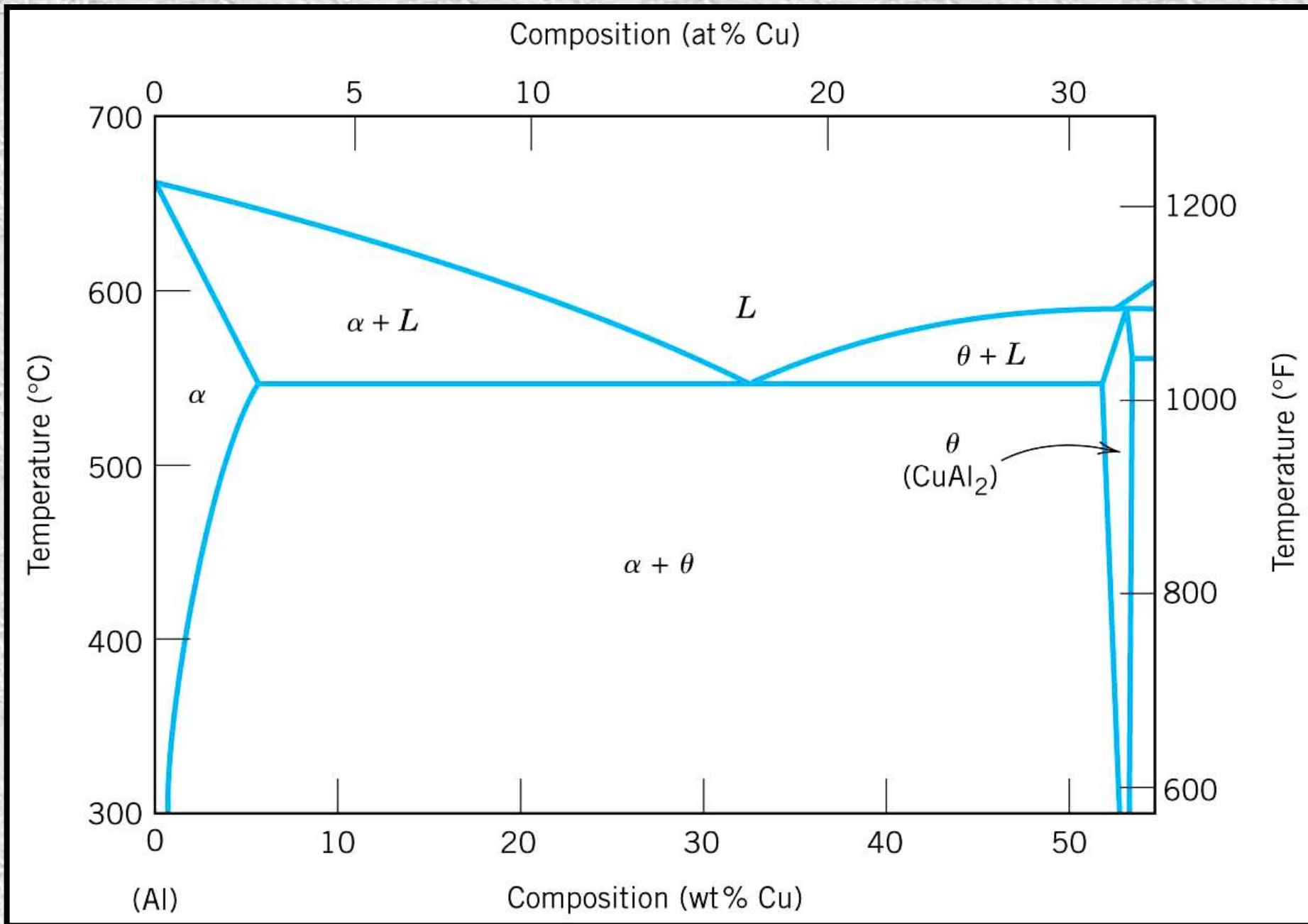






**FIGURE 11.19** Hypothetical phase diagram for a precipitation-hardenable alloy of composition  $C_0$ .

ที่  $T_0$  ธาตุ B ละลายในธาตุ A ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ  $T_2$  เมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ  $\beta$  จะค่อย ๆ เกิดขึ้นตาม lever arm rule



