
สารบัญ

คำนำ

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญรูป

บทที่ 1	โครงสร้างของโลหะ	1
1.1	โครงสร้างอะตอม	2
1.2	พันธะระหว่างอะตอมและโมเลกุล	7
1.3	ระบบผลึกและผลึกโลหะ	14
1.4	การศึกษาโครงสร้างผลึกของโลหะ	40
บทที่ 2	การเกิดผลึก โลหะเจือ และการเปลี่ยนรูปถาวรของโลหะ	51
2.1	การเกิดผลึก	51
2.2	โลหะเจือ	62
2.3	การเปลี่ยนรูปถาวร	69
บทที่ 3	แผนภาพวัฏภาค	83
3.1	แผนภาพวัฏภาคของระบบโลหะเจือ	83
3.2	แผนภาพการสมดุลของระบบโลหะเจือ 2 ธาตุ	87
3.3	การเปลี่ยนรูปในสถานะของแข็ง	131
3.4	แผนภาพการสมดุลแบบซับซ้อน	140
บทที่ 4	แผนภาพสมดุลของเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์	147
4.1	เหล็กอินกอตและเหล็กอ่อน	147
4.2	แผนภาพสมดุลของเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์	152
บทที่ 5	เหล็กกล้า เหล็กกล้าเจือ และเหล็กหล่อ	169
5.1	เหล็กกล้า	169
5.2	เหล็กกล้าเจือ	177
5.3	เหล็กหล่อ	196

บทที่ 6	การอบชุบเหล็กกล้า	231
6.1	การอบชุบความร้อน	231
6.2	แผนภาพการเปลี่ยนโครงสร้างออสเตไนต์โดยอุณหภูมิคงที่	261
6.3	การชุบแข็งที่ผิวหรือการชุบแข็งที่ปลอก	272
บทที่ 7	โลหะที่ไม่ใช่เหล็กและโลหะเจือ	289
7.1	ทองแดงและทองแดงเจือ	290
7.2	อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมเจือ	303
7.3	แมกนีเซียมและแมกนีเซียมเจือ	316
7.4	นิกเกิลและนิกเกิลเจือ	323
7.5	ตะกั่ว ตะกั่วเจือ ดีบุก และดีบุกเจือ	331
7.6	ไทเทเนียม ไทเทเนียมเจือ สังกะสี และสังกะสีเจือ	334
7.7	โลหะมีค่า	343
7.8	แพลเลเดียม แพลเลเดียมเจือ ไอร์เดียม ออสเมียม โรเดียม รูทีเนียม ทังสเตน และโมลิบดีนัม	347
บทที่ 8	การกัดกร่อนและโลหะวิทยาผง	353
8.1	การกัดกร่อน	353
8.2	โลหะวิทยาผง	376
บทที่ 9	การตรวจโครงสร้างและการทดสอบโดยไม่ทำลายสภาพโลหะ	393
9.1	การตรวจโครงสร้างโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์	393
9.2	การทดสอบแบบไม่ทำลายสภาพ	408
บรรณานุกรม		423
ดัชนี		425



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	มวลและประจุของโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน	2
ตารางที่ 1.2	ค่าของเลขควอนตัมของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่าง ๆ	5
ตารางที่ 1.3	การจัดอิเล็กตรอนของธาตุบางชนิด	6
ตารางที่ 1.4	พลังงานแลตทิซและจุดหลอมเหลวของของแข็งไอออนบางชนิด	9
ตารางที่ 1.5	พลังงานพันธะและจุดหลอมเหลวของโลหะในคาบที่สี่ของตารางธาตุ	11
ตารางที่ 1.6	พลังงานพันธะและจุดหลอมเหลวของสารที่มีพันธะแบบต่าง ๆ	14
ตารางที่ 1.7	ลักษณะของระบบผลึก 7 ระบบ	17
ตารางที่ 1.8	รัศมีอะตอมและสัดส่วน c/a ของโลหะที่มีโครงสร้างผลึก HCP บางชนิด	24
ตารางที่ 1.9	โครงสร้างผลึกของโลหะบางชนิด	25
ตารางที่ 1.10	อัญรูปต่าง ๆ ของโลหะบางชนิด	40
ตารางที่ 1.11	ลำดับของการเลี้ยวเบนและมุมสะท้อนหรือหักเห	44
ตารางที่ 2.1	ระบบการเลื่อน ขนาดความเค้นเฉือน ของโลหะรูปผลึกต่าง ๆ	74
ตารางที่ 2.2	ผลของการเปลี่ยนรูปการต่อสมบัติเชิงกลของทองเหลือง 70 : 30	79
ตารางที่ 3.1	สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของ Cu – Ni ที่ผ่านการอบอ่อน	96
ตารางที่ 3.2	ผลของการปร่มแข็งต่อสมบัติของอะลูมิเนียมเจือ 2014 (3.5 – 4.5%Cu)	114
ตารางที่ 3.3	ผลของขั้นการปร่มแข็งและสัดส่วนเจือของโลหะเจือ Cu – Be ต่อสมบัติเชิงกล	117
ตารางที่ 4.1	สมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงของเหล็กอ่อน	151
ตารางที่ 4.2	สมบัติของเหล็กอ่อนเมื่อเจือและไม่เจือนิกเกิล	152
ตารางที่ 5.1	ตัวอย่างของเหล็กกล้าคาร์บอน	172
ตารางที่ 5.2	ตัวอย่างของเหล็กกล้าเจือที่ควรรู้จัก	174
ตารางที่ 5.3	พฤติกรรมและแนวโน้มการละลายและการรวมตัวเป็นสารประกอบ คาร์ไบด์ของธาตุแต่ละชนิดในเหล็กกล้า	179
ตารางที่ 5.4	อนุกรมเหล็กกล้าไร้สนิม	188
ตารางที่ 5.5	เปรียบเทียบผลของการรีดเย็นในแนวตามยาวต่อเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก	195
ตารางที่ 5.6	ความแข็งแรงต่อแรงดึงของเหล็กอบเหนียว	205

