

อภินันทนาการ

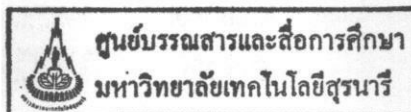
เอกสารประกอบการสอน
รายวิชา 431101 วัสดุวิศวกรรม

ส่วนที่ 1:
วัสดุโลหะ

โดย

อาจารย์สารัมภ์ บุญมี

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 ประวัติและธรรมชาติของวัสดุโลหะ สมบัติเชิงกลพื้นฐานของโลหะ	1
บทที่ 2 แผนภูมิสมมูลของโลหะผสม	23
บทที่ 3 แผนภูมิสมมูลของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์	39
บทที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะ	50
บทที่ 5 กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า	62
บทที่ 6 กระบวนการอบชุบโลหะด้วยความร้อน	79
บทที่ 7 ประเภทของวัสดุโลหะและโลหะในกลุ่มเหล็ก	90
บทที่ 8 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	101

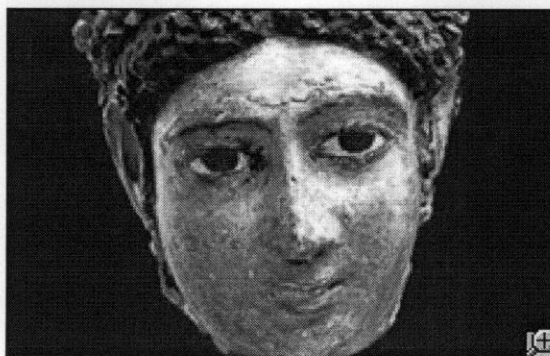
บทที่ 1

ประวัติและธรรมชาติของวัสดุโลหะ สมบัติเชิงกลพื้นฐานของโลหะ

อ. สารัมภ์ บุญมี

1.1 ประวัติของโลหะ

โลหะวิทยาเป็นหนึ่งในวิชาทางวิทยาศาสตร์ที่มีความเก่าแก่มากที่สุด ซึ่งสามารถย้อนกลับไปได้ถึง 6000 ปีก่อนคริสตกาล ปัจจุบันนี้มีโลหะที่รู้จักกันอยู่ 86 ชนิด ซึ่งก่อน ค.ศ. 1900 มีโลหะที่รู้จักเพียงแค่ 24 ชนิด และใน 24 ชนิดนี้มี 17 ชนิดที่ค้นพบในช่วง ค.ศ. 1700 ดังนั้นจึงมีโลหะเพียง 7 ชนิดเท่านั้นที่มีการค้นพบนับแต่อดีตกาลก่อนประวัติศาสตร์จนถึงปี ค.ศ. 1700 ซึ่งได้แก่ ทอง, ทองแดง, เงิน, ตะกั่ว, ดีบุก, เหล็กและปรอท ซึ่งโลหะในกลุ่มนี้มีหลายชนิดที่พบในสภาพโลหะในธรรมชาติได้แก่ ทอง, เงิน, ตะกั่ว, ปรอทและเหล็ก (ในอุกกาบาต) โลหะเหล่านี้ถูกใช้ในอารยธรรมเมโสโปเตเมีย, อียิปต์, โรมันมาเป็นเวลานาน ยกตัวอย่างเช่น ตะกั่วถูกใช้ในรูปของ Lead Sulphide หรือแร่ Galena ซึ่งในวัฒนธรรมอียิปต์ใช้เป็นเครื่องสำอางในการแต่งหน้า ในยุคที่มีการใช้งานโลหะเหล่านี้ก็จะถูกตั้งชื่อยุคตามวัสดุที่มีการใช้อย่างแพร่หลายด้วย เช่น ยุคหิน, ยุคบรอนซ์, ยุคเหล็ก เป็นต้น

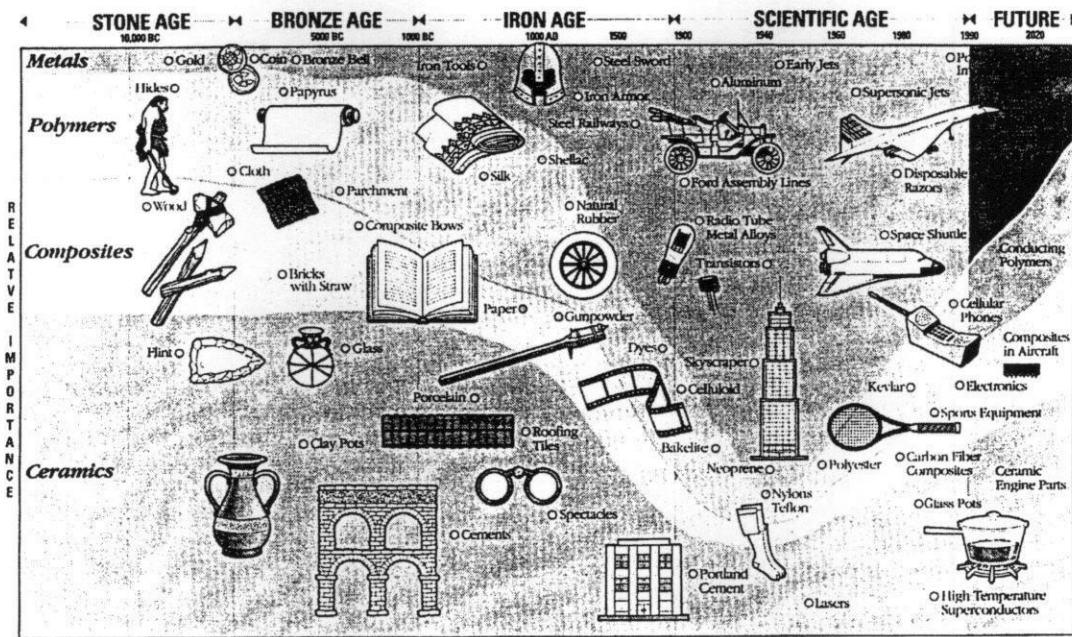


ภาพ 1.1 เครื่องสำอางสำหรับทาขอบดวงตาของชาวอียิปต์
มีส่วนประกอบมาจากตะกั่วซัลไฟด์

โลหะเช่น ทอง, เงินและทองแดง มีความแข็งแรงต่ำแต่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย เนื่องจากมีความเหนียวสูง สำหรับทองและเงินนั้นมีความสวยงามจึงถูกนำไปใช้เป็นเครื่องประดับและเหรียญกษาปณ์ แต่ในทางวิศวกรรมแล้วทองมีประโยชน์ค่อนข้างน้อย ในขณะที่เงินและทองแดงสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี เมื่อระยะเวลาผ่านไปความรู้ทางด้านโลหะวิทยาเพิ่มพูนขึ้น โดยใน

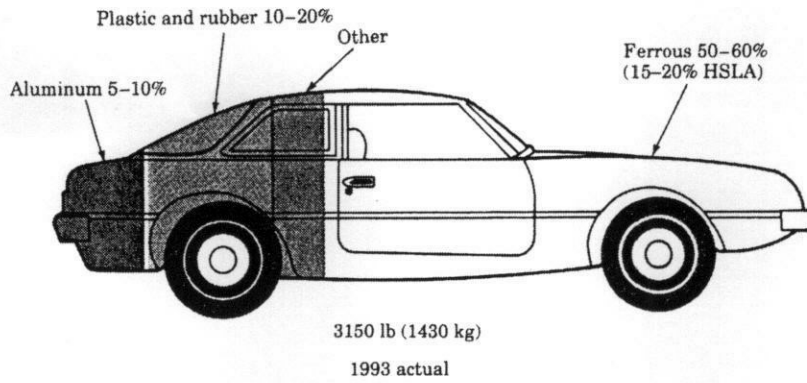
บางช่วงจะมีการเร่งพัฒนาที่สูงมากกว่าปกติ เช่น การปฏิวัติอุตสาหกรรมและสงครามโลก ทำให้อุปกรณ์ทางวิศวกรรมและยุทธโศปกรณ์มีศักยภาพสูงขึ้นตามไปด้วย

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการพัฒนาความรู้ทางด้านวัสดุศาสตร์และโลหะวิทยานั้น ควบคู่ไปกับการพัฒนาของเทคโนโลยี เมื่อมีวัสดุใหม่ ๆ ที่มีความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา ก็จะทำให้ข้ามขีดจำกัดทางเทคโนโลยีไปด้วย เช่น กระจวยอวกาศต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ในขณะที่เดียวกันก็ต้องการความแข็งแรงและทนความร้อนได้สูงด้วย นอกจากนี้ยังต้องสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและ/หรือมีราคาไม่แพงด้วย



ภาพ 1.2 วิวัฒนาการของโลหะและวัสดุ

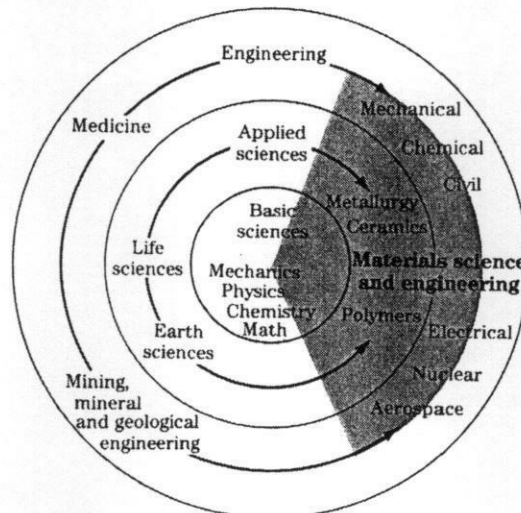
ตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นพัฒนาการของโลหะและวัสดุคือน้ำหนักของรถยนต์ เพื่อที่จะประหยัดพลังงานรถยนต์ควรมีน้ำหนักเบา น้ำหนักของรถยนต์ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ อย่างไรก็ตามวัสดุที่นำมาใช้นั้นก็ต้องมีความแข็งแรงพอเพียงที่จะทำหน้าที่ของมันได้เช่นในส่วนของเครื่องยนต์ก็ต้องทนความร้อนและรับแรงกระแทกได้ดี น้ำหนักรวมเฉลี่ยของรถยนต์ในสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1977 นั้นเท่ากับ 1800 kg ซึ่งประกอบไปด้วยเหล็กกล้าและเหล็กหล่อประมาณ 70% ที่เหลือได้แก่พลาสติกและยางประมาณ 10-20% อลูมิเนียมประมาณ 3% แต่ในปี ค.ศ. 1993 น้ำหนักรวมเฉลี่ยของรถยนต์ในสหรัฐอเมริกาเท่ากับ 1430 kg ซึ่งประกอบไปด้วยเหล็กกล้าและเหล็กหล่อประมาณ 50-60% พลาสติกและยางประมาณ 10-20% และอลูมิเนียมประมาณ 5-10% จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของรถยนต์มีแนวโน้มลดลงแต่รถยนต์ในปัจจุบันกลับมีสมรรถนะดีกว่ารถยนต์ในอดีต



ภาพ 1.3 โลหะและวัสดุในรถยนต์ในปี ค.ศ. 1993

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโลหะวิทยาและสาขาวิชาอื่น

หากลองมองรอบตัวเรา จะพบว่าวัสดุล้วนอยู่ในชีวิตประจำวันของเราไปจนถึงเครื่องจักร และโครงสร้างขนาดใหญ่ ในทางด้านวิศวกรรมโลหะถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบเครื่องยนต์, เครื่องจักรกล, โครงสร้าง, วัสดุก่อสร้าง มากมายหลายอย่าง ภาพ 1.4 เป็นแผนภาพที่แสดงให้เห็นว่าความรู้ทางด้านวิศวกรรมวัสดุและโลหะนั้นเกี่ยวเนื่องกับความรู้ทางวิทยาศาสตร์ทั่วไปและความรู้ทางด้านวิศวกรรมสาขาอื่น ๆ อย่างไร จะเห็นได้ว่าวิศวกรรมวัสดุนั้นเป็นสะพานเชื่อมระหว่างวิทยาศาสตร์พื้นฐาน (คณิตศาสตร์, ฟิสิกส์, เคมี) กับวิศวกรรมทั่วไป (วิศวกรรมเครื่องกล, เหมืองแร่, โยธา, เคมี, สิ่งแวดล้อม, ไฟฟ้า ฯลฯ) รวมไปถึงการแพทย์ สำหรับโลหะที่ถูกนำมาใช้ในงานอย่างแพร่หลายคือ เหล็กหล่อ, เหล็กกล้า, อลูมิเนียม, ทองแดง, สังกะสีและแมกนีเซียม, นิกเกิล, ไทเทเนียม เป็นต้น



ภาพ 1.4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิศวกรรมวัสดุและสาขาวิชาแขนงอื่น

1.3 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุโลหะ

การเลือกวัสดุโลหะมาใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ราคา, ความแข็งแรง, ความยากง่ายในการขึ้นรูป, ความทนทาน, น้ำหนัก, ความสวยงาม เป็นต้น ยกตัวอย่างของการเลือกวัสดุมาใช้งานเช่น การเลือกวัสดุมาทำเป็นสายไฟฟ้า ปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดคือวัสดุนั้นต้องมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งได้แก่ เงินและทองแดง และต้องสามารถขึ้นรูปเป็นสายไฟฟ้าได้ง่ายอีกด้วย ซึ่งทั้งเงินและทองแดงก็สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ปัจจัยอันดับต่อมาคือราคา เนื่องจากเงินมีราคาแพงและสายไฟฟ้าต้องมีการผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก ในด้านความสวยงามถึงแม้ว่าเงินจะดูสวยงามกว่าแต่สายไฟฟ้าต้องมีการเคลือบผิวด้วยวัสดุพอลิเมอร์ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อเป็นฉนวน ดังนั้นความสวยงามของเงินจึงไม่เป็นปัจจัยที่สำคัญในกรณีนี้ ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้ทองแดงซึ่งมีราคาถูกกว่าจึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุของสายไฟฟ้ามากกว่า ถึงแม้เงินจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเล็กน้อยก็ตาม

ตัวอย่างอื่นในการเลือกวัสดุ เช่น กล้องถ่ายภาพ ตัวโครงสร้างของกล้องถ่ายภาพระดับมืออาชีพทำจากโลหะผสมแมกนีเซียมซึ่งมีความแข็งแรง, เบา สามารถรับแรงกระแทกได้พอสมควร ส่วนวัสดุที่ใช้ทำบริเวณที่จับถือทำจากพอลิเมอร์ซึ่งมีน้ำหนักเบา จับแล้วให้ความรู้สึกสบายมือ โดยถ้านำไปใช้งานในเขตที่มีอากาศหนาวเย็นจะไม่ทำให้เย็นมือเหมือนกับการจับโลหะหรือเซรามิกโดยตรง ตัวเลนส์ที่ใช้ในการรับภาพทำจากแก้วที่มีคุณภาพสูงซึ่งมีความโปร่งแสง



ภาพ 1.5 การเลือกใช้วัสดุสำหรับกล้องถ่ายภาพ



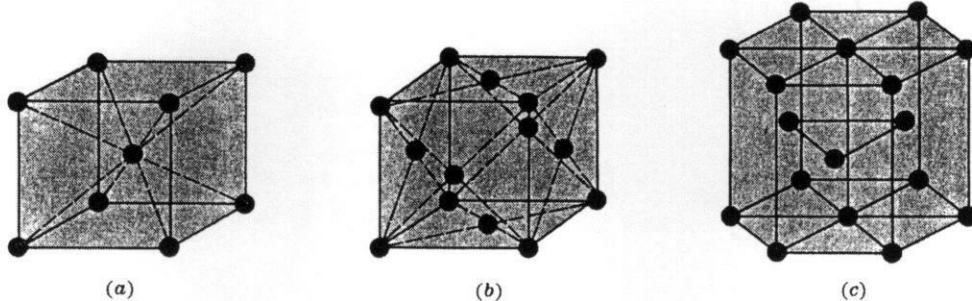
ภาพ 1.6 หน้ากากโทรศัพท์มือถือทำจากโลหะผสมแมกนีเซียม



ภาพ 1.7 หัวไม้กอล์ฟทำจาก Ti-6Al-4V

1.4 โครงสร้างผลึกของโลหะ

โครงสร้างผลึกพื้นฐานของโลหะได้แก่ Body Center Cubic (BCC), Face Center Cubic (FCC) และ Hexagonal Close-Packed (HCP) (ภาพ 1.8)



ภาพ 1.8 โครงสร้างผลึกพื้นฐานของโลหะ a) BCC b) FCC c) HCP

1.4.1 Body Center Cubic (BCC)

โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC ยกตัวอย่างเช่น เหล็ก, โครเมียม, ทังสเตน เป็นต้น พิจารณา unit cell แบบ BCC ในภาพ 1.9a) unit cell นี้ประกอบไปด้วยอะตอมซึ่งเป็นทรงกลมอยู่ตรงกลาง unit cell และมีอะตอมข้างเคียง 8 อะตอมอยู่ตามมุมของ unit cell หากสมมติให้อะตอมมีลักษณะเหมือนลูกปิงปองเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น โครงสร้างผลึกแบบ BCC จะมีลักษณะตามภาพ 1.8b) เมื่อตัดเอา unit cell ออกมาเพียง cell เดียวก็จะได้ภาพตัดดังภาพ 1.9c) ดังนั้นหากคำนวณหาความยาวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ ($\sqrt{3}a$) จะมีความยาวเท่ากับสี่เท่าของรัศมีของอะตอม ($4R$) (ดูภาพ 1.10 ประกอบ) ค่า a คือ lattice constant ของโลหะแต่ละชนิด ตาราง 1.1 แสดงค่า lattice constant และรัศมีอะตอมของโลหะที่มีโครงสร้างผลึก BCC

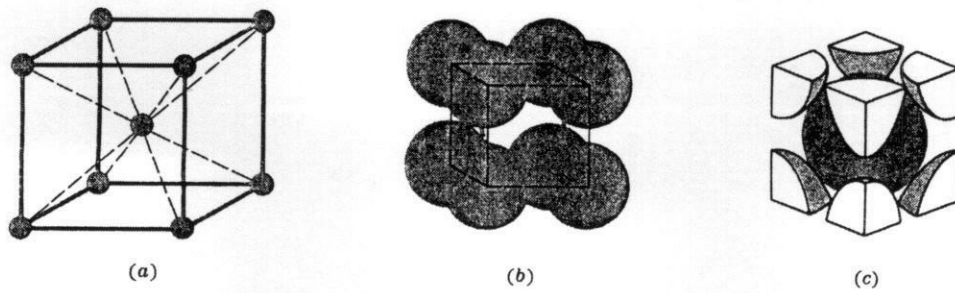
จาก

$$\sqrt{3}a = 4R$$

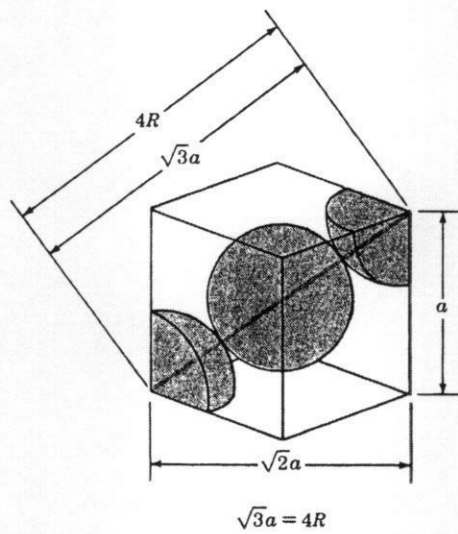
สำหรับเหล็ก จากตาราง 1.1 $R = 0.124 \text{ nm}$

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} = \frac{4(0.124)}{\sqrt{3}} = 0.2864 \text{ nm}$$

สำหรับค่า Atomic Packing Factor (APF) = $\frac{\text{Volume of atom in unit cell}}{\text{Volume of unit cell}}$



ภาพ 1.9 Unit cell ของโครงสร้างผลึกแบบ BCC



ภาพ 1.10 นิยามค่า a และมิติของ unit cell แบบ BCC

ตาราง 1.1 ค่า lattice constant และรัศมีอะตอมของโลหะที่มีโครงสร้างผลึก 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

ค่า APF เป็นตรรกะที่บ่งบอกว่าการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกนั้น ๆ มีความหนาแน่นเท่าใด สำหรับ BCC

Volume of atom in unit cell (V_{atom}) เท่ากับ

$$V_{atom} = (2)\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) = 8.373R^3$$

Volume of unit cell (V_{unit}) เท่ากับ

$$V_{unit} = a^3$$

โดยที่ a คือ lattice constant สำหรับ BCC

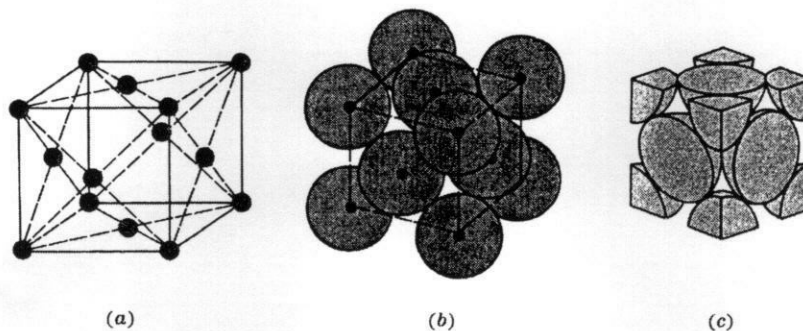
$$\sqrt{3}a = 4R$$

ดังนั้น

$$APF = \frac{V_{atom} / unitcell}{V_{unit}} = \frac{8.373R^3}{12.32R^3} = 0.68$$

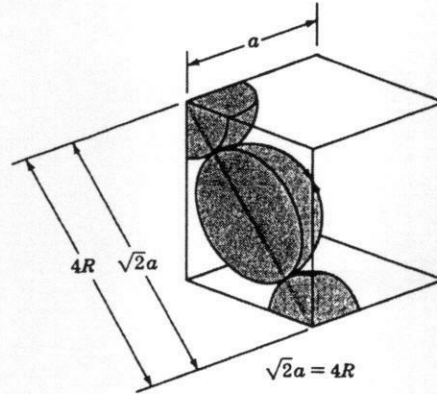
1.4.2 Face Center Cubic (FCC)

โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ที่สำคัญ ๆ ได้แก่ อะลูมิเนียม, ทองแดง, เงิน, ทอง และ เหล็กที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น โลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC มักจะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ภาพ 1.11 แสดง unit cell และการเรียงตัวของอะตอมใน unit cell ของโครงสร้างผลึกแบบ FCC โครงสร้างผลึกแบบ FCC ต่างจากโครงสร้างผลึกแบบ BCC โดยจะมีอะตอมอยู่บนหน้าของลูกบาศก์เส้นทแยงมุมของหน้าของลูกบาศก์ที่มีความยาวเท่ากับ $\sqrt{2}a$ ซึ่งจะเท่ากับสี่เท่าของรัศมีอะตอม (ดูภาพ 1.12 ประกอบ) ตาราง 1.2 แสดงค่า lattice constant และรัศมีอะตอมของโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC



ภาพ 1.11 Unit cell ของโครงสร้างผลึกแบบ FCC

เมื่อนำเงื่อนไข $\sqrt{2}a = 4R$ ไปคำนวณหาค่า APF จะได้ค่าเท่ากับ 0.74 ซึ่งมีค่ามากกว่า APF ของโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC ซึ่งค่า APF เท่ากับ 0.74 เป็นค่าการเรียงตัวที่มีความหนาแน่นมากที่สุดในทางทฤษฎีที่ทรงกลมจะบรรจุลงในลูกบาศก์ได้



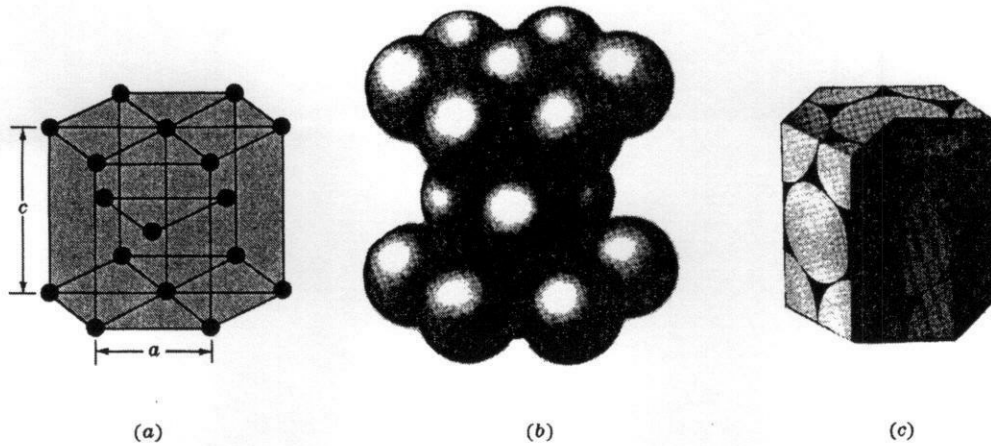
ภาพ 1.12 นิยามค่า a และมิติของ unit cell แบบ FCC

ตาราง 1.1 ค่า lattice constant และรัศมีอะตอมของโลหะที่มีโครงสร้างผลึก 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

1.4.3 Hexagonal Close-Packed (HCP)

โครงสร้างผลึกพื้นฐานของโลหะแบบที่สามได้แก่ HCP ตัวอย่างโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ แคดเมียม, สังกะสี, ไทเทเนียม เป็นต้น ภาพ 1.13 แสดงการเรียงตัวของอะตอมแบบ HCP สำหรับ HCP จะมีค่า lattice constant สองค่าด้วยกันคือค่า a และค่า c โดยนิยามตามภาพ 1.13 ค่า APF ของโครงสร้างผลึกแบบ HCP มีค่าเท่ากับโครงสร้างผลึกแบบ FCC คือเท่ากับ 0.74 สำหรับ HCP แต่ละอะตอมจะประกอบไปด้วยอะตอมข้างเคียง 12 อะตอม ตาราง 1.3 แสดงค่า a และ c ของโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ HCP



ภาพ 1.13 นิยามค่า a , c ของ unit cell แบบ HCP

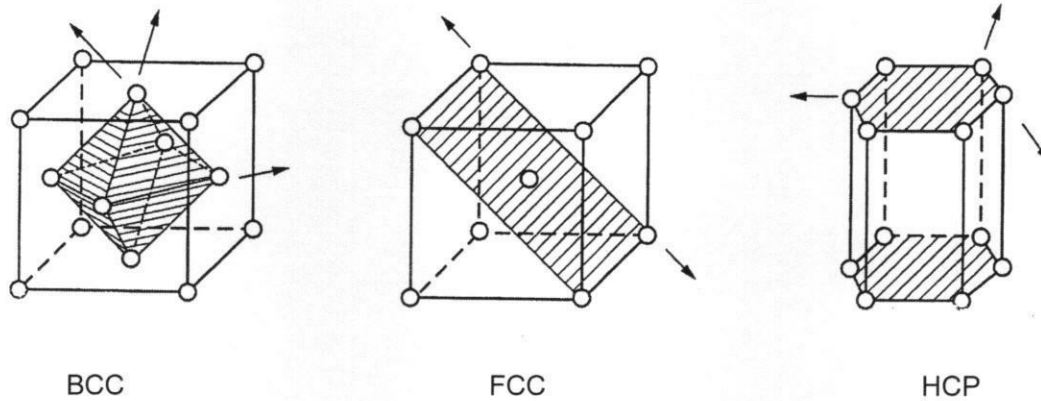
ตาราง 1.3 ค่า a และ c ของโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ HCP

Metal	Lattice constants, nm		Atomic radius R , nm	c/a ratio	% deviation from ideality
	a	c			
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

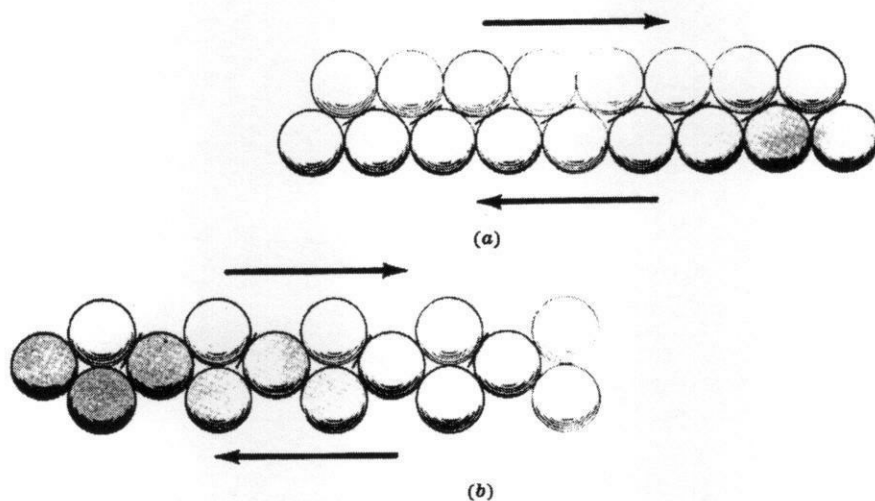
1.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกของโลหะกับสมบัติเชิงกล

โครงสร้างผลึกแต่ละแบบจะทำให้มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ต่างกันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และจากการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ต่างกันทำให้โครงสร้างผลึกแต่ละแบบมีจำนวนระนาบที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมหนาแน่นที่สุดไม่เท่ากันด้วย ภาพ 1.14 แสดงระนาบที่มีการจัดเรียงอะตอมหนาแน่นที่สุดของโครงสร้างผลึก BCC, FCC และ HCP จำนวนระนาบที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่หนาแน่นที่สุดสำหรับ FCC, BCC และ HCP คือ 8, 6, 2 ตามลำดับ ซึ่งระนาบเหล่านี้จะเป็นระนาบที่ทำให้เกิดการเลื่อนของอะตอมได้ง่ายที่สุด (ดูภาพ 1.15 ประกอบ) ดังนั้นโครงสร้างผลึกที่มีจำนวนระนาบเหล่านี้มากก็จะมี ความเหนียวและขึ้นรูปได้ง่าย ในทางกลับกันโครงสร้างผลึกที่มีจำนวนระนาบเหล่านี้น้อยก็จะมี ความเหนียวน้อย, เปราะและขึ้นรูปได้ยาก

ดังนั้นโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จึงมักจะมีค่าความเหนียวสูงและขึ้นรูปได้ง่าย เช่น อะลูมิเนียม, ทองแดง, ทอง, เงิน, ตะกั่ว เป็นต้น ส่วนโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ HCP มักจะมีสมบัติเปราะและขึ้นรูปได้ยาก เช่น แมกนีเซียม, สังกะสี, ไทเทเนียม เป็นต้น



ภาพ 1.14 ระนาบที่มีการจัดเรียงอะตอมหนาแน่นที่สุดสำหรับโครงสร้างผลึก FCC, BCC และ HCP



ภาพ 1.15 ลักษณะการเลื่อนของอะตอม a) Close packed plane
b) non-close packed plane

1.5 สมบัติเชิงกลพื้นฐานของโลหะ

ในการนำไปใช้งานของโลหะหรือโลหะผสมแต่ละประเภทนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ต้องนำไปใช้เช่น รับแรงดึง, รับแรงอัด, รับการเสียดสี, รับการกระแทก, นำความร้อน, นำไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นการเลือกโลหะเพื่อนำไปใช้งานก็ต้องคำนึงถึงสมบัติที่เหมาะสมต่องานนั้น ๆ ด้วย สมบัติของโลหะได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ, อุณหภูมิหลอมตัว, ความแข็งแรงดึง, ความแข็ง, ความแกร่ง, ความเหนียว, ความสามารถในการนำไฟฟ้า, ความสามารถในการนำความร้อน, ความเป็นแม่เหล็ก ฯลฯ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของสมบัติเชิงกลซึ่งมีผลต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด

1.5.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)

ในการทดสอบทางกลของโลหะ วิธีการทดสอบที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือการทดสอบแรงดึง โดยการให้แรงดึงแก่ชิ้นงานโลหะทำให้เกิดการยืดตัวไปจนชิ้นงานขาด ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟ stress-strain โดยค่าความเค้น (stress) หาได้จาก

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

โดย S = ความเค้น

P = แรงดึงที่ให้กับชิ้นงาน

A₀ = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ

ความเครียด (Strain) หาได้จาก

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

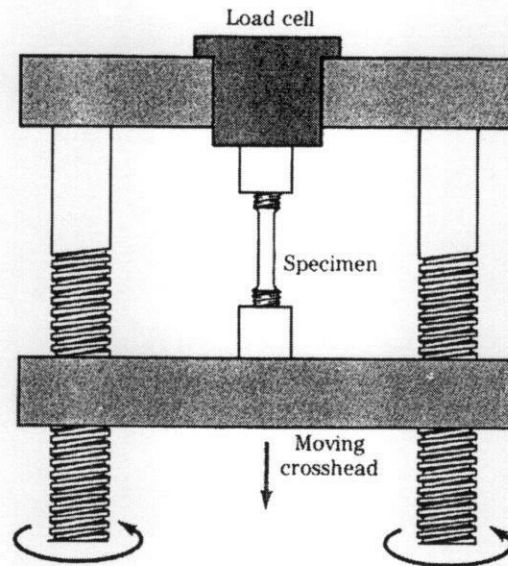
โดย e = ความเครียด

L = ความยาวของชิ้นงานขณะนั้น

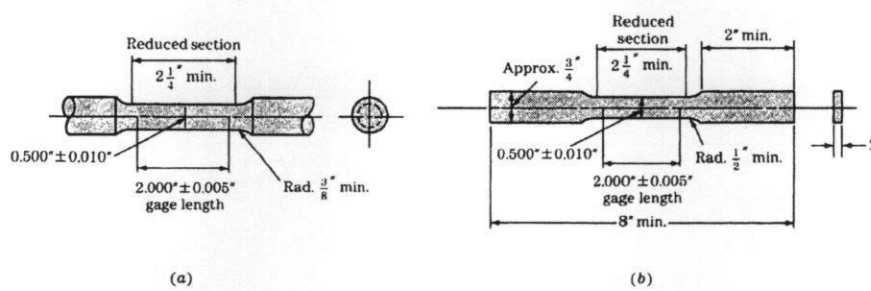
L = ความยาวของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ

เมื่อโลหะได้รับแรงดึงจะถูกยืดออก หรือเสียรูปในช่วงแรกจะเป็นการเสียรูปแบบไม่ถาวร (elastic deformation) กล่าวคือเมื่อปลดแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นงานออก ชิ้นงานก็จะหดตัวกลับสู่สภาพเดิม เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงต่อไปจะเกิดการคราก (Yield) ซึ่งเมื่อได้รับแรงดึงต่อจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร จากนั้นเมื่อโลหะได้รับแรงเพิ่มขึ้นจนเกิดความสามารถในรับแรงแล้วจะเกิดคอคอด (necking) ขึ้นและขาดออกจากกันในที่สุด ภาพ 1.16 แสดงภาพตัวอย่างของการทดสอบแรง

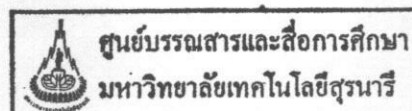
ดิ่ง และภาพ 1.17 แสดงภาพตัวอย่างรูปร่างชิ้นงานในการทดสอบแรงดิ่ง สมบัติเชิงกลเบื้องต้นที่ได้จากการทดสอบแรงดิ่ง ได้แก่ Modulus of elasticity, Yield strength, Ultimate tensile strength, percent elongation ภาพ 1.18 แสดง stress-strain curve ของโลหะชนิดต่างๆ

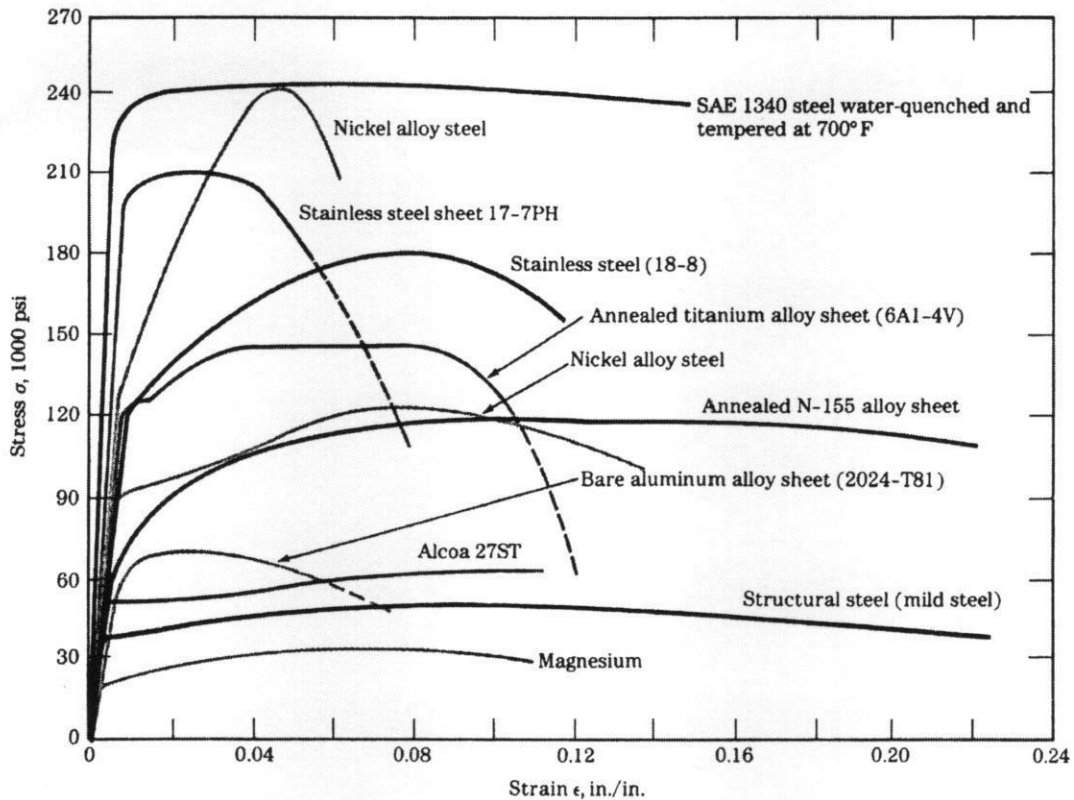


ภาพ 1.16 ภาพตัวอย่างของการทดสอบแรงดิ่ง



ภาพ 1.17 ภาพตัวอย่างรูปร่างชิ้นงานในการทดสอบแรงดิ่ง a) ทรงกระบอก b) plate





ภาพ 1.18 stress-strain curve ของโลหะชนิดต่าง ๆ

Modus of elasticity (Young's Modulus) หาได้จากความชันของ stress-strain curve ในช่วงที่มีโลหะเสียรูปอย่างไม่ถาวร โดยเป็นช่วงที่เป็นเส้นตรงใน stress-strain curve

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

เมื่อ E คือค่า Modulus of elasticity

s คือความเค้น (stress)

e คือความเครียด (strain)

ค่า Modulus of elasticity นั้นบอกว่าโลหะชนิดนั้น ๆ มี stiffness มากเพียงใด กล่าวคือ หาก stress-strain curve มีความชันมากแสดงว่าค่า E มาก ซึ่งต้องใช้แรงมากที่จะทำให้โลหะชนิดนั้นเสียรูปอย่างไม่ถาวร ตาราง 1.4 แสดงค่า E สำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ

ตาราง 1.4 ค่า Modulus of Elasticity สำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ

Materials	Modulus of Elasticity (GPa)
Carbon Steel	207
Austenitic Stainless Steel	193
Titanium alloys	114
Aluminium	72

ค่า **Yield strength** ได้มาจากการลากเส้นขนานกับความชันในช่วง elastic โดยมีจุดเริ่มจากค่า strain เท่ากับ 0.002 ไปตัดกับ stress-strain curve แล้วอ่านค่า stress ที่จุดนั้น วิธีการหาค่า yield strength แบบนี้เรียกว่า proof strength ค่า Yield strength บ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงได้โดยไม่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร

Ultimate Tensile Strength (UTS) คือค่า stress ที่สูงที่สุดที่โลหะสามารถรับแรงดึงได้ก่อนที่จะเกิด necking ซึ่งเมื่อเกิด necking แล้วจะทำให้ค่าความเค้นลดต่ำลงเนื่องจาก engineering stress ได้จากการคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดตั้งต้น แต่พื้นที่หน้าตัดที่เกิดขึ้นจริงลดลง จึงทำให้ค่าความเค้นที่คำนวณได้ลดลง

ค่า UTS เป็นดัชนีหนึ่งที่ยกย่องวัสดุหรือโลหะที่ทำการทดสอบมีความแข็งแรงมากน้อยแค่ไหน โลหะที่มีค่า UTS สูงก็จะมีแข็งแรงสูงด้วย อย่างไรก็ตามค่า UTS ไม่ค่อยถูกไปใช้ในการออกแบบเนื่องจากเป็นจุดที่โลหะกำลังจะเกิดความเสียหายแล้ว ดังนั้นการออกแบบจึงนิยมใช้ค่า yield strength มากกว่า

Percent elongation คือปริมาณการยืดตัวของโลหะก่อนที่จะเกิดการขาด ซึ่งเป็นดัชนีหนึ่งที่จะบอกว่าโลหะมีความเหนียวมากน้อยแค่ไหนและสามารถที่จะขึ้นรูปได้ยากง่ายเพียงไร สำหรับค่า percent elongation หาได้จาก

$$\%elongation = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

เมื่อ L_f คือความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน

L_0 คือความยาวเริ่มต้น (gage length)

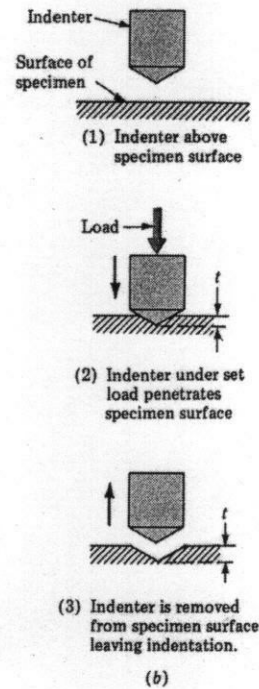
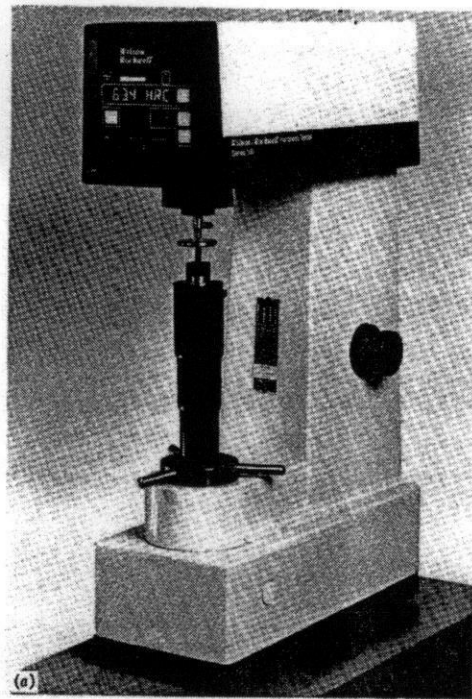
1.5.2 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งคือความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเสีรูปร่างอย่างถาวร ความแข็งของโลหะวัดได้โดยการใช้หัวกดตกลงบนโลหะแล้ววัดขนาด, พื้นที่ผิวหรือความลึกของรอยกด ลักษณะและวัสดุที่ใช้ทำหัวกดขึ้นอยู่กับวิธีการวัดที่ใช้ วิธีการวัดความแข็งที่ได้รับความนิยมคือ Brinell, Vickers, Knoop และ Rockwell ทั้งนี้แต่ละวิธีมีความเหมาะสมข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันออกไป ตาราง 1.5 แสดงความแตกต่างของวิธีการวัดความแข็งแบบต่าง ๆ การทดสอบความแข็งนี้ง่ายและรวดเร็วกว่าการทดสอบแรงดึง อีกทั้งยังสามารถทดสอบได้โดยทำให้ตัวอย่างทดสอบเสียหายน้อยด้วยการใช้วิธีวัดความแข็งที่ทำให้เกิดรอยวัดขนาดเล็ก และความแข็งกับความแข็งแรงดึงมักจะมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน รวมทั้งมีสูตรอย่างง่ายในการเชื่อมโยงค่าความแข็งแรงดึงกับความแข็ง ดังนั้นการวัดความแข็งก็สามารถบอกได้คร่าว ๆ ว่าโลหะนั้นมีความแข็งแรงดึงมากน้อยเพียงใด ด้วยเหตุนี้การวัดความแข็งจึงเป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิต สำหรับใช้ในกระบวนการควบคุมคุณภาพ ภาพ 1.19 แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell

ตาราง 1.5 วิธีการวัดความแข็งแบบต่าง ๆ

Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formula for hardness number	
		Side view	Top view			
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = \frac{1.72P}{d^2}$	
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$	
Rockwell						
A } C } D }	Diamond cone			60 kg	$R_A =$	100-500f
				150 kg	$R_C =$	
B } F } G }	1/8-in-diameter steel sphere			100 kg	$R_D =$	
				100 kg	$R_B =$	
				60 kg	$R_F =$	
				150 kg	$R_G =$	
				100 kg	$R_E =$	130-500f
E	1/2-in-diameter steel sphere					

Source: After H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials," vol. III, Wiley, 1965, p. 12.