# กลไกของ Precipitation Hardening

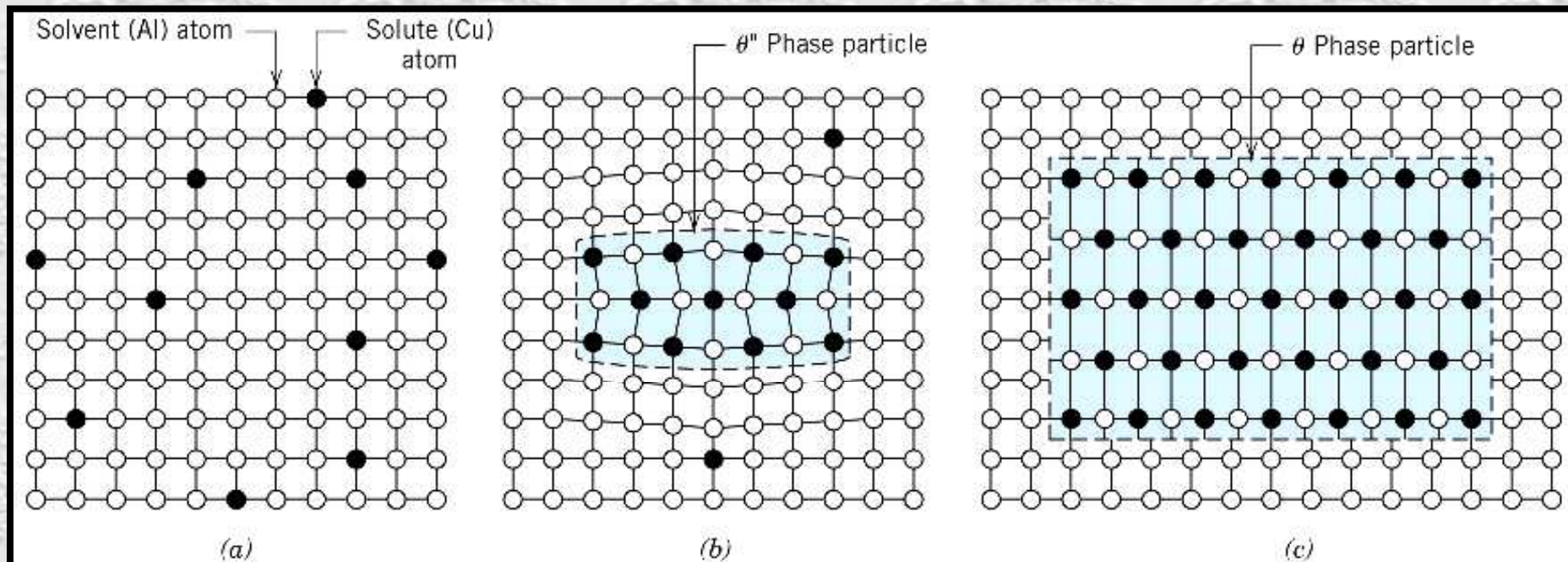
- ที่อุณหภูมิสูงธาตุ B จะละลายในธาตุ A ได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเราทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ธาตุ B ไม่สามารถแพร่ออกจากธาตุ A ได้ทัน จึงเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution)
- ถ้ามีการตกผลึกเฟส  $\beta$  ออกมาประมาณหนึ่ง เฟส  $\beta$  ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเสริมความแข็งแรงให้กับโลหะผสม
- Supersaturated solid solution จะเกิดการแพร่ให้เฟส  $\beta$  ได้ แต่จะเกิดขึ้นอย่างช้ามากที่อุณหภูมิห้อง เราจึงเร่งการแพร่ให้เกิดเร็วขึ้น โดยการนำไปอบ (Aging) แต่ถ้า aging เป็นเวลานานเกินไปจะทำให้เฟส  $\beta$  ตกผลึกออกมามากเกินไปทำให้ความแข็งแรงลดต่ำลง (over aging)



