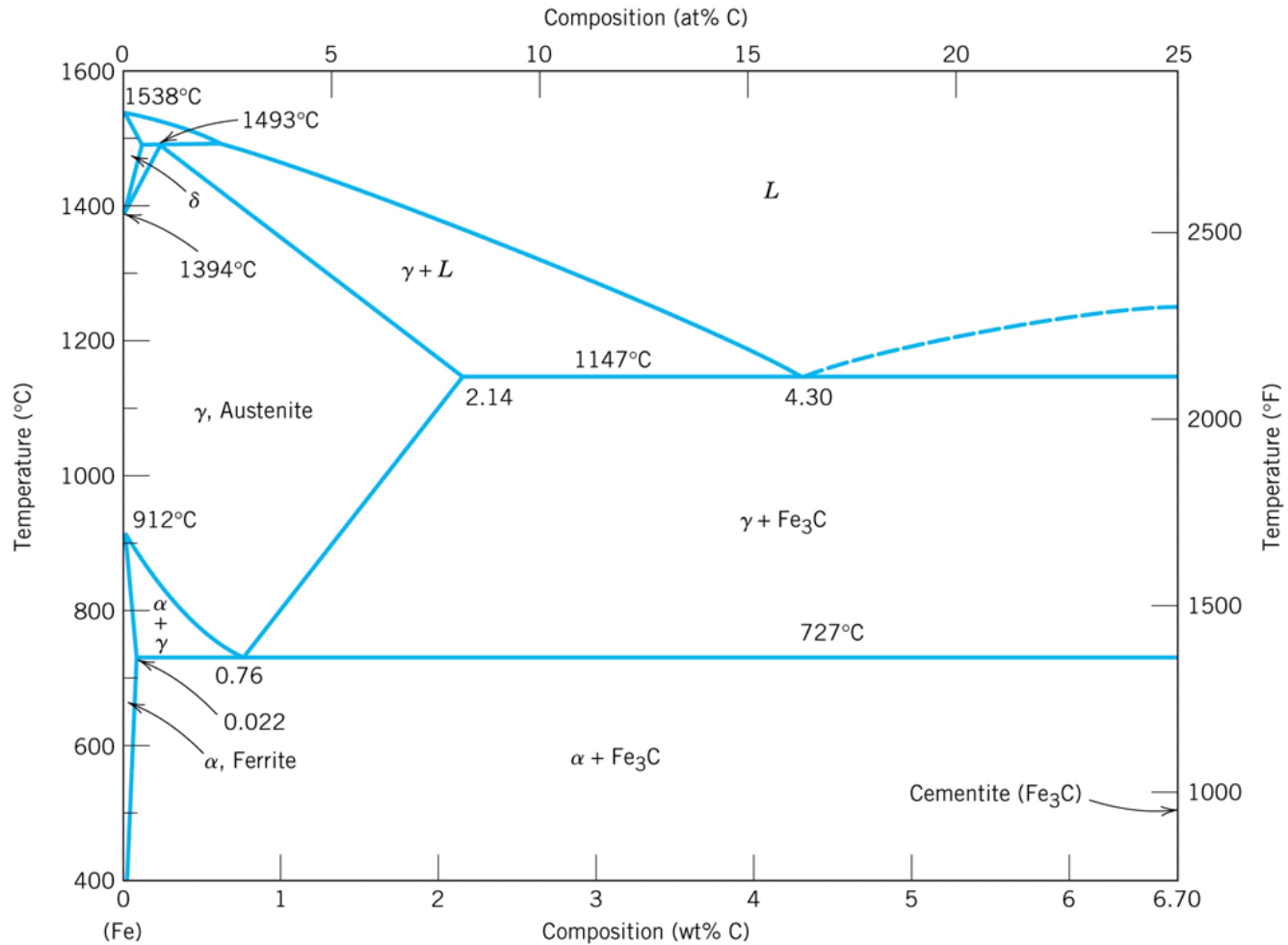
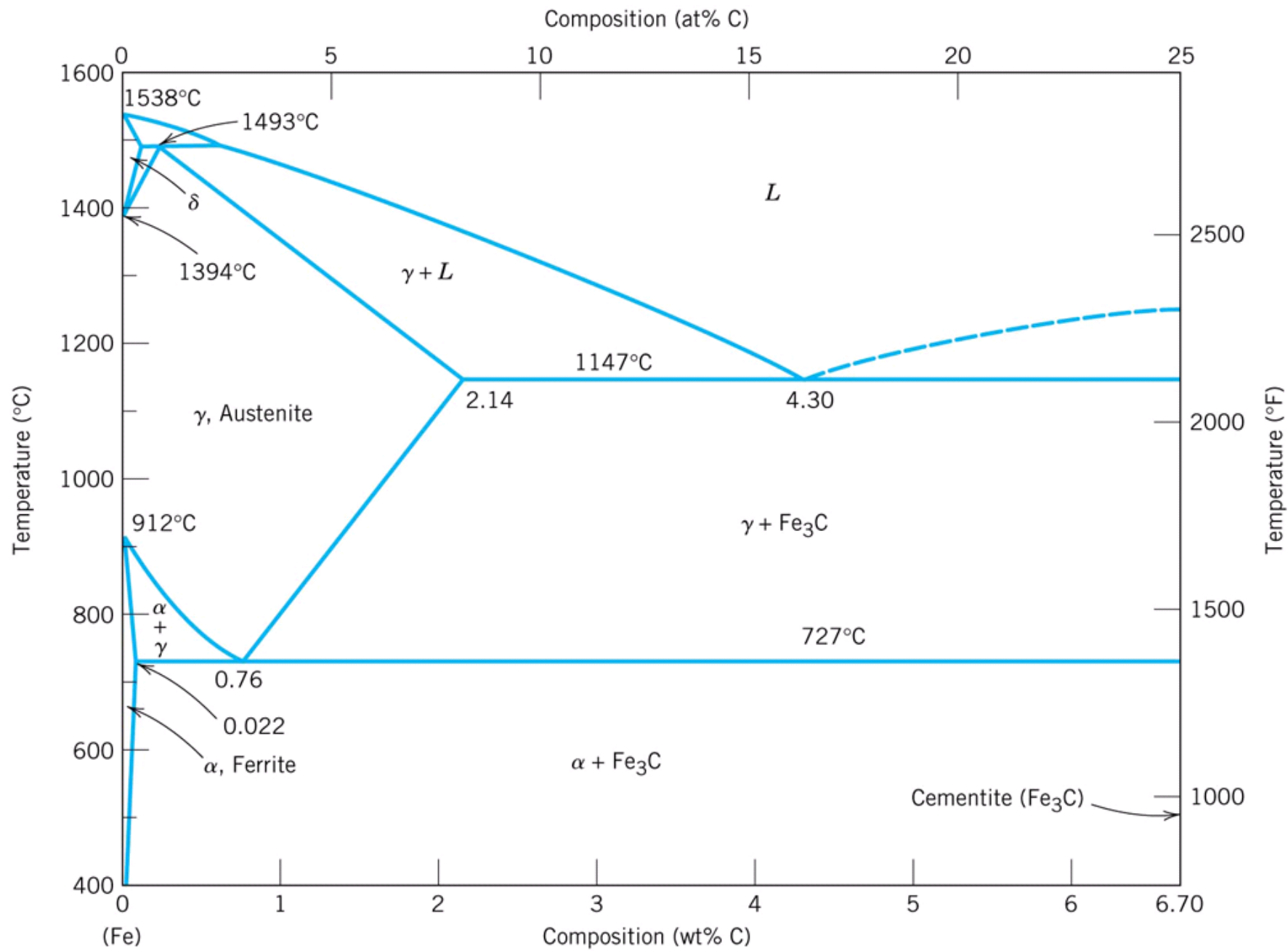


แผนภาพของเฟสในระบบ Fe-C





ในระบบ Fe-C มีเฟสและโครงสร้างที่สำคัญ ดังนี้

1. Austenite (γ Iron)

2. Ferrite (α Iron)

3. Cementite (Fe_3C)

4. Delta Iron (δ Iron)

5. Pearlite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

6. Ledeburite ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$)

เฟส

โครงสร้าง

Phase ต่างๆ ที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังนี้

- 1. Ferrite (α Iron)** มีโครงสร้างเป็น BCC จะคงตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 912 °C คาร์บอนละลายได้สูงสุด 0.022% ที่ 727 °C และที่อุณหภูมิห้อง carbon จะละลายได้ไม่เกิน 0.008%
- 2. Austenite (γ Iron)** มีโครงสร้างเป็น FCC จะคงตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 727 °C - 1493 °C คาร์บอนละลายได้สูงสุด 2.14% ที่ 1147°C
- 3. Cementite (Fe_3C)** เป็นสารประกอบคาร์ไบด์ ระหว่าง Fe กับ C ในอัตราส่วน 3 : 1 โดยอะตอม มีคุณสมบัติทางกลสูงแต่ถ้ามี คาร์บอนผสมอยู่มากก็ไปจะเปราะ

4. Pearlite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) เป็น Lamellar Layer สลับกันระหว่าง α และ Fe_3C (คล้ายกับโครงสร้างยูเทคติก)

5. Delta Iron (δ Iron) มีโครงสร้างเป็น BCC จะคงตัวที่อุณหภูมิระหว่าง $1394^\circ\text{C} - 1538^\circ\text{C}$, คาร์บอนละลายได้สูงสุด 0.1% ที่ 1493°C

6. Ledeburite ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) เป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อ (Cast Iron, 2.14%C – 6.70%C) จะคงตัวที่อุณหภูมิระหว่าง $727^\circ\text{C} - 1147^\circ\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 727°C , γ จะทำให้เกิด *Eutectoid Reaction* ได้ Pearlite ดังนั้น Phase ที่ได้คือ *Pearlite + Fe_3C*

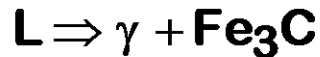
เส้นโค้ง (curve) ที่สำคัญในระบบ Fe-C

- เส้นโค้งอุณหภูมิวิกฤตบน (Upper Critical Temperature Curve) แบ่งออกเป็น
 1. Ferrite Started Curve (A_3) แสดงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite)
 2. Cementite Started Curve (A_{cm})) แสดงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเฟสซีเมนไทต์ (Cementite)
- เส้นโค้งอุณหภูมิวิกฤตล่าง (Lower Critical Temperature Curve) (A_1) แสดงอุณหภูมิที่เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ผ่านปฏิกิริยายูเทคตอยด์ (Eutectoid reaction)

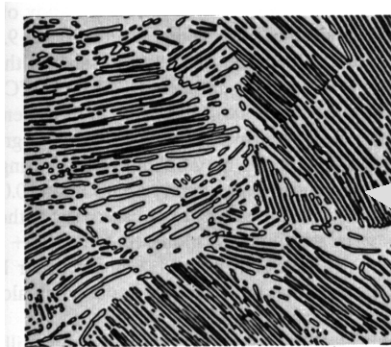
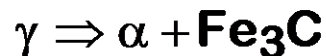
2 จุดที่สำคัญในระบบ Fe-C

- 2 important points

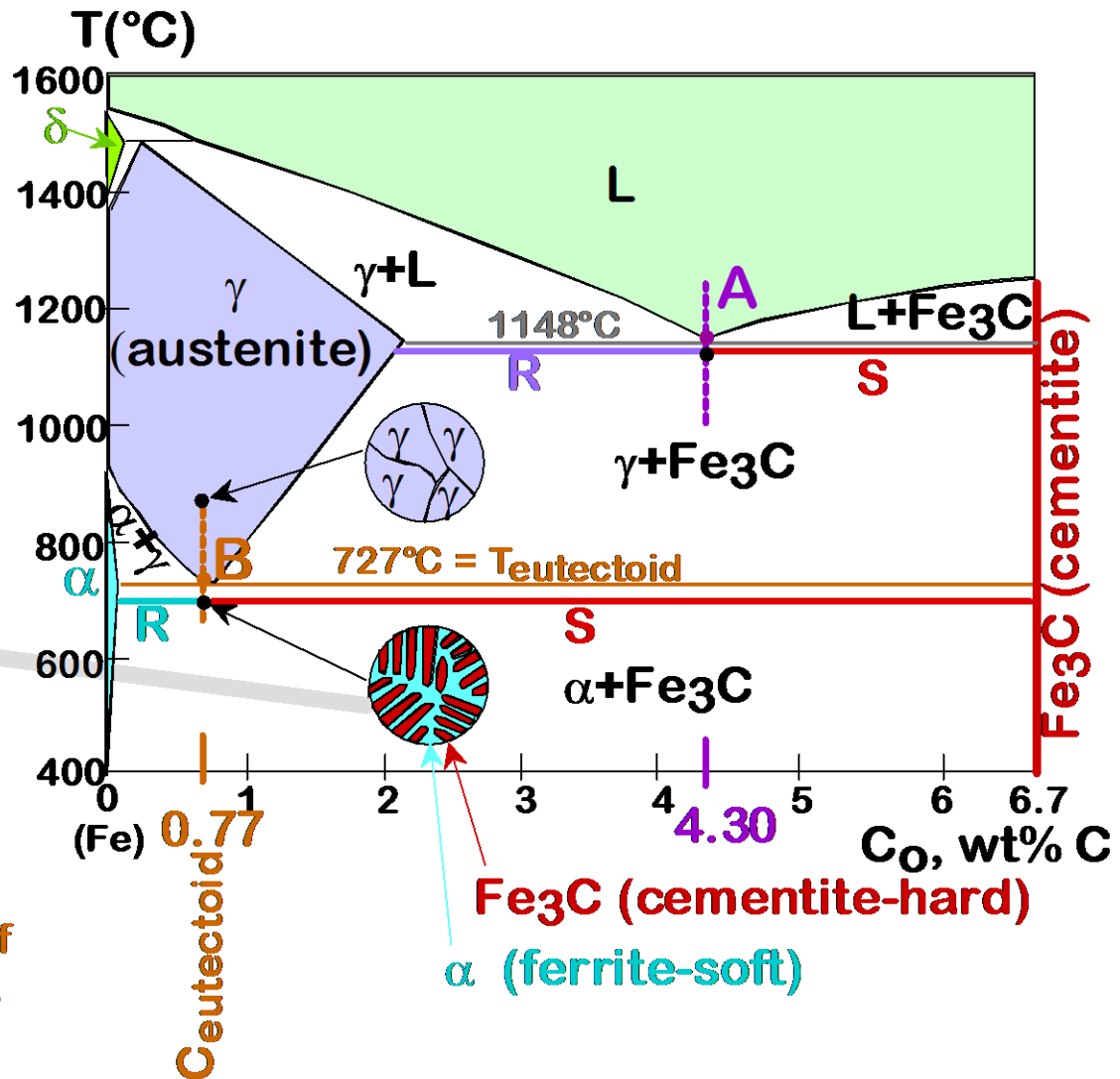
-Eutectic (A):