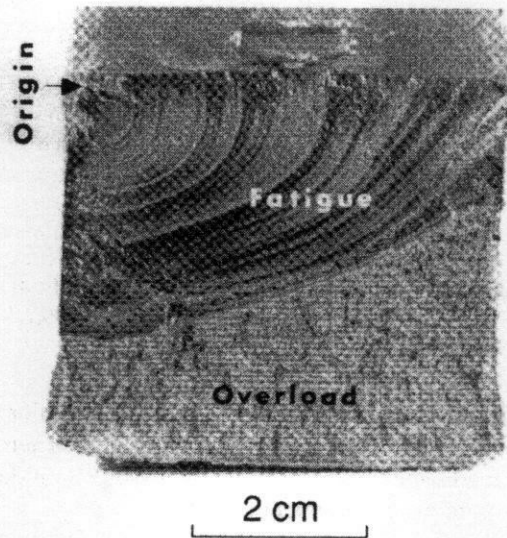


ภาพ 1.19 เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell

1.5.3 ความล้า (Fatigue)

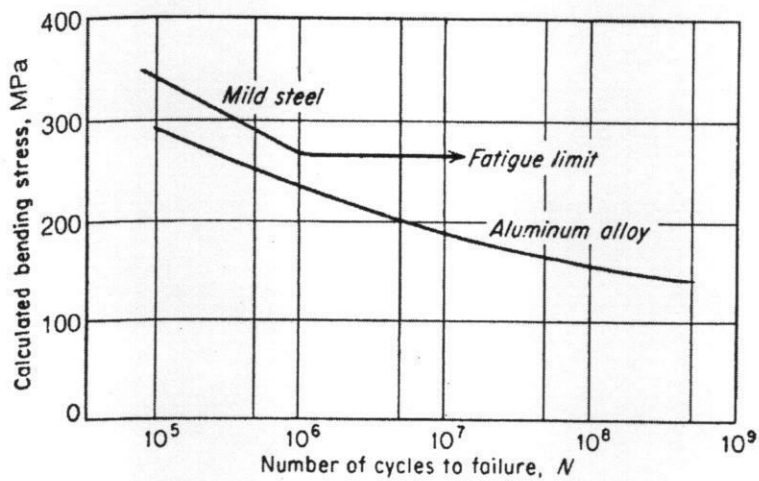
ความล้าเป็นรูปแบบหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างโลหะเสียหายได้ แม้ว่าจะได้รับแรงต่ำกว่า tensile strength ก็ตาม หากได้รับแรงกระทำแบบซ้ำ ๆ (cyclic load) โครงสร้างที่ได้รับแรงซ้ำ ๆ ยกตัวอย่างเช่น เฟลาของรถและเครื่องจักร, ปีกของเครื่องบินที่ได้รับแรงลม การเสียหายเนื่องจากความล้าเริ่มต้นจากการมีจุดเริ่มของรอยแตกที่บริเวณผิวของโครงสร้างเมื่อได้รับแรงซ้ำ ๆ กันรอยแตกจะเกิดการขยายตัวไปเรื่อย ๆ จนเมื่อถึงจุดหนึ่งพื้นที่รับแรงของโครงสร้างไม่สามารถรับแรงกระทำต่อไปได้อีกก็จะเกิดการแตกแบบเปราะ ภาพ 1.20 แสดงผิวรอยแตกที่เกิดขึ้นจากความล้า

การทดสอบความล้าทำได้โดยให้ชิ้นงานได้รับแรงดัดซ้ำไปมาจนเกิดความเสียหายแล้วบันทึกจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการเสียหาย แล้วทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าแรงหรือความเค้นที่กระทำต่อชิ้นงาน การทดสอบความล้าจะแสดงผลในรูปแบบ S-N curve (Stress-Number of cycle) โดยค่าความเค้นที่ทำให้โครงสร้างมีอายุใช้งานเกินกว่า 10^7 รอบ หรือมีอายุการใช้งานไม่จำกัดเรียกว่า "Endurance limit" ภาพ 1.21 แสดงตัวอย่าง S-N curve



ภาพ 1.20 ผิวยรอยแตกที่เกิดขึ้นจากความล้า

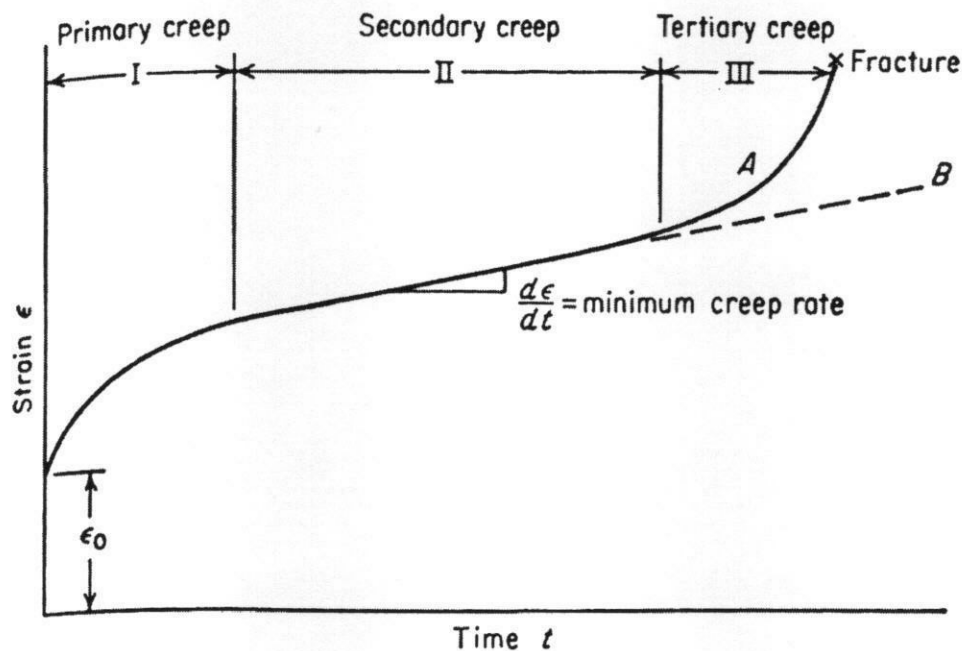
โลหะจำพวกเหล็กมักจะปรากฏ endurance limit หรือ fatigue limit แต่โลหะนอกกลุ่มเหล็กส่วนใหญ่ เช่น อลูมิเนียม, ทองเหลือง มักจะไม่ปรากฏ endurance limit



ภาพ 1.21 ตัวอย่าง S-N curve

1.5.4 ความคืบ (Creep)

เมื่อโลหะต้องรับแรงภายใต้อุณหภูมิสูง ($>0.5T_m$) เป็นระยะเวลานาน ๆ จะเกิดการยึดตัวที่เรียกว่า “ความคืบ” เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้ dislocation, atom, grain boundary เคลื่อนที่ได้ง่าย ชิ้นส่วนโลหะที่ต้องรับแรงที่อุณหภูมิสูงนาน ๆ ได้แก่ โครงสร้างในโรงงานผลิตไฟฟ้า, steam turbine เป็นต้น ความคืบเป็นการเสียหายของโลหะอีกแบบหนึ่งเกิดขึ้นแม้ว่าโครงสร้างจะได้รับแรงที่ต่ำกว่า ultimate tensile strength ก็ตาม การคืบมักจะถูกแสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง strain และเวลา (ภาพ 1.22) ในช่วงแรกโลหะจะเกิดการยึดตัวในอัตราที่ค่อย ๆ ช้าลงจนเมื่ออัตราการยึดตัวต่ำที่สุดจนคงที่จะเข้าสู่ช่วงที่สองซึ่งเป็นช่วงที่โลหะยึดตัวด้วยอัตราที่ต่ำที่สุดและค่อนข้างคงที่ ช่วงนี้เรียกว่า steady state เมื่อโลหะยึดตัวไปจนเกิด necking จะเข้าสู่ช่วงที่สาม ซึ่งอัตราการยึดตัวจะเพิ่มสูงขึ้นจนขาดไปในที่สุด อัตราการยึดตัวหรืออายุการใช้งานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเค้นที่โครงสร้างได้รับ โลหะที่สามารถต้านทานทานการเกิดการคืบได้ดีควรมีจุดหลอมตัวที่สูง โลหะที่ถูกออกแบบสำหรับรับความคืบนอกจากจะมีจุดหลอมตัวที่สูงแล้วจะมีอนุภาคเล็ก ๆ ที่มีความเสถียรแม้จะต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน อนุภาคเหล่านี้สามารถทำได้โดยการปรับส่วนผสมทางเคมีและการอบชุบด้วยความร้อน



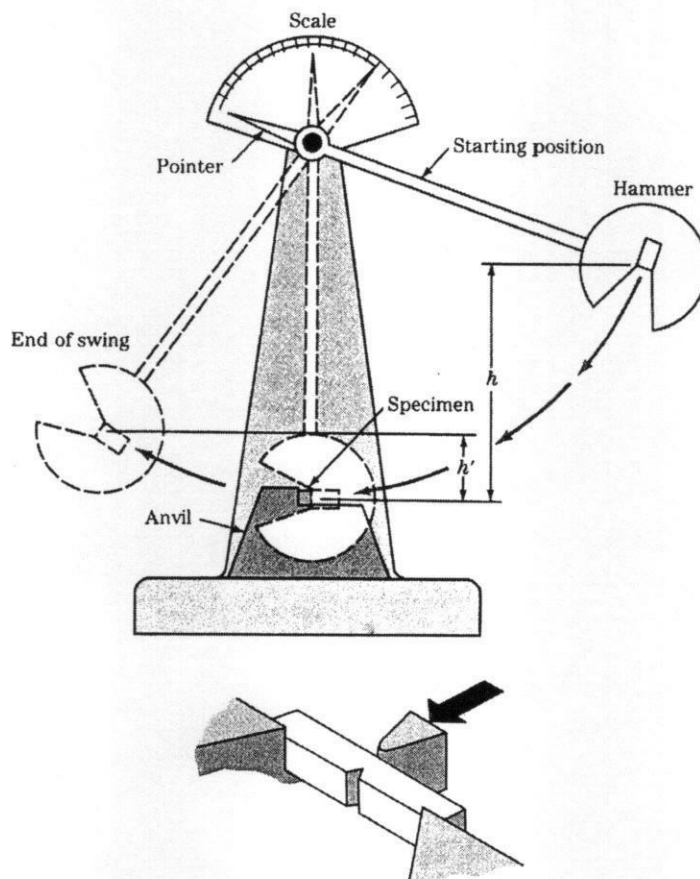
ภาพ 1.22 Creep Curve

1.5.5 ความต้านทานแรงกระแทก (Impact resistance)

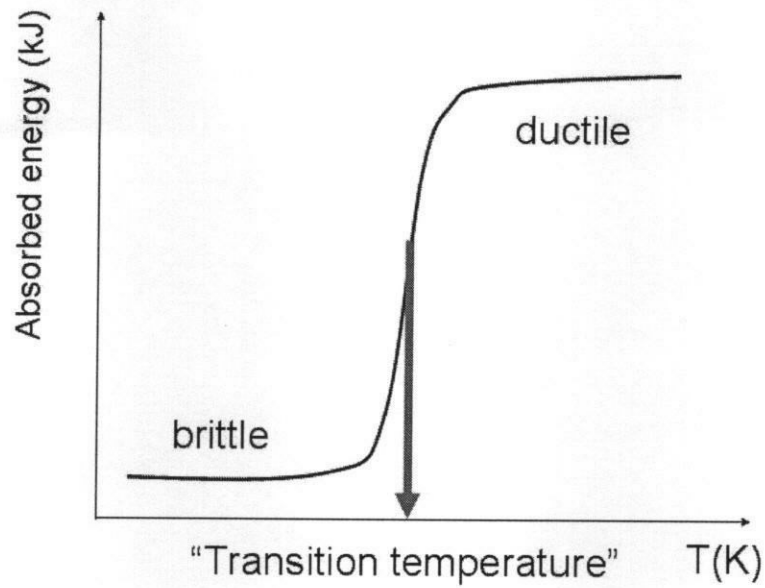
โลหะจะสามารถรับแรงกระแทกได้ระดับหนึ่งโดยแรงกระแทกที่สามารถรับได้นั้นแสดงเป็นพลังงานที่โลหะดูดซับไว้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ยิ่งโลหะสามารถดูดซับพลังงานได้มากก็แสดงว่าสามารถรับแรงกระแทกได้มากเช่นกัน

ที่อุณหภูมิต่ำลงโลหะจะรับแรงกระแทบได้น้อยลง โดยจะเปลี่ยนไปมีพฤติกรรมการแตกแบบเปราะซึ่งทำให้สามารถดูดซับพลังงานได้น้อย อุณหภูมิที่โลหะเปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวไปเป็นเปราะนี้เรียกว่า "Transition Temperature"

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกทำได้โดยใช้ค้อนทิ้งน้ำหนักลงมาทำให้เกิดแรงกระแทกต่อชิ้นงานที่มีรอย Notch ไว้ (ภาพ 1.23) หากชิ้นงานโลหะสามารถดูดซับแรงกระแทกไว้ได้มากจะทำให้ค้อนเหวี่ยงขึ้นไปได้ต่ำ ถ้าชิ้นงานโลหะสามารถดูดซับแรงกระแทกได้น้อยจะทำให้ค้อนเหวี่ยงขึ้นไปได้สูง ซึ่งเข็มบนหน้าปัดจะแสดงค่าพลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ได้ เมื่อทำการทดสอบที่หลายอุณหภูมิจะสามารถนำค่าพลังงานที่ดูดซับกับอุณหภูมิมาสังเคราะห์กราฟดังภาพ 1.24 ได้ อุณหภูมิที่กราฟมีความชันสูงที่สุดจะเป็นบริเวณที่โลหะเกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวไปเป็นเปราะ ซึ่งก็คือ Transition Temperature

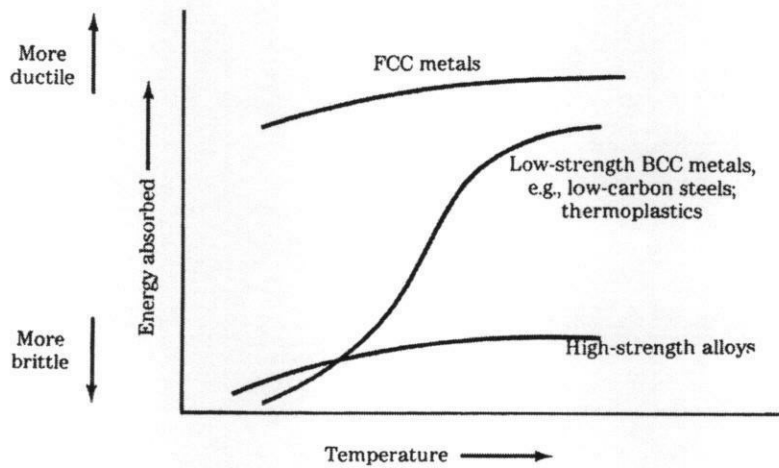


ภาพ 1.23 อุปกรณ์และชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



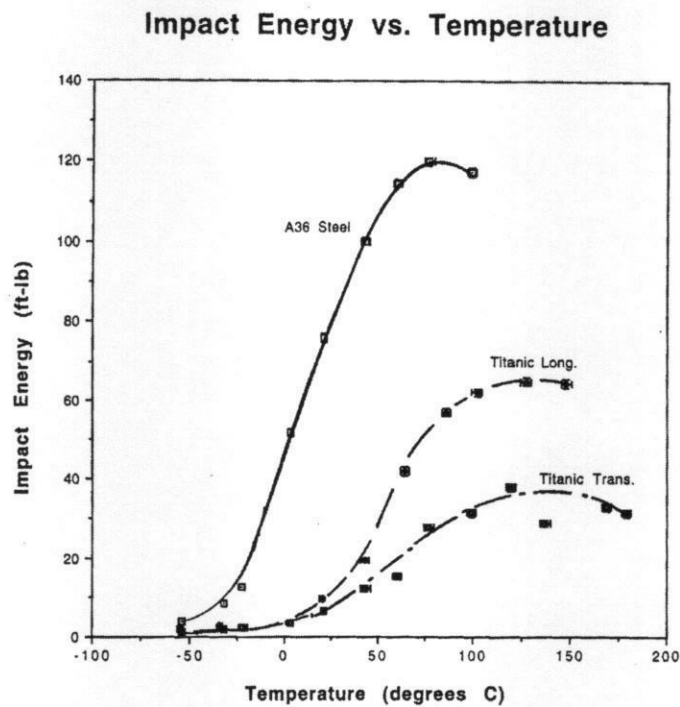
ภาพ 1.24 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับและอุณหภูมิทดสอบ

โดยทั่วไปแล้วโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จะมีความต้านทานแรงกระทำสูงกว่าโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ HCP และ BCC



ภาพ 1.25 ลักษณะความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างพลังงานดูดซับและอุณหภูมิสำหรับโลหะที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน

เหตุการณ์ในอดีตที่ความต้านทานแรงกระแทกอยู่เบื้องหลังโศกนาฏกรรมก็คือการจมของเรือไททานิค ซึ่งจากการวิจัยเศษชิ้นส่วนของเรือไททานิคพบว่ามี Transition Temperature สูงกว่าเหล็กกล้าในปัจจุบันทั่วไป ซึ่งทำให้รับแรงกระแทกได้ต่ำกว่า เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำมากๆ แล้วเกิดแรงกระแทกมหาศาลจากการชนกับภูเขาน้ำแข็งจึงทำให้เหล็กกล้าของเรือไททานิคแตกแบบเปราะและจมลงเร็วกว่าปกติ



ภาพ 1.26 เปรียบเทียบความต้านทานแรงกระแทกของเหล็กกล้าจากเรือไททานิค และเหล็กกล้าที่ผลิตในปัจจุบัน

บทที่ 2

แผนภูมิสมดุลของโลหะผสม

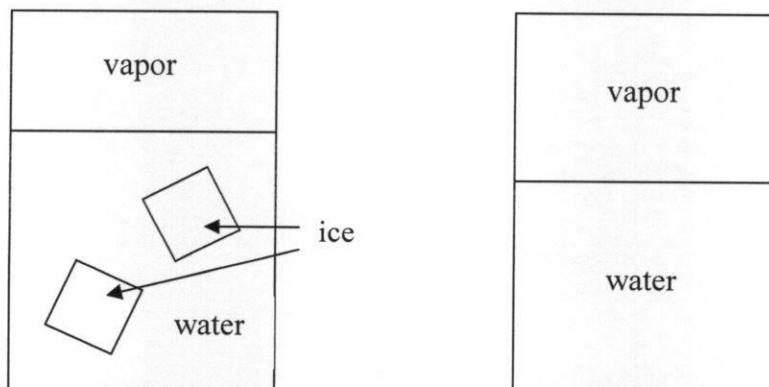
Equilibrium Phase Diagram of Alloys

อ. สาร์มภ์ บุญมี

Phase ในวัสดุหนึ่งหมายถึงบริเวณที่มีความแตกต่างกันจากบริเวณอื่นในด้านโครงสร้าง, ส่วนผสมทางเคมี สำหรับ Phase Diagram หมายถึงแผนผังที่อธิบายพฤติกรรมของเฟสที่อุณหภูมิ ความดันและส่วนผสมทางเคมีใด ๆ โดยทั่วไปแล้ว phase diagram จะแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณทาง thermodynamics ในสภาวะสมดุล ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่า “แผนภูมิสมดุล” หรือ “Equilibrium phase diagram”

2.1 แผนภูมิสมดุลของสารบริสุทธิ์

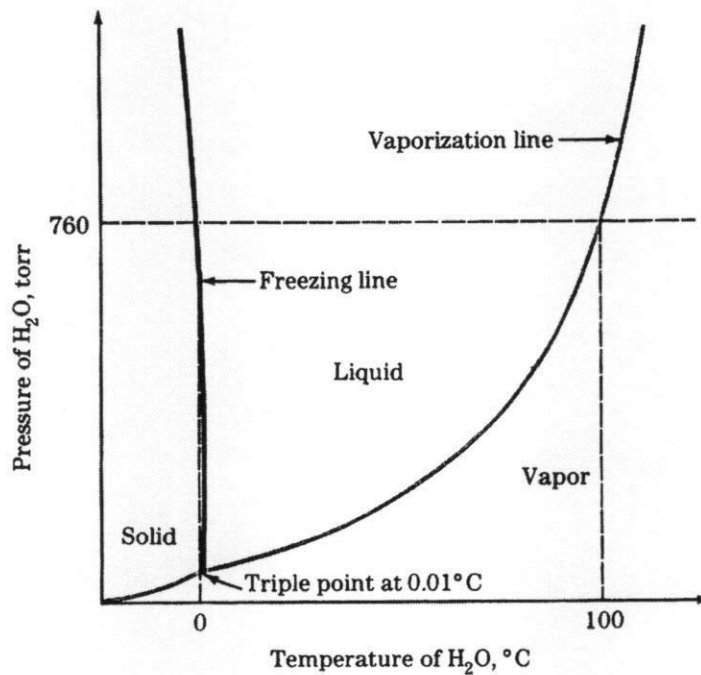
สารบริสุทธิ์จะสถานะใด (ของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ยกตัวอย่างเช่น น้ำ (น้ำแข็ง, น้ำและไอน้ำ) หากสมมุติว่ามีแก้วใบหนึ่งมีน้ำและน้ำแข็งอยู่ในแก้ว เฟสประกอบไปด้วยเฟสของแข็งได้แก่ น้ำแข็ง และเฟสของเหลวได้แก่ น้ำ โดยมีรอยต่อระหว่างน้ำแข็งและน้ำเป็น Phase boundary ในทำนองเดียวกันสำหรับน้ำเดือดก็จะประกอบไปด้วยเฟสของเหลวคือน้ำและเฟสที่เป็นก๊าซคือไอน้ำ โดยมีพื้นผิวน้ำเป็น phase boundary ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพ 2.1 ตัวอย่างเฟสของน้ำ

โดยทั่วไปเรามักจะรู้จักจุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากน้ำแข็งไปเป็นน้ำคือ “จุดเยือกแข็ง” (freezing point) หรือ “จุดหลอมเหลว” (melting point) ในกรณีเปลี่ยนจากน้ำไปเป็นน้ำแข็ง และจุดเปลี่ยนจากน้ำไปเป็นไอน้ำคือ “จุดเดือด” (boiling point) ซึ่งมีค่าเป็นอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม

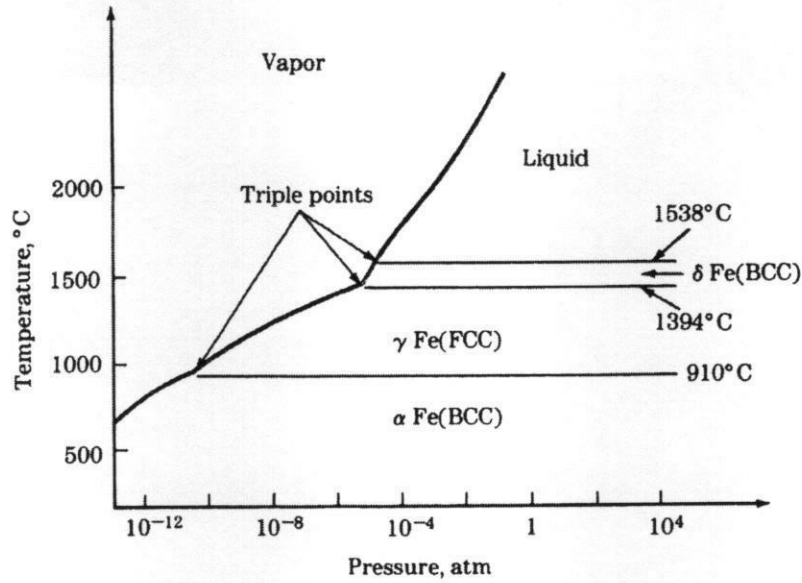
อุณหภูมิเปลี่ยนเฟส (transformation temperature) เหล่านี้ก็ขึ้นอยู่กับความดันด้วย ยกตัวอย่าง เช่น หากเราต้มน้ำบนภูเขา (ความดันต่ำ) น้ำจะเดือดก่อน 100 °C เป็นต้น ดังนั้นแผนภูมิสมดุลของสารบริสุทธิ์จึงเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสกับความดัน โดยพื้นที่ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสแสดงถึงบริเวณที่เฟสนั้น ๆ เป็นเฟสที่สมดุลสำหรับความดันและอุณหภูมินั้น ภาพ 2.2 แสดง phase diagram ของน้ำ



ภาพ 2.2 Phase diagram ของน้ำ

จากภาพ 2.2 จะพบจุด triple point ที่ความดัน 4.579 torr และอุณหภูมิ 0.0098 °C ที่ซึ่งเฟส 3 เฟสได้แก่ น้ำ, น้ำแข็งและไอน้ำอยู่ในสมดุลร่วมกัน และเส้นที่แบ่งระหว่างของแข็งกับของเหลวคือ freezing line เส้นที่แบ่งระหว่างของเหลวกับไอคือ vaporization line

แผนภูมิสมดุลสำหรับสารบริสุทธิ์อื่นนอกจากน้ำก็สามารถสร้างได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น สำหรับเหล็กบริสุทธิ์ (ภาพ 2.3) ซึ่งจะเห็นความแตกต่างจากแผนภูมิสมดุลของน้ำได้อย่างหนึ่งคือเฟสของแข็ง (solid phase) สามารถแบ่งแยกออกเป็นหลายเฟส ได้แก่ α -Fe (ferrite), γ -Fe (austenite) และ δ -Fe (delta ferrite) โดยการแบ่งเฟสนี้แบ่งตามโครงสร้างผลึกของแต่ละเฟส โดยที่ ferrite และ delta ferrite มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC และ austenite มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC



ภาพ 2.2 Phase diagram ของฮีเลียมบริสุทธิ์

2.2 Gibbs Phase Rule

J.W. Gibbs ได้แสดงสมการบอกความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของเฟสในสมดุล ซึ่งใช้ในการคำนวณทาง thermodynamics สมการนี้เรียกว่า "Gibbs Phase Rule"

$$P + F = C + 2$$

โดย P = จำนวน Phase ที่เกี่ยวข้องในระบบ

C = จำนวน Component ในระบบ

F = degree of Freedom

ปกติแล้ว C นั้นคือจำนวนธาตุหรือสารประกอบในระบบ F คือ degree of freedom ซึ่งหมายถึงจำนวนตัวแปร (ความดัน, อุณหภูมิ, ส่วนผสมทางเคมี) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของเฟสในสมดุลที่กำลังสนใจนั้น

ยกตัวอย่างเช่น จากภาพ 2.2 แผนภูมิสมดุลของน้ำบริสุทธิ์ ที่ triple point มี 3 เฟสที่เกี่ยวข้องในระบบและมี 1 component คือน้ำ เมื่อคำนวณ degree of freedom:

$$P + F = C + 2$$

$$3 + F = 1 + 2$$

$$F = 0 \text{ (zero degree of freedom)}$$

เนื่องจากไม่มีตัวแปรใดเลยที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าแล้วยังคงรักษาการปรากฏของน้ำในสถานะทั้งน้ำแข็ง, น้ำและไอน้ำไว้ได้ ดังนั้นจึงมีค่า degree of freedom = 0 จุด triple point อย่างนี้เรียกอีกอย่างว่า “invariant point”

ต่อไปพิจารณาจุดบนเส้น Freezing point มี 1 component เช่นเดิมเนื่องจากระบบมีน้ำเป็นองค์ประกอบเพียงอย่างเดียว มี 2 เฟสคือน้ำและน้ำแข็ง ดังนั้น degree of freedom จึงมีค่าเท่ากับ

$$P + F = C + 2$$

$$2 + F = 1 + 2$$

$$F = 1 \text{ (one degree of freedom)}$$

เนื่องจากสามารถเปลี่ยนค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง (ความดัน, อุณหภูมิ) แล้วยังคงการปรากฏของเฟสทั้งสอง (น้ำและน้ำแข็ง) ไว้ได้ เช่น ถ้ามีการกำหนดความดันให้กับระบบค่าหนึ่ง อุณหภูมิที่จะทำให้ระบบประกอบไปด้วยน้ำและน้ำแข็งเช่นเดิมได้ก็จะถูกกำหนดตามไปด้วย

ต่อไปพิจารณาจุดใดจุดหนึ่งในพื้นที่บริเวณของแต่ละเฟส ซึ่งจะประกอบได้ด้วยเฟสเฟสเดียวเท่านั้น ($P = 1$) ดังนั้น degree of freedom จึงมีค่าเท่ากับ

$$P + F = C + 2$$

$$2 + F = 1 + 2$$

$$F = 2 \text{ (two degrees of freedom)}$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดันจะเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระโดยที่ยังคงเฟสเฟสเดียวให้ปรากฏในระบบได้เช่นเดิม

แผนภูมิสมมูลส่วนใหญ่ที่ปรากฏในตำราและวารสารทางด้านวัสดุศาสตร์นั้นมักจะเป็นแผนภูมิสมมูลระหว่างอุณหภูมิและส่วนผสมทางเคมี โดยจะให้มีความดันคงที่ (โดยทั่วไป 1 atm) ดังนั้นสำหรับแผนภูมิสมมูลที่มีความดันคงที่ Gibbs phase rule จะเปลี่ยนเป็น

$$P + F = C + 1$$

2.3 Isomorphous Binary Phase Diagram

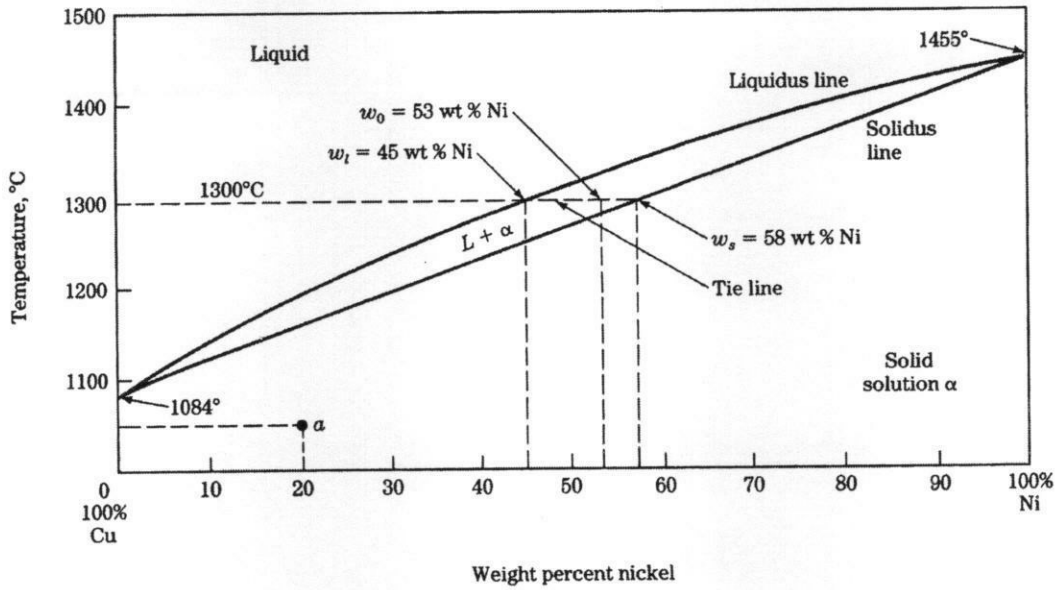
โลหะ 2 ชนิดเมื่อมาผสมกันเรียกว่า “Binary alloys” โดยเป็นระบบที่มี 2 components โลหะเมื่อผสมกันแล้วอาจทำให้เกิดสารประกอบที่มีสูตรเคมีแน่นอนระหว่างโลหะทั้งสองชนิดหรืออาจผสมกันอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งก็ได้ ในโลหะผสมบางระบบธาตุทั้งสองสามารถละลาย

ในกันและกันได้หมดตลอดทุกส่วนผสมทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อธาตุทั้งสองมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่า "isomorphous system" โดยปกติแล้ว isomorphous system จะปรากฏในเงื่อนไขต่อไปนี้

- โครงสร้างผลึกของแต่ละธาตุของสารละลายของแข็งต้องเป็นแบบเดียวกัน
- ขนาดของอะตอมของทั้งสองธาตุต้องไม่ต่างกันเกินไปนัก (ไม่เกิน 15%)
- ธาตุทั้งสองต้องไม่ทำให้เกิดสารประกอบต่อกันและกัน ดังนั้นธาตุทั้งสองจึงควรมีความแตกต่างกันของ electronegativity พอสมควร
- ธาตุทั้งสองคนมี valence electron เท่ากัน

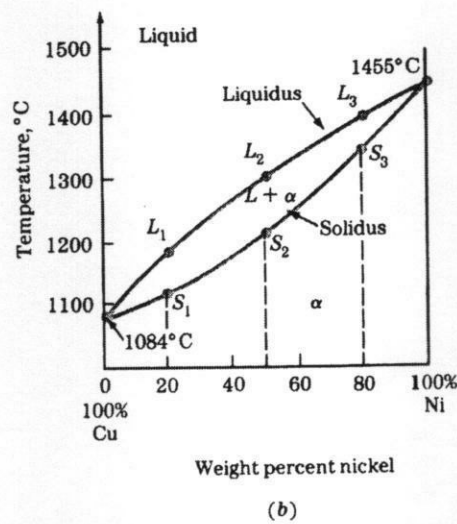
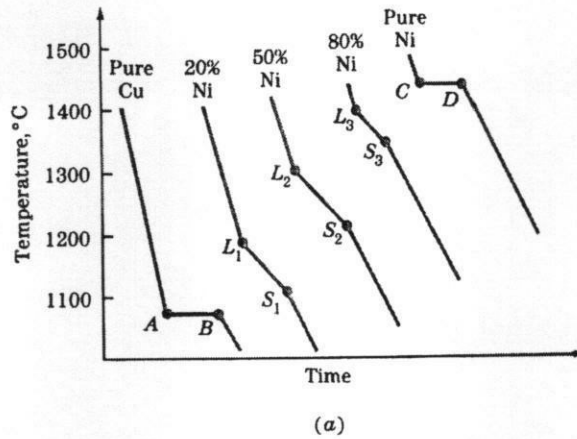
ระบบโลหะผสมใดๆ ก็ตามไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นทั้งหมด ก็สามารถเป็น isomorphous alloys ได้ แผนภูมิสมมูลของ isomorphous alloys นั้นจะปรากฏเป็นรูปลักษณะไปไม้ (ภาพ 2.4) โดยเส้นด้านบนของแผนภูมิสมมูล เรียกว่า เส้น "Liquidus" เหนือเส้น liquidus ในไดอะแกรมเป็นพื้นที่ที่โลหะผสมจะอยู่ในสภาพของเหลว เส้นด้านล่างของไดอะแกรม เรียกว่า เส้น "Solidus" ใต้เส้น solidus ในไดอะแกรมเป็นพื้นที่ที่โลหะผสมจะอยู่ในสภาพของแข็ง ส่วนพื้นที่ระหว่างเส้น liquidus และ solidus คือบริเวณที่โลหะผสมประกอบไปด้วยเฟสของแข็งและของเหลวทั้งสองเฟสอยู่ด้วยกัน ดังนั้นหากทราบอุณหภูมิและส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมก็จะทำให้ทราบว่าโลหะผสมนั้นจะอยู่ในสถานะใด

ยกตัวอย่างการใช้งานแผนภูมิสมมูล เช่น ถ้ามีโลหะผสม Cu-53 wt%Ni ที่อุณหภูมิ 1300 °C หากต้องการทราบว่าโลหะผสมดังกล่าวจะมีสถานะใด อ่านได้จากพิกัดระหว่าง 53 wt%Ni และที่ 1300 °C โดยจากภาพจะเห็นได้ว่าตกอยู่ในบริเวณที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลว ดังนั้นโลหะผสม Cu-53 wt%Ni ที่ 1300 °C จะประกอบไปด้วยเฟสของแข็งและของเหลวอยู่ร่วมกัน โดยมีส่วนผสมเฉลี่ยโดยรวมเท่ากับ 53 wt%Ni ถ้าต้องการทราบส่วนผสมทางเคมีของเฟสของแข็งให้ลากเส้นในแนวนอน เรียกว่า เส้น "Tie line" ไปตัดที่เส้น solidus ค่าของส่วนผสมทางเคมีในแกนนอนที่จุดตัดจะบอกส่วนผสมทางเคมีของเฟสของแข็งที่เกิดขึ้น ในที่นี้คือ 58 wt%Ni ถ้าต้องการทราบส่วนผสมทางเคมีของเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นให้ลากเส้น tie line ไปตัดที่เส้น liquidus ค่าของส่วนผสมทางเคมีในแกนนอนที่จุดตัดจะบอกส่วนผสมทางเคมีของเฟสของเหลวที่เกิดขึ้น ในที่นี้คือ 45 wt%Ni



