

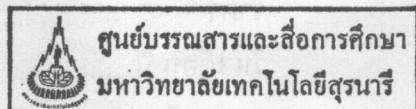
อภิธานศัพท์

เอกสารประกอบการสอน
รายวิชา 431101 Engineering Materials

ส่วนที่ 1 : วัสดุโลหะ

อ. สาร์มภ์ บุญมี

ภาคการศึกษา 3/2548
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



บทที่ 1
ความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับโลหะ

- 1.1 บทนำวัสดุวิศวกรรม
- 1.2 ประเภทของวัสดุ
- 1.3 ประวัติของวัสดุโลหะ
- 1.4 ธรรมชาติของวัสดุโลหะ

1.1 บทนำวัสดุวิศวกรรม

วัสดุเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของคนเราอยู่ตลอดเวลา เช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม, ภาชนะ, ยานพาหนะ, การสื่อสาร, สิ่งก่อสร้าง ฯลฯ ยกตัวอย่างเช่น

เสื้อผ้า → Polymer

ตัวถังรถยนต์ → Metal

คอนกรีต → Ceramics

ดังนั้นความเข้าใจในธรรมชาติที่มาและที่ไปของวัสดุจึงมีประโยชน์อย่างมากต่อวิศวกร

1.2 ประเภทของวัสดุ

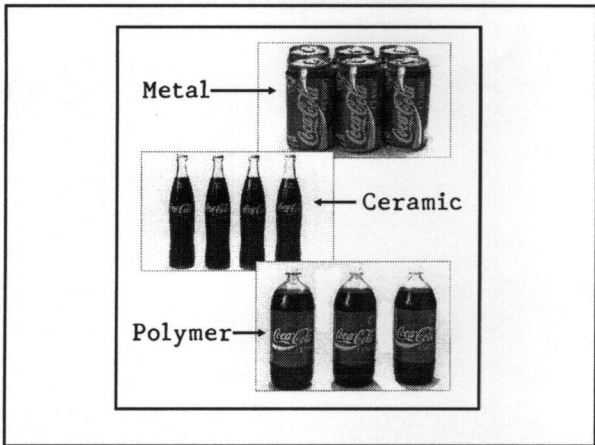
วัสดุสามารถจำแนกตามพันธะทางเคมีและพฤติกรรมทั่วไปออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

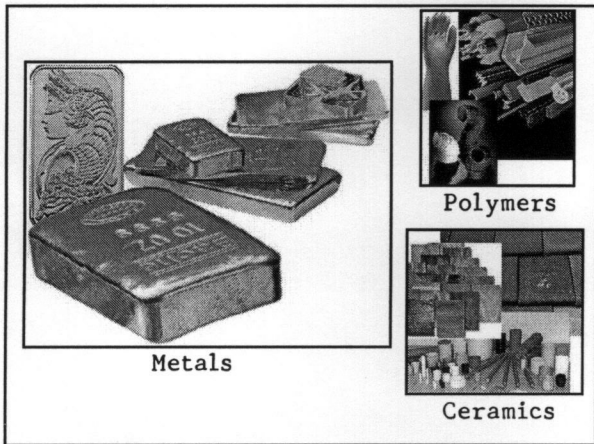
โลหะ Metals

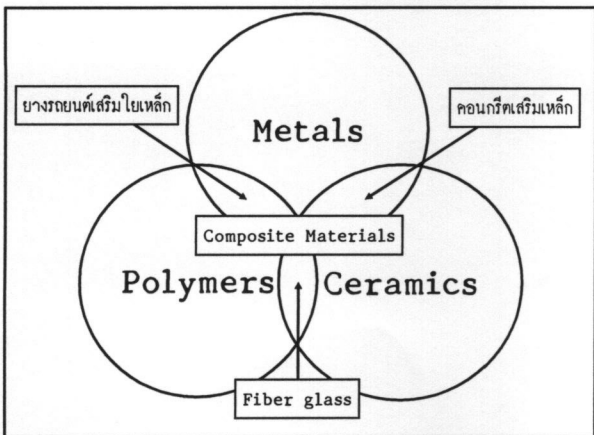
เซรามิก Ceramics

พอลิเมอร์ Polymers

วัสดุบางประเภทเป็นของผสมระหว่างวัสดุต่างชนิดกันเรียกว่า Composite Materials เช่น คอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้คอนกรีตซึ่งปกติรับแรงดึงได้น้อย สามารถทนแรงดึงได้สูงขึ้น





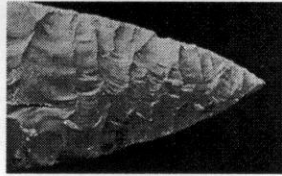


Stone Age



ยุคหิน มนุษย์ใช้วัสดุจากธรรมชาติ เช่น หิน, ไม้, เกรว็ลล์ มาทำ ยุทโธปกรณ์ ใช้ในการล่าสัตว์และรบ

โลหะที่ใช้ได้แก่ ทองคำ, เงิน, ตะกั่ว ซึ่งพบในสภาพโลหะตามธรรมชาติ



Bronze Age



ยุคบรอนซ์ วัสดุที่ใช้ทำยุทโธปกรณ์ ทำจากโลหะผสมทองแดง ซึ่งมี น้ำหนักมากแต่มีความแข็งแรงกว่า ทอง เงิน ตะกั่ว

แหล่งโบราณคดีที่เก่าแก่ที่สุด (5000 BC) ที่พบการนำโลหะผสมทองแดงมาใช้คือ แหล่ง โบราณคดีบ้านเชียง จ.อุดรธานี

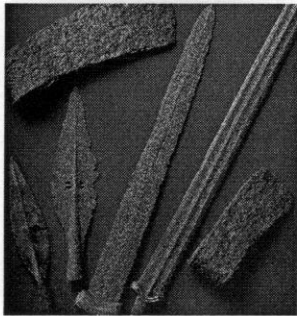


โครงสร้างจุลภาคของ บรอนซ์จากบ้านเชียง

Iron Age

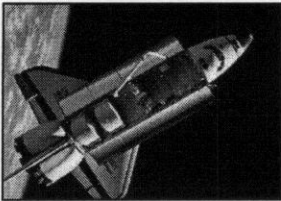


ยุคเหล็ก มนุษย์เริ่มหันมาใช้เหล็กซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าทองแดง ทั้งยังแข็งแรงกว่าทองแดงอีกด้วย แต่ที่เหล็กขึ้นรูปได้ยากกว่า รวมทั้งมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ



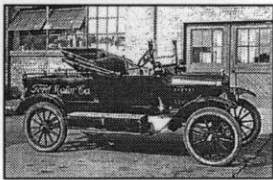
ยุทธโศปกรณ์จากยุคเหล็ก

Scientific Age

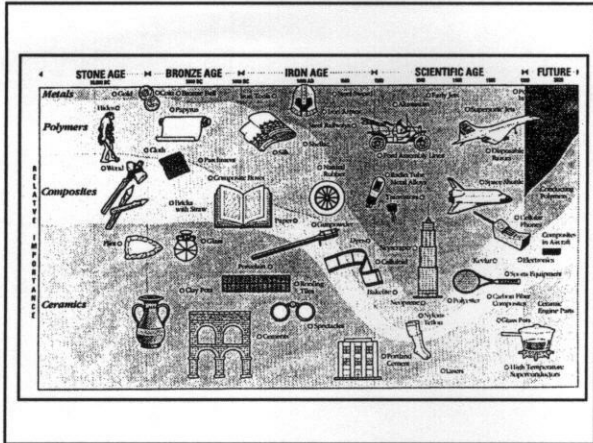


ยุควิทยาศาสตร์ โลหะเริ่มมีหน้าที่หลากหลายขึ้น นอกเหนือไปจากความแข็งแรง เช่น การนำไฟฟ้า

จุดเปลี่ยนที่สำคัญคือการปฏิวัติอุตสาหกรรม ทำให้มีการพัฒนาความรู้และการนำไปใช้งานของวัสดุโลหะอย่างรวดเร็ว

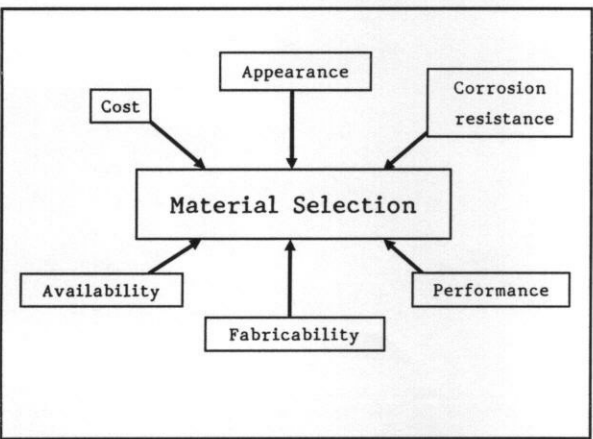


Ford Model T



ปัจจัยในการเลือกใช้วัสดุ

- สามารถทำหน้าที่ได้ดี เช่น แข็งแรง, นำไฟฟ้า, เป็นแม่เหล็ก ฯลฯ
- น้ำหนัก เช่น อลูมิเนียมเบากว่าเหล็ก
- ความทนทาน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดสนิมยากกว่าเหล็ก
- ราคา เช่น เหล็กราคาถูกกว่าไททานเนียม
- ความสวยงาม เช่น ทองคำมีสีที่สวยงามกว่าทองเหลือง
- ความง่ายในการขึ้นรูป เช่น ทองแดงอัดขึ้นรูปได้ง่ายกว่าเหล็ก
- สามารถหาได้ง่าย เช่น ไททานเนียมหาได้ยากทำให้มีราคาแพง

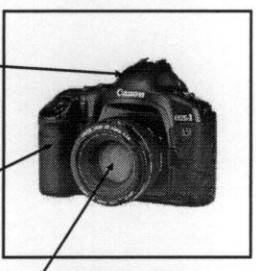




หน้าจอกโทรศัพท์มือถือทำจาก Mg alloy มีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ

หัวไม้กอล์ฟทำจาก Ti alloy มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง

กล้องถ่ายภาพ



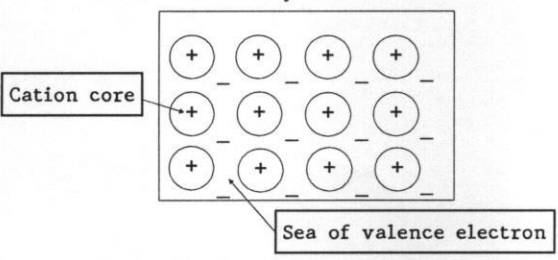
โครงสร้าง ทำจากโลหะ (Mg alloy) แข็งแรง, เบา, ไม่เปราะ

ผิว ทำจากพอลิเมอร์ น้ำหนักเบา เหนียว ขึ้นรูปง่าย จับแล้วให้ความรู้สึกสบายมือ

เลนส์ ทำจากเซรามิกส์ (แก้ว) มีความโปร่งแสง

1.4 ธรรมชาติของวัสดุโลหะ

- วัสดุโลหะปกติแล้วเกิดขึ้นจากส่วนผสมระหว่างธาตุโลหะ ซึ่งทำพันธะโลหะกัน ซึ่งจะมี valence electron อยู่ร่วมกัน



Cation core

Sea of valence electron

1.4 ธรรมชาติของวัสดุโลหะ(ต่อ)

- สมบัติของวัสดุโลหะหลายประการเป็นผลมาจาก valence electron เช่นสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี
- สมบัติโดยทั่วไปของโลหะคือ แข็งและเหนียวปานกลาง, นำไฟฟ้า, นำความร้อนได้ดี, ไม่โปร่งใส, เกิดสนิมได้

ความแข็ง

Polymers < Metals < Ceramics

ความเหนียว

Ceramics < Metals < Polymers

จุดหลอมตัว

Polymers < Metals < Ceramics

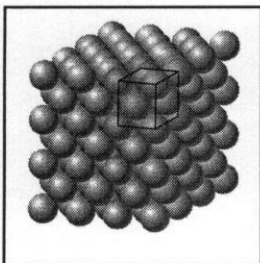
การนำความร้อน

Ceramics < Polymers < Metals

การนำไฟฟ้า

Ceramics < Polymers < Metals

โครงสร้างผลึกของโลหะ



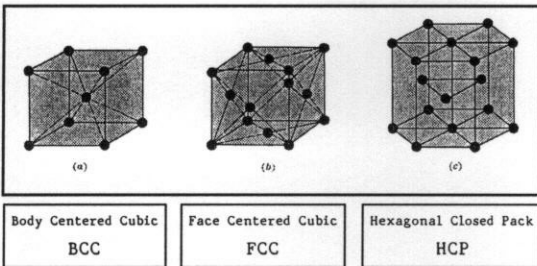
หากมีกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายมาก ๆ ส่องเข้าไปในโลหะจะพบว่า โครงสร้างของโลหะมีความเป็นระเบียบ โดยจะมีลักษณะซ้ำ ๆ กัน เมื่อพิจารณาโครงสร้างที่ซ้ำ ๆ กันนั้นแล้ว เลือกลหน่วยปริมาตรที่เป็นตัวแทนของ โครงสร้างดังกล่าวออกมา หน่วย ปริมาตรนั้นเรียกว่า "Unit Cell"

สำหรับ Fe มีด้านของ unit cell ยาว 0.287 nm
 ดังนั้นระยะทาง 1 cm จะเท่ากับ unit cell ของ Fe
 มาเรียงต่อกันจำนวน

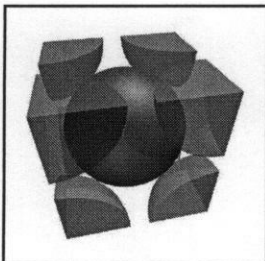
$$\frac{1 \times 10^{-2} \text{ m}}{0.287 \times 10^{-9} \text{ m}} = 3.48 \times 10^7 \text{ Unit cells}$$

หรือเท่ากับสามสิบล้านสี่แสนแปดแสน unit cells !!!

โครงสร้างผลึกของโลหะมี 3 แบบได้แก่



BCC

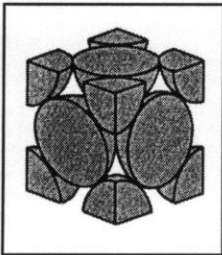


- Body Centered Cubic (BCC)
- ประกอบไปด้วย
- 1 atom บริเวณใจกลาง unit cell
- 1/8 atom ที่มุมทั้งแปดของ unit cell

ตัวอย่าง โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC

Metal	Lattice constant a , nm	Atomic radius R ,* nm
Chromium	0.289	0.125
Iron	0.287	0.124
Molybdenum	0.315	0.136
Potassium	0.533	0.231
Sodium	0.429	0.186
Tantalum	0.330	0.143
Tungsten	0.316	0.137
Vanadium	0.304	0.132

FCC



• Face Centered Cubic (FCC)

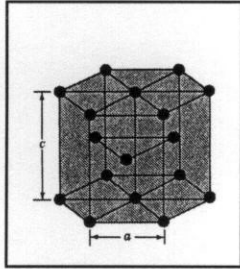
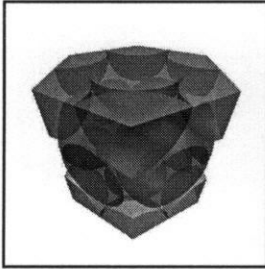
ประกอบด้วย

- 1/2 ของอะตอมจำนวน 6 ซีกที่บริเวณหน้าทั้งหกของ unit cell
- 1/8 ของอะตอมจำนวน 8 ซีกที่มุมทั้งแปดของ unit cell

ตัวอย่าง โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC

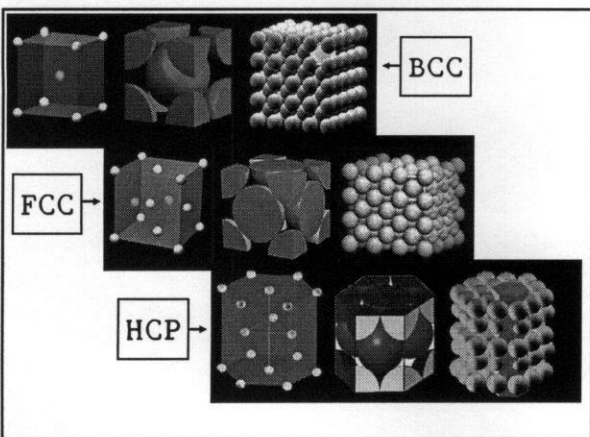
Metal	Lattice constant a , nm	Atomic radius R ,* nm
Aluminum	0.405	0.143
Copper	0.3615	0.128
Gold	0.408	0.144
Lead	0.495	0.175
Nickel	0.352	0.125
Platinum	0.393	0.139
Silver	0.409	0.144

HCP



ตัวอย่าง โลหะที่มี โครงสร้างผลึกแบบ HCP

Metal	Lattice constants, nm		Atomic radius R , nm	c/a ratio	% deviation from ideality
	a	a			
Cadmium	0.2973	0.5618	0.149	1.890	+15.7
Zinc	0.2665	0.4947	0.133	1.856	+13.6
Ideal HCP				1.633	0
Magnesium	0.3209	0.5209	0.160	1.623	-0.66
Cobalt	0.2507	0.4069	0.125	1.623	-0.66
Zirconium	0.3231	0.5148	0.160	1.593	-2.45
Titanium	0.2950	0.4683	0.147	1.587	-2.81
Beryllium	0.2286	0.3584	0.113	1.568	-3.98



fcc bcc hexagonal

ระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุดจะเป็นระนาบที่ให้เกิดการ slip ได้ง่ายที่สุด

การ slip
a) closed pack direction b) non-closed pack direction

FCC BCC HCP

8 planes 6 planes 2 planes

- โครงสร้างผลึกที่มีจำนวนระนาบการ slip มากจะทำให้โลหะชนิดนั้นสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมีสมบัติเหนียว
- โครงสร้างผลึกที่มีจำนวนระนาบการ slip น้อยจะทำให้โลหะชนิดนั้นสามารถขึ้นรูปได้ยากและมีสมบัติเปราะ

BCC	6
FCC	8
HCP	2

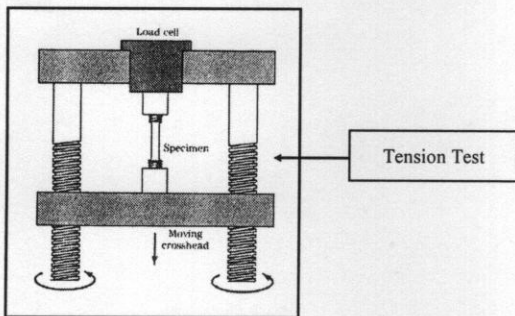
สรุป

- โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC มีสมบัติค่อนข้างเหนียวและขึ้นรูปได้ง่าย เช่น ทองแดง, เงิน, ทอง, อลูมิเนียม
- โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ HCP มีสมบัติค่อนข้างเปราะ เช่น แมกนีเซียม, สังกะสี, ไททาเนียม
- โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC มีสมบัติปานกลางระหว่าง FCC และ HCP เช่น เหล็ก, โครเมียม, โมลิบดีนัม

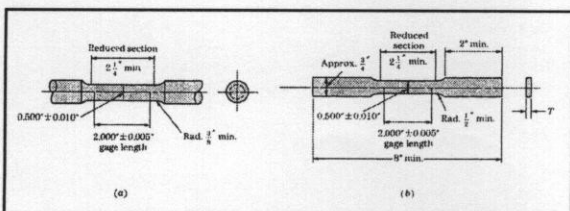
สมบัติเชิงกลพื้นฐานของ โลหะ
Mechanical Properties of Metals

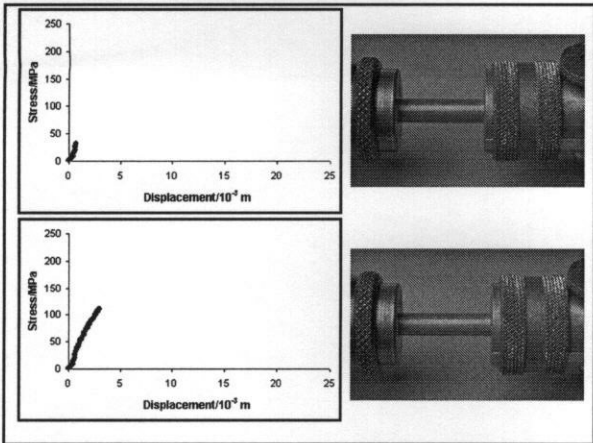
- ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)
- ความแข็ง (Hardness)
- ความล้า (Fatigue)
- ความคืบ (Creep)
- ความต้านทานแรงกระแทก (Impact resistance)

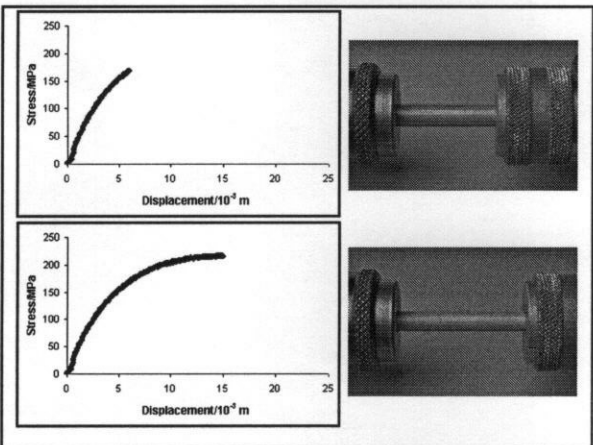
ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)

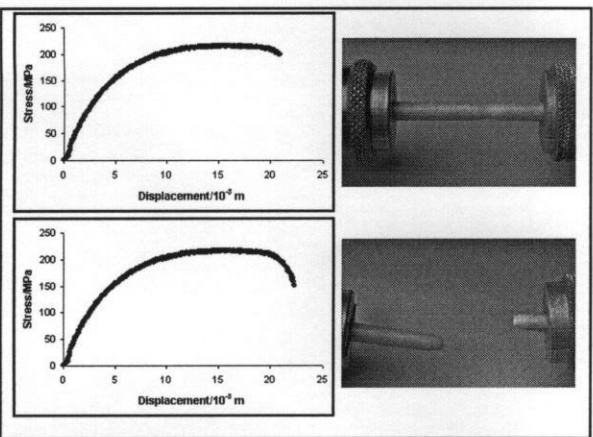


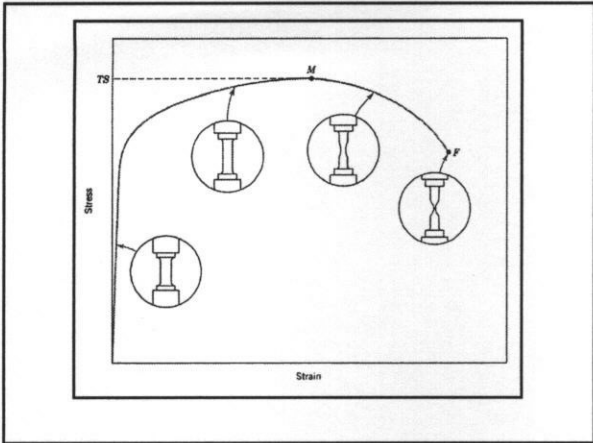
Tensile specimen

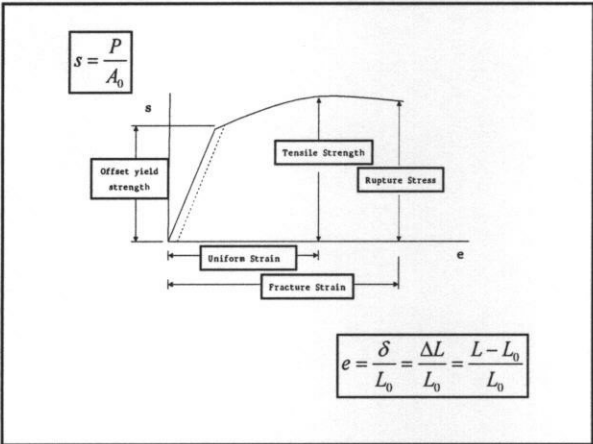


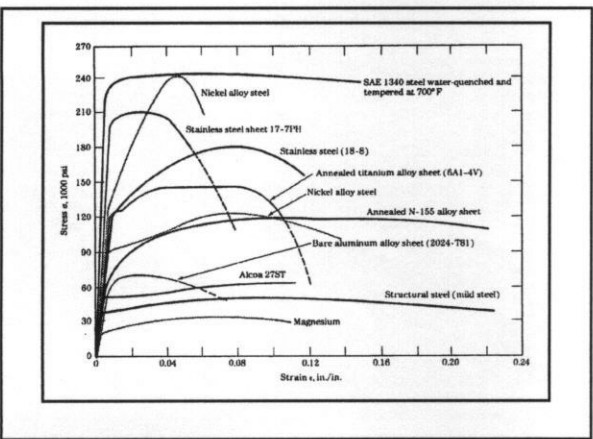






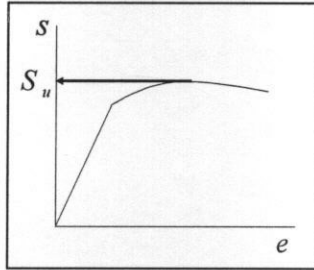






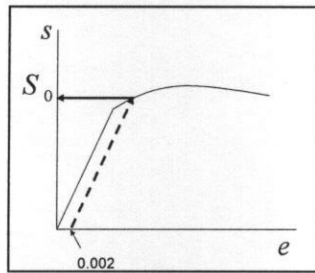
Tensile Strength (Ultimate Tensile Stress) (s_u)

$$S_u = \frac{P_{\max}}{A_0}$$



Yield Strength (s_0)

$$S_0 = \frac{P_{@strain=0.002}}{A_0}$$



Elongation (e_f)

ความยาวชิ้นงานที่ขาดแล้ว - ความยาวชิ้นงานก่อนทดสอบ
 ความยาวชิ้นงานก่อนทดสอบ

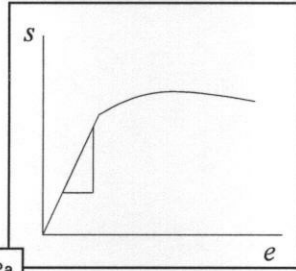
$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

*รวมความยาวที่เกิดขึ้นจาก necking เข้าไปด้วย ดังนั้น จึงควรรายงาน gage length ร่วมกับผลการทดสอบแรงดึง

Modulus of Elasticity (E)

$$E = \frac{s}{e}$$

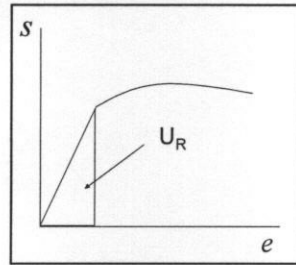
i.e. Carbon Steel = 207 GPa
Al alloys = 72 GPa



Resilience (U_R)

พื้นที่ใต้กราฟบริเวณ Elastic

$$U_R = \frac{1}{2}se$$



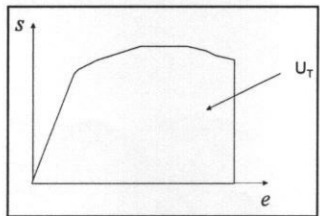
Toughness (U_T)

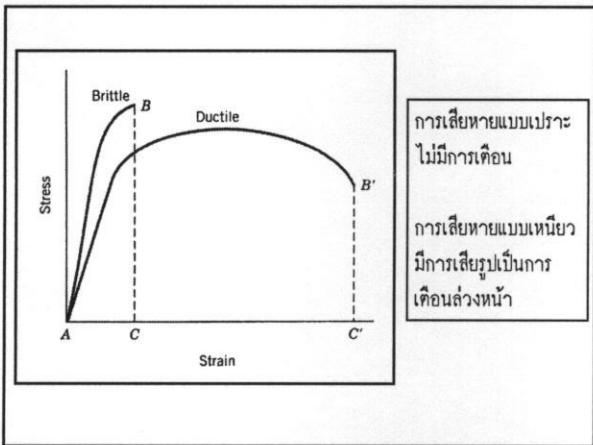
$U_T =$ พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