ขณะยังเป็น  
supersaturated  
solid solution

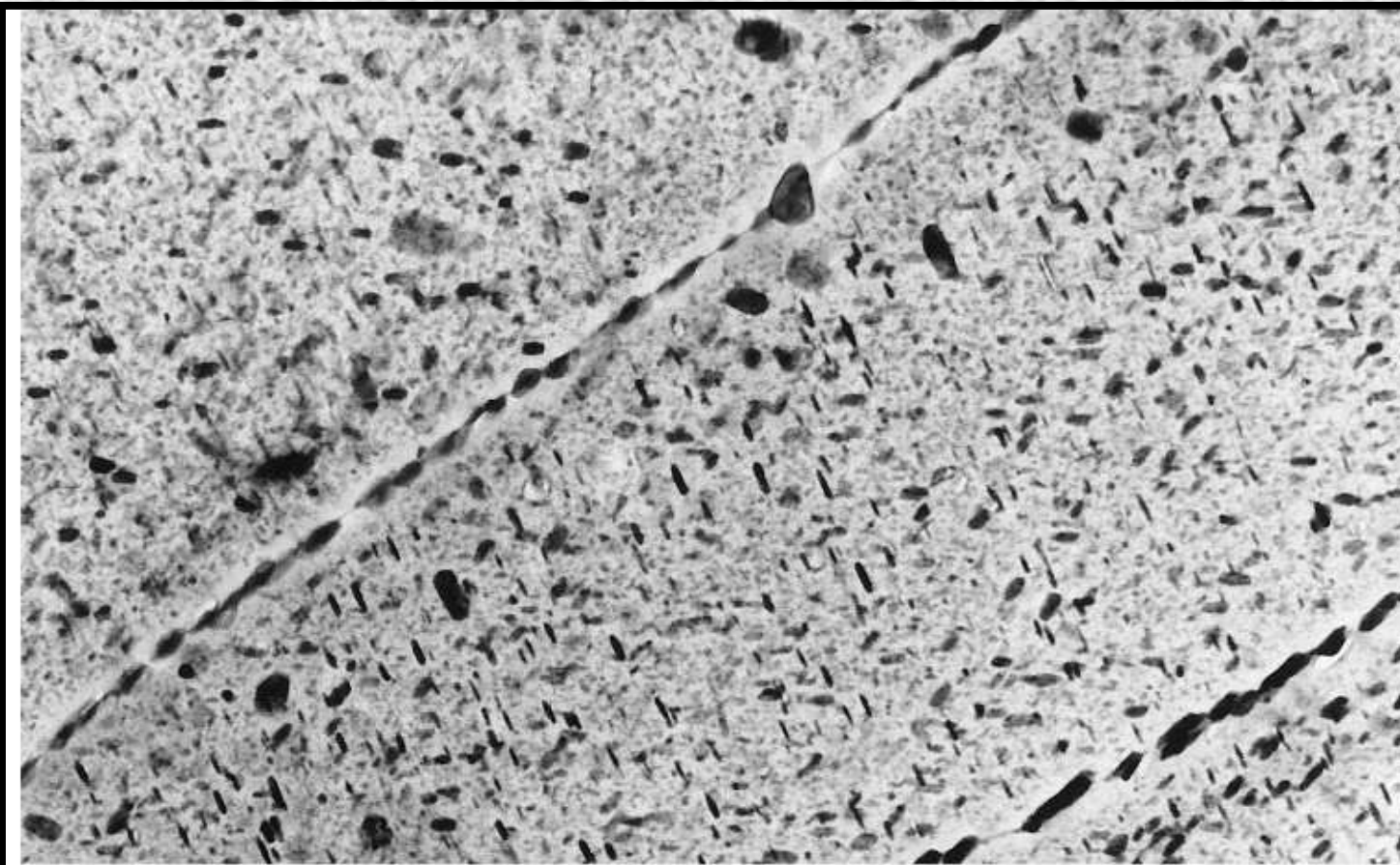
ลักษณะการตกผลึกเฟส  
 $\beta$  ที่เหมาะสม