ตารางที่ 5.7	ขนาดแผ่นแกรไฟต์	213
ตารางที่ 5.8	สมบัติเชิงกลของแท่งทดสอบเหล็กหล่อสีเทามาตรฐาน	217
ตารางที่ 5.9	ค่าความแข็งในหน่วยบริเนลล์ของเหล็กหล่อตามโครงสร้างจุลภาค	218
ตารางที่ 5.10	องค์ประกอบทางเคมีและความแข็งของเหล็กหล่อเย็น	220
ตารางที่ 5.11	สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อในดูลาร์ชนิดต่าง ๆ	223
ตารางที่ 5.12	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทาที่เปลี่ยนตามปริมาณ ของโครเมียม	224
ตารางที่ 5.13	เปอร์เซ็นต์ของธาตุเจือและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเจือต่ำ บางชนิด	227
ตารางที่ 6.1	สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าอบอ่อนและเหล็กกล้าอบปกติ	235
ตารางที่ 6.2	อัตราการเย็นตัวของแท่งเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว ยาว 2 ½ นิ้ว เมื่อชุบจาก 1500°F ในสารตัวกลางชนิดต่าง ๆ	248
ตารางที่ 6.3	ความรุนแรงของการชุบในสภาวะต่าง ๆ ที่เทียบกับน้ำที่มี ความรุนแรงเท่ากับ 1.0	248
ตารางที่ 6.4	อิทธิพลของความถี่ไฟฟ้าที่ใช้ต่อความลึกของชั้นผิวแข็ง	284
ตารางที่ 7.1	อิทธิพลของสังกะสีต่อสมบัติเชิงกลของทองเหลือง	293
ตารางที่ 7.2	ระบบตัวเลขระบุกลุ่มอะลูมิเนียม	305
ตารางที่ 7.3	อักษรแสดงธาตุที่เจือ	318
ตารางที่ 7.4	เปอร์เซ็นต์ธาตุเจือและสมบัติเชิงกลของนิกเกิลเกรดการค้า	324
ตารางที่ 7.5	สมบัติของโลหะเจือตะกั่ว – พลวงหล่อ	332
ตารางที่ 7.6	สมบัติของโลหะเจือตะกั่ว – ดีบุกหล่อ	333
ตารางที่ 8.1	อนุกรมแรงเคลื่อนไฟฟ้าของโลหะ	358
ตารางที่ 8.2	อนุกรมของโลหะและโลหะเจือที่ใช้ในงานน้ำทะเล	359
ตารางที่ 8.3	ผลของลักษณะการกัดกร่อนแบบต่าง ๆ ต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน	368
ตารางที่ 8.4	พื้นที่ผิวของผงโลหะที่จำหน่ายในท้องตลาดที่ผลิตโดยวิธีต่าง ๆ	380
ตารางที่ 8.5	ความหนาแน่นปรากฏของผงโลหะต่าง ๆ	382
ตารางที่ 9.1	สารเคมีกัดผิวและชนิดของชิ้นงานที่ใช้	398