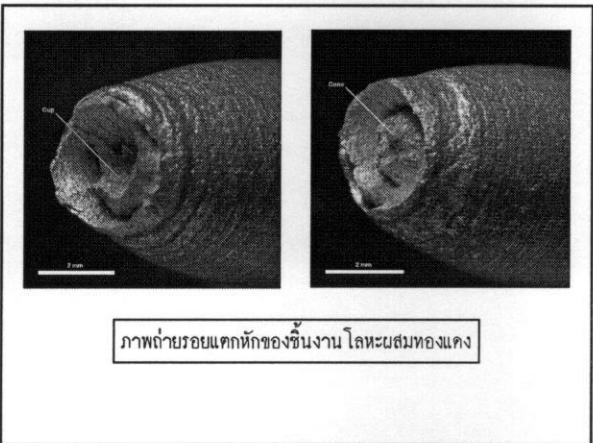
$$U_T \approx s_u e_f$$

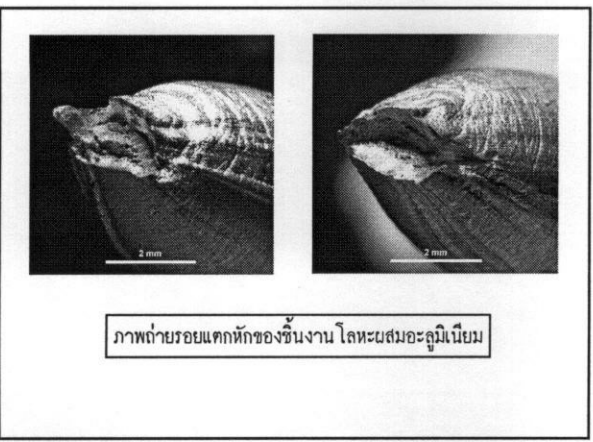
$$\approx \frac{s_0 + s_u e_f}{2}$$

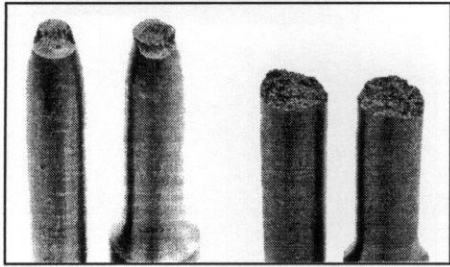
$$\approx \frac{2}{3} s_u e_f$$





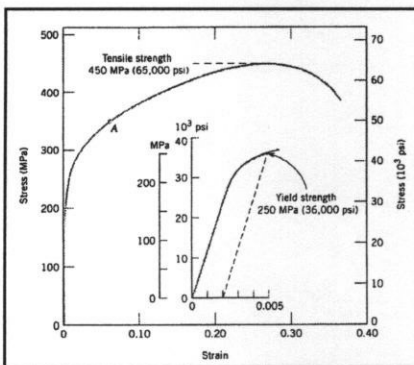






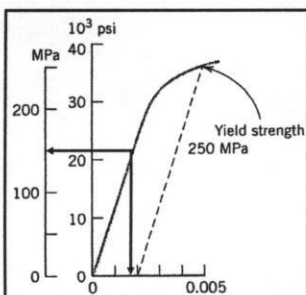
ภาพถ่ายรอยแตกหักแบบเหนียวเทียบกับแบบเปราะ

ตัวอย่าง



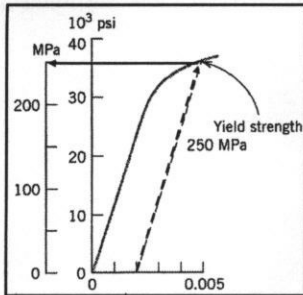
a) Modulus of Elasticity

$E = \text{slope}$ ในช่วง elastic



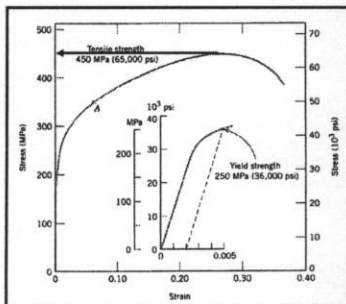
$$E = \frac{(150 - 0) \text{ MPa}}{0.0016 - 0} = 93.8 \text{ GPa}$$

b) Yield Strength at a strain offset 0.002



$$S_0 = 250 \text{ MPa}$$

c) Maximum load for cylindrical rod with $\varnothing = 12.8 \text{ mm}$



פירוק
 $UTS = 450 \text{ MPa}$

$$s = \frac{F}{A_0}$$

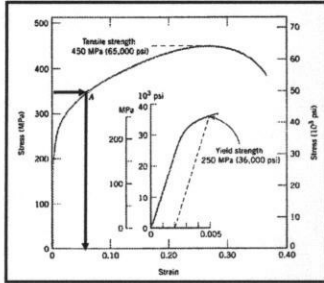
$$F = sA_0$$

$$= \left(450 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \right) \left(\frac{12.8 \times 10^{-3} m}{2} \right)^2 \pi$$

$$= 57,900 N$$

Maximum load for cylindrical rod
 (with $\varnothing = 12.8 \text{ mm}$) $\approx 58 \text{ kN}$

d) The change in length of a specimen with $L_0 = 250$ mm that is subjected to a tensile stress of 345 MPa



Strain at
345 MPa = 0.06
 $\Delta l = e l_0$
= (0.06)(250mm)
= 15mm

ความแข็ง (Hardness)

การวัดความแข็งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

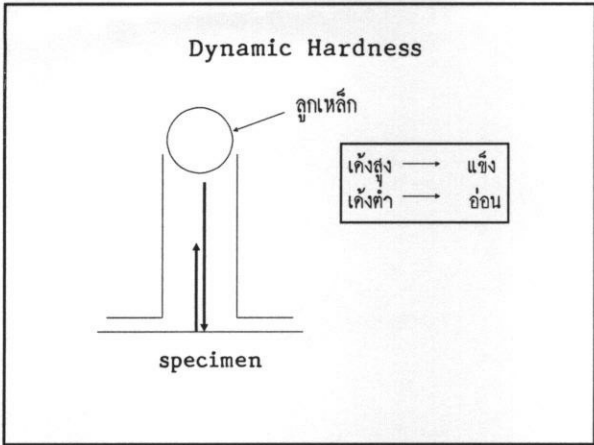
1. Scratch hardness
2. Indentation hardness
3. Dynamic or Rebound hardness

*การวัดความแข็งของโลหะส่วนใหญ่เป็น indentation hardness

Moh's Hardness

หลักการ
ของที่แข็งกว่าเมื่อขีด
บนของที่อ่อนกว่าจะ
ทำให้ของที่อ่อนกว่า
เป็นรอย

Diamond	10	
Corundum	9	
Topaz	8	Martensite
Quartz	7	Hard Metals
Feldspar	6	
Apatite	5	
Fluorite	4	Annealed copper
Calcite	3	
Gypsum	2	
Talc	1	



Indentation Hardness

หลักการ
เมื่อวัสดุถูกกดด้วยแรง วัสดุที่อ่อนกว่าจะเกิดรอยกดที่ใหญ่กว่าวัสดุที่แข็งกว่า

ประเภทของ indentation hardness

- Brinell Hardness
- Vicker Hardness
- Rockwell Hardness

Brinell Hardness

BHN = Load/surface area of indentation

$$= \frac{P}{\pi(D/2)(D-\sqrt{D^2-d^2})} = \frac{P}{\pi Dt}$$

ข้อดีของ Brinell hardness

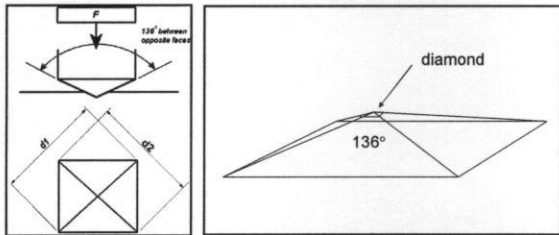
- ความขรุขระและรอยขีดข่วนมีผลต่อค่าความแข็งที่ได้น้อย
- พื้นที่ทดสอบขนาดใหญ่ ค่าที่ได้เป็นการเฉลี่ยความแข็งของหลายเฟสในบริเวณทดสอบ

ข้อด้อยของ Brinell hardness

- เมื่อต้องการเปรียบเทียบผลการทดลองกัน จะต้องรักษามุมของการกดให้เท่ากัน ซึ่งทำได้โดยการ ใช้ load เท่ากัน แต่หากต้องการเปรียบเทียบความแข็งระหว่างวัสดุที่ความแข็งต่างกันมาก อาจไม่สามารถใช้ load เท่ากันได้ จึงต้องรักษา P/D^2 ให้เท่ากันตลอดทุกการทดลอง

Vickers Hardness

$$\begin{aligned} \text{VHN} &= \text{Load/surface area of indentation} \\ &= \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2} \end{aligned}$$



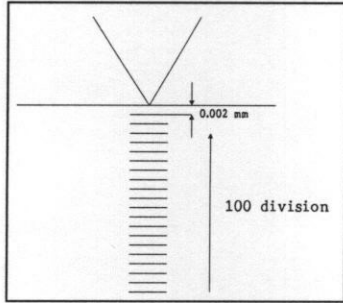
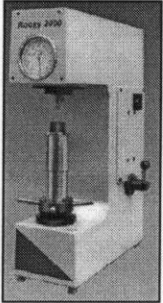
ข้อดีของ Vickers hardness

- สามารถทดสอบ โลหะที่มีความแข็งต่างกันมาก ได้โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนหัวกด
- เมื่อเปลี่ยน load สามารถนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากรอยกดที่เกิดจากพีระมิดมี geometry เหมือนกันไม่ว่าจะมีขนาดแค่ไหน

ข้อด้อยของ Vickers hardness

- อารแปรผลคลาดเคลื่อน ได้ง่ายเนื่องจากการวัดความยาวของเส้นแวงมุมขึ้นอยู่กับผู้วัด และสำหรับวัสดุบางประเภทรอยกดที่ได้เบี่ยงเบน ไปจากรอยกดที่สมบูรณ์
- พื้นที่ที่ทำการวัดความแข็งมีขนาดเล็ก ทำให้ค่าความแข็งขึ้นอยู่กัฟอสในแค่ละบริเวณ ซึ่งอาจไม่ใช่ตัวแทนของค่าความแข็งทั้งชิ้นงาน

Rockwell Hardness

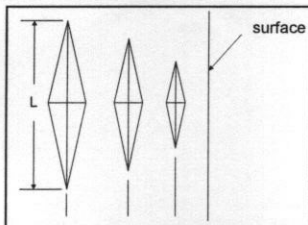
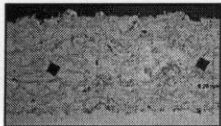


- ค่าความแข็ง Rockwell ต้องบอก Load ด้วย
- ผิวสัมผัสต้องตั้งฉากและสะอาดปราศจากน้ำมันหรือ oxides
- ถ้าพื้นผิวที่ทดสอบเป็นผิว โคงค่า ได้ที่จะคลาดเคลื่อน
- ระยะความห่างของจุดทดสอบแต่ละจุดควรห่างกันเกิน 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด
- ความลึกของรอยกดควรมีค่าไม่เกิน 15% ของความหนาชิ้นงานทดสอบ
- ไม่สามารถใช้ทดสอบกับตัวอย่างขนาดเล็กที่ mount กับ bakelite ได้
- ความเร็วในการให้ load ควรปรับให้เท่ากันทุกครั้ง

Microhardness

$$\text{KHN} = \frac{\text{Load/unrecovered projected area}}{L^2C}$$

$$= \frac{P}{A_p} = \frac{P}{L^2C}$$

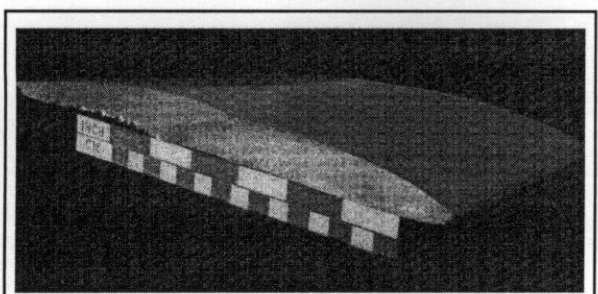


Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formula for hardness number
		Side view	Top view		
Bridgman	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = \frac{1.72P}{d^2}$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = \frac{14.2P}{d^2}$
Rockwell	Diamond cone			60 kg 100 kg 150 kg	$R_{60} =$ $R_{100} =$ $R_{150} =$
	1/8-in-diameter steel sphere			100 kg 60 kg 150 kg 100 kg	$R_{100} =$ $R_{60} =$ $R_{150} =$ $R_{100} =$
	1-in-diameter steel sphere			100 kg	$R_{100} =$

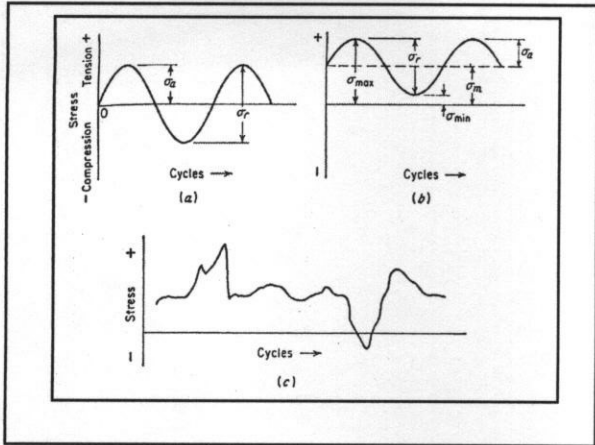
Source: Alter H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulf, "The Structure and Properties of Materials," vol. II, Wiley, 1965, p. 12.

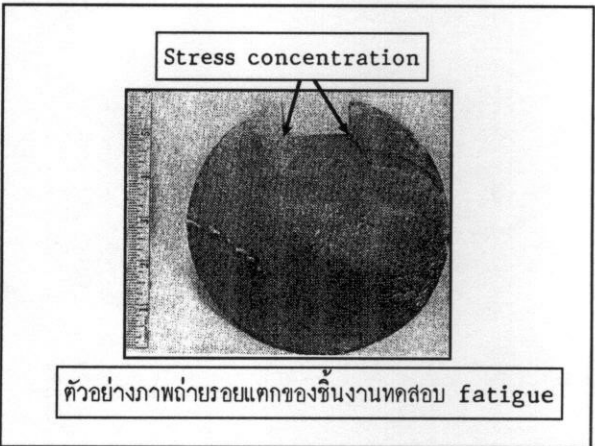
ความล้า (Fatigue)

- เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้โลหะเสียหายที่ความเค้นต่ำกว่า ultimate tensile strength โดยการได้รับความเค้นในแบบ วัฏจักร (cyclic stress) เป็นระยะเวลานาน
- ระยะเวลาที่ทำให้โลหะเกิดความเสียหายนั้นเป็นจำนวน cycle ของ stress เรียกว่า "Fatigue Life"
- ชิ้นส่วนที่ใ้รับ cyclic stress ยกตัวอย่างเช่น เพลารถยนต์, ปีกเครื่องบิน เป็นต้น



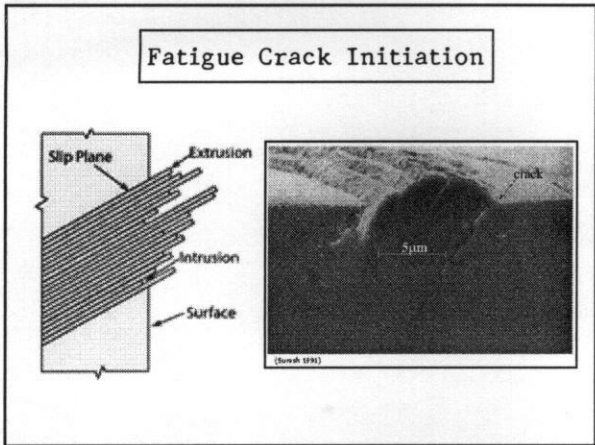
ปีกเครื่องบินรับแรงคั่นซ้ำ ๆ ไปมาขณะใช้งาน → ล้า

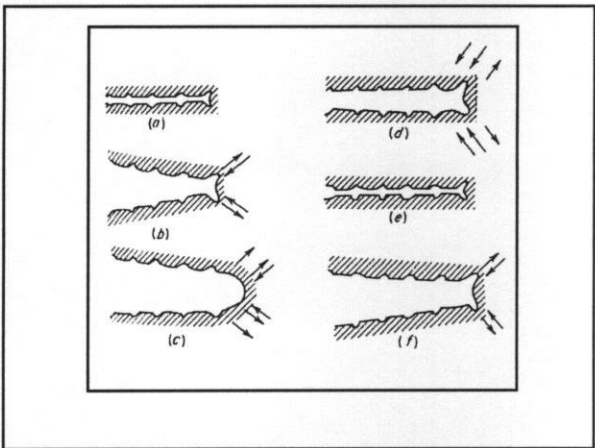


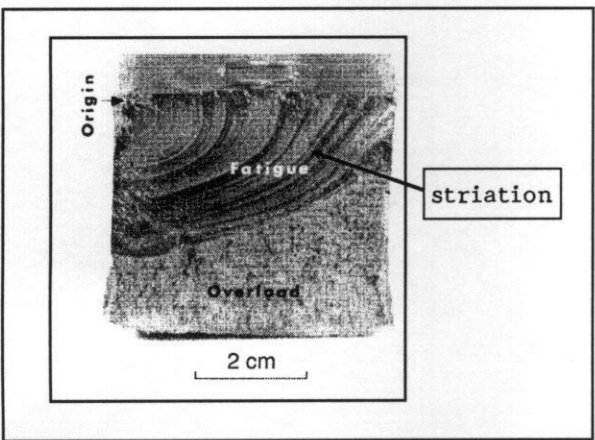


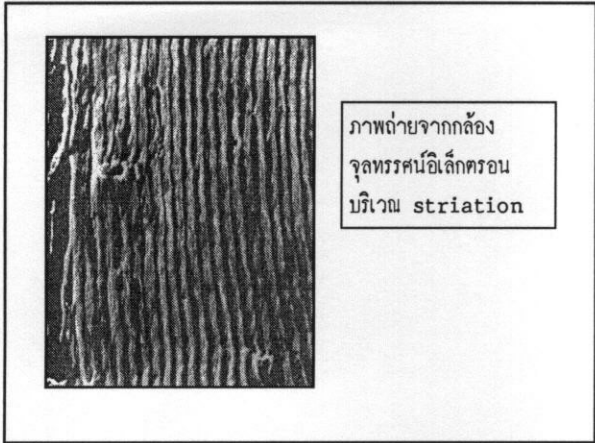
กลไกของ fatigue

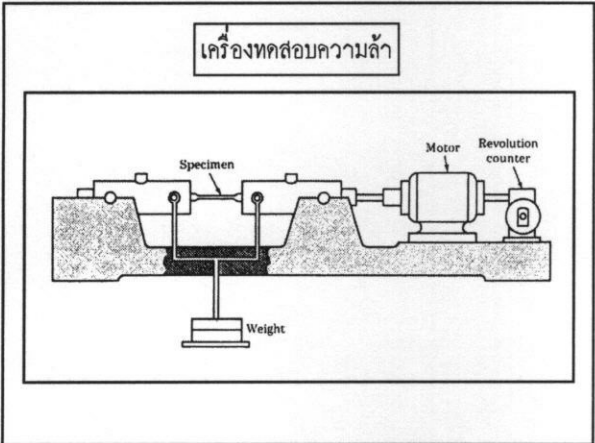
- เมื่อชิ้นส่วนได้รับ cyclic stress รอยแตกจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นส่วน โดยจะเกิดบริเวณที่มี stress concentration เช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างฉับพลันหรือรอบ ๆ สิ่งปนเปื้อนในเนื้อโลหะและเริ่มขยายตัวไปเรื่อย ๆ ในช่วงนี้จะทำให้เกิดรอยคล้าย beach mark บนผิวรอยแตก เรียกว่า "striation" ในช่วงนี้การขยายตัวของรอยแตกเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ
- เมื่อรอยแตกขยายตัวไปเรื่อย ๆ จนทำให้พื้นที่หน้าตัดที่เหลือไม่สามารถรับ stress ต่อไปได้ก็จะเกิดการแตกแบบฉับพลันทันที







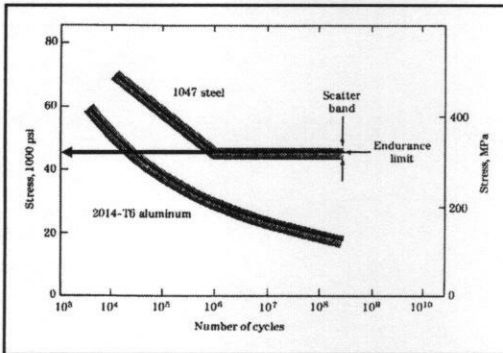






S-N curve

- สร้างโดยการนำชิ้นงานโลหะมาทดสอบที่ cyclic stress ขนาดต่าง ๆ กัน แล้วนับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการแตกหัก
- นำค่า cyclic stress และจำนวนรอบมา plot บน graph
- Cyclic stress ↑ → จำนวนรอบ ↓
- Cyclic stress ↓ → จำนวนรอบ ↑



- สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กเมื่อค่า cyclic stress ต่ำกว่าค่าค่าหนึ่งจะสามารถใช้งานได้ไปตลอด โดยไม่มีการเสียหายเนื่องจากความล้า ค่า cyclic stress ค่านี้เรียกว่า "Endurance limit" หรือ "Fatigue limit"
- สำหรับโลหะนอกกลุ่มเหล็กส่วนใหญ่ (ยกเว้น Ti alloys) จะไม่ปรากฏ Endurance limit
- ค่า Endurance limit สามารถประมาณได้ คือ

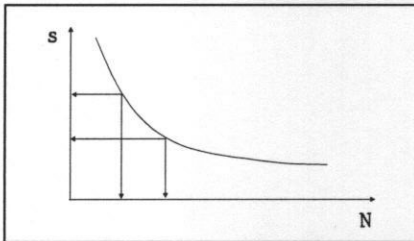
$$\text{Endurance limit} \approx \frac{1}{2} S_u$$

ปัจจัยที่มีผลต่อ fatigue

- ขนาดของ cyclic stress
- ความขรุขระของผิวโลหะ
- Residual stress และการชุบแข็งผิว
- สิ่งปนเปื้อน ในเนื้อโลหะ

ขนาดของ cyclic stress

- Cyclic stress ↓ → ↓ fatigue life
- Cyclic stress ↑ → ↑ fatigue life



ความขรุขระของผิว

Table 12-3 Fatigue life of SAE 3130 steel specimens tested under completely reversed stress at 655 MPa†

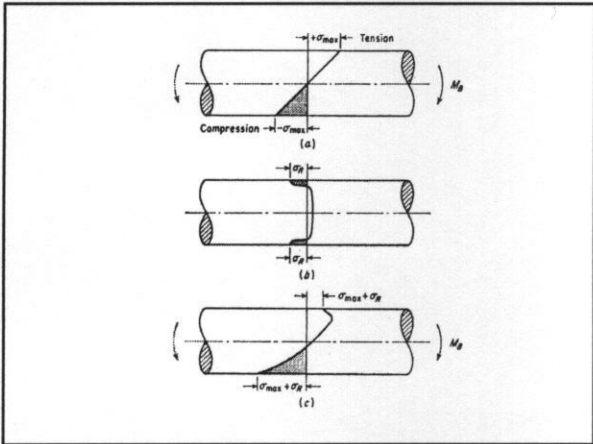
Type of finish	Surface roughness, μm	Median fatigue life, cycles
Lathe-formed	2.67	24,000
Partly hand-polished	0.15	91,000
Hand-polished	0.13	137,000
Ground	0.18	217,000
Ground and polished	0.05	234,000
Superfinished	0.18	212,000

† P. G. Fluck, *Am. Soc. Test. Mater. Proc.*, vol. 51, pp. 584-592, 1951.

พื้นผิวเรียบ ↑ → ↓ fatigue life

Residual stress และการชุบแข็งผิว

- Compressive residual stress ช่วยในการหักล้าง tensile stress ที่ผิวทำให้ขนาดของ cyclic stress ลดลง ในทางปฏิบัติสามารถสร้าง compressive residual stress ได้โดยการทำ shot peening โดยการยิงลูกเหล็กใส่ผิวโลหะเหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดเล็กหรือมีรูปร่างซับซ้อน หรืออีกวิธีหนึ่งคือ surface rolling
- การชุบแข็งผิวก็เปรียบเสมือนเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวของชิ้นงานทำให้สามารถต้านทาน cyclic stress ได้ดีขึ้น





สิ่งปนเปื้อนในเนื้อโลหะ

สิ่งปนเปื้อนในเนื้อโลหะ (Inclusion) ทำหน้าที่เป็น stress riser หรือ stress concentration ทำให้เป็นจุดกำเนิดการเสียหายแบบเนื่องจากความล้า ดังนั้นในขั้นตอนการผลิตจึงควรพยายามลดสิ่งปนเปื้อนให้มากที่สุด

ความคืบ (Creep)

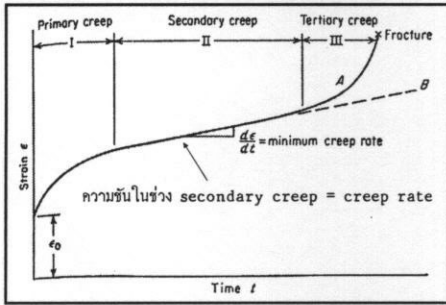
- เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้โลหะเสียหายด้วยความเค้นที่ต่ำกว่า ultimate tensile strength เมื่อโลหะได้รับแรงที่อุณหภูมิสูง ($>0.5 T_m$) เป็นเวลานาน
- ชิ้นส่วนโลหะที่ถูกนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานมีความเสี่ยงต่อความคืบ เช่น gas turbine blade เป็นต้น

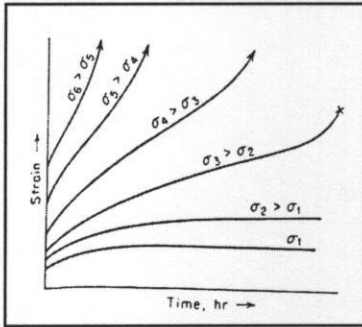
Creep แบ่งออกเป็น 3 ช่วง

- Primary creep
- Secondary creep
- Tertiary creep

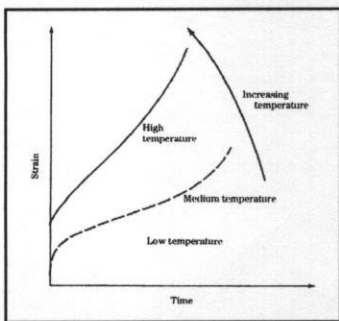
← เป็นช่วงที่ชิ้นส่วนมีการบิดตัวด้วยอัตราค่าที่สูงสุดและอัตรามีค่าคงที่

