อภินันทนาการ

สำนักหอสมุด

รายงานการวิจัย

เรื่อง การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยอนุภาคสารประกอบคาร์ไบด์ด้วยจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน

Microstructural Study of Stainless Steel Composites Reinforced with Carbide Compound Particles by Electron Microscopy

ดร. อัมพร เวียงมูล

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน - 5 JUL 2011
เลขทะเบียน 156483120 02
เลขเรียกหนังสือ QD
906
.E37
0555
2550

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จากงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ปีงบประมาณ 2550
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทคัดย่อ

โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนิติก เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์ ได้ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน รวมทั้งการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (อีดีเอส) และวัดสมบัติด้านความแข็งแบบวิคเกอร์ จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์และอนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและบริเวณขอบเกรนที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง สำหรับเหล็กกล้าสเตนเลสที่ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์ และอนุภาคของสารประกอบที่มีธาตุไททาเนียมสูงซึ่งมีลักษณะต่อเนื่องบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์ อย่างไรก็ตามไม่พบการตกตะกอนของอนุภาคภายในเกรนของออสเทนไนท์ จากการวัดความแข็งพบว่าเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ จะมีความแข็งมากกว่าเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ อันเนื่องมาจากการตกตะกอนของอนุภาคในเกรนของออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์

คำสำคัญ : โครงสร้างจุลภาค เหล็กกล้าสเตนเลส กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซิลิกอนคาร์ไบด์ ไททาเนียมคาร์ไบด์

Abstract

The microstructures of stainless steel 316L reinforced with silicon carbide and titanium carbide have been studied by light microscopy (LM), scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The chemical composition was analyzed by energy dispersive spectroscopy (EDS). Vickers hardness was also measured. It was found that the microstructure of stainless steel 316L reinforced with silicon carbide consisted of austenite grains, and discontinuous particles phase at grain boundaries and precipitation of particle within austenite grains. While the stainless steel 316L reinforced with titanium carbide, the microstructure consisted of austenitic grains and continuous Ti-rich particles at grain boundaryies. However, no particles precipitated within austenite grains. Vickers hardness of the stainless steel 316L reinforced with silicon carbide was higher than the stainless steel 316L reinforced with titanium carbide. This is due to the precipitation of particles within austenite grains in stainless steel 316L reinforced with silicon carbide.

Keywords: microstructure, stainless steel, electron microscopy, silicon carbide, titanium carbide

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2550 ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และศูนย์บริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็คตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือเตรียมชิ้นงาน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือวัดความแข็ง

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เหล็กกล้า	3
1) เหล็กกล้าประสมต่ำ (Low alloy steels)	3
2) เหล็กกล้าประสมสูง (High alloy steels)	4
2.2 เหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless steels)	4
1) เหล็กกล้าสเตนเลสเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels)	4
2) เหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนิติก (Austenitic stainless steels)	5
3) เหล็กกล้าสเตนเลสมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels)	6
4) เหล็กกล้าสเตนเลสแบบพรีซีพปิเตชันฮาร์ดเดนนิ่ง (Precipitation hardening stainless steels)	6
2.3 เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steels)	7
1) เหล็กกล้าผสมไทเทเนียม (Titanium steel)	7
2) เหล็กกล้าปผสมซิลิกอน (Silicon steel)	8
2.4 วัสดุคอมโพสิท (Composite materials)	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9

หน้า

3. วิธีการทดลอง 11

3.1 การเตรียมชิ้นงานและส่วนผสมทางเคมี (Materials and chemical composition) 11

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure examnination) 12

3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness measurement) 14

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล 15

4.1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไป (General microstructure) 15

4.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM examination) 18

4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive spectroscopy, EDS) 19

4.4 ความแข็ง (Hardness) 24

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 27

5.1 สรุปผลการวิจัย 27

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป 27

เอกสารอ้างอิง 28

ภาคผนวก ผลงานที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ 29

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	11
4.1 ค่าความแข็งมหภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์	24
4.2 ค่าความแข็งมหภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์	24
4.3 ค่าความแข็งจุลภาคภายในเกรนออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์	25
4.4 ค่าความแข็งจุลภาคภายในเกรนออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์	25