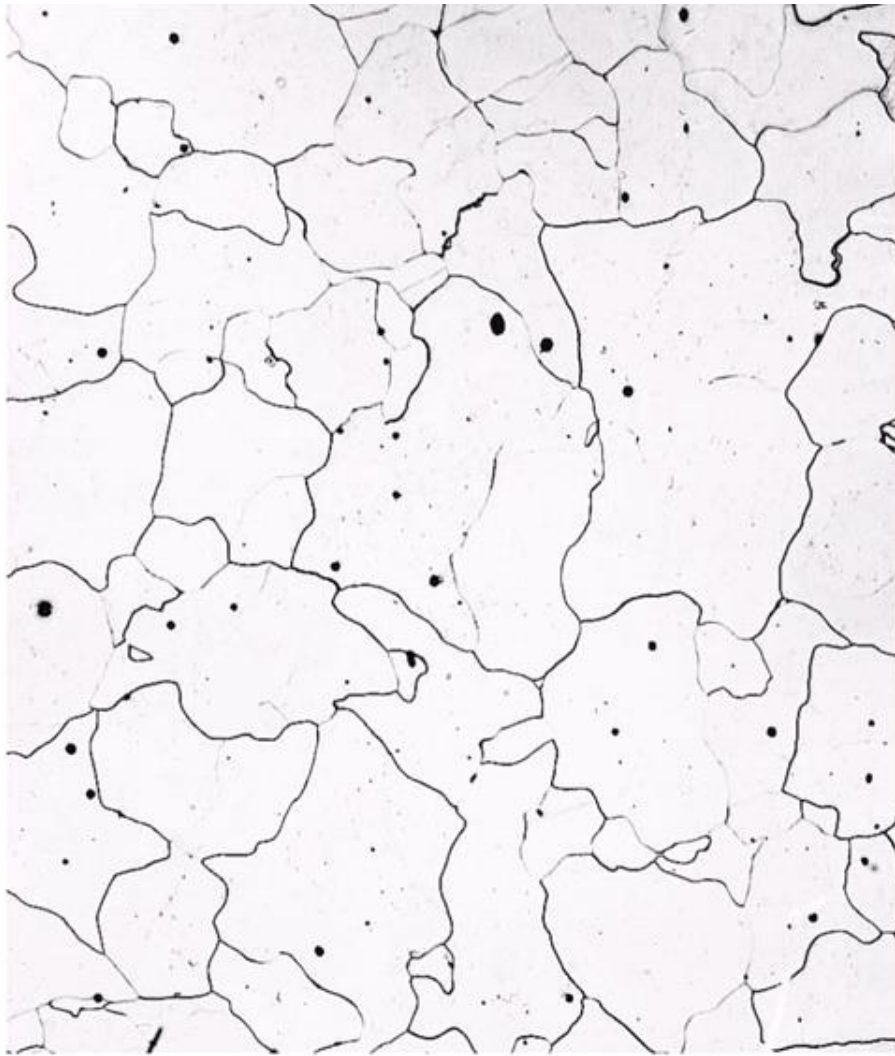


-Eutectoid (B):

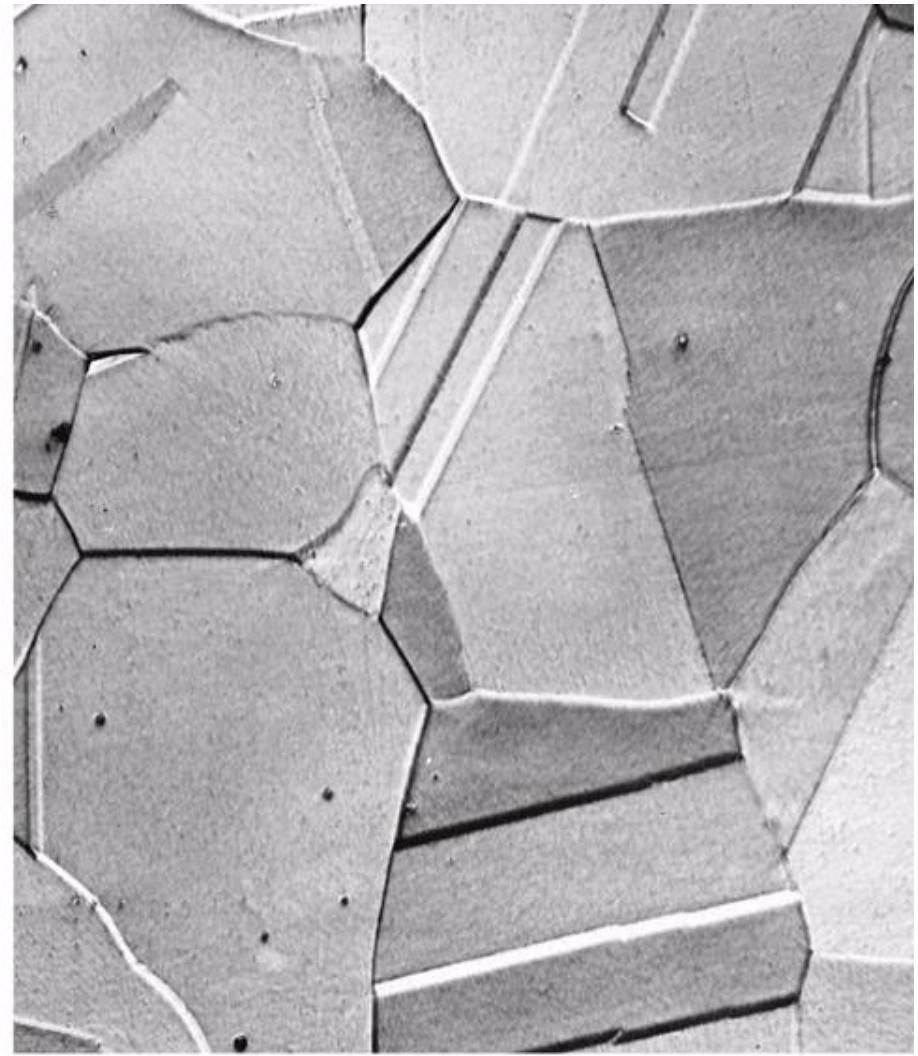


Result: Pearlite = alternating layers of α and Fe_3C phases.



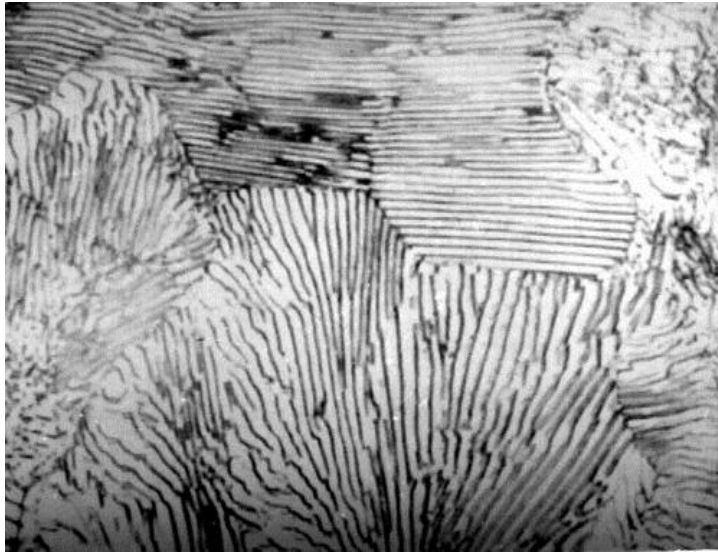


(a)

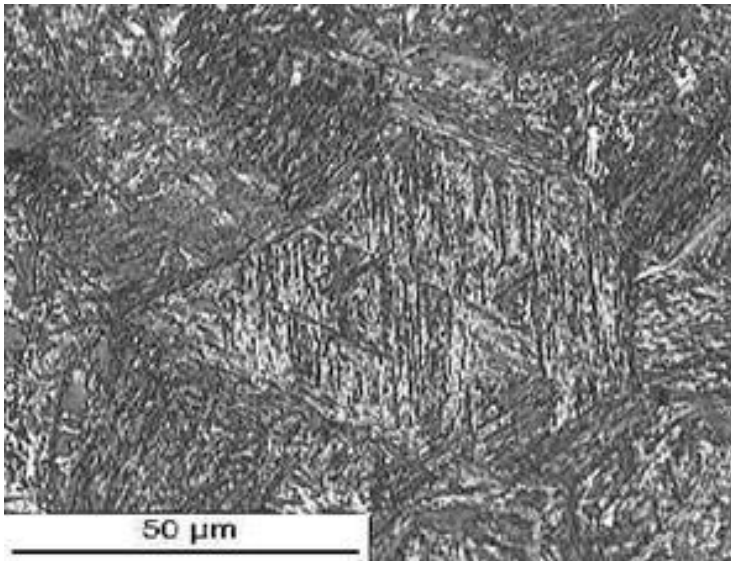


(b)

FIGURE 9.22 Photomicrographs of (a) α ferrite (90 $\times$) and (b) austenite (325 $\times$). (Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)



Pearlite phase



Cementite phase

การเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กผสม (STEEL ALLOYS)

กรณี 1 $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (Eutectoid Reaction)