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจน	3
รูปที่ 1.2	แผนภาพแสดงลำดับการบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลต่าง ๆ	5
รูปที่ 1.3	แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกของ Na^+ และไอออนลบของ Cl^-	8
รูปที่ 1.4	พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของไฮโดรเจน	10
รูปที่ 1.5	พันธะโลหะของอะตอม	10
รูปที่ 1.6	การกระจายของอิเล็กตรอนในแก๊สเฉื่อย	13
รูปที่ 1.7	พันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของ HF	13
รูปที่ 1.8	สเปซ แลตทิซ และแลตทิซ พารามิเตอร์	15
รูปที่ 1.9	หน่วยเซลล์ 14 ชนิด	16
รูปที่ 1.10	หน่วยเซลล์ของผลึกโลหะ	18
รูปที่ 1.11	หน่วยเซลล์ BCC	19
รูปที่ 1.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซและรัศมีอะตอมของ BCC	20
รูปที่ 1.13	หน่วยเซลล์ FCC	21
รูปที่ 1.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซและรัศมีอะตอมของ FCC	22
รูปที่ 1.15	หน่วยเซลล์แบบ HCP	23
รูปที่ 1.16	ตำแหน่งฟิวด์ของอะตอมในหน่วยเซลล์ BCC	26
รูปที่ 1.17	ทิศทางต่าง ๆ ในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์	27
รูปที่ 1.18	ระนาบในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์	29
รูปที่ 1.19	แกนทั้งสี่ของ HCP	31
รูปที่ 1.20	ดัชนีมิลเลอร์ของ HCP	33
รูปที่ 1.21	ฉัณรูปต่าง ๆ ของเหล็กตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	38
รูปที่ 1.22	หลอดรังสีเอกซ์	41
รูปที่ 1.23	รังสีเอกซ์ของโมลิบดีนัม	42
รูปที่ 1.24	การเลี้ยวเบน	43
รูปที่ 1.25	แนวรังสีสะท้อนสู่ฟิล์มรับภาพ	47
รูปที่ 1.26	เทคนิคผลึกหมุน	47
รูปที่ 1.27	เทคนิคเดอบาย – เซอร์เรอร์	48
รูปที่ 1.28	การจัดวางตัวอย่างและการเลี้ยวเบนจากระนาบผลึกใน X – ray Diffractometer	49

รูปที่ 1.29	กราฟความเข้มของแสงกับมุมแบรกก์	49
รูปที่ 2.1	พลังงานอิสระกับอุณหภูมิของโลหะในสถานะของเหลวและของแข็ง	52
รูปที่ 2.2	กราฟอัตราการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์	53
รูปที่ 2.3	การเกิดผลึกและเกรนของโลหะ	54
รูปที่ 2.4	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของระบบและรัศมีของนิวเคลียสที่เกิดขึ้น	55
รูปที่ 2.5	โครงสร้างเดนไดรท์	56
รูปที่ 2.6	ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างเกรนในแบบหล่อ	58
รูปที่ 2.7	ความไม่สมบูรณ์แบบจุด	60
รูปที่ 2.8	ความไม่สมบูรณ์แบบขอบ	61
รูปที่ 2.9	ความไม่สมบูรณ์โครงผลึก	61
รูปที่ 2.10	โครงสร้างของโลหะเจือ	62
รูปที่ 2.11	กราฟการเย็นตัวของโลหะพลวงบริสุทธิ์	63
รูปที่ 2.12	สารละลายของแข็ง	69
รูปที่ 2.13	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่เกิดขึ้นบนระนาบของอะตอม	71
รูปที่ 2.14	ลักษณะแถบการเคลื่อนของโลหะสังกะสีผลึกเดี่ยว	72
รูปที่ 2.15	เปรียบเทียบการเคลื่อนของอะตอมกับการเคลื่อนที่ของตัวหนอน	73
รูปที่ 2.16	ระนาบการบิดและทิศทางการบิดในผลึก FCC	75
รูปที่ 2.17	ภาพวาดแสดงกลไกการบิดในผลึก FCC	76
รูปที่ 2.18	โลหะสังกะสีที่ปรากฏแถบการบิด	77
รูปที่ 2.19	ผลของการขึ้นรูปเย็นต่อความเค้นแรงดึงและความเค้นจุดครากของทองแดง	80
รูปที่ 3.1	เส้นตัดผ่านวัฏภาค (tie line) ที่ระดับอุณหภูมิ T	86
รูปที่ 3.2	ระยะ mn และ no	87
รูปที่ 3.3	กราฟการเย็นตัวของโลหะเจือสัดส่วนเจือต่าง ๆ กัน เมื่อนำมาเรียงบนกราฟเดียวกัน	88
รูปที่ 3.4	แผนภาพวัฏภาคของโลหะเจือแบบที่ 1	89
รูปที่ 3.5	การเย็นตัวอย่างช้า ๆ ของโลหะเจือ 70A – 30B และโครงสร้างจุลภาคที่จุดต่าง ๆ	91