ภาพ 2.4 แผนภูมิสมดุลของ Cu - Ni

วิธีการสร้างแผนภูมิสมดุลทำได้โดยการให้โลหะหลอมเหลวเย็นตัวอย่างช้า ๆ เพื่อให้ใกล้เคียงกับสมดุล ที่ความดัน 1 atm แล้ววัดอุณหภูมิในระหว่างการเย็นตัวของโลหะ จะได้ cooling curve ดังภาพ 2.5 สำหรับโลหะบริสุทธิ์ ขณะที่โลหะเกิดการแข็งตัวจะมีอุณหภูมิการแข็งตัวที่คงที่และอุณหภูมิจะลดลงอีกก็ต่อเมื่อโลหะแข็งตัวทั้งหมดแล้ว ดังนั้นอุณหภูมิจึงเริ่มเกิดการแข็งตัวกับอุณหภูมิจึงเป็นอุณหภูมิเดียวกัน หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมให้มีค่าต่าง ๆ กัน แล้วทำการวัดอุณหภูมิขณะโลหะเย็นตัวเช่นกัน แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิจึงเริ่มแข็งตัวและแข็งตัวเสร็จสิ้น เมื่อนำค่าอุณหภูมิจึงเริ่มแข็งตัวและแข็งตัวเสร็จสิ้นดังกล่าวมาสร้างแผนภูมิสมดุลจะได้เส้น liquidus และ solidus ซึ่งเป็นเส้นที่บอกอุณหภูมิจึงเริ่มแข็งตัวและอุณหภูมิจึงสุดท้ายที่โลหะแข็งตัว ดังนั้นจากวิธีการสร้างแผนภูมิสมดุล จะทำให้เราทราบว่าแผนภูมิสมดุลนั้น ไม่สามารถนำไปใช้กับการเย็นตัวอย่างรวดเร็วได้ เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วไม่ถือว่าอยู่ในสมดุลทางความร้อน และหากความดันในการใช้งานไม่ตรงกับสมดุลของแผนภูมิสมดุล ค่าในแผนภูมิสมดุลที่อ่านได้ก็จะยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที นอกจากนี้ในกรณีที่โลหะอยู่ในรูปของอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ ค่าก็จะเบี่ยงเบนไปจากแผนภูมิสมดุล เนื่องจากค่าที่ได้จากคำนวณในแผนภูมิสมดุลนั้นสมมุติให้ไม่มีอิทธิพลของรัศมี ความโค้งเข้ามาเกี่ยวข้อง

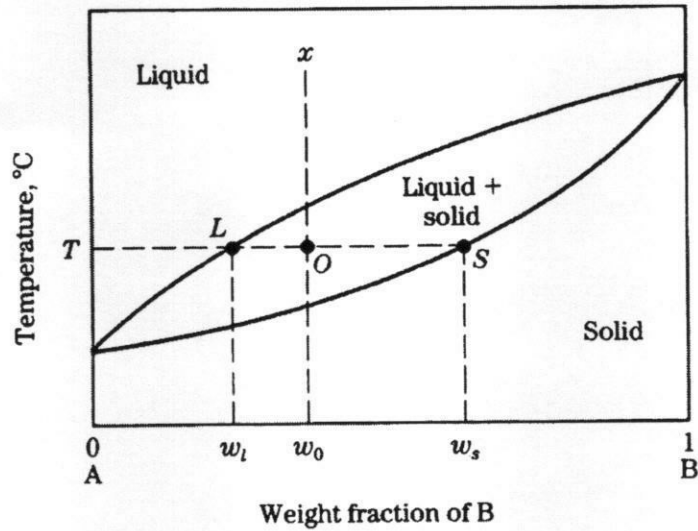


ภาพ 2.5 การสร้างแผนภูมิสมดุลจาก cooling curve

2.4 กฎคานงัด

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงวิธีการหาส่วนผสมทางเคมีของของแข็งและของเหลวที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีสมดุลประกอบไปด้วยเฟสของแข็งและของเหลว สำหรับการหาน้ำหนักของแต่ละเฟสนั้นอาศัย “กฎคานงัด” (The Lever Rule)

ภาพ 2.6 แสดงการนิยามค่าต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักของแต่ละเฟส โดยที่อุณหภูมิ T นั้น w_0 คือส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมที่สนใจมีค่าเป็น weight fraction ของธาตุ B w_L คือส่วนผสมทางเคมีของเฟสของเหลวและ w_S คือส่วนผสมทางเคมีของเฟสของแข็ง



ภาพ 2.6 นิยามค่าต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักของแต่ละเฟส

ถ้าให้ X แทน weight fraction ของเฟส เช่น X_S คือ weight fraction ของเฟสของแข็งและ X_L คือ weight fraction ของเฟสของเหลว ผลรวมของ weight fraction ของเฟสของแข็งและของเหลวจะต้องเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$X_L + X_S = 1$$

และ $X_L = 1 - X_S$

หรือ $X_S = 1 - X_L$

น้ำหนักของธาตุ B ในแต่ละเฟสจะคำนวณได้จากผลคูณของ weight fraction ของเฟสคูณกับ weight fraction ของธาตุ B ในเฟสนั้น เช่น

$$\text{น้ำหนักของธาตุ B ในเฟสของแข็ง} = X_S w_S$$

ดังนั้นปริมาณของธาตุ B รวม (w_0) จึงเท่ากับผลรวมน้ำหนักของธาตุ B ของทั้งสองเฟส

$$w_0 = X_L w_L + X_S w_S$$

โดย $X_L = 1 - X_S$ นำไปแทนค่าในสมการข้างบน

$$w_0 = (1 - X_S)w_L + X_S w_S$$

$$\text{หรือ } w_0 = w_L - X_S w_L + X_S w_S$$

$$X_S w_S - X_S w_L = w_0 - w_L$$

$$\text{ดังนั้น } \boxed{X_S = \frac{w_0 - w_L}{w_S - w_L}}$$

เมื่อย้อนกลับไปดูภาพ 2.6 จะพบว่า $w_0 - w_L$ ก็คือระยะระหว่างส่วนผสมทางเคมีโดยรวมไปถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟสของเหลว และ $w_S - w_L$ คือระยะระหว่างส่วนผสมทางเคมีโดยรวมไปถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟสของแข็ง

ในทำนองเดียวกัน

$$w_0 = X_L w_L + X_S w_S$$

$$X_S = 1 - X_L$$

$$w_0 = X_L w_L + (1 - X_L) w_S$$

$$\text{หรือ } w_0 = X_L w_L + w_S - X_L w_S$$

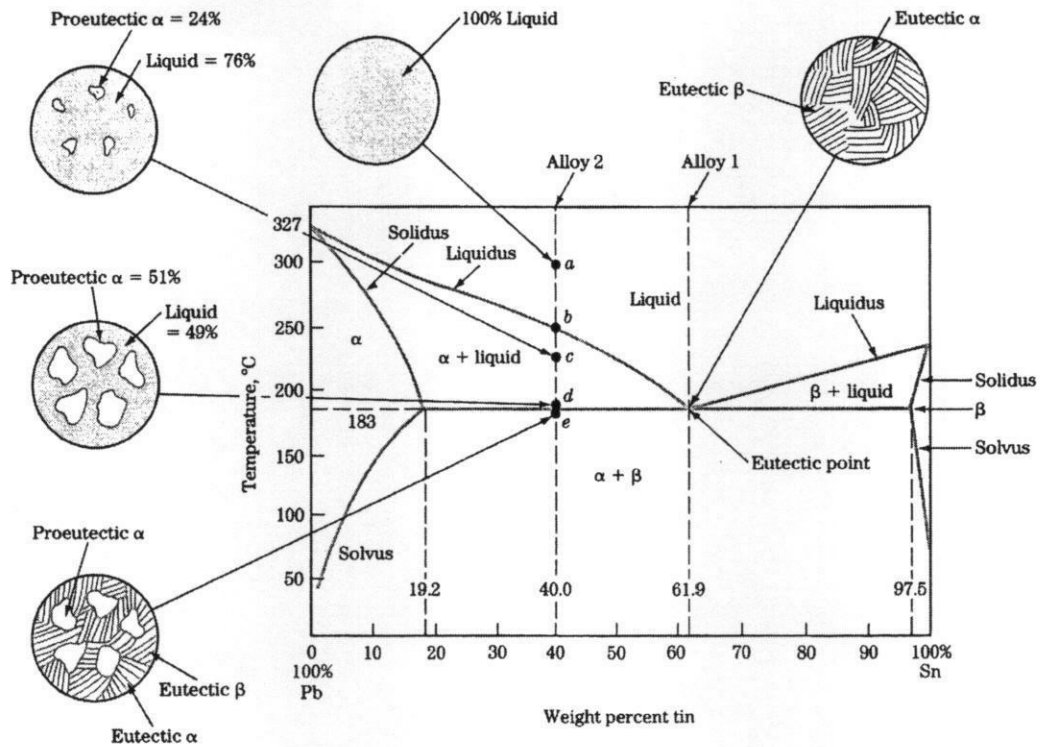
$$X_L w_S - X_L w_L = w_0 - w_S$$

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

ดังนั้นการหา Weight fraction ของเฟสใดหาได้จากการนำส่วนของเส้น tie line ด้านตรงข้ามหารด้วยความยาวของเส้น tie line

2.5 Binary Eutectic Alloys System

ในหัวข้อ 2.3 ได้กล่าวถึง Isomorphous alloys ไปแล้ว ซึ่งโลหะสองชนิดสามารถละลายในกันและกันได้สมบูรณ์ทั้งในสถานะของแข็งและของเหลว แต่โลหะจำนวนมากไม่สามารถละลายกันได้สมบูรณ์ในสภาพของแข็ง โดยมีขีดจำกัดในการละลายของกันและกันทำให้ปรากฏเฟสของสารละลายของแข็ง (solid solution) เช่น α และ β ในภาพ 2.7 จะเห็นได้ว่า Sn สามารถละลายใน Pb ได้จำกัดโดยสามารถละลายได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 183 C และลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เส้นที่แสดงปริมาณที่ธาตุหนึ่งสามารถละลายในอีกธาตุหนึ่งเรียกว่า เส้น "Solvus"



ภาพ 2.7 แผนภูมิสมดุลของ Pb – Sn

หากพิจารณาแผนภูมิสมดุลของโลหะผสม Pb-Sn จะพบว่า มีลักษณะที่ต่างออกไปจาก isomorphous alloys โดยที่ส่วนผสมทางเคมีค่าหนึ่งจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าส่วนผสมทางเคมีอื่น จุดนี้เรียกว่า จุด “Eutectic” และที่อุณหภูมินั้นเรียกว่า “อุณหภูมิยูเทคติก” (Eutectic temperature) สำหรับโลหะผสม Pb-Sn เกิดจุดยูเทคติกที่ 61.9% Pb – 38.1% Sn โดยมีอุณหภูมิยูเทคติกเท่ากับ 183 °C ถ้าสมมุติว่าโลหะผสมมีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับยูเทคติกพอดีเมื่อเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิยูเทคติกแล้วจะเกิด “ปฏิกิริยายูเทคติก” (Eutectic reaction) ขึ้น



ที่จุดยูเทคติกหากพิจารณาจาก Gibbs phase rule จะพบว่ามี 2 component (ได้แก่ Sn และ Pb) และมี 3 เฟส (L, α , β)

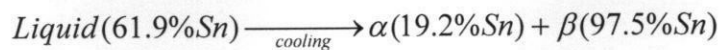
$$P + F = C + 1$$

$$3 + F = 2 + 1$$

$$F = 0$$

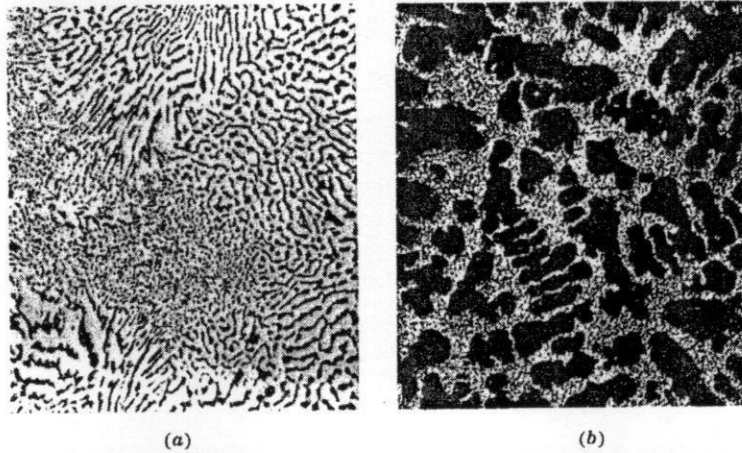
ดังนั้นจุดยูเทคติกคือ invariant point โดยการเปลี่ยนตัวแปรใด ๆ จะทำให้เฟสใดเฟสหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งหายไป เช่นการลดอุณหภูมิจะทำให้เฟสของเหลวหายไปหรือการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เฟสสารละลายของแข็งหายไป 2 เฟส เป็นต้น

พิจารณาโลหะผสม Alloy 1 ในภาพ 2.7 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี 61.9 wt%Sn เท่ากับส่วนผสมยูเทคติก โลหะผสม alloy 1 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 183 °C จะยังคงมีสถานะเป็นโลหะหลอมเหลวอยู่ เมื่อเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมียูเทคติก 183 °C โลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัวโดยเกิดปฏิกิริยายูเทคติกได้ของผสมยูเทคติกระหว่างสารละลายของแข็ง α (19.2 wt%Sn) และ β (97.5 wt%Sn) ปฏิกิริยา คือ



สารละลายของแข็งทั้งสองส่วนผสมจะเกิดขึ้นด้วยกระบวนการแพร่โดยจะเกิดขึ้นเป็นชั้นสลับกันระหว่าง α และ β เมื่อโลหะผสมแข็งตัวเสร็จสิ้นแล้ว อุณหภูมิที่ลดลงต่อไปจะทำให้ความสามารถในการละลายในกันและกันลดลง (เส้น solvus) แต่เนื่องจากความสามารถในการแพร่ในของแข็งจะค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการแพร่ในของเหลว เมื่อโลหะเย็นตัวแล้วจึงยังคงโครงสร้างที่เป็นชั้น ๆ อยู่ที่อุณหภูมิต่ำ ภาพโครงสร้างจุลภาคของของผสมยูเทคติกที่มีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับยูเทคติกของ Pb-Sn แสดงไว้ในภาพ 2.8a)

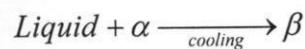
ถ้าหากส่วนผสมไม่เท่ากับส่วนผสมยูเทคติก ยกตัวอย่างเช่น โลหะผสม alloy 2 ในภาพ 2.7 (60 wt%Pb – 40%Sn) เมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงมาถึงเส้น liquidus จะเกิดของแข็งขึ้นคือสารละลายของแข็ง α โดยมีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับจุดที่ tie line ตัดกับเส้น solidus ที่อุณหภูมินั้น เมื่อโลหะผสมเย็นตัวจนถึงอุณหภูมียูเทคติกของเหลวที่เหลือ (คำนวณได้จากกฎคานงัด) จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกในลักษณะเดียวกับโลหะผสมที่มีส่วนผสมยูเทคติก ได้ของผสมระหว่าง α และ β โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเมื่อแข็งตัวเสร็จสิ้นแล้วจะประกอบไปด้วยเกรนของสารละลายของแข็ง α (Pro-Eutectic solid solution) กับของผสมยูเทคติก โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Alloy 2 แสดงไว้ในภาพ 2.8b) เมื่อโลหะผสมมีปริมาณธาตุผสมน้อยกว่าส่วนผสมยูเทคติกจะเรียกว่า “Hypo-eutectic alloys” และถ้ามีปริมาณธาตุผสมมากกว่าส่วนผสมยูเทคติกจะเรียกว่า “Hyper-eutectic alloys”



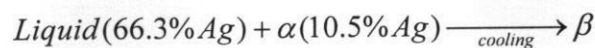
ภาพ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของ Pb-Sn (a) ที่ส่วนผสม eutectic (61.9 wt%Sn)
(b) 40 wt%Sn-Pb

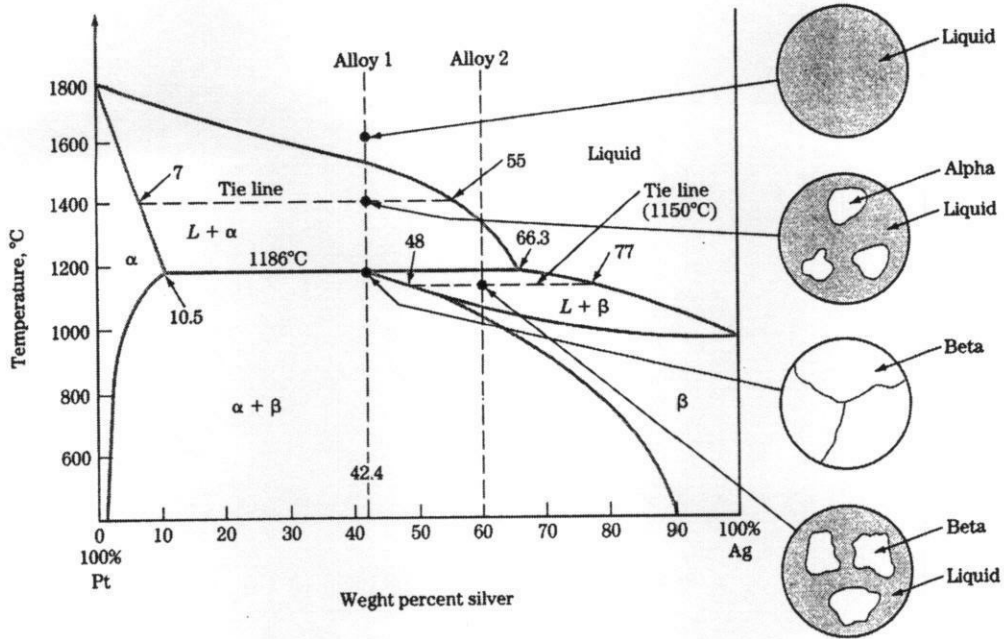
2.6 Binary Peritectic Alloys System

นอกจากปฏิกิริยายูเทคติกที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว อีกปฏิกิริยาหนึ่งก็คือ peritectic reaction โดยจะพบได้มากในกรณีที่ธาตุทั้งสองมีจุดหลอมเหลวที่ต่างกันมาก ปฏิกิริยา peritectic มีสารตั้งต้นคือของเหลวทำปฏิกิริยากับสารละลายของแข็งให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารละลายของแข็งอีกประเภทหนึ่ง



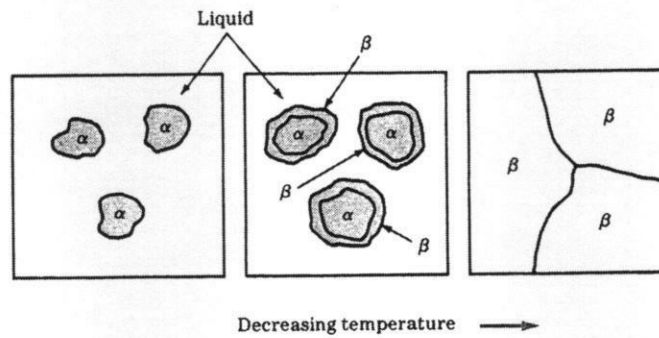
ภาพ 2.9 แสดงแผนภูมิสมดุลของ Pt และ Ag จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 1186 °C และ ส่วนผสมทางเคมีเท่ากับ 42.4 wt%Ag มี invariant point คือจุดเพอริเทคติก ถ้าโลหะผสม หลอมเหลวที่มีส่วนผสมดังกล่าว (alloy 1 ในภาพ 2.9) เมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงเส้น liquidus จะทำให้เกิดการแข็งตัวเกิดสารละลายของแข็งขึ้นคือ α โดยจะมีปริมาณเฟสเพิ่มขึ้นตามกฎคานังด์ เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิเพอริเทคติก โลหะหลอมเหลวที่เหลือและสารละลายของแข็งที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาให้สารละลายของแข็งอีกชนิดหนึ่งคือ β





ภาพ 2.9 แผนภูมิสมดุลของ Pt - Ag

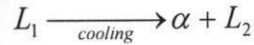
ถ้าโลหะผสมมีส่วนผสม 60 wt%Ag-Pt (alloy 2 ในภาพ 2.9) เมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวมาถึงเส้น liquidus จะทำให้เกิดสารละลายของแข็งขึ้นคือ α และเมื่อเย็นตัวมาถึงอุณหภูมิเพอริเทคติกของเหลวและ α จะทำปฏิกิริยาให้ β โดย β ที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นบริเวณรอบเฟส α ที่เกิดขึ้นก่อน ดังแสดงในภาพ 2.10 จนเมื่อถึงเส้น solidus โลหะผสมก็จะกลายเป็น β ทั้งหมด



ภาพ 2.10 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของ 60 wt%Ag-Pt ซึ่งเกิดปฏิกิริยา peritectic ระหว่างการแข็งตัว

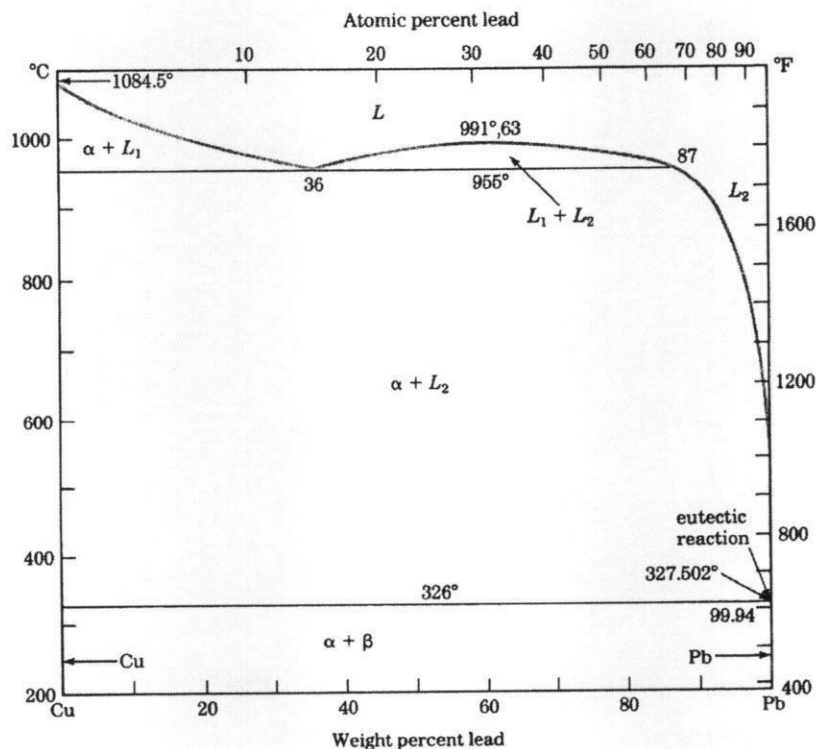
2.7 Binary Monotectic Alloys System

สำหรับ invariant point อีกแบบหนึ่งเกิดขึ้นเมื่อธาตุสองชนิดไม่สามารถละลายกันได้อย่างสมบูรณ์ในสถานะของเหลว คล้ายกับการแยกตัวระหว่างน้ำและน้ำมัน โดยจะมีสารละลายของเหลวสองชนิดคือ L_1 และ L_2 ปฏิกริยาเกิดขึ้นเมื่อสารละลายของเหลว L_1 แยกตัวเป็นสารละลายของเหลว L_2 และสารละลายของแข็ง α



ตัวอย่างของแผนภูมิสมดุลที่มีลักษณะเช่นนี้ได้แก่ Cu-Pb (ภาพ 2.11) สำหรับปฏิกริยาโมโนเทคติกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 955 °C และ 36 wt%Pb โดยเมื่อโลหะเย็นตัวผ่านอุณหภูมิโมโนเทคติกแล้วของเหลวที่เหลือจะกลายเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า (327.5 °C) โดยทั่วไปแล้วตะกั่วสามารถละลายในธาตุต่างๆ ได้ค่อนข้างน้อยและมักจะถูกเติมในโลหะผสมเพื่อวัตถุประสงค์ที่จะลดความเหนียวของโลหะผสมลง ทำให้สามารถกลึง ไส กัด เจาะได้ง่ายขึ้น โดยจะทำให้เศษกลึงขาดง่ายขึ้น

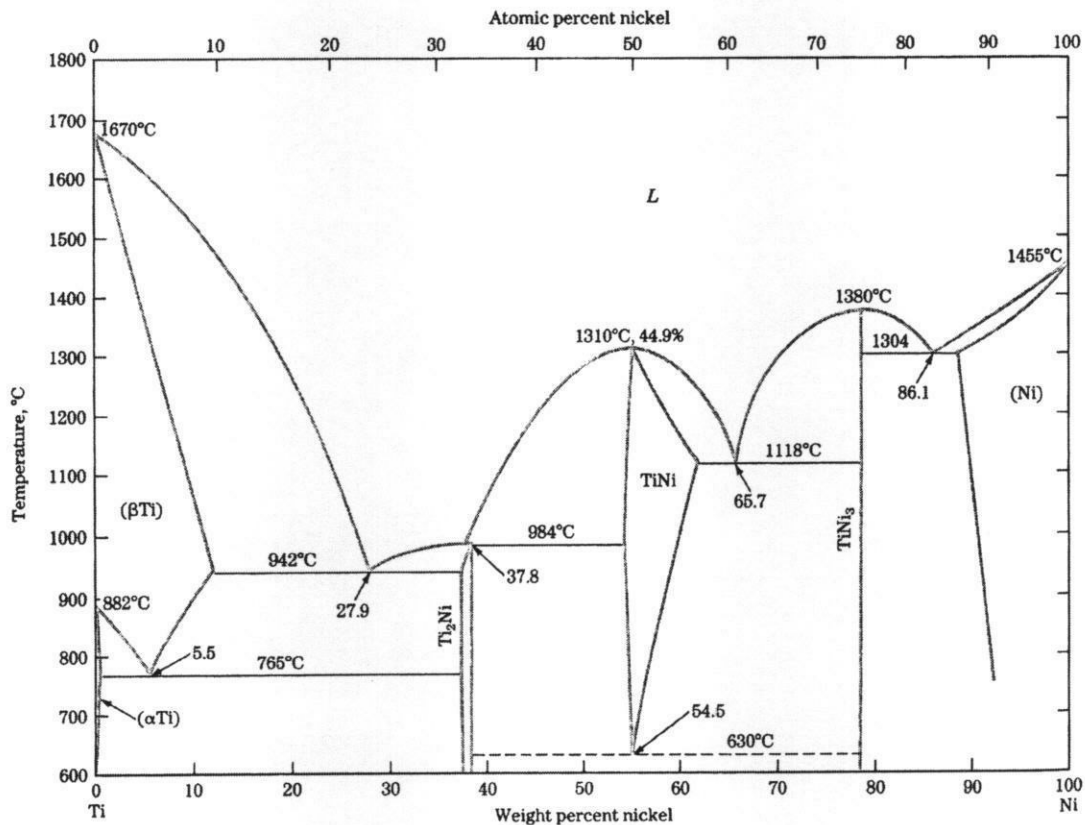
สำหรับปฏิกริยาในลักษณะเดียวกันกับปฏิกริยายูเทคติก, เพอริเทคติก, โมโนเทคติก แต่เกิดขึ้นในสถานะของแข็งจะมีชื่อเรียกที่ต่างออกไปคือ eutectoid, peritectoid และ monotectoid ตามลำดับ



ภาพ 2.10 แผนภูมิสมดุลของ Cu-Pb

2.8 แผนภูมิสมมูลที่มีสารประกอบเชิงโลหะ

สารประกอบเชิงโลหะคือสารประกอบของโลหะที่มีสัดส่วนทางเคมีที่แน่นอน เช่น Fe_3C เป็นต้น สารประกอบเชิงโลหะจะปรากฏในแผนภูมิสมมูลในลักษณะที่เป็นเส้นตรงหรือบริเวณแคบในแนวตั้ง หากสารประกอบนั้นมีเสถียรภาพอยู่ในสมมูลจนถึงจุดหลอมเหลว เมื่อโลหะผสมหลอมเหลวที่มีส่วนผสมทางเคมีเท่ากับสารประกอบนั้นเกิดการแข็งตัวจะทำให้ไม่มีช่วงการแข็งตัว กล่าวคือมีอุณหภูมิการแข็งตัวคงที่ในลักษณะเดียวกันกับสารบริสุทธิ์ การแข็งตัวของโลหะผสมในลักษณะนี้ เรียกว่า "Congruent melting" ยกตัวอย่างเช่น ในแผนภูมิสมมูลระหว่าง Ni และ Ti (ภาพ 2.12) จะพบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะอยู่หลายตัว ได้แก่ Ti_2Ni , $NiTi$, Ni_3Ti โดยจะปรากฏในแผนภูมิสมมูลเป็นเส้นตรงหรือบริเวณแคบ ๆ แนวตั้ง เฟส $NiTi$ มีความสำคัญคือมีปรากฏการณ์จำรูป เป็นโลหะจำรูปที่มีความสำคัญมากที่สุดระบบหนึ่ง สามารถนำไปใช้งานเป็นตัวกระตุ้นในงานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย



ภาพ 2.11 แผนภูมิสมมูลของ Ni - Ti

2.9 สรุป

ตาราง 2.1 แสดง invariant reaction ต่าง ๆ ในแผนภูมิสมดุระบบสองธาตุและสมการปฏิกิริยารวมทั้งลักษณะที่ปรากฏในแผนภูมิสมดุล

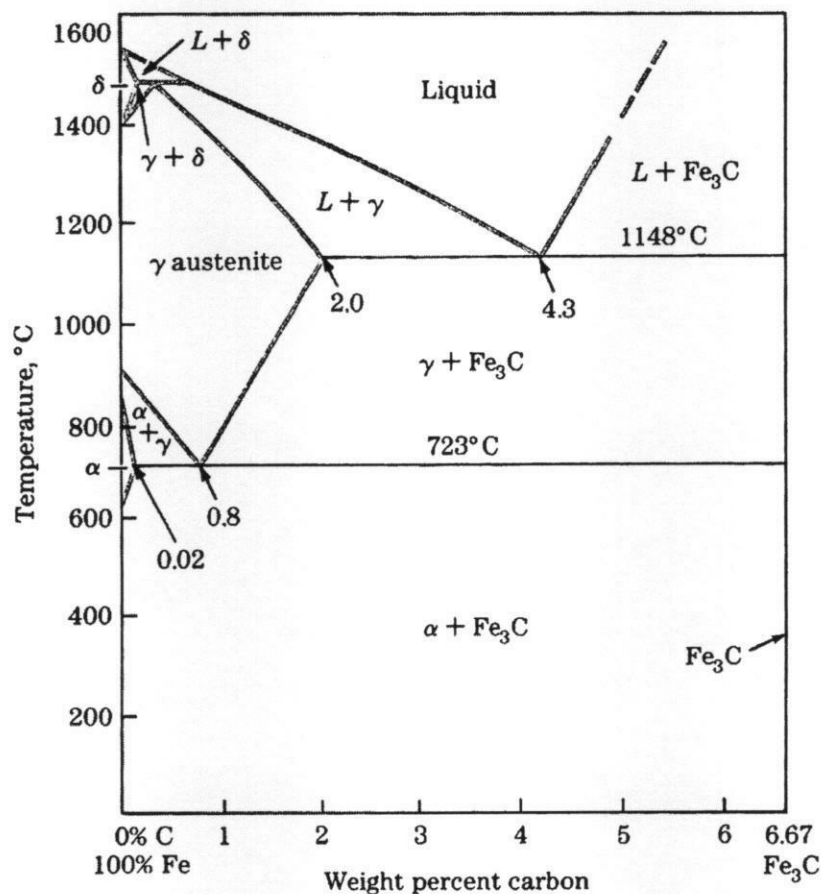
Name of reaction	Equation	Phase-diagram characteristic
Eutectic	$L \xrightarrow{\text{cooling}} \alpha + \beta$	
Eutectoid	$\alpha \xrightarrow{\text{cooling}} \beta + \gamma$	
Peritectic	$\alpha + L \xrightarrow{\text{cooling}} \beta$	
Peritectoid	$\alpha + \beta \xrightarrow{\text{cooling}} \gamma$	
Monotectic	$L_1 \xrightarrow{\text{cooling}} \alpha + L_2$	

บทที่ 3

แผนภูมิสมดุลของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ Iron-Iron Carbide Phase Diagram

อ. สารัมภ์ บุญมี

ภาพ 3.1 แสดงแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ อันที่จริงแล้วแผนภูมิของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์นั้นไม่ใช่แผนภูมิสมดุลเนื่องจาก เหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) ไม่ใช่เฟสที่สมดุล โดยเหล็กคาร์ไบด์หรือเรียกกันในเรื่อง "Cementite" จะสามารถแตกตัวในเฟสที่เสถียรกว่าคือแกรไฟต์ (Graphite: C) สภาพในลักษณะเดียวกันกับ cementite นี้เรียกว่า "metastable" หรือ กึ่งเสถียร อย่างไรก็ตาม Fe_3C มีเสถียรภาพค่อนข้างสูง จึงสามารถพิจารณาแผนภูมิเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ เหมือนกับแผนภูมิสมดุลทั่วไปได้



ภาพ 3.1 แผนภูมิ Fe - Fe₃C

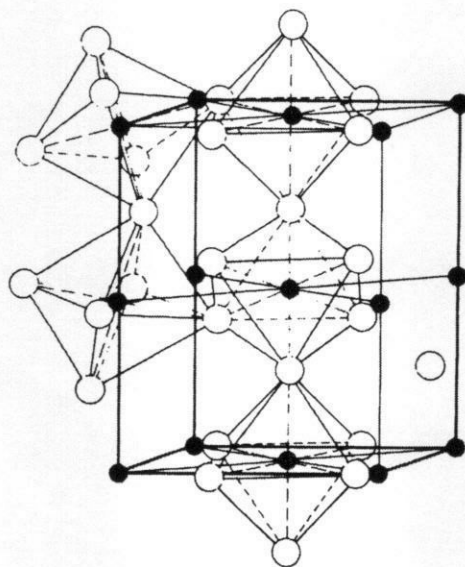
3.1 เฟสของแข็งในแผนภูมิ Fe-Fe₃C

จากแผนภูมิ Fe-Fe₃C (ภาพ 3.1) จะพบว่ามีเฟสสารละลายของแข็งและสารประกอบเชิงโลหะปรากฏอยู่ ได้แก่ α -ferrite, austenite (γ), cementite (Fe₃C) , δ -ferrite

α -ferrite เฟสนี้เป็นเฟสสารละลายของแข็ง มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC คาร์บอนอะตอมจะแทรกอยู่ใน lattice ของเหล็กได้เนื่องจากมีขนาดอะตอมเล็กเมื่อเทียบกับเหล็ก ความสามารถในการละลายของคาร์บอนในเหล็กมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยจะละลายได้มากที่สุดที่ 723 °C คือ 0.025 wt%C เท่านั้นและความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ตามเส้น solvus ในแผนภูมิ

Austenite (γ) เป็นเฟสสารละลายของแข็งระหว่างเหล็กและคาร์บอน มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC คาร์บอนสามารถละลายใน austenite ได้มากกว่าใน ferrite หลายเท่า โดยสามารถละลายได้มากที่สุดที่ 1148 °C คือ 2.08 wt%C และลดลงเหลือ 0.8 wt%C ที่ 723 C โดยปกติแล้วเฟส austenite เป็นเฟสที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่ปรากฏให้เห็นในโครงสร้างจุลภาค แต่การเติมธาตุผสมบางชนิดเช่น Ni มีผลทำให้ austenite อาจเสถียรที่อุณหภูมิห้องได้เช่นกัน

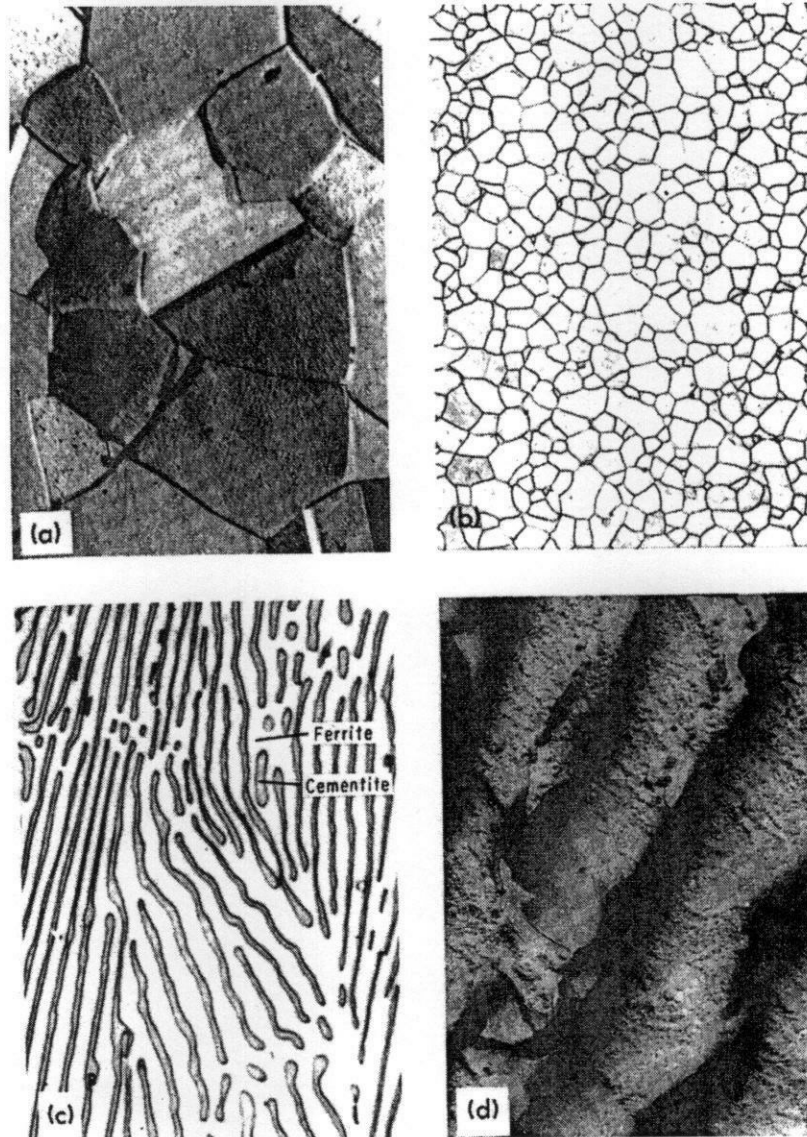
Cementite (Fe₃C) เป็นสารประกอบเชิงโลหะซึ่งมีสัดส่วนทางเคมีที่แน่นอนจึงปรากฏในแผนภูมิเป็นเส้นตรง มีส่วนผสมที่ 6.67 wt%C และ 93.3 wt%Fe cementite เป็นเฟสที่มีความแข็งและเปราะ โครงสร้างผลึกของ Fe₃C เป็นแบบ Orthorhombic ประกอบไปด้วยอะตอมของเหล็ก 12 อะตอมและอะตอมของคาร์บอน 4 อะตอม ภาพ 3.2 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกของ Fe₃C



ภาพ 3.2 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของ Fe₃C

δ -ferrite เป็นเฟสสารละลายของแข็งระหว่างเหล็กและคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเพอริเทคติก มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เหมือนกับ α -ferrite แต่ว่ามี lattice constant ที่สูงกว่า ความสามารถในการละลายสูงสุดของคาร์บอนใน δ -ferrite คือ 0.09 wt%C ที่ 1465 °C

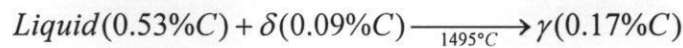
ภาพ 3.3 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแต่ละเฟสในแผนภูมิของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์



ภาพ 3.3 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแต่ละเฟสในแผนภูมิของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์

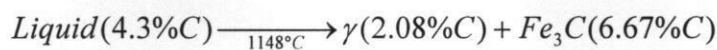
3.2 ปฏิกริยาในแผนภูมิเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์

Peritectic reaction เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1495 °C สารตั้งต้นคือเหล็กหลอมเหลวที่ ส่วนผสม 5.3 wt%C และ δ -ferrite 0.09 wt%C เกิดสารละลายของแข็ง Austenite (γ) ที่ 0.17 wt%C ปฏิกริยา คือ



δ -ferrite เป็นเฟสที่เสถียรที่อุณหภูมิสูงและไม่พบในเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิห้อง

Eutectic reaction เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1148 °C สารตั้งต้นคือเหล็กหลอมเหลว 4.3 wt%C เกิดสารละลายของแข็ง Austenite (γ) (2.08 wt%C) และสารประกอบเชิงโลหะ cementite (Fe_3C) 6.67 wt%C ปฏิกริยา คือ



ปฏิกริยานี้มีบทบาทสำคัญสำหรับเหล็กหล่อซึ่งมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงนี้ แต่ไม่มีบทบาทสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่านี้มาก

Eutectoid reaction เกิดที่อุณหภูมิ 723 °C สารตั้งต้นคือ Austenite (γ) 0.8 wt%C ให้สารละลายของแข็ง α -ferrite (0.025 wt%C) และ Fe_3C (6.67 wt%C) ปฏิกริยา คือ

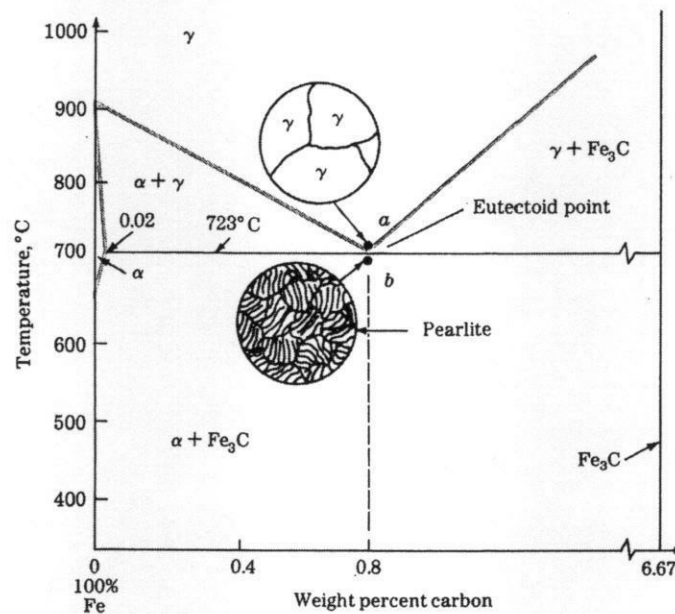


ปฏิกริยายูเทคตอยเกิดขึ้นในสถานะของแข็งซึ่งมีบทบาทสำคัญในการอบชุบเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเท่ากับ 0.8 wt%C เรียกว่า Eutectoid steel หากเหล็กกล้าคาร์บอนมีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8 wt%C จะเรียกว่า Hypoeutectoid steel และเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8 wt%C จะเรียกว่า Hypereutectoid steel