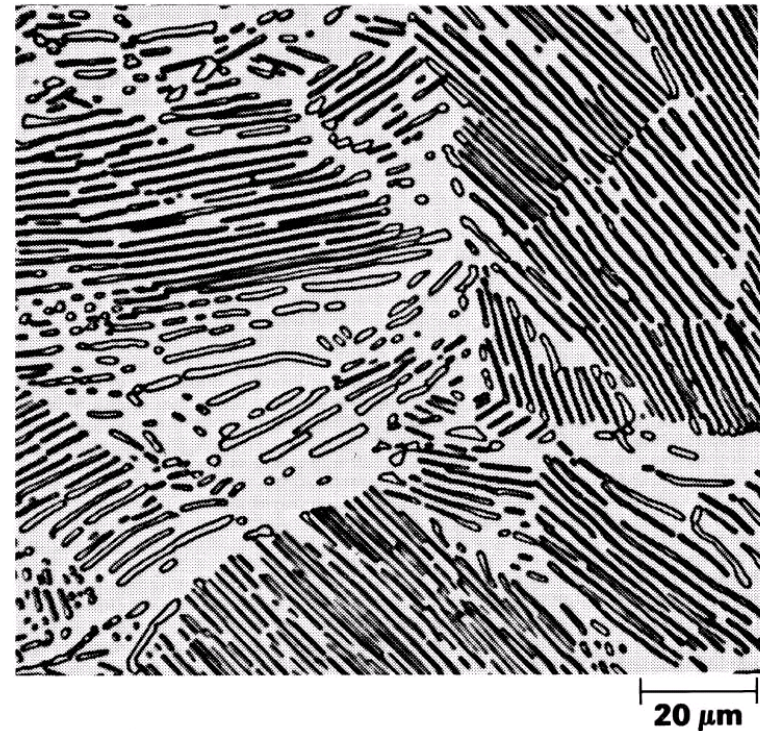
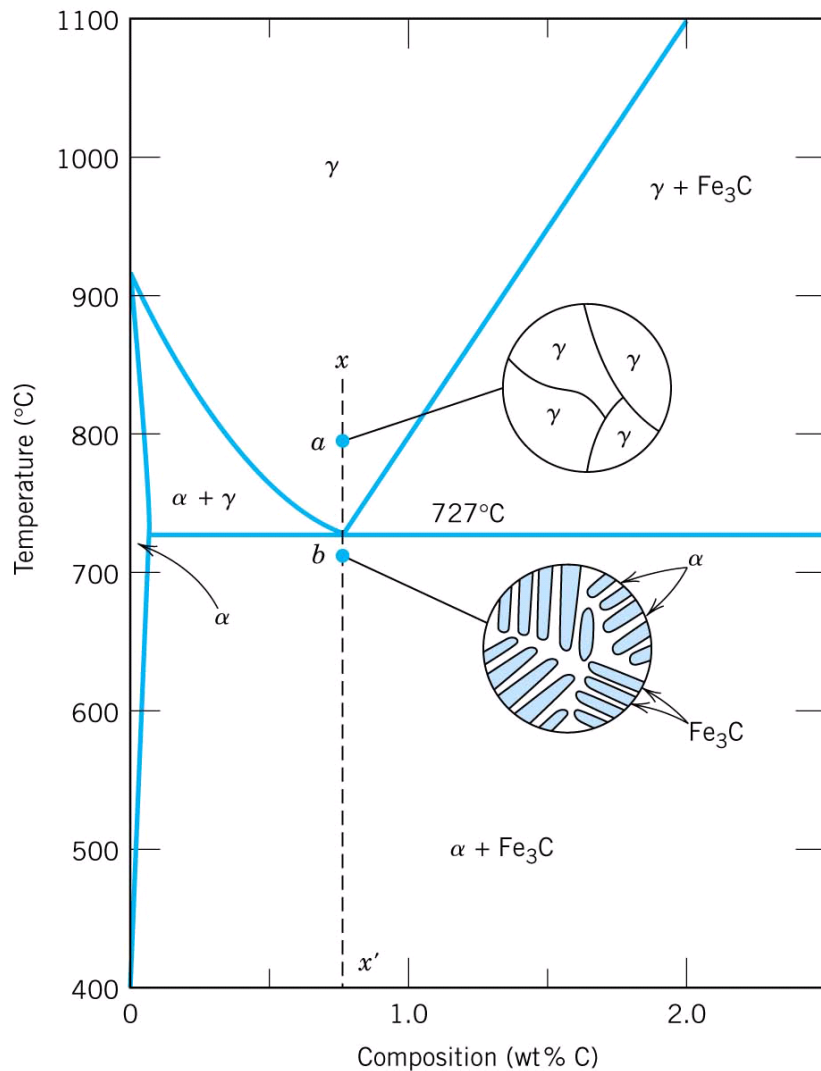
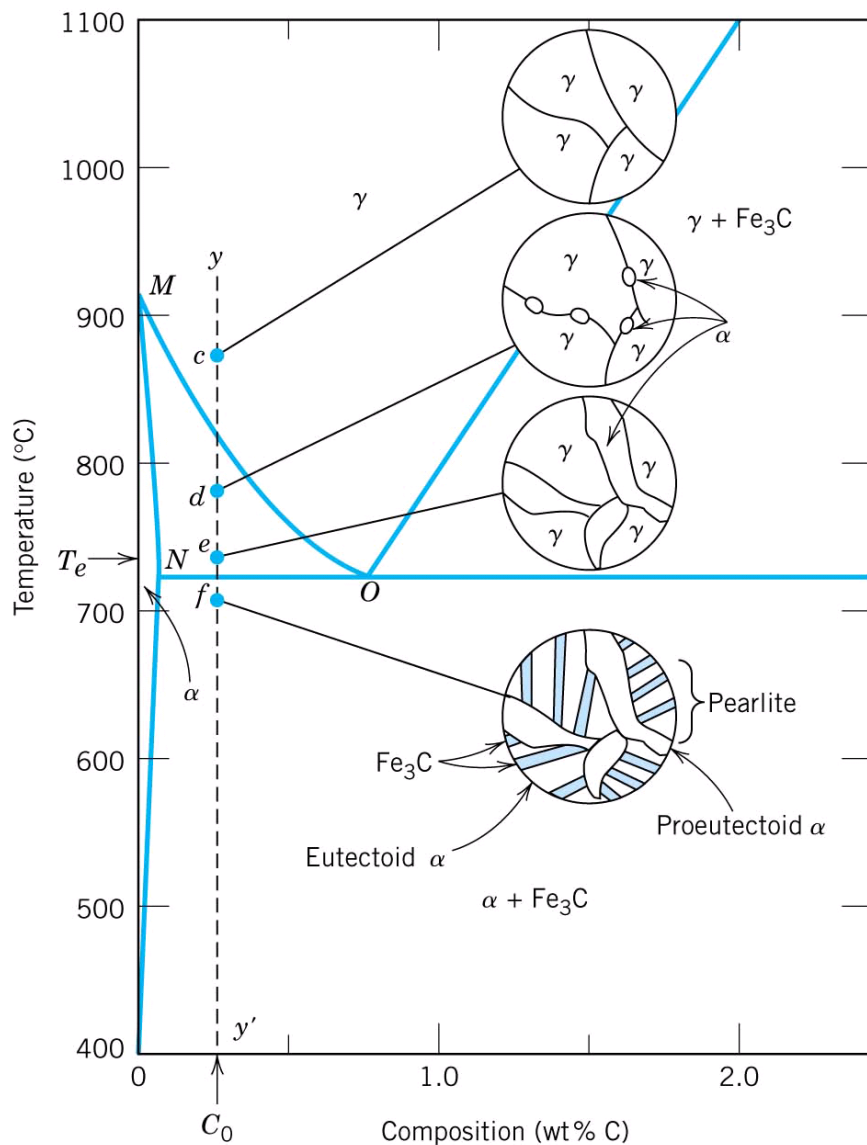


Fig. 9.24 ภาพถ่ายของ Eutectoid steel ที่แสดงถึงโครงสร้าง Pearlite (500x)

Fig. 9.23 จำลองการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ Eutectoid steel (0.76 wt%C)

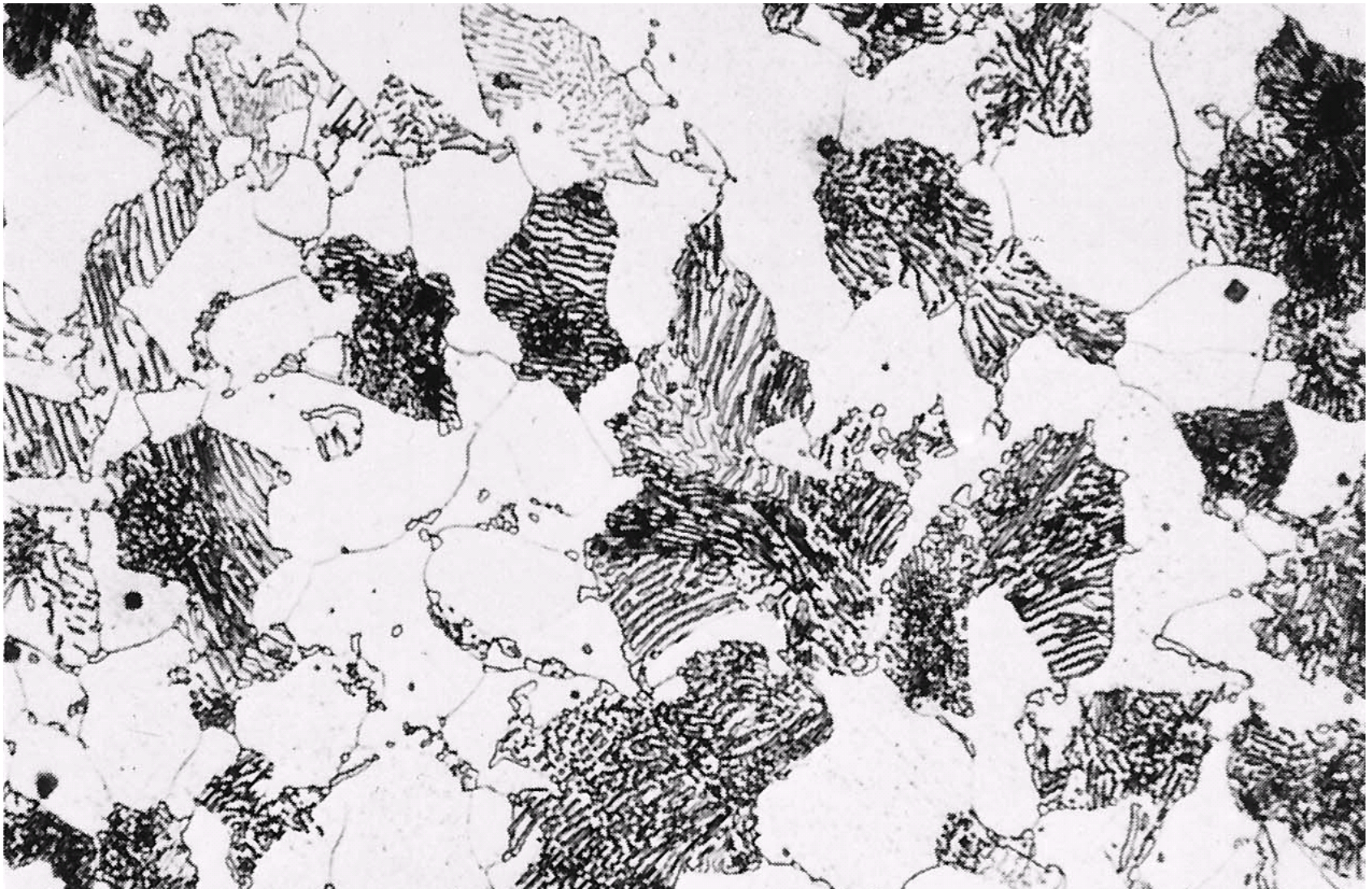
2. HYPOEUTECTOID STEEL



Hypoeutectoid steel คือมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.022 – 0.76 wt%C

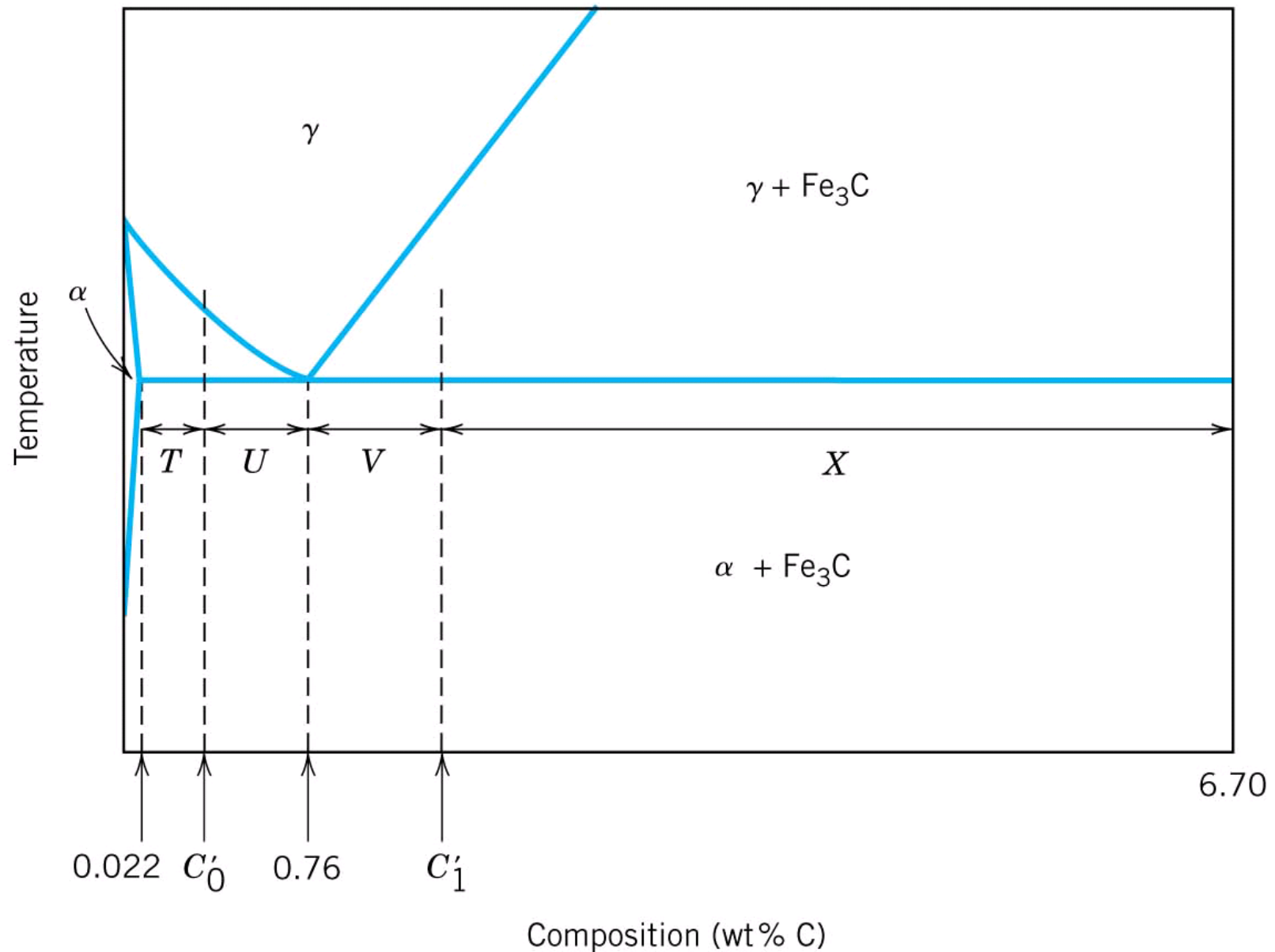
เฟส Ferrite ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Eutectoid Ferrite α ที่อยู่ในโครงสร้าง Pearlite