รูปที่ 3.6	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือที่สารละลายของแข็งเกิดจากการเย็นตัวอย่างช้า ๆ (100X)	92
รูปที่ 3.7	กลไกการแพร่ของอะตอม	92
รูปที่ 3.8	แผนภาพของการเย็นตัวที่ไม่สมดุลและเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแกน	94
รูปที่ 3.9	แผนภาพรูปร่างอื่นของแผนภาพสมดุลแบบที่ 1	97
รูปที่ 3.10	การสร้างแผนภาพสมดุลแบบที่ 2	98
รูปที่ 3.11	แผนภาพวิวัฒนาการแบบยูเทกติก	99
รูปที่ 3.12	แผนภาพวิวัฒนาการแบบยูเทกติกและรายละเอียดในบริเวณ สัดส่วนเจือต่าง ๆ	100
รูปที่ 3.13	โครงสร้างจุลภาคของผสมยูเทกติก	101
รูปที่ 3.14	โครงสร้างจุลภาคขณะเย็นตัวช้า ๆ ของโลหะเจือไฮโปยูเทกติก 80A – 20B	102
รูปที่ 3.15	ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัดส่วนเจือและโครงสร้างที่เกิดใน ระบบยูเทกติก	104
รูปที่ 3.16	แผนภาพวิวัฒนาการชนิดละลายได้เป็นบางส่วนในสถานะของแข็ง	105
รูปที่ 3.17	แผนภาพวิวัฒนาการแบบที่ 3 แสดงรายละเอียดการเย็นตัวที่ สัดส่วนเจือต่าง ๆ	106
รูปที่ 3.18	กราฟการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือ 95A – 5B	107
รูปที่ 3.19	กราฟการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือ 3	109
รูปที่ 3.20	กราฟการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือ 4	110
รูปที่ 3.21	แผนภาพสมดุลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือตะกั่ว – พลวง	111
รูปที่ 3.22	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือ 4 (85A – 15B)	113
รูปที่ 3.23	อิทธิพลของอุณหภูมิการป้อนต่อความแข็งแรงของเหล็กกล้า	114
รูปที่ 3.24	ขั้นการตกผลึก	115
รูปที่ 3.25	อิทธิพลของระยะเวลาการป้อนแข็งต่อสมบัติเชิงกลของโลหะเจือ	116
รูปที่ 3.26	สัดส่วนเจือและจุดหลอมเหลวของสารบริสุทธิ์ A, B และ สารประกอบ $A_m B_n$	118
รูปที่ 3.27	แผนภาพที่มีวิวัฒนาการมีอันตรายเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ	119

รูปที่ 3.28	แผนภาพที่มีวัฏภาคมัธยันตร์แบบ Congruent – melting จากปฏิกิริยาเพอริเทคติก	120
รูปที่ 3.29	แผนภาพที่มีวัฏภาคมัธยันตร์แบบ Incongruent – melting จากปฏิกิริยาเพอริเทคติก	121
รูปที่ 3.30	แสดงการแพร่ของอะตอมในปฏิกิริยาเพอริเทคติก	122
รูปที่ 3.31	การเย็นตัวอย่างช้า ๆ ของโลหะเจือ 90A – 10B	123
รูปที่ 3.32	การเย็นตัวอย่างช้า ๆ ของโลหะเจือ 65A – 35B	124
รูปที่ 3.33	โครงสร้างจุลภาคของ 40%Pt – 60%Ag	125
รูปที่ 3.34	แผนภาพสมดุลของโลหะสองชนิดที่ละลายได้เป็นบางส่วนในสถานะของเหลว	126
รูปที่ 3.35	แผนภาพวัฏภาคของโลหะเจือทองแดง – ตะกั่ว	129
รูปที่ 3.36	แผนภาพวัฏภาคของโลหะชนิดที่ไม่ละลายกันทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง	130
รูปที่ 3.37	แผนภาพวัฏภาคโลหะเจืออะลูมิเนียม – ตะกั่ว	130
รูปที่ 3.38	แผนภาพสมดุลแบบที่ 1 ซึ่งปรากฏการเปลี่ยนแปลงอัญรูปด้วย	131
รูปที่ 3.39	แผนภาพสมดุลโลหะเจือเหล็ก – นิกเกิล	132
รูปที่ 3.40	แผนภาพสมดุลโลหะเจือทอง – ทองแดง	133
รูปที่ 3.41	แผนภาพสมดุลโลหะเจือทองแดง – แพลเลเดียม	134
รูปที่ 3.42	แผนภาพวัฏภาคที่มีปฏิกิริยายูเทคตอยด์	135
รูปที่ 3.43	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือไฮโปยูเทคตอยด์	137
รูปที่ 3.44	แผนภาพวัฏภาคแสดงการเกิดวัฏภาคมัธยันตร์โดยปฏิกิริยาเพอริเทคตอยด์	138
รูปที่ 3.45	การเกิดสารละลายของแข็งแกมมาที่ปลายแผนภาพโดยปฏิกิริยาเพอริเทคตอยด์	138
รูปที่ 3.46	แผนภาพสมดุลของเงิน – อะลูมิเนียม	139
รูปที่ 3.47	แผนภาพสมดุลของระบบโลหะเจือโคบอลต์ – ทังสเตน	141
รูปที่ 4.1	กราฟการเย็นตัวของเหล็กบริสุทธิ์	148
รูปที่ 4.2	สแลกในเหล็กอ่อน	150
รูปที่ 4.3	แผนภาพการเย็นตัวอย่างสมดุลของเหล็ก – เหล็กคาร์ไบด์	153