Creep curve





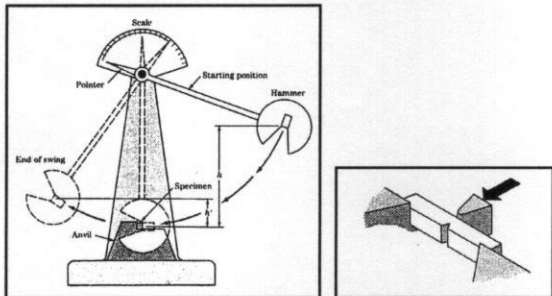
stress ↑ → creep rate ↑

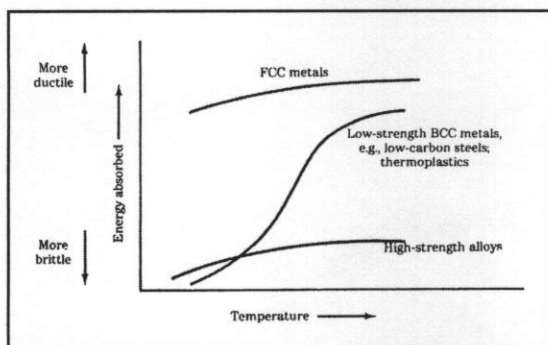


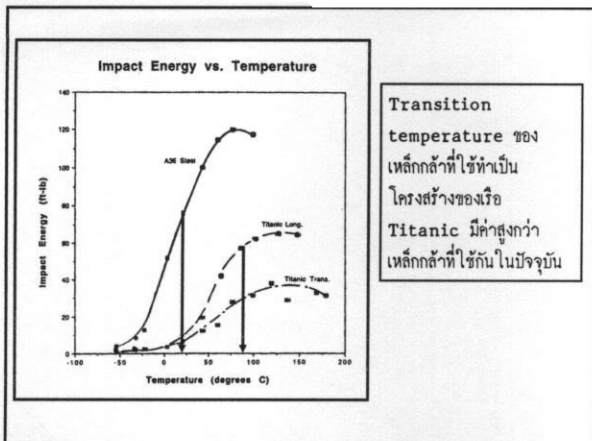
T ↑ → creep rate ↑

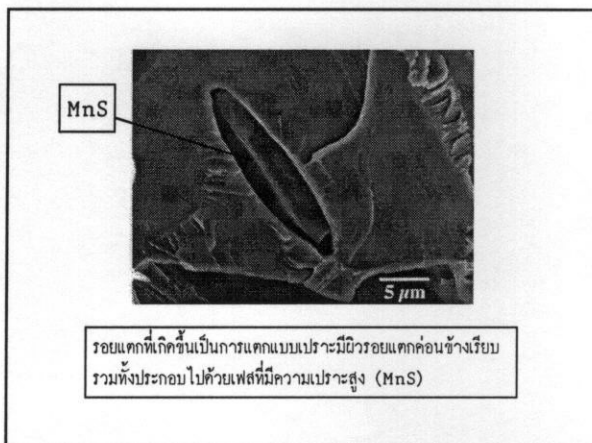
- เลือกใช้วัสดุที่มีสมบัติพิเศษที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิได้คือ เช่น โลหะผสม Ni-based alloys ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเฟสที่มีจุดหลอมตัวสูง
- หลีกเลี่ยงการนำโลหะที่มี creep rate สูงไปใช้ที่อุณหภูมิสูง

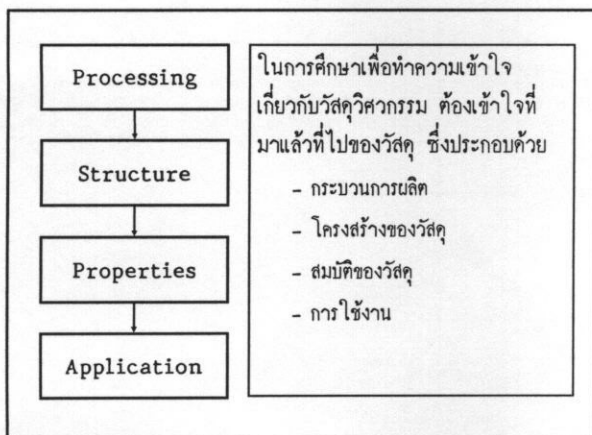
ความต้านทานแรงกระแทก
(Impact resistance)



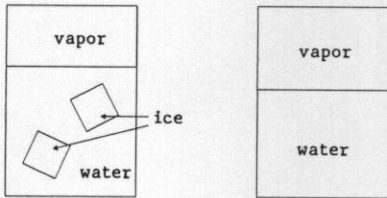








บทที่ 2
แผนภูมิสมดุลของโลหะผสม

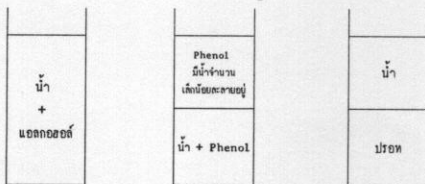


Definition

Phase : "a physically homogeneous and distinct portion of a material system"

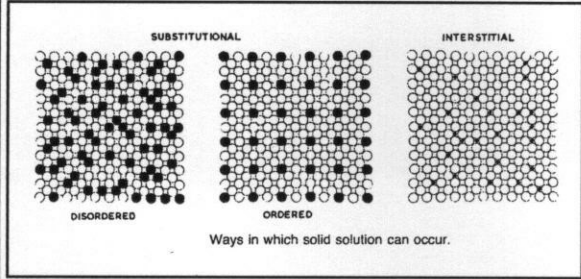
เฟส : ส่วนหนึ่งในวัสดุที่มีลักษณะทางกายภาพที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและแตกต่างจากบริเวณอื่น

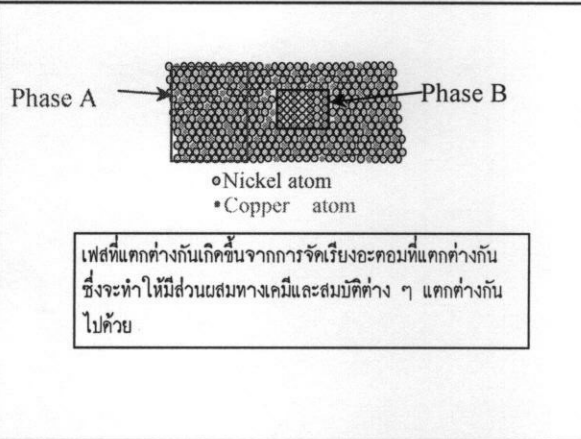
Liquid Solution



1 phase Complete soluble 2 Phases Partial soluble 2 phases Complete Insoluble

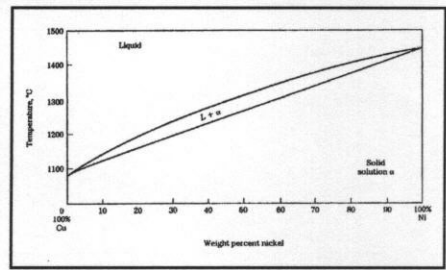
เมื่อ โลหะมากกว่าหนึ่งชนิดผสมกัน

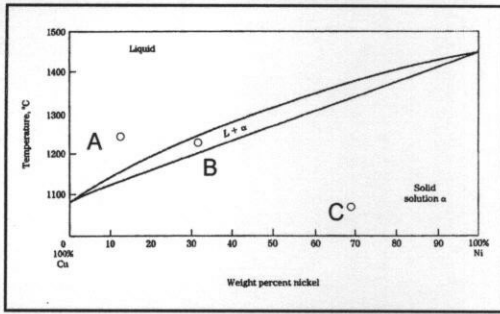




Isomorphous Binary Phase Diagram

โลหะผสมบางระบบธาตุทั้งสองสามารถละลายในกันและกันได้หมดตลอดทุกส่วนผสม ทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง



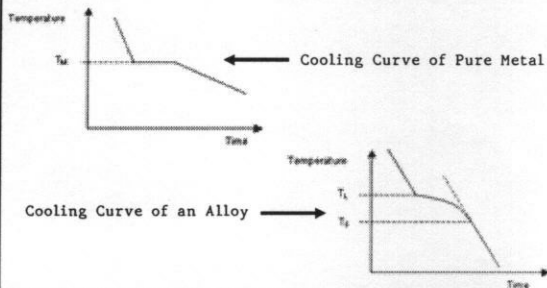


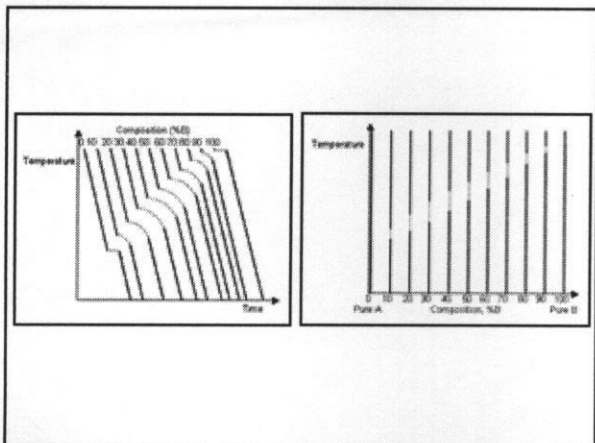
ที่จุด A เป็นของเหลวทั้งหมด ที่จุด C เป็นของแข็งทั้งหมด
 ที่จุด B เป็นของผสมระหว่างของแข็งและของเหลว

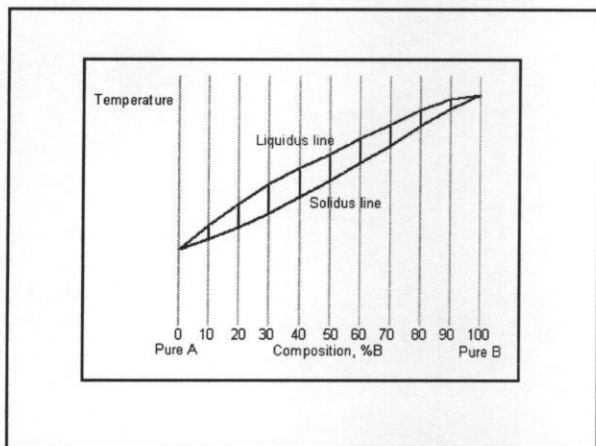
แผนภูมิสมมูลส่วนใหญ่ที่ปรากฏในตำราและวารสารทางด้าน
 วิทยาศาสตร์นั้นมักจะเป็นแผนภูมิสมมูลระหว่างอุณหภูมิและส่วนผสม
 ทางเคมี โดยจะให้ความดันคงที่ (โดยทั่วไป 1 atm) ดังนั้น
 สำหรับแผนภูมิสมมูลที่มีความดันคงที่ Gibbs phase rule
 จะเปลี่ยนเป็น

$$P + F = C + 1$$

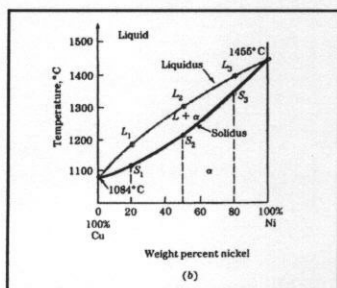
การสร้างแผนภูมิสมมูล



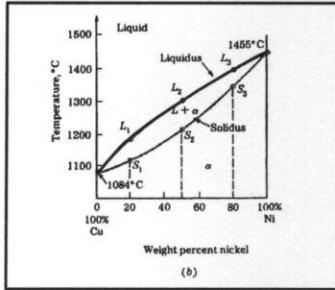




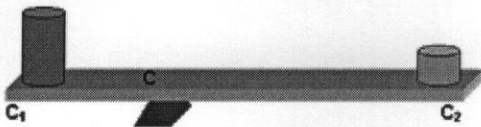
Solidus line คือเส้นที่แบ่งบริเวณที่ประกอบด้วยเฟสของแข็งอย่าง
เดียวออกจากบริเวณอื่น



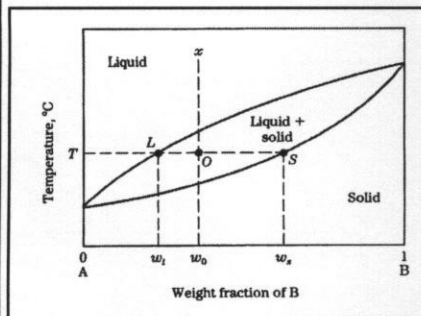
Liquidus line คือเส้นที่แบ่งบริเวณที่ประกอบด้วยเฟสของเหลวอย่าง
เดียวออกจากบริเวณอื่น



Lever arm rule



ที่สมดุลน้ำหนักที่ปลายคานาด้านหนึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวของคานา
ด้านตรงกันข้ามหารด้วยความยาวของคานาทั้งหมด



$$X_S = \frac{w_0 - w_L}{w_S - w_L}$$

$$X_L = \frac{w_S - w_0}{w_S - w_L}$$

ตัวอย่าง

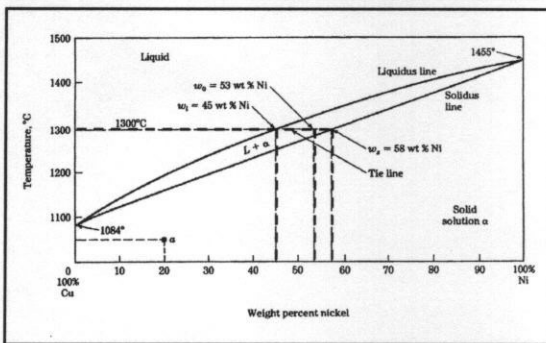
จงคำนวณหาปริมาณเฟสของแข็งและของเหลวของโลหะผสม 53% Ni-Cu ที่อุณหภูมิ 1300 °C

จาก

$$X_S = \frac{w_0 - w_L}{w_S - w_L} \quad X_L = \frac{w_S - w_0}{w_S - w_L}$$

โจทย์กำหนดให้ $w_0 = 53\%Ni$

สิ่งที่ต้องทราบเพื่อใช้ในการคำนวณคือ w_S และ w_L ที่ 1300 °C



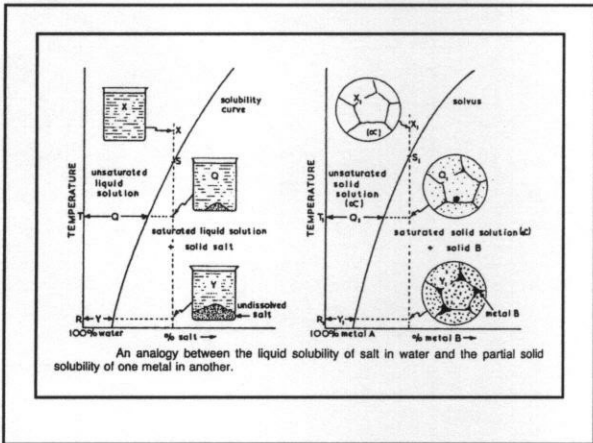
จาก phase diagram

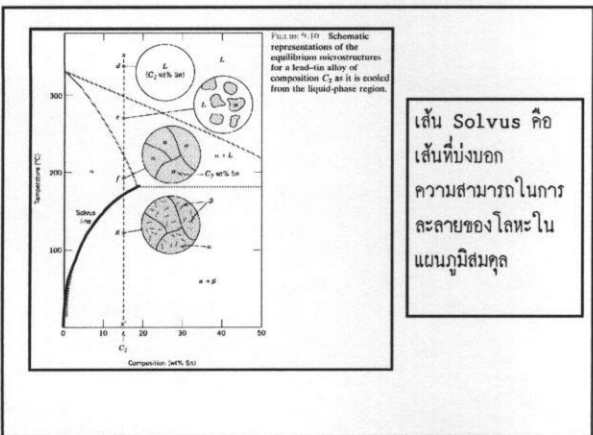
อ่านค่า w_S และ w_L ได้เท่ากับ 58%Ni และ 45%Ni ตามลำดับ

$$\begin{aligned} X_S &= \frac{w_0 - w_L}{w_S - w_L} & X_L &= \frac{w_S - w_0}{w_S - w_L} \\ &= \frac{53 - 45}{58 - 45} & &= \frac{58 - 53}{58 - 45} \\ &= 0.615 & &= 0.385 \end{aligned}$$

ตอบ มีเฟสของแข็ง 61.5% และมีเฟสของเหลวอยู่ 38.5% โดยน้ำหนัก

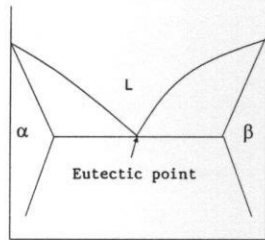
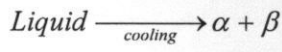
โลหะต่างชนิดกันอาจจะไม่สามารถละลายกันได้ในสภาพของแข็งทั้งหมด เปรียบเหมือนการที่เกลือสามารถละลายในน้ำได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้บางส่วนของเกลือตกผลึกออกมาจากสารละลาย (น้ำเกลือ) กลายเป็นของแข็ง การที่เกลือจะละลายในน้ำได้มากหรือน้อยเรียกว่าความสามารถในการละลาย (Solubility)





เส้น Solvus คือเส้นที่บ่งบอกความสามารถในการละลายของโลหะในแผนภูมิสมดุล

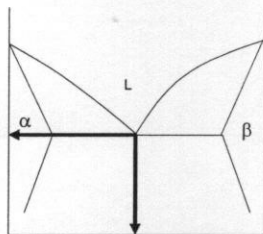
Binary Eutectic Alloys System



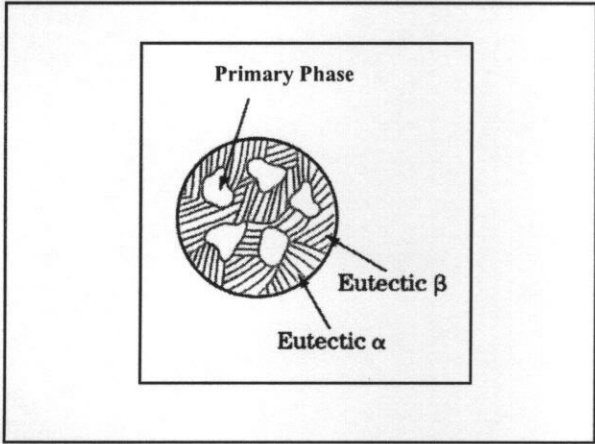
คำศัพท์ที่ควรรวม

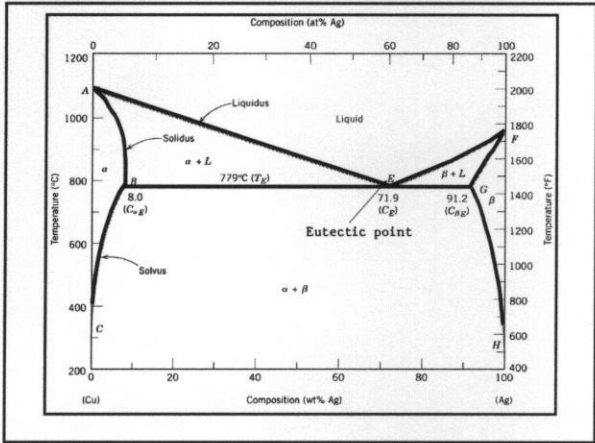
- Eutectic temperature คืออุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา eutectic
- Eutectic composition คือส่วนผสมทางเคมีที่ปฏิกิริยา eutectic
- Eutectic Mixture คือผสมระหว่างเฟสหลายเฟสที่มีส่วนผสมไม่เท่ากันเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Eutectic มีลักษณะเป็นชั้นสลับไปมา ระหว่างแต่ละเฟส
- Primary Phase คือเฟสที่เกิดขึ้นจากการแข็งตัวก่อนที่ eutectic mixture จะเกิดที่อุณหภูมิ eutectic มีลักษณะเป็นเฟสแยกจาก eutectic mixture

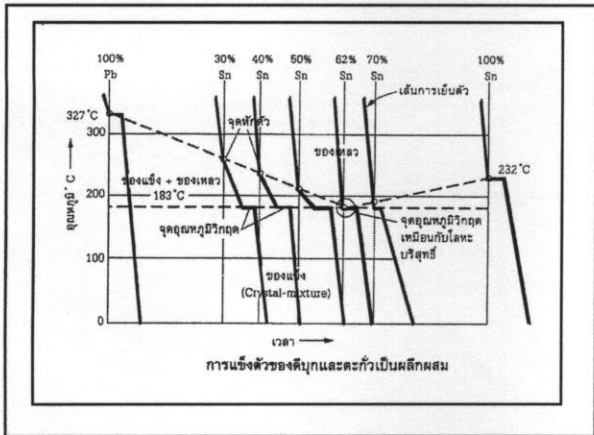
Eutectic temperature

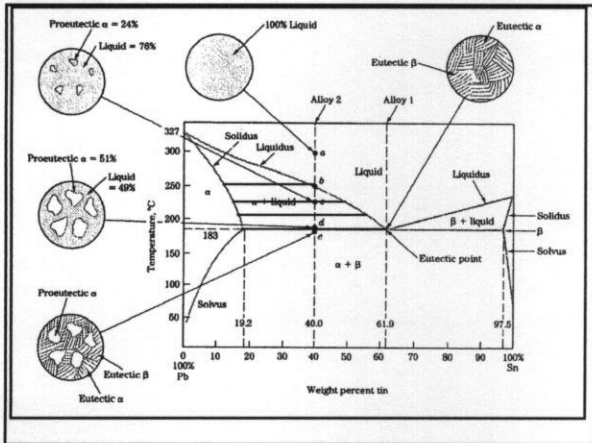


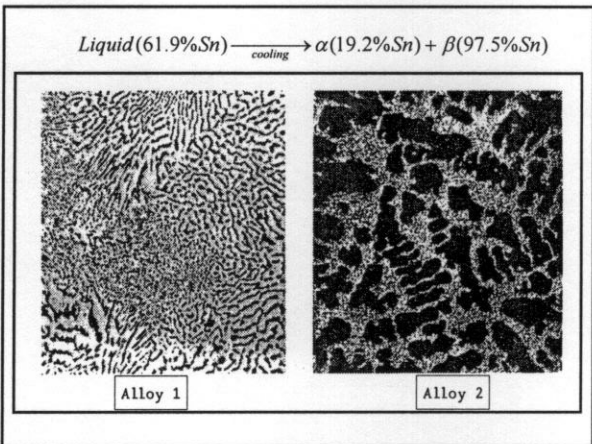
Eutectic composition











ตัวอย่าง

สำหรับโลหะผสม 61.9wt%Sn-Pb ที่ 183 °C

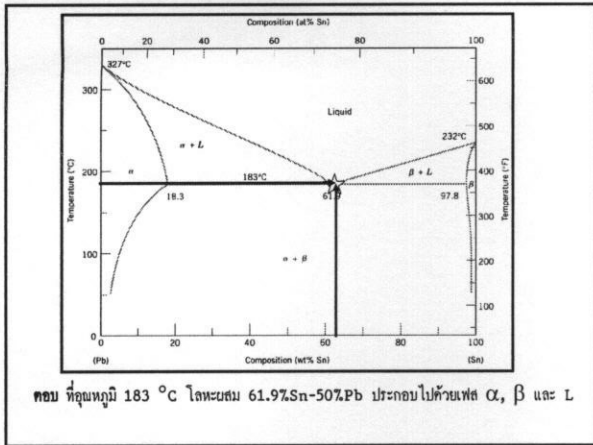
- ที่อุณหภูมินั้น โลหะผสมประกอบไปด้วยเฟสอะไรบ้าง?
- เฟสที่เกิดขึ้นมีส่วนผสมทางเคมีเท่ากันเท่าไร?
- จากข้อ a) จงคำนวณหาปริมาณเฟสที่เกิดขึ้น

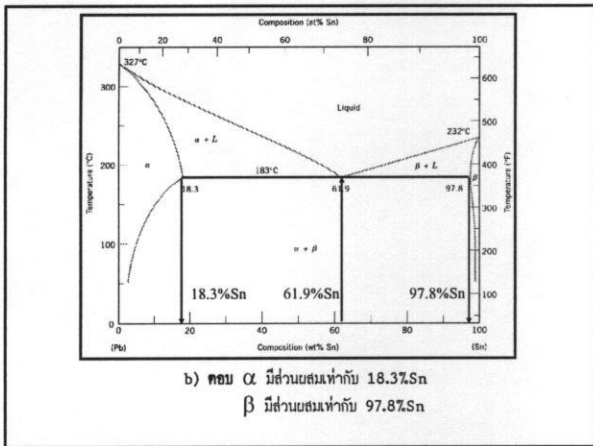
วิธีทำ

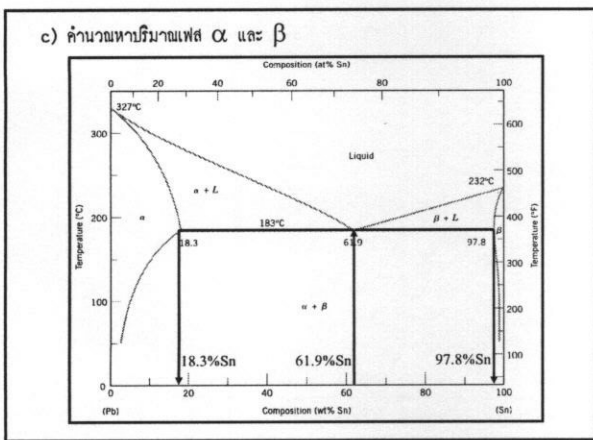
ข้อ a) โจทย์ต้องการทราบเฟสที่อุณหภูมิและส่วนสมนั้น วิธีทำให้นำค่าอุณหภูมิและส่วนสมที่โจทย์กำหนดไปอ่านในแผนภูมิสมดุลระหว่าง Sn-Pb

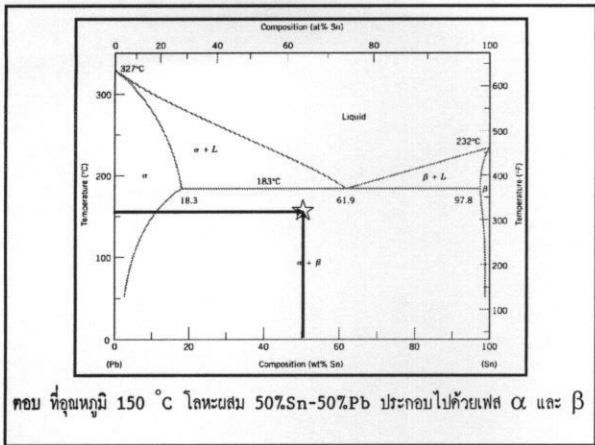
T = 183 °C

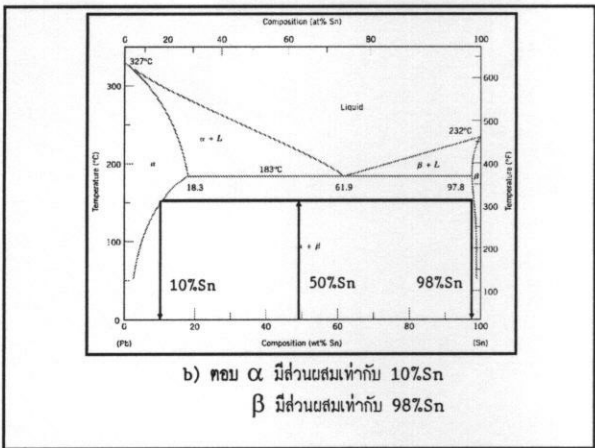
61.9wt%Sn-Pb

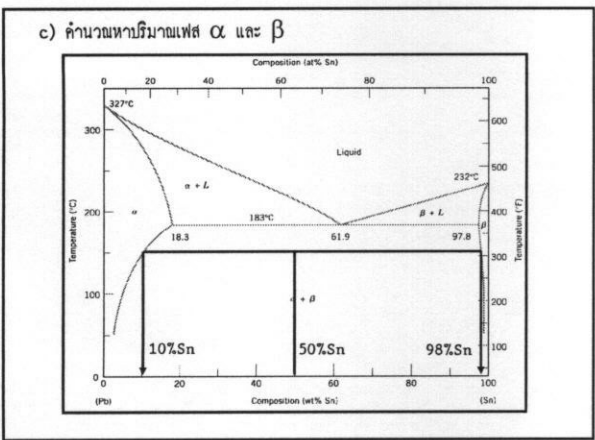










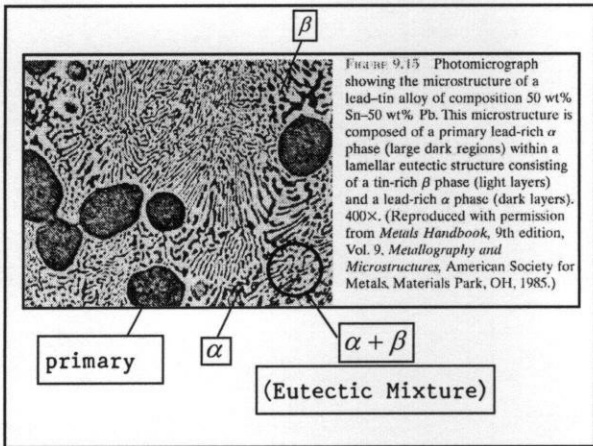


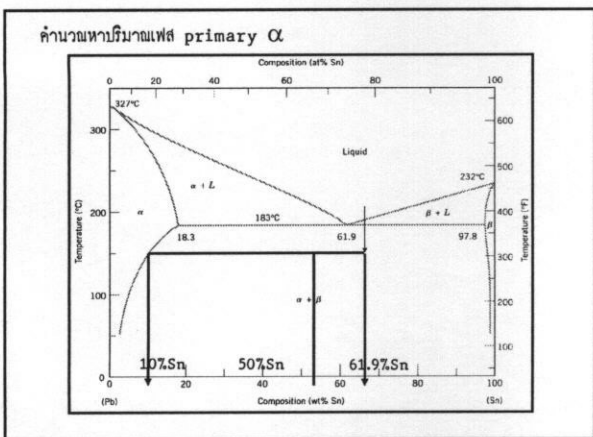
$$X_{\alpha} = \frac{w_{\beta} - w_0}{w_{\beta} - w_{\alpha}} \quad X_{\beta} = \frac{w_0 - w_{\alpha}}{w_{\beta} - w_{\alpha}}$$

$$= \frac{98 - 50}{98 - 10} \quad = \frac{50 - 10}{98 - 10}$$

$$= 0.55 \quad = 0.45$$

คอม มีเฟส α 55% และมีเฟส β อยู่ 45% โดยน้ำหนัก





$$X_{\alpha'} = \frac{X_E - X_0}{X_E - X_{\alpha}}$$

$$= \frac{61.9 - 50}{61.9 - 10}$$

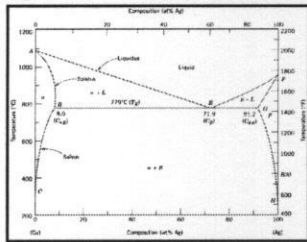
$$= 0.23$$

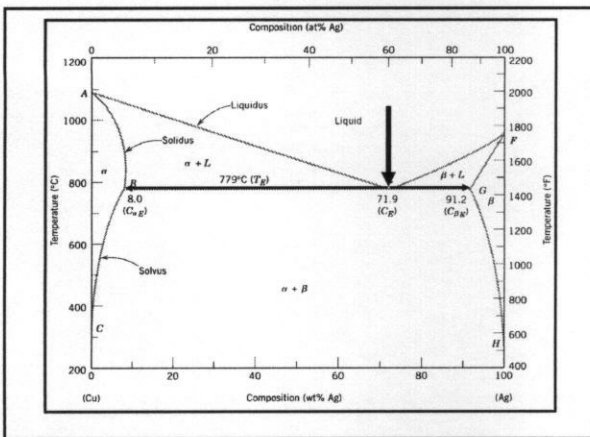
มีปริมาณเฟส primary α อยู่ 23% โดยน้ำหนัก
 และมี eutectic mixture อยู่ 77% โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง

จากแผนภูมิสมดุลของ Ag-Cu

- a) จงบอกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 779 °C
- b) สำหรับ 30%Ag-Cu คำนวณปริมาณเฟสแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C
- c) สำหรับ 90%Ag-Cu คำนวณปริมาณเฟสแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 850 °C

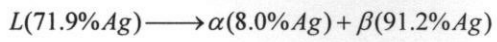


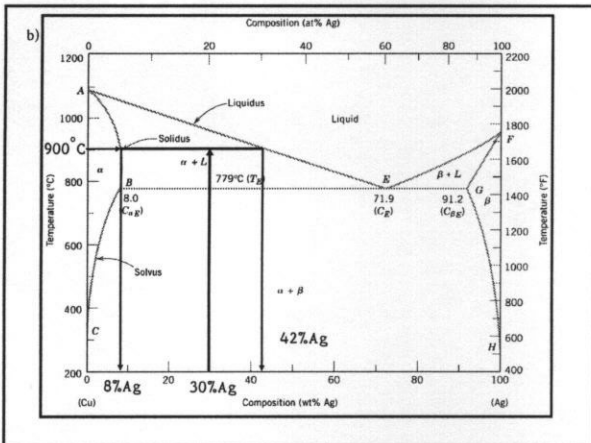


a) จงบอกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 779 °C

ตอบ

เกิดปฏิกิริยาโลหะผสมหลอมเหลวที่มีส่วนผสม 71.9%Ag แยกตัวให้สารละลายของแข็ง 2 ชนิดคือ α ที่มีส่วนผสม 8.0%Ag และ β ที่มีส่วนผสม 91.2%Ag



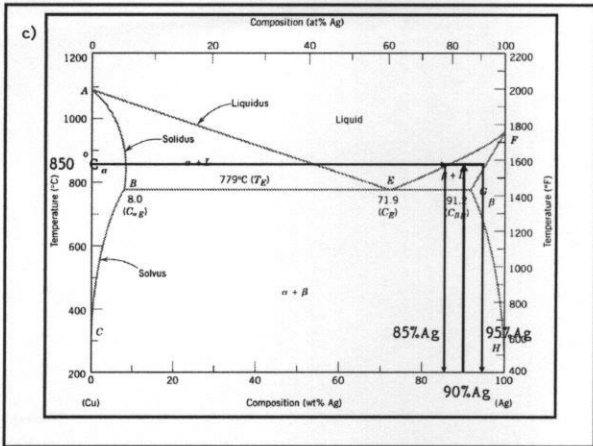


$$X_{\alpha} = \frac{w_L - w_0}{w_L - w_{\alpha}} \quad X_L = \frac{w_0 - w_{\alpha}}{w_L - w_{\alpha}}$$

$$= \frac{42 - 30}{42 - 8} \quad = \frac{30 - 8}{42 - 8}$$

$$= 0.35 \quad = 0.65$$

ตอบ มีเฟส α 35% และมีเฟส L อยู่ 65% โดยน้ำหนัก



$$X_L = \frac{w_\beta - w_0}{w_\beta - w_L} \quad X_\beta = \frac{w_0 - w_L}{w_\beta - w_L}$$

$$= \frac{95 - 90}{95 - 85} \quad = \frac{90 - 85}{95 - 85}$$

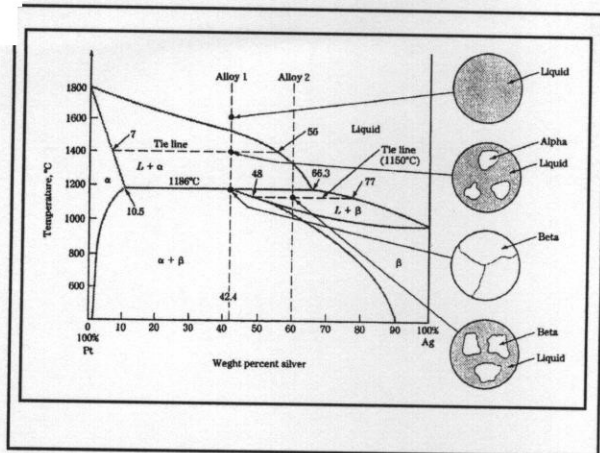
$$= 0.50 \quad = 0.50$$

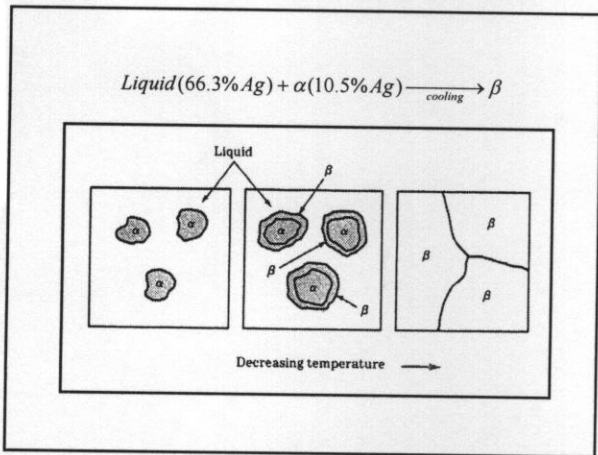
ทอง มีเฟส α 50% และมีเฟส L อยู่ 50% โดยน้ำหนัก

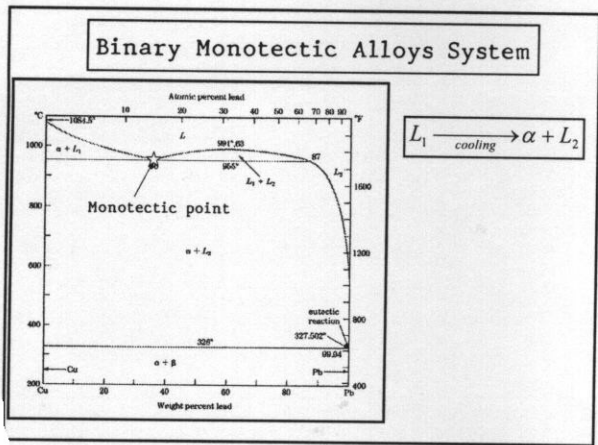
Binary Peritectic Alloys System

$Liquid + \alpha \xrightarrow{\text{cooling}} \beta$

Phase diagram illustrating the peritectic reaction: $Liquid + \alpha \xrightarrow{\text{cooling}} \beta$. The diagram shows the peritectic point and the resulting phases: α, β, L, α+L, α+β, and L+β.

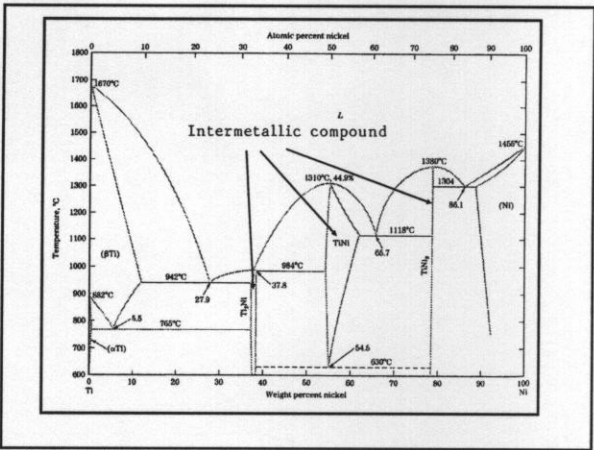






แผนภูมิสมมูลที่มีสารประกอบเชิงโลหะ

สารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound) เป็นสารประกอบของโลหะซึ่งมีสูตรโมเลกุลแน่นอน เช่น $(\text{CuAl}_2, \text{Ti}_2\text{Ni})$ เป็นต้น ส่วนใหญ่มีลักษณะแข็งและเปราะ เนื่องจากมีสูตรโมเลกุลที่แน่นอนจึงให้มีส่วนผสมทางเคมีคงที่และจะปรากฏในแผนภูมิสมมูลเป็นเส้นตรงในแนวดิ่ง อย่างไรก็ตาม สารประกอบเชิงโลหะบางชนิดก็มีช่วงในการละลายบ้างเช่นกัน และจะปรากฏในแผนภูมิสมมูลเป็นบริเวณแคบ ๆ



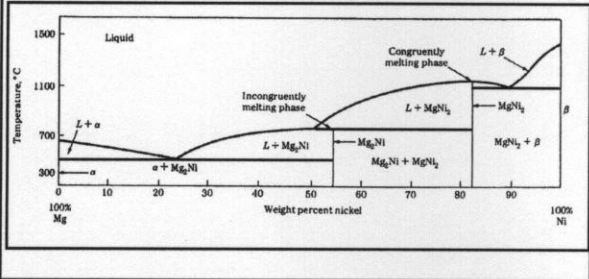
สรุป

Name of reaction	Equation	Phase-diagram characteristic
Eutec	$L \xrightarrow{\text{cooling}} \alpha + \beta$	
Eutec	$L \xrightarrow{\text{cooling}} \beta + \gamma$	
Peritec	$L \xrightarrow{\text{cooling}} \beta$	
Peritect	$L \xrightarrow{\text{cooling}} \gamma$	
Monotec	$L \xrightarrow{\text{cooling}} \alpha + L_2$	

ตัวอย่าง

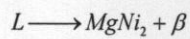
จรรยาบรรณปฏิกิริยาในแผนภูมิสมดุลระหว่าง Mg-Ni

- a) ที่ 1000 °C
- b) ที่ 710 °C
- c) ที่ 500 °C

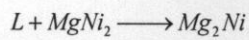


ตอบ ปฏิกิริยาในแผนภูมิสมดุลระหว่าง Mg-Ni

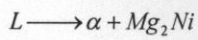
- a) ที่ 1000 °C ปฏิกิริยา eutectic



- b) ที่ 710 °C ปฏิกิริยา peritectic



- c) ที่ 500 °C ปฏิกิริยา eutectic



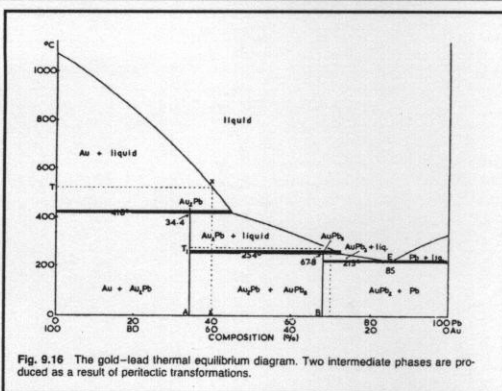
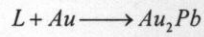
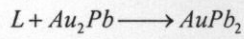


Fig. 9.16 The gold-lead thermal equilibrium diagram. Two intermediate phases are produced as a result of peritectic transformations.

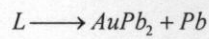
ปฏิกิริยาในแผนภูมิสมดุระหว่าง Pb-Au
 a) ที่ 418 °C ปฏิกิริยา peritectic



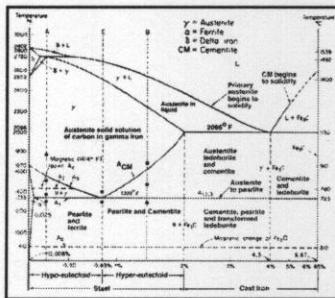
b) ที่ 254 °C ปฏิกิริยา peritectic

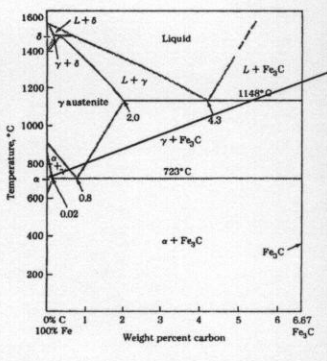


c) ที่ 215 °C ปฏิกิริยา eutectic

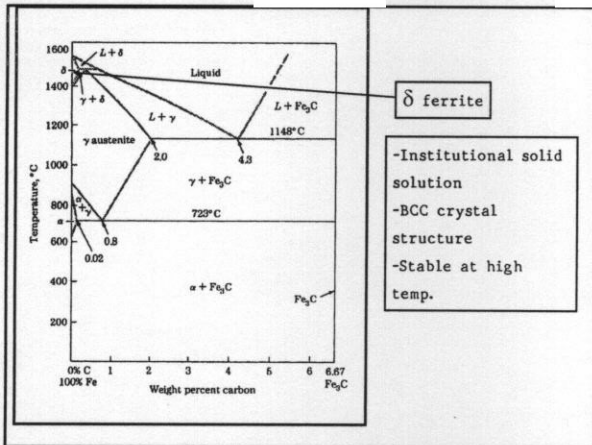


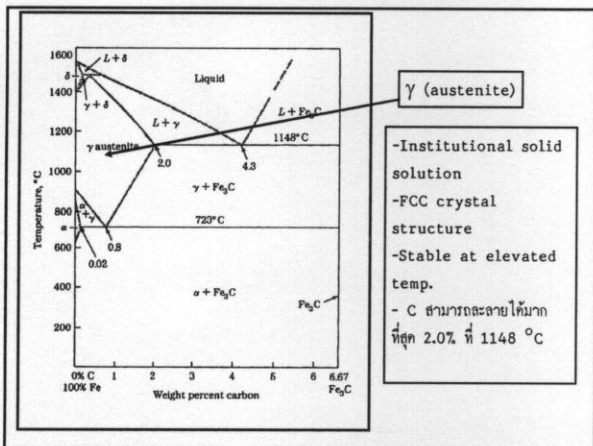
บทที่ 3
 แผนภูมิของเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์

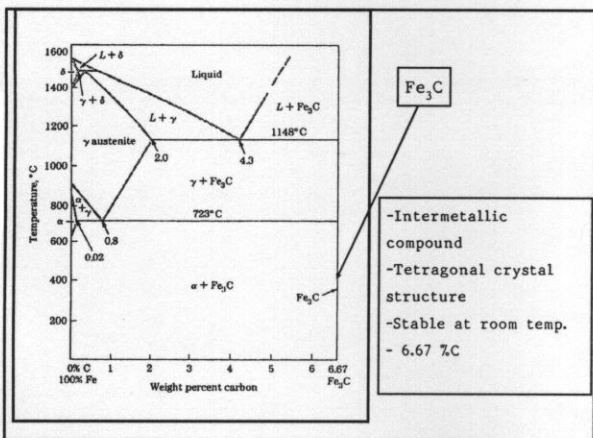


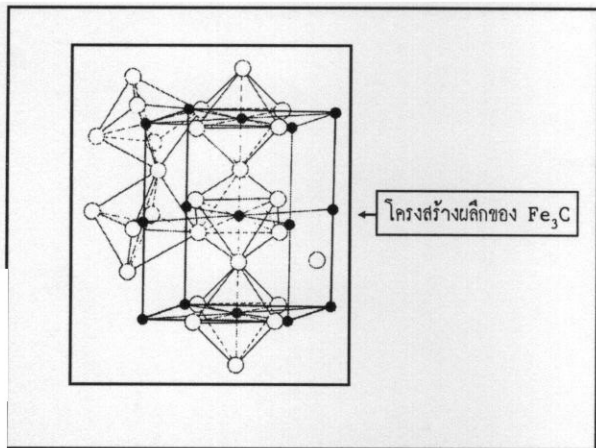


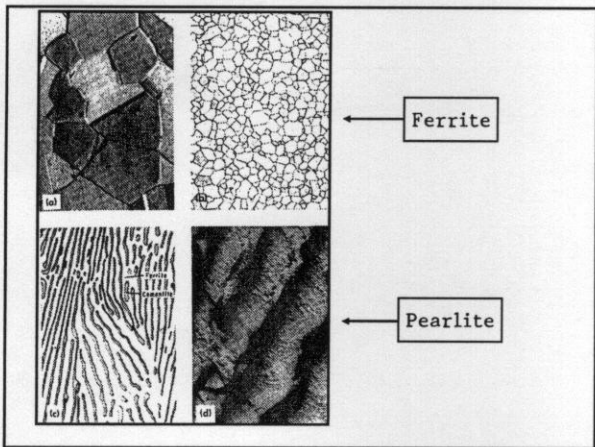
α ferrite
 -Institutional solid solution
 -BCC crystal structure
 -Stable at room temp.
 - C สามารถละลายได้มากที่สุด 0.025% ที่ 723 °C

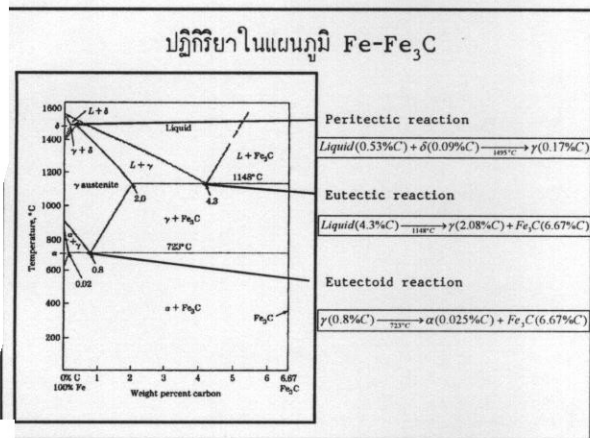


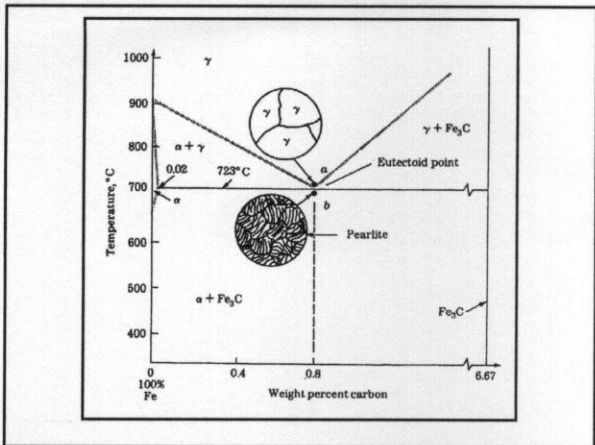


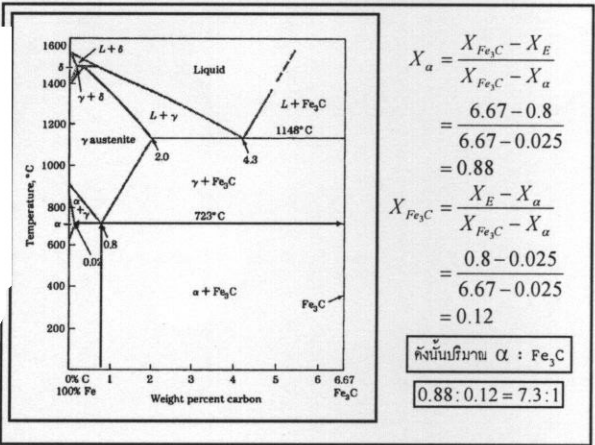


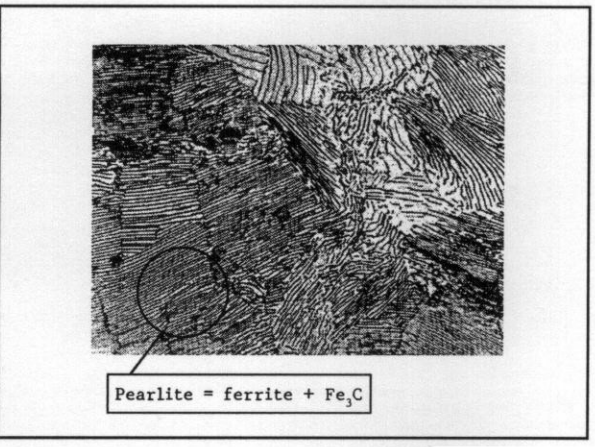


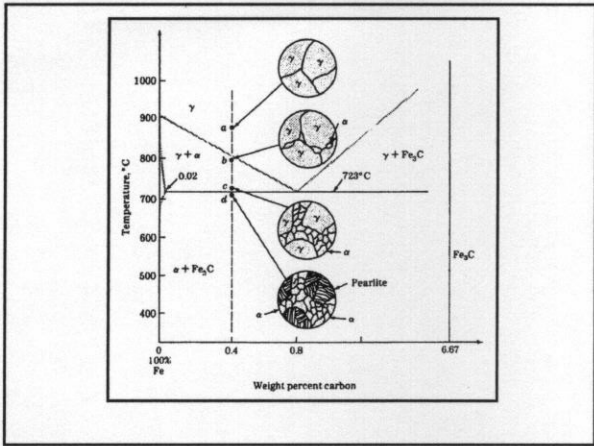


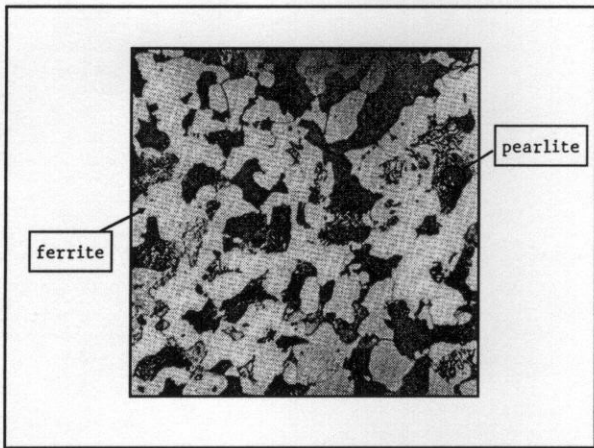


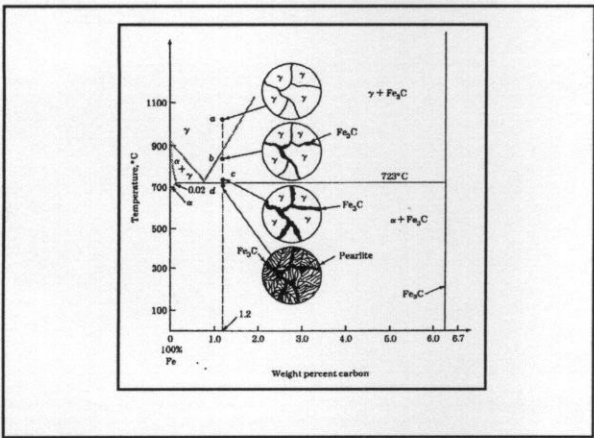


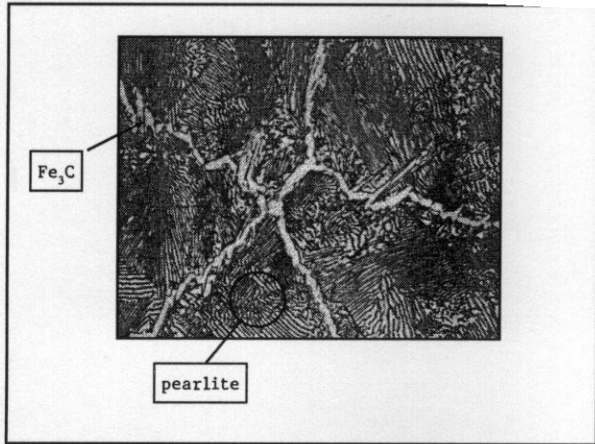


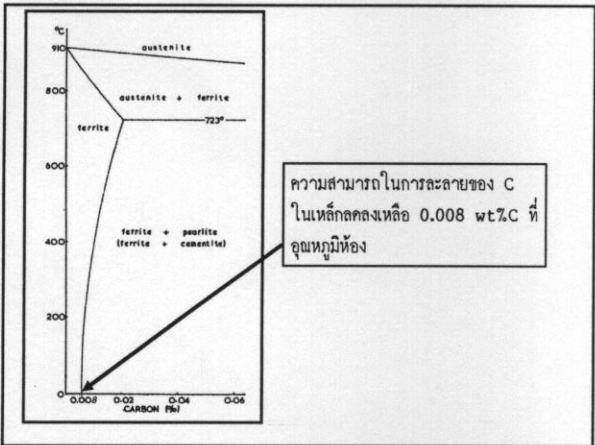






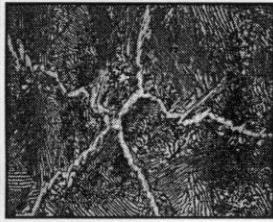






ปริมาณเฟส α ferrite $\approx 50\%$
 ปริมาณเฟส pearlite $\approx 50\%$

$$\begin{aligned} \%C &= (0.5)(0.008) + (0.5)(0.8) \\ &= 0.004 + 0.4 \\ &\approx 0.404 \text{ wt}\%C \end{aligned}$$

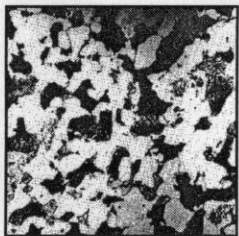


ปริมาณเฟส $Fe_3C \approx 5\%$
 ปริมาณเฟส pearlite $\approx 95\%$
 $\%C = (0.05)(6.67) + (0.95)(0.8)$
 $= 0.33 + 0.76$
 $\approx 1.09 \text{ wt}\%C$

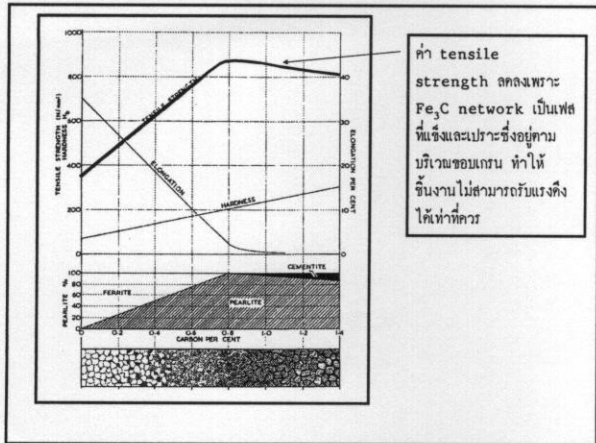
การประมาณ tensile strength
 ของเหล็กกล้าคาร์บอน

เราสามารถประมาณ Tensile strength จาก
 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนได้โดย
 Ferrite มี tensile strength = 28 kg/mm^2
 Pearlite มี tensile strength = 80 kg/mm^2

