

ผลของการอบด้วยความร้อนต่อการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ
ในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%



นางสาวสวรินทร์ รัตนมหาสกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2546

ISBN : 974-17-4900-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON SECONDARY CARBIDE PRECIPITATION

IN Fe-30.8Ni-26.6Cr ALLOY



Miss. Savarin Ratanamahasukul

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2003

ISBN : 974-17-4900-7


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการอบด้วยความร้อนต่อการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิใน
โลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

โดย นางสาวสวรินทร์ รัตนมหาสกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ปัญญวัชร วังยาว


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. ปัญญวัชร วังยาว)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสาร์ตนพร)

สวรินทร์ รัตนมหาสกุล : ผลของการอบด้วยความร้อนต่อการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ
ในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% (EFFECT OF HEAT TREATMENT ON
SECONDARY CARBIDE PRECIPITATION IN Fe-30.8Ni-26.6Cr ALLOY.) อ. ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ปัญญวัชร วังยาว, 121 หน้า,
ISBN 974-17-4900-7

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลของการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °ซ ต่อ
การตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% และ โครเมียม 26.6% โครงสร้าง
จุลภาคของชิ้นงานในสภาพที่ได้รับ (as-received state) ประกอบด้วยโครงสร้างตาข่าย (network) ของ
คาร์ไบด์ปฐมภูมิสองชนิด คือ โครเมียมคาร์ไบด์ และไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์บนโครงสร้างพื้นฐาน
ออสเทนไนท์ ภายหลังอบด้วยความร้อนพบว่า คาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนบนโครงสร้างพื้นบริเวณที่ใกล้
กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิก่อนแล้วกระจายเข้าสู่ใจกลางของเดนไดรท์ คาร์ไบด์ทุติยภูมิรูปเข็ม (needlelike) และ
แบบแผ่นฟิล์ม เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของ
คาร์ไบด์ทุติยภูมิด้วยเทคนิค EDS พบว่ามีส่วนผสมคล้ายคาร์ไบด์ปฐมภูมิ อนุภาคคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่
ละเอียดส่งผลให้ความเค้นดึงสูงสุด และ ความเค้นคราก (0.2% proof stress) สูงขึ้น ส่วนค่าความแข็ง
สูงขึ้นเล็กน้อย

จากแผนภูมิการตกตะกอนที่อุณหภูมิคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา พบว่าการตกตะกอนเกิดช้า
ที่สุดที่อุณหภูมิ 800 °ซ และเกิดเร็วที่สุดที่อุณหภูมิ 1000 °ซ ซึ่งให้ปริมาณคาร์ไบด์ทุติยภูมิสูงสุดประมาณ
0.7% (โดยน้ำหนัก) ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการ
Johnson-Melt และ Avrami พบว่าปฏิกิริยาเกิดเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกการโตของตะกอนถูกควบคุม
โดยการแพร่ในเนื้อ (volume diffusion) มีค่าพลังงานกระตุ้น 213.4 กิโลจูลต่อกรัมโมล ขั้นตอนสองการโต
ของตะกอนถูกควบคุมด้วยการแพร่ที่ขอบเกรน (grain boundary diffusion controlled) มีค่าพลังงาน
กระตุ้น 51.7 กิโลจูลต่อกรัมโมล ผลการทดลองสามารถสร้างแผนภูมิการตกตะกอนที่อุณหภูมิคงที่ (TTP)
เพื่อใช้สำหรับการอบด้วยความร้อนและการเชื่อมโลหะผสมเกรดนี้ต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต...สวรินทร์ รัตนมหาสกุล.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...Prof. Asst. Dr. Korbun Luatokha.....
ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470590921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD : Fe-Cr-Ni ALLOY / SECONDARY CARBIDE / PRECIPITATION / MECHANICAL PROPERTIES / KINETIC MODEL / TTP – DIAGRAM

SAVARIN RATANAMAHASAKUL: EFFECT OF HEAT TREATMENT ON SECONDARY CARBIDE PRECIPITATION IN Fe-30.8Ni-26.6Cr ALLOY. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, DR.ING. THESIS CO-ADVISOR : PANYAWAT WANGYAO (Ph.D.), 121pp. ISBN 974-17-4900-7