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนิติกเกรด 316L เช่น ลูกโลหะเม็ดกลมใช้ในถังฉีดน้ำยาเคมี อ่างล้างจาน มีดใช้ในครัว และเครื่องประดับ	6
2.2	ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าเครื่องมือแม่พิมพ์เครื่องประดับ และหัวดอกสว่าน	8
3.1	ตำแหน่งชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	11
3.2	การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง LM และ SEM	13
3.3	กล้องจุลทรรศน์แสง (light optical microscope : LM)	13
3.4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของบริษัท LEO รุ่น 1455VP	14
3.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของบริษัท Philips รุ่น Tecnai 12	14
4.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วย เกรนของออสเทนไนท์ อนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและขอบเกรนของออสเทนไนท์ (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
4.2	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ ประกอบด้วย เกรนของออสเทนไนท์ และอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรน (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
4.3	ภาพ bright field (BF) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์ในเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์	18
4.4	ภาพ TEM-BF แสดงการตกตะกอนของอนุภาคในเกรนของออสเทนไนท์ในเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์	18
4.5	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย point analysis ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริม แรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยที่ (1) เกรนของออสเทนไนท์ (2) อนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรน (3) อนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรน	20
4.6	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray line scanning ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์	21
4.7	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ point analysis ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ โดย (1) เกรนของออสเทนไนท์ (2) อนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์	22

รูปที่ หน้า

4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray line scanning ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ 23

4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความแข็งมหภาคและความแข็งจุลภาคในเกรนออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SS 316L+SiC) และไททาเนียมคาร์ไบด์ (SS 316L+TiC) 26

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

โดยทั่วไป แม่พิมพ์ (เช่น die และ punch) และเครื่องมือช่าง มักจะทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ (tool steels) ที่มีสมบัติเด่นด้านความแข็งและความทนทานต่อการเสียดสี (wear resistance) อย่างไรก็ตาม die และ punch ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือมักเกิดสนิมที่บริเวณผิว ทำให้เกิดการสะดุดระหว่างการใช้งาน ดังนั้นจึงมีความพยายามปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานกัดกร่อนให้ดีขึ้น

เหล็กกล้าสเตนเลสเป็นวัสดุหนึ่งที่มีความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีข้อด้อยในด้านความแข็งและความทนทานการเสียดสีเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของเหล็กกล้าสเตนเลส สามารถทำได้โดยการผสมวัสดุที่มีความแข็งและความทนทานต่อการเสียดสีได้ดี เช่น เซรามิก เพื่อทำให้เป็นวัสดุคอมโพสิท (composite materials) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิก เพื่อใช้ทดแทนเหล็กกล้าเครื่อง มือที่มีปัญหาด้านการกัดกร่อน

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า โครงสร้างของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยอนุภาคของคาร์ไบด์ ซึ่งเกิดวัฏภาคที่สามตามบริเวณขอบเกรนและในเมทริกซ์ แต่ยังไม่มีผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคที่มีขนาดเล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) และแบบส่องผ่าน ซึ่งปัจจุบันมีการศึกษาน้อยมาก เนื่องจากข้อจำกัดในการเตรียมชิ้นงานที่ยุ่งยาก ซับซ้อน และใช้เวลานาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลส เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลส เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลส เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 6% โดยปริมาตร และไททาเนียมคาร์ไบด์ 6% โดยปริมาตร ที่ผ่านการเตรียมด้วยกระบวนการโลหะผงวิทยามาแล้ว

2. ศึกษาโครงสร้างของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
3. ศึกษาสมบัติทางด้านความแข็งแบบวิกเกอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติในคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสเกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์
2. สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านในการศึกษาโครงสร้างที่มีขนาดเล็กได้
3. สามารถตีพิมพ์ในวารสารในระดับประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้า (Steels) [1-2]

เหล็กกล้า คือ เหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนไม่เกิน 2% และธาตุอื่นๆ หรือสารเจือ โดยทั่วไปเหล็กบริสุทธิ์มีคุณสมบัติทางกลที่ไม่เหมาะสมสำหรับงานทางด้านวิศวกรรม ดังนั้นเหล็กกล้าจึงมีความแตกต่างจากเหล็กอ่อน เหล็กบริสุทธิ์และเหล็กหล่อ คือ สามารถทนต่อแรงดึงและแรงบิด ขึ้นรูปหรือแปรรูปง่าย ไม่เปราะหรือแตกหักง่าย และสามารถเชื่อมได้ นอกจากนี้ เหล็กกล้ามีจุดหลอม เหลวสูงกว่าเหล็กดิบเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนต่ำ