ตัวอย่าง

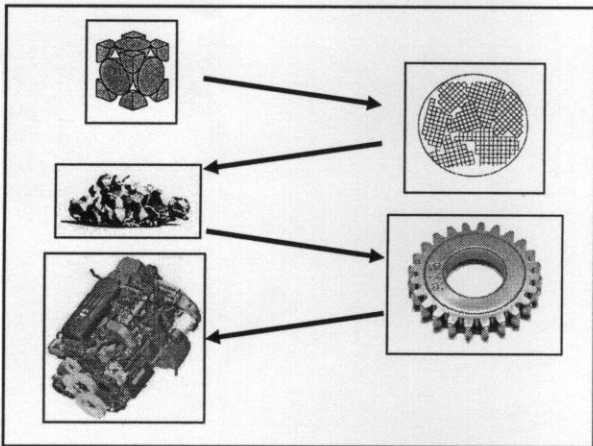


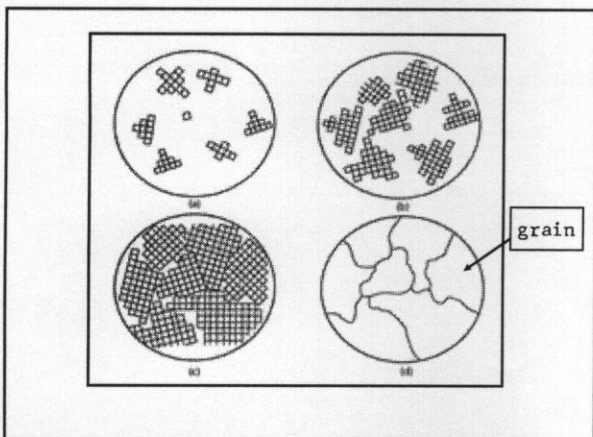
ปริมาณเฟส α ferrite $\approx 50\%$
 ปริมาณเฟส pearlite $\approx 50\%$
 Tensile strength
 $= (0.5)(28) + (0.5)(80)$
 $= 14 + 40$
 $\approx 54 \text{ kg/mm}^2$



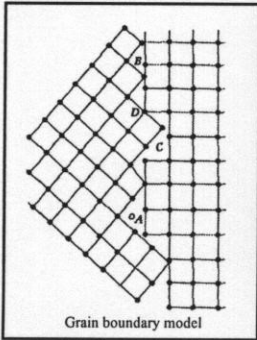
โครงสร้างจุลภาคของโลหะ
(Microstructure of Metals)

- อะตอมหลายอะตอมเรียงตัวกันเป็น Unit Cell
- Unit Cell หลาย Unit Cell เรียงตัวกันเป็น Grain
- Grain หลาย Grain ประกอบกันเป็นชิ้นส่วนโลหะ
- ชิ้นส่วน โลหะหลายชิ้นส่วนประกอบกันเป็นเครื่องจักร





Grain boundary

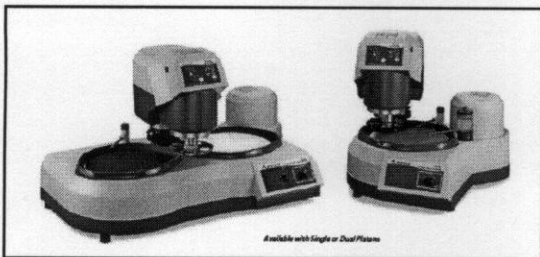


คือบริเวณที่แบ่งแยกระหว่างแต่ละเกรน หรือเฟสออกจากกันอย่างชัดเจน เปรียบเสมือนพรมแดนของแต่ละประเทศ

- A อะตอมที่ไม่เป็นของทั้งสอง lattice
- B compression zone
- C tension zone
- D อะตอมที่เป็นของทั้งสอง lattice

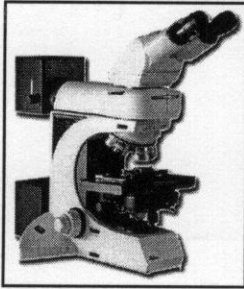
การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของ โลหะ

- ตัดชิ้นส่วนที่ต้องการ
- ซักผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย โดยค่อย ๆ เพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย จนกระทั่งผิวของชิ้นงานเรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน
- ซักผิวละเอียดด้วยผงอะลูมินาและผ้าสักหลาดจนผิวชิ้นงานเรียบเหมือนกระจก
- นำชิ้นงานไปกัดกรด กรดจะกัดผิวหน้าชิ้นงานตามบริเวณ Grain Boundary ทำให้เกิดร่องที่ Grain Boundary
- นำชิ้นงาน ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

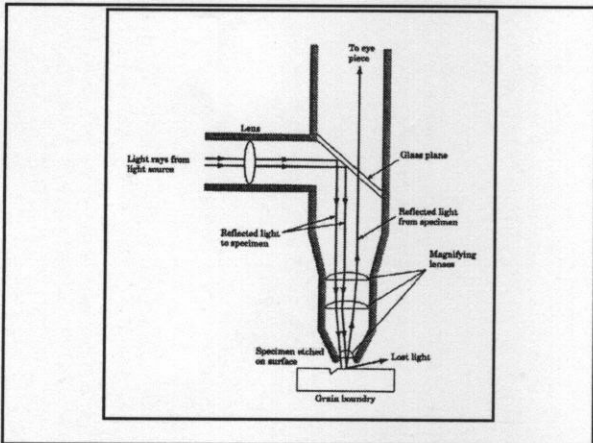


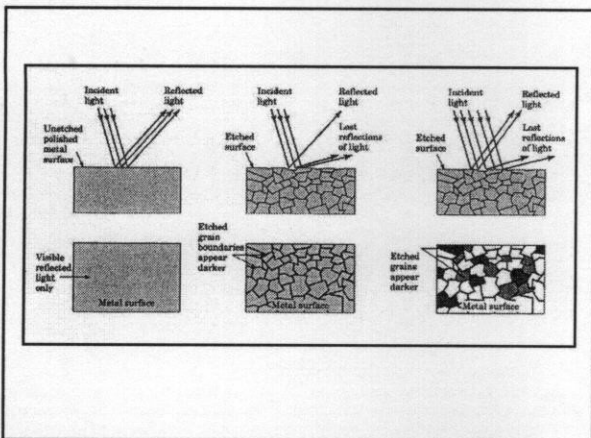
เครื่องซัด

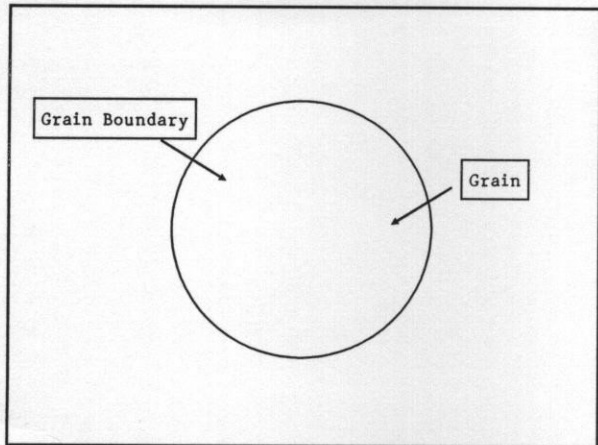
Optical Microscope

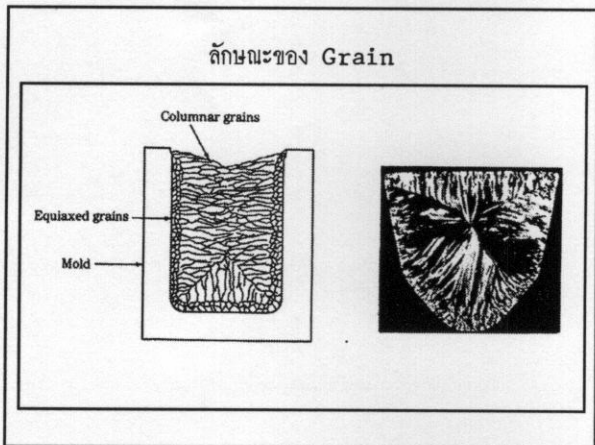


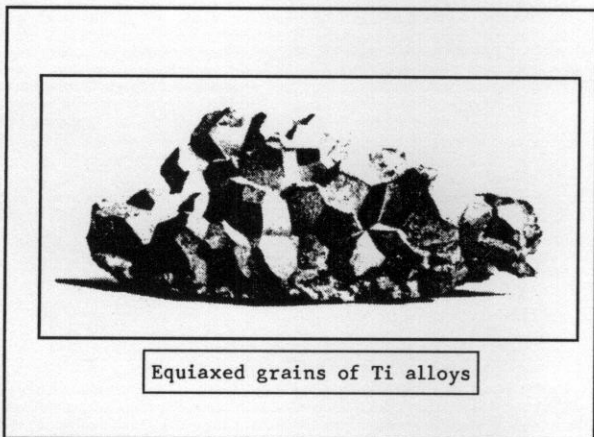
เมื่อแสงตกกระทบพื้นผิว
 วัตถุจะ → สะท้อนออก
 → มีค
 วัตถุเรียบ → สะท้อนกลับ
 → สว่าง

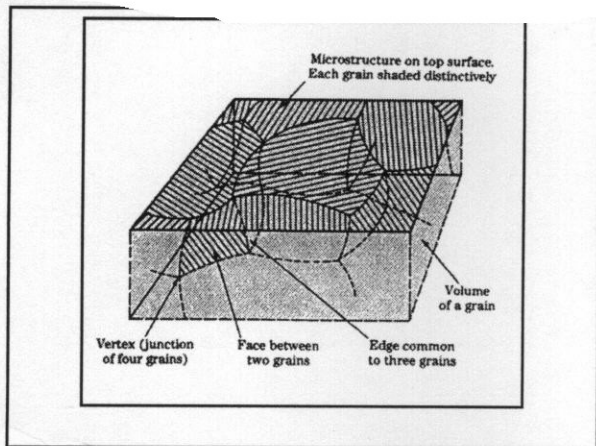












Grain Size

$$N = 2^{n-1}$$

N = จำนวนเกรนในหนึ่งตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100x
n = ASTM grain-size number

(ASTM = American Society of Testing Materials)

ตัวอย่าง เพื่อหาขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM ของตัวอย่างโลหะชนิดหนึ่ง
ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ถูกถ่ายและนับจำนวนเกรนได้
64 เกรนในหนึ่งตารางนิ้ว ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM ของโลหะชิ้นนี้เท่ากับ
เท่าใด?

$$N = 2^{n-1}$$

$$\log 64 = (n-1)(\log 2)$$

$$1.806 = (n-1)(0.301)$$

$$n = 7$$

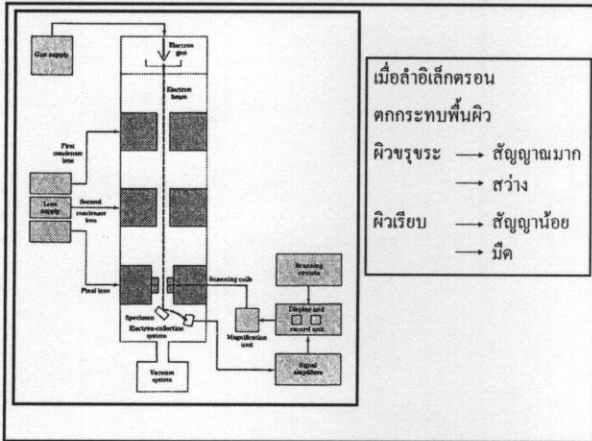
ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM ของโลหะชิ้นนี้เท่ากับ 7

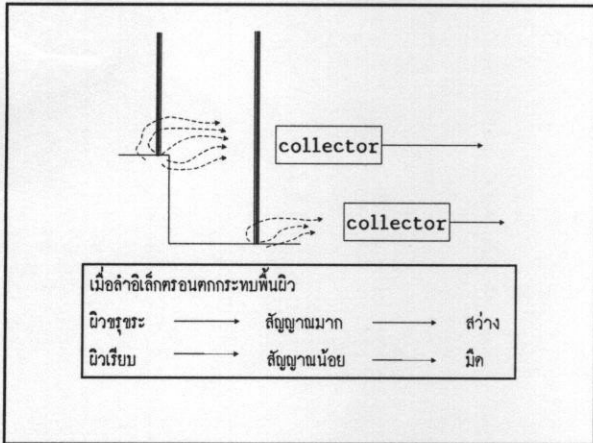
ASTM Grain Sizes		
Grain-size no.	Nominal number of grains	
	Per sq mm of 1 x	Per sq in of 100 x
1	16.5	1.0
2	31.0	2.0
3	62.0	4.0
4	124	8.0
5	248	16.0
6	496	32.0
7	992	64.0
8	1980	128
9	3970	256
10	7940	512

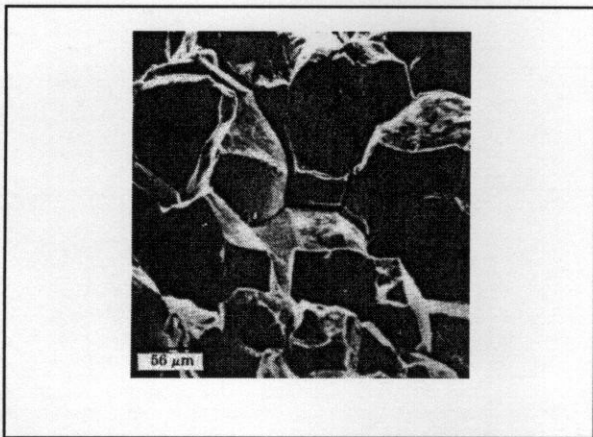
ปัจจัยที่มีผลต่อ Grain size

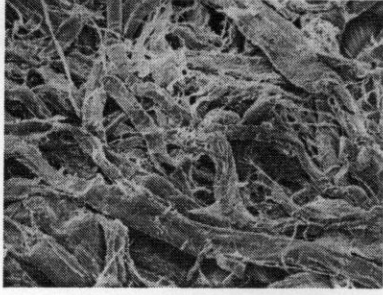
- อัตราการเย็นตัว (Cooling rate)
 - Cooling rate ↓ Grain size ↓
 - Cooling rate ↑ Grain size ↑
- ในขณะที่โลหะหลอมเหลว ถ้าหากโลหะมีอัตราการเย็นตัวสูงจะทำให้ได้ Grain ละเอียดและมีสมบัติแข็งกลด
- เหล็กกล้าและเหล็กหล่อหลังจากขึ้นรูปแล้วสามารถอบชุบเพื่อให้ได้ Grain ละเอียดได้ เรียกวิธีการนี้ว่า "Heat Treatment"

Scanning Electron Microscope



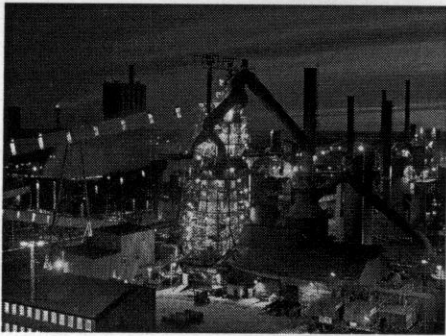






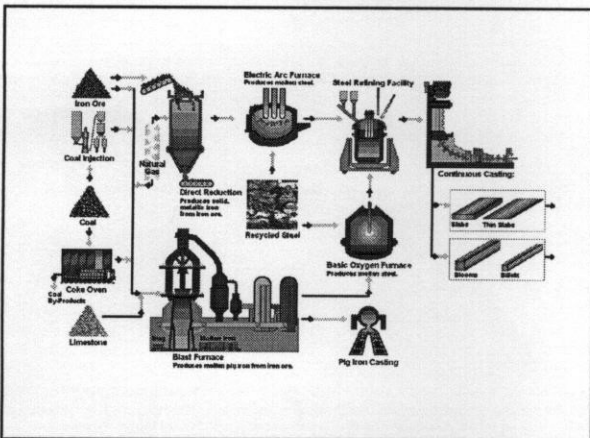
โครงสร้างจุลภาคของกระดาษไหม

กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า



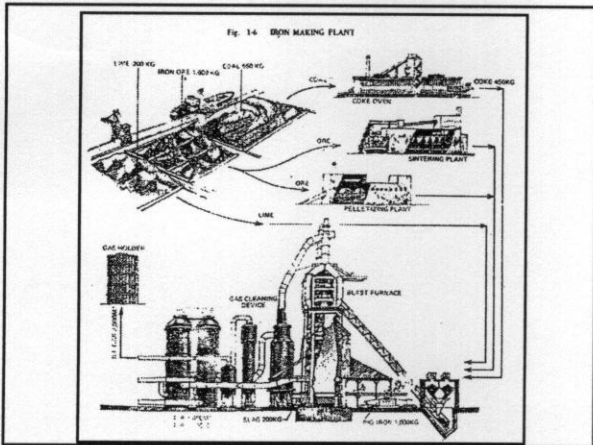
ขั้นตอนของกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า





การถลุงเหล็ก

- Blast furnace เป็นเตาที่นิยมใช้ที่สุดในการถลุงแร่เหล็กให้กลายเป็นเหล็ก
- วัตถุดิบได้แก่ แร่เหล็ก (Fe_2O_3), ถ่านโค้ก (C), หินปูน ($CaCO_3$)
- ถ่านโค้กทำหน้าที่หลักสองอย่างคือ เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และเป็นตัว Reduce โดยดึง Oxygen ออกจากแร่เหล็ก
- หินปูนทำหน้าที่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (slag) ออกจากน้ำโลหะ



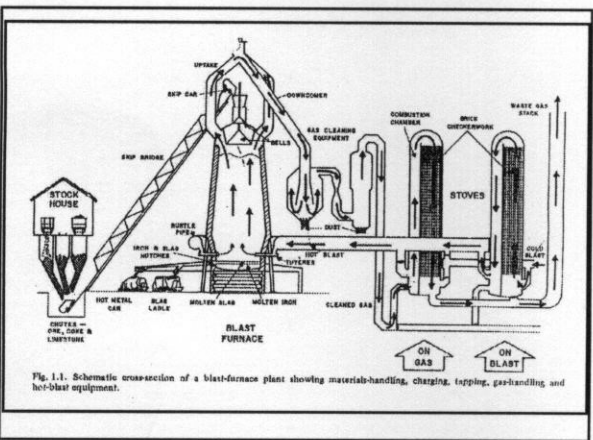
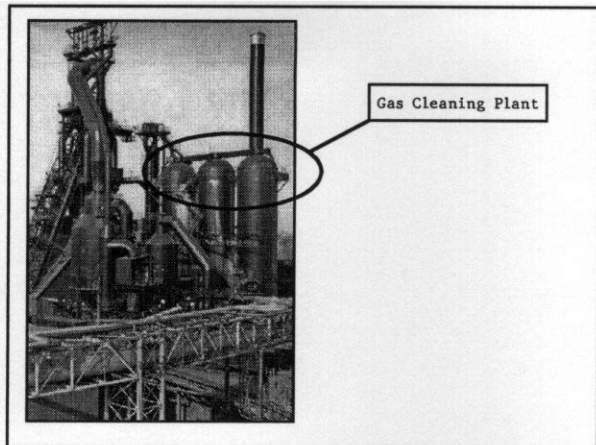
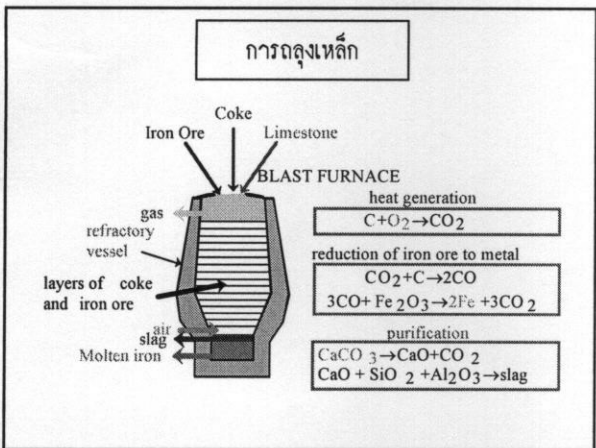
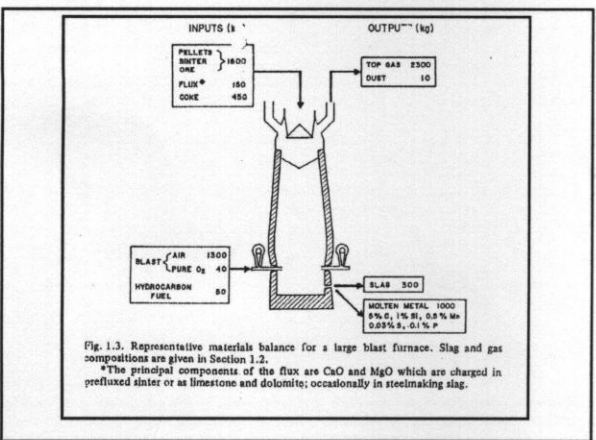


Fig. 1.1. Schematic cross-section of a blast-furnace plant showing materials-handling, charging, tapping, gas-handling and hot-blast equipment.







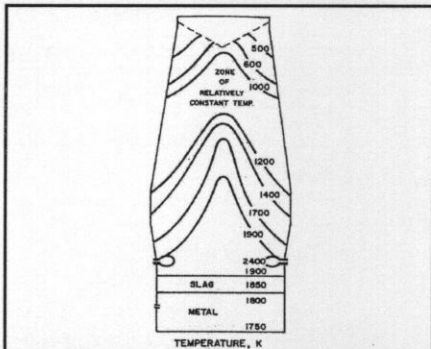


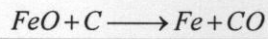
Fig. 2.1. Gas temperatures in the blast furnace as interpreted from the quenched-furnace data of Nakamura (1978). A zone of relatively constant temperature, i.e. the thermal reserve zone, is shown.

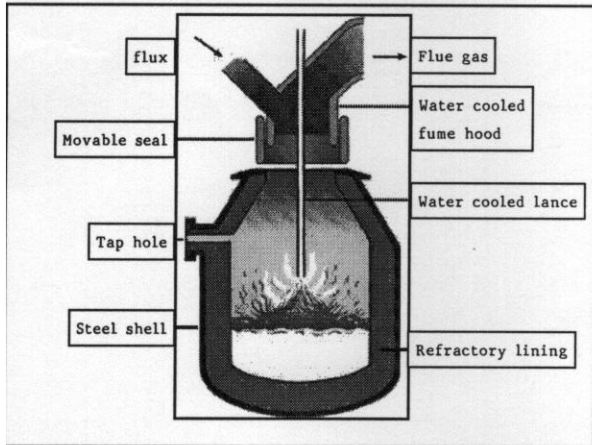
- ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก blast furnace ได้แก่ Pig Iron ซึ่งมีมลทินมากประกอบไปด้วย Fe, C, N, P, Si, Mn, S, ...
- Pig Iron จะมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 4% ซึ่งจะต้องนำไปกำจัดสารมลทินและลดปริมาณคาร์บอนก่อนนำไปใช้งาน

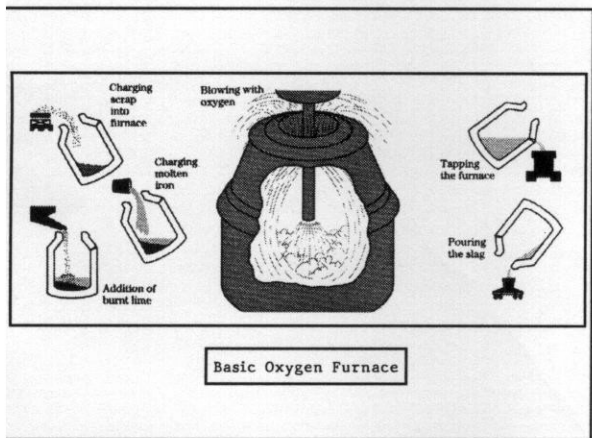


การผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

- วัตถุประสงค์ในการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าคือ Pig Iron และ/หรือ เซสเหล็ก
- การลดปริมาณคาร์บอนใน Pig Iron และการกำจัดสารมลทินเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้
- เตาที่ใช้อุตสาหกรรมคือ BOF (Basic Oxygen Furnace) วัตถุประสงค์จะถูกหลอมตัวภายในเตาและถูกพ่นด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้เหล็กหลอมเหลวกลายเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนกลายเป็น Carbonmonoxide





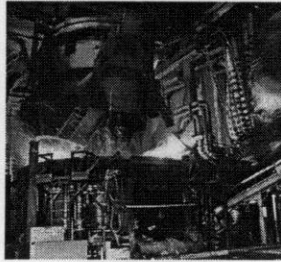


Basic Oxygen Furnace

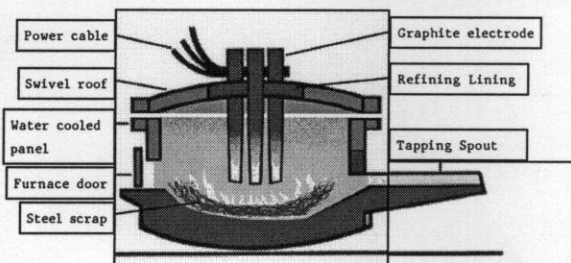
- มีการเติมหินปูนเพื่อรวมกับ FeO, SiO₂ เกิดเป็นตะกรัน (Slag)
- Slag ทำปฏิกิริยากับน้ำเหล็กช่วยลด S, P ในน้ำเหล็ก
- Slag จะถูกกำจัดออกได้ โดยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเหล็กทำให้ลอยตัวขึ้นที่ผิวหน้า
- น้ำเหล็กที่ได้จะถูกนำไปหล่อเป็น slab แล้วนำไปขึ้นรูปในภายหลัง แต่ในปัจจุบันนี้กระบวนการส่วนใหญ่ถูกปรับเปลี่ยนไปเป็นการนำไปหล่อและรีดต่อเนื่องด้วย Continuous casting machine

Electric Arc Furnace

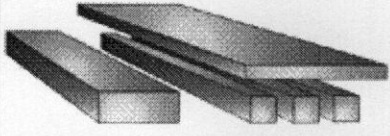
- ในการนำเหล็กกลับมาใช้ใหม่นิยมใช้เตา Electric Arc Furnace ซึ่งประหยัดพลังงานกว่าเตา BOF
- วัตถุดิบคือ Steel Scrap สามารถตั้งไกลจากชายฝั่งได้ โดยต้องมีปริมาณเศษเหล็กเพียงพอ
- ความคุมส่วนต่อประสานเคมีและคุณภาพได้ยาก นวัตกรรมที่จึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่ไม่วิกฤตเรื่องคุณภาพ



Electric Arc Furnace



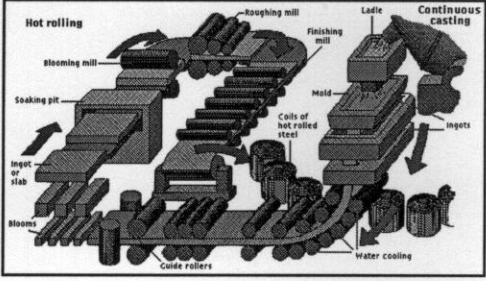
SLAB. Up to 3000 mm wide and up to 320 mm thick



BLOOM. Up to around 500 mm either square or rectangular

BILLET. Up to 180 mm square

Continuous Casting Machine



การขึ้นรูป

Metal fabrication techniques

- Forming operations
 - Forging
 - Rolling
 - Extrusion
 - Drawing
- Casting
 - Sand
 - Die
 - Investment
 - Continuous
- Miscellaneous
 - Powder metallurgy
 - Welding

การขึ้นรูปด้วยแรงทางกล

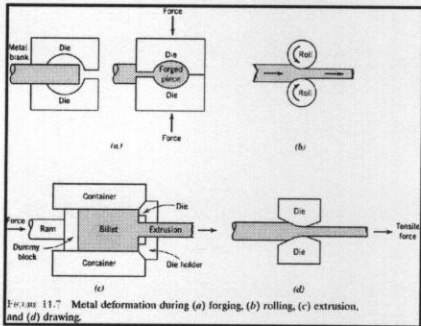
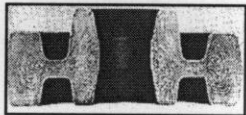
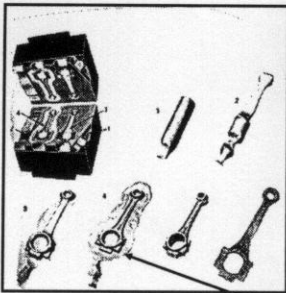


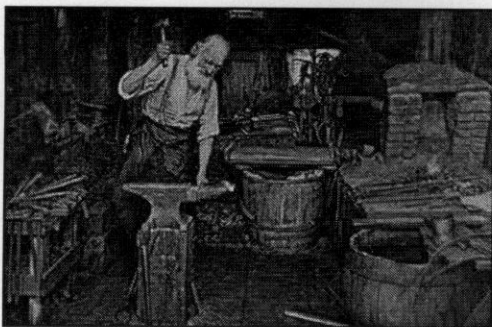
FIGURE 11.7 Metal deformation during (a) forging, (b) rolling, (c) extrusion, and (d) drawing.