Proeutectoid Ferrite α ที่ตกผลึกออกมาก่อนปฏิกิริยา Eutectoid

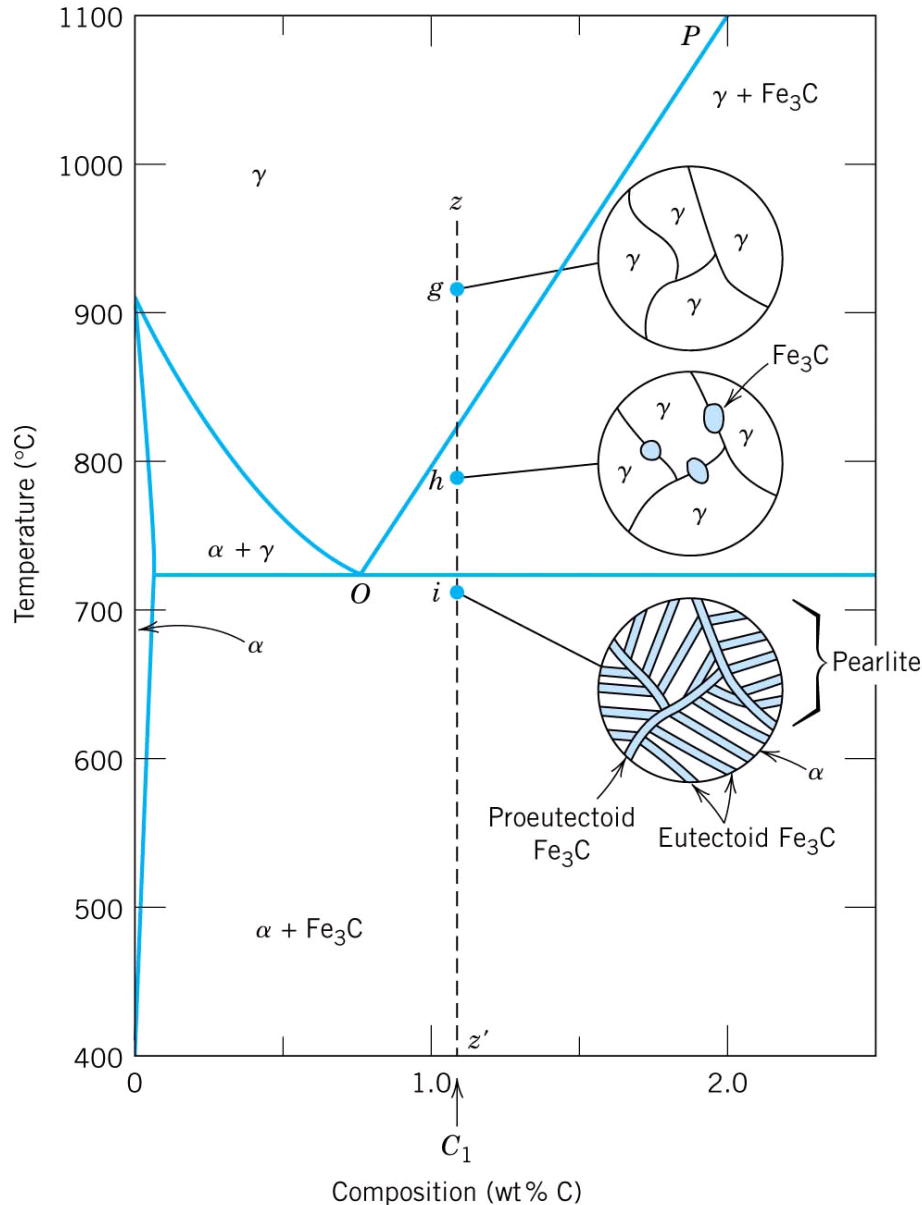


ภาพถ่ายโครงสร้างของ Hypoeutectoid steel 0.38 wt%C (635x)

การคำนวณหาปริมาณหรือสัดส่วนของเฟสต่างๆใน Hypoeutectoid steel



3. Hypereutectoid Steel



Hypereutectoid steel คือมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.76 – 2.11 wt%C

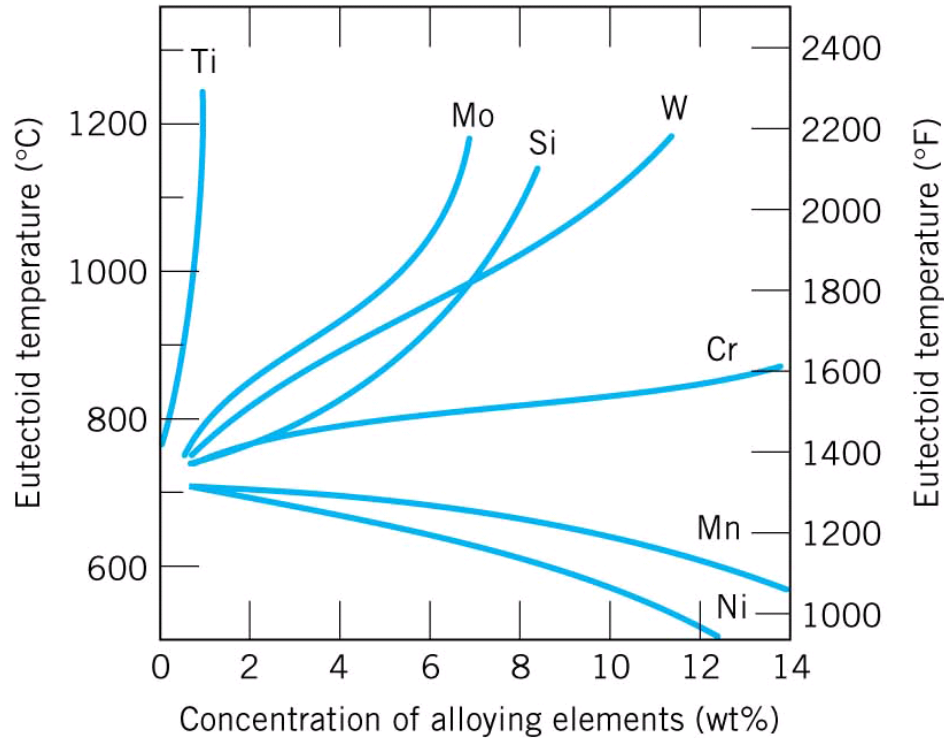
Proeutectoid Cementite (Fe_3C) ที่เกิดก่อนปฏิกิริยา Eutectoid และ Eutectoid cementite ที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์ (Eutectoid)

รูป(ซ้าย) แสดงการเปลี่ยนเฟสการเย็นตัวของโลหะผสม Hypereutectoid steel



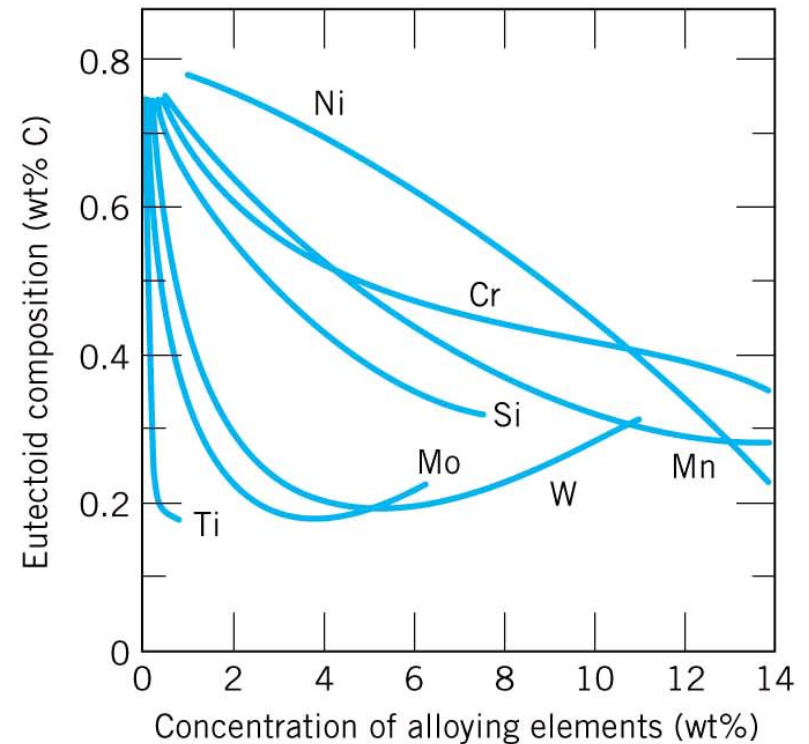
ภาพถ่ายของโครงสร้าง Hypereutectoid steel 1.4 wt%C (1000x)

ผลกระทบของโลหะต่างๆต่อลักษณะแผนภาพเฟส Fe-C



แสดงผลกระทบของโลหะชนิดต่างๆ

ต่ออุณหภูมิ Eutectoid



แสดงผลกระทบของโลหะชนิดต่างๆ

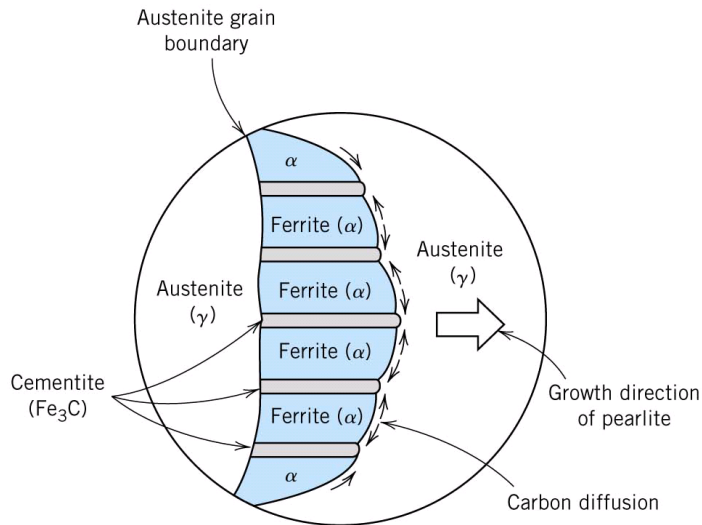
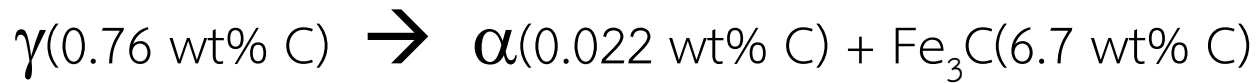
ต่อส่วนผสม Eutectoid

การเปลี่ยนโครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะผสม Iron - Carbon