เหล็กกล้าผสม (alloy steels) หมายถึง เหล็กที่มีธาตุอื่นนอกจากคาร์บอนผสมอยู่ในเหล็กที่เป็นส่วนผสมหลัก โดยธาตุที่ผสมอยู่อาจมีปริมาณมากกว่าคาร์บอนก็ได้ ธาตุที่ผสมลงไปได้แก่ โมลิบดินัม แมงกานีส ซิลิคอน โครเมียม อลูมิเนียม นิกเกิล วาเนเดียม เป็นต้น จุดประสงค์ในการเพิ่มธาตุต่างๆ เข้าไปในเนื้อเหล็ก เพื่อทำให้สมบัติของเหล็กดีขึ้น คือ

1. เพิ่มความแข็ง
2. เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง
3. เพิ่มคุณสมบัติทางฟิสิกส์
4. เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ
5. เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน
6. เพิ่มคุณสมบัติทางแม่เหล็ก
7. เพิ่มความเหนียวแน่นทนต่อแรงกระแทก

เหล็กกล้าผสม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steels)

เหล็กกล้าผสมต่ำ เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมน้อยกว่า 8% ธาตุที่ผสมอยู่คือ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดินัม และแมงกานีส ปริมาณของธาตุที่ใช้ผสมแต่ละตัวจะมีประมาณ 1 – 2% ผลจากการผสมธาตุทำให้เหล็กสามารถชุบแข็งได้ มีความแข็งแรงสูงเหมาะสำหรับใช้ในการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น เฟือง เพลาข้อเหวี่ยง หรือมีชื่อเรียนอีกอย่างหนึ่งว่าเหล็กกล้าเครื่องจักรกล (machine steels) เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูง ต้องใช้งานในสภาพชุบแข็งและอบอ่อน

2) เหล็กกล้าผสมสูง (Ligh alloy steels)

เหล็กกล้าประเภทนี้ จะมีธาตุผสมรวมกันมากกว่า 8% เพื่อปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น เหล็กกล้าทนความร้อน เหล็กกล้าทนการเสียดสี และเหล็กกล้า ทนการกัดกร่อน ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเหล็กกล้าสเตนเลสและเหล็กกล้าทำเครื่องมือเท่านั้น

2.2 เหล็กกล้าสเตนเลส (Stainless steels)

เหล็กกล้าสเตนเลสหรือเรียกว่าเหล็กกล้าสเตนเลส หมายถึง กลุ่มเหล็กที่ไม่ขึ้นสนิมสีดำหรือสีน้ำตาลเหมือนเหล็กกล้าทั่วไป เหล็กกล้าสเตนเลสในงานอุตสาหกรรมมักจะมีธาตุโครเมียมผสมอยู่ไม่น้อยกว่า 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การที่เหล็กกลุ่มนี้ไม่ขึ้นสนิมเป็นเพราะผิวเหล็กจะถูกปกคลุมด้วยโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ทำให้ตัวเหล็กไม่ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นออกไซด์ (Fe_3O_4 หรือ Fe_2O_3) จึงไม่มีสนิม อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าสเตนเลสอาจทำมาจากเหล็กที่ไม่มีธาตุโครเมียมผสมอยู่เลยก็ได้ โดยใช้ธาตุอะลูมิเนียมผสมแทน แต่เหล็กกล้าสเตนเลสที่ได้นี้มีสมบัติทั่วๆ ไปด้อยกว่าเหล็กที่ได้จากการผสมด้วยธาตุโครเมียม

ธาตุที่มีบทบาทสำคัญในเหล็กกล้าสเตนเลส ได้แก่ โครเมียมที่ผสมเข้าไปในเนื้อเหล็กซึ่งจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆ ขึ้นที่ผิวของเหล็ก ฟิล์มนี้จะมีความแข็งแรงสูง โปร่งใส ยึดตัวกับผิวเหล็กได้ดี มีความหนาแน่นสูงและไม่มีรูพรุน นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการซ่อมตัวเอง (การเกิดขึ้นใหม่เองได้เพื่อทดแทนส่วนของฟิล์มเก่าที่ถูกทำลายไปได้อย่างรวดเร็ว) การที่จะเกิดฟิล์มในลักษณะดังกล่าวได้จะต้องมีโครเมียมผสมอยู่ไม่น้อยกว่า 10% (ส่วนใหญ่มีอยู่ประมาณ 12%) นอกจากโครเมียมแล้วเหล็กกล้าสเตนเลสยังมีธาตุอื่นผสมอยู่อีก เช่น โมลิบดินัม นิกเกิล แมงกานีส เป็นต้น เหล็กกล้าสเตนเลสอาจเป็นสนิมได้ ถ้าโครงสร้างเปลี่ยนไปเนื่องจากอุณหภูมิบรรยากาศการใช้งาน หรือลักษณะของแรงที่มากระทำ ฟิล์มก็จะไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันสนิม

เหล็กกล้าสเตนเลสแบ่งเป็นกลุ่มๆ ตามชนิดของโครงสร้างจุลภาคได้ดังนี้

1) เหล็กกล้าสเตนเลสเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels)

เหล็กกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ body centered cubic (BCC) มีลักษณะที่สำคัญ คือ มีธาตุโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักและผสมอยู่ในช่วง 11-27% มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.2% และไม่มีนิกเกิล ดังนั้นบางทีก็เรียกว่าพวกสเตรตโครม (straight chrome) เนื้อเหล็กมีโครงสร้างจุลภาคแบบเฟอร์ริติก สมบัติทางกลของเหล็กขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีเป็นหลัก ไม่สามารถปรับปรุงด้วยวิธีทางความร้อนและทางกลได้ ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป (wrought products) ของเหล็กกลุ่มนี้จัดอยู่ในชุด 400 (ตามการเรียกชื่อของ AISI, American Iron and Steel Institute)

เหล็กกลุ่มนี้ไม่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมมีแต่เหล็กและโครเมียม ราคาถูก ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนทางการชุบแข็งได้ (hardening) เนื่องจากมีอัตราส่วนของคาร์บอนกับโครเมียมต่ำ โครงสร้างหลักเป็นเฟอร์ไรท์สามารถดูดแม่เหล็กได้ แบ่งออกเป็น 2

ประเภท คือ ประเภทคาร์บอนต่ำจะมีโครเมียมประมาณ 15–18% มีคาร์บอนไม่เกิน 0.12% และประเภททนต่อความร้อน มีโครเมียมประมาณ 25–30% และคาร์บอน 0.3%

2) เหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนิติก (Austenitic stainless steels)

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกลุ่มนี้เป็นแบบออสเทนไนต์ ซึ่งมีระบบผลึกเป็นแบบ face centered cubic (fcc) เหล็กกลุ่มนี้นอกจากมีโครเมียมผสมอยู่ในระดับเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติกแล้ว ยังมีนิกเกิลผสมอยู่มากทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกลายเป็นแบบออสเตนิติก นิกเกิลจะช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็กทำให้ขึ้นรูปทางกลได้ง่ายขึ้น ทำให้เหล็กถูกแปรรูปเย็นได้ง่ายขึ้นซึ่งช่วยให้เหล็กมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย นอกจากนี้นิกเกิลยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนจากกรดกำมะถันและกรดเกลือเจือจางได้ดีกว่าพวกสเตรตโครม ข้อดีของเหล็กกลุ่มนี้ทำให้เหล็กกลุ่มออสเตนิติกเป็นที่นิยมใช้แพร่หลายมาก และชนิดที่นิยมมากที่สุด คือ เกรด 18-8 ซึ่งมีโครเมียมอยู่ประมาณ 18% และมีนิกเกิลอยู่ประมาณ 8% AISI จัดเหล็กกลุ่มนี้อยู่ในชุด 200 และ 300

เหล็กกลุ่มนี้มีส่วนผสมของคาร์บอน 0.15% โครเมียม 18% นับเป็นกลุ่มที่มีหลายเกรดมากที่สุดและถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง โครงสร้างหลักเป็นออสเทนไนท์ (มีนิกเกิลและแมงกานีสเป็นส่วนผสมหลัก) ไม่เป็นสารแม่เหล็กและไม่สามารถทำการชุบแข็ง เพื่อปรับปรุงคุณภาพของเหล็กกล้าด้วยความร้อนได้ ใช้ทำเครื่องครัว มีด แท็งค์น้ำ เป็นต้น เหล็กกล้าประเภทนี้มีการแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย เช่น ประเภทคาร์บอนต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.08% ตามมาตรฐานอเมริกา (AISI) คือ เกรด 304 เกรด 316 เป็นต้น

เหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนิติกเกรด 316 และ 316L ส่วนผสมของเกรด 316 ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก คือ โครเมียม 16-18 % นิเกิล 10-14% โมลิบดีนัม 2-3% คาร์บอน 0.08 % และเหล็กส่วนเกรด 316L มีส่วนประกอบเช่นเดียวกับเกรด 316 แต่จะมีส่วนผสมของโมลิบดินัมเพิ่มสูงขึ้นและมีคาร์บอนลดลง คือ 0.03% ทำให้การปรับแต่งชิ้นงานได้ง่ายขึ้น เหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนนิติกเกรด 316 และ 316L จะมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเกรด 302 และเกรด 304 นิยมนำไปใช้ทำโซ่และอุปกรณ์ในงานทะเล ถังหมักขีสต์ ภาชนะบรรจุบรั่นดี ลูกโลหะเม็ดกลมใช้ในถังฉีดน้ำยาเคมี อ่างล้างจาน มีดใช้ในครัว และเครื่องประดับ เป็นต้น นอกจากนี้ยังง่ายต่อการเชื่อมและป้องกันการตกผลึกของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน (การตกผลึกคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนจากการเชื่อมทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง) จึงเหมาะสำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอาหารและงานขึ้นรูป ทำให้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางซึ่งทนในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและมีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง

ตัวอย่างการนำไปใช้งานแสดงในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนิติกเกรด 316L เช่น ลูกโลหะเม็ดกลมใช้ในถังฉีดน้ำยาเคมี อ่างล้างจาน มีดใช้ในครัว และเครื่องประดับ

3) เหล็กกล้าสเตนเลสมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels)

เหล็กกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีระบบผลึกแบบ body centered tethagonal (bct) ส่วนมากเป็นพวกสเตรตโครมเหมือนกับพวกเฟอร์ริติก คือ มีโครเมียมผสมอยู่ระหว่าง 11-18% แต่ปริมาณคาร์บอนของเหล็กกลุ่มนี้จะมีมากกว่าเพื่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์ได้ง่ายขึ้น เหล็กกลุ่มนี้สามารถทำให้แข็งขึ้นโดยการชุบแข็ง (quenching) หลังจากชุบแข็งเหล็กจะมีโครงสร้างเป็นแบบมาร์เทนไซต์ เหล็กพวกนี้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความแข็งมาก เช่น มีดตัด มีดโกน เครื่องมือผ่าตัด และงานที่ต้องการความคงทนต่อการสึกหรอมากๆ ความทนทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กกลุ่มนี้ด้อยกว่ากลุ่มเฟอร์ริติกและกลุ่มออสเตนิติก AISI จัดเหล็กกลุ่มนี้อยู่ในชุด 400

โครงสร้างเหล็กเป็นมาเทนไซต์ประกอบด้วยเหล็ก โครเมียม และคาร์บอนเป็นส่วนผสม แต่คาร์บอนเป็นตัวที่ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลงจึงเป็นธาตุที่ไม่พึงประสงค์ แต่เหล็กกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความแข็งโดยการชุบแข็งได้จึงต้องมีคาร์บอนผสมอยู่ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ประเภทที่มีคาร์บอนไม่เกิน 0.15% โครเมียมระหว่าง 12–14% ประเภทที่มีคาร์บอนประมาณ 0.2–0.4% โครเมียมระหว่าง 13–15% และประเภทที่มีคาร์บอนระหว่าง 0.6–1% โครเมียมระหว่าง 14–16%

4) เหล็กกล้าสเตนเลสแบบพรีซีปิเตชันฮาร์ดเดนนิ่ง (Precipitation hardening stainless steels)

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าที่สามารถทำให้เกิดเฟสใหม่ (precipitation of new phase) แยกออกจากเฟสเดิมได้โดยกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อน ผลของการเกิดเฟสใหม่ทำให้ความแข็งแรงของเหล็กเพิ่มมากขึ้น เหล็กกล้าสเตนเลสพวกนี้มีทั้งโครเมียมและนิกเกิลผสมอยู่เช่นเดียวกับกลุ่มออสเตนิติก นอกจากนี้ยังผสมด้วยธาตุอื่น เช่น อะลูมิเนียมและไทเทเนียม ฯลฯ เพื่อทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กโดยให้เกิดการแยกเฟสด้วยการทำกรรมวิธีทางความร้อนได้ สมบัติเด่นของ

เหล็กกลุ่มนี้ คือ ถ้าเผาให้อุณหภูมิสูงขึ้นเหล็กจะไม่แข็งแต่จะเหนียวมาก ทำให้สามารถแปรรูปทางกลได้มากจนได้ขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นก็ทำกรรมวิธีทางความร้อนต่อเพื่อให้เหล็กมีทั้งความแข็งและความเหนียวตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นข้อแตกต่างที่ระหว่างเหล็กกลุ่มนี้กับกลุ่มออสเตนิติก เพราะเหล็กกลุ่มออสเตนิติกต้องใช้การแปรรูปเย็นในการเพิ่มความแข็งให้กับเหล็ก การแปรรูปแบบเย็นมีขีดจำกัดในเรื่องปริมาณการแปรรูปคือทำได้น้อย ถ้าต้องการแปรรูปมากก็ต้องทำในขณะร้อน ซึ่งมีข้อเสียคือไม่มีความแข็งแรงที่ต้องการหลังจากการแปรรูป ฉะนั้นกลุ่มพรีซิพปีเตชันฮาร์ดเดนนิ่งจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขจุดอ่อนเหล่านี้ของเหล็กกลุ่มออสเตนิติก เหล็กกลุ่มนี้เป็นเหล็กที่มีลิขสิทธิ์ทางการค้า (proprietary alloys) และยังไม่ได้ขึ้นทะเบียนเป็นชื่อตัวเลขเหมือนกับกลุ่มอื่นๆ