3.3 Eutectoid Carbon Steel

ถ้ามีตัวอย่างเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.8 wt%C (Eutectoid steel) เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 723 °C ด้วยระยะเวลาที่นานพอจะได้เฟสที่เสถียรคือ austenite (จุด a ในภาพ 3.4) กระบวนการนี้เรียกว่า "Austenitizing" ถ้า eutectoid carbon steel นี้เย็นตัวลงมาอย่างช้าๆ หรือเย็นตัวอย่างสมดุลจนต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอย (จุด b ในภาพ 3.4) จะทำให้เกิด

การแตกตัวตามปฏิกิริยาแยกออกจาก austenite เป็น ferrite + cementite ได้โครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นๆ (lamellar structure) สลับกันระหว่าง ferrite และ cementite เรียกว่า "Pearlite" ภาพ 3.5 แสดงโครงสร้าง Pearlite ของ eutectoid carbide steel เนื่องจากความสามารถในการละลายของคาร์บอนใน ferrite ต่ำมากและลดลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง ดังนั้นโครงสร้าง Pearlite จะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงหลังจากเกิดปฏิกิริยาแยกตัวแล้ว



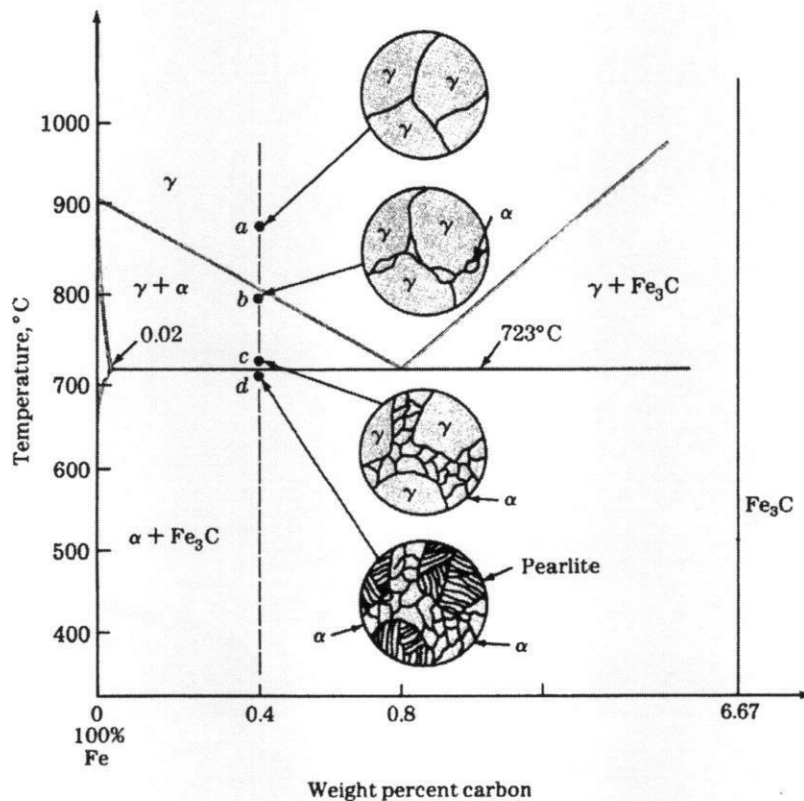
ภาพ 3.4 การเปลี่ยนเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.8%C



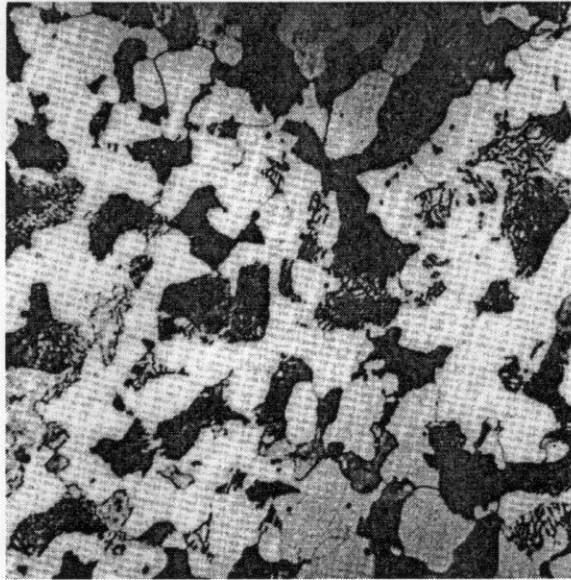
ภาพ 3.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.8%C (650x)

3.4 Hypoeutectoid Carbon Steel

ยกตัวอย่างเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4 wt%C ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนประเภท Hypoeutectoid เมื่อให้อุณหภูมิประมาณ 900 °C (จุด a ในภาพ 3.6) เป็นระยะเวลา นานเพียงพอที่จะทำให้เฟสทั้งหมดเป็น austenite เมื่อเหล็กกล้าเย็นตัวลงมาถึงจุด b จะเกิดเฟส ferrite ขึ้นตามบริเวณตามมุมหรือขอบเกรน เมื่อเหล็กกล้าเย็นตัวต่อไปเรื่อย ๆ ปริมาณเฟส ferrite จะเพิ่มขึ้นตามกฎคานังต์โดยที่จุด c จะมีเฟส ferrite มากกว่าจุด b เมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคตอย austenite ที่เหลือจะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยเปลี่ยนจาก austenite ไปเป็น pearlite ในลักษณะเดียวกันกับ eutectoid steel โครงสร้างสุดท้ายที่ได้จะประกอบไปด้วย ferrite ที่เกิดขึ้นก่อนแยกตัวเป็นเกรนจาก pearlite สำหรับ ferrite ที่มีลักษณะเช่นนี้เรียกว่า "Proeutectoid ferrite" ปริมาณ proeutectoid ferrite จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนโดยเป็นไปตามกฎคานังต์ เช่น ถ้าเหล็กกล้ามีคาร์บอน 0.025 wt% ก็ประกอบไปด้วย proeutectoid ferrite เพียงเฟสเดียว แต่ถ้าเหล็กกล้ามีคาร์บอน 0.8% ก็จะไม่มีการเกิด proeutectoid ferrite เลยหรือเป็น eutectoid steel ในหัวข้อที่แล้วนั่นเอง ดังนั้นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 0.2 wt% ก็จะมี proeutectoid มากกว่า 0.6%C ด้วยเช่นกัน ภาพ 3.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของ Hypoeutectoid Carbon steel ที่มี 0.35 wt%C



ภาพ 3.6 การเปลี่ยนเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.4%C



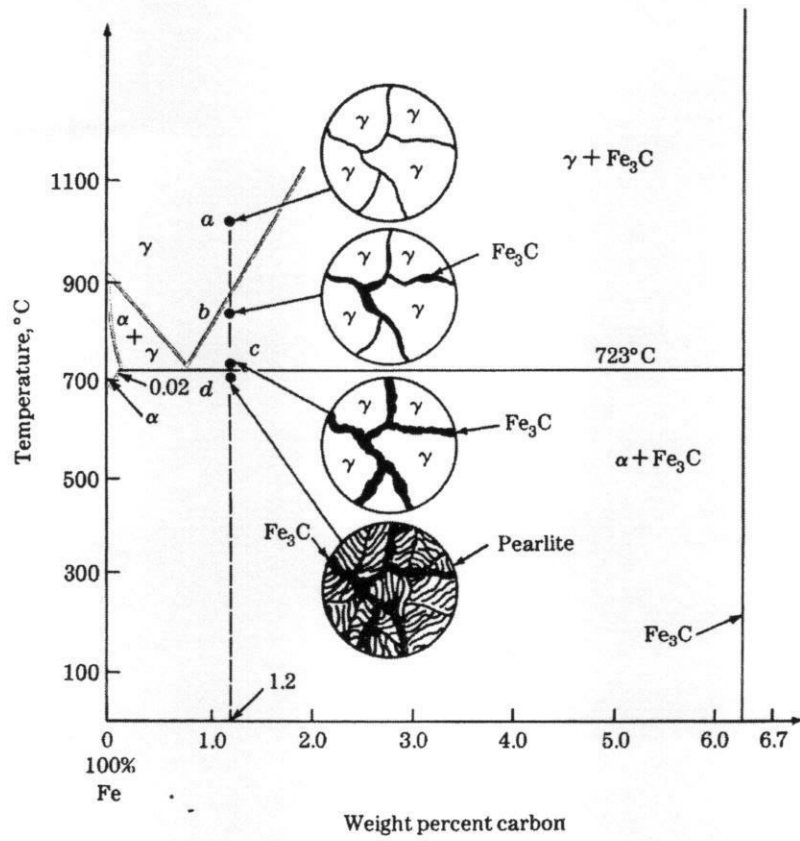
ภาพ 3.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.4%C (500x)

3.5 Hypereutectoid Carbon Steel

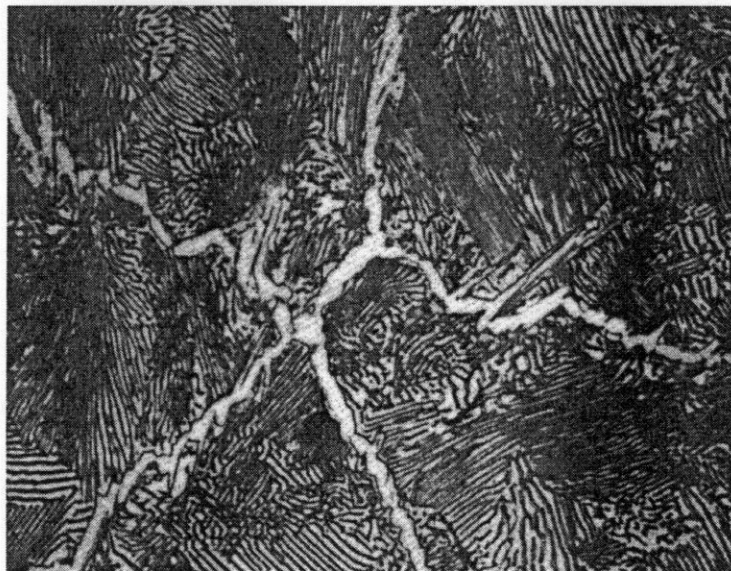
ถ้าเหล็กกล้ามีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2 wt%C ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนประเภท Hypereutectoid Steel ผ่านกระบวนการ austenitizing โครงสร้างที่ได้จะเป็น austenite ทั้งหมด (จุด a ในภาพ 3.8) หลังจากนั้นถูกทำให้เย็นตัวอย่างสมดุลงมาที่จุด b ในภาพ 3.8 จะเกิด cementite ขึ้น ซึ่งเช่นเดียวกับกรณี proeutectoid ferrite โดย cementite ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “Proeutectoid cementite” โดยจะเกิดและขยายตัวตามบริเวณของ austenite เมื่อเหล็กกล้าเย็นตัวต่อไป proeutectoid ก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามกฎคานังต์ จนถึงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอย austenite ที่เหลือจะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยแตกตัวเป็น pearlite โครงสร้างสุดท้ายที่ได้จะประกอบไปด้วย proeutectoid cementite ล้อมรอบ pearlite เป็นโครงข่ายดังภาพ 3.9

3.6 Hypoeutectic White Cast Iron

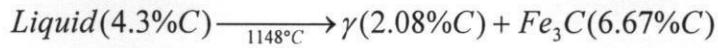
เมื่อเหล็กมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2.08 wt% จะสามารถขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อได้ง่ายกว่าวิธีการอื่นๆ จึงจัดอยู่ในประเภทเหล็กหล่อ สำหรับเหล็กหล่อที่ไม่ได้มีการ treatment ใดๆ เรียกว่าเหล็กหล่อขาว ซึ่งการที่จะเข้าใจโครงสร้างของเหล็กหล่อขาวนั้นต้องทำความเข้าใจตั้งแต่การแข็งตัว สมมุติว่ามีเหล็กหล่อ 0.3 wt%C ซึ่งเป็นเหล็กหล่อขาวประเภท Hypoeutectic เมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงมาถึงเส้น Liquidus จะเริ่มเกิดสารละลายของแข็งขึ้นได้แก่ γ และจะมีปริมาณเฟสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงตามกฎคานังต์ จนถึงอุณหภูมิ 1148 °C เฟสของเหลวจะเกิดปฏิกิริยายูเทคติก ให้ของผสมระหว่างสารละลายของแข็ง γ และสารประกอบเชิงโลหะ Fe_3C โดยมีลักษณะเรียงเป็นแท่งหรือชั้นสลับกัน โครงสร้างนี้เรียกว่า “Ledebulite”



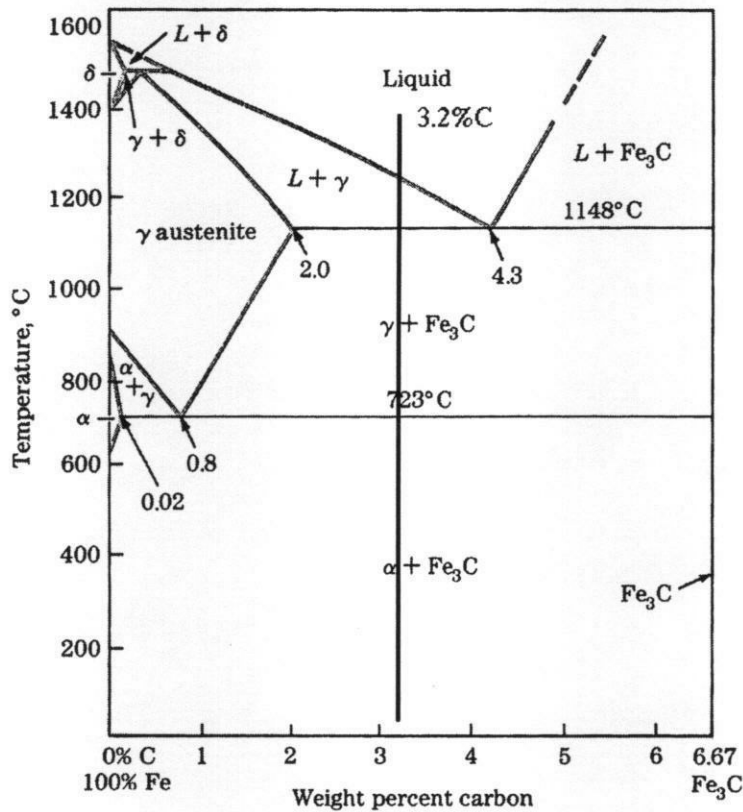
ภาพ 3.8 การเปลี่ยนเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน 1.2%C



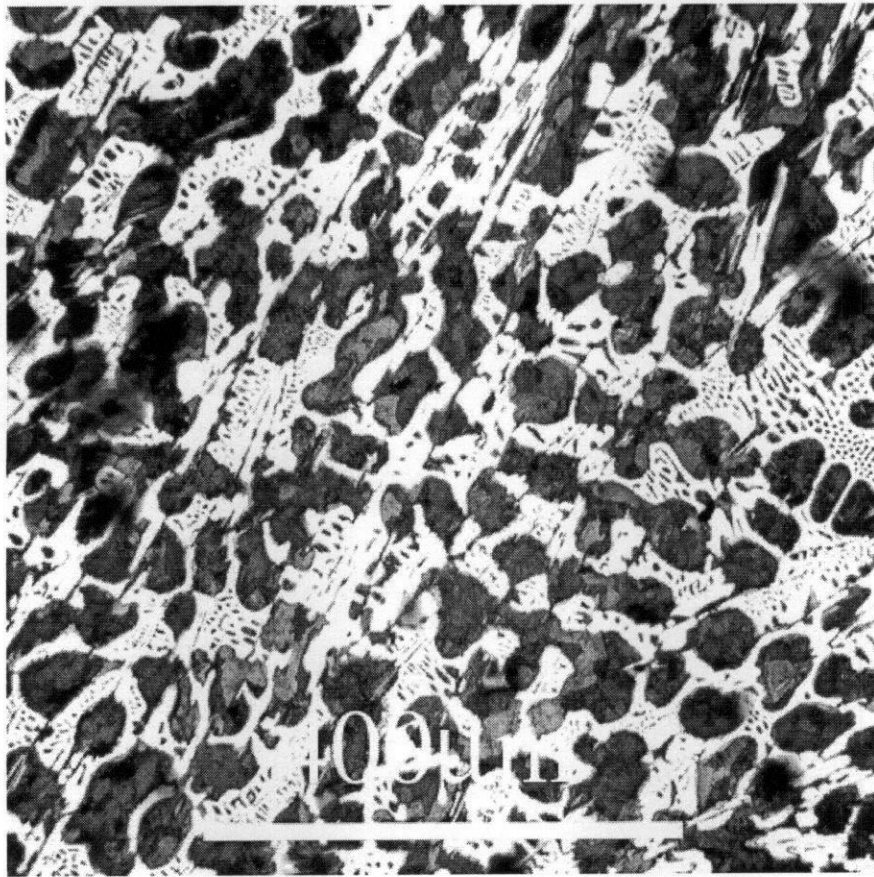
ภาพ 3.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน 1.2%C (1000x)



เมื่อปฏิกิริยายูเทคติกสิ้นสุดเฟสทั้งหมดจะกลายเป็นของแข็งประกอบไปด้วย Proeutectic γ และ ledeburite structure ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) เมื่อโลหะเย็นตัวต่อไปจะมีการเปลี่ยนเฟสจาก γ ไปเป็น Fe_3C จำนวนหนึ่งเนื่องจากเส้นความสามารถในการละลายของคาร์บอนใน γ ลดลง ดังนั้น Fe_3C จึงต้องมีปริมาณมากขึ้นตามกฎคานังต์ เมื่ออุณหภูมิถึงอุณหภูมิต่ำสุดของยูเทคตอย เฟส γ จะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยเปลี่ยนไปเป็น $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ หรือ pearlite ดังนั้นโครงสร้างสุดท้ายจะเห็น pearlite อยู่ในบริเวณที่เคยเป็น γ ภาพ 3.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อขาว hypoeutectic ที่มีคาร์บอน 3.2 wt%C



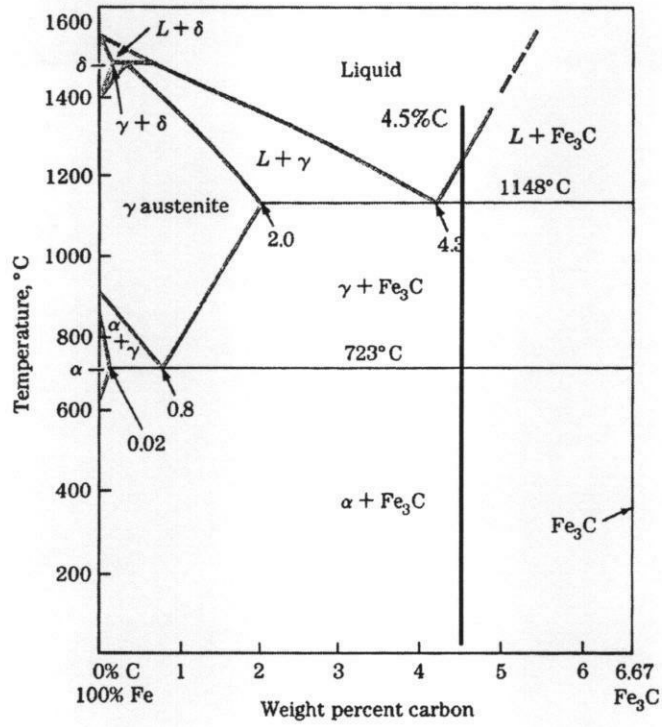
ภาพ 3.10 การเปลี่ยนเฟสของเหล็กหล่อ 3.2%C



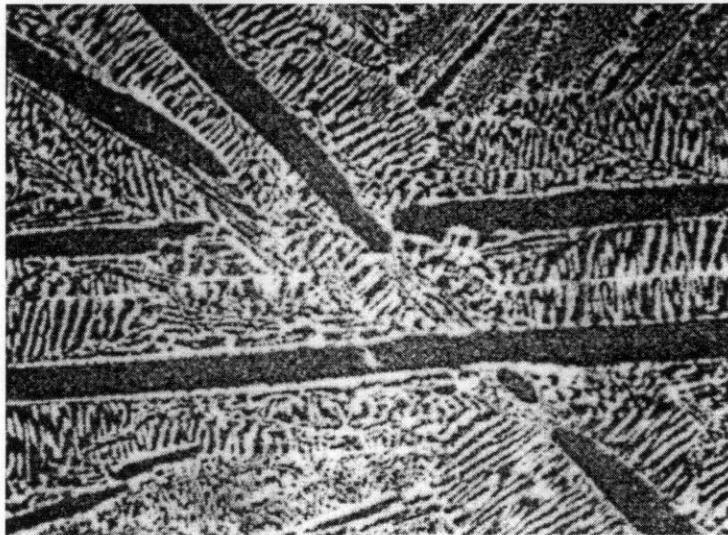
ภาพ 3.11 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อขาว hypoeutectic ที่มีคาร์บอน 3.2 wt%C

3.7 Hypereutectic White Cast Iron

สำหรับเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนเกินกว่า 4.3 wt% เรียกว่า hypereutectic white cast iron โดยเมื่อเย็นตัวมาถึงเส้น liquidus จะเกิดเฟสของแข็งคือสารประกอบเชิงโลหะได้แก่ Fe_3C ซึ่ง Fe_3C ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้เรียกว่า Primary cementite เมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคติกเฟสของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็น ledeburite ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) และเมื่อเย็นตัวต่อไปจะเกิด secondary cementite อันเนื่องมาจากความสามารถในการละลายของคาร์บอนใน γ ลดลง เมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคตอยเฟส γ จะเปลี่ยนไปเป็น $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ สำหรับ Fe_3C ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้เรียกว่า tertiary cementite เหล็กหล่อขาว hypereutectic มีการใช้งานน้อยเนื่องจากมีความเปราะมากเนื่องจาก primary cementite แต่มีความแข็งมาก ในบางครั้งใช้ในงานที่ต้องการความแข็งสูง เช่น ลูกบิด เป็นต้น ภาพ 3.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อขาว hypereutectic ที่มีคาร์บอน 4.32 wt%C



ภาพ 3.12 การเปลี่ยนเฟสของเหล็กหล่อ 4.5%C



ภาพ 3.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อขาว hypereutectic ที่มีคาร์บอน 4.32 wt% C, 0.44Si (100x)

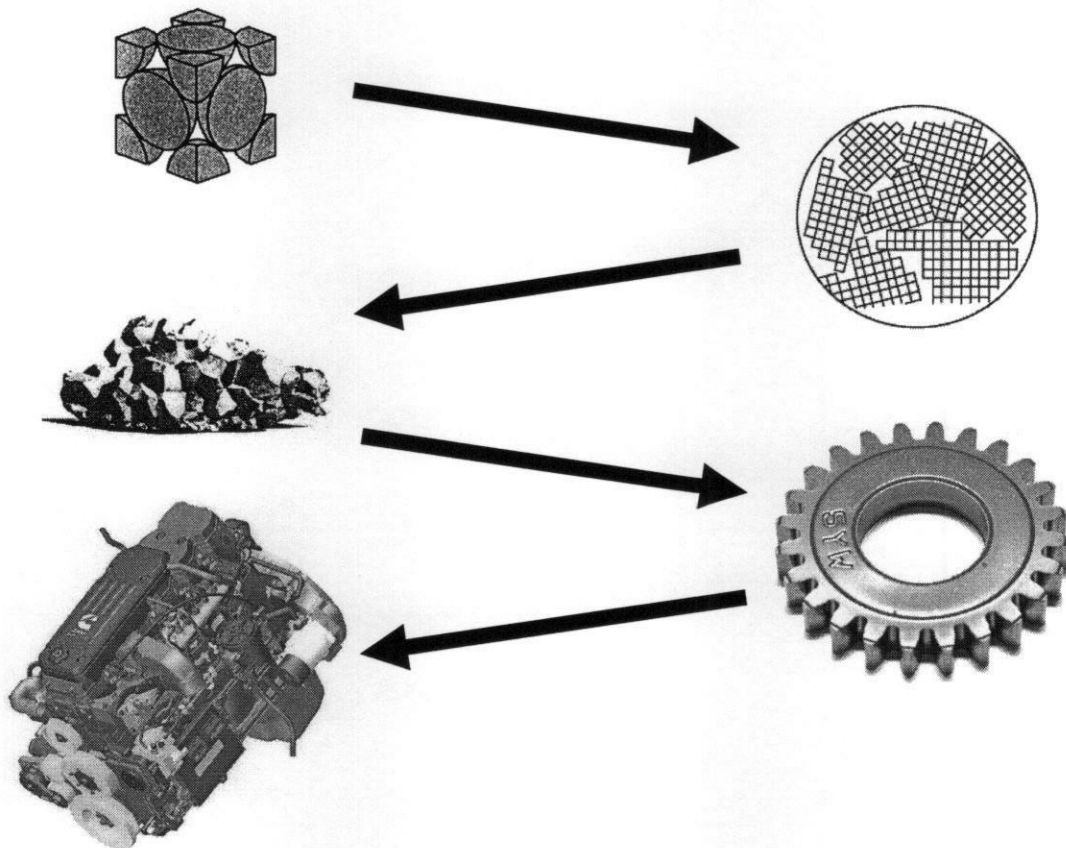
บทที่ 4

โครงสร้างจุลภาคของโลหะ (Microstructure of Metals)

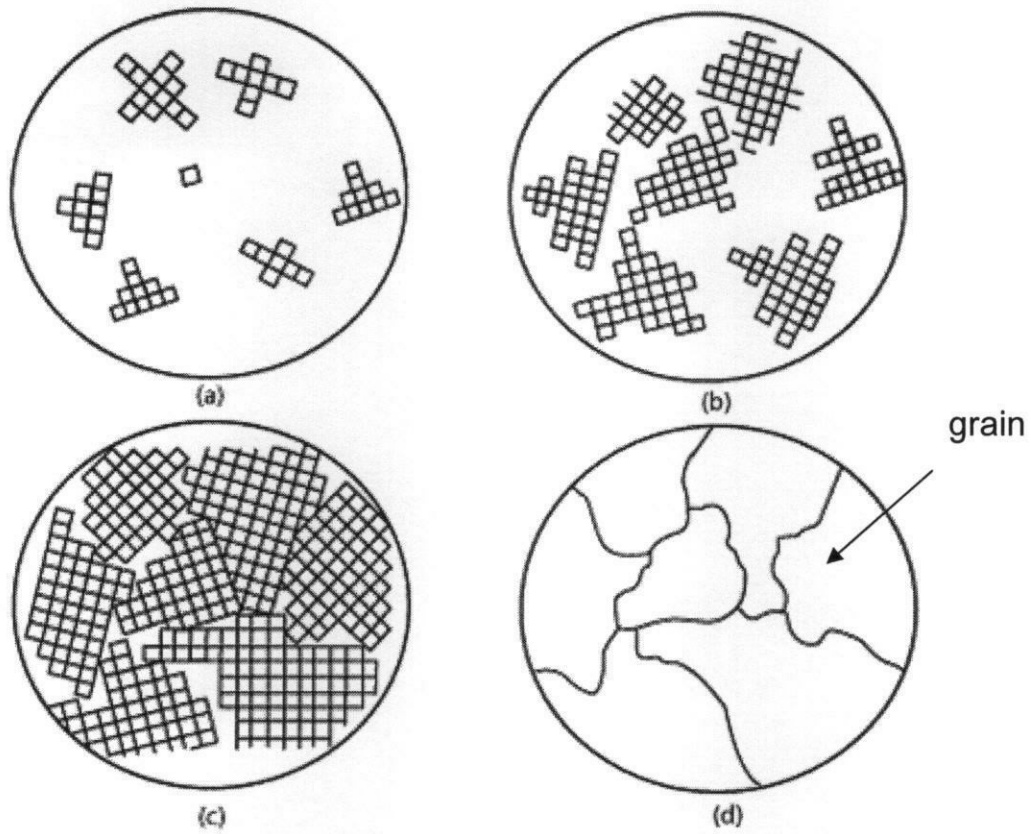
อ.สารัมภ์ บุญมี

4.1 บทนำ

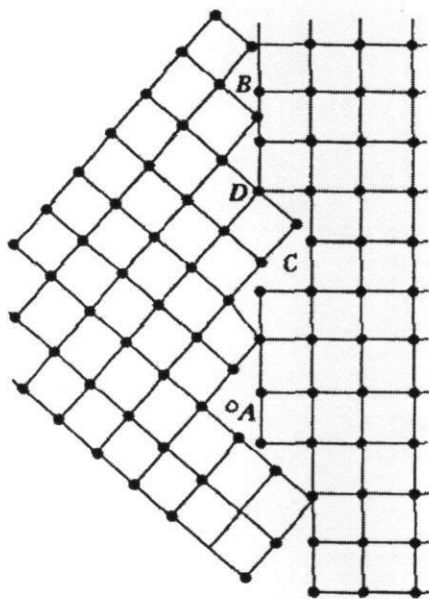
จากความรู้เรื่องโครงสร้างผลึกของโลหะ ทำให้เราทราบว่าโลหะประกอบขึ้นจาก Unit Cell จำนวนมากมาเรียงต่อกัน ถ้าสมมติให้โลหะอยู่ในสภาพหลอมเหลว อะตอมจะจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และมีระยะห่างระหว่างอะตอมมาก เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนทำให้โลหะเกิดการแข็งตัว โลหะจะเริ่มเกิดเป็นนิวเคลียส และขยายตัวต่อเนื่องกันมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน เรียกว่า Dendrite ซึ่งเกิดจากการที่ Unit Cell มาเรียงต่อกันจากแต่ละนิวเคลียส โดยที่แต่ละ Dendrite จะมีทิศทางการเรียงตัวแตกต่างกันไป ดังนั้น เมื่อ Dendrite ขยายตัวมาบรรจบกัน จะทำให้เกิดรอยต่อ เรียกว่า Grain Boundary หรือขอบเกรน ซึ่งชิ้นส่วนโลหะเกิดจากการที่เกรนจำนวนมากมาเรียงต่อกัน และชิ้นส่วนโลหะหลายชิ้นก็ประกอบเป็นเครื่องจักร ดังภาพ 4.1



ภาพ 4.1 อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Unit Cell , Grain , ชิ้นส่วน และเครื่องจักร



ภาพ 4.2 แบบจำลองการเติบโตจากนิวเคลียสเป็นเกรน



คือบริเวณที่แบ่งแยกระหว่างแต่ละเกรนหรือเฟสออกจากกันอย่างชัดเจน เปรียบเสมือนพรมแดนของแต่ละประเทศ

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

ภาพ 4.3 แบบจำลองของ Grain Boundary

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ

เนื่องจากสมบัติเชิงกลของโลหะขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคของโลหะ ดังนั้น ถ้าหากทราบลักษณะโครงสร้างจุลภาค ก็สามารถคาดคะเนสมบัติเชิงกลของโลหะขึ้นนั้นได้

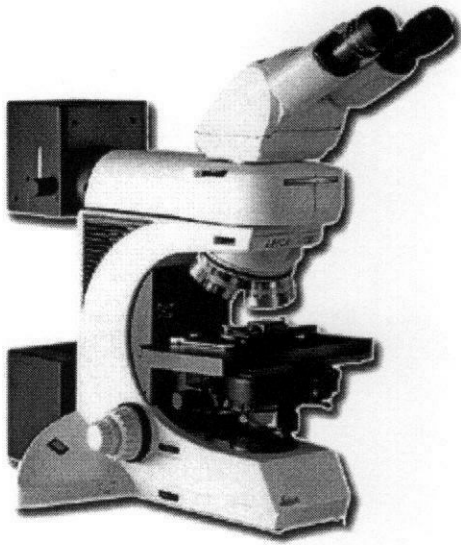
วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ โดยทั่วไปแล้วทำได้โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ซึ่งอาศัยหลักการการตกกระทบและการสะท้อนของแสง โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ดังนี้

1. ตัดชิ้นส่วนที่ต้องการ
2. ขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย จนได้ระนาบและรอยขีดที่มีความลึกสม่ำเสมอ แล้วจึงเพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย แล้วทำการขัดในทิศทางตั้งฉากกับรอยขีดเดิม ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผิวของชิ้นงานเรียบไม่มีรอยขีดข่วน
3. ขัดผิวละเอียดด้วยผงอะลูมินาและผ้าสักหลาดจนผิวชิ้นงานเรียบเหมือนกระจก
4. นำชิ้นงานไปกัดกรด กรดจะกัดผิวหน้าชิ้นงานตามบริเวณ Grain Boundary ทำให้เกิดร่องที่ Grain Boundary
5. นำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์



ภาพ 4.4 เครื่องขัด

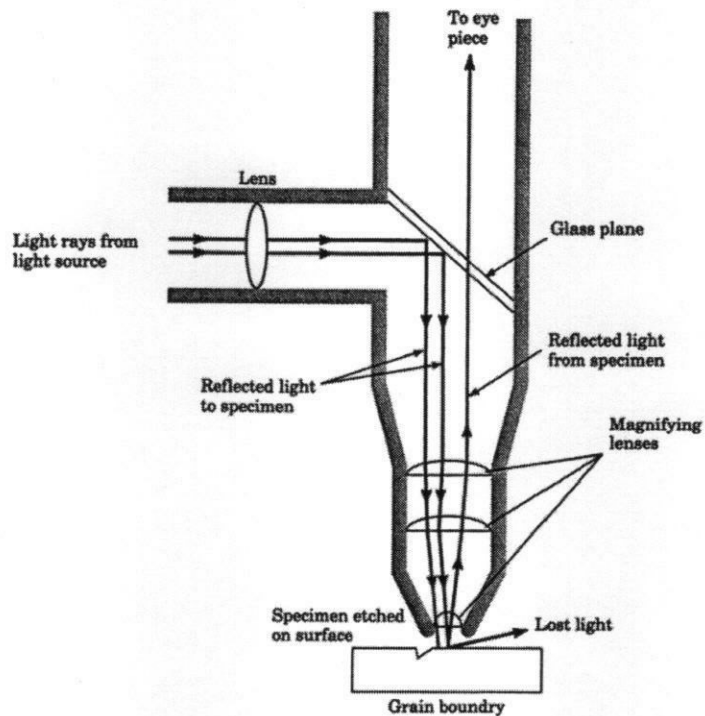
Optical Microscope



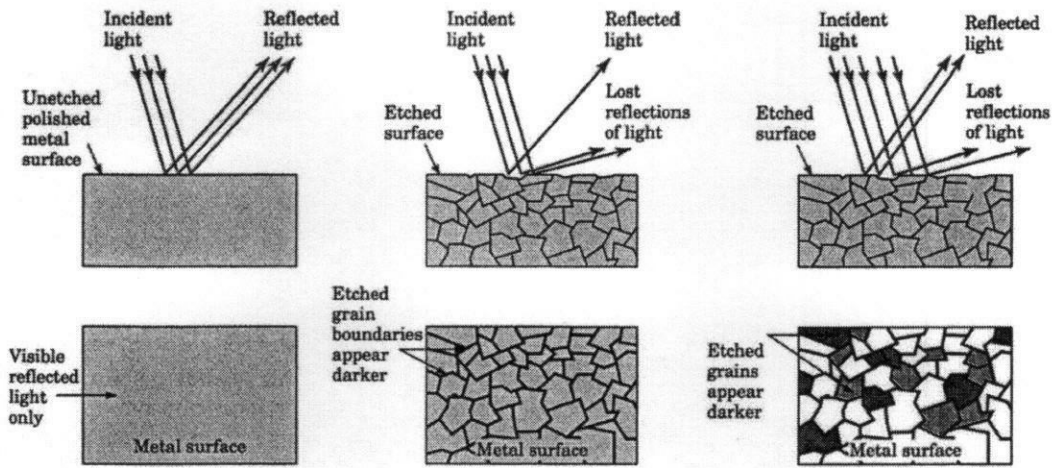
เมื่อแสงตกกระทบพื้นผิว

- | | | |
|-----------|---|------------|
| ผิวขรุขระ | → | สะท้อนออก |
| | → | มืด |
| ผิวเรียบ | → | สะท้อนกลับ |
| | → | สว่าง |

ภาพ 4.5 แบบจำลองของ Grain Boundary



ภาพ 4.6 องค์ประกอบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)



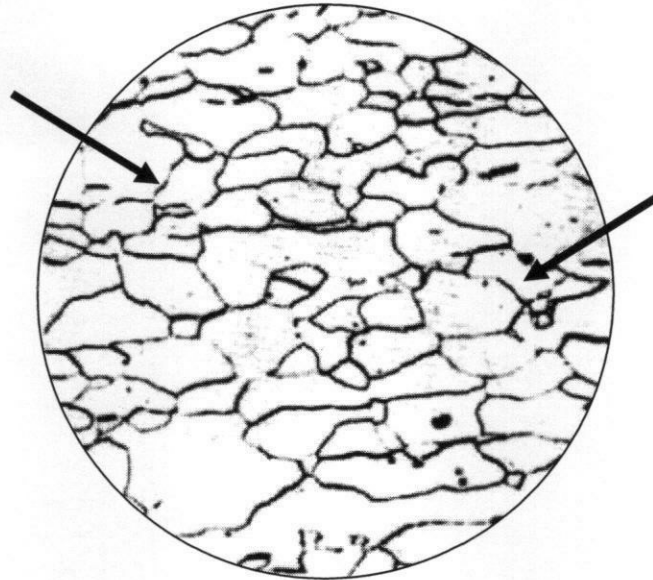
ภาพ 4.6 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

หลังจากที่ชิ้นงานถูกขัดจนมีผิวเรียบแล้ว เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะมองไม่
เป็นโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากผิวหน้าของชิ้นงานเรียบสม่ำเสมอ จึงสะท้อนแสงกลับเข้าสู่เลนส์
ตาทั้งหมด ทำให้ไม่เห็นความแตกต่าง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องทำการกัดกรดที่ผิวหน้าของชิ้นงาน
ซึ่งกรดจะกัดทำให้ Grain Boundary เป็นร่อง และเมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ บริเวณที่
เป็น Grain Boundary แสงที่ตกกระทบจะถูกสะท้อนออก เนื่องจากที่ Grain Boundary มี
ลักษณะเป็นร่อง และปรากฏเป็นบริเวณมืด ในขณะที่บริเวณเกรนซึ่งยังคงมีผิวเรียบอยู่ จะ
สะท้อนแสงกลับเข้าสู่เลนส์ตา และปรากฏเป็นบริเวณสว่าง จึงทำให้เห็นความแตกต่างและแปร
ผลเป็นโครงสร้างจุลภาคในที่สุด

ถ้าหากการขัดผิวหน้าไม่เรียบเสมอดี จะทำให้ปรากฏรอยการขัด มีลักษณะเป็นเส้น ซึ่ง
อาจทำให้แปรผลโครงสร้างจุลภาคคลาดเคลื่อนไป ถ้าหากทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานไม่ดี
ยังคงทิ้งอนุภาคอะลูมินา ซึ่งจะไปปรากฏในโครงสร้างจุลภาคทำให้แปรผลคลาดเคลื่อนเช่นกัน
ถ้าหากกัดกรดเบาเกินไป จะทำให้เห็นขอบเกรนไม่ชัดเจน แต่ถ้าหากกัดกรดแรงเกินไป จะทำ
ให้ได้ผิวหน้าชิ้นงานที่ขรุขระมาก และจะได้ภาพค่อนข้างมืด ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกัดกรดที่ไม่พอดี
นั้น ก็มีผลที่จะทำให้การแปรผลคลาดเคลื่อนด้วยเช่นกัน

อนึ่ง ข้อควรจำคือ ภาพโครงสร้างจุลภาคที่เห็นนั้น ถึงแม้ว่าจะเป็นภาพสองมิติ แต่
โครงสร้างในวัสดุนั้นเป็นภาพสามมิติ

Grain Boundary



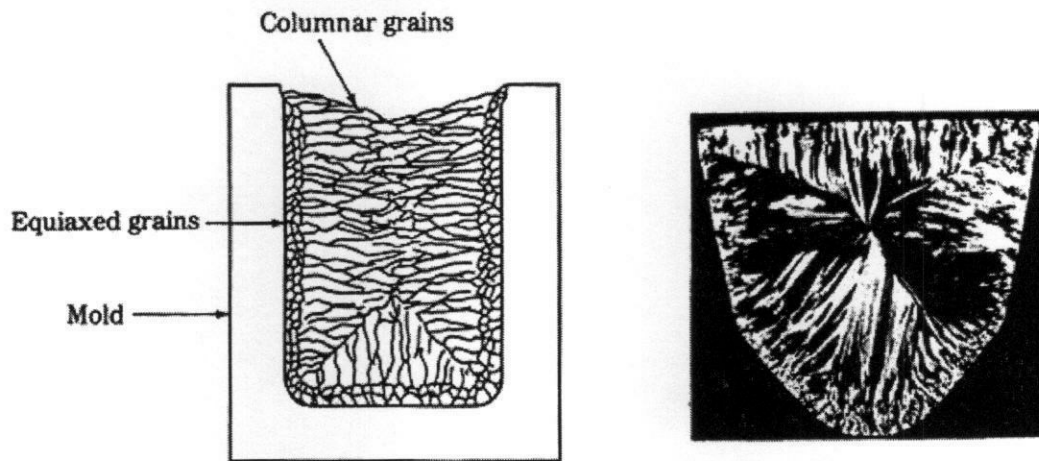
Grain

ภาพ 4.7 แสดงเกรนและขอบเกรน

4.3 ลักษณะของ Grain

ภายในชิ้นงานโลหะ ไม่จำเป็นที่จะต้องมียขนาดและรูปร่างเกรนสม่ำเสมอเท่ากันทั่วทั้งชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานหล่อ จะมีขนาดและรูปร่างขึ้นอยู่กับบริเวณและอัตราการเย็นตัว