ลักษณะการตกผลึกเฟส  $\beta$  ที่  
มากเกินไป



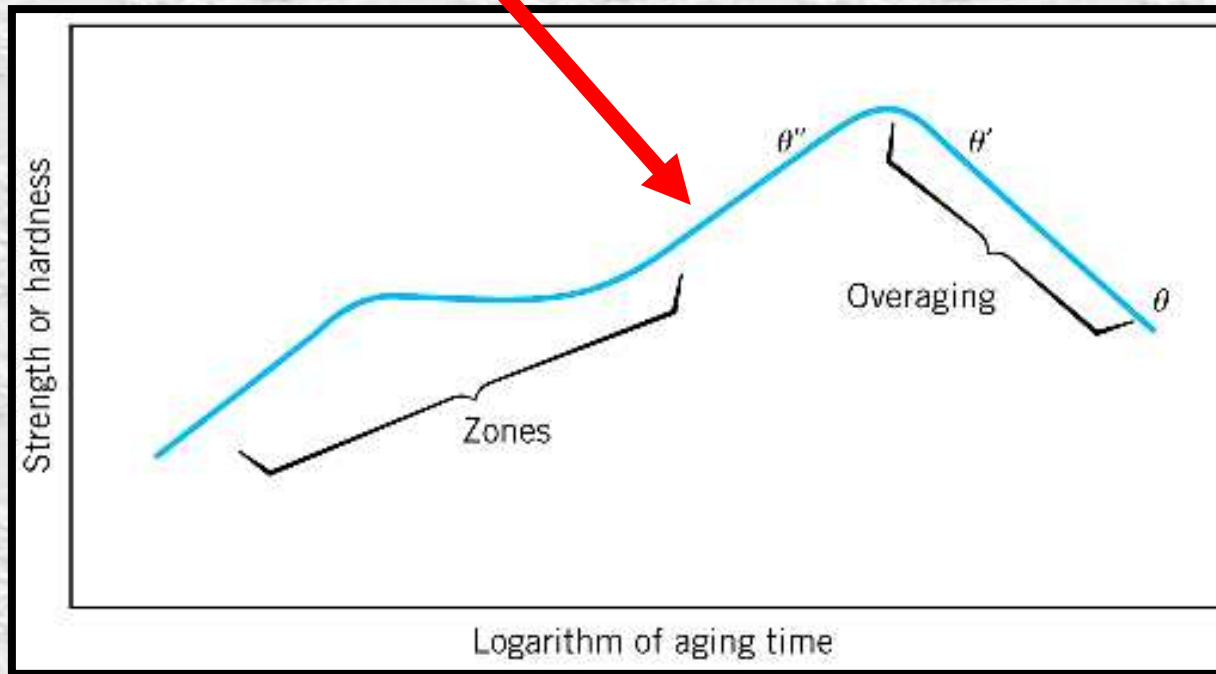
**FIGURE 11.23** Schematic depiction of several stages in the formation of the equilibrium precipitate ( $\theta$ ) phase. (a) A supersaturated  $\alpha$  solid solution. (b) A transition,  $\theta''$ , precipitate phase. (c) The equilibrium  $\theta$  phase, within the  $\alpha$ -matrix phase. Actual phase particle sizes are much larger than shown here.





**FIGURE 11.24** A transmission electron micrograph showing the microstructure of a 7150-T651 aluminum alloy (6.2Zn, 2.3Cu, 2.3Mg, 0.12Zr, 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  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) 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.)