This work studied the effect of aging at 800, 900, 1000 and 1100 °C on the secondary carbide precipitation in Fe-30.8Ni-26.6Cr alloy. The original microstructures from the as-received state consist of two types of primary carbide network; chromium carbide and niobium/titanium carbide networks on the austenite. After aging, the secondary carbide precipitated firstly near the primary carbide and then in the dendrite core. When aging time and temperatures increased, the amounts of needlelike and film secondary carbides increased. From EDS analysis, the composition of secondary carbide was nearly the same as primary carbide.

From the Time-Temperature-Precipitation (TTP) diagram, it showed that the slowest precipitation rate was at 800 °C and the fastest precipitation rate was at 1000 °C. The maximum amount of secondary carbide was 0.7vol%. The kinetic study after Johnson-Mehl/Avrami equation showed that the secondary carbide precipitated by the two-step reaction. The first step was volume diffusion controlled growth with the activation energy of 213.2 kJ/mole. And the secondary step was grain boundary diffusion controlled growth with the activation energy of 51.7 kJ/mole. The TTP diagram was established for the aging application and welding of this alloy.

Department...Metallurgical Engineering... Student 'signature.....*S. Ratanamahaskul*.....
 Field of study...Metallurgical Engineering... Advisor 's signature.....*Gobboon Lothongkum*.....
 Academic year...2003.....Coadvisor 's signature.....*Panyawat Wangyao*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร. ปัญญวัชร วังยาว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاعر จารุพิสิฐธร และ อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ขอขอบคุณบริษัท National Petrochemical Public Company Limited ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงานสำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณนายวิรัช พ่วงชิงงาม ที่ช่วยตัดเตรียมชิ้นงาน ขอขอบคุณนางสาวกนกวรรณ เทียมทินกฤติ และ นางสาวฉวีวรรณ พุณธนาวิวัฒน์กุล ที่ช่วยถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาด และวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS ขอขอบคุณนายรัฐพล รัตนมาลี ที่ช่วยทดสอบแรงดึง ขอขอบคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และเนื่องจากทุนการวิจัยได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่กราบขอพระคุณบิดา-มารดา น้องสาว และเพื่อนๆ ซึ่งให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	3
2.1 โลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม.....	3
2.2 ลักษณะโครงสร้างทางโลหวิทยา (Metallurgical Structure).....	8
2.3 คุณสมบัติทางกล.....	9
2.3.1 คุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง.....	9
2.3.2 คุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิสูง (Elevated – Temperature Tensile Properties).....	9
2.3.3 คุณสมบัติการคืบและความเค้นแตกหัก (stress Rupture).....	10
2.3.4 ความล้าเนื่องจากความร้อน (Thermal fatigue).....	10
2.3.5 ความเสียหายเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวเนื่องจากความร้อน.....	13
2.4 การใช้งานโลหะผสมหล่อทนความร้อนเหล็ก นิกเกิล โครเมียม.....	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 อุปกรณ์ในการให้ความร้อน.....	30
3.2 เครื่องมือเตรียมผิวชิ้นงาน.....	30
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	30
3.4 วัสดุคืบ.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 สารเคมี.....	31
3.6 ขั้นตอนการทดลอง.....	31
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	32
4.1 คุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ.....	32
4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี.....	32
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	32
4.1.3 ความแข็ง.....	35
4.1.4 คุณสมบัติแรงดึง.....	35
4.2 ผลของการอบด้วยความร้อน.....	36
4.2.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่ อุณหภูมิ 800°, 900°, 1000° และ 1100 °ซ ที่เวลา 1, 3, 10 และ 24 ชม.....	36
4.2.2 ความแข็งของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800°, 900°, 1000° และ 1100 °ซ ที่เวลา 1, 3, 10 และ 24 ชม.	45
4.2.3 ความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800°, 900°, 1000° และ 1100 °ซ ที่เวลา 1, 3, 10 และ 24 ชม.....	47
4.3 แผนภูมิ TTP และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการตกตะกอน คาร์ไบด์ทุติยภูมิ.....	51
4.3.1 แผนภูมิ TTP.....	51
4.3.2 จลนพลศาสตร์ของการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami.....	51
5. สรุปผลการทดลอง.....	58
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม ที่ทำการศึกษา (ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission Spectroscopy).....	3
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมหล่อทนความร้อนเกรดตามมาตรฐาน ACI (Alloy Casting Institute).....	7
ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมหล่อทนความร้อนเกรดที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ACI (Alloy Casting Institute).....	7
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมหล่อทนความร้อนเกรด ตามมาตรฐาน ACI.....	11
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมหล่อทนความร้อนเกรดไม่เป็นไปตาม มาตรฐาน ACI	11
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติการคืบของโลหะผสมหล่อทนความร้อนเกรดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน มาตรฐาน ACI.....	13
ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสม HP-Nb และ HP-NbTi.....	16
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิด้วย เทคนิค EDS ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ.....	35
ตารางที่ 4.2 ความแข็งของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ.....	35
ตารางที่ 4.3 ความแข็งแรงดึงของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ.....	36
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิ, คาร์ไบด์รูปเข็ม ของชิ้นตัวอย่างหลังการอบที่ 1000 °C 24 ชม.....	44
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS บริเวณ คาร์ไบด์ปฐมภูมิของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C 24 ชม.	45
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งจุลภาค (HV25g) บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิ.....	46
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งจุลภาค (HV25g) บริเวณโครงสร้างพื้น.....	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปร n (growth exponent), ค่าพลังงานกระตุ้น (Q), ค่าคงที่สมการอาร์เรเนียส (k_0) ของการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิโลหะผสมเหล็ก
 นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ.....56