Austenite จะมีการเปลี่ยนแปลง Phase ได้ 3 ลักษณะ คือ

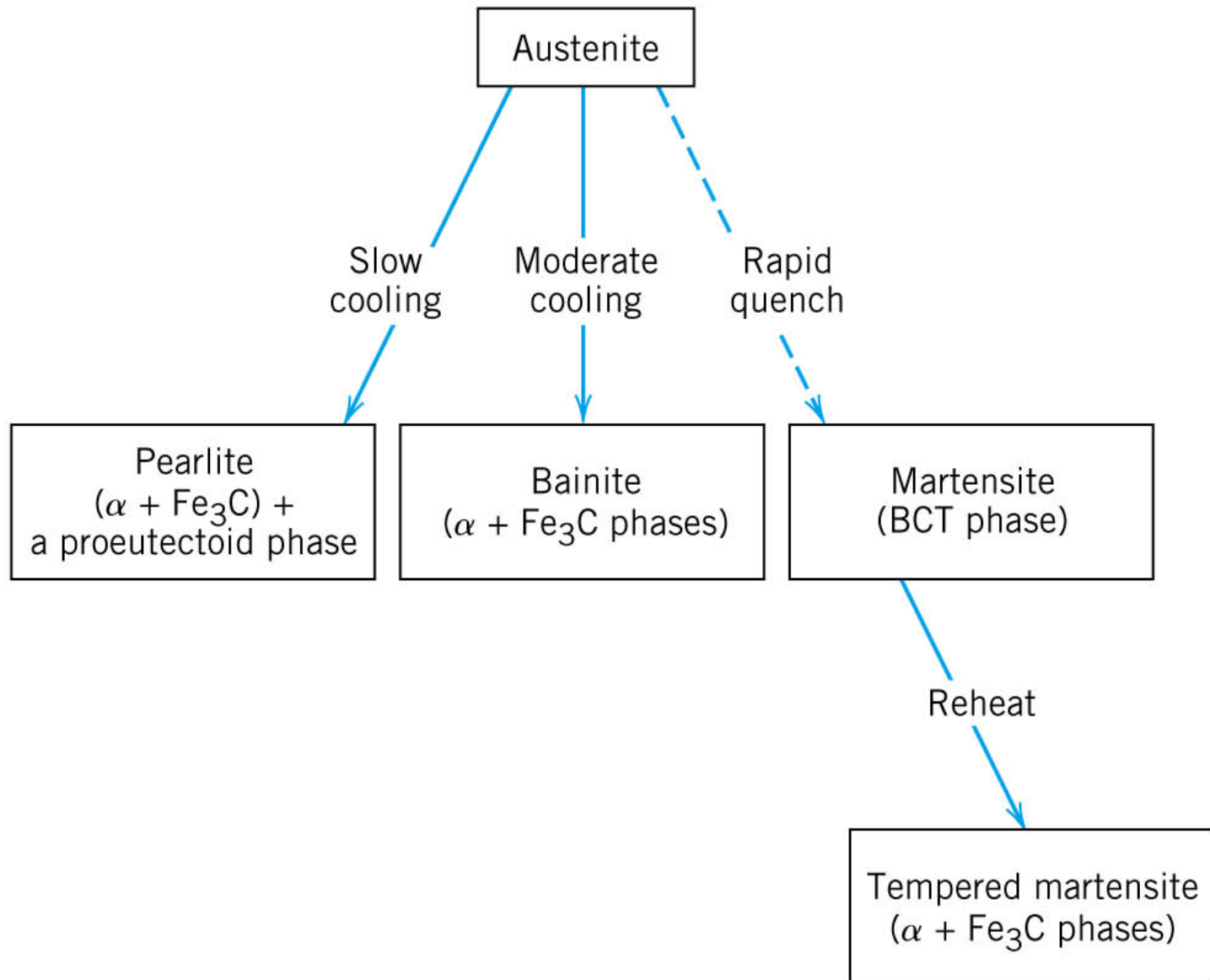
- Pearlite
- Bainite
- Martensite

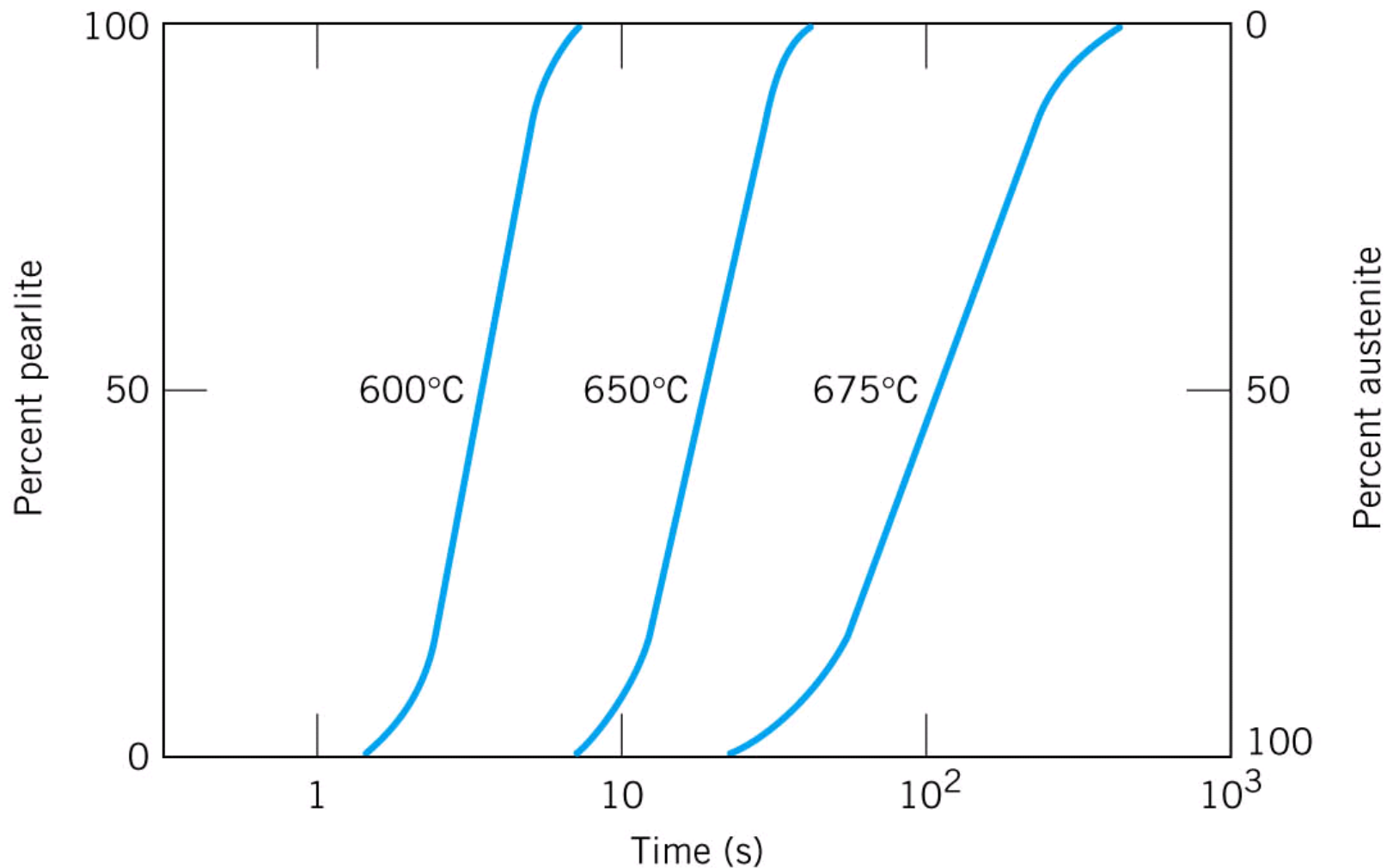
โครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์



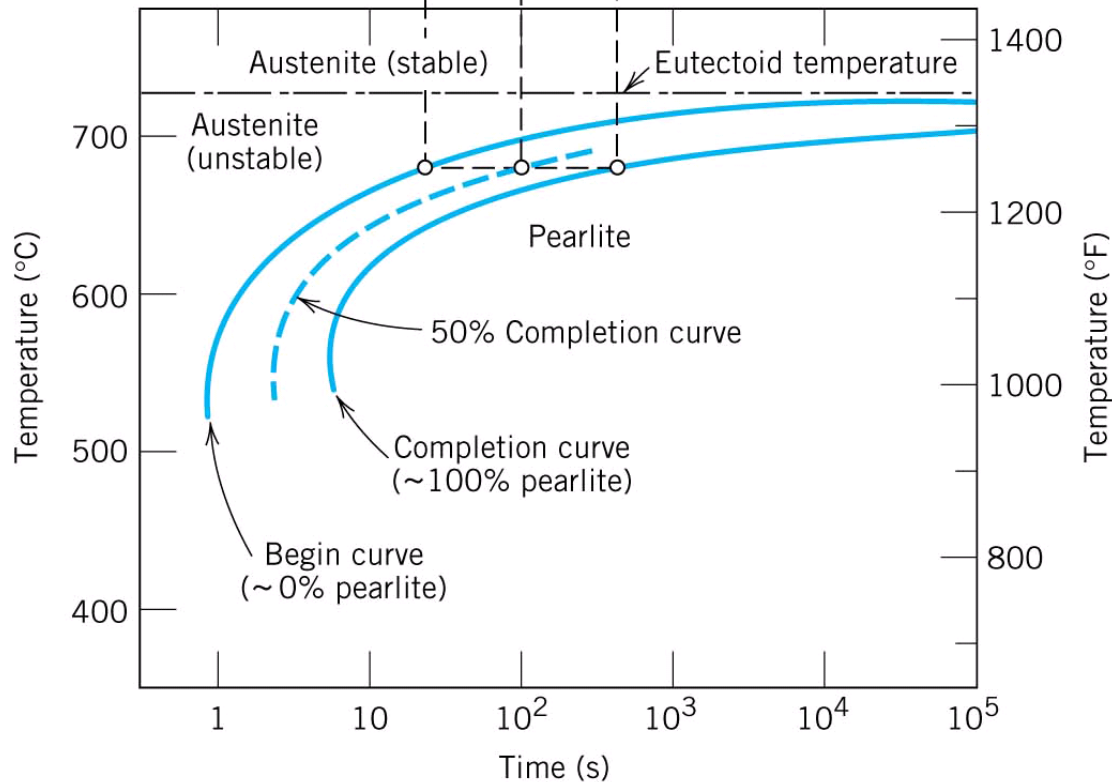
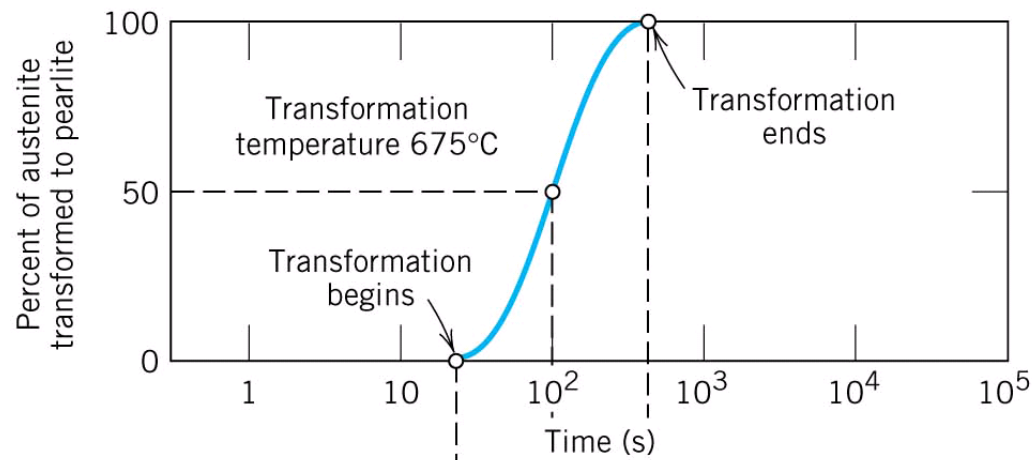
ภาพจำลองกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างจาก
Austenite ไปเป็น Pearlite

ออสเทนไนต์ (Austenite) สามารถเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างการเย็นตัว

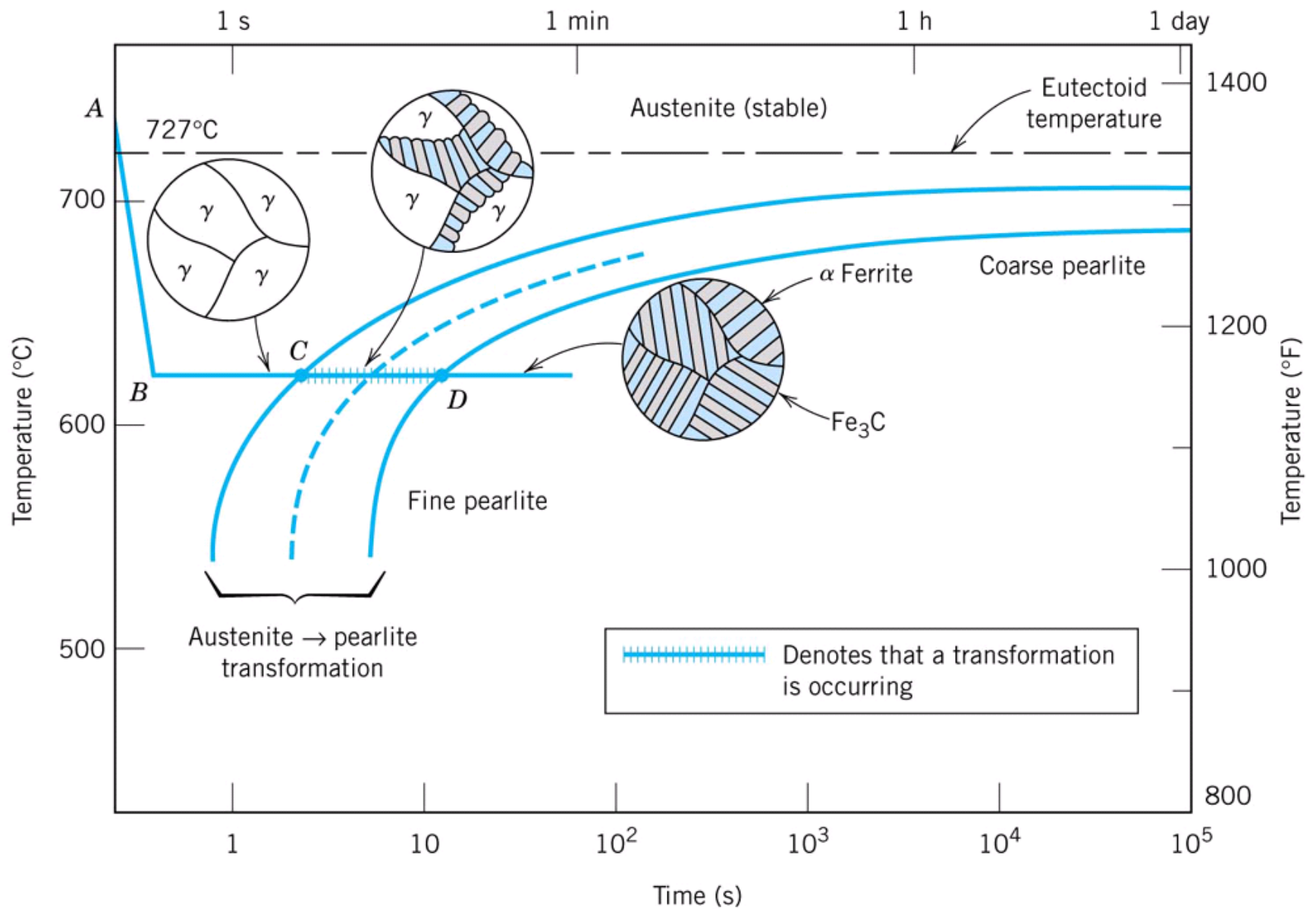




กราฟ Percent Transformation – Logarithm of Time
แสดงการเปลี่ยน Phase จาก Austenite ไปเป็น Pearlite

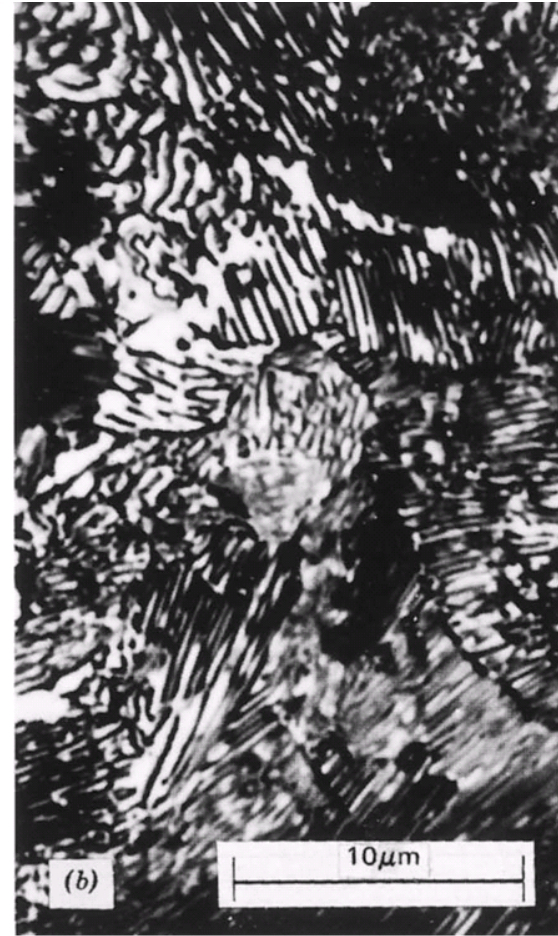
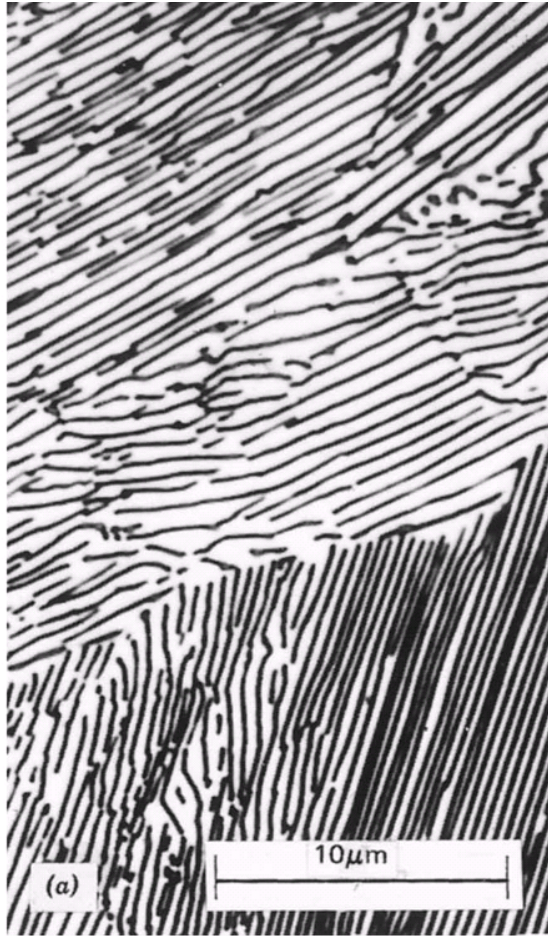