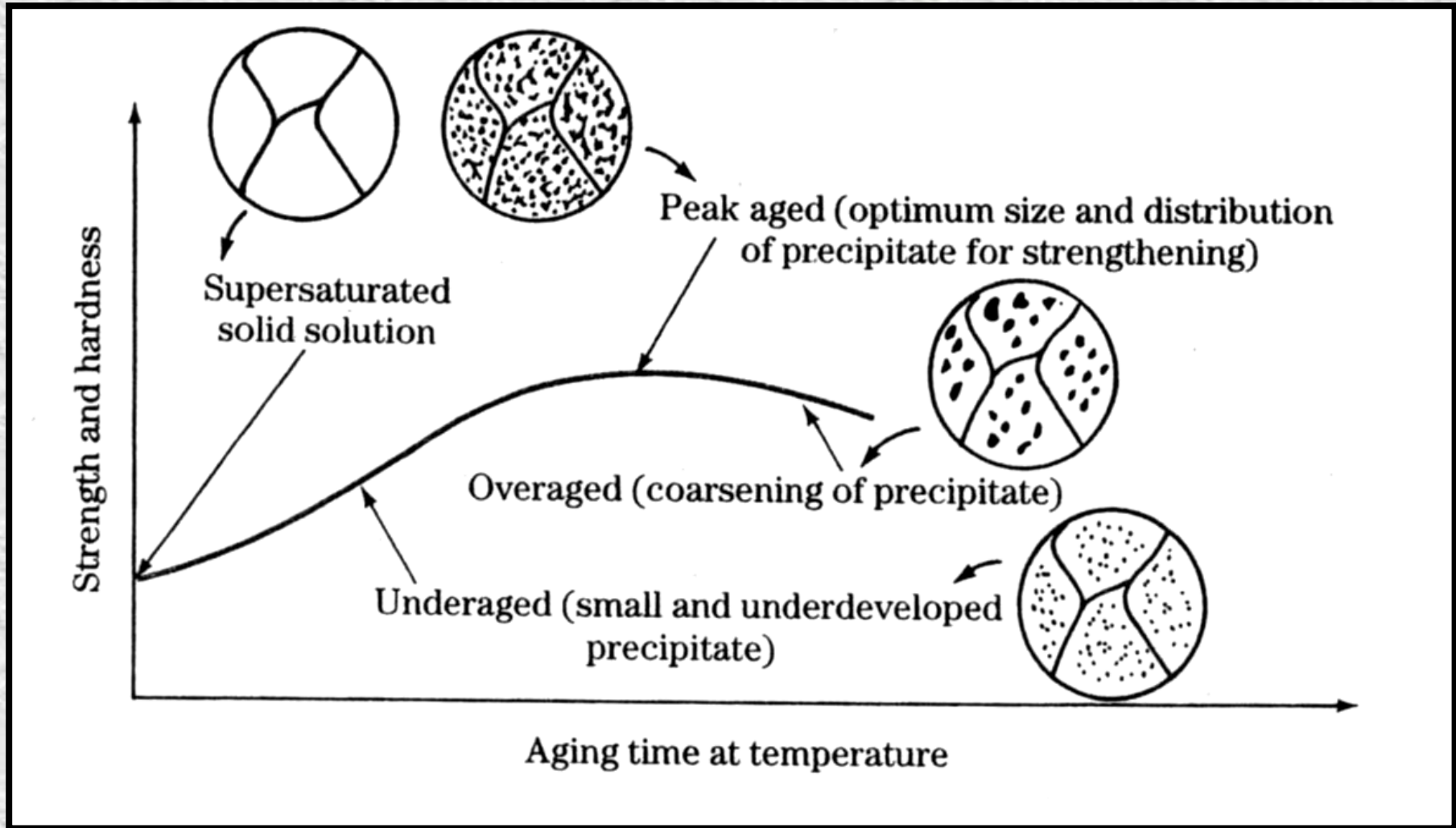
ช่วงที่มีความแข็งแรงเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