รูปที่ 4.4	บริเวณเดลตา (ส่วนบนสุดของแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์)	154
รูปที่ 4.5	บริเวณต่าง ๆ ของแผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์	155
รูปที่ 4.6	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กแต่ละชนิด	158
รูปที่ 4.7	ขนาดของช่องว่างในโครงผลึก	159
รูปที่ 4.8	การเปลี่ยนโครงสร้างในช่วงการเย็นตัวของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.2%	160
รูปที่ 4.9	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มี %C ต่าง ๆ กัน เมื่อทิ้งให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ	162
รูปที่ 4.10	การเปลี่ยนโครงสร้างในช่วงการเย็นตัวของเหล็กกล้าเจือคาร์บอน 1%	163
รูปที่ 4.11	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเย็นตัวอย่างช้า ๆ	165
รูปที่ 4.12	บริเวณไฮโปยูเทคตอยด์ของเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลอง	167
รูปที่ 5.1	ผลการเพิ่มความแข็งแรงของธาตุต่าง ๆ ที่ละลายในเหล็กแอลฟา	180
รูปที่ 5.2	อิทธิพลของธาตุที่เจือต่ออุณหภูมิยูเทคตอยด์ และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ยูเทคตอยด์	182
รูปที่ 5.3	อิทธิพลของโครเมียมที่ลดการอ่อนตัวหลังการอบคืนตัวเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง	183
รูปที่ 5.4	แผนภาพของเหล็กกล้าเจือโครเมียม 12 เปอร์เซ็นต์	189
รูปที่ 5.5	แผนภาพของเหล็กกล้าเจือโครเมียม 18 เปอร์เซ็นต์	190
รูปที่ 5.6	แผนภาพของเหล็กกล้าเจือโครเมียม 18 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 8 เปอร์เซ็นต์	191
รูปที่ 5.7	แผนภาพพหุภาคเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์	197
รูปที่ 5.8	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีขาว (250X)	198
รูปที่ 5.9	แผนภาพสมดุลกึ่งเสถียรของเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์ ที่วางซ้อนทับ แผนภาพสมดุลที่เสถียรของเหล็ก - แกรไฟต์ (เส้นประ)	200
รูปที่ 5.10	เหล็กหล่ออบเหนียวที่มีแกรไฟต์ก่อนกลบขนาดไม่สม่ำเสมอ	201
รูปที่ 5.11	การเปลี่ยนของโครงสร้างจุลภาคในระหว่างรอบการอบเหนียว	202
รูปที่ 5.12	เหล็กอบเหนียวเพียร์ลิติก (500X)	203
รูปที่ 5.13	ลักษณะโครงสร้าง Bull's - eye	203
รูปที่ 5.14	เหล็กอบเหนียวเพียร์ลิติกอบคืนตัวที่มีเพียร์ลิต์เม็ดกลม (500X)	204
รูปที่ 5.15	ลักษณะแผ่นแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทา (100X)	206