Forging



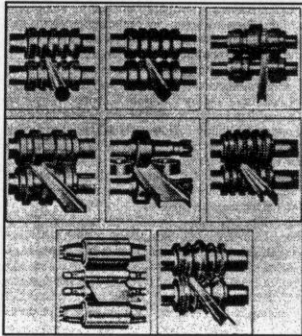
Grain flow ในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป

Trimming คือการตัดขี้ผึ้งที่เกิดจากการขึ้นรูป



"blacksmith"

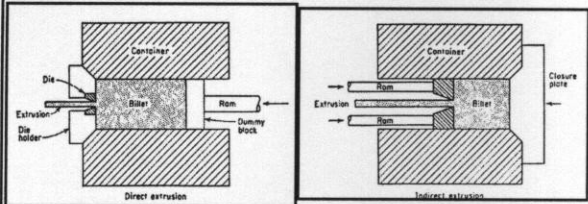
Rolling



รูปแบบ roller เพื่อให้ได้ชิ้นงานแบบต่างๆ

- การรีดแบ่งออกเป็น
1. รีดร้อน (Hot rolling)
 2. รีดเย็น (Cold rolling)

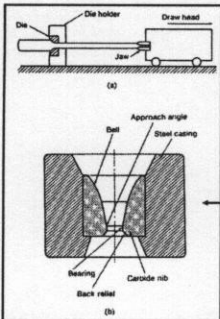
Extrusion



Direct Extrusion

Indirect Extrusion

Drawing

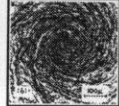


Drawing ใช้แรงดึงในการขึ้นรูป
ต่างจาก extrusion (แรงอัด)

Drawing die

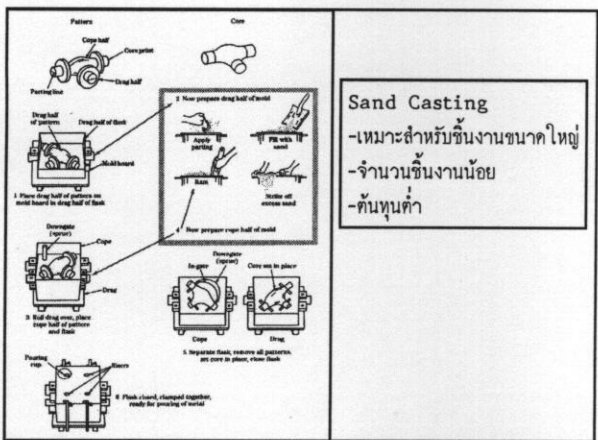
อุณหภูมิการขึ้นรูป

- Hot working
 - recrystallization
 - less energy to deform
 - oxidation: poor finish
 - lower strength
 - higher ductility
- Cold working
 - no recrystallization
 - more energy to deform
 - no oxidation: good finish
 - higher strength
 - lower ductility
- Cold worked microstructures
 - generally are very anisotropic!

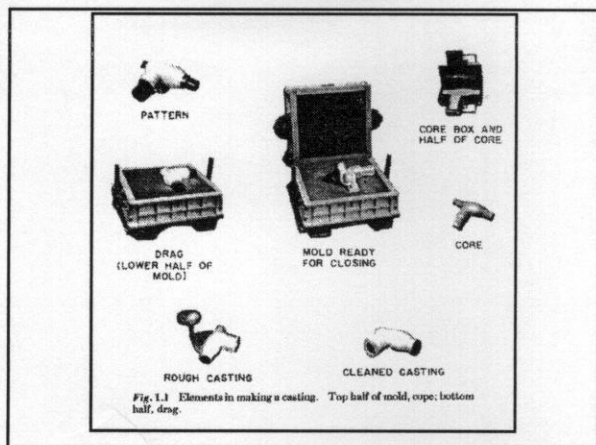


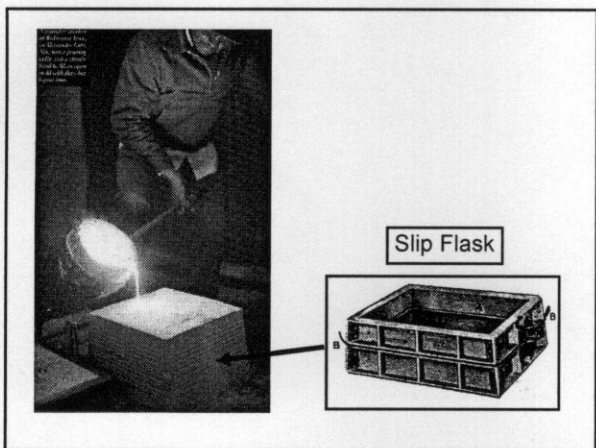
การขึ้นรูปด้วยการหล่อ

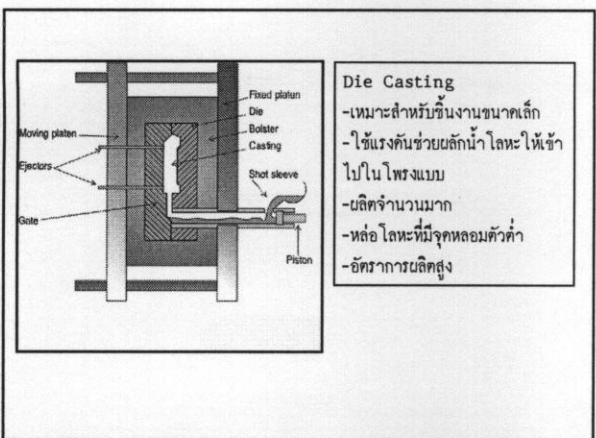
- การหล่อจะมีบทบาทเมื่อ
 - รูปร่างของชิ้นงานมีความซับซ้อนหรือใหญ่จนทำให้ขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นได้ยาก
 - โลหะชนิดที่ต้องการขึ้นรูปมีความเหนียวน้อยจนไม่สามารถทำ hot & cold working ได้
 - ในกรณีผลิตชิ้นงานนั้น ๆ การหล่อให้ต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่าเทคนิคการขึ้นรูปแบบอื่น

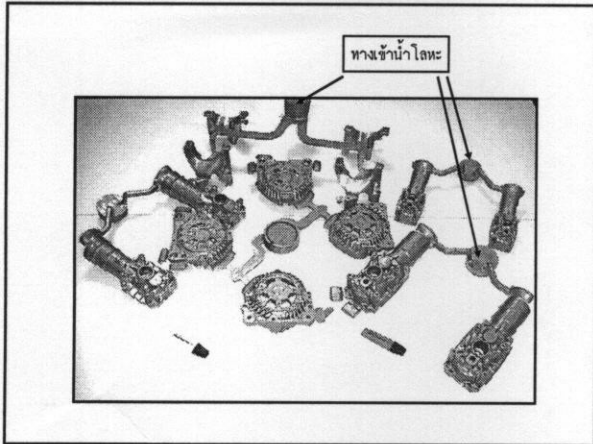


Sand Casting
 -เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่
 -จำนวนชิ้นงานน้อย
 -ต้นทุนต่ำ

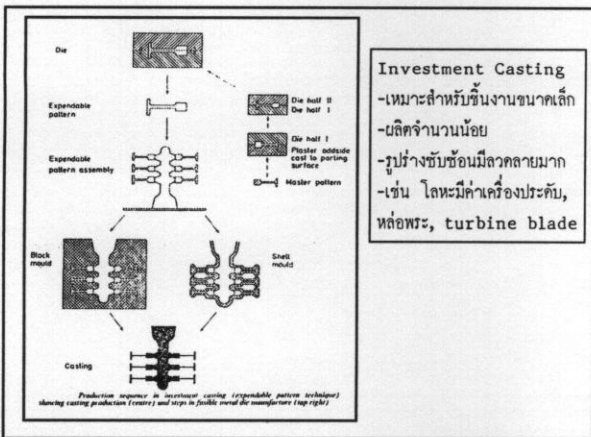


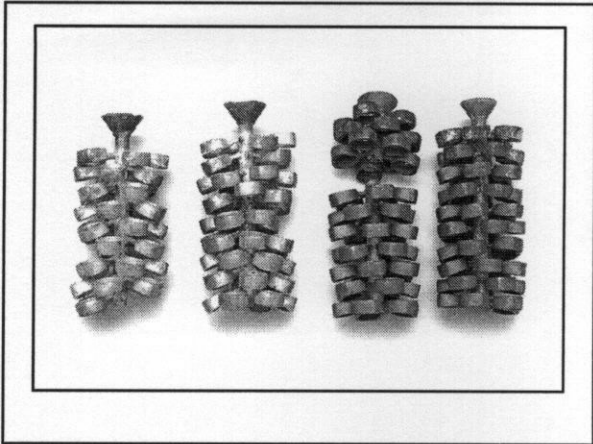


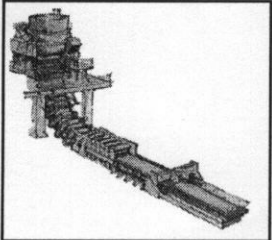






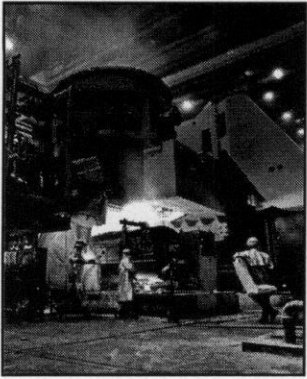







Continuous Casting

- เป็นการหล่อต่อเนื่องจากการผลิตเหล็กกล้า
- วัตถุดิบคือน้ำเหล็กที่ได้จากเตา BOF
- เมื่อหล่อเสร็จทำการรีดต่อเนื่อง
- ได้โครงสร้างและส่วนประกอบเคมีที่มี ความสม่ำเสมอว่าการหล่อเป็น slab แล้วคือนำมารีด

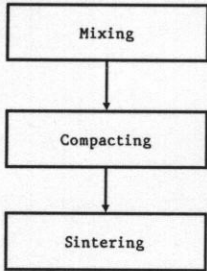


Continuous Casting Machine

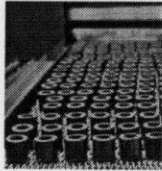


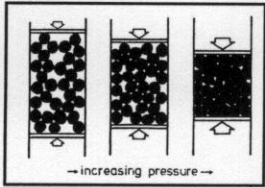
ภาพจากมุมมอง

Powder Metallurgy



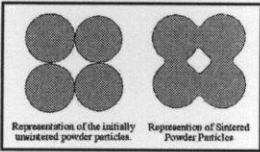
- เหมาะสำหรับชิ้นรูปโลหะที่มีจุดหลอมต่ำสูง และ/หรือ มี ductility ต่ำ
- ชิ้นงานขนาดเล็กและมีรูปร่างซับซ้อน
- ผลิตเป็นจำนวนมาก
- ควบคุมมิติของชิ้นงานได้ดี

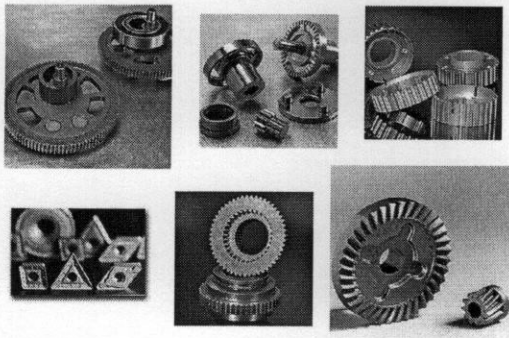




compacting

sintering





การเชื่อม

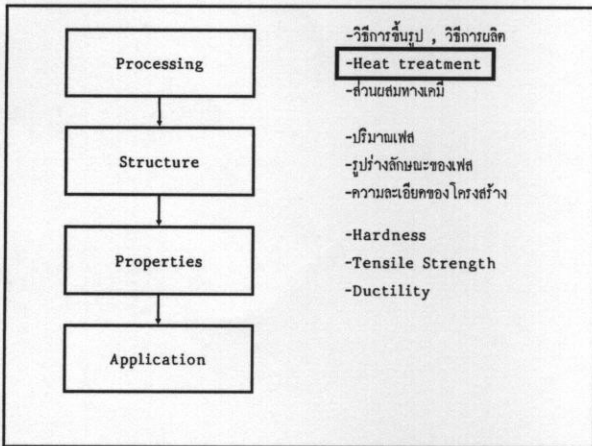


ใช้เมื่อชิ้นงานมีรูปร่าง
ซับซ้อนและสะดวกกว่าการขึ้น
รูปเป็นชิ้นงาน โลหะขึ้นเคียว

กระบวนการอบชุบ โลหะด้วยความร้อน
(Heat Treatment of Metals)

สมบัติเชิงกลของโลหะและโลหะผสมนอกจากจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะก็คือการอบชุบด้วยความร้อนของโลหะ

เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนใกล้เคียงกันแต่อาจมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน โดยสิ้นเชิงด้วยการอบชุบด้วยความร้อนของโลหะ



- กระบวนการ heat treatment สำหรับโลหะทั่วไป
- Process Annealing
 - Stress Relief
- กระบวนการ heat treatment สำหรับเหล็กกล้า
- Normalizing
 - Full Annealing
 - Spheroidizing
 - Quenching and Tempering

Process Annealing

- วัตถุประสงค์ : เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคและเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับ โลหะของโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา
- วิธีการ : นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 300 - 600 °C (สำหรับเหล็กกล้า) ในสายการผลิต โดยทำการขึ้นรูป
- ควบคุมอุณหภูมิและเวลา
 - อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดออกไซด์ผิวโลหะมาก อาจต้องใช้บรรยากาศที่ไม่เกิด oxidizing ช่วย
 - อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้การ annealing เป็นไปได้อ้า
 - เวลาที่นานเกินไปจะทำให้เกิดเกรนขยายตัว (grain growth) ซึ่งทำให้ได้เกรนขนาดหยาบและสมบัติเชิงกลไม่ดี

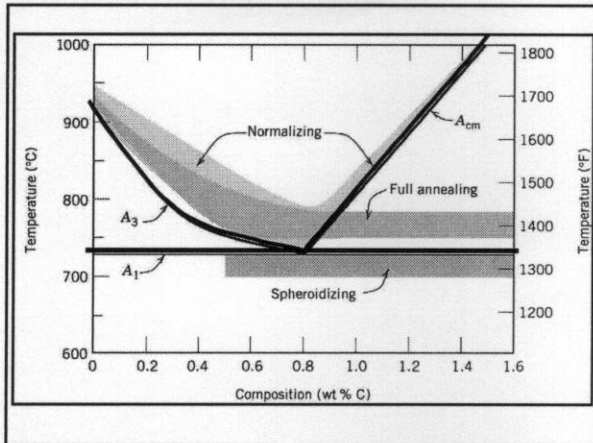
Stress Relief

- วัตถุประสงค์ : เพื่อคลายความเค้นในชิ้นงานโลหะที่เกิดจาก
 - การขึ้นรูป เช่น การกลึง, การรีด, extrusion
 - การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (thermal stress) ทำให้แต่ละบริเวณในชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวไม่เท่ากัน เช่น จากการเชื่อม, การชุบแข็งผิวด้วยไฟฟ้า
 - การเปลี่ยนแปลงสถานะที่โลหะเย็นตัว ซึ่งผลที่เปลี่ยนไม่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการยึดหรือหดตัวในชิ้นงาน → stress
- ถ้าชิ้นงานที่มี 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

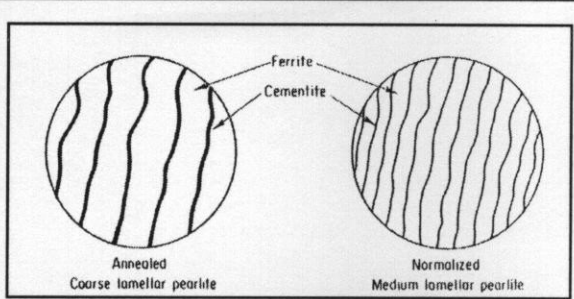


Normalizing

- เหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูป เช่น การรีด, extrusion จะมีรูปร่างลักษณะเกรนที่ขึ้นอยู่กับการขึ้นรูปและมีขนาดหยวน ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลไม่คงและขึ้นอยู่กับทิศทางการขึ้นรูป
- วัตถุประสงค์ของ normalizing คือปรับโครงสร้างจุลภาคทำให้มีเกรนที่รูปร่างและการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ รวมทั้งทำให้ได้เกรนที่มีขนาดละเอียดขึ้น
- วิธีการ : อบอุ่นงานภายในเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า A_3 หรือ A_{cm} ประมาณ 50 K ทิ้งไว้จนพอที่จะทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็น austenite ทั้งหมดแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

Full Annealing

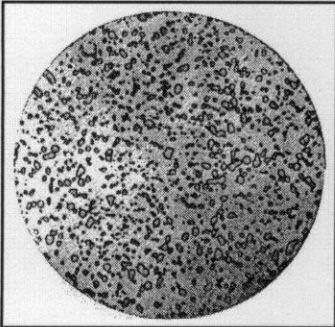
- วัตถุประสงค์ : ใช้สำหรับปรับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าให้พร้อมที่จะนำไปทำการกลึงหรือการขึ้นรูปที่มีการทำให้เกิด plastic deformation อยู่มาก
- วิธีทำ : อบอุ่นงานภายในเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า A_3 หรือ A_1 (A_3 สำหรับ hypoeutectoid carbon steel และ A_1 สำหรับ hypereutectoid carbon steel) ประมาณ 50 K ทิ้งไว้จนพอที่จะทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็น austenite ทั้งหมดแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในเตา
- เย็นตัวในเตาให้อัตราการเย็นตัวที่ต่ำกว่าเย็นตัวในอากาศของ normalizing



Normalizing มีอัตราการเย็นตัวสูงกว่า Full Annealing ทำให้ได้ pearlite ที่ละเอียดกว่า

Spheroidizing

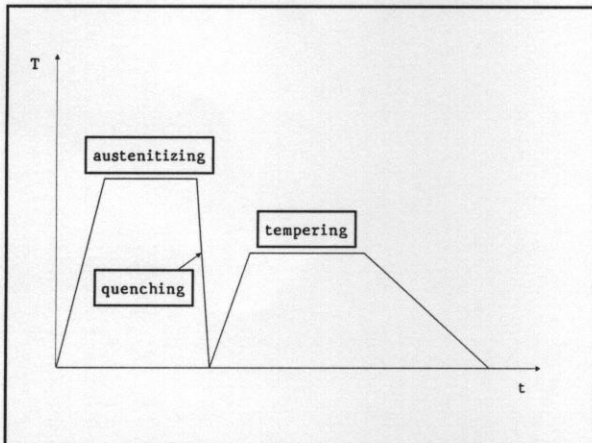
- โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนสูง (0.25-1.1% C) จะประกอบไปด้วย pearlite ในปริมาณพอสมควร ซึ่งถ้า pearlite เหล่านี้มีขนาดที่หยาบ จะทำให้ขึ้นรูปได้ยาก (กลึง, โม่, กัด, เจาะ, คว้าน)
- วัตถุประสงค์ : เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น โดยเปลี่ยน Fe_3C ใน pearlite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



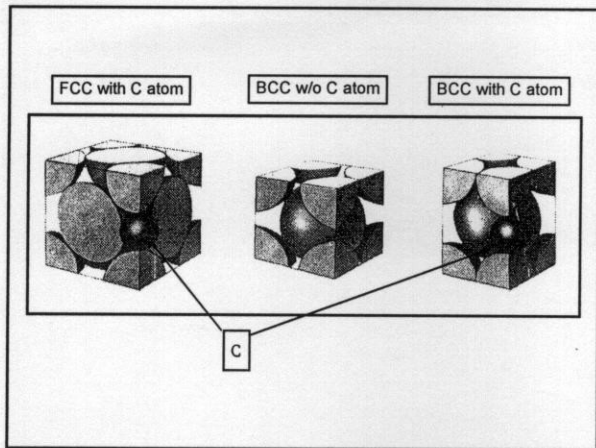
Spheroidized 1.1% C steel 1000x

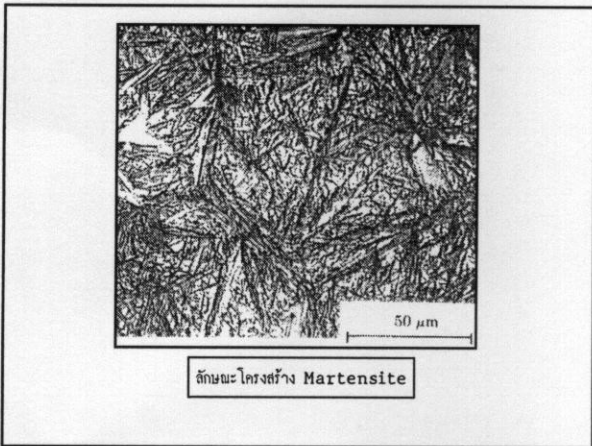
Quenching and Tempering

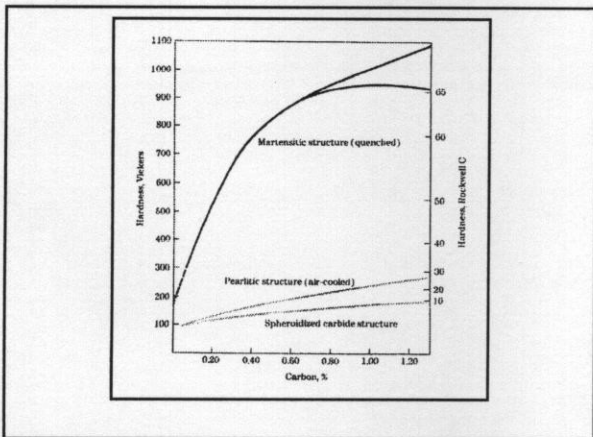
- เป็นเทคนิคในการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนสูง ($>0.3\%C$)
- วิธีการ : นำชิ้นงานเหล็กกล้าไปอบที่อุณหภูมิสูงกว่า upper critical temperature เป็นระยะเวลาสั้นพอที่จะทำให้โครงสร้างเป็น austenite ทั้งชิ้น (กระบวนการนี้เรียกว่า "Austenitizing") หลังจากนั้นทำการชุบลงในของเหลวทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว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



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

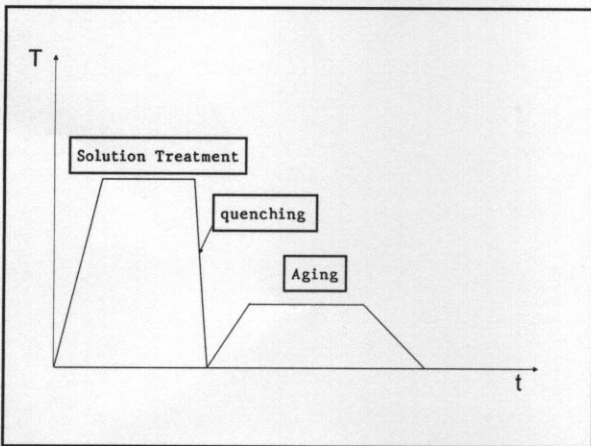






Precipitation Hardening

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



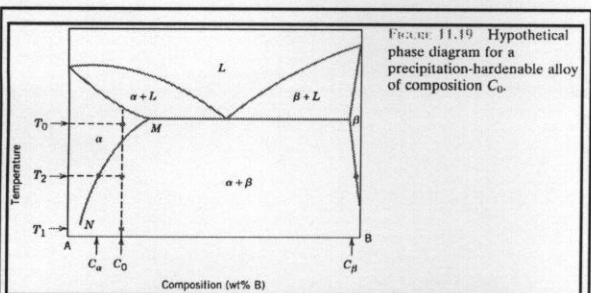
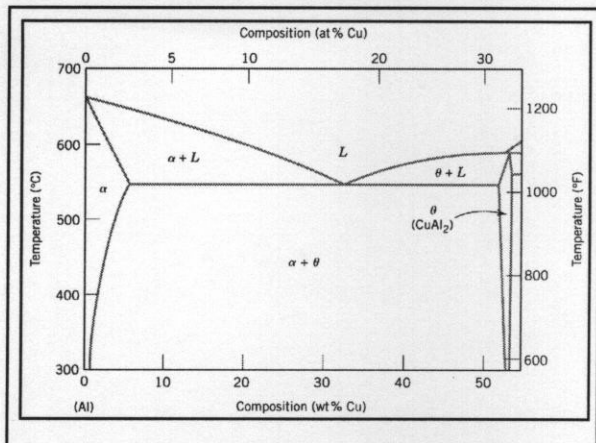


Figure 11.19 Hypothetical phase diagram for a precipitation-hardenable alloy of composition C_0 .

ที่ T_0 ธาตุ B ละลายในธาตุ A ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ T_2 เมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ β จะค่อย ๆ เกิดขึ้นตาม lever arm rule



กลไกของ Precipitation Hardening

- ที่อุณหภูมิสูงธาตุ B จะละลายในธาตุ A ได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเราทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ธาตุ B ไม่สามารถแพร่ออกจากธาตุ A ได้ทัน จึงเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่มีความอิ่มตัวยังยวดยก (Supersaturated solid solution)
- ถ้ามีการทดสลิเฟส β ออกมาประมาณหนึ่ง เฟส β ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเสริมความแข็งแรงให้กับโลหะผสม
- Supersaturated solid solution จะเกิดการแพร่ให้เฟส β ได้ แต่จะเกิดขึ้นอย่างช้ามากที่อุณหภูมิต่ำ เราจึงเร่งการแพร่ให้เกิดขึ้นโดยการนำไปอบ (Aging) แต่ถ้า aging เป็นเวลานานเกินไปจะทำให้เฟส β ทดสลิออกมามากเกินไปทำให้ความแข็งแรงลดต่ำลง (over aging)

ขณะยังเป็น supersaturated solid solution

ลักษณะการทดสลิเฟส β ที่เหมาะสม

ลักษณะการทดสลิเฟส β ที่มากเกินไป

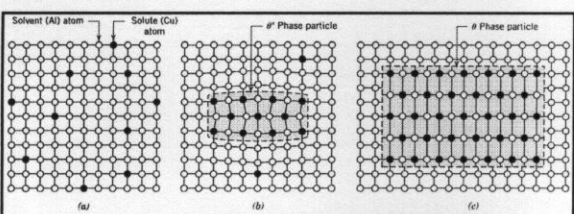


FIGURE 11.23 Schematic depiction of several stages in the formation of the equilibrium precipitate (θ) phase. (a) A supersaturated α solid solution. (b) A transition, θ^* , precipitate phase. (c) The equilibrium θ phase, within the α -matrix phase. Actual phase particle sizes are much larger than shown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

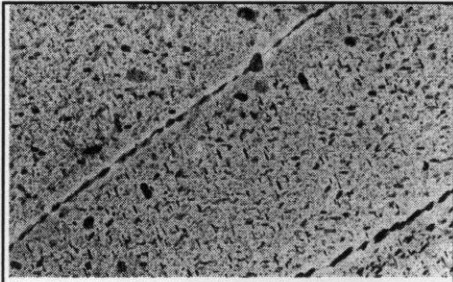


FIGURE 11.24 A transmission electron micrograph showing the microstructure of a 7150-T651 aluminum alloy (6.2Zn, 2.3Cu, 2.3Mg, 0.12Zr, the balance Al) that has been precipitation hardened. The light matrix phase in the micrograph is an aluminum solid solution. The majority of the small plate-shaped dark precipitate particles are a transition η' phase, the remainder being the equilibrium η (MgZn₂) 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

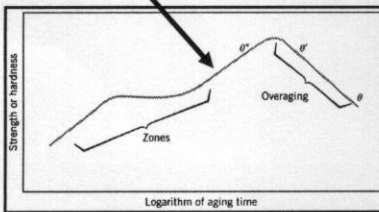
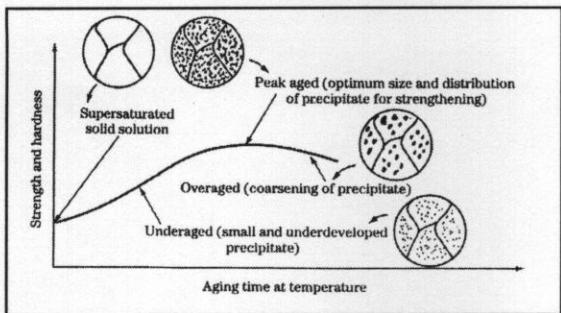
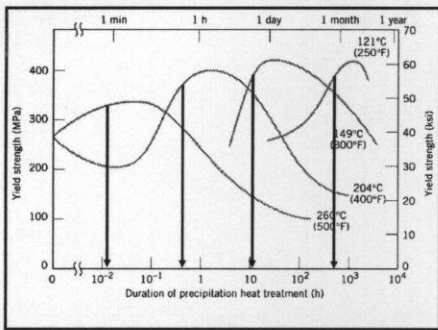


FIGURE 11.21 Schematic diagram showing strength and hardness as a function of the logarithm of aging time at constant temperature during the precipitation heat treatment.