ตารางที่ 4.9 ความหมายของค่า n ตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami.....56



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 (ก)-(ข) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8%โครเมียม 26.6%ในสภาพที่ ได้รับ.....	4
รูปที่ 2.2 (ก)-(ข) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8%โครเมียม 26.6%ภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 1100 °ซ 1 ชม.....	5
รูปที่ 2.3 (ก)-(ค) (ก) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหล่อทนความร้อน เกรด HT-44 ในสภาพ หล่อ (ข) ภายหลังการทดสอบการคืบที่ 760 °ซ 1005 ชม. และ 41 MPa (ค) ภายหลังการทดสอบการคืบที่ 870 °ซ 1001 ชม.....	6
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเค้นดึง และความเหนียวของ โลหะผสมหล่อทนความร้อนเกรด HP.....	9
รูปที่ 2.5 อัตราการคืบของโลหะผสมหล่อทนความร้อนเกรดมาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.6 คุณสมบัติความเค้นแตกหัก (stress-rupture) ของโลหะผสมหล่อทนความร้อน (a) ความเค้นแตกหักที่ 10,000 ชม. (b) ความเค้นแตกหักที่ 100,000 ชม.....	12
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติแรงดึงกับอุณหภูมิของโลหะผสม HP-50WZ	14
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบต่ำสุด, ความเค้น และอุณหภูมิของโลหะผสม HP-50WZ	15
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา, ความเค้นแตกหัก และ อุณหภูมิของโลหะผสม HP-50WZ	15
รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างในสภาพหล่อ (a) HP-Nb (b) HP-Nb.....	17
รูปที่ 2.11 ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างในสภาพหล่อ (a) HP-Nb (b) HP-NbTi.....	18
รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังการบ่ม (a)HP-Nb (b)HP-NbTi.....	18
รูปที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดสองกวาดของ HP -Nb และ HP -NbTi ในสภาพหล่อ (a) HP -Nb โดยเทคนิคอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (b) HP -Nb โดยเทคนิคอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (c) HP-NbTi โดยเทคนิคอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (d) HP -NbTi โดยเทคนิคอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ.....	19

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของ HP-Nb และ HP -NbTi ภายหลังจากการบ่ม