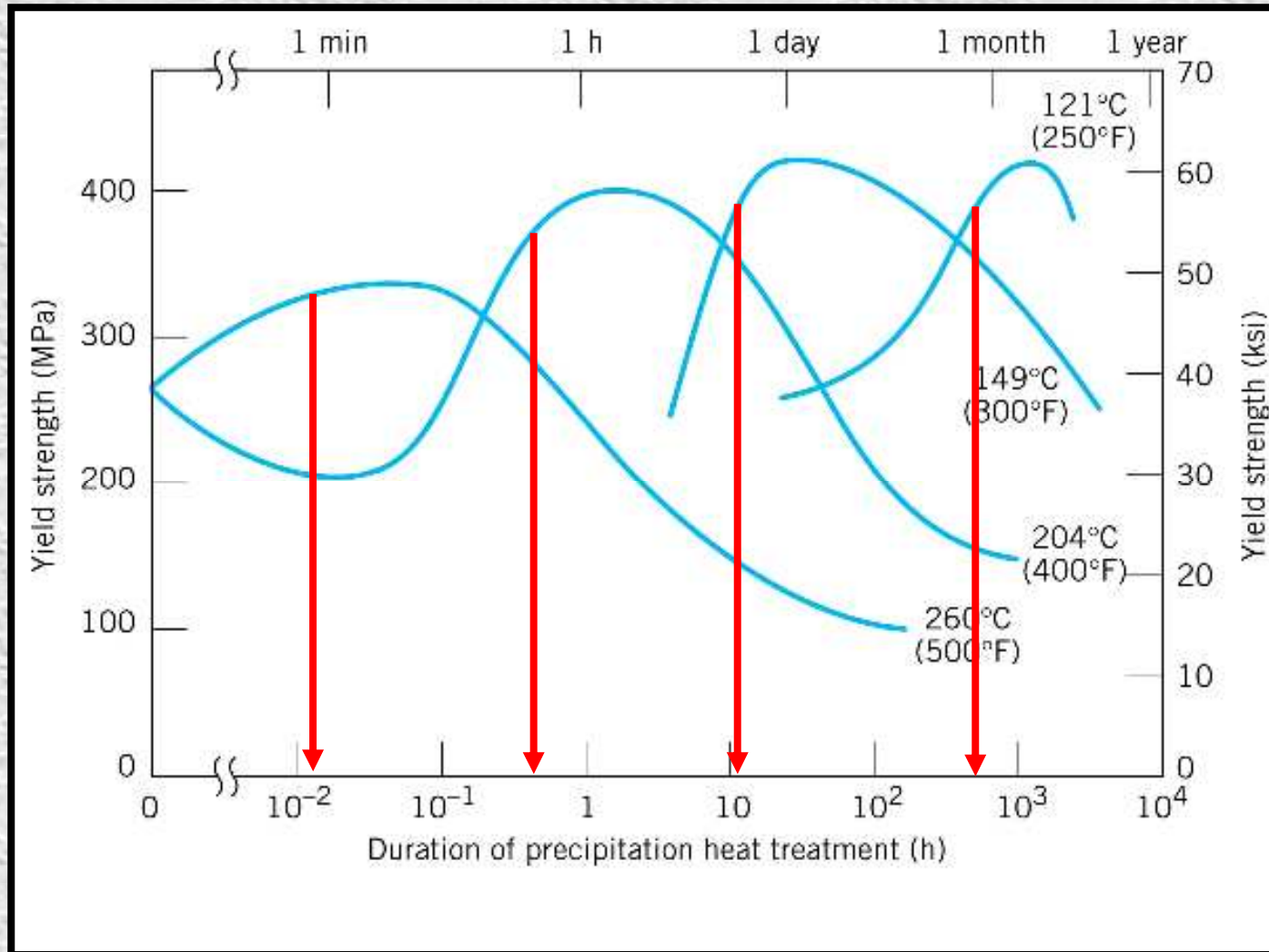
**FIGURE 11.21** Schematic diagram showing strength and hardness as a function of the logarithm of aging time at constant temperature during the precipitation heat treatment.

ปล่อยให้  $\beta$  ตกผลึกเองเรียก "Natural aging"  
ให้อุณหภูมิเร่งการตกผลึกเรียก "Artificial aging"









ถ้าเพิ่มอุณหภูมิในการ aging จะทำให้เวลาที่เหมาะสมต่อการ aging ลดลง