ปล่อยให้ β ตกผลึกเองเรียก "Natural aging"
ให้อุณหภูมิเร่งการตกผลึกเรียก "Artificial aging"

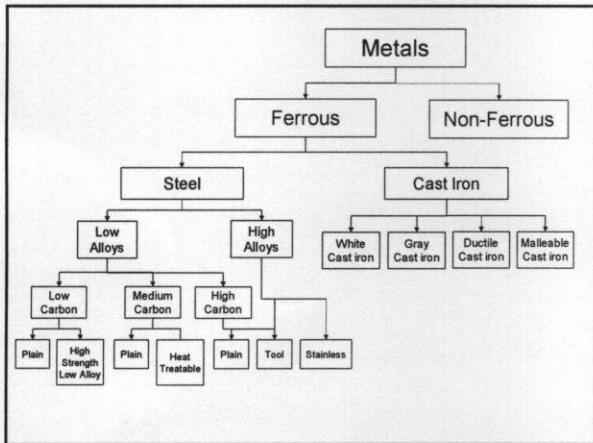




ถ้าเพิ่มอุณหภูมิในการ aging จะทำให้เวลาที่เหมาะสมต่อการ aging ลดลง

ประเภทของ โลหะ

- โลหะสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทหลักคือ
 - Ferrous metals
 - Non-ferrous metals
- Ferrous metals คือ โลหะที่ส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นเหล็กซึ่งได้แก่ เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ
- Non-ferrous metals คือ โลหะที่นอกเหนือไปจาก ferrous metals



Ferrous Alloys

- เป็นโลหะประเภทที่มีการผลิตและการใช้งานมากที่สุด เนื่องจาก
 - เหล็กเป็นทรัพยากรที่มีอยู่มากในเปลือกโลก
 - เหล็กสามารถผลิตและขึ้นรูปด้วยวิธีที่ประหยัดกว่าโลหะชนิดอื่น
 - เหล็กมีสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ดีเมื่อเทียบกับราคา
- ข้อดีที่สำคัญของเหล็กคือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำและเกิดสนิมได้ง่ายมาก
- Ferrous Alloys แบ่งออกเป็น
 - เหล็กกล้า (<2% C)
 - เหล็กหล่อ (>2% C)

เหล็กกล้า

- เหล็กกล้าถูกจำแนกตามปริมาณคาร์บอนออกเป็น
 - เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มี C น้อยกว่า 0.25%
 - เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มี C ระหว่าง 0.25% - 0.6%
 - เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) โดยทั่วไปมี C ระหว่าง 0.6% - 1.4%
- Plain carbon steel หมายถึงเหล็กกล้าที่มีเฉพาะเหล็กและคาร์บอนเป็นส่วนผสมเท่านั้น อาจมี Mn ปริมาณเล็กน้อย นอกเหนือจากนี้คือสารมลทิน
- Alloy steel คือเหล็กกล้าที่มีการเติมธาตุผสมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติ

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

- เป็นเหล็กกล้าที่มีการผลิตและการใช้งานมากที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าด้วยกัน โดยมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.25% ซึ่งทำให้ไม่สามารถอบชุบเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีทางความร้อนได้ (ไม่สามารถได้โครงสร้าง Martensite ได้โดยการ quenching)
- การเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำใช้วิธี cold working
- โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำประกอบไปด้วย ferrite และ pearlite
- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความเหนียวและอ่อนมาก ทำให้สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีทางกลและการเชื่อมได้ง่ายและต้นทุนต่ำ

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอีกกลุ่มหนึ่งคือ HSLA (High Strength Low Alloy Steel)
- มีการเติม Cu, V, Ni, Mo ในปริมาณเล็กน้อยทำให้ HSLA มีความแข็งแรงมากกว่า Plain low carbon steel
- ในบรรยากาศทั่วไป HSLA มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำกว่า Plain carbon steel
- HSLA ราคาแพงกว่า Plain carbon steel มาก

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

- สมบัติเชิงกลทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

- Tensile Strength	415 - 550 MPa
- Elongation	25%
- Yield Strength	200 - 300 MPa

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

- เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีคาร์บอนระหว่าง 0.25 - 0.6% เหล็กกล้าประเภทนี้สามารถอบชุบด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ (Quench and Tempering)
- Plain medium carbon steel มีความสามารถในการอบชุบน้อยคั้งนั้นจึงมีการเติมธาตุผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการอบชุบ เช่น Cr, Ni, Mo
- Alloyed medium carbon steel มีความแข็งแรงสูงกว่า plain low carbon steel แต่มีความเหนียวและขึ้นรูปยากกว่าเช่นกัน

AISI Designation

AISI = American Iron and Steel Institute

XXxx

Alloy content Carbon content

ตัวอย่าง

เหล็กกล้า 1020 หมายถึงเหล็กกล้ามีคาร์บอน 0.2% (ไม่มีธาตุอื่นผสม)

เหล็กกล้า 1080 หมายถึงเหล็กกล้ามีคาร์บอน 0.8% (ไม่มีธาตุอื่นผสม)

AISI Designation	Composition Range			
	Ni	Cr	Mo	Other
10XX				
11XX				0.08-0.33S
12XX				0.10-0.35S
				0.04-0.12P
13XX				1.60-1.90Mn
40XX			0.20-0.30	
41XX		0.80-1.10	0.15-0.25	
43XX	1.65-2.00	0.40-0.90	0.20-0.30	
46XX	0.70-2.00		0.15-0.30	
48XX	3.25-3.75		0.20-0.30	
51XX		0.70-1.10		
61XX		0.50-1.10		0.10-0.15V
86XX	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	
92XX				1.80-2.20Si

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง

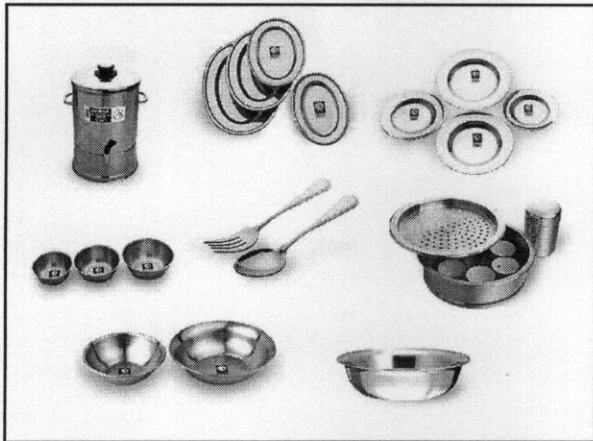
- เหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.6% - 1.4% มีความแข็งแรงและแข็งมากที่สุดแต่มีความเหนียวน้อยที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกัน
- เกือบทั้งหมดถูกใช้งานในสภาพที่ผ่านการอบชุบ
- สามารถทนการสึกหรอได้ดี ใช้ทำเครื่องมือและแม่พิมพ์
- ธาตุผสมทั่วไปได้แก่ Cr, Mo, V, W ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนให้สารประกอบ Carbide ที่มีความแข็งและจุดหลอมตัวสูง (i.e. Cr_3C_2 , V_4C_3 , WC)

เหล็กกล้าไร้สนิม

- Stainless steel เป็นเหล็กกล้าที่ความต้านทานการกัดกร่อนสูงเป็นพิเศษ โดยไม่เป็นสนิมในบรรยากาศปกติ (เหล็กกล้าทั่วไปเป็นสนิม)
- ความต้านทานการกัดกร่อนได้มาจากการเติมธาตุ Cr (อย่างน้อย 13%) เป็นหลักทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ช่วยป้องกันเนื้อโลหะ
- อาจเติมธาตุอื่น ๆ ช่วยเพิ่มสมบัติบางประการเช่น Ni และ Mo

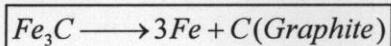
เหล็กกล้าไร้สนิม

- Stainless steel แบ่งตามลักษณะโครงสร้างพื้นได้เป็น 3 ประเภทได้แก่
 - Ferritic Stainless Steel
(โครงสร้างพื้นเป็น ferrite ออบชุบให้เป็น martensite ไม่ได้)
 - Austenitic Stainless Steel
(เติม Ni ทำให้ Austenite เสถียรที่อุณหภูมิห้อง)
 - Martensitic Stainless Steel
(โครงสร้างพื้นเป็น martensite)
- Austenitic stainless steel ไม่เป็นแม่เหล็กในขณะที่ martensitic และ ferritic เป็นแม่เหล็ก



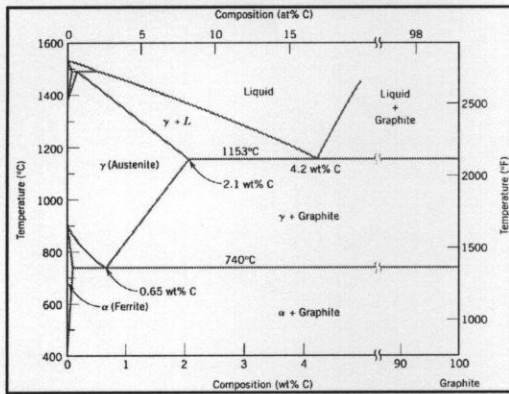
เหล็กหล่อ

- มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2%
- จุดหลอมตัวต่ำกว่าเหล็กกล้าและมีความเหนียวน้อยทำให้ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อได้สะดวกกว่าด้วยแรงทางกล
- Fe_3C เป็นสารประกอบกึ่งเสถียร (Metastable compound) ซึ่งสามารถแตกตัวให้ Fe และ Graphite ได้



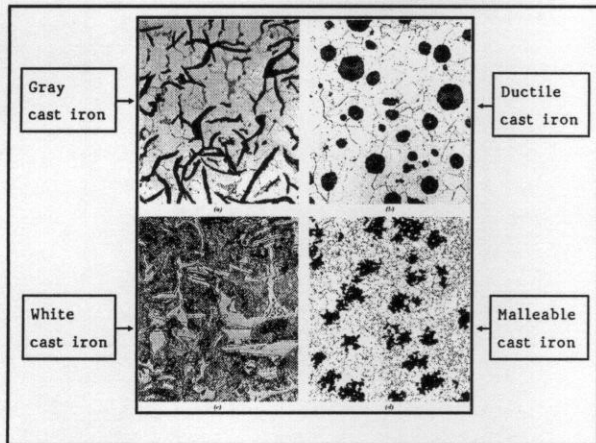
เหล็กหล่อ

- คังนั้ณแผนภูมิสมคุดระหว่าง Fe-Fe₃C จิงไมไ้แผนภูมิสมคุดของ Fe-C อย่างแท้จริง แผนภูมิสมคุดของ Fe-C จะแตกต่างไปจาก Fe-Fe₃C เล็กน้อย
- ปัจจัยที่ท้่าให้เกิด Graphite คือดส่วนผสมทางเคมีและอัตราการเย็นตัว
- ธาตุผสมบางชนิดเช่น Si, Ce, Mg ช่วยท้่าให้เกิด Graphite
- อัตราการเย็นตัวเร็วท้่าให้ Graphite ไม้สามารถเกิดได้ทันเพราะต้องอาศัยกระบวนการแพร่ คังนั้ณอัตราการเย็นตัวช้าจะส่งเสริมให้ Graphite เกิดมากขึ้น



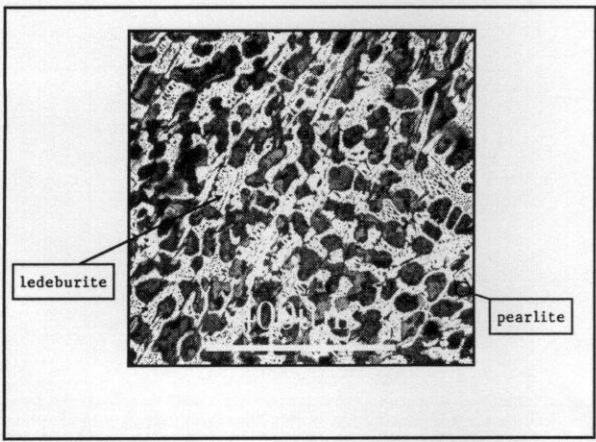
ประเภทของเหล็กหล่อ

- Gray Cast Iron
- Ductile Cast Iron
- White Cast Iron
- Malleable Cast Iron



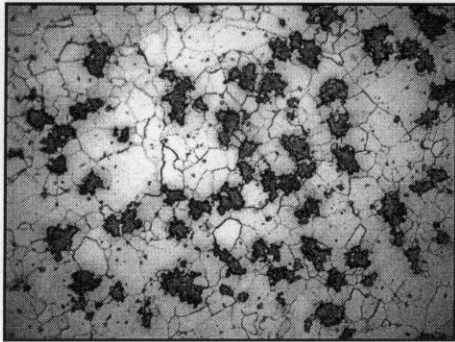
White Cast Iron

- สำหรับเหล็กหล่อที่มีปริมาณ Si ต่ำ (น้อยกว่า 1%) และ/หรือ เย็นตัวอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะอยู่ในรูปแบบของ Fe_3C แทน graphite
- เนื่องจากรอยแตกของเหล็กหล่อชนิดนี้มีสีขาวจึงเรียก "เหล็กหล่อขาว" หรือ White Cast Iron
- เหล็กหล่อขาวมีสมบัติแข็งและเปราะมากทำให้สามารถใช้ได้เฉพาะงานที่ต้องการความต้านทานการสึกหรอสูงและไม่สามารถรับแรงกระแทกได้

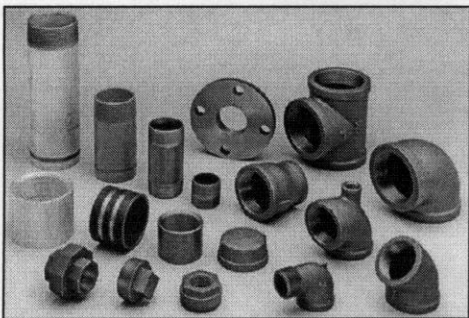


Malleable Cast Iron

- เมื่อนำเหล็กหล่อขาวมาอบที่อุณหภูมิ 800 - 900 °C เป็นเวลานาน (มากกว่า 30 ชั่วโมง) ในบรรยากาศปกคลุม (เพื่อป้องกัน oxidation) จะทำให้ Fe₃C แยกตัวเป็น graphite มีลักษณะเป็นกลุ่มเป็นก้อนคล้าย คอกไม้
- โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยกลุ่ม graphite ล้อมรอบด้วยโครงสร้างพื้น เป็น ferrite หรือ pearlite ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว
- เหล็กหล่อ Malleable จะมีความเหนียวและสามารถตีแผ่ได้ (malleable แปลกว่า สามารถตีแผ่ได้) มี tensile strength ค่อนข้างสูง (ใกล้เคียงกับ nodular cast iron)



Microstructure of Malleable Cast Iron



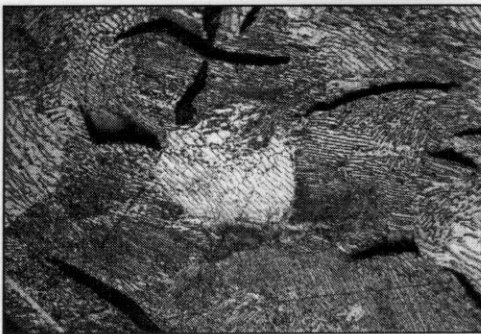
Malleable Cast Iron

Gray Cast Iron

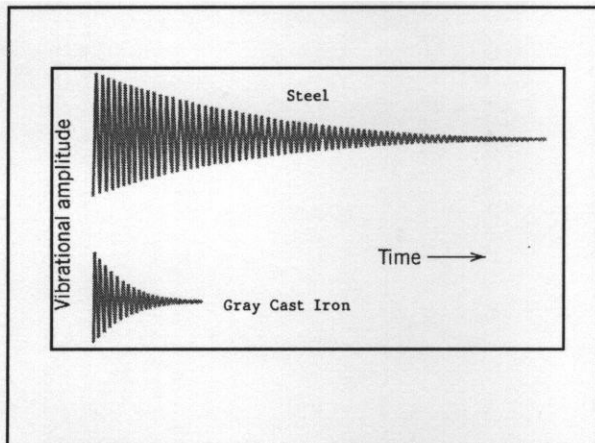
- ได้จากการเติม Si ลงไปประมาณ 1.0-3.0% มีคาร์บอนอยู่ในช่วง 2.5-4.0%
- Si ทำให้คาร์บอนในเหล็กรวมตัวเป็น Graphite ในลักษณะ Flake โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วย Flake Graphite ล้อมรอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็น ferrite หรือ pearlite
- เนื่องจาก flake graphite ทำให้รอยแตกของเหล็กหล่อชนิดนี้มีสี่เท่าจึงเป็นที่มาของชื่อ Gray cast iron

Gray Cast Iron

- เหล็กหล่อสีเทามีสมบัติค่อนข้างแข็งและเปราะ รับแรงดึงได้น้อยเนื่องจากบริเวณปลายของ flake graphite เป็นบริเวณที่เกิด stress concentration เหล็กหล่อสีเทาสามารถรับแรงอัดได้ดี
- สมบัติเด่นของเหล็กหล่อสีเทาคือสามารถรับแสงสั่นสะเทือนได้ดีมาก
- เหล็กหล่อสีเทามี Fluidity ที่ดีมากทำให้สามารถหล่อขึ้นรูปชิ้นงานซับซ้อนได้ง่ายกว่าเหล็กหล่อประเภทอื่นและมีต้นทุนต่ำที่สุดในบรรดาเหล็กหล่อด้วยกัน



Microstructure of Gray Cast Iron

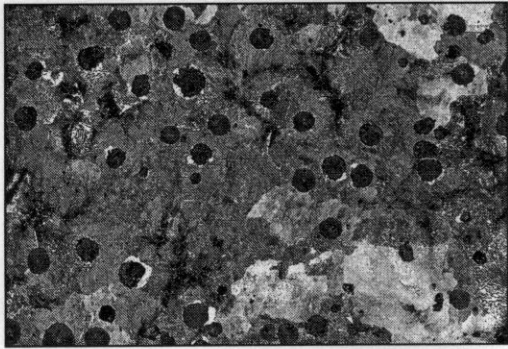


Ductile Cast Iron

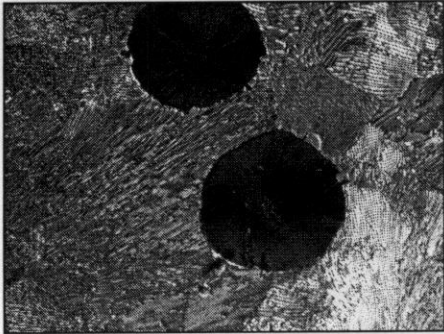
- เหล็กหล่อเหนียวได้จากการเติม Mg และ/หรือ Ce ลงใน gray cast iron ขณะหลอมเหลวทำให้ graphite เปลี่ยนรูปแบบเป็นทรงกลม จึงมีอีกชื่อหนึ่งคือ "Nodular Cast Iron"
- โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วย nodular graphite และโครงสร้างพื้นเป็น ferrite หรือ pearlite ขึ้นอยู่กับการอบชุบ โดยยิ่งให้เวลาที่อุณหภูมินาน โครงสร้างพื้นจะเปลี่ยนไปเป็น ferrite เนื่องจากคาร์บอนแพร่เข้าสู่บริเวณที่เป็น graphite

Ductile Cast Iron

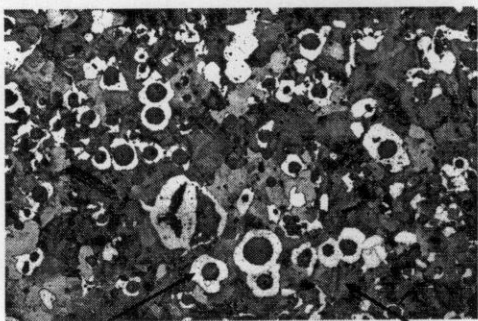
- เหล็กหล่อเหนียวมี tensile strength อยู่ในช่วง 380-480 MPa ซึ่งมากกว่า gray cast iron เพราะมี graphite ที่อยู่ในรูปทรงกลมจึงไม่มี stress concentration zone
- เหล็กหล่อเหนียวมี elongation อยู่ในช่วง 10-20%
- การใช้งาน ได้แก่ ทำเฟือง, วาล์ว, ตัวปั๊มและชิ้นส่วนยานยนต์



Microstructure of Ductile Cast Iron



Microstructure of Ductile Cast Iron



ferrite

Bull-eyed structure

pearlite

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Alloys)

- ถึงแม้ว่าโลหะที่มีการใช้งานมากที่สุดคือเหล็ก แต่เนื่องจากข้อจำกัดบางประการทำให้มีการใช้โลหะนอกกลุ่มเหล็กมาทดแทน ข้อจำกัดเหล่านั้นได้แก่
 - เหล็กมีน้ำหนักมาก (7.86 g/cm^3)
 - เหล็กมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ
 - เหล็กมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ
- ดังนั้นจึงมีการนำโลหะนอกกลุ่มเหล็กมาใช้ทดแทนข้อจำกัดเหล่านี้ เช่น Al และ Mg มีน้ำหนักเบา, Ti alloys มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง, Cu และ Ag นำไฟฟ้าได้ดีมาก

ประเภทของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก

- จำแนกตามวิธีการขึ้นรูป
 - Wrought alloys ขึ้นรูปด้วยแรงทางกล เช่น การรีด, การตีขึ้นรูป ฯลฯ
 - Cast alloys ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ
- จำแนกตามชนิดของโลหะ โลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีการใช้งานมากได้แก่
 - Al เช่น ครอบหมวกต่าง, ลูกสูบรถยนต์, ชิ้นส่วนเครื่องบิน
 - Cu เช่น สายไฟ, ทองเหลือง, บรอนซ์
 - Mg เช่น หน้ากากมือถือ, ส่วนประกอบ notebook, บอร์ดกล้องถ่ายภาพ
 - Ti เช่น gas turbine engine, ข้อต่ออวัยวะเทียม, อุปกรณ์กีฬา, โครงเครื่องบิน

ทองแดงและโลหะผสมทองแดง

- สมบัติที่สำคัญของทองแดง
 - ในสภาพบริสุทธิ์มี Ductility สูงมาก เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC
 - มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง และด้วยการเติมธาตุผสมบางชนิดทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม
 - มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงมาก
 - สามารถนำความร้อนได้ดีมาก
 - มีน้ำหนักมาก (8.92 g/cm^3)
 - จุดหลอมตัวสูงพอประมาณ ($1084 \text{ }^\circ\text{C}$)

ทองแดงและโลหะผสมทองแดง

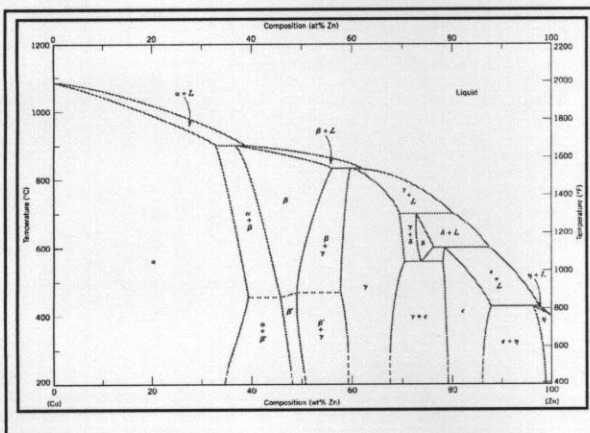
โลหะผสมทองแดงที่มีการใช้งานมากได้แก่

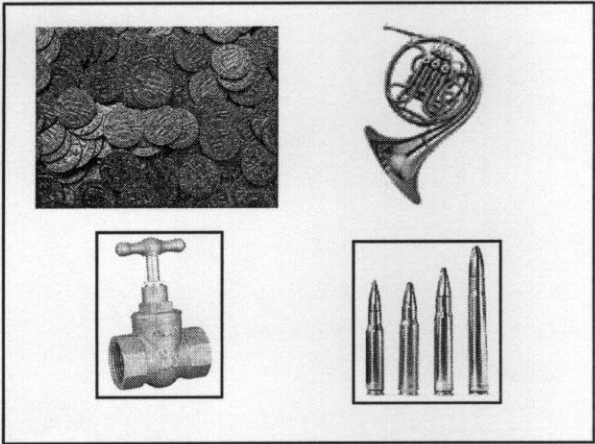
- Brass - ทองเหลือง คือโลหะผสมทองแดงกับสังกะสี (Cu-Zn)
- Bronze - โลหะผสมทองแดงกับธาตุอื่น เช่น Sn, Al, Be, Si, Ni

ทองเหลือง (Brass)

สมบัติเชิงกลของทองเหลืองขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีเป็นหลัก

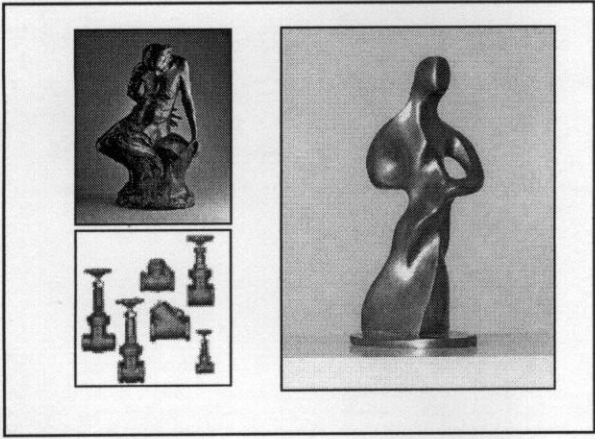
- ที่มีปริมาณ Zn น้อยกว่า 35% ทองเหลืองจะประกอบไปด้วยเฟส α เฟสเดียวซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ทำให้ทองเหลืองที่มี Zn ในช่วงนี้มีสมบัติค่อนข้างเหนียว
- ที่มีปริมาณ Zn มากกว่า 35% ทองเหลืองจะประกอบไปด้วยเฟส $\alpha + \beta'$ ซึ่งเฟส β' มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC ทำให้ทองเหลืองที่มี Zn ในช่วงนี้มีสมบัติที่แข็งแรงมากขึ้นแต่ความเหนียวลดลง ทำให้ส่วนใหญ่จะขึ้นรูปด้วยวิธี Hot work
- ปลอกกระสุนปืน, เหยี่ยวสลิงทำจากทองเหลืองที่มี 30% Zn ซึ่งเป็นทองเหลืองส่วนผสมที่มีการใช้งานมากที่สุด บางครั้งเรียก "Cartridge Brass"
- ทองเหลืองยังมี Zn มากจะมีสีเหลืองซีดและยังมี Zn น้อยจะมีสีเหลืองเข้มจนถึงส้ม





บรอนซ์ (Bronze)