การที่เหล็กกล้าสเตนเลสจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กนั้นๆ โดยทั่วไปธาตุผสม ได้แก่ โครเมียม นิเกิล โมลิบดีนัม คาร์บอน ซิลิกอน และแมงกานีส ธาตุเหล่านี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกส่งผลให้เหล็กมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม คาร์บอน ซิลิกอน กลุ่มที่สองส่งผลให้เหล็กมีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนท์กลุ่มนี้ได้แก่ นิเกิล คาร์บอน แมงกานีส เมื่อธาตุเหล่านี้ถูกผสมผสานปนอยู่ในเนื้อเหล็กสเตนเลส ตัวเหล็กจะมีโครงสร้างจุลภาคแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับว่าธาตุกลุ่มไหนมีอิทธิพลมากกว่า เหล็กกล้าสเตนเลสที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนท์นั้น จะไม่เป็นสารแม่เหล็กคือแม่เหล็กดูดไม่ติด ส่วนเหล็กกล้าสเตนเลสที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบเฟอร์ไรต์และมาร์เทนไซต์นั้นเป็นสารแม่เหล็กคือแม่เหล็กสามารถดูดติด

2.3 เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steels)

เหล็กกล้าเครื่องมือ เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม โมลิบดินัม นิกเกิล วาเนเดียม โคบอลต์ และไทเทเนียม มากกว่า 5% และมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.8–2.2% ธาตุผสมเหล่านี้สามารถเพิ่มสมบัติพิเศษให้กับเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยเฉพาะเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงที่รักษาคมมีดตัดโลหะได้ดีถึงแม้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจนผิวของคมตัดร้อนมีสีแดง สมบัตินี้เรียกว่าความแข็งขณะร้อน (hot hardness) เช่น ดอกกัด (endmil) มีดกลึง มีดไส เครื่องมือทำเกลียวใน (tap) และเครื่องมือทำเกลียวนอก (die) การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ ลักษณะการใช้งานเหล็กเครื่องมือ ปริมาณของธาตุผสม และลักษณะการชุบแข็ง จากการที่นำวัสดุต่างๆ ผสมเข้าไปในเหล็กกล้าทำให้เกิดเหล็กกล้าผสมที่มีสมบัติตามวัสดุที่มาผสม ซึ่งเหล็กกล้าชนิดนี้จะเรียกชื่อตามวัสดุที่มาผสม ได้แก่

1) เหล็กกล้าผสมไทเทเนียม (Titanium steel) มีสมบัติคือเมื่อผสมไททาเนียมในเหล็กด้วยปริมาณไม่เกิน 1% ทำให้ความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มมากขึ้น ถ้าผสมลงไปในเหล็กเป็นจำนวนมากจะทำให้ลดความสามารถในการชุบแข็ง ถ้านำไททาเนียมผสมกับไนโตรเจนจะได้ไททาเนียมไนไตรท์ซึ่งมีความแข็งแรงสูง

2) เหล็กกล้าผสมซิลิกอน (Silicon steel) มีคุณสมบัติคือทำให้จุดคราก (yield point) ของเหลวสูงขึ้นโดยไม่มีผลเกี่ยวกับการชุบแข็ง เมื่อผสมซิลิกอนเข้าไปมากทำให้การนำไปใช้งานเกี่ยวกับการเชื่อมไม่ดีเพราะซิลิกอนจะรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่ายมาก