รูปที่ 5.16	แผ่นแกรไฟต์ในสามมิติ	206
รูปที่ 5.17	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา (100X)	207
รูปที่ 5.18	ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนและซิลิคอนต่อโครงสร้างของเหล็กหล่อ	208
รูปที่ 5.19	บริเวณสเตยโคไตน์ในเหล็กหล่อสีเทา	210
รูปที่ 5.20	ผลของความเค้นที่ลดลงภายหลังการอบคลายความเค้น	211
รูปที่ 5.21	ลักษณะแผ่นแกรไฟต์ขนาดต่าง ๆ ตาม ASTM และ AFS	214
รูปที่ 5.22	ลักษณะแผ่นแกรไฟต์แบบต่าง ๆ	216
รูปที่ 5.23	โครงสร้างเหล็กหล่อเย็นจากผิวภายนอกสู่ภายใน	219
รูปที่ 5.24	เหล็กหล่อโนดูลาร์	221
รูปที่ 5.25	เหล็กโนดูลาร์เฟอริติก	221
รูปที่ 5.26	เหล็กหล่อโนดูลาร์เพียริลิติก	222
รูปที่ 5.27	เหล็กหล่อเจ็อนิกเกิดต่ำ	225
รูปที่ 5.28	เหล็กหล่อเจ็อ 3.95%Ni และ 1.5%Cr	226
รูปที่ 5.29	เหล็กหล่อสีเทาเจ็อ 21.06%Ni 2.20%Cr และ 0.06%Mg	226
รูปที่ 6.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์	233
รูปที่ 6.2	สัดส่วนโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏในเหล็กกล้าอบอ่อน	234
รูปที่ 6.3	ช่วงอุณหภูมิการอบชุบความร้อนเหล็กกล้าคาร์บอน	234
รูปที่ 6.4	ภาพวาดแสดงโครงสร้างเพียริไลต์จากการอบอ่อนและจากการอบปกติ	238
รูปที่ 6.5	ปริมาณของมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิที่ลดลง	240
รูปที่ 6.6	อิทธิพลของคาร์บอนต่อช่วงอุณหภูมิมาร์เทนไซต์	241
รูปที่ 6.7	อิทธิพลของคาร์บอนต่อความแข็งของออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์	242
รูปที่ 6.8	กราฟการเย็นตัวของเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกขนาดเล็กที่ถูกชุบในน้ำอุ่น	244
รูปที่ 6.9	กราฟการเย็นตัวของแท่งเหล็กกล้าไร้สนิม ในสารตัวกลางต่าง ๆ	246
รูปที่ 6.10	ขนาดตัวอย่างและอุปกรณ์สำหรับวัดความสามารถในการชุบแข็งแบบ Jominy	252
รูปที่ 6.11	กราฟระหว่างค่าความแข็งกับระยะทางที่วัดจากปลายชุบขึ้นไป	253
รูปที่ 6.12	กราฟความแข็งจากการชุบปลายเดี่ยวของเหล็กกล้าเจ็อ 3 ชนิด	254

รูปที่ 6.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความแข็งแกร่งภายหลังการอบคืนตัว 1 ชั่วโมง	257
รูปที่ 6.14	ผลของเวลาที่มีต่อความแข็งของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ที่อบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างกัน	260
รูปที่ 6.15	ค่าความแข็งแกร่งทนแรงกระแทกของเหล็กเหมือนกัน 3 ชิ้นที่ผ่านกรรมวิธีความร้อนต่างกัน	261
รูปที่ 6.16	ขึ้นตัวอย่างทดสอบ	263
รูปที่ 6.17	ผังวิธิตดลองกับขึ้นทดสอบและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้น	263
รูปที่ 6.18	การเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์ไปเป็นเพิร์ไลต์ที่อุณหภูมิ 1300°F	264
รูปที่ 6.19	แผนภาพ TTT	265
รูปที่ 6.20	แผนภาพ I – T ของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์	266
รูปที่ 6.21	แผนภาพ I – T ของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์	267
รูปที่ 6.22	กราฟการเย็นตัววางทับบนแผนภาพ I – T ของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์	268
รูปที่ 6.23	แผนภาพ C – T ของเหล็กกล้ายูเทคตอยด์ที่ปรับมาจากแผนภาพ I – T	271
รูปที่ 6.24	บริเวณผิวแข็งทั้งหมดของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.20 เปอร์เซ็นต์ หลังการเติมคาร์บอนที่ผิว	273
รูปที่ 6.25	ปริมาณคาร์บอนตามความลึกของชั้นผิวในเหล็กกล้าที่มีชั้นผิวแข็ง 0.080 นิ้ว	274
รูปที่ 6.26	ความลึกของชั้นไนไตรด์กับเวลาในการสร้างผิวแข็ง ที่อุณหภูมิ 975°F	280
รูปที่ 6.27	หัวข้อแปลวไฟความร้อนชนิดหัวเดียว	282
รูปที่ 6.28	ลักษณะขดลวดปฐมภูมิที่ใช้งานทั่ว ๆ ไปและลักษณะแนวความร้อน	286
รูปที่ 7.1	แผนภาพวัฏภาคบางส่วนของทองแดง – สังกะสี	292
รูปที่ 7.2	โครงสร้างสองวัฏภาค ($\alpha + \beta'$) ของโลหะ Muntz	295
รูปที่ 7.3	แผนภาพวัฏภาคบางส่วนของระบบโลหะเจือทองแดง – ดีบุก	297
รูปที่ 7.4	โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อฟอสฟอรัสที่มีดีบุก 10 เปอร์เซ็นต์	298
รูปที่ 7.5	แผนภาพวัฏภาคบางส่วนของระบบโลหะเจือทองแดง – ซิลิคอน	299
รูปที่ 7.6	แผนภาพวัฏภาคบางส่วนของระบบโลหะเจือทองแดง – อะลูมิเนียม	300
รูปที่ 7.7	โครงสร้างจุลภาคของบรอนซ์อะลูมิเนียม	301
รูปที่ 7.8	แผนภาพวัฏภาคบางส่วนของระบบโลหะเจือทองแดง – เบริลเลียม	302