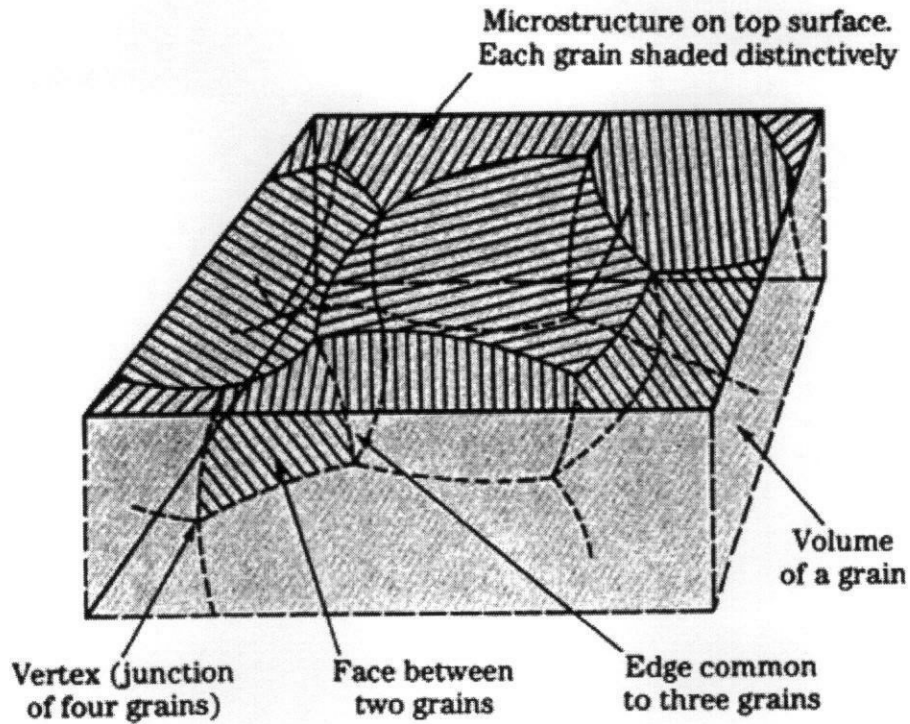
เมื่อโลหะหลอมเหลวสัมผัสแบบหล่อ จะเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้เกรนละเอียด มีรูปร่างเท่ากันทุกทิศทาง เรียกว่า Chill Grain หลังจากนั้น เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนลดต่ำลง เกรนที่เกิดขึ้นจะมีการขยายตัวอย่างมีทิศทาง โดยตั้งฉากกับผนังแบบหล่อหรือขนานกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน เกรนเหล่านี้มีลักษณะเป็นแท่ง เรียกว่า Columnar Grain การที่เกรนมีการเรียงตัวอย่างเป็นทิศทางนี้ จะทำให้สมบัติเชิงกลไม่เท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งเป็นผลเสียและเป็นโครงสร้างที่ไม่ต้องการ ถ้าเป็นชิ้นงานประเภทเหล็ก สามารถปรับปรุงโครงสร้างได้ด้วยวิธีการอบชุบความร้อน ที่บริเวณใจกลางชิ้นงานหลอมมักจะปรากฏเกรนที่มีรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง เช่นเดียวกับ Chill Grain แต่มีขนาดโตกว่า เรียกว่า Equiaxed Grain



ภาพ 4.8 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ



ภาพ 4.9 Equiaxed grains of Ti alloys



ภาพ 4.10 แบบจำลองเกรนในขนาดสามมิติ

4.4 ขนาดเกรน (Grain Size)

จากการที่สมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาค ดังนั้น ขนาดเกรนจึงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลด้วยเช่นกัน ชิ้นงานโลหะที่มีขนาดเกรนเล็กจะมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนใหญ่ ดังนั้น จึงมีการตั้งมาตรฐานขนาดเกรน โดยที่นิยม คือ มาตรฐาน ASTM (American Society of Testing Materials)

วิธีการวัดขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM คือ ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า แล้วนับจำนวนเกรนใน 1 ตารางนิ้ว แล้วนำไปคำนวณขนาด ASTM grain-size number

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

N = จำนวนเกรนในหนึ่งตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100x

n = ASTM grain-size number

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

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

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

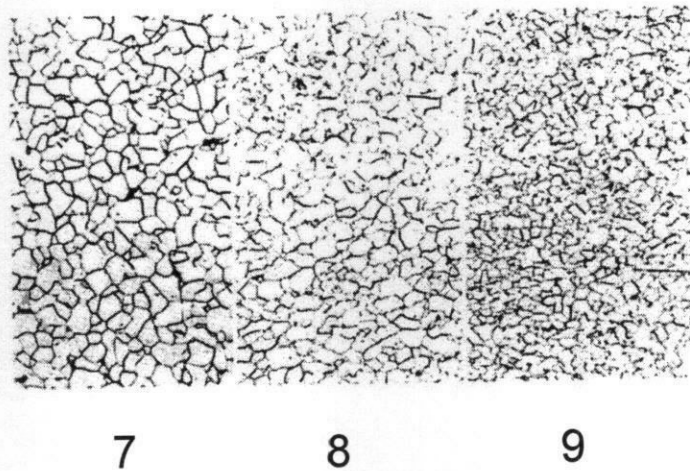
$$1.806 = (n - 1)(0.301)$$

$$n = 7$$

ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM ของโลหะชิ้นนี้เท่ากับ 7

ASTM Grain Sizes

Grain-size no.	Nominal number of grains	
	Per sq mm at 1x	Per sq in at 100x
1	15.5	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



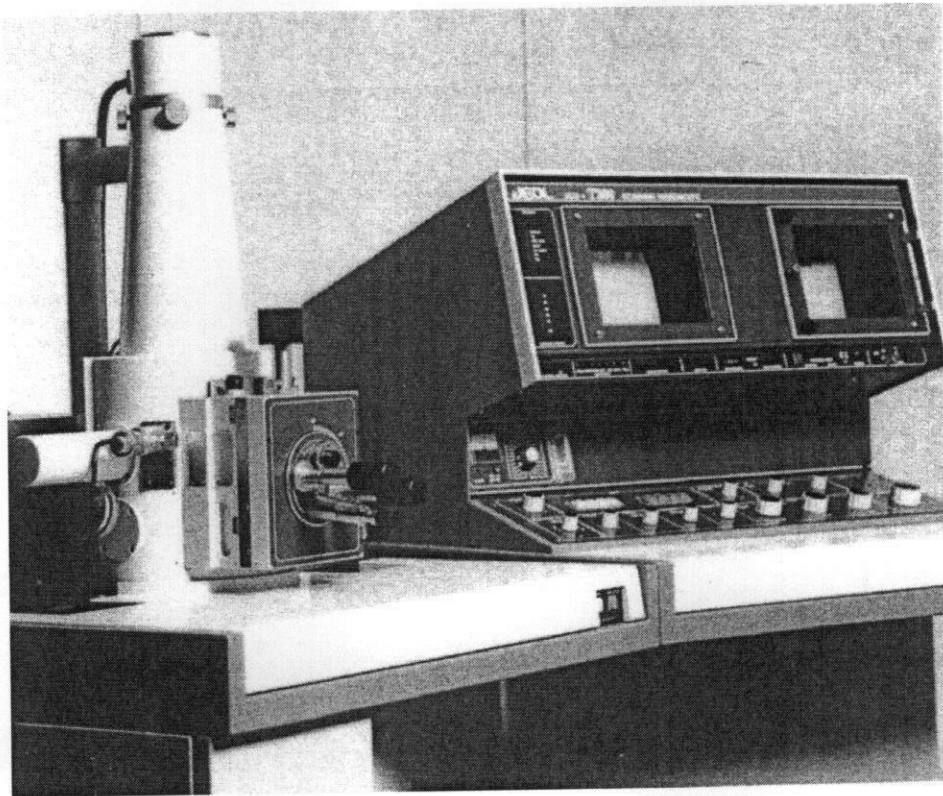
ภาพ 4.11 ตัวอย่างภาพโครงสร้างจุลภาคที่มี ASTM grain-size number ต่างกัน

4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อ Grain size

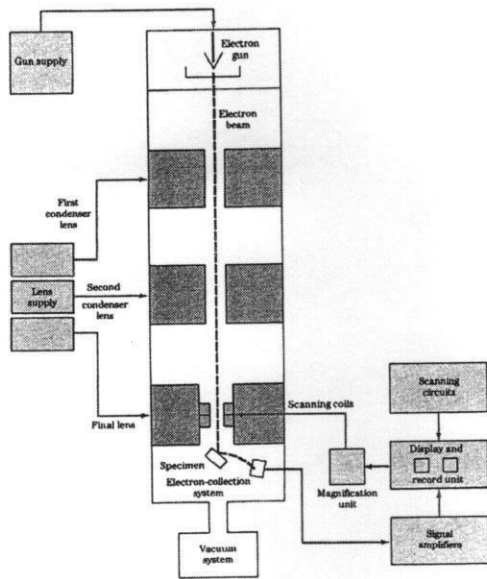
- อัตราการเย็นตัว (Cooling rate)
 - Cooling rate ↑ Grain size ↓
 - Cooling rate ↓ Grain size ↑
- ในขณะที่โลหะหลอมเหลว ถ้าหากโลหะมีอัตราการเย็นตัวสูงจะทำให้ได้ Grain เล็กลงและมีสมบัติเชิงกลดี
- เหล็กกล้าและเหล็กหล่อหลังจากขึ้นรูปแล้วสามารถอบชุบเพื่อให้ได้ Grain เล็กลงได้ เรียกวิธีการนี้ว่า "Heat Treatment"

4.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

นอกจากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่ง คือ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ซึ่งให้กำลังขยายได้สูงกว่า (ประมาณ 200,000 เท่า) และให้ระยะชัดลึก (Depth of field) ที่สูงกว่า



ภาพ 4.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)



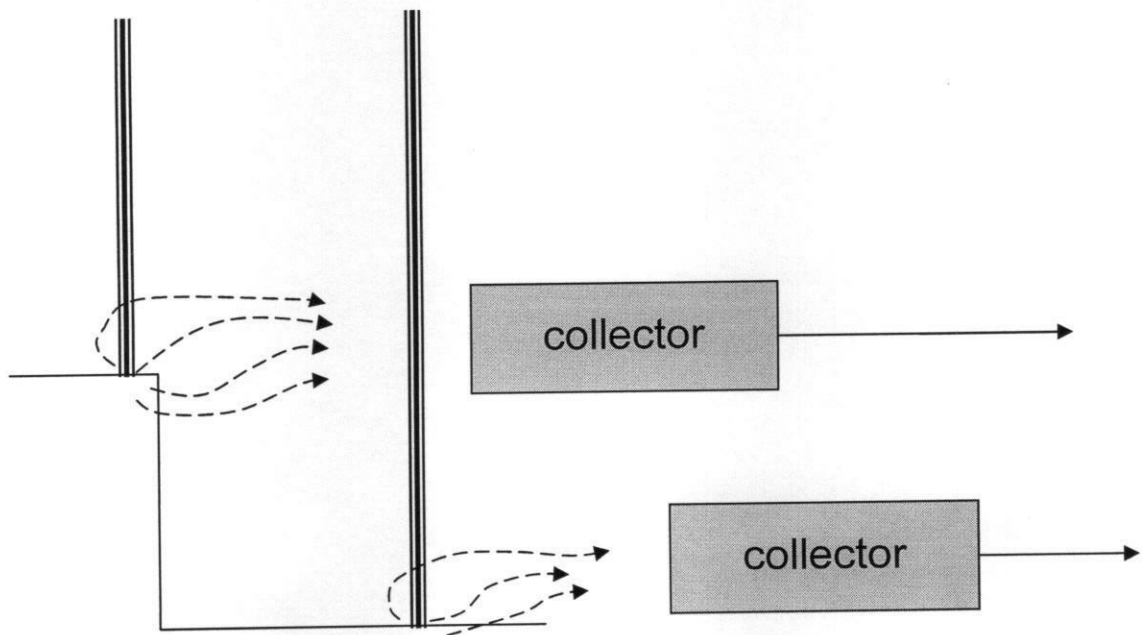
เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิว

- ผิวขรุขระ → สัญญาณมาก
- สว่าง
- ผิวเรียบ → สัญญาณน้อย
- มืด

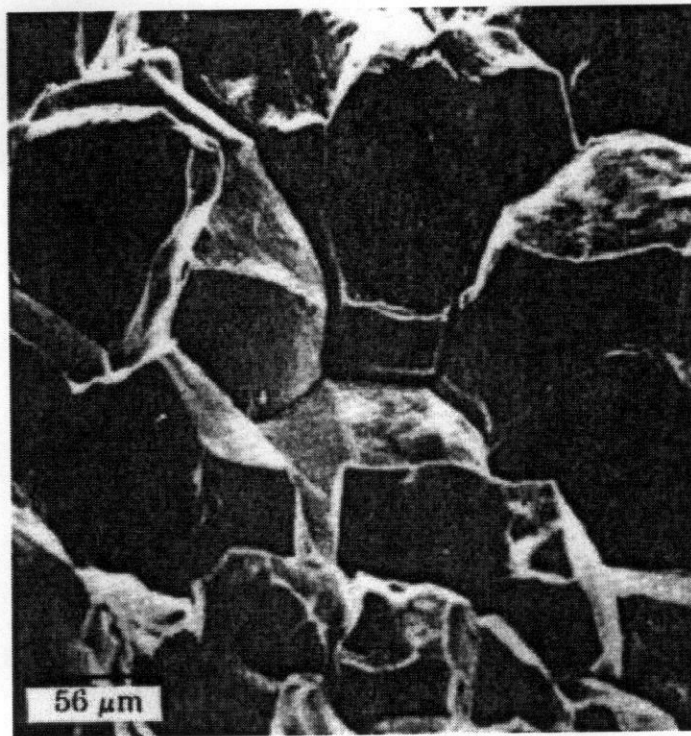
ภาพ 4.13 องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิวของชิ้นงาน ถ้าหากพื้นผิวก่อนข้างเรียบ จะทำให้เกิดสัญญาณน้อยและปรากฏในภาพเป็นบริเวณมืด แต่ถ้าหากพื้นผิวขรุขระ จะทำให้เกิดสัญญาณมากและปรากฏในภาพเป็นบริเวณสว่าง

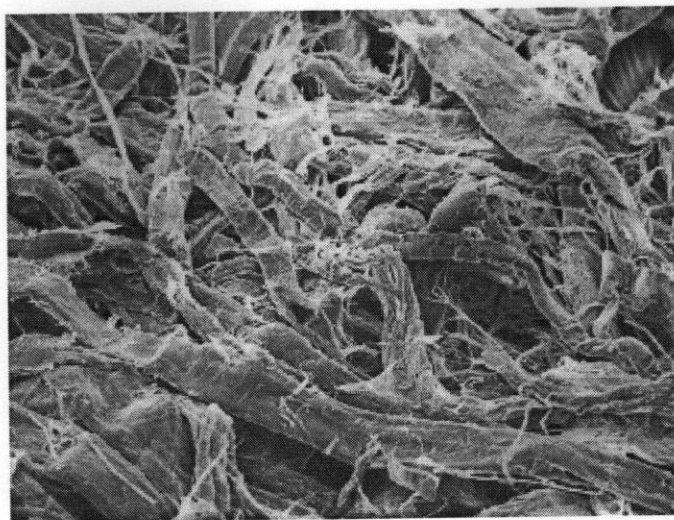
ข้อควรจำ จะเห็นได้ว่า ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีโทนมืดสว่างที่ตรงข้ามกัน



ภาพ 4.14 อธิบายกลไกการเกิดภาพของ SEM



ภาพ 4.15 โครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วย SEM



ภาพ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของกระดาษชำระที่ถ่ายด้วย SEM

บทที่ 5

กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

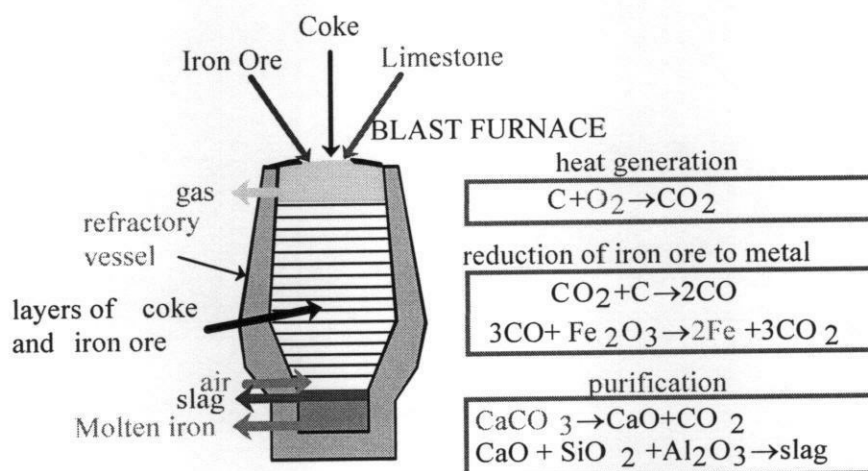
อ.สารัมภ์ บุญมี

5.1 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

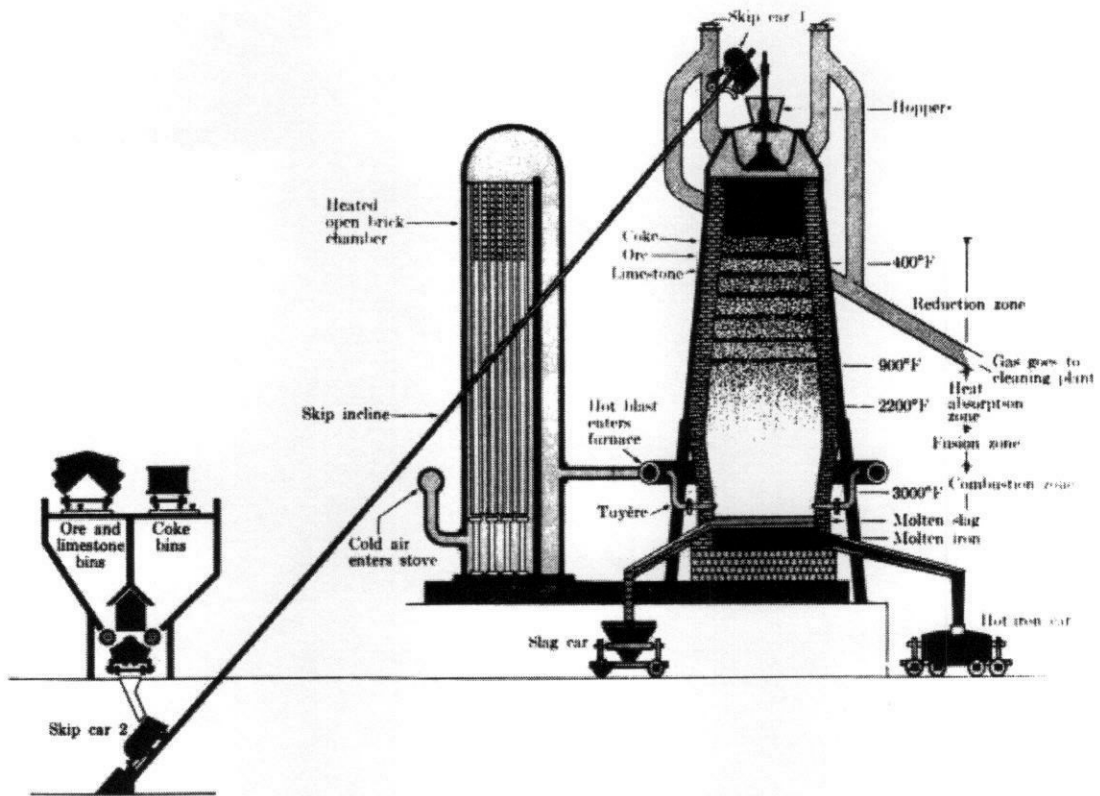
ในการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า เริ่มต้นจากการถลุงแร่เหล็กให้กลายเป็นโลหะเหล็ก แล้วนำเหล็กดิบที่ได้จากการถลุงมาทำความสะอาดและลดปริมาณคาร์บอน แล้วผลิตเป็นเหล็กรูปพรรณ ซึ่งจะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

5.1.1 การถลุงเหล็ก

- Blast furnace เป็นเตาที่นิยมใช้ที่สุดในการถลุงแร่เหล็กให้กลายเป็นเหล็ก
- วัตถุดิบได้แก่ แร่เหล็ก (Fe_2O_3), ถ่านโค้ก (C), หินปูน (CaCO_3)
- ถ่านโค้กทำหน้าที่หลักสองอย่างคือ เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และเป็นตัว Reduce โดยดึง Oxygen ออกจากแร่เหล็ก
- หินปูนทำหน้าที่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (slag) ออกจากน้ำโลหะ
- ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก blast furnace ได้แก่ Pig Iron ซึ่งมีมลทินมากประกอบไปด้วย Fe, C, N, P, Si, Mn, S, ...
- Pig Iron จะมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 4% ซึ่งจะต้องนำไปกำจัดสารมลทินและลดปริมาณคาร์บอนต่อไปก่อนนำไปใช้งาน



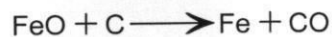
ภาพ 5.1 Production of Pig Iron in a Blast furnace



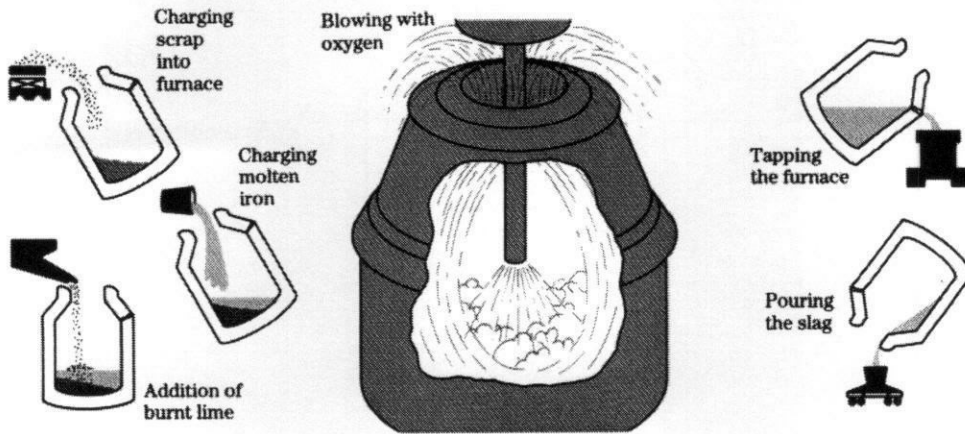
ภาพ 5.2 แสดงองค์ประกอบของเตา Blast Furnace

5.1.2 การผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

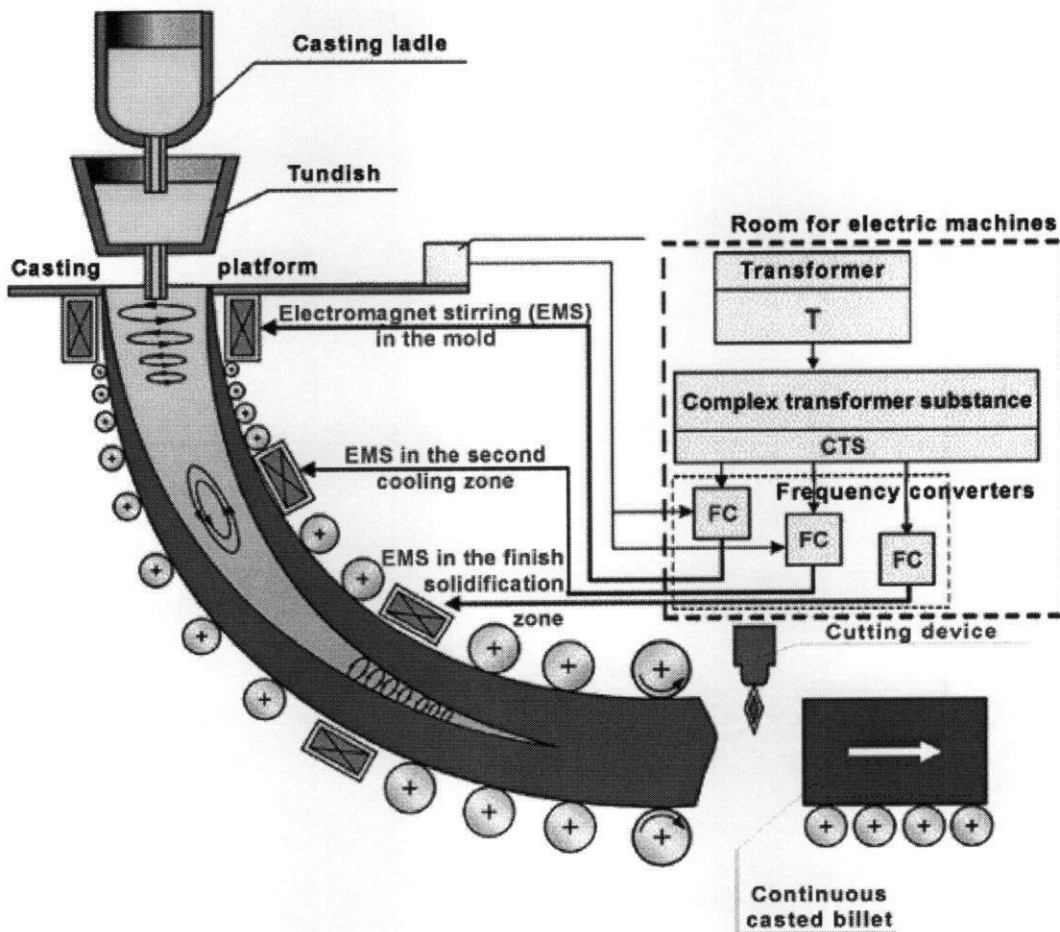
- วัตถุดิบในการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าคือ Pig Iron และ/หรือ เศษเหล็ก
- การลดปริมาณคาร์บอนใน Pig Iron และการกำจัดสารมลทินเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้
- เตาที่นิยมใช้อุตสาหกรรมคือ BOF (Basic Oxygen Furnace) วัตถุดิบจะถูกหลอมตัวภายในเตาและถูกพ่นด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้เหล็กหลอมเหลวกลายเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนกลายเป็น Carbonmonoxide



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



ภาพ 5.3 แสดงหลักการทำงานของเตา Basic Oxygen Furnace



ภาพ 5.4 Continuous Casting Machine

5.1.3 การขึ้นรูป

การขึ้นรูปโลหะจำแนกตามกลไกได้ดังนี้ คือ

การขึ้นรูปด้วยแรงทางกล (Metal Forming)

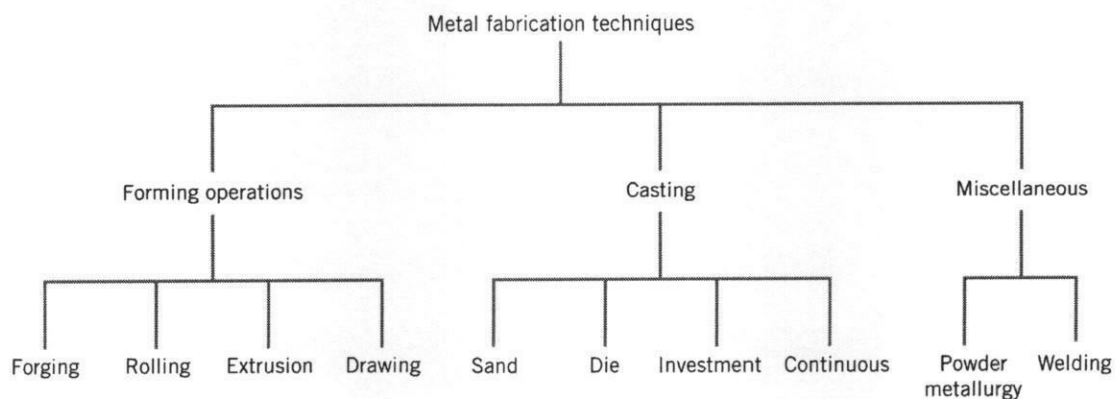
- Forging (การทุบขึ้นรูป)
- Rolling (การรีดขึ้นรูป)
- Extrusion (การอัดขึ้นรูป)
- Drawing (การดึงขึ้นรูป)

การขึ้นรูปด้วยการหล่อ (Metal Casting)

- Sand Casting (การหล่อแบบทราย)
- Die Casting (การหล่อด้วยแม่พิมพ์)
- Investment (การหล่อขี้ผึ้งหาย)
- Continuous (การหล่อแบบต่อเนื่อง)

กรรมวิธีอื่น ๆ

- Powder Metallurgy (โลหะวิทยาโลหะผง)
- Welding (การเชื่อมโลหะ)



ภาพ 5.5 อธิบายหลักการขึ้นรูปโลหะด้วยแรงทางกลแบบต่าง ๆ

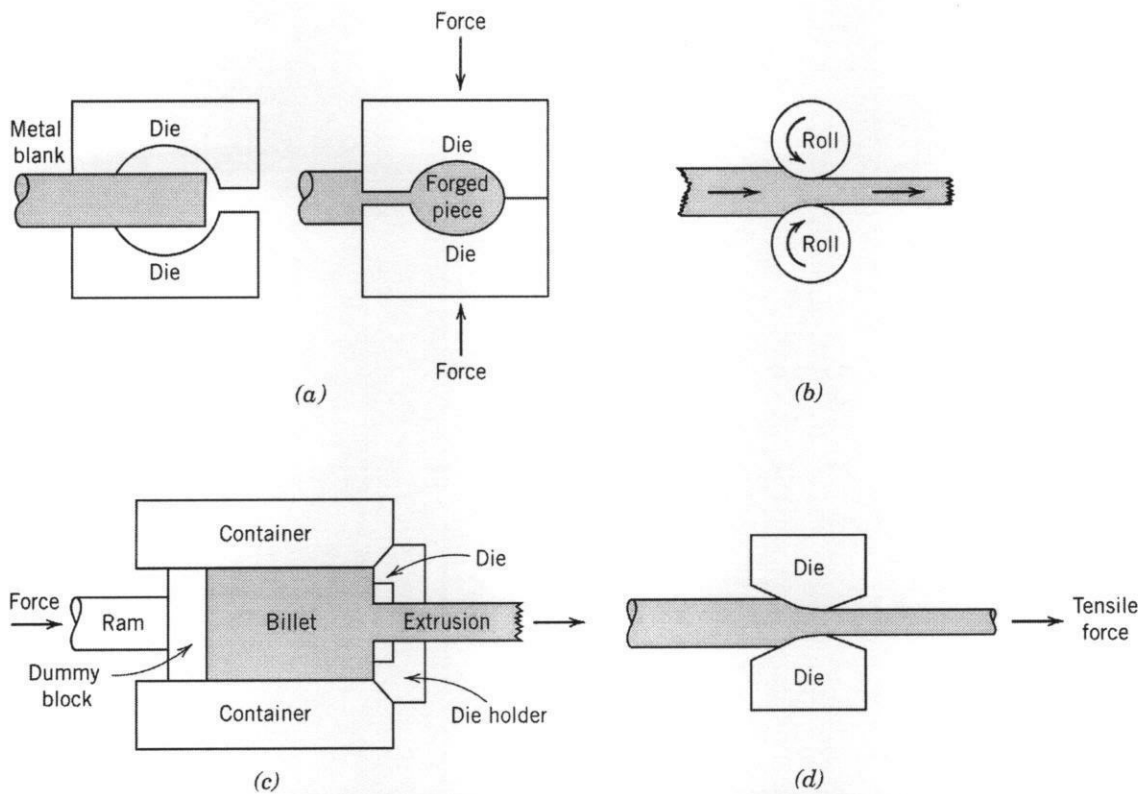


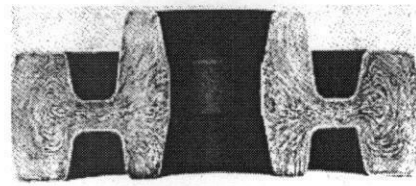
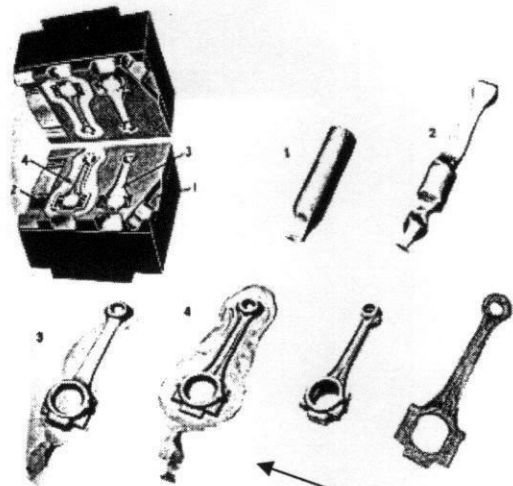
FIGURE 11.7 Metal deformation during (a) forging, (b) rolling, (c) extrusion, and (d) drawing.

ภาพ 5.6 อธิบายหลักการขึ้นรูปโลหะด้วยแรงทางกลแบบต่าง ๆ

5.2 การขึ้นรูปด้วยแรงทางกล (Metal Forming)

Forging

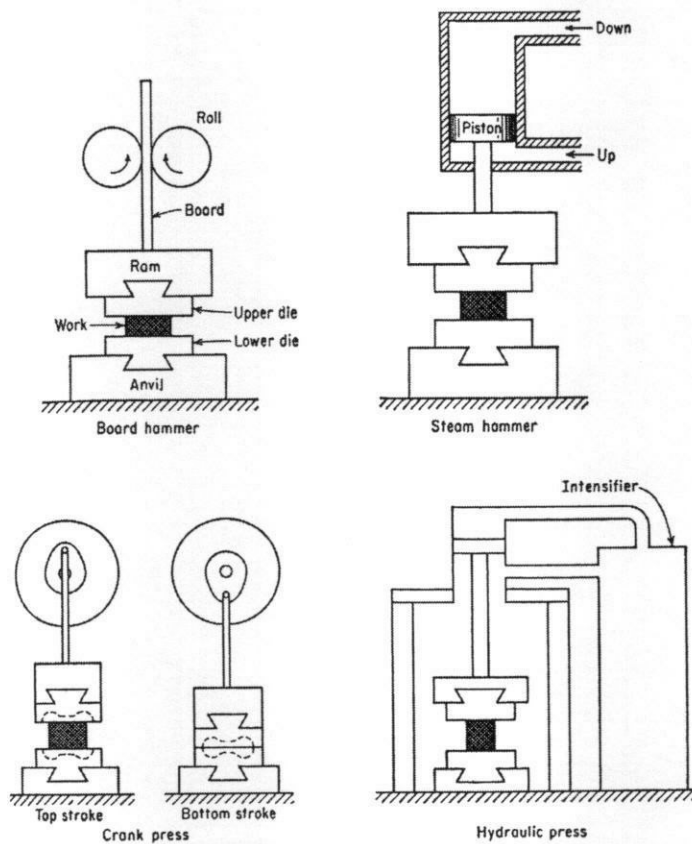
Forging เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะโดยอาศัยแรงทางกลอย่างหนึ่ง โดยมีวิธีการนำโลหะไปอบให้ร้อนและนำไปทุบขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เมื่อโลหะได้รับแรงทางกล เนื้อโลหะจะไหลไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์ ได้รูปร่างชิ้นงานตามที่ต้องการได้ ปริมาณเนื้อโลหะที่นำไปใช้ในการทุบขึ้นรูปนี้ ต้องมีปริมาณมากกว่าชิ้นงานที่ต้องการเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นงานจะมีเนื้อโลหะเต็ม ปริมาณเนื้อโลหะที่เกินมานั้น จะกลายเป็นครีปที่รอยต่อระหว่างแม่พิมพ์ด้านบนและด้านล่าง ซึ่งจะถูกกำจัดออกในภายหลังด้วยการ Trimming วิธีการนี้เหมาะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและต้องการความแข็งแรงสูง เช่น Connecting rod



Grain flow ในชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูป

Trimming คือการตัดครีบที่เกิดจากการตีขึ้นรูปออก

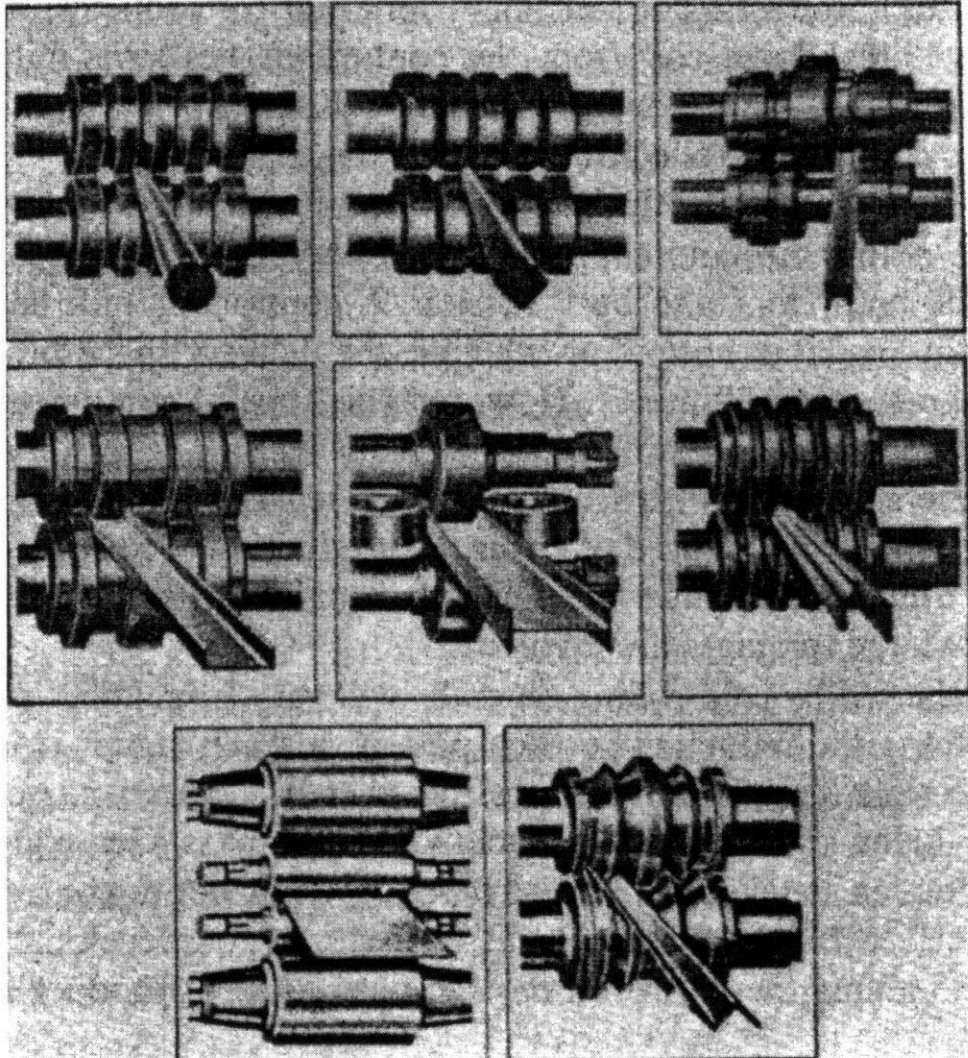
ภาพ 5.7 กรรมวิธีการ Forging



ภาพ 5.8 Forging machine แบบต่าง ๆ

Rolling

เป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยแรงทางกล โดยใช้ลูกรีดออกแรงอัดให้โลหะเสียรูปไปตามช่องว่างระหว่างลูกรีด โดยรูปร่างของผลิตภัณฑ์ จะขึ้นอยู่กับลูกรีด ดังภาพแสดง วิธีการนี้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นแผ่นหรือแท่ง เช่น เหล็กแผ่น และเหล็กข้ออ้อย



ภาพ 5.9 รูปแบบ roller เพื่อให้ได้ชิ้นงานแบบต่าง ๆ

การรีดแบ่งออกเป็น

1. รีดร้อน (Hot rolling)

การรีดร้อนมีข้อได้เปรียบ คือ ใช้แรงในการรีดน้อย และสามารถลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานได้มาก แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวไม่สวยงาม

2. รีดเย็น (Cold rolling)

การรีดเย็นมีข้อได้เปรียบ คือ ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมาก และไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวสวยงาม แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ ต้องใช้แรงในการรีดมากและสามารถลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานได้น้อย

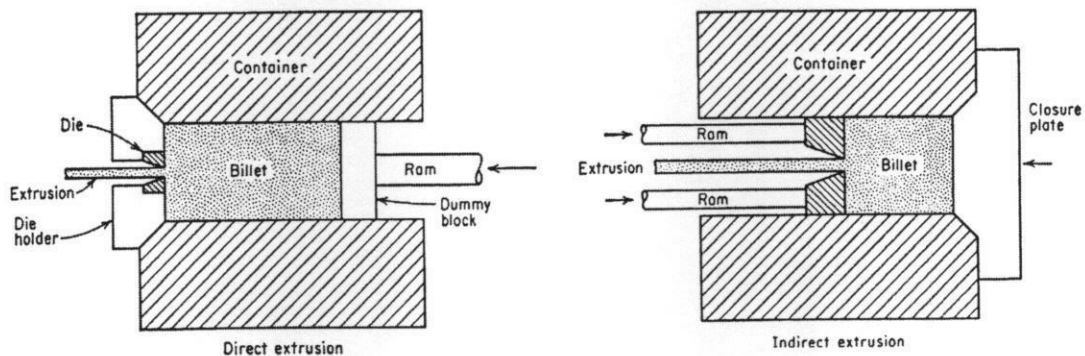
Extrusion

เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยแรงทางกล โดยใช้แรงอัดทำให้เนื้อโลหะที่อุณหภูมิสูงไหลผ่านแม่พิมพ์ออกมา รูปร่างชิ้นงานของผลิตภัณฑ์จะถูกกำหนดโดยรูปร่างของแม่พิมพ์ วิธีการนี้เหมาะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นแท่ง

Extrusion แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- a. Direct Extrusion
- b. Indirect Extrusion

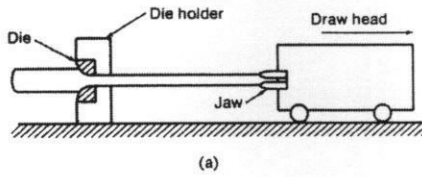
Direct Extrusion ต่างจาก Indirect Extrusion คือ Direct Extrusion ให้แรงอัดกับเนื้อโลหะโดยตรง แต่ Indirect Extrusion จะให้แรงอัดกับแม่พิมพ์ไปกดลงบนเนื้อโลหะ ดังภาพแสดง



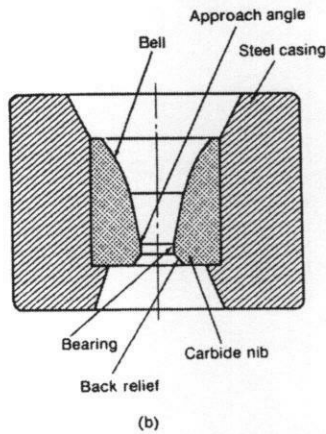
ภาพ 5.10 แสดงหลักการทำงานของ Direct Extrusion และ Indirect Extrusion

Drawing

เป็นวิธีการขึ้นรูปโลหะทางกลโดยอาศัยแรงดึงผ่านแม่พิมพ์ ซึ่งรูปร่างชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของแม่พิมพ์เหมือนกัน วิธีการนี้เหมาะสำหรับใช้ในการขึ้นรูปเส้นลวด เรียกว่า Wire Drawing



Drawing ใช้แรงดึงในการขึ้นรูป
ต่างจาก extrusion (แรงอัด)

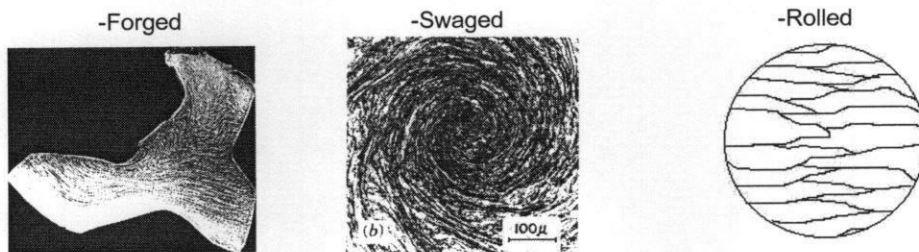


Drawing die

ภาพ 5.11 Drawing Die

จะเห็นได้ว่าการขึ้นรูปโลหะด้วยแรงทางกล มีทั้งที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงและขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีความแตกต่างกันออกไป ดังภาพแสดง

- 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!