แม่พิมพ์ (เช่น die และ punch) และเครื่องมือช่าง เช่น ดอกสว่าน ดังรูปที่ 2.2 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญมาก เหล็กกล้าที่ใช้ทำแม่พิมพ์มีหลายชนิด การเลือกใช้เหล็กให้เหมาะสมจะนำไปสู่ความประหยัด โดยปัจจัยหลักในการพิจารณากำหนดชนิดของเหล็กกล้าที่เหมาะสมนั้นที่สำคัญได้แก่ ลักษณะการใช้งาน แม่พิมพ์ส่วนใหญ่ขณะใช้งานจะมีการเสียดสี และนำไปสู่การสึกหรอ และต้องพิจารณาด้วยว่าแรงที่กระทำเป็นแรงกระแทกหรือไม่ ปัจจัยอื่นที่สำคัญคืออุณหภูมิขณะการใช้งาน เพราะถ้าอุณหภูมิเกินกว่า 350 องศาเซลเซียส มักจะมีปัญหาเรื่องการคืบ (creep) หรือเรื่องการแตกร้าวที่ผิว นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงเรื่องการกัดกร่อนการเป็นสนิม เช่น ขณะทำงานต้องสัมผัสกับตัวกลางที่สามารถกัดกร่อนสนิมเหล็กกล้าได้อย่างรุนแรง โดยทั่วไปแม่พิมพ์มักจะทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ (tool steels) ที่มีสมบัติเด่นด้านความแข็งและความทนทานต่อการเสียดสี (wear resistance) อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าเครื่องมือ มักเกิดสนิมที่บริเวณผิว ทำให้เกิดการสะดุดระหว่างการใช้งาน ดังนั้นจึงมีความพยายามปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานกัดกร่อนให้ดีขึ้น

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าเครื่องมือ เช่น แม่พิมพ์เครื่องประดับ และหัวดอกสว่าน

2.4 วัสดุคอมโพสิท (Composite materials) [3-4]

วัสดุคอมโพสิทหรือวัสดุผสม เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่นำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกันมามาผสมกันให้กลายเป็นวัสดุผสมที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิมหรือดีกว่า เช่น ค่าความแกร่งและแข็งสูง ความถ่วงจำเพาะต่ำ นำมาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบาสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีและสภาพอากาศ มีความยืดหยุ่นตัวสูง และมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ในปัจจุบัน วัสดุคอมโพสิทที่มีบทบาทมากที่สุด คือ คอมโพสิทโลหะ (metal composites) และคอมโพสิทเซรามิก (ceramic composites).

วัสดุคอมโพสิทประกอบด้วยตัวเสริมแรง (reinforce phase) และเนื้อประสาน (matrix) เช่น โพลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ทำหน้าที่ในการประสานเชื่อมโยงโครงสร้างระหว่างตัวเสริมแรง เพื่อทำให้เกิดโครงข่าย 3 มิติ (cross linking) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติ ทางกลให้แก่วัสดุคอมโพสิท โดยปกติสารที่เป็นองค์ประกอบเหล่านั้นจะไม่ละลายเข้าด้วยกัน และสามารถสังเกตุดูได้ที่รอยต่อระหว่างสารที่เป็นองค์ประกอบ การผลิตวัสดุผสมจึงมีได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับวิธีการของการเสริมแรงกับตัวประสาน ในปัจจุบันวัสดุคอมโพสิทที่มีบทบาทมากที่สุด คือ คอมโพสิทโลหะ (metal composites) และคอมโพสิทเซรามิก (ceramic composites) ทั้งนี้ด้วยสมบัติของ วัสดุคอมโพสิทดังกล่าวส่งผลให้วัสดุคอมโพสิทถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์และวัสดุทางการแพทย์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้างโครงสร้าง อุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนิติคเกรด 316L ที่มีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย คาร์บอน โครเมียม นิเกิล และโมลิบดินัม มีสมบัติเด่นด้านความต้านทานการกัดกร่อนสูง ทำให้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและมีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง เช่น เตาแยกปฏิกรณ์ปรมาณู อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนิติคเกรด 316L มีข้อด้อยคือ มีความแข็งต่ำและไม่สามารถปรับปรุงโดยกระบวนการทางความร้อนได้ สำหรับวิธีการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งและความต้าน ทานการเสียดสีของเหล็กกล้าสเตนเลส สามารถทำได้โดยการผสมด้วยอนุภาคที่มีความแข็งสูง เพื่อให้กลายเป็นวัสดุคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสที่มีความแข็งสูงขึ้น [5-6].