รูปที่ 7.9	แผนภาพสมดุลโลหะเจืออะลูมิเนียม - ทองแดง	308
รูปที่ 7.10	แผนภาพสมดุลระบบโลหะเจืออะลูมิเนียม - แมงกานีส	310
รูปที่ 7.11	แผนภาพสมดุลระบบโลหะเจืออะลูมิเนียม - ซิลิคอน	311
รูปที่ 7.12	แผนภาพระบบโลหะเจืออะลูมิเนียม - แมกนีเซียม	312
รูปที่ 7.13	แผนภาพสมดุลระบบ Al - Mg ₂ Si	313
รูปที่ 7.14	แผนภาพสมดุลระบบโลหะเจืออะลูมิเนียม - สังกะสี	314
รูปที่ 7.15	โครงสร้างของโลหะเจือกลุ่ม 7075 - O ที่ผ่านการอบอ่อน	315
รูปที่ 7.16	แผนภาพสมดุลระบบโลหะเจืออะลูมิเนียม - แมกนีเซียม	319
รูปที่ 7.17	แผนภาพวัฏภาคระบบโลหะเจือ निकิล - เหล็ก	329
รูปที่ 7.18	อิทธิพลของนิกเกิลต่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของเหล็กอินวาร	330
รูปที่ 7.19	สมบัติความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นมาจากการละลายของไนโตรเจนในไทเทเนียม	335
รูปที่ 7.20	แผนภาพวัฏภาคระบบโลหะเจือไทเทเนียม - อะลูมิเนียม	336
รูปที่ 7.21	แผนภาพวัฏภาคระบบโลหะเจือไทเทเนียม - วาเนเดียม	337
รูปที่ 7.22	แผนภาพวัฏภาคระบบโลหะเจือไทเทเนียม - แมงกานีส	337
รูปที่ 7.23	โครงสร้างจุลภาคบีตาทั้งหมดในโลหะเจือ Ti - 3Al - 13V - 11Cr	339
รูปที่ 7.24	แผนภาพวัฏภาคอะลูมิเนียม - สังกะสี	341
รูปที่ 7.25	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเจือ AG40A (Zamak - 3)	342
รูปที่ 7.26	แผนภาพระบบโลหะเงินเจือทองแดง	344
รูปที่ 8.1	การเกิดโลหะไอออนที่แอโนดและไฮโดรเจนที่แคโทดในโลหะขึ้นเดียวกัน	355
รูปที่ 8.2	การเกิดโพลาไรเซชันที่แคโทด โดยฟิล์มของไฮโดรเจน	355
รูปที่ 8.3	การเกิด เฟอร์ริสไฮดรอกไซด์ ในสนิมของเหล็ก	356
รูปที่ 8.4	ลักษณะการกัดกร่อนบนหมุดย้ำเหล็กกล้าที่ยึดแผ่นทองแดง	361
รูปที่ 8.5	ลักษณะการกัดกร่อนรุนแรงบริเวณขอบใบพัดทองเหลืองที่หมุนด้วยความเร็วสูงในน้ำทะเล	362
รูปที่ 8.6	ลักษณะเป็นรูที่เกิดจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้มข้นไม่เท่ากัน	363
รูปที่ 8.7	การกัดกร่อนแบบร่องที่เกิดจากฟองของเหลวขุ่นผิวโลหะ	364

รูปที่ 8.8	การกัดกร่อนแบบมุมอับ	365
รูปที่ 8.9	การกัดกร่อนแบบลึกหรือจากการสั่นบนเพลลาของเฟือง	366
รูปที่ 8.10	รอยแตกจากการกัดกร่อนแรงเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก 304	366
รูปที่ 8.11	การกัดกร่อนแบบชะละลายของสังกะสีในทองเหลือง	368
รูปที่ 8.12	การกัดกร่อนแบบเซลล์กัลวานิก	369
รูปที่ 8.13	การออกแบบการต่อโลหะ	371
รูปที่ 8.14	มุมอับที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนและการใช้การเชื่อมแทน	373
รูปที่ 8.15	กระบวนการผลิตชิ้นงานโลหะผง	377
รูปที่ 8.16	รูปทรงของผงโลหะจากการผลิตวิธีต่าง ๆ	378
รูปที่ 8.17	อนุภาคผงโลหะขนาดเล็กเข้าแทรกพอดี	381
รูปที่ 8.18	แนวกันของอนุภาคผงโลหะ	381
รูปที่ 8.19	อิทธิพลของรูปทรงอนุภาคผงโลหะต่อความหนาแน่นปรากฏ	383
รูปที่ 8.20	แม่แบบอัดชนิดใช้ก้านอัด	384
รูปที่ 8.21	การอัดด้วยแรงดันเท่ากันทุกทิศทาง	385
รูปที่ 8.22	วิธีการอัดรีดแห้งโลหะจากผงโลหะ	385
รูปที่ 8.23	ตัวอย่างชิ้นงานที่ผลิตจากโลหะผง	389
รูปที่ 9.1	การยึดชิ้นงาน	395
รูปที่ 9.2	ภาพวาดจากกล้องจุลทรรศน์แสดงถึงผลจากการกัดผิว	397
รูปที่ 9.3	ระบบการให้แสงของกล้องจุลทรรศน์แบบเลนส์	400
รูปที่ 9.4	กล้องจุลทรรศน์แบบเลนส์	401
รูปที่ 9.5	กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนผ่าน	402
รูปที่ 9.6	เปรียบเทียบทางเดินอิเล็กตรอนและแสงในกล้อง TEM และกล้องจุลทรรศน์แบบเลนส์	403
รูปที่ 9.7	โครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมแนวเส้นที่มีผิดปกติ	404
รูปที่ 9.8	รูปถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	404
รูปที่ 9.9	รอยแตกระหว่างเกรนที่เกิดรอบ ๆ รอยเชื่อมของ ทอสเตนเลส 304	406
รูปที่ 9.10	องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบรังสีเอกซ์	407