ภาพ 5.12 เปรียบเทียบระหว่าง Hot Working และ Cold Working

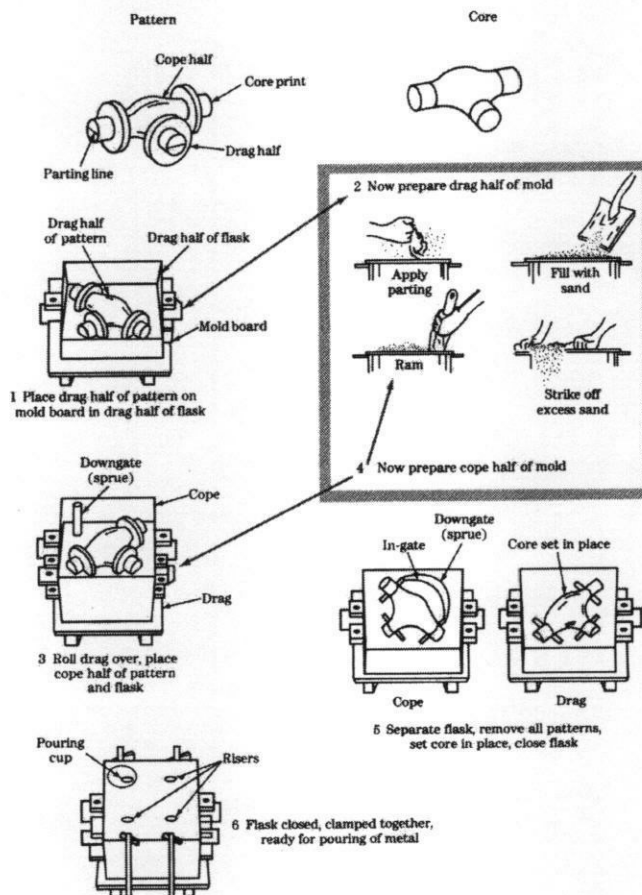
5.3 การขึ้นรูปด้วยการหล่อ (Metal Casting)

การหล่อจะมีบทบาทเมื่อ

- รูปร่างของชิ้นงานมีความซับซ้อนหรือใหญ่จนทำให้ขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นได้ยาก
- โลหะชนิดที่ต้องการขึ้นรูปมีความเหนียวอ่อนจนไม่สามารถทำ hot & cold working ได้
- ในการผลิตชิ้นงานนั้น ๆ การหล่อให้ต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่าเทคนิคการขึ้นรูปแบบอื่น

Sand Casting

- เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่
- จำนวนชิ้นงานน้อย
- ต้นทุนต่ำ



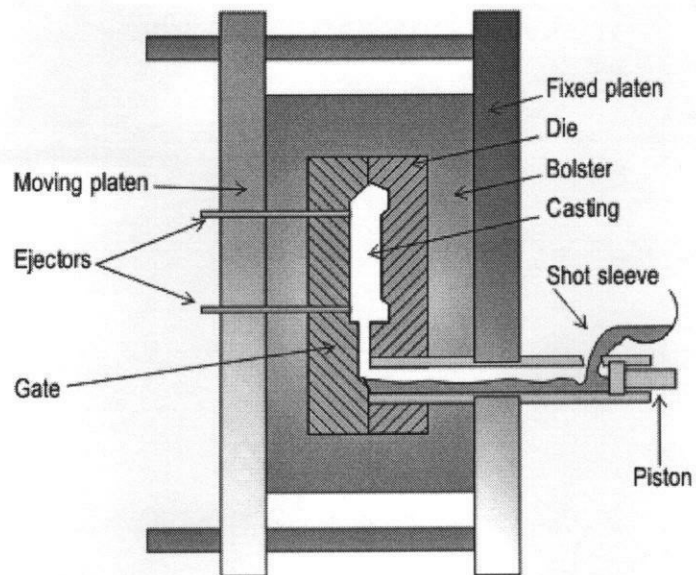
ภาพ 5.13 แสดงการหล่อด้วยแบบทราย



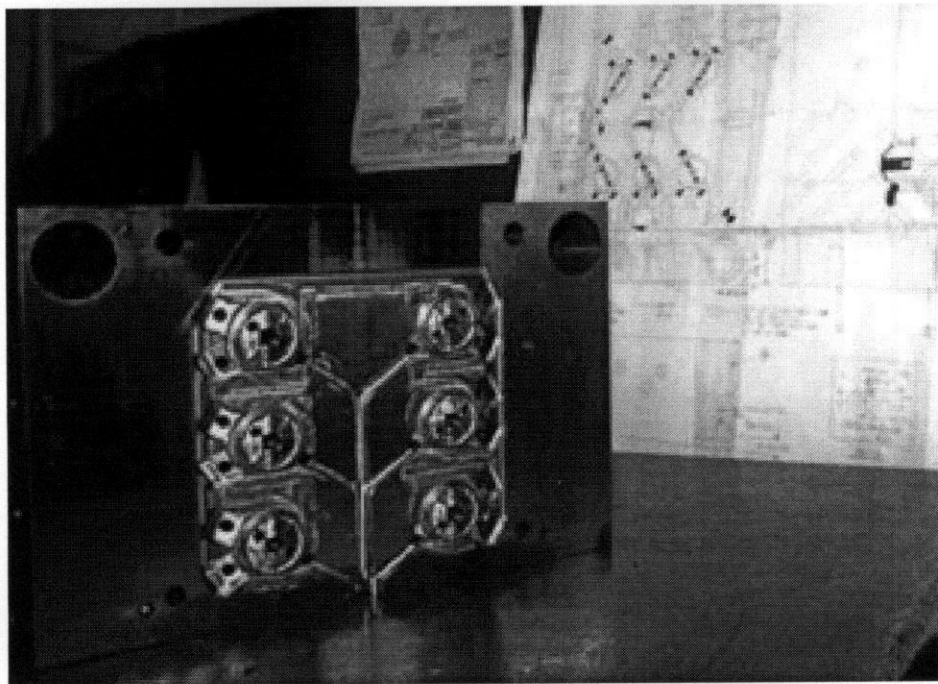
ภาพ 5.14 แสดงการเทน้ำโลหะในการหล่อด้วยแบบทราย

Die Casting

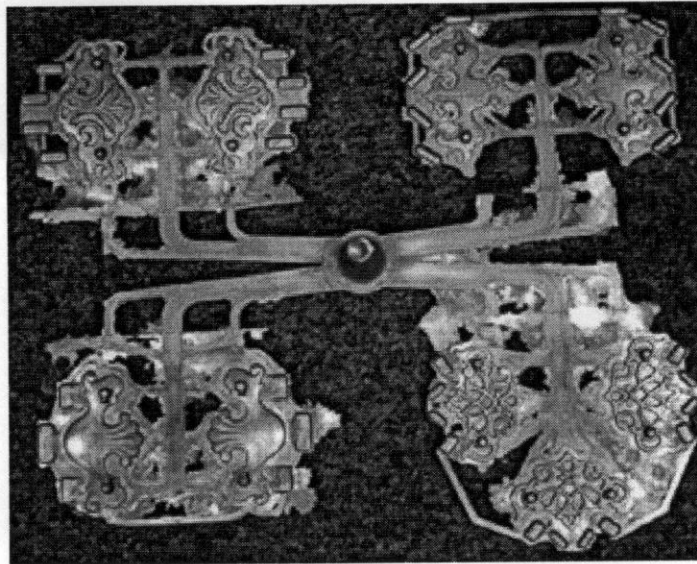
- เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก
- ใช้แรงดันช่วยผลักดันน้ำโลหะให้เข้าไปในโพรงแบบ
- ผลิตจำนวนมาก
- หล่อโลหะที่มีจุดหลอมต่ำ
- อัตราการผลิตสูง



ภาพ 5.15 แสดงหลักการทำงานของ Die Casting



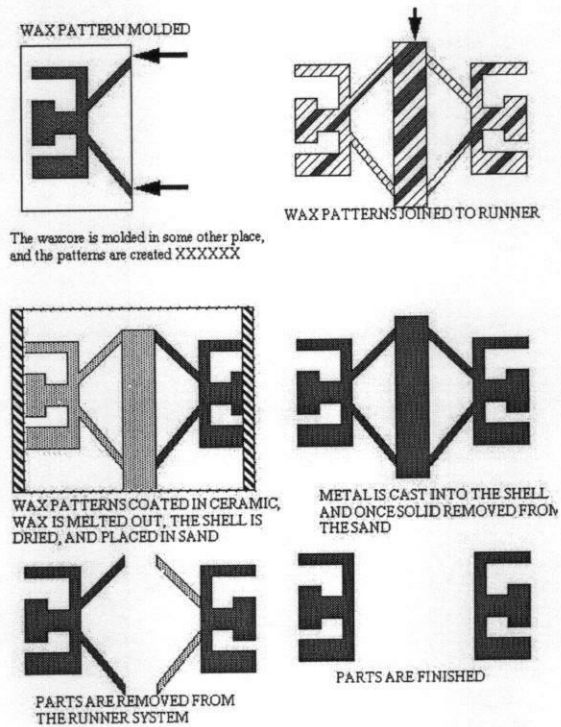
ภาพ 5.16 แม่พิมพ์ Die Casting



ภาพ 5.17 ชิ้นงาน Die Casting

Investment Casting

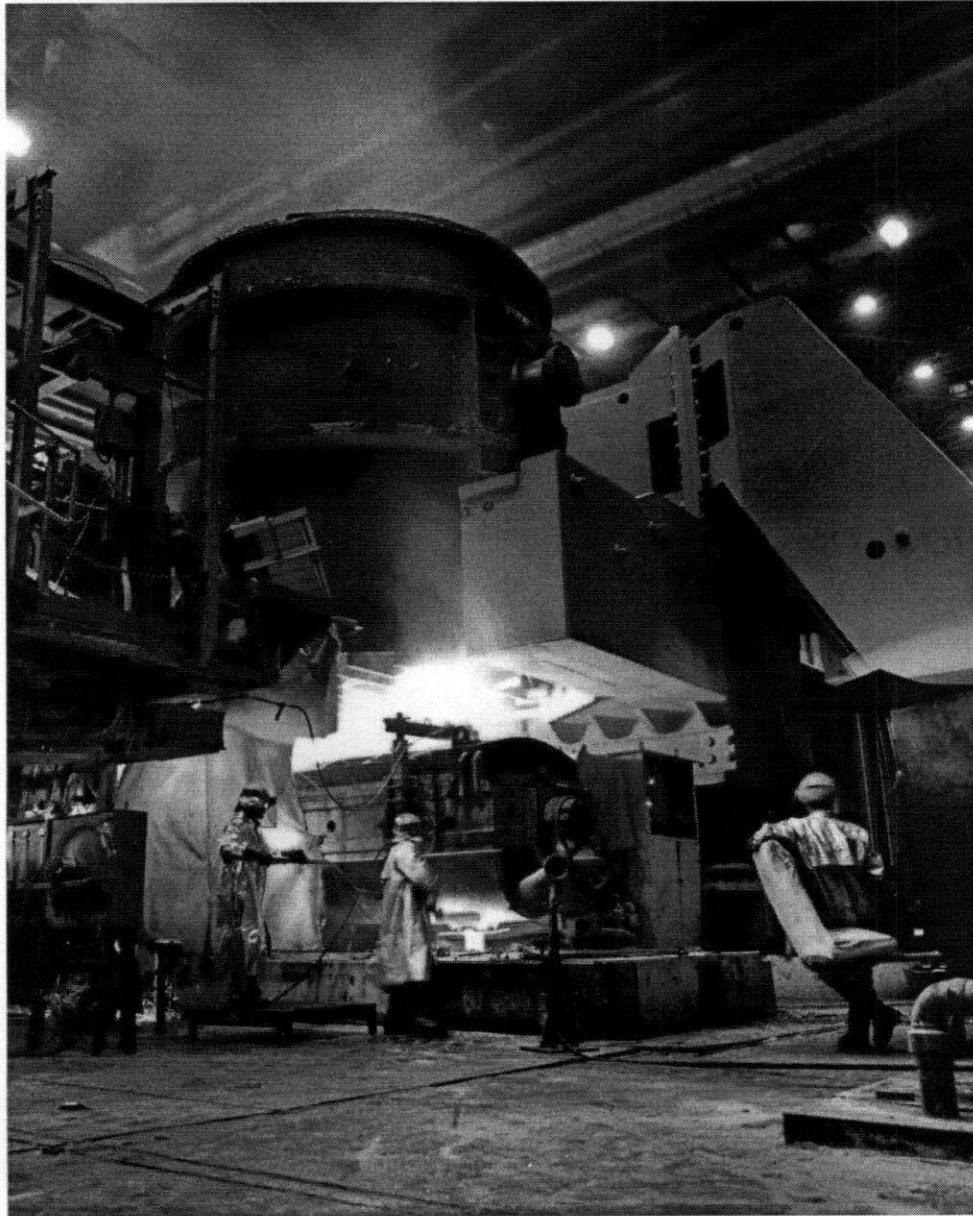
- เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก
- ผลิตจำนวนน้อย
- รูปร่างซับซ้อนมีลวดลายมาก
- เช่น โลหะมีค่าเครื่องประดับ, หล่อพระ, turbine blade



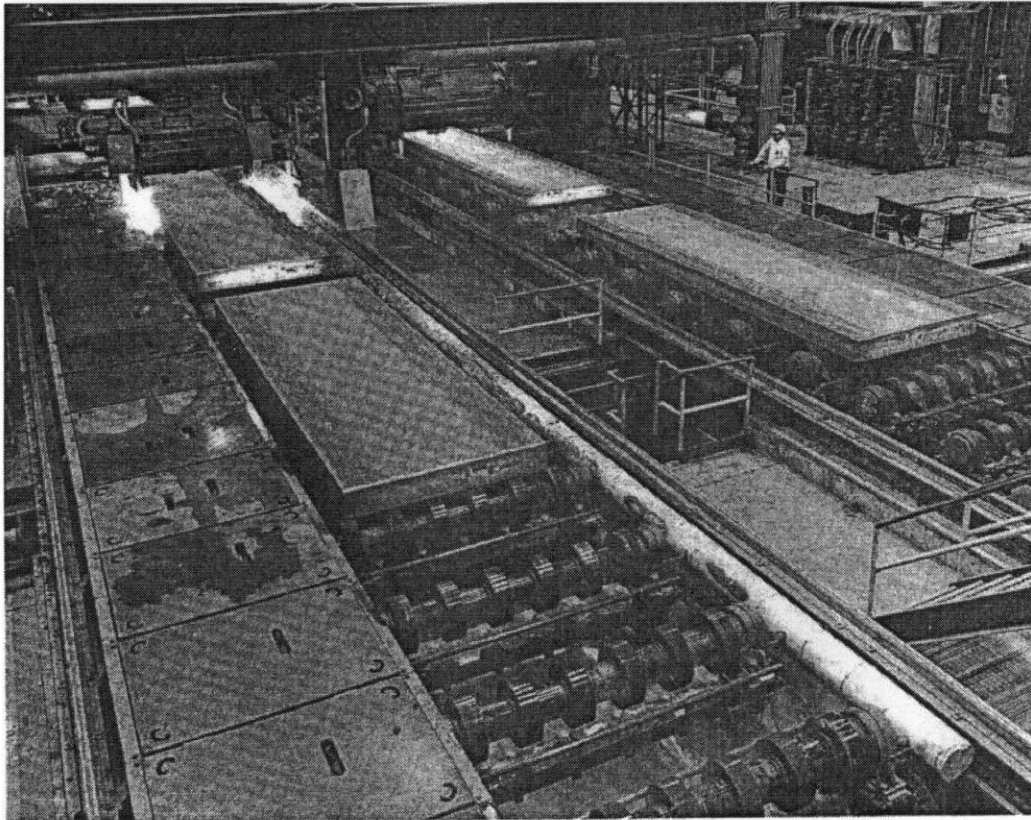
ภาพ 5.18 แสดงกรรมวิธี Investment Casting

Continuous Casting

- เป็นการหล่อต่อเนื่องจากการผลิตเหล็กกล้า
- วัตถุดิบคือน้ำเหล็กที่ได้จากเตา BOF
- เมื่อหล่อเสร็จทำการรีดต่อเนื่อง
- ได้โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีที่มีความสม่ำเสมอกว่าการหล่อเป็น slab แล้วค่อยนำมารีด



ภาพ 5.19 Continuous Casting Machine



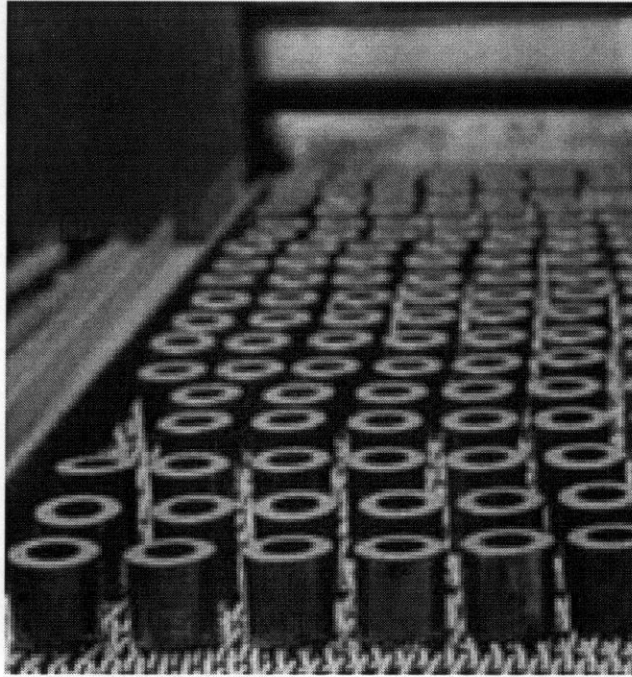
ภาพ 5.20 Slab of continuously cast steel

5.4 กรรมวิธีอื่น ๆ

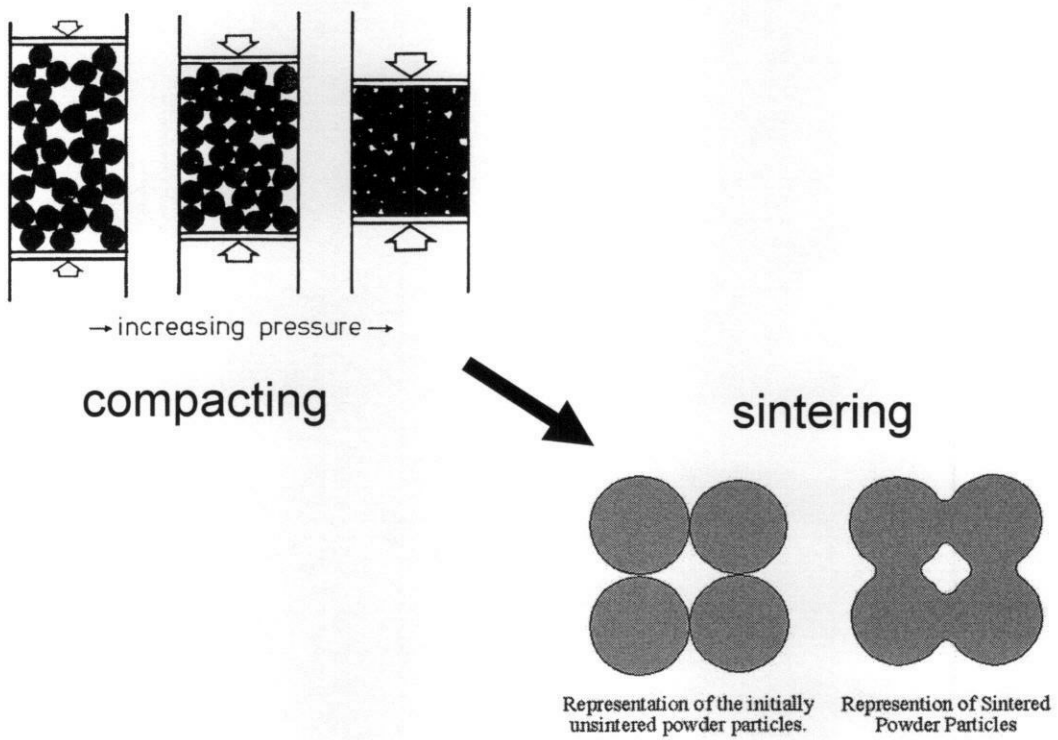
Powder Metallurgy (โลหะวิทยาโลหะผง)

มีวิธีการ คือ นำผงโลหะมาผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปอัดด้วยแม่พิมพ์ จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามต้องการ แต่ยังไม่มีความแข็งแรง ต้องนำไปเผา (Sintering) ผงโลหะจึงจะประสานกันทำให้เกิดความแข็งแรง

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



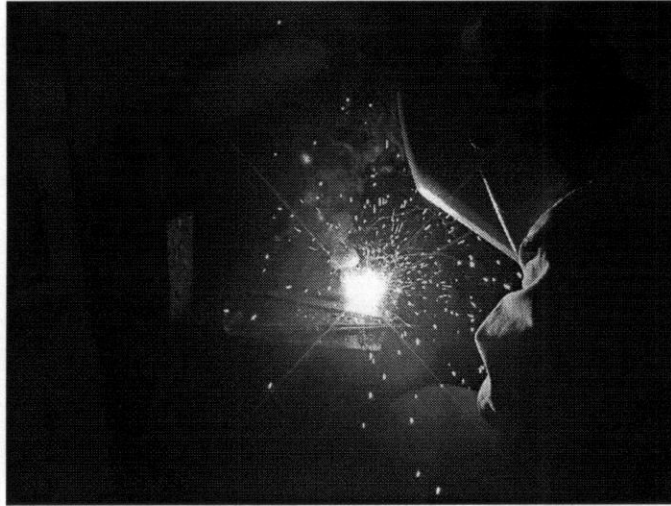
ภาพ 5.21 การ Sintering



ภาพ 5.22 แบบจำลองผงโลหะก่อนและหลังการทำ Sintering

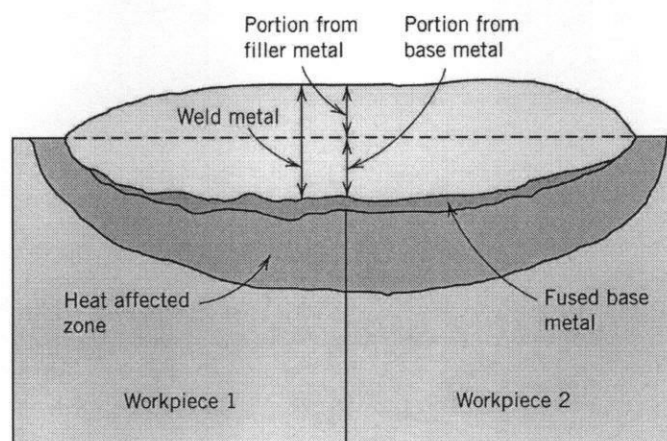
Welding (การเชื่อม)

ใช้เมื่อชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อนและสะดวกกว่าการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโลหะชิ้นเดียว



ภาพ 5.23 แสดงการเชื่อมโลหะ

ในการเชื่อมนั้นจะมีการให้ความร้อนแก่วัสดุเชื่อม (ลวดเชื่อม) จนทำให้เกิดการหลอมละลายลงไปประสานโลหะที่ต้องการเชื่อมทั้งสองชิ้นเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งจะทำให้โลหะที่ต้องการเชื่อมได้รับความร้อนและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค เรียกว่าบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคนี้ว่า Heat affected zone



ภาพ 5.24 แบบจำลองแสดงบริเวณต่าง ๆ ของการเชื่อม

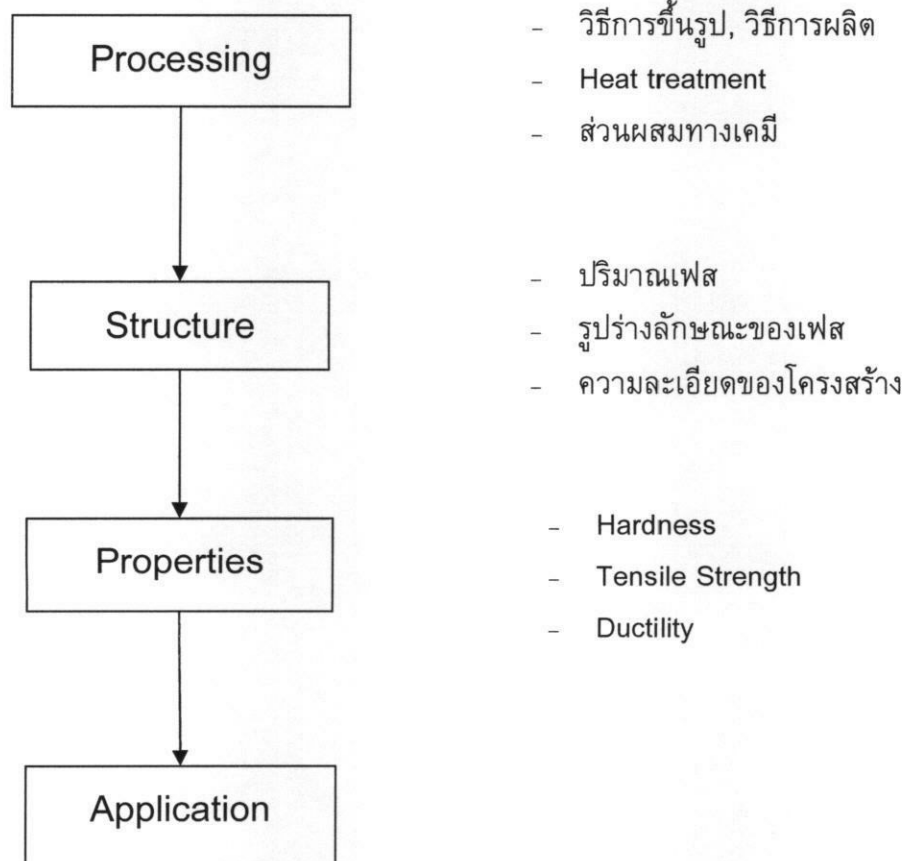
บทที่ 6

กระบวนการอบชุบโลหะด้วยความร้อน (Heat Treatment of Metals)

อ.สารัมภ์ บุญมี

สมบัติเชิงกลของโลหะและโลหะผสม นอกจากจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีซึ่งมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะก็คือการอบชุบด้วยความร้อนของโลหะ

เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกันแต่อาจมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิงด้วยการอบชุบด้วยความร้อนของโลหะ



ภาพ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการ, โครงสร้างจุลภาค, สมบัติและการใช้งาน

กระบวนการ heat treatment สำหรับโลหะทั่วไป

- Process Annealing
- Stress Relief

กระบวนการ heat treatment สำหรับเหล็กกล้า

- Normalizing
- Full Annealing
- Spheroidizing
- Quenching and Tempering

6.1 Process Annealing

วัตถุประสงค์ : เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคและเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับโลหะของโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา

วิธีการ : นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 300 – 600 °C (สำหรับเหล็กกล้า) ในสายการผลิต โดยทำก่อนการขึ้นรูป

ควบคุมอุณหภูมิและเวลา

- อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดออกไซด์ที่ผิวโลหะมาก อาจต้องใช้บรรยากาศที่ไม่เกิด oxidizing ช่วย
- อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้การ annealing เป็นไปได้ช้า
- เวลาที่นานเกินไปจะทำให้เกิดเกรนขยายตัว (grain growth) ซึ่งทำให้ได้เกรนขนาดหยาบและสมบัติเชิงกลไม่ดี

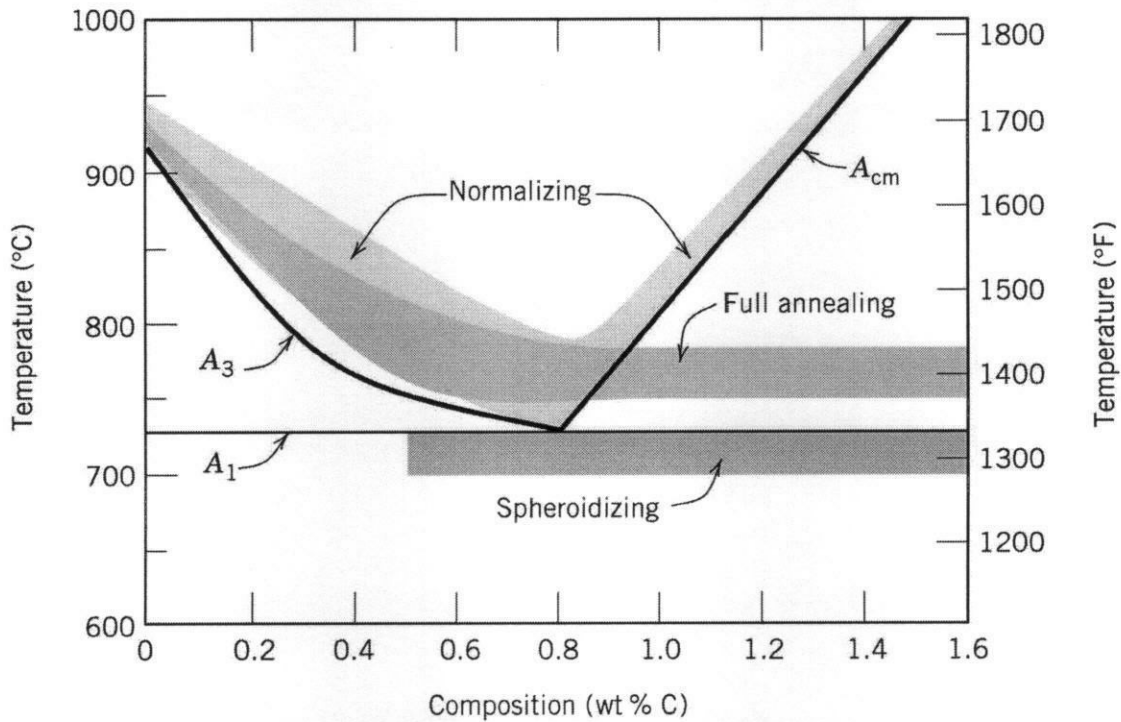
6.2 Stress Relief

วัตถุประสงค์ : เพื่อคลายความเค้นในชิ้นงานโลหะที่เกิดจาก

- การขึ้นรูป เช่น การกลึง, การรีด, extrusion
- การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (thermal stress) ทำให้แต่ละบริเวณในชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวไม่เท่ากัน เช่น จากการเชื่อม, การชุบแข็งผิวด้วยไฟฟ้า
- การเปลี่ยนเฟสขณะที่โลหะเย็นตัว ซึ่งเฟสที่เปลี่ยนไปมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการยึดหรือหดตัวในชิ้นงาน stress

ถ้าชิ้นงานที่มี residual stress ไปใช้งานอาจทำให้เกิดการบิดเบี้ยวแตกหักได้

วิธีการ : ให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงานเป็นระยะเวลาจนทำให้อุณหภูมิภายในชิ้นงานสม่ำเสมอแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



ภาพ 6.2 แสดง Critical Temperature

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

6.3 Normalizing

เหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูป เช่น การรีด , extrusion จะมีรูปร่างลักษณะเกรนที่ขึ้นอยู่กับทิศทางการขึ้นรูปและมีความหยาบ ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลไม่ดีและขึ้นอยู่กับทิศทางการขึ้นรูป

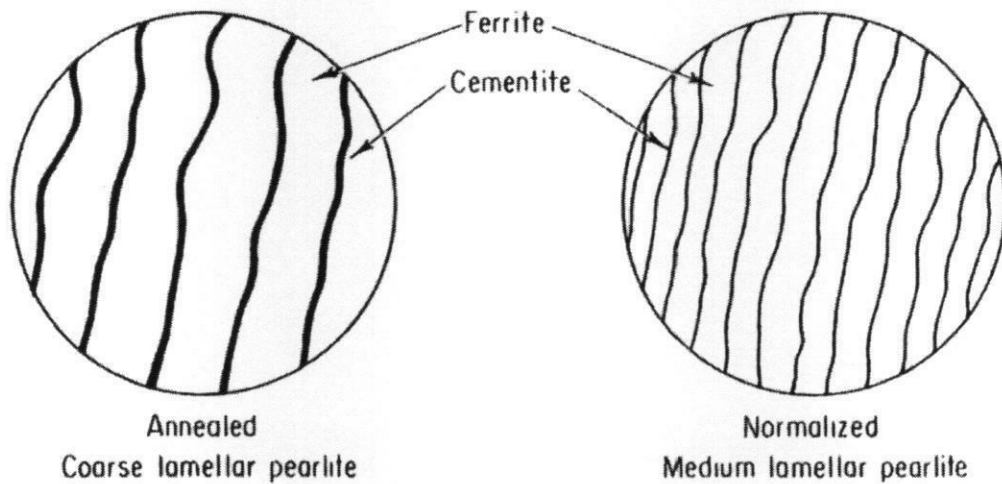
วัตถุประสงค์ : เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคทำให้มีเกรนที่รูปร่างและการกระจายตัวที่สม่ำเสมอรวมทั้งทำให้ได้เกรนที่มีขนาดละเอียดขึ้น

วิธีการ : อบชิ้นงานภายในเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า A_3 หรือ A_{cm} ประมาณ 50 K ทิ้งไว้นานพอที่จะทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็น austenite ทั้งหมดแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

6.4 Full Annealing

วัตถุประสงค์ : ใช้สำหรับปรับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าให้พร้อมที่จะนำไปทำการกลึงหรือการขึ้นรูปที่มีการทำให้เกิด plastic deformation อย่างมาก

วิธีการ : ออบชิ้นงานภายในเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า A_3 หรือ A_1 (A_3 สำหรับ hypoeutectoid carbon steel และ A_1 สำหรับ hypereutectoid carbon steel) ประมาณ 50 K ทั้งไว้นานพอที่จะทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็น austenite ทั้งหมดแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในเตา เย็นตัวในเตาให้อัตราการเย็นตัวที่ต่ำกว่า เย็นตัวในอากาศของ normalizing



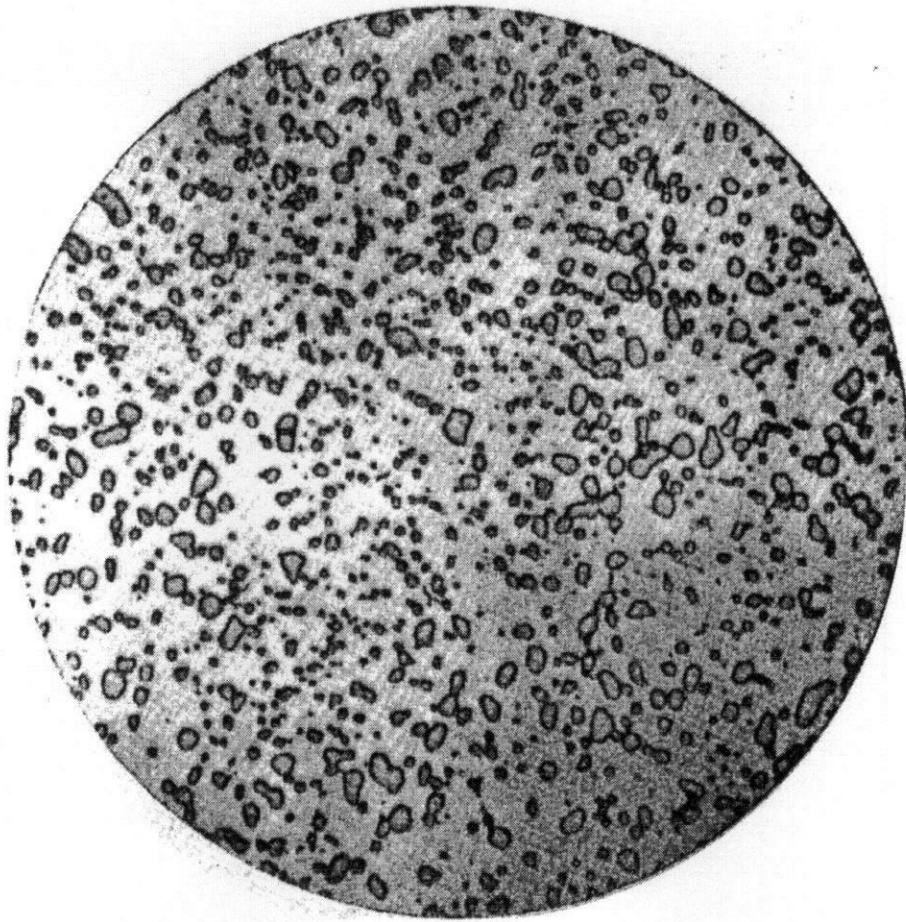
ภาพ 6.3 Normalizing มีอัตราการเย็นตัวสูงกว่า Full Annealing ทำให้ได้ pearlite ที่ละเอียดกว่า

6.5 Spheroidizing

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนสูง (0.25-1.1% C) จะประกอบไปด้วย pearlite ในปริมาณพอสมควร ซึ่งถ้า pearlite เหล่านี้มีขนาดที่หยาบ จะทำให้ขึ้นรูปได้ยาก (กลึง, ไส, กัด, เจาะ, คว้าน)

วัตถุประสงค์ : เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น โดยเปลี่ยน Fe_3C ใน pearlite ให้เปลี่ยนไปมีลักษณะกลมขึ้น ทำให้มีความเหนียว และกลึงได้ง่ายขึ้น

วิธีการ : ออบชิ้นงานภายในเตาที่อุณหภูมิต่ำกว่า eutectoid temperature เล็กน้อย (ประมาณ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลาประมาณ 15 – 25 ชั่วโมง