วิธีการสร้าง Isothermal Transformation หรือ TTT diagram จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง Percent Transformation - Time



TTT Curve แสดงถึงขอบเขตการเย็นตัวตามเส้น A-B-C-D

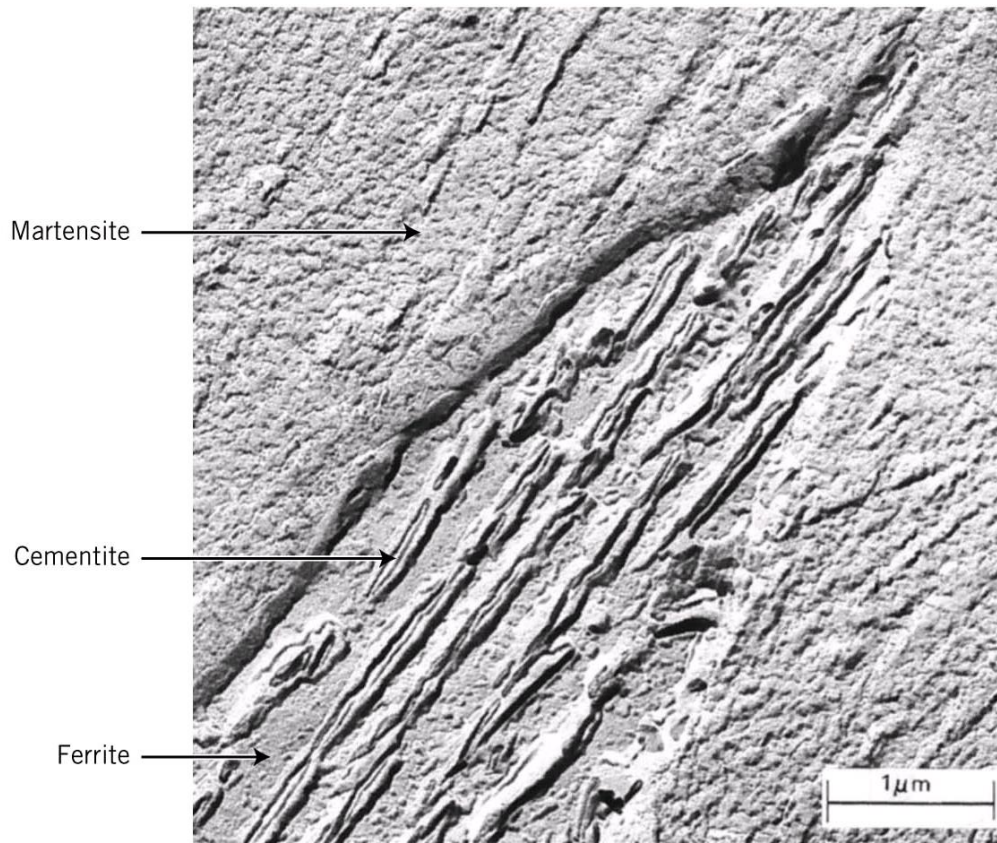
เพิร์ลไลต์ (Pearlite)

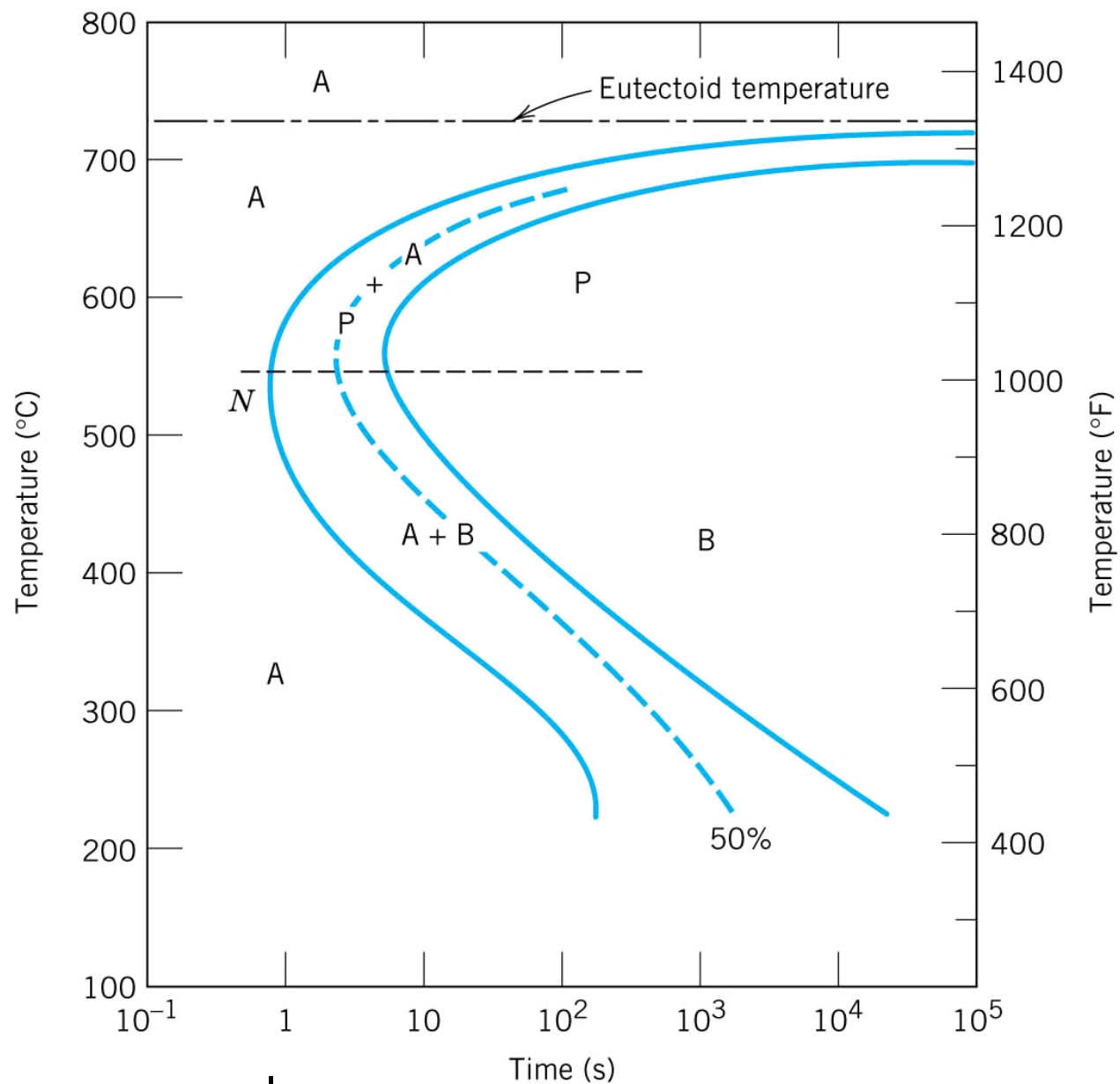


(a) เพิร์ลไลต์หยาบ (Coarse Pearlite) (b) เพิร์ลไลต์ละเอียด (Fine Pearlite)

เบนไนต์ (Bainite)

Bainite ประกอบด้วย Ferrite และ Cementite ซึ่งจะมีรูปร่างที่เรียวแหลม หรือมีรูปร่างที่แบนก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในขณะที่เปลี่ยนโครงสร้างนั้น

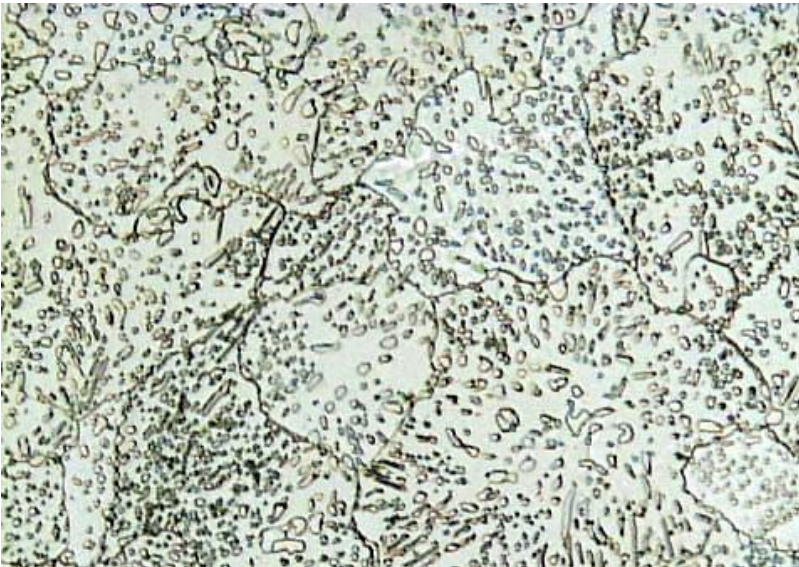




TTT Curve แสดงการเปลี่ยน Phase ของ Austenite -Pearlite (A-P) และการเปลี่ยน Phase ของ Austenite-Bainite (A-B)

สเฟียรอยด์ (Spheroidite)

- ให้ความร้อนเหล็กกล้าผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ Eutectoid 727°C และคงไว้
มากพอเช่น 700°C เป็นเวลา 18-24 ชม. $\rightarrow$ เย็นตัว , Fe_3C เปลี่ยนเป็นทรงกลม
- เกิดการแพร่อะตอมคาร์บอน(C) ระหว่าง α และ Fe_3C
- เมื่อเปลี่ยนรูปร่างเป็นทรงกลมแล้วทำให้โครงสร้างมีเส้นขอบเกรนน้อยลง



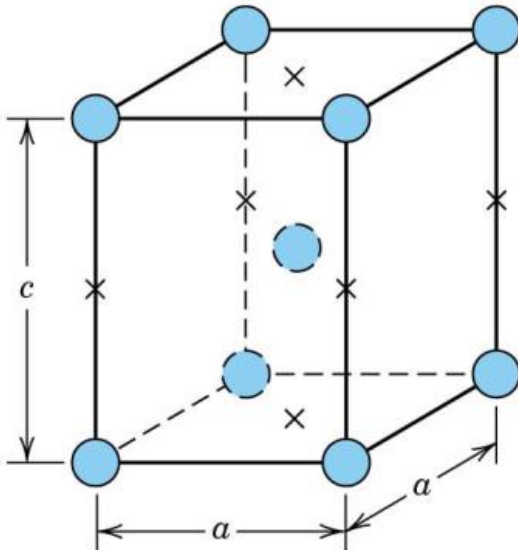
Photomicrograph ของเหล็กกล้าผสมที่
ปรากฏโครงสร้าง Spheroidite

มาร์เทนไซต์ (Martensite)

เกิดการเย็นตัวที่เร็วมากของ Austenite

เกิดการแพร่ของอะตอม Carbon ใน Austenite ไม่สมบูรณ์ จึงเกิดการแทนที่ของอะตอมขึ้นในโครงสร้าง

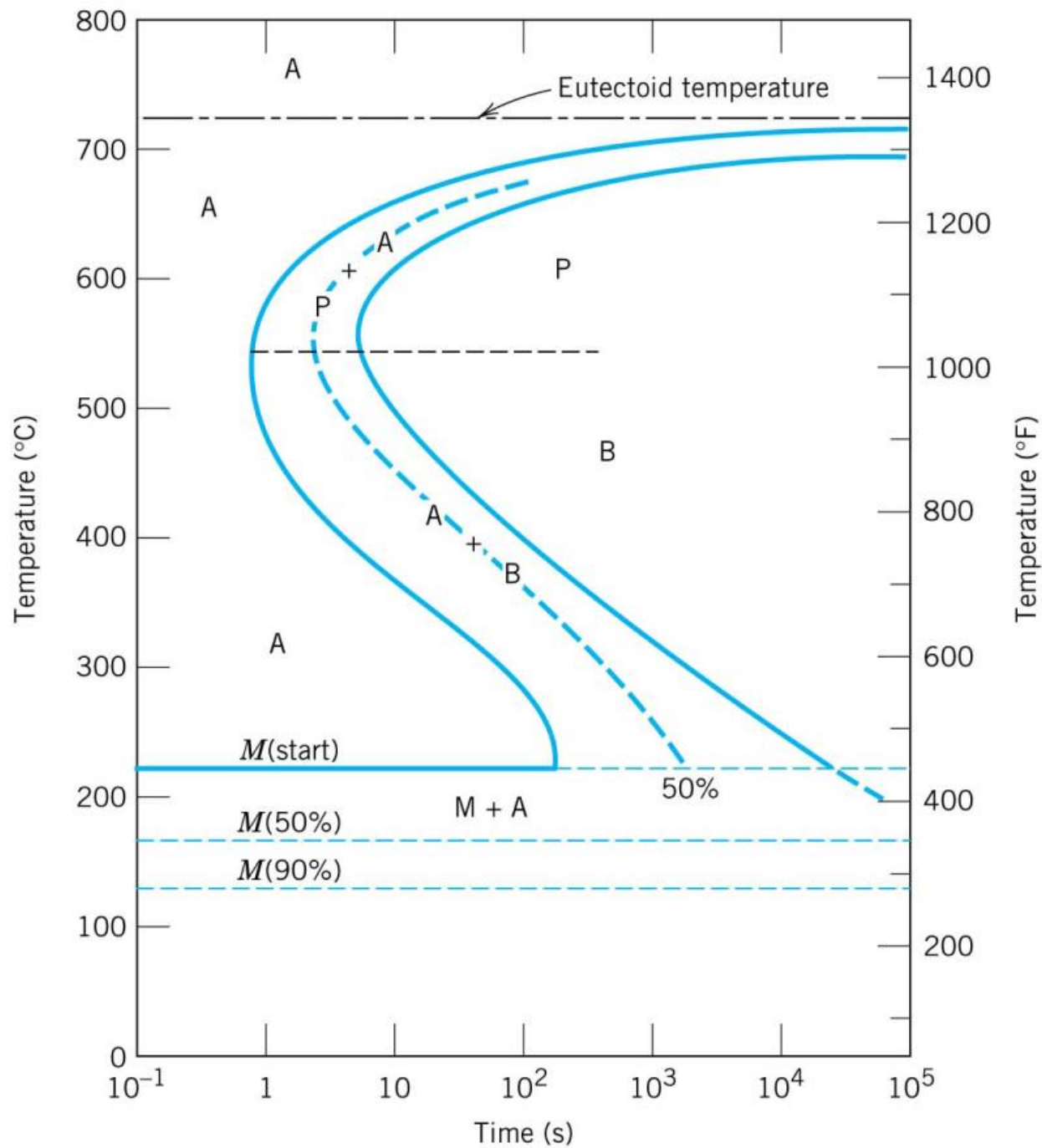
FCC (Austenite) $\rightarrow$ BCT ($a = b \neq c$)