รูปที่ 9.11	ภาพโครงสร้างภายในและสเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ในชั้นทดสอบ	408
รูปที่ 9.12	การตรวจสอบชิ้นงานด้วยภาพถ่ายรังสี	411
รูปที่ 9.13	การส่งคลื่นของคลื่นผ่านตลอด	413
รูปที่ 9.14	สัญญาณที่ปรากฏบนออสซิลโลสโคป	413
รูปที่ 9.15	การส่งและรับคลื่นสะท้อนด้วยทรานสดิวเซอร์ตัวเดียว	414
รูปที่ 9.16	วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ	417
รูปที่ 9.17	การตรวจสอบโดยใช้สารแทรกซึม	419
รูปที่ 9.18	การเกิดกระแสไหลวน	420
รูปที่ 9.19	เครื่องมือตรวจสอบกระแสไหลวน	421





ดวงฤดี สุภติมัสโร

โลณะวิทยาพิสิคส์ / ดวงฤดี สุภติมัสโร

1. โลณะวิทยาพิสิคส์. 2. พิสิคส์.

669.9

ISBN 978-974-03-2658-8

สปจ. 1445



สรรคณค้ำวชิการ สู้ชคค
www.ChulaPress.com
Knowledge to All

เลขหมู่ 669.9
๑ 14
2553
เลขทะเบียน 17441
วันที่ 31 ส.ค. 2553
105444

ลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 1,000 เล่ม พ.ศ. 2553

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้นต้องได้รับ
อนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้จัดจำหน่าย ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

สาขา ศาลาพระเกี้ยว โทร. 0-2218-7000-3 โทรสาร 0-2255-4441

สยามสแควร์ โทร. 0-2218-9881 โทรสาร 0-2254-9495

ม.นเรศวร จ.พิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-4 โทรสาร 0-5526-0165

ม.เทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา โทร. 0-4421-6131-4 โทรสาร 0-4421-6135

ม.บูรพา จ.ชลบุรี โทร. 0-3839-4855-9 โทรสาร 0-3839-3239

โรงเรียนนายร้อย จปร. จ.นครนายก โทร. 0-3739-3023 โทรสาร 0-3739-3023

จัตุรัสจามจุรี (CHAMCHURI SQUARE) ชั้น 4 โทร. 0-2160-5300-1 โทรสาร 0-2160-5304

CALL CENTER โทร. 0-2255-4433 <http://www.chulabook.com>

เครือข่าย

ศูนย์หนังสือ ม.วลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช โทร. 0-7567-3648-51 โทรสาร 0-7567-3648

ศูนย์หนังสือ ม.แม่ฟ้าหลวง จ.เชียงราย โทร. 0-5391-7020-4 โทรสาร 0-5391-7025

ศูนย์หนังสือ ม.ราชภัฏเชียงราย จ.เชียงราย โทร. 0-5377-6000

ร้านหนังสือบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) งามคำแหง 43/1 โทร. 0-2538-2573

โทรสาร 0-2539-7091

ร้านค้า, หนังสือเข้าชั้นเรียน ติดต่อแผนกขายส่ง สยามสแควร์ ชั้น 14 โทร. 0-2218-9889-90

โทรสาร 0-2254-9495

กองบรรณาธิการ : ทิพวรรณ โหละสุด

พิสูจน์อักษร : ร.รัชนีวรรณ

ออกแบบปกและรูปเล่ม : ชวินทร์ นามมุงคุณ โทร. 0-2945-1317, 08-6800-9455

พิมพ์ที่ : บริษัท ส.เอเชียเพรส (1989) จำกัด โทร. 0-2732-3101 โทรสาร 0-2375-1654

สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

BSTI DEPT. OF SCIENCE SERVICE
สำนักหอสมุดฯ มหาวิทยาลัยสุรนารี



1110012026