(a) HP -Nb โดยเทคนิคอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

(b) HP -Nb โดยเทคนิคอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ

(c) HP -NbTi โดยเทคนิคอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

(d) HP -NbTi โดยเทคนิคอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ.....20

รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาค bright field จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านของ HP-NbTi ภายหลังจากการบ่มโครงสร้างประกอบด้วยโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิ (P-Cr), ทุติยภูมิ (S-Cr) และ G-phase (G)..... 21

รูปที่ 2.16 ภาพขยายบริเวณ G-phase ในรูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยไทเทเนียมคาร์ไบด์ตกตะกอนบน G-phase22

รูปที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาค bright field จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านของ HP-NbTi ภายหลังจากการบ่ม แสดงทิศทางการตกตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ทุติยภูมิตั้งบนโครงสร้างพื้น $[110_{\text{carbide}}]//[110_{\gamma}]$22

รูปที่ 2.18 สเปกตร้าของ EDS, ภาพ selected area diffraction และค่าคงที่ผลึกของ G-phase.....23

รูปที่ 2.19 สเปกตร้าของ EDS, ภาพ selected area diffraction และค่าคงที่ผลึกของไนโอเบียมคาร์ไบด์.....23

รูปที่ 2.20 สเปกตร้าของ EDS, ภาพ selected area diffraction และค่าคงที่ผลึกของไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์24

รูปที่ 2.21 สเปกตร้าของ EDS, ภาพ selected area diffraction และค่าคงที่ผลึกของไทเทเนียมคาร์ไบด์.....24

รูปที่ 2.22 สเปกตร้าของ EDS, ภาพ selected area diffraction และค่าคงที่ผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์.....25

รูปที่ 2.23 สเปกตร้าของ EDS, ภาพ selected area diffraction และค่าคงที่ผลึกของโครงสร้างพื้น.....25

รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุผสมนิกเกิล โครเมียม และเหล็กบริเวณโครงสร้างพื้นของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการบ่มที่อุณหภูมิ 750 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....28

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.25 ความแข็ง (HV200g) ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการบ่มที่อุณหภูมิ 750 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....	28
รูปที่ 2.26 สเปกตร้า EDS ของไนโอเบียมคาร์ไบด์ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการบ่มที่ อุณหภูมิ 750 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.27 สเปกตร้า EDS ของไนโอเบียมคาร์ไบด์ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการบ่มที่ อุณหภูมิ 750 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....	29
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับ ประกอบด้วยโครงสร้างตาข่ายของคาร์ไบด์ปฐมภูมิ.....	33
รูปที่ 4.2 ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่าง ในสภาพที่ได้รับ.....	33
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง ในสภาพที่ได้รับ.....	34
รูปที่ 4.4 อนุภาคคิวบิกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่างใน สภาพที่ได้รับ.....	34
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 1 ชม.....	39
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 3 ชม.....	39
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 10 ชม.....	40
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 24 ชม.....	40
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่ อุณหภูมิ 1000 °ซ 24 ชม.....	41
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง ภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 24 ชม.....	41
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง ภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 1 ชม.....	42
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS บริเวณ โครงสร้างพื้นของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS บริเวณ โครงสร้างพื้นของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 900 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....	43
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS บริเวณ โครงสร้างพื้นของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 1000 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....	44
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS บริเวณ โครงสร้างพื้นของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 1100 °ซ ที่เวลาต่างๆ.....	44
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กัน.....	46
รูปที่ 4.17 กราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับ.....	48
รูปที่ 4.18 กราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 800°ซ 10ชม.....	48
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับเวลาของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ และ เวลาต่างๆ กัน.....	49
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากกับเวลาของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กัน.....	49
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึดกับเวลาของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กัน.....	50
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความแกร่งกับเวลาของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กัน.....	50
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์ไบด์ตกตะกอนในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	53
รูปที่ 4.24 แผนภูมิ TTP แสดงการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ทุติยภูมิในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%.....	54
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ	55
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง ภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 1 ชม.....	57
รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง ภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 1000 °ซ 24 ชม.....	57