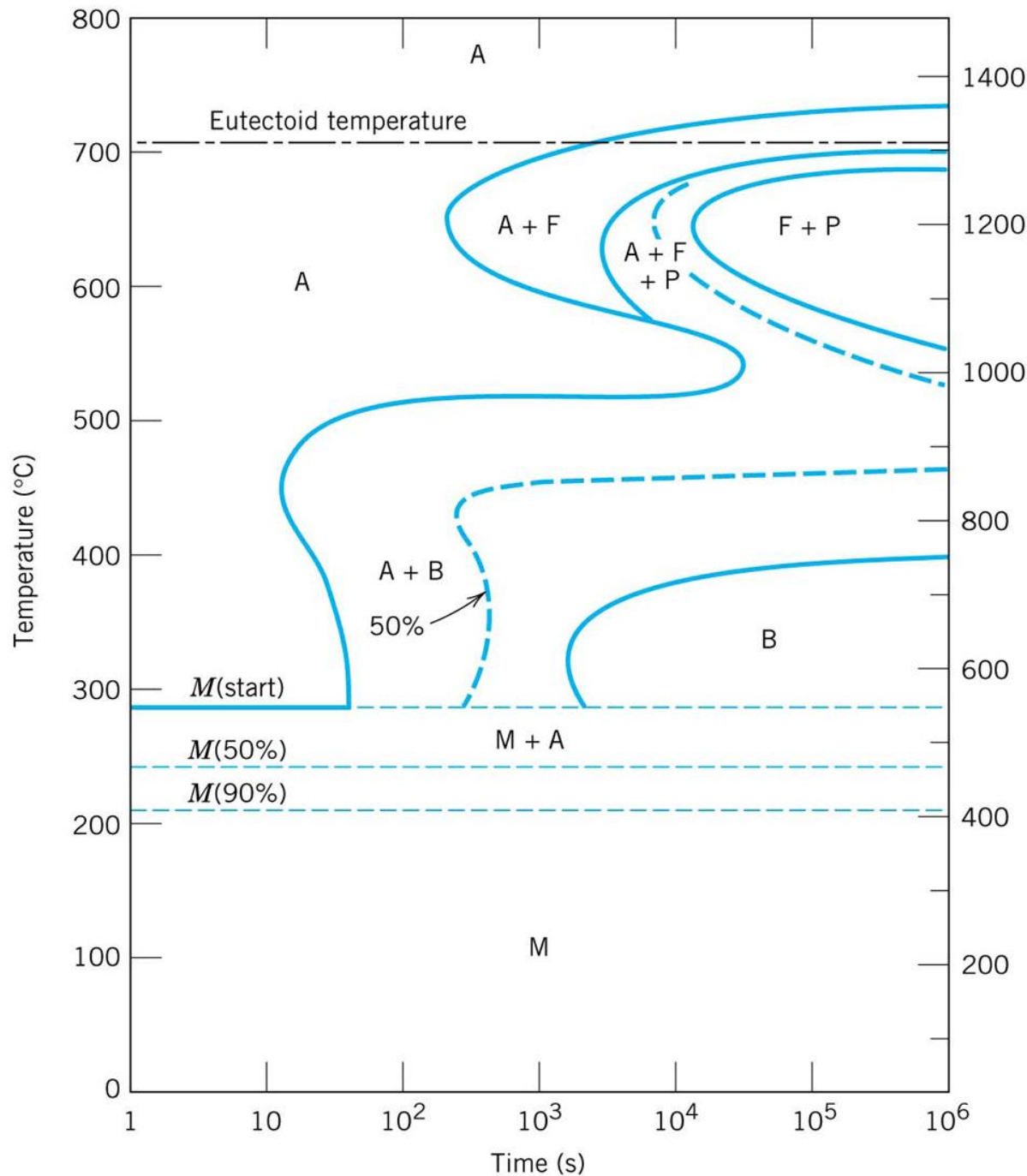
โครงสร้างผลึกแบบ BCT (Body-Centered Tetragonal) ของ Martensite (Iron Atom) แทนด้วยรูปวงกลม Carbon Atom แทนด้วยกากบาท



Photomicrograph แสดงโครงสร้างของ Martensite (1220x)



แผนภาพ Isothermal Transformation (สมบูรณ์) สำหรับ eutectoid steel (Fe-0.76wt% C)



Isothermal transformation diagram สำหรับ alloy steel (type 4030)

A= austenite

B= bainite

P= pearlite

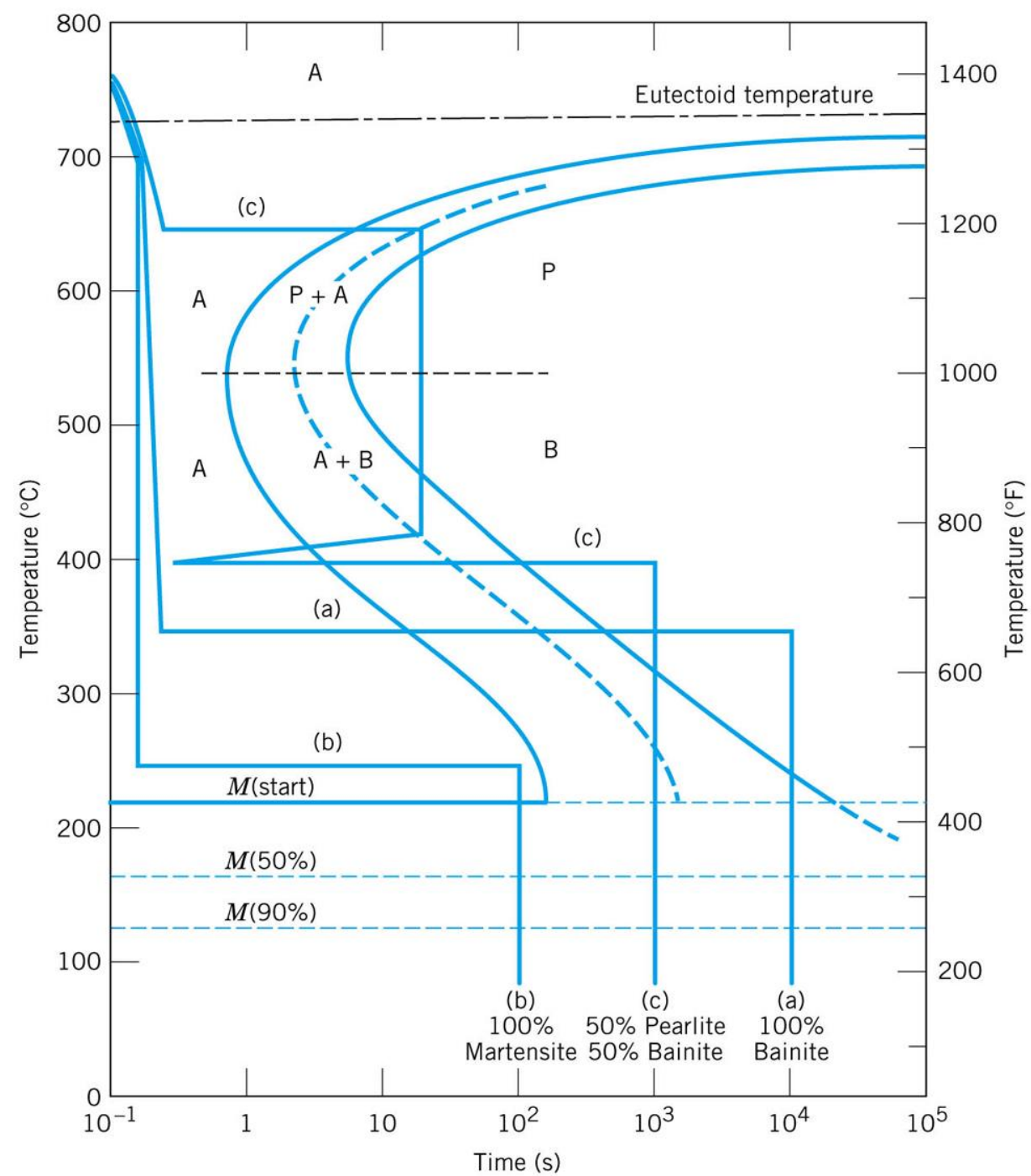
M= martensite

F= proeutectoid ferrite

แบบฝึกหัด

จงใช้ isothermal transformation diagram ของ eutectoid steel เพื่อทำนาย microstructure และ เปรูเซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ของตัวอย่าง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแต่ละวิธี โดยอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 760°C

- (a) ทำให้เย็นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 350°C แล้วทิ้งไว้ 10^4 วินาที แล้วทำให้เย็นลงด้วยน้ำจนถึงอุณหภูมิห้อง
- (b) ทำให้เย็นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 250°C แล้วทิ้งไว้ 100 วินาที แล้วทำให้เย็นลงด้วยน้ำจนถึงอุณหภูมิห้อง
- (c) ทำให้เย็นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 650°C แล้วทิ้งไว้ 20 วินาที แล้วทำให้เย็นลงต่ออย่างรวดเร็วไปที่ 400°C แล้วทิ้งไว้ 10^3 วินาที จากนั้นทำให้เย็นลงด้วยน้ำจนถึงอุณหภูมิห้อง



ผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า

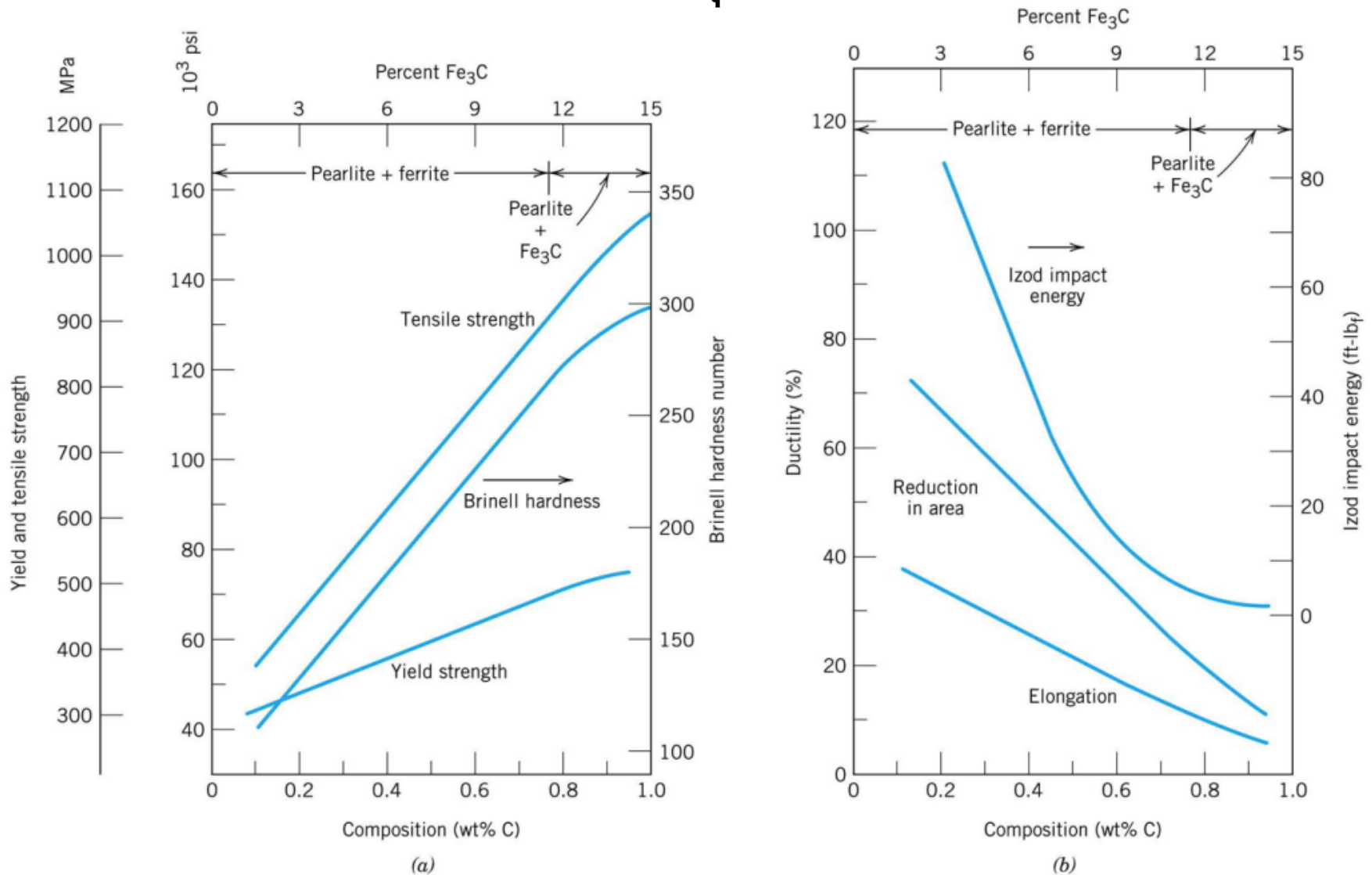


FIGURE 10.20 (a) Yield strength, tensile strength, and Brinell hardness versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. (b) Ductility (%EL and %RA) and Izod impact energy versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. [Data taken from *Metals Handbook*.]