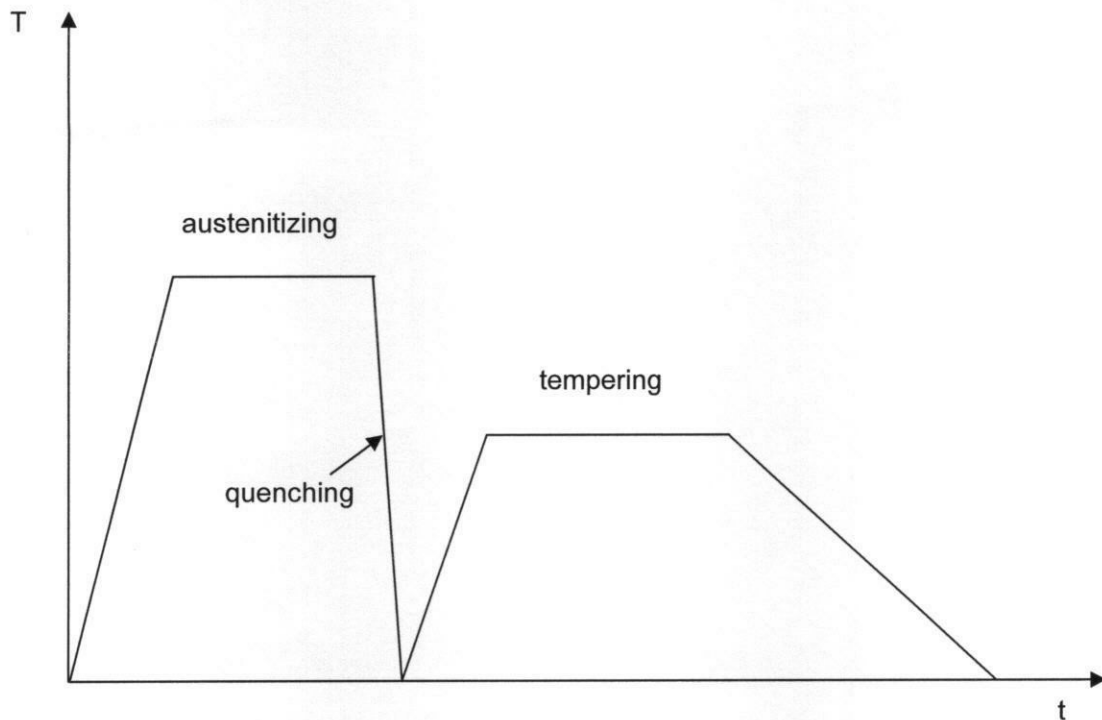


ภาพ 6.4 Spheroidized 1.1%C steel 1000x

6.6 Quenching and Tempering

วัตถุประสงค์ : เพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนสูง (>0.3 %C)

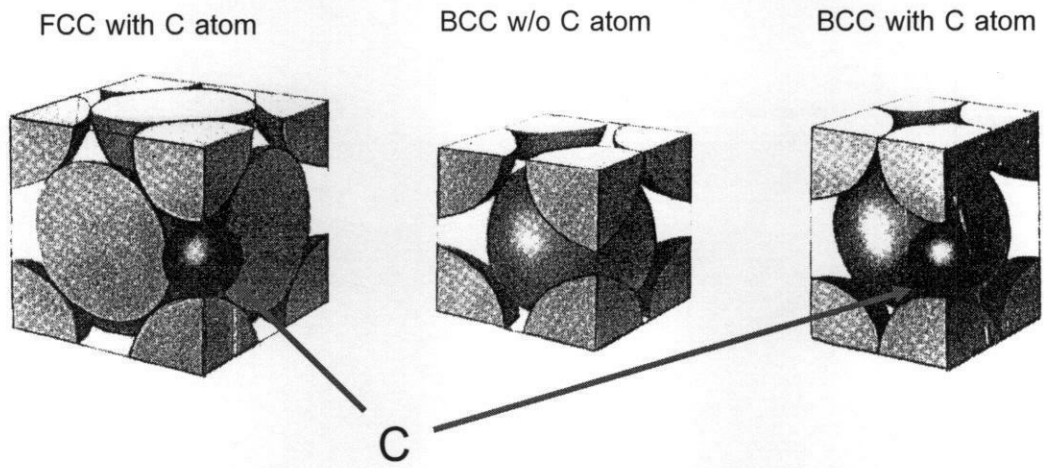
วิธีการ : นำชิ้นงานเหล็กกล้าไปอบที่อุณหภูมิสูงกว่า upper critical temperature เป็นระยะเวลานานพอที่จะทำให้โครงสร้างเป็น austenite ทั้งชิ้น (กระบวนการนี้เรียกว่า "Austenitizing") หลังจากนั้นทำการชุบลงในของเหลวทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (กระบวนการนี้เรียกว่า "Quenching") หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 100 - 500 °C (กระบวนการนี้เรียกว่า "Tempering")



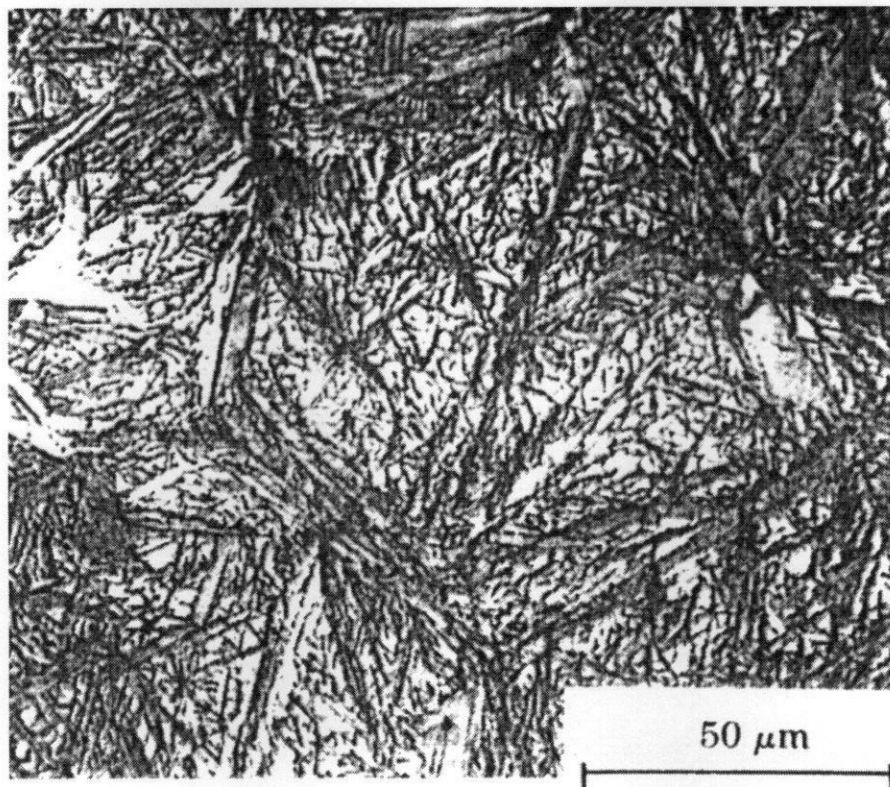
ภาพ 6.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำ Quenching and Tempering

เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนละลายอยู่ที่อุณหภูมิสูงเหล็กมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ซึ่งจะทำให้อะตอมคาร์บอนแทรกอยู่ในลักษณะหนึ่ง เมื่อลดอุณหภูมิเหล็กจะมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เมื่อทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำคาร์บอนไม่สามารถแพร่ออกจากเหล็กเกิดเป็น eutectoid mixture ได้ทัน และเกิดเฟสอื่นขึ้นมาแทนมีลักษณะเป็นแท่ง, เข็ม ฟุ้งไปมาในทิศทางต่างๆ กัน โครงสร้างนี้เรียกว่า "Martensite" (มาร์เทนไซต์)

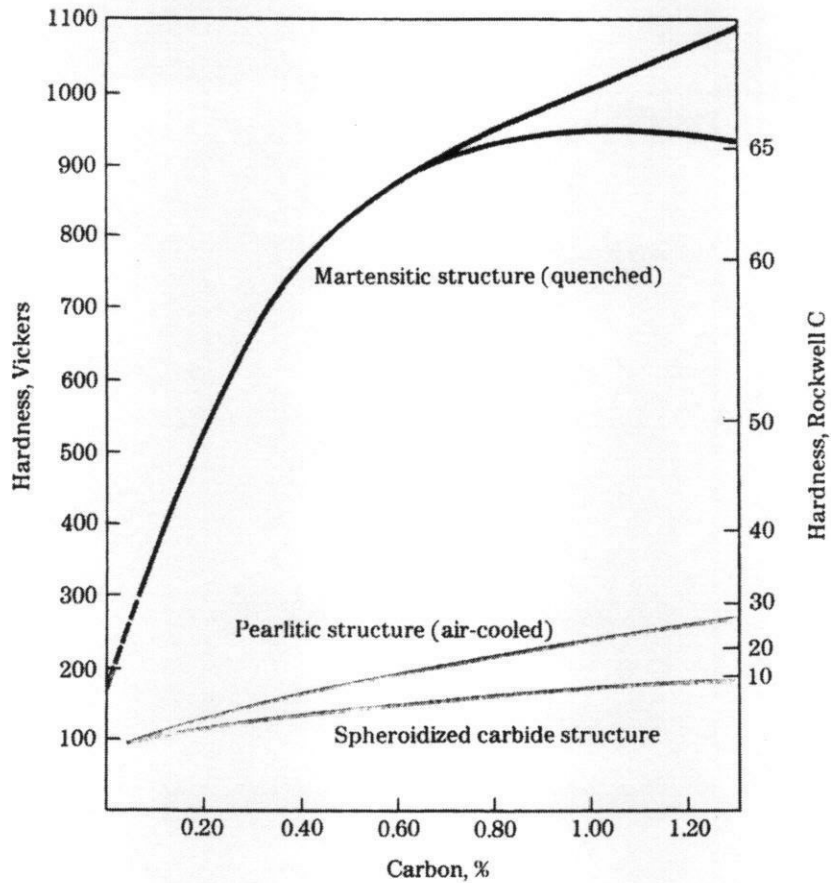
โครงสร้างมาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูง แต่ขาดความเหนียวและทนการสึกหรอได้ไม่ดี ชิ้นงานที่ผ่านการ quench จะมีความเค้นเนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหักเมื่อนำไปใช้งาน จึงต้องมีการทำ Tempering หรือการอบคืนไฟ เพื่อลดความเค้นภายในชิ้นงานและเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงานเล็กน้อยก่อนนำไปใช้งาน



ภาพ 6.7 แบบจำลองอะตอมของเหล็กที่มีคาร์บอนแทรกอยู่



ภาพ 6.8 ลักษณะโครงสร้าง Martensite

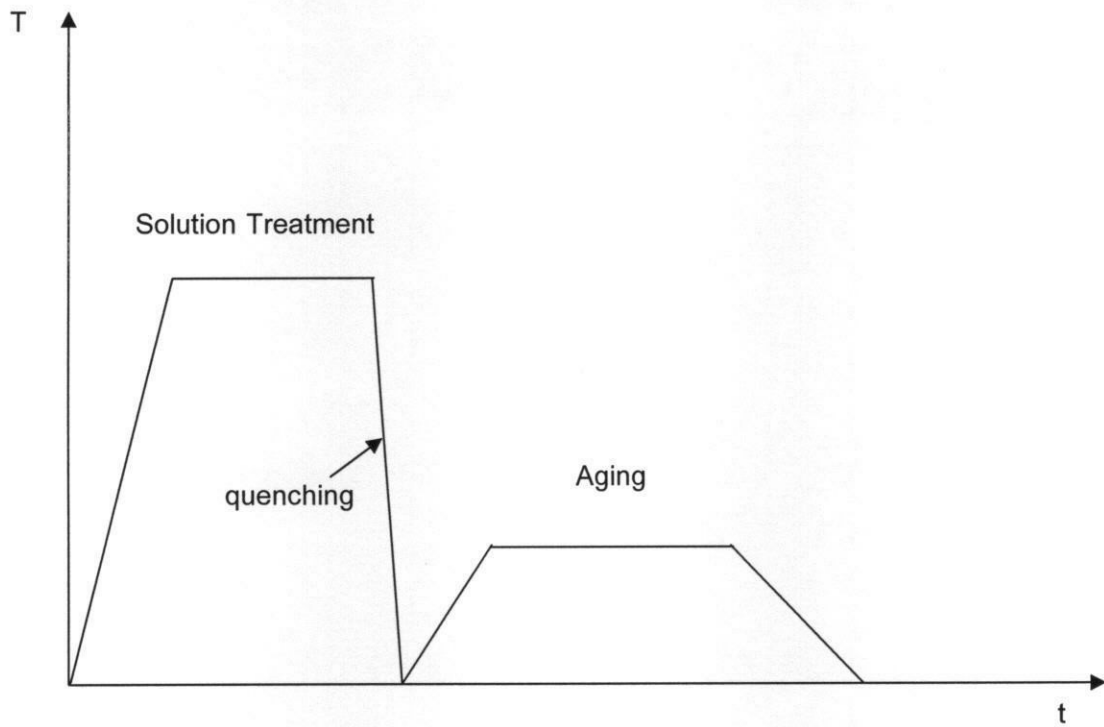


ภาพ 6.9 เปรียบเทียบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนก่อนและหลัง
การทำ Quenching and Tempering

6.7 Precipitation Hardening

วัตถุประสงค์ : เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสม โดยอาศัยความสามารถการละลายที่
น้อยลงของธาตุผสมเมื่ออุณหภูมิลดลง

วิธีการ : อบอุ่นงานในเตาที่อุณหภูมิสูงทิ้งไว้เป็นเวลานานพอที่ second phase จะ
ละลายใน solid solution ได้หมด ขั้นตอนนี้เรียกว่า "Solution treatment"
หลังจากนั้นทำการชุบลงในของเหลวให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว
(Quenching) หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการ quench ไปอบที่อุณหภูมิต่ำ
ก่อนข้างต่ำด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม ขั้นตอนนี้เรียกว่า "Aging"



ภาพ 6.10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำ Precipitation Hardening

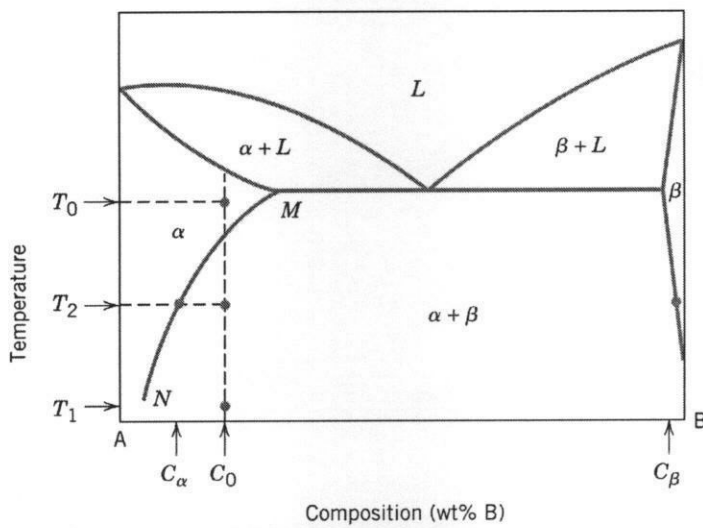
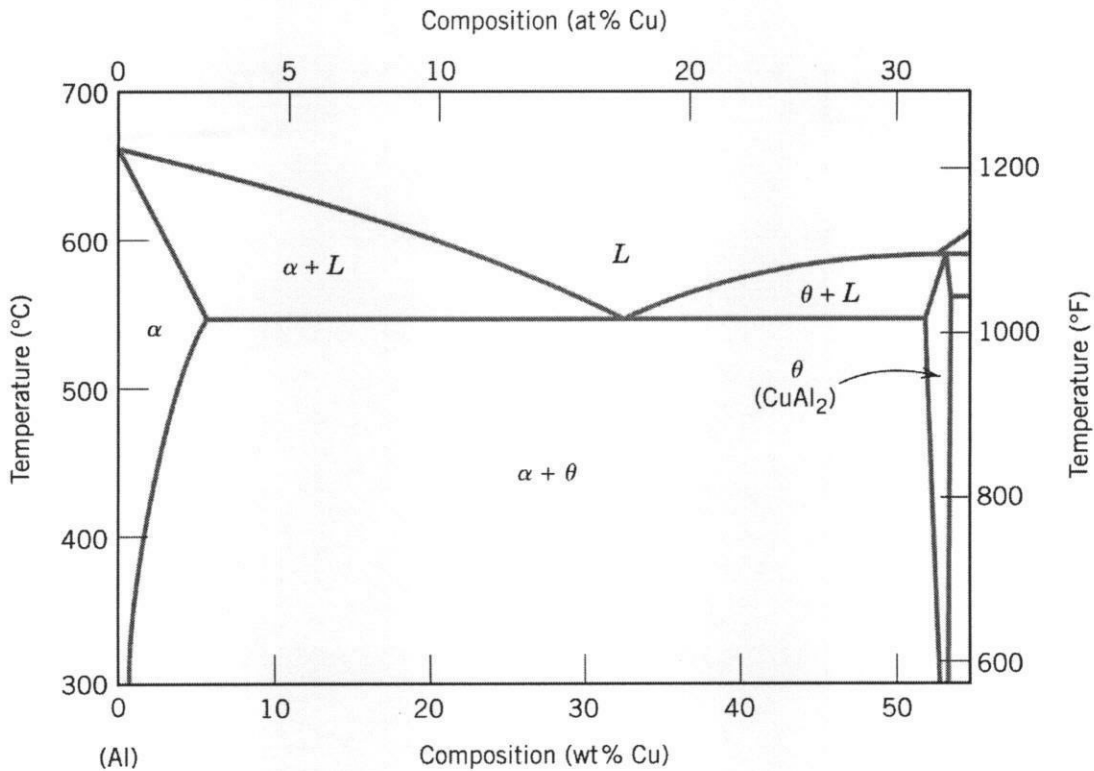


FIGURE 11.19 Hypothetical phase diagram for a precipitation-hardenable alloy of composition C_0 .

ภาพ 6.11 แสดงอุณหภูมิและส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการทำ Precipitation Hardening

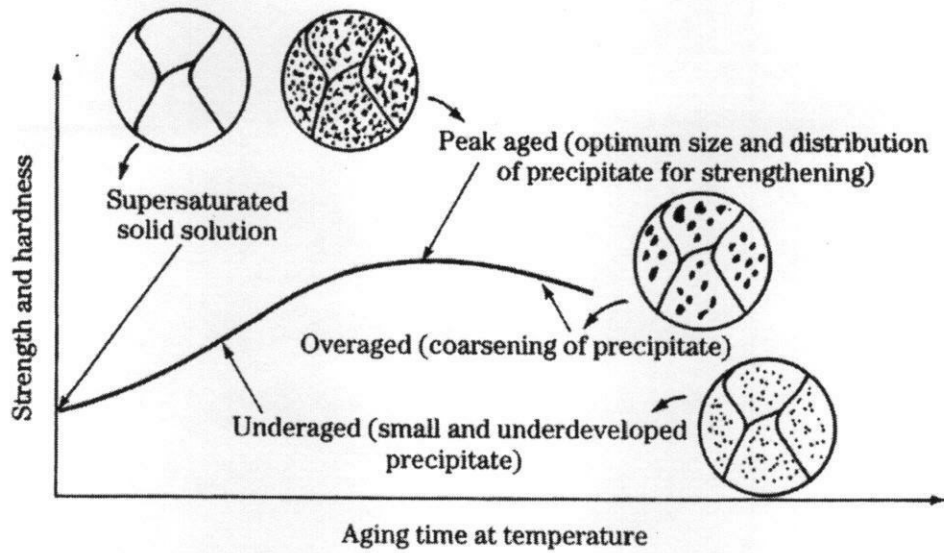
ที่ T_0 ธาตุ B ละลายในธาตุ A ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ T_2 เมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ β จะค่อยๆ เกิดขึ้นตาม lever arm rule



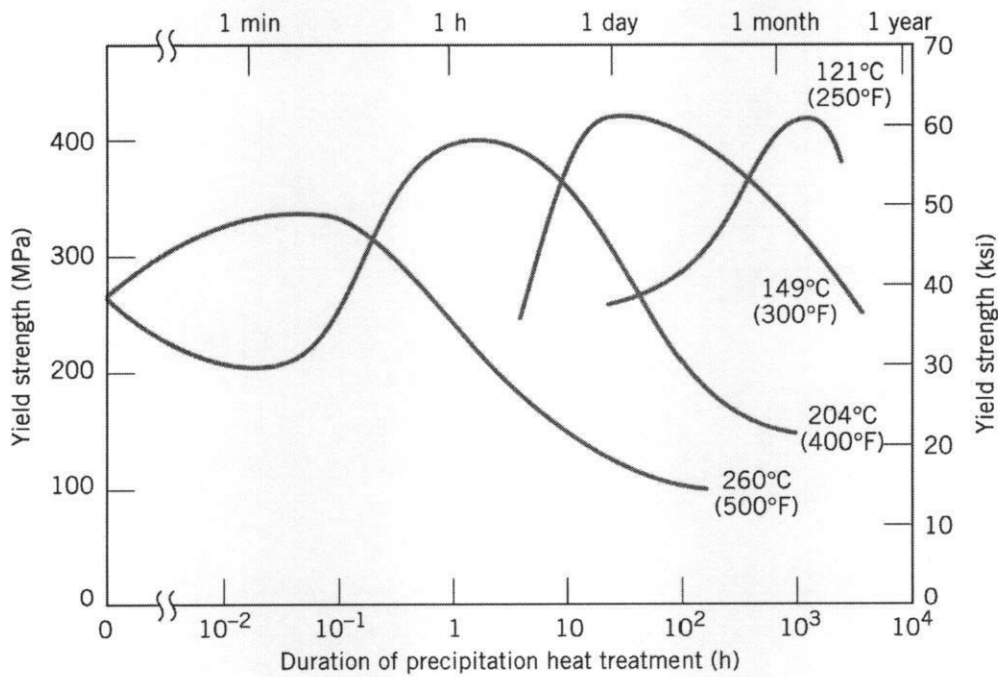
ภาพ 6.12 แผนภูมิสมดุลของ Al และ Cu

กลไกของ Precipitation Hardening

- ที่อุณหภูมิสูงธาตุ B จะละลายในธาตุ A ได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเราทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ธาตุ B ไม่สามารถแพร่ออกจากธาตุ A ได้ทัน จึงเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution)
- ถ้ามีการตกผลึกเฟส β ออกมาประมาณหนึ่ง เฟส β ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเสริมความแข็งแรงให้กับโลหะผสม
- Supersaturated solid solution จะเกิดการแพร่ให้เฟส β ได้แต่จะเกิดขึ้นอย่างช้ามากที่อุณหภูมิต่ำ เราจึงเร่งการแพร่ให้เกิดเร็วขึ้นโดยการนำไปอบ (Aging) แต่ถ้า aging เป็นเวลานานเกินไปจะทำให้เฟส β ตกผลึกออกมามากเกินไปทำให้ความแข็งแรงลดต่ำลง (over aging)
- ปล่อยให้ β ตกผลึกเองเรียก "Natural aging"
- ให้อุณหภูมิเร่งการตกผลึกเรียก "Artificial aging"



ภาพ 6.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงความแข็งและโครงสร้างจุลภาคในการทำ aging



ภาพ 6.15 แสดงอุณหภูมิในการ aging จะทำให้เวลาที่เหมาะสมต่อการ aging ลดลง

บทที่ 7

ประเภทของวัสดุโลหะและโลหะในกลุ่มเหล็ก

อ.สารัมภ์ บุญมี

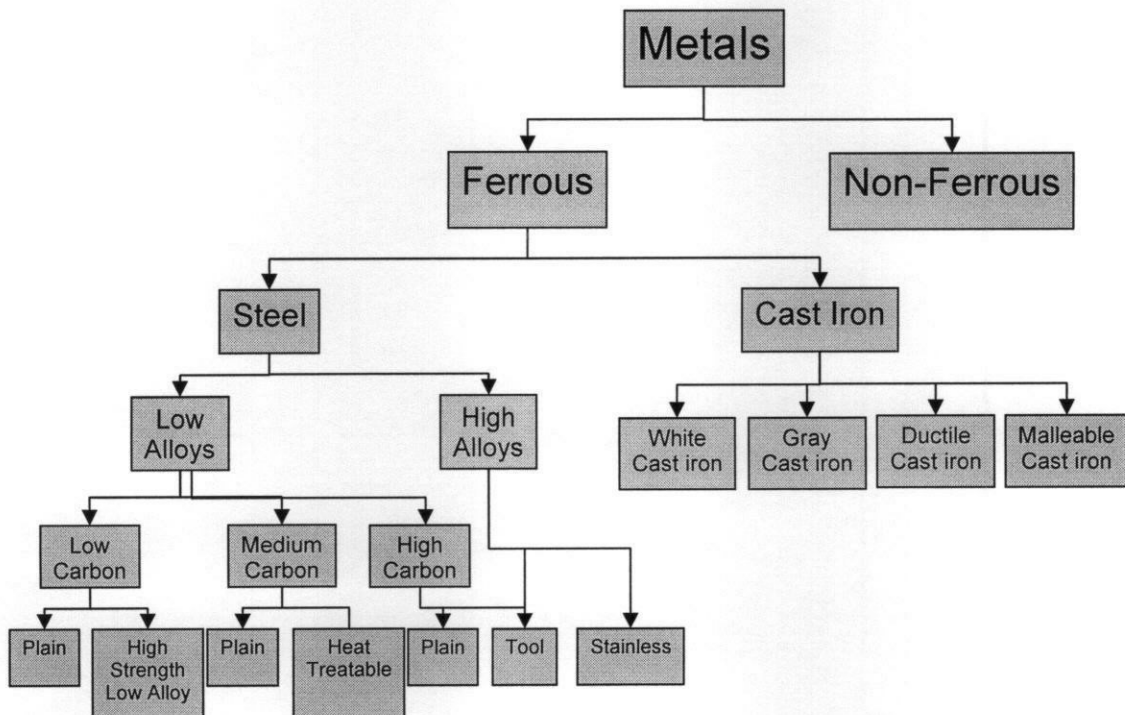
วัสดุโลหะสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

โลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals)

คือโลหะที่ส่วนผสมส่วนใหญ่เป็นเหล็กซึ่งจำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่ เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ โดยจำแนกตามปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็ก ซึ่งเหล็กกล้าจะมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่าเหล็กหล่อ ทำให้มีสมบัติทางกายภาพและทางกลแตกต่างกัน

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals)

คือโลหะที่นอกเหนือไปจากโลหะกลุ่มเหล็ก (ferrous metals)



ภาพ 7.1 แผนภาพการจำแนกประเภทโลหะ

โลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals)

เป็นโลหะประเภทที่มีการผลิตและการใช้งานมากที่สุด เนื่องจาก

- เหล็กเป็นทรัพยากรที่มีอยู่มากในเปลือกโลก
จากความรู้ทางธรณีวิทยา ทำให้ทราบว่าชั้นเปลือกโลก และแกนกลางที่ยังเป็นของเหลวอยู่ มีเหล็กเป็นองค์ประกอบจำนวน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ป้องกันรังสีคอสมิกจากลมสุริยะได้ จึงทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถดำรงชีวิตอยู่ในโลกนี้ได้
- เหล็กสามารถผลิตและขึ้นรูปได้ง่ายและประหยัดกว่าโลหะชนิดอื่น
เหล็กในธรรมชาติจะอยู่ในสภาพแร่เหล็ก ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ และจะยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ต้องทำการถลุงแร่เหล็กให้อยู่ในสภาพโลหะเหล็กเสียก่อน เช่นเดียวกับกับโลหะชนิดอื่น ที่ต้องทำการถลุงเช่นกัน แต่ เหล็กสามารถทำการถลุงและผลิตได้ง่ายกว่าโลหะชนิดอื่น เนื่องจาก วัตถุดิบที่ใช้ในการถลุง ซึ่งได้แก่ถ่านโค้ก และ หินปูน มีมากและราคาถูก รวมทั้งกระบวนการผลิตก็มีความซับซ้อนน้อย
- เหล็กมีสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ดีเมื่อเทียบกับราคา
เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ นั้น สามารถอบชุบทางความร้อน เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้อย่างกว้างขวาง แต่โลหะนอกกลุ่มเหล็กอาจทำการอบชุบทางความร้อนได้ยาก หรือไม่ได้เลย

ข้อด้อยที่สำคัญของเหล็กคือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ เกิดสนิมได้ง่ายมาก รวมทั้งเหล็กมีน้ำหนักมาก นำไฟฟ้าและความร้อนได้ไม่ดี

โลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) แบ่งออกเป็น

เหล็กกล้า

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ จากแผนภูมิสมมูลของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ จะเห็นได้ว่าเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนในเกณฑ์นี้ จะมีจุดหลอมตัวค่อนข้างสูง (1450 - 1538 °C) และมีความเหนียวอยู่พอสมควร จึงทำให้เหล็กชนิดนี้ สามารถขึ้นรูปด้วยแรงทางกลได้ เรียกเหล็กชนิดนี้ว่า **เหล็กกล้า (Steel)**

เหล็กหล่อ

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ จากแผนภูมิสมมูลของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ จะพบปฏิกิริยายูเทคติก ที่ปริมาณคาร์บอน 4.3 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ในเกณฑ์นี้มีจุดหลอมตัวค่อนข้างต่ำ และมีความเหนียวต่ำ จึงทำให้เหล็กชนิดนี้ไม่สามารถขึ้นรูปด้วยแรงทางกลได้ จำเป็นต้องขึ้นรูปด้วยวิธีการเปลี่ยนสถานะให้เป็นของเหลว แล้วปล่อยให้แข็งตัวในโพรงแบบให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าการหล่อ จึงทำให้เรียกเหล็กชนิดนี้ว่า **เหล็กหล่อ (Cast iron)**

7.1 เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กกล้าถูกจำแนกตามปริมาณคาร์บอนออกเป็น

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25%

- เป็นเหล็กกล้าที่มีการผลิตและการใช้งานมากที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าด้วยกัน โดยมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.25% ซึ่งทำให้ไม่สามารถอบชุบเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีทางความร้อนได้ (ไม่สามารถได้โครงสร้าง Martensite ได้โดยการ quenching)
- การเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำใช้วิธี cold working
- โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำประกอบไปด้วย ferrite และ pearlite
- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความเหนียวและอ่อนมาก ทำให้สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีทางกลและการเชื่อมได้ง่ายและต้นทุนต่ำ
- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอีกกลุ่มหนึ่งคือ HSLA (High Strength Low Alloy Steel) มีการเติม Cu, V, Ni, Mo ในปริมาณเล็กน้อยทำให้ HSLA มีความแข็งแรงมากกว่า Plain low carbon steel
- ในบรรยากาศทั่วไป HSLA มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า Plain carbon steel
- HSLA ราคาแพงกว่า Plain carbon steel มาก

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.25% – 0.6%

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

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) โดยทั่วไปมีปริมาณคาร์บอน (C) ระหว่าง 0.6% - 1.4%

- เหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.6% - 1.4% มีความแข็งแรงและแข็งมากที่สุดแต่มีความเหนียวน้อยที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกัน
- เกือบทั้งหมดถูกใช้งานในสภาพที่ผ่านการอบชุบ
- สามารถทนการสึกหรอได้ดีใช้ทำเครื่องมือและแม่พิมพ์

- ธาตุผสมทั่วไปได้แก่ Cr, Mo, V, W ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนให้สารประกอบ Carbide ที่มีความแข็งและจุดหลอมตัวสูง (i.e. $Cr_{23}C_6$, V_4C_3 , WC)

ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า จะมีการตั้งรหัสของเหล็กกล้าตามมาตรฐาน American Iron and Steel Institute (AISI) โดยจะประกอบไปด้วยตัวเลข 4 หลัก 2 หลักแรกบอกถึงชนิดและปริมาณธาตุผสม 2 หลักหลังบอกถึงปริมาณคาร์บอน

ตัวอย่าง

เหล็กกล้า 1020 หมายถึง เหล็กกล้ามีคาร์บอน 0.2% (ไม่มีธาตุอื่นผสม)

เหล็กกล้า 1080 หมายถึง เหล็กกล้ามีคาร์บอน 0.8% (ไม่มีธาตุอื่นผสม)

จะเห็นได้ว่าตัวเลข 2 หลักหลังนั้น เมื่อนำไปหารด้วย 100 จะได้ปริมาณคาร์บอน ส่วน 2 หลักแรกนั้น สามารถนำไปเปิดตารางเพื่อทราบชนิดและปริมาณธาตุผสม ดังตารางข้างล่างนี้

ตาราง 7.1 AISI Designation และปริมาณธาตุผสม

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

Plain carbon steel หมายถึง เหล็กกล้าที่มีเฉพาะเหล็กและคาร์บอนเป็นส่วนผสมเท่านั้น อาจมี Mn ปริมาณเล็กน้อย นอกเหนือจากนี้คือสารมลทิน

Alloy steel คือ เหล็กกล้าที่มีการเติมธาตุผสมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติ

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

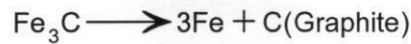
- Stainless steel เป็นเหล็กกล้าที่ความต้านทานการกัดกร่อนสูงเป็นพิเศษ โดยไม่เป็นสนิมในบรรยากาศปกติ (เหล็กกล้าทั่วไปเป็นสนิม)
- ความต้านทานการกัดกร่อนได้มาจากการเติมธาตุ Cr (อย่างน้อย 13%) เป็นหลักทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวป้องกันเนื้อโลหะ
- อาจเติมธาตุอื่นๆ ช่วยเพิ่มสมบัติบางประการเช่น Ni และ Mo
- Stainless 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



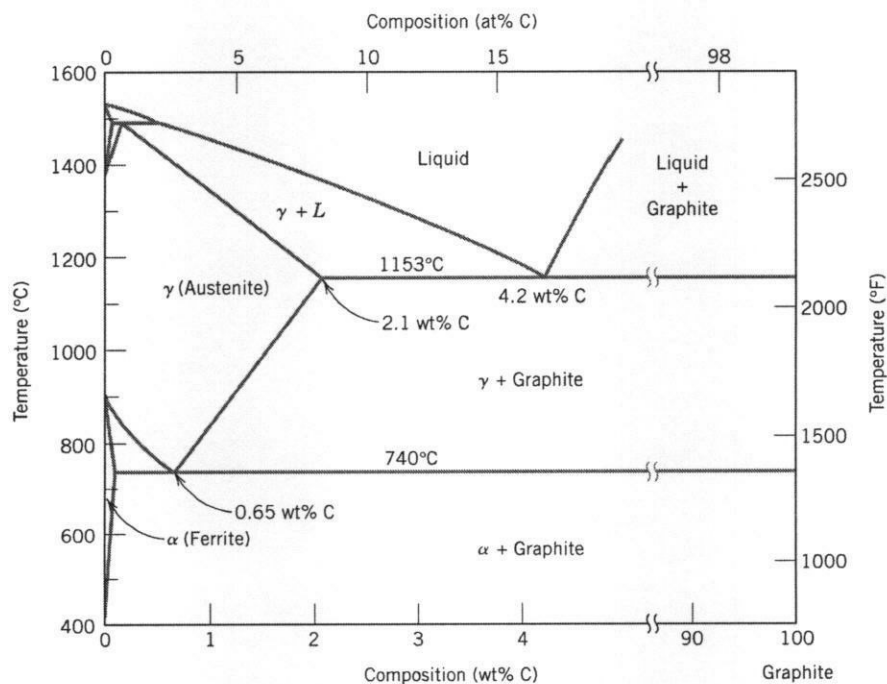
ภาพ 7.2 ภาชนะที่ทำจาก Stainless steel

7.2 เหล็กหล่อ

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



- ดังนั้นแผนภูมิสมมูลระหว่าง Fe- Fe_3C จึงไม่ใช่แผนภูมิสมมูลของ Fe-C อย่างแท้จริง แผนภูมิสมมูลของ Fe-C จะแตกต่างไปจาก Fe- Fe_3C เล็กน้อย
- ปัจจัยที่ทำให้เกิด Graphite คือส่วนผสมทางเคมีและอัตราการเย็นตัว
- ธาตุผสมบางชนิดเช่น Si, Ce, Mg ช่วยทำให้เกิด Graphite
- อัตราการเย็นตัวเร็วทำให้ Graphite ไม่สามารถเกิดได้ทันเพราะต้องอาศัยกระบวนการแพร่ ดังนั้นอัตราการเย็นตัวช้าจะส่งเสริมให้ Graphite เกิดมากขึ้น

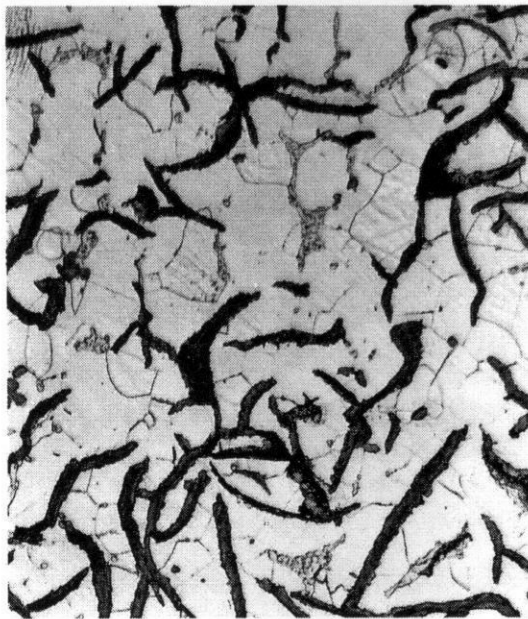


ภาพ 7.3 แผนภูมิสมมูลของเหล็กและคาร์บอน

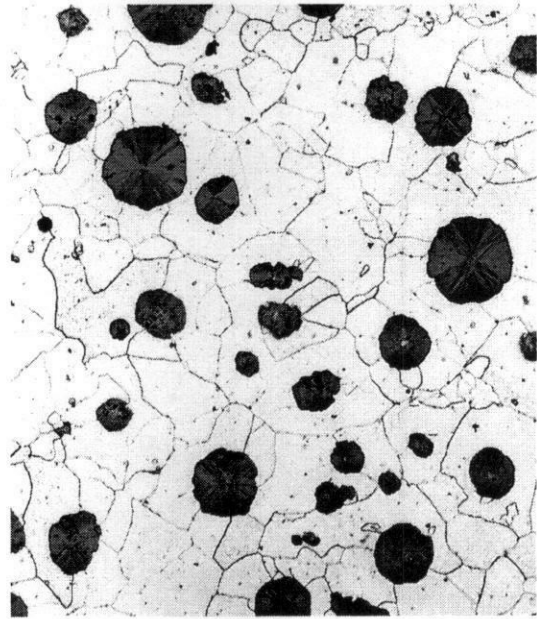
ประเภทของเหล็กหล่อ

เหล็กหล่อจำแนกตามรูปแบบของกราฟไฟต์ ออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

- | | |
|--|---------|
| 1. เหล็กหล่อขาว (White Cast Iron) | ภาพ (c) |
| 2. เหล็กหล้ออบเหนียว (Malleable Cast Iron) | ภาพ (d) |
| 3. เหล็กหล้อสีเทา (Gray Cast Iron) | ภาพ (a) |
| 4. เหล็กหล้อเหนียว (Ductile Cast Iron) | ภาพ (b) |



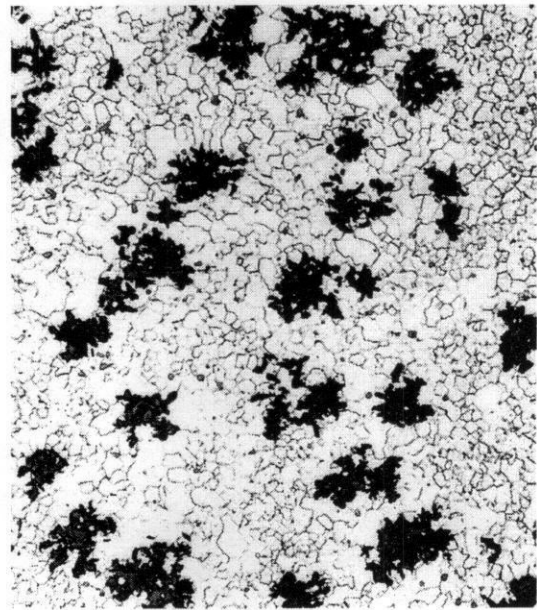
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพ 7.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแต่ละประเภท

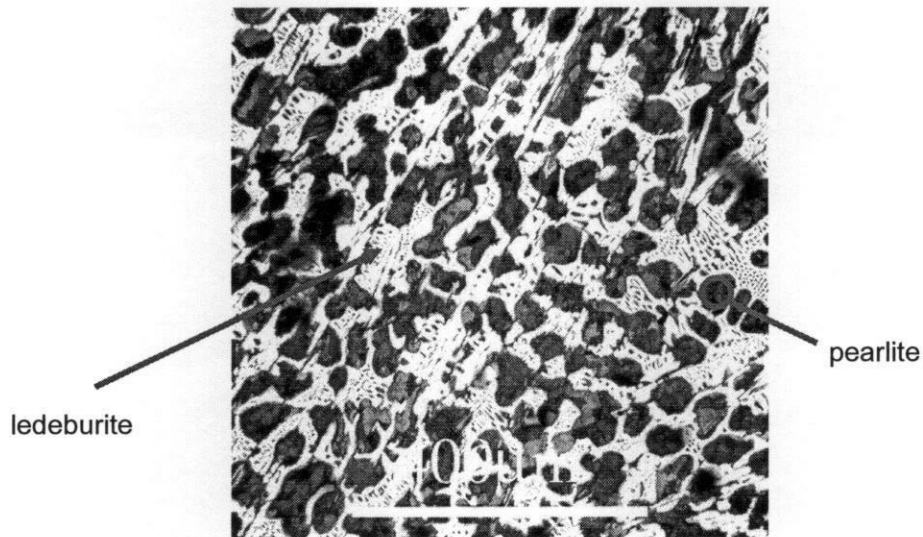
สมบัติและความแข็งแรงของเหล็กหล่อ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ

1. รูปทรงของกราฟไฟต์
2. โครงสร้างพื้นฐาน

เนื่องจากเหล็กหล่อมีกราฟไฟต์เป็นส่วนประกอบรวมอยู่ในโครงสร้างพื้นฐาน และกราฟไฟต์ที่อยู่ในเหล็กหล่อเปรียบเสมือนเป็นช่องว่าง และไม่ได้มีส่วนที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับเหล็กหล่อ แต่การควบคุมรูปทรงของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อให้มีรูปทรงที่เหมาะสมกลับมีผลช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับเหล็กหล่อได้มาก กล่าวคือ แกรไฟต์รูปเกล็ดที่ปรากฏพบในเหล็กหล่อสีเทาส่งผลให้เหล็กหล่อสีเทามีความแข็งแรงดิ่งต่ำ และเปราะไม่ทนต่อแรงกระแทก แต่ถ้าสามารถปรับรูปทรงของกราฟไฟต์จากเกล็ดให้เป็นกราฟไฟต์กลม จะสามารถลดจุดศูนย์รวมของความเค้นที่มีความเข้มข้นสูงที่สะสมอยู่ที่ส่วนปลายแหลมของกราฟไฟต์เกล็ดได้มาก ดังนั้นเหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่อกราฟไฟต์กลมจึงมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเหล็กหล่อสีเทา และอาจเทียบเท่าได้กับเหล็กกล้าคาร์บอน นอกจากการควบคุมรูปทรงของกราฟไฟต์ในเหล็กหล่อแล้วการควบคุมโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กหล่อก็มีความสัมพันธ์กันกับสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อ กล่าวคือ โครงสร้างพื้นฐานที่เป็นเฟอไรต์จะส่งผลให้เหล็กหล่อมีคุณสมบัติทางด้านทนแรงดิ่ง และความแข็งแรงได้สูง แต่โครงสร้างพื้นฐานเพอร์ไรท์ ส่งผลให้เหล็กหล่อมีความเหนียว และความต้านทานต่อแรงกระแทกได้สูง แต่คุณสมบัติทางด้านทนแรงดิ่งต่ำ สำหรับการควบคุมโครงสร้างพื้นฐานในเบื้องต้นจะอยู่ที่การควบคุมปริมาณธาตุซิลิคอนให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ถ้าหากเหล็กหล่อที่ผลิต มีปริมาณซิลิคอนสูงเกินไปจะได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นเพอร์ไรท์ในปริมาณมาก หากปริมาณซิลิคอนต่ำเกินไป สำหรับเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมอาจเกิดโครงสร้างเฟอไรต์ในปริมาณสูงอยู่ร่วมกับโครงสร้างเลดเดอไรท์ที่มีความแข็งแรงสูงและเปราะ อีกทั้งยังเป็นปัญหาต่อการกลึง ใส ตัด เจาะ ขึ้นรูปชิ้นงานหล่อด้วย

White Cast Iron

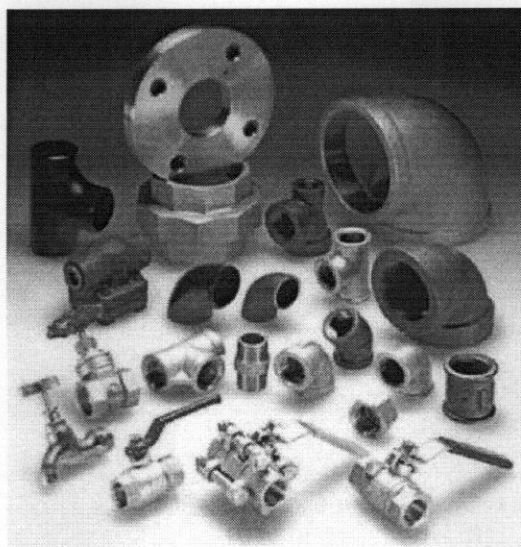
- สำหรับเหล็กหล่อที่มีปริมาณ Si ต่ำ (น้อยกว่า 1%) และ/หรือ เย็นตัวอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะอยู่ในรูปแบบของ Fe_3C แทน graphite
- เนื่องจากรอยแตกของเหล็กหล่อชนิดนี้มีสีขาวจึงเรียก “เหล็กหล่อขาว” หรือ White Cast Iron
- เหล็กหล่อขาวมีสมบัติแข็งและเปราะมากทำให้สามารถใช้ได้เฉพาะงานที่ต้องการความต้านทานการสึกหรอสูงและไม่สามารถรับแรงกระแทกได้



ภาพ 7.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีขาว (White Cast Iron)

Malleable Cast Iron

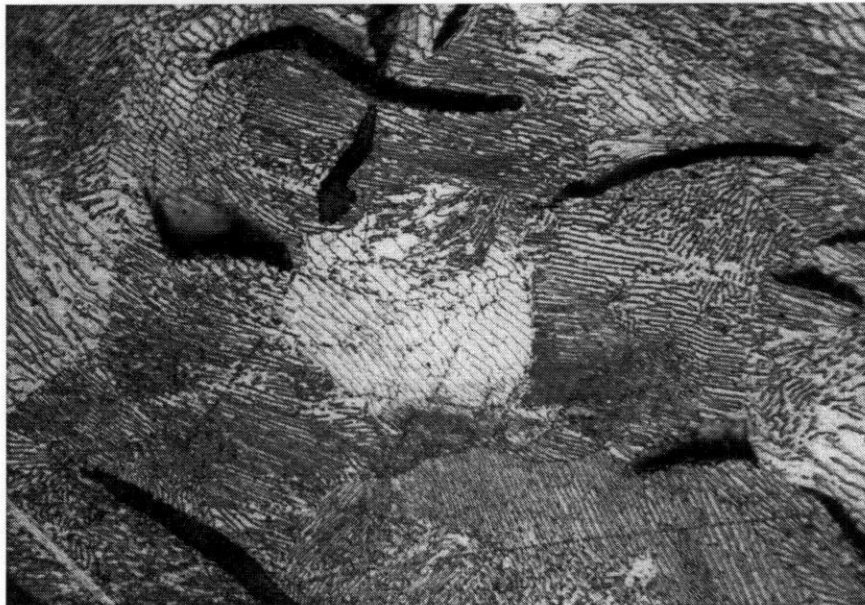
- เมื่อนำเหล็กหล่อขาวมาอบที่อุณหภูมิ 800 – 900 °C เป็นเวลานาน (มากกว่า 30 ชั่วโมง) ในบรรยากาศปกคลุม (เพื่อป้องกัน oxidation) จะทำให้ Fe_3C แตกตัวเป็น graphite มีลักษณะเป็นกลุ่มเป็นก้อนคล้ายดอกไม้
- โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยกลุ่ม graphite ล้อมรอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็น ferrite หรือ pearlite ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว
- เหล็กหล่อ Malleable จะมีความเหนียวและสามารถตีแผ่ได้ (malleable แปลกว่า สามารถตีแผ่ได้) มี tensile strength ค่อนข้างสูง (ใกล้เคียงกับ nodular cast iron)



ภาพ 7.6 Pipe fitting ทำจาก 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 ทำให้รอยแตกของเหล็กหล่อชนิดนี้มีสี่เทาจึงเป็นที่มาของชื่อ Gray cast iron
- เหล็กหล่อสี่เทามีสมบัติค่อนข้างแข็งและเปราะ รับแรงดึงได้น้อยเนื่องจากบริเวณปลายของ flake graphite เป็นบริเวณที่เกิด stress concentration เหล็กหล่อสี่เทาสามารถรับแรงอัดได้ดี
- สมบัติเด่นของเหล็กหล่อสี่เทา คือ สามารถรับแสงสะท้อนได้ดีมาก
- เหล็กหล่อสี่เทามี Fluidity ที่ดีมากทำให้สามารถหล่อขึ้นรูปชิ้นงานซับซ้อนได้ง่ายกว่าเหล็กหล่อประเภทอื่นและมีต้นทุนต่ำที่สุดในบรรดาเหล็กหล่อด้วยกัน

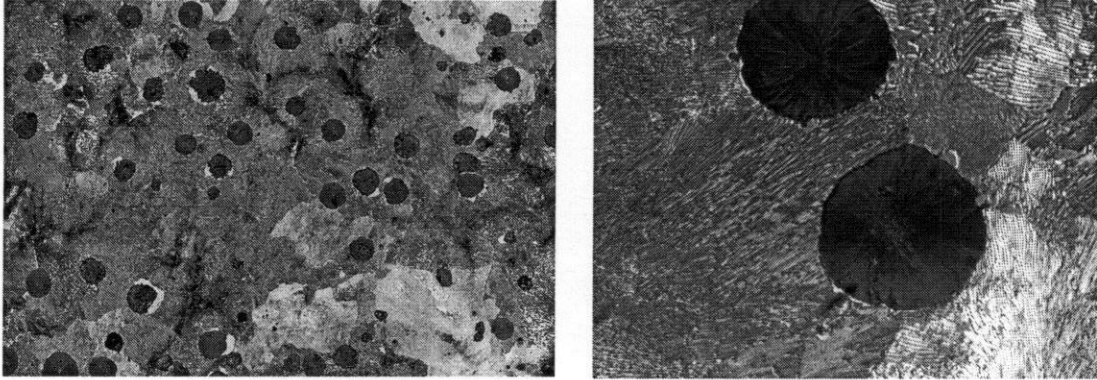


ภาพ 7.7 Microstructure of Gray Cast Iron

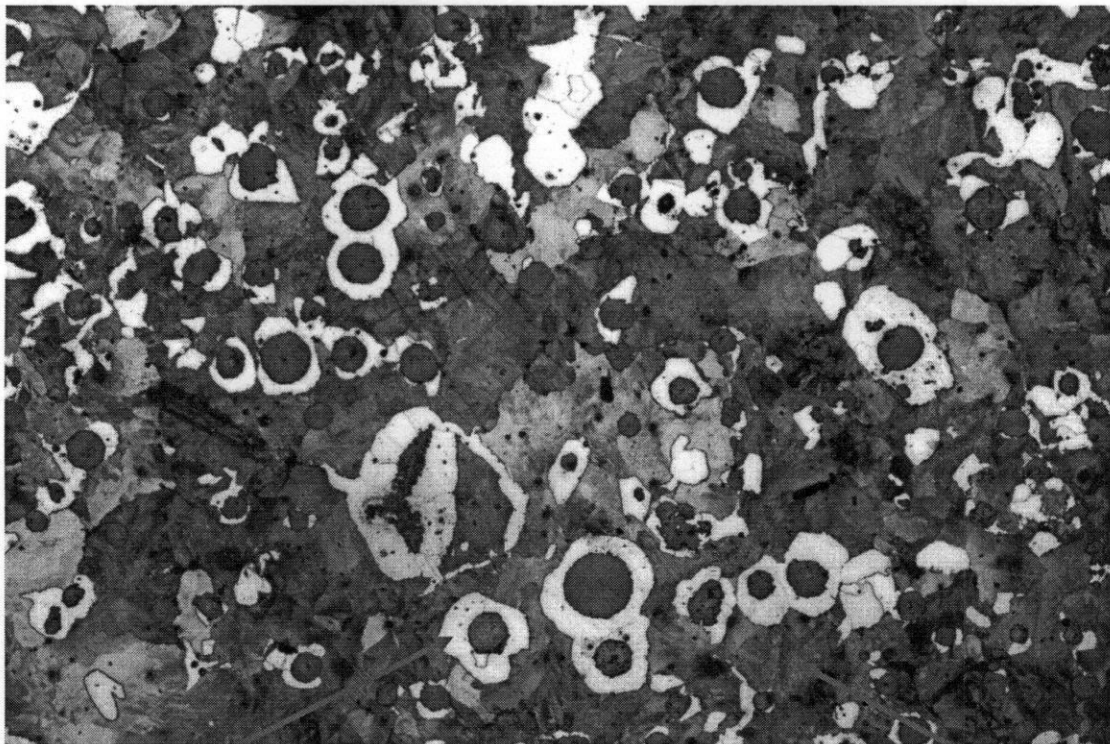
Ductile Cast Iron

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

- เหล็กหล่อเหนียวมี tensile strength อยู่ในช่วง 380-480 MPa ซึ่งมากกว่า gray cast iron เพราะมี graphite ที่อยู่ในรูปกลมจึงไม่มี stress concentration zone
- เหล็กหล่อเหนียวมี elongation อยู่ในช่วง 10-20%
- การใช้งานได้แก่ ทำเฟือง, วาล์ว, ตัวยึดและชิ้นส่วนยานยนต์



ภาพ 7.8 Microstructure of Ductile Cast Iron



ferrite

Bull-eyed structure

pearlite

ภาพ 7.9 Bull-eyed Structure

บทที่ 8

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Alloys)

อ.สารัมภ์ บุญมี

ถึงแม้ว่าโลหะที่มีการใช้งานมากที่สุดคือเหล็ก แต่เนื่องจากข้อจำกัดบางประการทำให้มีการใช้โลหะนอกกลุ่มเหล็กมาทดแทน ข้อจำกัดเหล่านั้นได้แก่

- เหล็กมีน้ำหนักมาก (7.86 g/cm^3)
- เหล็กมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนต่ำ
- เหล็กมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ

ดังนั้นจึงมีการนำโลหะนอกกลุ่มเหล็กมาใช้ทดแทนข้อจำกัดเหล่านี้ เช่น Al และ Mg มีน้ำหนักเบา, Ti alloys มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง, Cu และ Ag นำไฟฟ้าได้ดีมาก

ประเภทของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
สามารถจำแนกได้หลายวิธี

โดยหากจำแนกตามวิธีการขึ้นรูป จะแบ่งได้ดังนี้

- Wrought alloys เป็นโลหะผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยแรงทางกล เช่น การรีด, การตีขึ้นรูป ฯลฯ เนื่องจาก โลหะผสมจำพวกนี้มีความเหนียวมาก
- Cast alloys เป็นโลหะผสมที่นิยมขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ เนื่องจากมีความเหนียวต่ำ โลหะผสมจำพวกนี้ มักจะมีจุดหลอมตัวไม่สูงมากนัก และสามารถหล่อได้ง่าย (มี Fluidity)

อีกวิธีหนึ่ง คือ การจำแนกตามชนิดของโลหะ โดยโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีการใช้งานมาก ได้แก่

- Al เช่น กรอบหน้าต่าง, ลูกสูบรถยนต์, ชิ้นส่วนเครื่องบิน
- Cu เช่น สายไฟ, ทองเหลือง, บรอนซ์
- Mg เช่น หน้ากากมือถือ, ส่วนประกอบ notebook , บอดี้กล้องถ่ายภาพ
- Ti เช่น gas turbine engine, ข้อต่ออวัยวะเทียม, อุปกรณ์กีฬา, โครงเครื่องบิน

8.1 ทองแดงและโลหะผสมทองแดง (Copper and its alloys)

สมบัติที่สำคัญของทองแดง

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

โลหะผสมทองแดงที่มีการใช้งานมากได้แก่

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

8.1.1 ทองเหลือง (Brass)

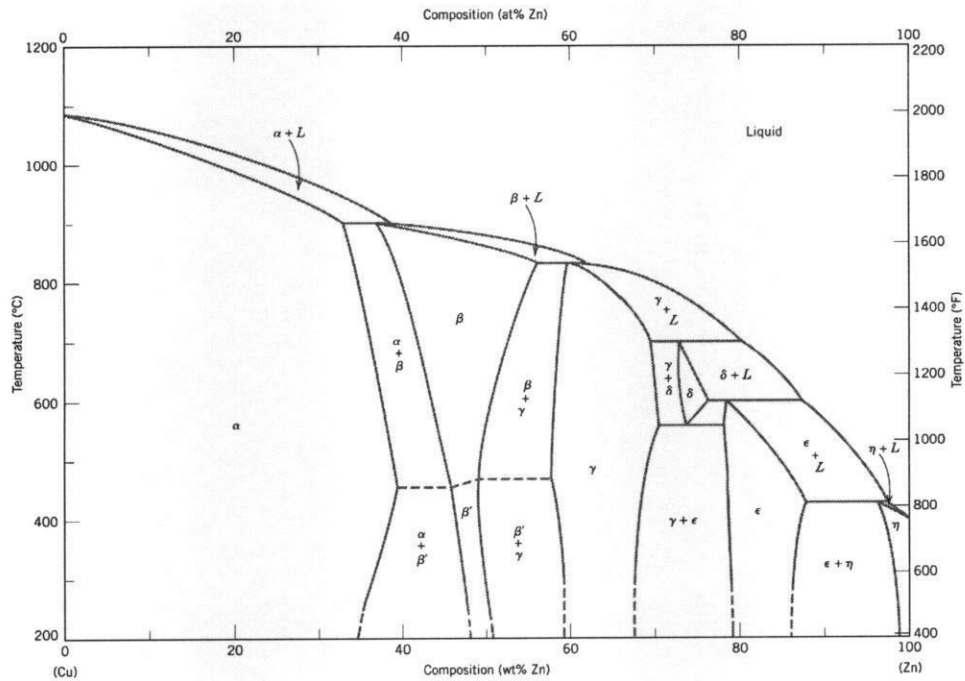
เมื่อนำทองแดงมาผสมกับสังกะสี โดยที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก เราเรียกโลหะผสมชนิดนี้ว่า ทองเหลือง

ทองเหลืองมีสมบัติเชิงกลทั่วไปที่อยู่ในเกณฑ์ปานกลางและมีความเหนียวสูง ทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยแรงทางกลได้ดี รวมทั้งสามารถ กลึง ไส กัด เจาะ ได้ง่าย จึงทำให้ทองเหลืองถูกนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปได้ยาก เช่น ปลอกกระสุนปืน, ข้อต่อท่อ นอกจากนี้ทองเหลืองจะมีสีเหลืองสวยงาม ทำให้ถูกนำไปใช้เป็นรูปปั้นและเหรียญกษาปณ์

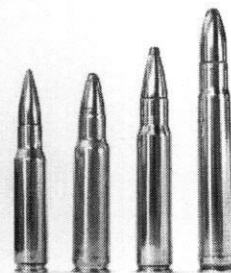
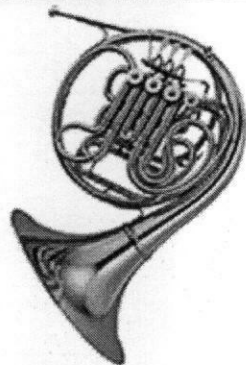
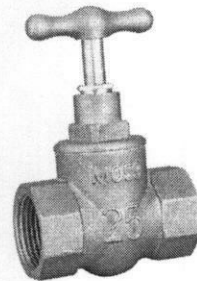
สมบัติเชิงกลของทองเหลืองขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีเป็นหลัก

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

- ทองเหลืองส่วนใหญ่จะมีการเติมตะกั่วลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการกลึง โดยตะกั่วจะทำให้เศษกลึงขาดออกจากกันได้ง่าย



ภาพ 8.1 แผนภูมิสมดุลของ Cu และ Zn

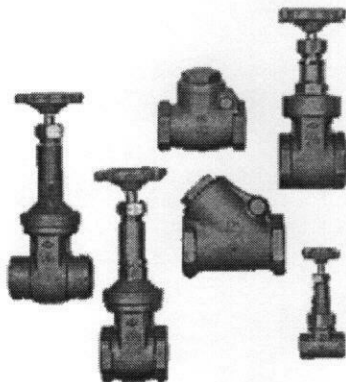
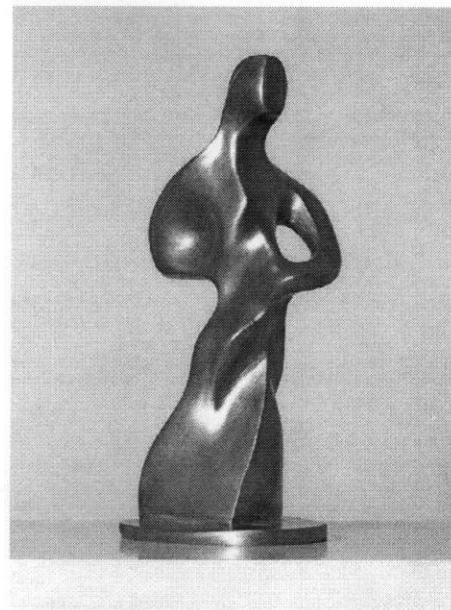


ภาพ 8.2 การนำไปใช้งานของทองเหลือง

8.1.2 บรอนซ์ (Bronze)

เมื่อนำทองแดงไปผสมกับธาตุผสมอื่นนอกเหนือจากสังกะสี จะเรียกว่า บรอนซ์ ซึ่งจะมีสมบัติเชิงกลแตกต่างออกจากทองเหลือง ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณธาตุผสม

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



ภาพ 8.3 การนำไปใช้งานของบรอนซ์

8.2 อะลูมิเนียมและโลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminum and its alloys)

โลหะผสมอะลูมิเนียมมีปริมาณการใช้งานเป็นอันดับสองรองจากเหล็กเท่านั้น โดยในปี ค.ศ. 1989 มีการผลิตอะลูมิเนียมเพื่อนำมาใช้งานภายในสหรัฐอเมริกาประมาณ 4 ล้านตัน ซึ่งส่วนใหญ่แล้ว จะเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมด้านการบรรจุภัณฑ์ และการขนส่ง

สมบัติที่สำคัญของอะลูมิเนียม

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

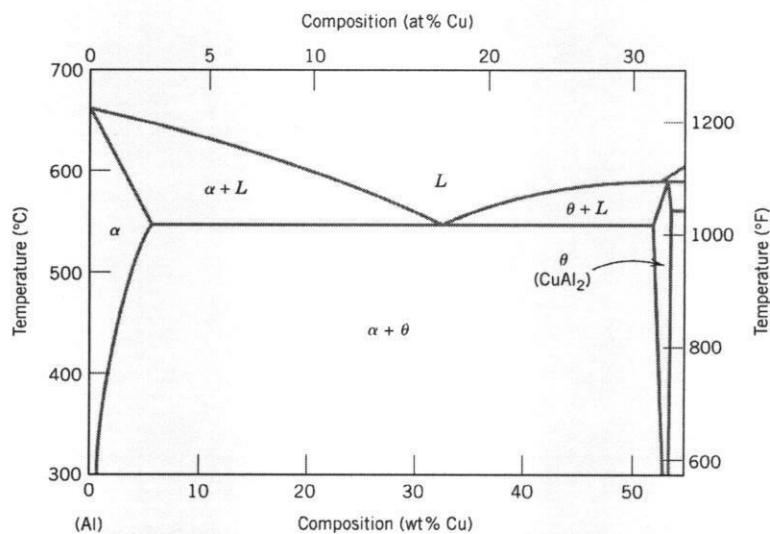
จำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- Wrought Alloys ขึ้นรูปด้วยแรงทางกล มีธาตุผสมเช่น Cu, Mg
- Cast Alloys ขึ้นรูปด้วยการหล่อ เช่น Al-7.0%Si มีความสามารถในการหล่อที่ดีมาก

โลหะผสม Al-Cu

- เมื่อเติมทองแดงลงในอะลูมิเนียมประมาณ 3-4%Cu จะทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถทำ Precipitation Hardening ได้ ทำให้ได้ความแข็งแรงสูงกว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมทั่วไป (UTS = 400 – 500 MPa ในขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมทั่วไป UTS = 100-250 MPa)
- โลหะผสมชนิดนี้มีราคาสูง นำไปใช้เป็นตัวถังเครื่องบินเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง (High specific strength)

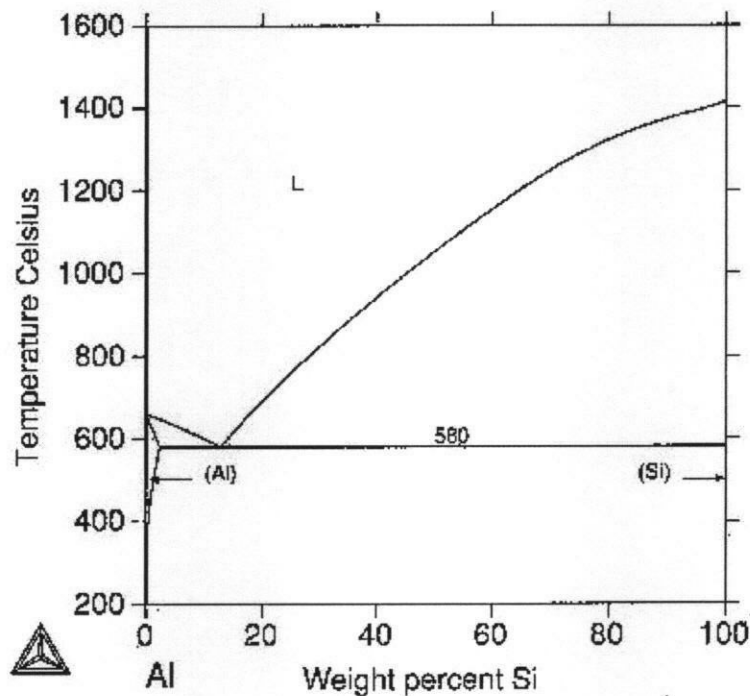
$$\text{Specific Strength} = \frac{\sigma_{\text{UTS}}}{\rho}$$



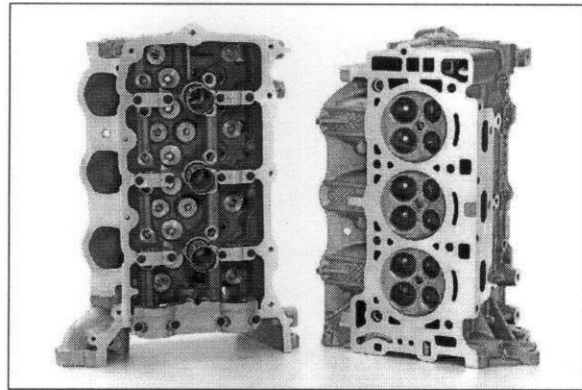
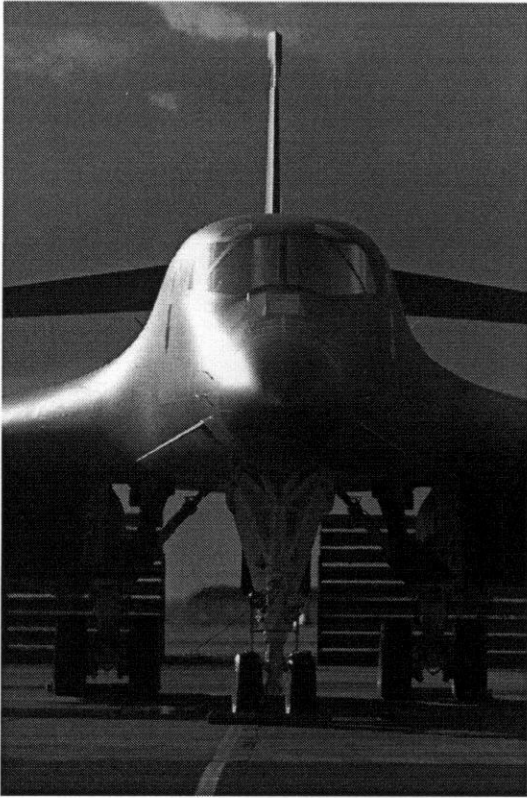
ภาพ 8.4 แผนภูมิสมดุลของ Al และ Cu

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 ได้แต่มีผลไม่มากนัก มี Tensile strength อยู่ในช่วง 200-250 MPa
- ส่วนผสมทั่วไป Al - 7.0%Si - 0.3%Mg



ภาพ 8.5 แผนภูมิสมดุลของ Al และ Si



ภาพ 8.6 การนำไปใช้งานของโลหะผสมอะลูมิเนียม

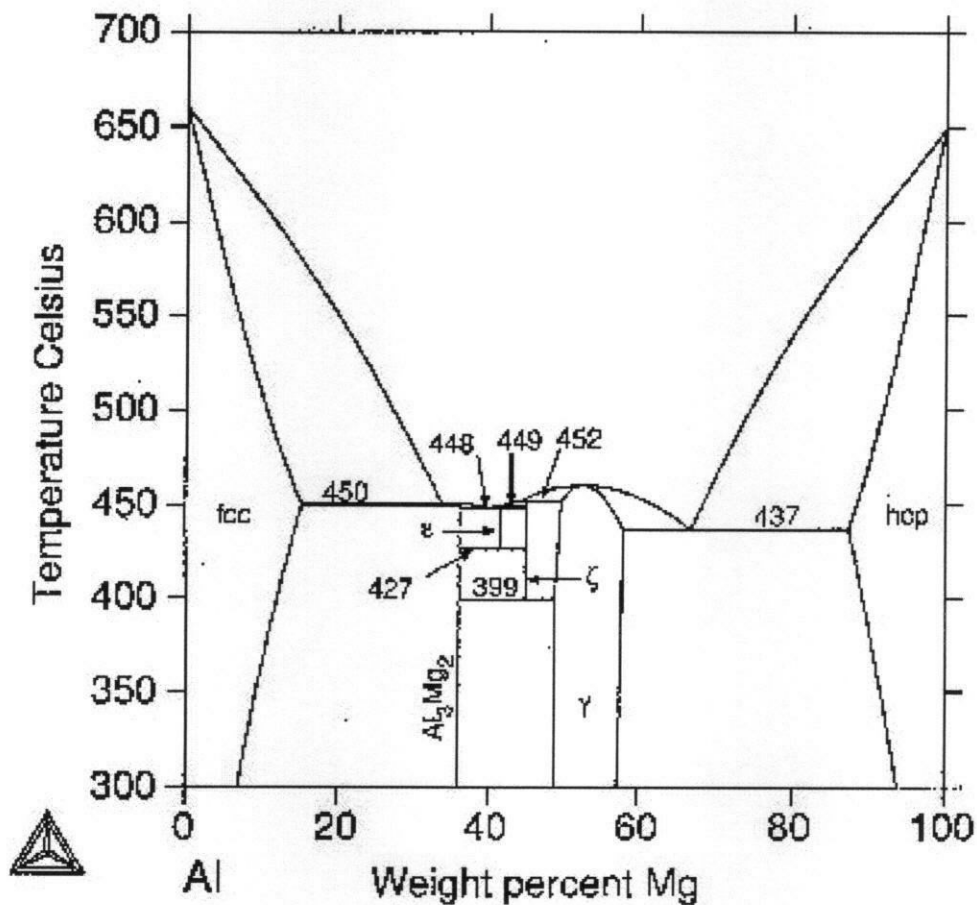
8.3 แมกนีเซียมและโลหะผสมแมกนีเซียม (Magnesium and its alloys)

จุดเด่นของโลหะผสมแมกนีเซียม คือน้ำหนักที่เบามาก ซึ่งถือว่าเบาที่สุดในบรรดาโลหะผสมทางวิศวกรรมด้วยกัน ดังนั้นการนำไปใช้งานของโลหะผสมแมกนีเซียม จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดน้ำหนักเป็นสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน , รถแข่ง อย่างไรก็ตาม แมกนีเซียมนั้น มีสมบัติค่อนข้างเปราะ เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบ HCP และมี Modulus of Elasticity ต่ำ (45 GPa) รวมทั้งโลหะผสมแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ง่ายมาก ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จึงทำให้ชิ้นส่วนที่ทำจากโลหะผสมแมกนีเซียมมีราคาแพง กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแมกนีเซียมที่นิยม ได้แก่ Pressure Die Casting

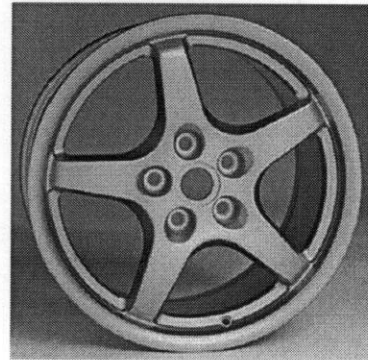
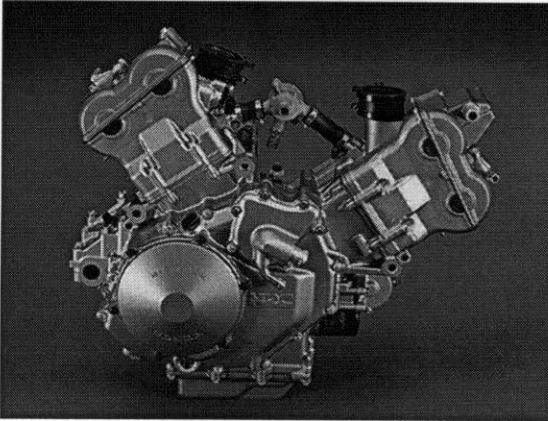
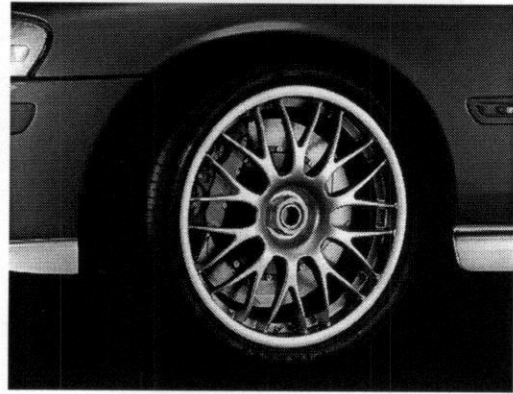
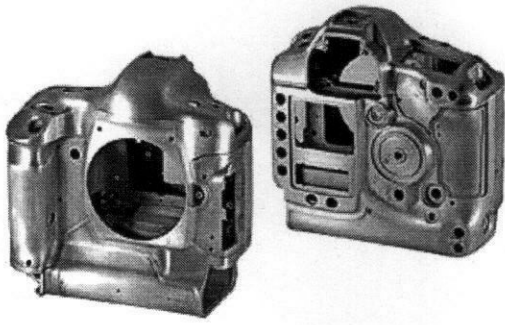
สมบัติที่สำคัญของแมกนีเซียม

- มีน้ำหนักเบา (1.7 g/cm³)
- มีความเหนียวต่ำเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบ HCP
- จุดหลอมตัวต่ำ (651 °C) ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ได้
- มี Young's Modulus ต่ำ (45 GPa)
- มีความต้านทานการกัดกร่อนดีพอสมควรในบรรยากาศปกติ แต่จะต้านทานการกัดกร่อนต่ำมากในบรรยากาศน้ำทะเล

- เป็นโลหะผสมแมกนีเซียมที่มีการใช้งานมากโดยใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์
- “ล้อยแม็ค” ก็เป็นโลหะผสมในระบบนี้เช่นกันส่วนผสมทั่วไปคือ Mg-6.0%Al
- ที่อุณหภูมิเยือกแข็ง Mg ให้ Al ละลายได้ถึง 12.7% แต่ที่อุณหภูมิต่ำความสามารถในการละลายลดลงเหลือ 3.2% โดยจะตกผลึกเป็น intermetallic compound γ ($Mg_{17}Al_{12}$) ซึ่งมีสมบัติที่ค่อนข้างแข็งจากพฤติกรรมนี้ทำให้โลหะผสมชนิดนี้สามารถทำ Precipitation hardening ได้
- Tensile strength มีค่าอยู่ในช่วง 200-300 MPa



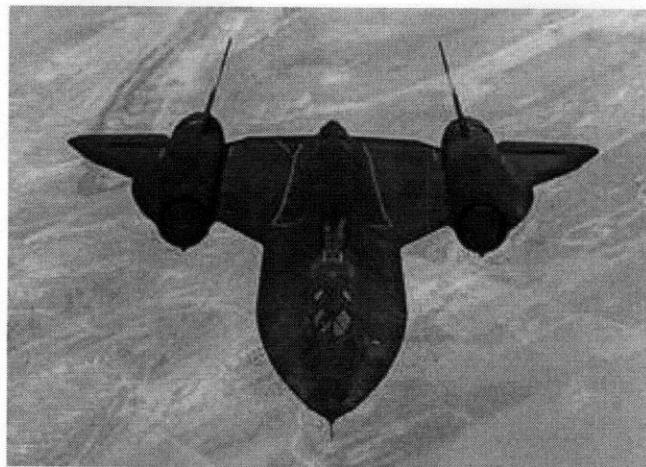
ภาพ 8.6 แผนภูมิสมดุลของ Mg และ Al



ภาพ 8.7 การนำไปใช้งานของโลหะผสมแมกนีเซียม

8.4 ไททาเนียมและโลหะผสมไททาเนียม (Titanium and its alloys)

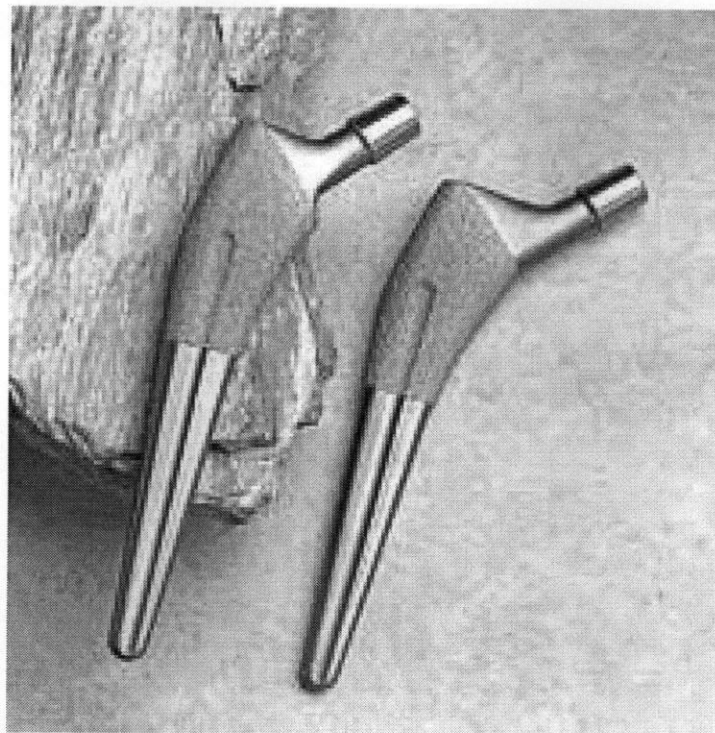
การนำไททาเนียมมาใช้ในงานวิศวกรรมเริ่มต้นในยุค 1950 โดยในช่วงแรกเริ่มต้นจากการทหารโดยนำมาใช้ทำตัวถังเครื่องบินสำรวจ Lockheed SR-71 "Blackbird" ซึ่งตัวเครื่องจะต้องบินเร็วกว่าความเร็วเสียงถึง 3 เท่า ทำให้เกิดความร้อนมากจนไม่สามารถใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมได้ จึงนำโลหะผสมไททาเนียมมาใช้แทนเพราะมีจุดหลอมตัวที่สูงกว่า



ภาพ 8.9 "Blackbird"

สมบัติที่สำคัญของไททาเนียม

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



ภาพ 8.10 กระดูกเทียมทำจาก Ti-6Al-4V

เนื่องจากไททาเนียมมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่สูงมากทำให้สามารถนำไปใช้งานทางการแพทย์ได้ดี เพราะมีน้ำหนักเบาและแข็งแรง

ข้อจำกัดของโลหะไททาเนียม คือ เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศได้ง่ายมาก ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมบรรยากาศในการหลอมโลหะไททาเนียม ซึ่งทำให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงมาก

8.5 โลหะมีค่า

โลหะมีค่าส่วนใหญ่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอัญมณีเครื่องประดับ ซึ่งปัจจุบันนี้ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกสินค้าประเภทอัญมณีเครื่องประดับอันดับต้นๆ ของโลก ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยมีแรงงานฝีมือราคาถูก รวมทั้ง มีความประณีต สามารถผลิตสินค้าคุณภาพสูงได้ ดังนั้น รัฐบาลจึงให้การสนับสนุนอุตสาหกรรมประเภทนี้ โดยการจัดงานเพื่อเป็นการส่งเสริมสินค้าเข้าสู่ตลาดโลก

โลหะมีค่า ได้แก่ ทอง (Au), เงิน (Ag), Platinum (Pt), Palladium (Pd)

สมบัติที่สำคัญ

- แพง
- สวย
- เหนียวมากและความแข็งแรงต่ำ ขึ้นรูปได้ง่าย
- ไม่เกิด oxidation ในบรรยากาศ
- ทองและเงินสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการเติมทองแดง
- สำหรับเงินผสมทองแดงประมาณ 7.5%Cu เรียกว่า Sterling Silver
- ทอง, เงิน และ Palladium ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีเครื่องประดับ
- เงินนำไฟฟ้าได้ดีมากทำให้ถูกนำไปใช้ทำสายไฟในเครื่องเสียงราคาแพง
- ทองและเงิน ใช้ทำ electrical contact คุณภาพสูงเพราะไม่เกิดออกไซด์เมื่อใช้งานไปนานๆ
- ทองและเงินใช้ทำเป็นฟันปลอม



ภาพ 8.11 การนำไปใช้งานของโลหะมีค่า