- ธาตุผสมสำหรับบรอนซ์ได้แก่ Sn, Al, Si, Ni, Be เป็นต้น
- โดยทั่วไปบรอนซ์มีความแข็งแรงกว่าทองเหลืองและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าทองเหลืองด้วย นิยมใช้ทำ Bearing
- Cu ผสมกับ 1.0-2.5% Be สามารถทำ Precipitation hardening ได้ ทำให้มีความแข็งแรงสูงกว่าโลหะผสมทองแดงทั่วไป (UTS = 1140-1300 MPa โดยที่โลหะผสมทองแดงทั่วไปมี UTS อยู่ในช่วง 300-600 MPa)



อะลูมิเนียมและ โลหะผสมอะลูมิเนียม

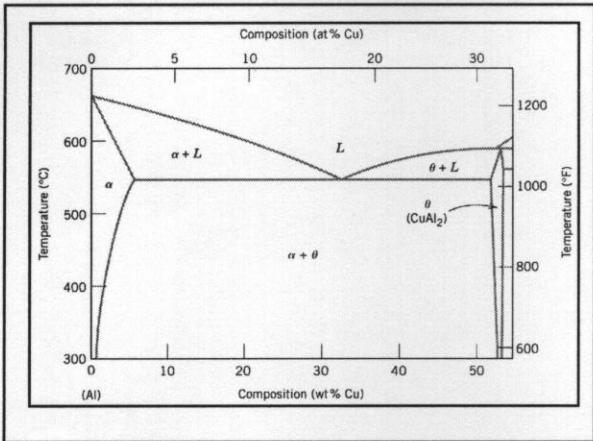
- สมบัติที่สำคัญของอะลูมิเนียม
 - มีน้ำหนักเบา (2.7 g/cm^3)
 - มีจุดหลอมตัวต่ำ ($660 \text{ }^\circ\text{C}$) ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ได้
 - นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แต่น้อยกว่าทองแดง
 - มี Ductility สูงมากเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC
 - มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงในบรรยากาศปกติ

อะลูมิเนียมและ โลหะผสมอะลูมิเนียม

- จำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ
 - Wrought Alloys ขึ้นรูปด้วยแรงทางกล ธาตุผสมเช่น Cu, Mg
 - Cast Alloys ขึ้นรูปด้วยการหล่อ เช่น Al-7.0%Si มีความสามารถในการหล่อที่ดีมาก

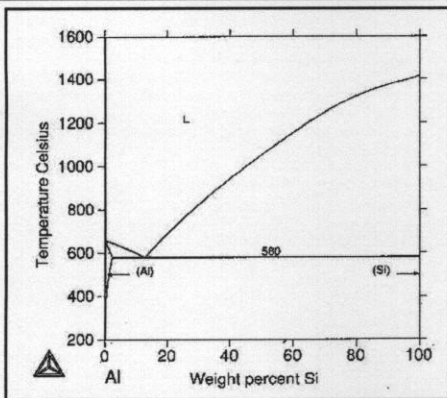
โลหะผสม Al-Cu

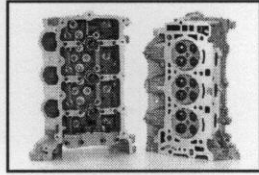
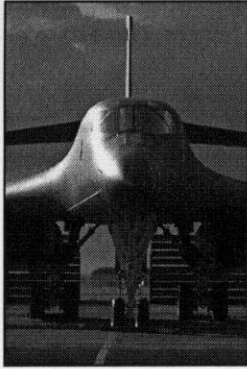
- เมื่อเติม Cu ลงใน Al ประมาณ 3-4%Cu จะทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถทำ Precipitation Hardening ได้ ทำให้ได้ความแข็งแรงสูงกว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมทั่วไป (UTS = 400 - 500 MPa ในขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมทั่วไป UTS = 100-250 MPa)
- มีราคาสูง นำไปใช้เป็นตัวถังเครื่องบินเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง (High specific strength)
- Specific Strength = $\frac{\sigma_{UTS}}{\rho}$



โลหะผสม Al-Si

- Al ยอมให้ Si ละลายในสภาพสารละลายของแข็งได้น้อยมาก โดยความสามารถในการละลายสูงสุดที่ 577 °C เท่ากับ 1.65% Si และลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ในทำนองเดียวกัน Al แทบจะไม่สามารถละลายใน Si ได้เลย
- โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยสารละลายของแข็ง α (Al-rich) และ β (Si) ซึ่งเฟส β ค่อนข้างแข็งและทำให้โลหะผสมที่มีปริมาณ Si มากเปราะและต้องขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ
- โลหะผสมชนิดนี้สามารถทำ precipitation hardening ได้แต่น้อยไม่มากนัก มี Tensile strength อยู่ในช่วง 200-250 MPa
- ส่วนผสมทั่วไป Al-7.0%Si-0.3Mg



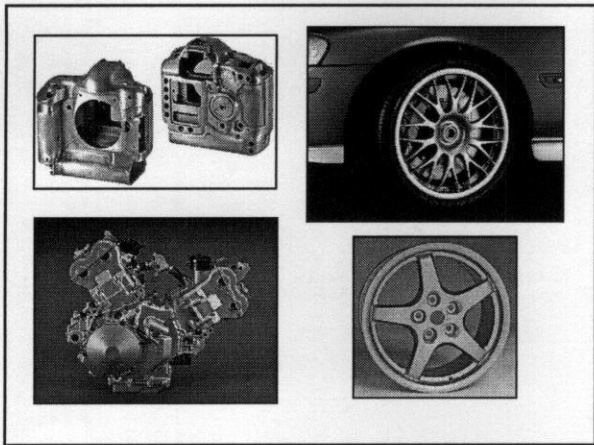


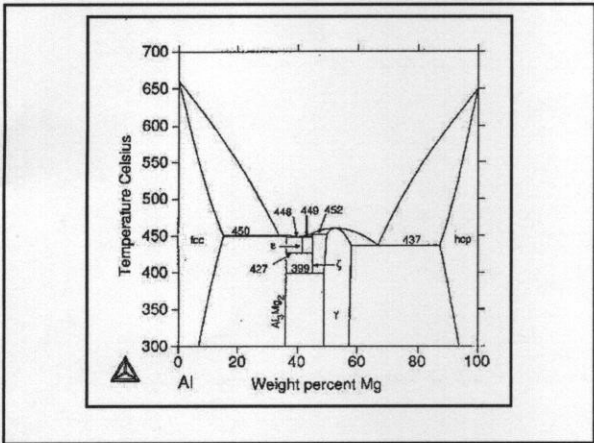
แมกนีเซียมและ โลหะผสมแมกนีเซียม

- สมบัติที่สำคัญของแมกนีเซียม
 - มีน้ำหนักเบามาก (1.7 g/cm^3)
 - มีความเหนียวต่ำเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบ HCP
 - จุดหลอมตัวต่ำ ($651 \text{ }^\circ\text{C}$) ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ได้
 - มี Young's Modulus ต่ำ (45 GPa)
 - มีความต้านทานการกัดกร่อนดีพอสมควรในบรรยากาศปกติ แต่จะต้านทานการกัดกร่อนต่ำมากในบรรยากาศน้ำทะเล

โลหะผสม Mg-Al

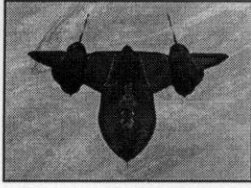
- เป็นโลหะผสมแมกนีเซียมที่มีการใช้งานมากโดยใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์
- ที่อุณหภูมิปกติ Mg ให้ Al ละลายได้ถึง 12.7% แต่ที่อุณหภูมิห้องความสามารถในการละลายลดลงเหลือ 3.2% โดยจะตกผลึกเป็น intermetallic compound $\gamma \text{ (Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ ซึ่งมีสมบัติที่ค่อนข้างแข็งจากพฤติกรรมนี้ทำให้โลหะผสมชนิดนี้สามารถทำ Precipitation hardening ได้
- Tensile strength มีค่าอยู่ในช่วง 200-300 MPa





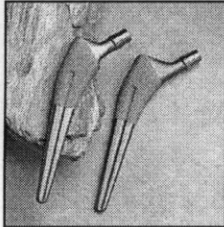
ไททาเนียมและโลหะผสมไททาเนียม

- สมบัติที่สำคัญของไททาเนียม
 - น้ำหนักเบา (4.5 g/cm^3)
 - จุดหลอมตัวสูง ($1660 \text{ }^\circ\text{C}$)
 - Young's Modulus สูง (107 GPa)
 - Tensile Strength สูง (1000-1200 MPa)
 - เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ง่ายมาก ทำให้กระบวนการต่างๆ ที่อุณหภูมิสูงทำได้ยากและมีต้นทุนสูงมาก
 - ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนสูงมากทั้งในบรรยากาศปกติและน้ำทะเล
 - มีความเหนียวพอประมาณสามารถขึ้นรูปและกลึงได้



"Blackbird"

การนำ Ti มาใช้ในงานวิศวกรรมเริ่มต้นในยุค 1950 โดยในช่วงแรกเริ่มต้นจากการทหารโดยนำมาใช้ทำตัวถังเครื่องบินสำรวจ Lockheed SR-71 "Blackbird" ซึ่งตัวเครื่องจะต้องบินเร็วด้วยความเร็วเสียงถึง 3 เท่า ทำให้เกิดความร้อนมากจนไม่สามารถใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมได้ จึงนำโลหะผสมไททาเนียมมาใช้แทนเพราะมีจุดหลอมตัวที่สูงกว่า

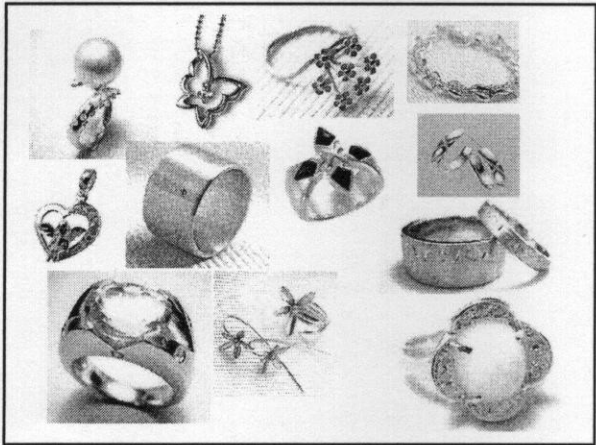


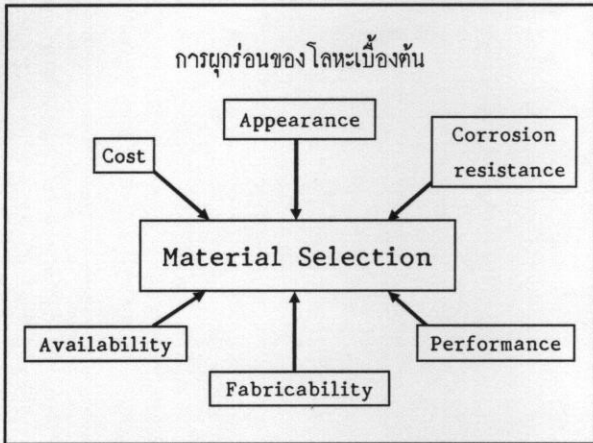
กระดุกเทียมทำจาก
Ti-6Al-4V

เนื่องจาก ไททาเนียมมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่สูงมากทำให้สามารถนำไปใช้งานทางการแพทย์ได้ดี เพราะมีน้ำหนักเบาและแข็งแรง

โลหะมีค่า

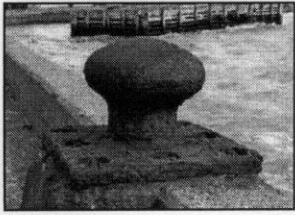
- ใ้แก่ ทอง (Au), เงิน (Ag), Platinum (Pt), Palladium (Pd)
- สมบัติที่สำคัญ
 - แพง
 - เหนียวมากและความแข็งแรงต่ำ ขึ้นรูปได้ง่าย
 - ไม่เกิด oxidation ในบรรยากาศ → สวย
- ทองและเงินสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการเติม Cu
- สำหรับ Ag บผสมทองแดงประมาณ 7.5%Cu เรียกว่า Sterling Silver
- Ag, Au, Pd ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ระดับ
- Ag นำไฟฟ้าได้ดีมากทำให้ถูกนำไปใช้ทำสายไฟในเครื่องเสียงราคาแพง
- Ag และ Au ใช้ทำ electrical contact คุณภาพสูงเพราะไม่เกิดออกไซด์เมื่อใช้งานไปนานๆ
- Ag และ Au ใช้ทำเป็นฟิล์มลอม





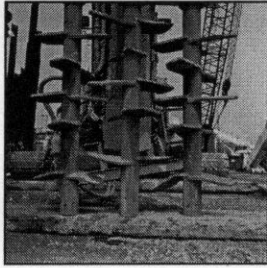
- ประเภทของการกัดกร่อน
- Uniform Corrosion
 - Galvanic Corrosion
 - Crevice Corrosion
 - Pitting Corrosion
 - Intergranular Corrosion
 - Selective Leaching Corrosion
 - Erosion Corrosion
 - Stress Corrosion
 - Hydrogen Damage

Uniform Corrosion



เป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะมากที่สุด โดยเกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นงาน

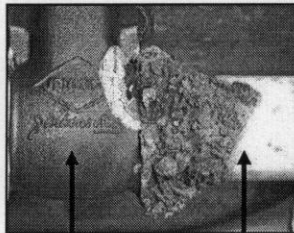
อย่างไรก็ตามการกัดกร่อนแบบนี้สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ จึงไม่ใช่รูปแบบที่น่าเป็นห่วง



การป้องกันการกัดกร่อนรูปแบบนี้
ได้แก่

- เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม
- เคลือบผิวหรือทาสี

Galvanic Corrosion



brass

steel

เมื่อโลหะสองชนิดสัมผัสกัน และมี
Electrolyte สัมผัสกับโลหะทั้งสอง
ชนิด จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า และโลหะที่มี
ความเสถียรต่ำกว่าจะเป็น Anode โลหะ
ที่มีความเสถียรสูงกว่าจะเป็น Cathode

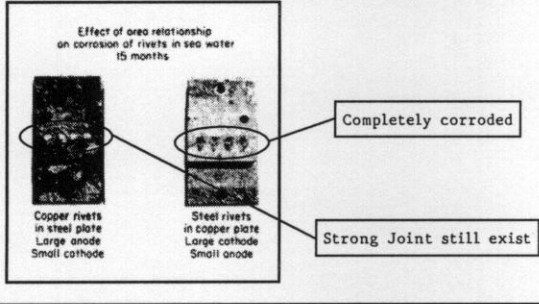
Anode → อับครรณ
Cathode → คงระพัน

Table 3-1 Standard emf series of metals

	Metal-metal ion equilibrium (unit activity)	Electrode potential vs. normal hydrogen electrode at 25°C, volts
↑ Noble or cathodic	Au-Au ⁺	+1.498
	Pt-Pt ⁺	+1.2
	Pd-Pd ⁺	+0.987
	Ag-Ag ⁺	+0.799
	Hg-Hg ₂ ⁺	+0.788
	Cu-Cu ⁺	+0.337
	H ₂ -H ⁺	0.000
	Pb-Pb ⁺	-0.126
	Sn-Sn ⁺	-0.136
	Ni-Ni ⁺	-0.250
	Co-Co ⁺	-0.277
	Cd-Cd ⁺	-0.403
	Fe-Fe ⁺	-0.440
	Cr-Cr ⁺	-0.744
	Zn-Zn ⁺	-0.763
↓ Active or anodic	Al-Al ⁺	-1.662
	Mg-Mg ⁺	-2.363
	Na-Na ⁺	-2.714
	K-K ⁺	-2.925

"Area Effect"

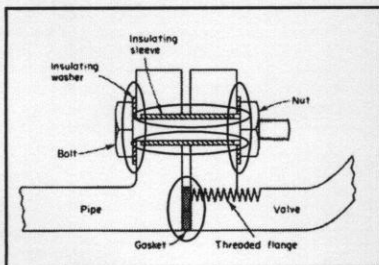
Anode/Cathode ใหญ่ Current Density น้อย Corrosion rate ต่ำ
 Anode/Cathode เล็ก Current Density สูง Corrosion rate สูง



ถ้าหากเชื่อมต่อ โลหะสองชนิดเข้าด้วยกัน การเคลือบผิวบริเวณโลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าจะก่อให้เกิดผลเสีย เนื่องจากทำให้ Anode มีพื้นที่ผิวเล็กลง

และควรเคลือบผิวบริเวณโลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า เนื่องจากจะทำให้ Cathode มีพื้นที่เล็กลง

การป้องกัน Galvanic Corrosion



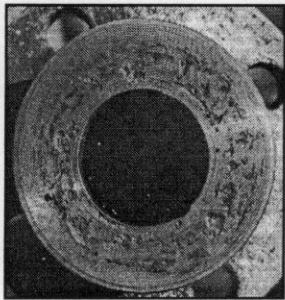
ใช้ Gasket คั่นระหว่างโลหะทั้งสองชนิด

การใช้ประโยชน์จากความรู้เรื่อง Galvanic Corrosion



การใช้สังกะสีเคลือบแผ่นเหล็ก (Galvanized Steel) สังกะสีมีความเสถียรน้อยกว่าเหล็กจึงถูกกัดกร่อนไป แต่เหล็กยังคงสภาพได้ในทางตรงกันข้ามถ้าเคลือบแผ่นเหล็กด้วยดีบุก เหล็กจะถูกกัดกร่อนก่อนการใช้โลหะที่มีความเสถียรน้อยกว่ามาช่วยป้องกันการกัดกร่อนเรียกว่า "Sacrificial Anode"

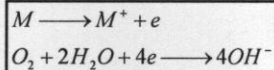
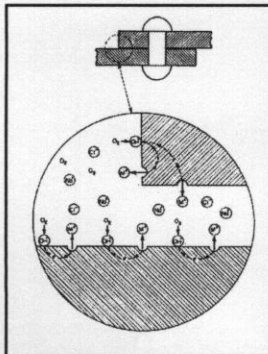
Crevice Corrosion



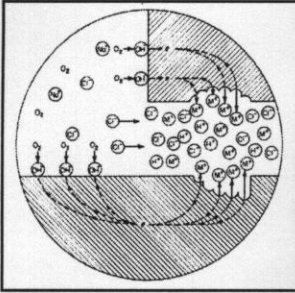
เป็นการบุกกร่อนเฉพาะบริเวณ (Localized Corrosion) ซึ่งทำให้เกิดปัญหามากกว่า Uniform Corrosion

Crevice Corrosion จะเกิดตามซอก หลืบ หน้าแปลน หรือบริเวณที่ทำให้ของไหลเกิด "Stagnant flow"

กลไกการเกิด Crevice Corrosion

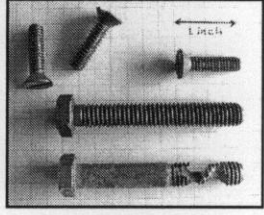


เมื่อปฏิกิริยาค่าเนินไปจะทำให้ Oxygen ถูกใช้ไป บริเวณนอก Crevice จะมีการหมุนเวียนของไหล ทำให้ยังคงมี Oxygen อยู่ แต่ใน Crevice จะไม่มีการเพิ่มเติม Oxygen ทำให้เกิด "Concentration cell"



ถ้าในสารละลายมี Cl^- เช่น น้ำเกลือ หรือ น้ำทะเลจะยิ่งเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น โดยภายใน Crevice จะมี pH ต่ำมาก

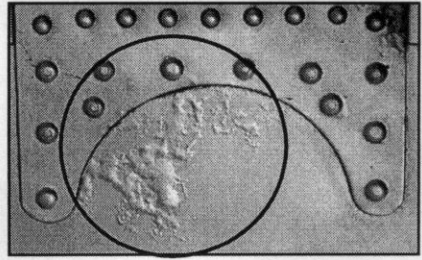
ภายในซอก	Anode	อันครซาน
ภายนอกซอก	Cathode	คทกรพ่น



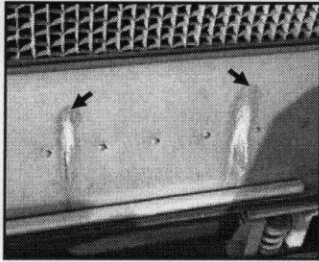
การป้องกัน Crevice Corrosion

1. ใช้การเชื่อมแทนการใช้ Rivet หรือน็อต
2. ปิดช่องซอก หลืบ ร่อง จากสารละลาย
3. ใช้ปะเก็นที่ไม่ดูดซับความชื้น
4. ถ้ายางของเหลวออกจากระบบท่อหรือภาชนะ หากไม่ใช้งานเป็นเวลานาน และออกแบบภาชนะให้สามารถระบายของเหลวออกได้หมด
5. ตรวจสอบและกำจัดสารตกค้างในภาชนะ ซึ่งอาจทำให้เกิด stagnant flow ในภาชนะได้

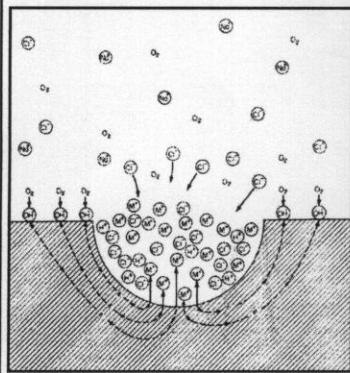
ในบางครั้ง Crevice corrosion อาจเกิดที่ผิวเคลือบได้ โดยความชื้นซึมผ่านผิวเคลือบลงไปทำให้เกิด Corrosion product และคันให้ผิวเคลือบโป่งพอง ด้วยเหตุนี้จึงต้องการหาสีรองพื้นกันสนิมหรือเคลือบชั้น phosphate ป้องกันสนิม



Pitting Corrosion



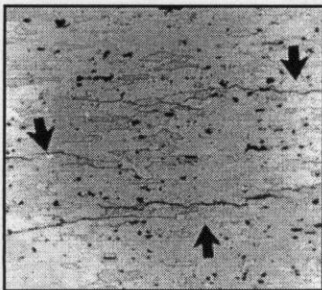
เป็นรูปแบบ Corrosion ที่ร้ายแรง เกิดเป็นบริเวณแคบและกินลึกไปในเนื้อโลหะเป็นหลุม (Pit) ตรวจพบได้ยาก เนื่องจากมีขนาดเล็กและมักจะถูกปกคลุมด้วยสนิม มักจะเกิดในแนวคิ่งมากกว่าแนวราบ



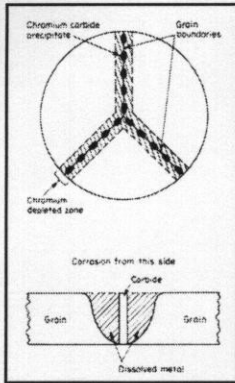
กลไก คล้ายคลึงกับ Crevice corrosion คือเมื่อเกิดหลุมขึ้น บริเวณภายในหลุมจะมีปริมาณ Oxygen น้อยกว่าภายนอก กลายเป็น Concentration cell และภายในหลุมกลายเป็น Anode นอกหลุมเป็น Cathode

Anode อันตรธาน
Cathode คงระพัน

Intergranular Corrosion

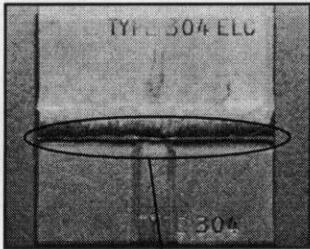


เกิดขึ้นในกรณีที่ขอบเกรนมีความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าภายในเกรน



กรณีศึกษา

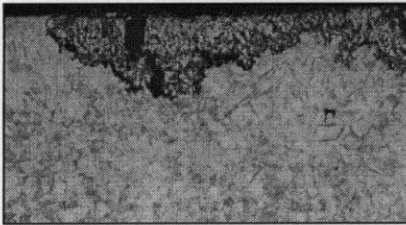
Stainless steel มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงจากการมีปริมาณ Cr เกิน 13% ทำให้เกิด Oxide film ปกป้องเนื้อเหล็ก
 ในการเชื่อม stainless steel จะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนสูงและ Cr กับ C รวมตัวกันเป็น $Cr_{23}C_6$ และทำให้บริเวณรอบ ๆ รอยเชื่อมมี Cr ต่ำลง มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ เกิดสนิม



การแก๊ซ
 ทำให้โดยเลือกใช้ stainless steel ที่มี C ต่ำเช่น 304L แทน 304 หรือทำให้บริเวณรอยเชื่อมเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยการชุบน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้ Cr รวมตัวกับ C

Weld Decay

Selective Leaching Corrosion

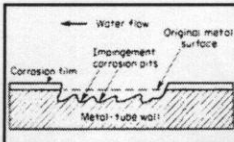


ตัวอย่างของ selective leaching ได้แก่ dezincification ซึ่งเกิดขึ้นกับ Brass โดยสารละลายทำให้ทองเหลืองละลายออกมาแล้วทองแดงเท่านั้นที่ตกตะกอนกลับไปซ้ำใหม่แต่สังกะสีจะละลายอยู่ในสารละลายเช่นเดิม

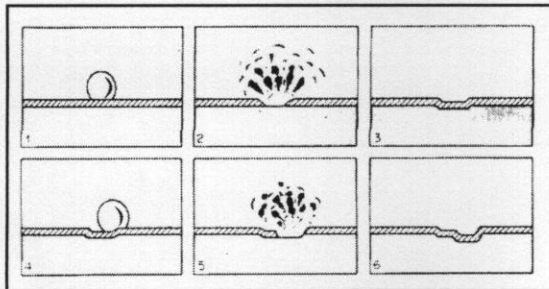
Erosion Corrosion



เกิดขึ้นในกรณีที่ชิ้นส่วนโลหะถูก
 ให้นำใช้งานในของเหลวที่มีการ
 ไหลด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิด
 "impingement" กัดเซาะ
 โลหะไปตามทิศทางการไหลของ
 ของเหลว



เมื่อของเหลวมีแรงดันสูงจะทำให้
 เกิดฟองอากาศ และฟองอากาศที่
 กระทบชิ้นส่วนโลหะจะแตกออก
 ด้วยแรงดันสูงทำให้โลหะถูกกัด
 เซาะไป



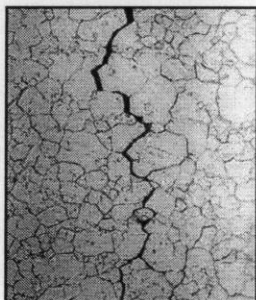
Stress Corrosion



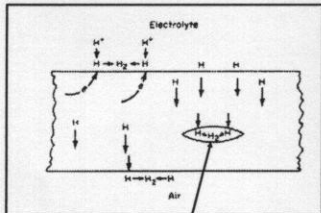
เมื่อโลหะได้รับความเค้นภายใต้บรรยากาศเฉพาะจะเกิดการแตกได้ เรียกว่า "Stress Corrosion Cracking"

บรรยากาศที่ไม่เหมาะสม

- Al alloys น้ำเกลือ, น้ำทะเล
- Cu alloys NH_3
- Steel $NaOH, NH_3$
- Stainless Cl^- solution
- Ti alloys Methanol, HCl
- 70Ni-30Cu HF
- Mg alloys น้ำทะเล

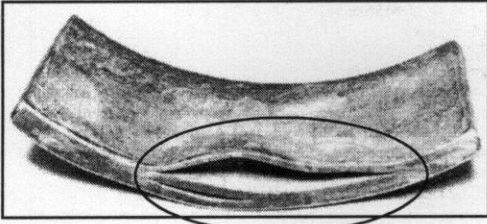


Hydrogen Damage



ช่องว่าง

เกิดจากเมื่อน้ำโลหะไปใช้งานภายใต้บรรยากาศที่มี H_2 อะตอมของ H จะมีขนาดเล็กและแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อโลหะได้ และไปสะสมตัวบริเวณที่เป็นช่องว่าง เปลี่ยนกลายเป็น H_2 อีกครั้ง เมื่อมีแรงดันสูงพอจะดันให้เกิดรอยพุพอง



Hydrogen Blistering

"Hydrogen Embrittlement" เกิดจากการที่ไฮโดรเจนแพร่ซึมเข้าสู่เนื้อโลหะแล้วเกิดเป็นสารประกอบ Hydride ซึ่งค่อนข้างเปราะทำให้ชิ้นส่วนเสียหายจากการได้รับแรงกระแทก

แหล่งที่มาของไฮโดรเจน

- Operate in hydrogen atmosphere
- Acid pickling
- Electroplating
- Cathodic Protection
- Corrosion Reaction