เปรียบเทียบ FINE- COARSE PEARLITE - SPHEROIDITE

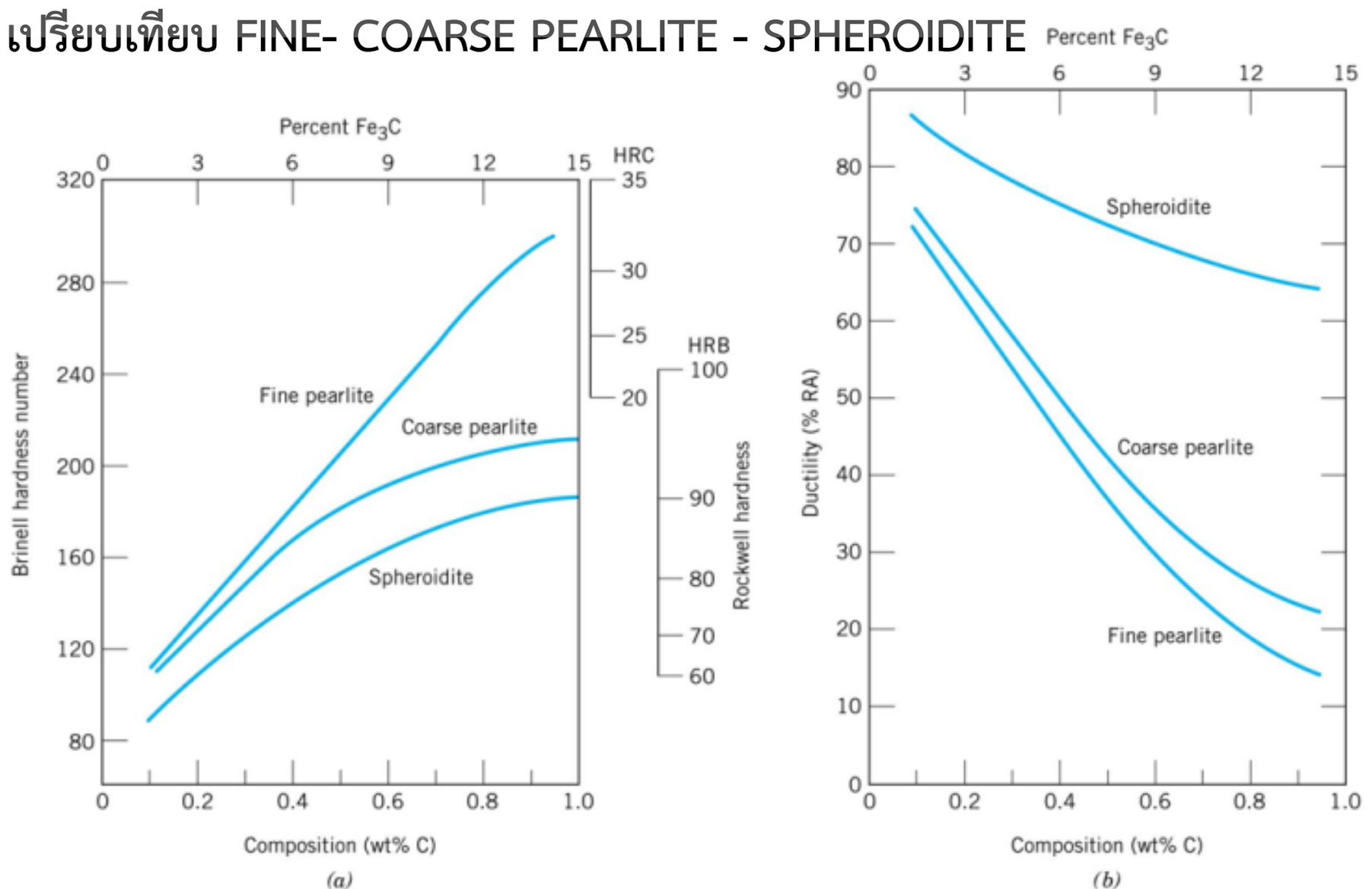


FIGURE 10.21 (a) Brinell and Rockwell hardness as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (b) Ductility (% RA) as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*,

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า

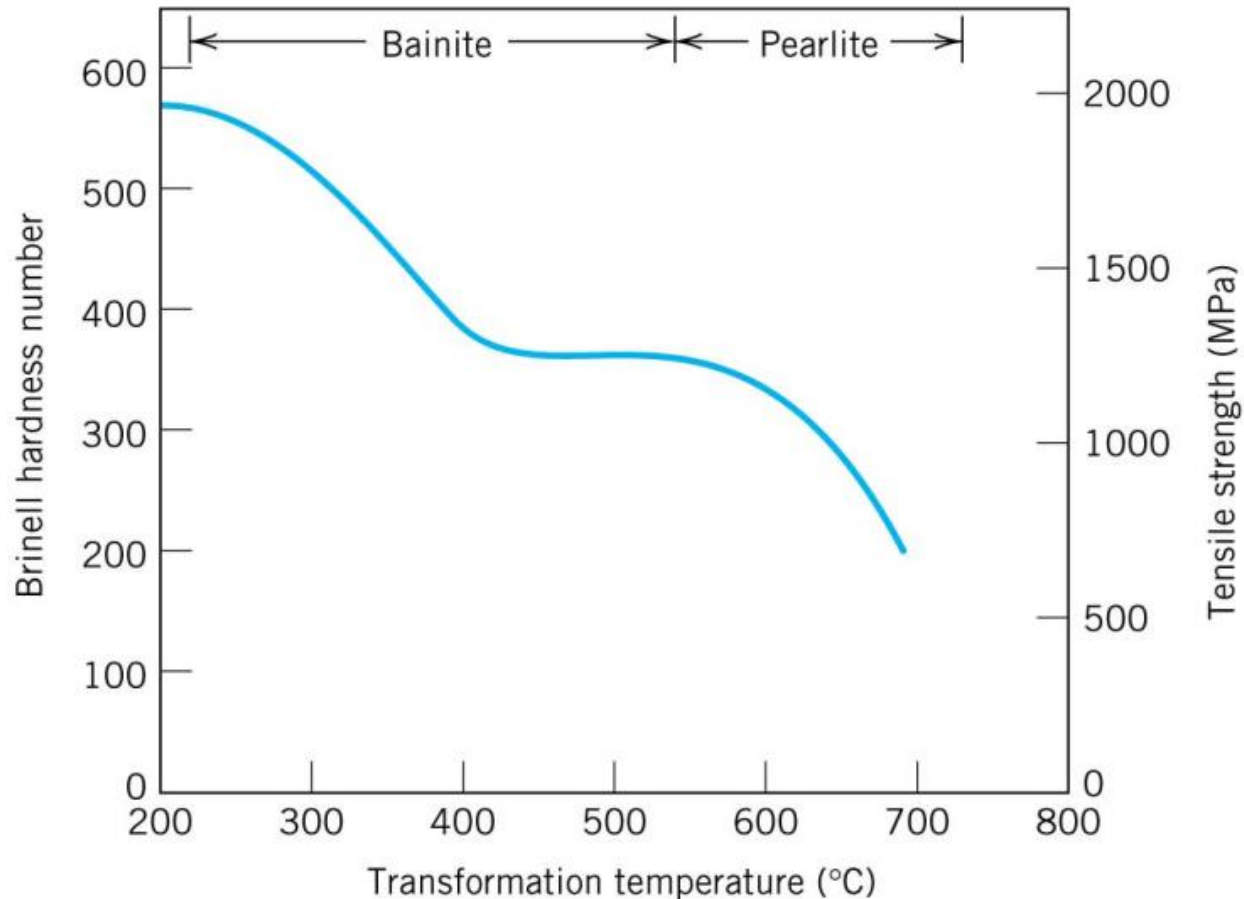


FIGURE 10.22 Brinell hardness and tensile strength as a function of isothermal transformation temperature for an iron-carbon alloy of eutectoid composition, taken over the temperature range at which bainitic and pearlitic microstructures form. (Adapted from E. S. Davenport, “Isothermal Transformation in Steels,” *Trans. ASM*, **27**, 1939, p. 847. Reprinted by permission of ASM International.)

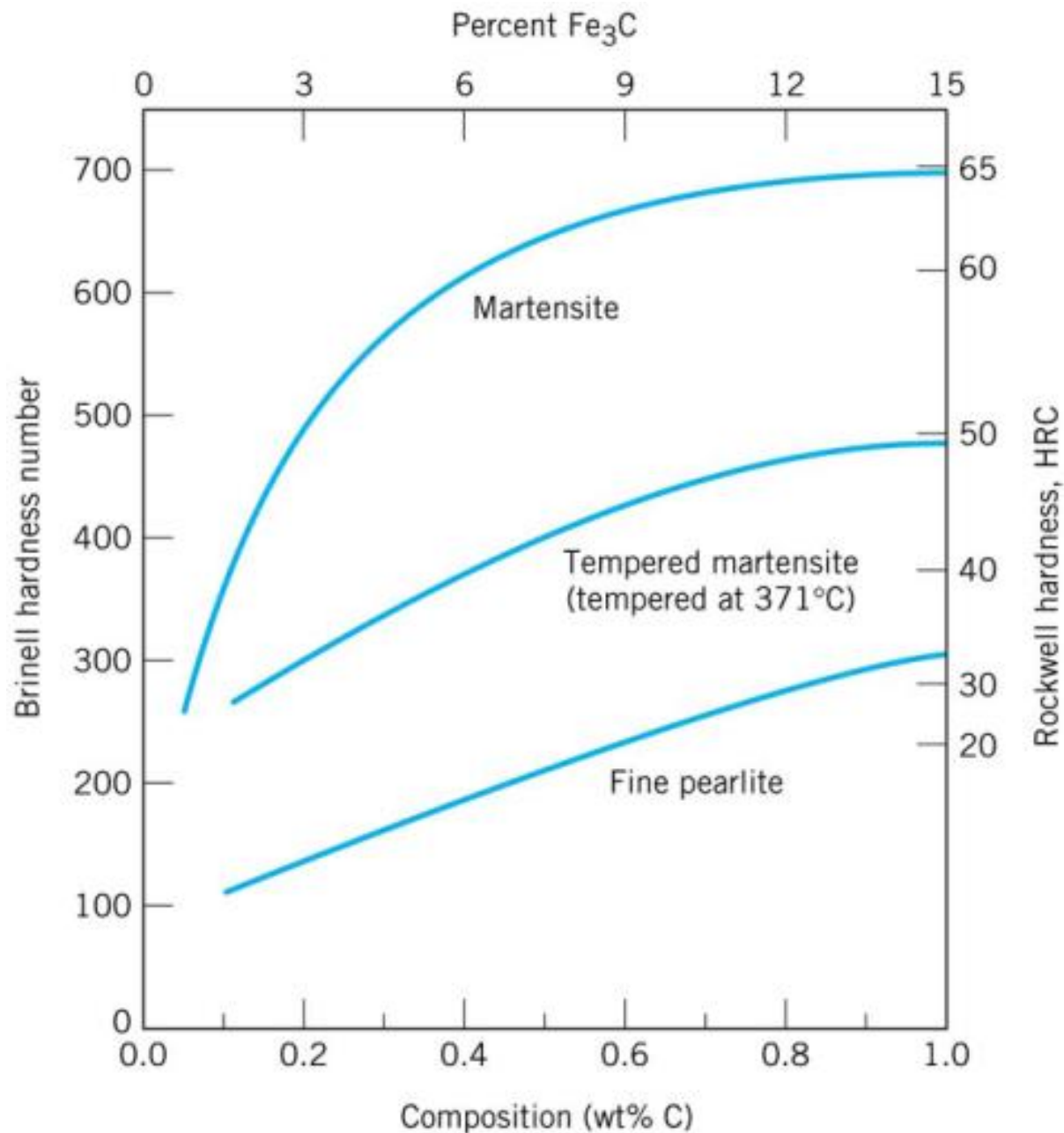


FIGURE 10.23 Hardness as a function of carbon concentration for plain carbon martensitic, tempered martensitic [tempered at 371°C (700°F)], and pearlitic steels. (Adapted from Edgar C. Bain, *Functions of the Alloying Elements in Steel*, American Society for Metals, 1939, p. 36; and R. A. Grange, C. R. Hribal, and L. F. Porter, *Metall. Trans. A*, Vol. 8A, p. 1776.)

แบบฝึกหัด

1. Consider 2.5 kg of austenite containing 0.65 wt%C, cooled to just below 727°C.
 - (a) What is the proeutectoid phase present?
 - (b) How many kilograms each of the total ferrite and cementite form?
 - (c) How many kilograms each of pearlite and the proeutectoid phase form?
2. Estimate the Brinell hardnesses for specimens of eutectoid composition that have been subjected to the heat treatments : Cool rapidly to 700 °C, hold for 10^4 s, then quench to room temperature, finally reheat the specimen to 700°C for 20 h.

การบ้าน

1. จงวาดเส้นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการทางความร้อนของเหล็กที่มีส่วนผสมยูเทคตอยด์ เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ต้องการตามลักษณะต่อไปนี้
 - (ก) Coarse pearlite 100%
 - (ข) Bainite 50% Martensite 50%
 - (ค) Fine Pearlite 50% Bainite 25% Martensite 25%
 - (ง) Coarse Pearlite 50% Bainite 50%