มีงานวิจัยที่ศึกษาคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนิติก เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาค γ-TiAl จากผลการวิจัยพบว่า เหล็ก โครเมียม และนิเกิล แพร่เข้าไปที่อนุภาคเสริมแรง และยังพบการแพร่ของไททาเนียมและอลูมิเนียมไปยังเมทริกซ์ ทำให้เกิดวัฏภาคเหล็กเฟอร์ไรท์ล้อมรอบอนุภาคเสริมแรง และมีผลึกขนาดเล็กเกิดขึ้นในเฟอร์ไรท์ [7] จากผลการวิจัยของ Abenojar et. al. [8] ที่ได้ผสมอนุภาคอลูมิเนียมโครไมด์ ($AlCr_2$), ไททาเนียมโครไมด์ ($TiCr_2$), วาเนเดียมคาร์ไบด์ (VC) และซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ในเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนิติก เกรด 316L พบว่า คอมโพสิทที่เสริมแรงด้วยอลูมิเนียมโครไมด์เกิดชั้นของอลูมินาล้อมรอบอนุภาคเสริมแรง ทำให้คอมโพสิทมีความแข็งแรงต่ำ

ส่วนคอมโพสิทที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมโครไมด์จะเกิดการแพร่ของโครเมียมจากไททาเนียมโครไมด์ไปยังเมทริกซ์ ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคและเมทริกซ์ดีขึ้น และเป็นผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามคอมโพสิททั้งสอง มีความต้านทานการเสียดสีต่ำ เนื่องจากอนุภาค $AlCr_2$ และ $TiCr_2$ เป็นสารประกอบระหว่างโลหะที่มีความแข็งต่ำ ในขณะที่การเสริมแรงด้วยอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์และซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่เกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ และคอมโพสิทที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีความต้านทานการเสียดสีดีที่สุด ในประเทศไทยเองก็มีนักวิจัยที่ศึกษาทางด้านนี้อยู่ ตัวอย่างเช่น สมศรี [4] ซึ่งได้ศึกษาสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลส เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์ พบว่าคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ในขณะที่ไททาเนียมคาร์ไบด์จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างของคอมโพสิททั้งสองจะเกิดวัฏภาคที่สามตามบริเวณขอบเกรนและในเมทริกซ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังไม่สามารถเห็นลักษณะของวัฏภาคดังกล่าวเนื่องจากมีขนาดเล็ก ซึ่งจะต้องศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเท่านั้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการวิจัยในครั้งนี้

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งในคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลส เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์ ด้วยจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

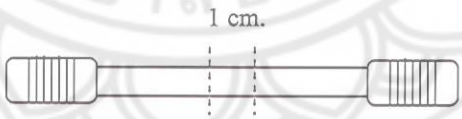
3.1 การเตรียมชิ้นงานและส่วนผสมทางเคมี (Materials and chemical composition)

ชิ้นงานที่นำมาทำการวิจัยนี้ คือกลุ่มของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสออสเตนิติกเกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SS+SiC) และที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ (SS+TiC) ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทั้ง 2 กลุ่ม แสดงในตารางที่ 3.1

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำผงเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ตามส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 3.1 มาอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำมาเผาซินเตอร์ริ่งในบรรยากาศของกาซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของชิ้นงานและบริเวณกึ่งกลางที่นำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (vol%)									
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	SiC	TiC
SS+SiC	0.03	16-18.5	10-14	2-3	< 2	< 1	< 0.045	< 0.03	6	-
SS+TiC	0.03	16-18.5	10-14	2-3	< 2	< 1	< 0.045	< 0.03	-	6



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructural study)

การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Light microscopy; LM)

การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เริ่มจากการนำชิ้นงานที่ขึ้นเรือนมาขัดหยาบ (grinding) เพื่อเอาผิวหน้าชิ้นงานที่เสียหายหรือแปรรูปออกไป ด้วยกระดาษทราย (SiC-paper) โดยเริ่มจากกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 360, 500, และ 1000 ตามลำดับ จากนั้นนำมาขัดเงา (polishing) ด้วยผงขัดเพชร (diamond suspension) ร่วมกับผ้ากำมะหยี่ โดยเริ่มจากผงเพชรขนาด 6 และ 3 ไมครอน ร่วมกับสารหล่อเย็น และอลูมินาขนาด 1 ไมครอน ใช้ร่วมกับน้ำ เพื่อลดความร้อนที่เกิดจากการขัดเงาชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาด เป่าให้แห้ง และนำไปกัดกรด โดยสารละลายที่ใช้ในการกัดกรด คือ สารละลาย glyceregia ที่ประกอบด้วย กรดไฮโดรคลอลิค : กลีเซอรอล : กรดไนตริค ในอัตราส่วน 3 : 2 : 1 โดยการผสมกรดไฮโดรคลอลิคกับกรดไนตริคก่อน แล้วจึงค่อยๆ หยดลงในกลีเซอรอลเป็นอันดับสุดท้าย ใช้เวลาในการกัดกรดประมาณ 10 วินาที

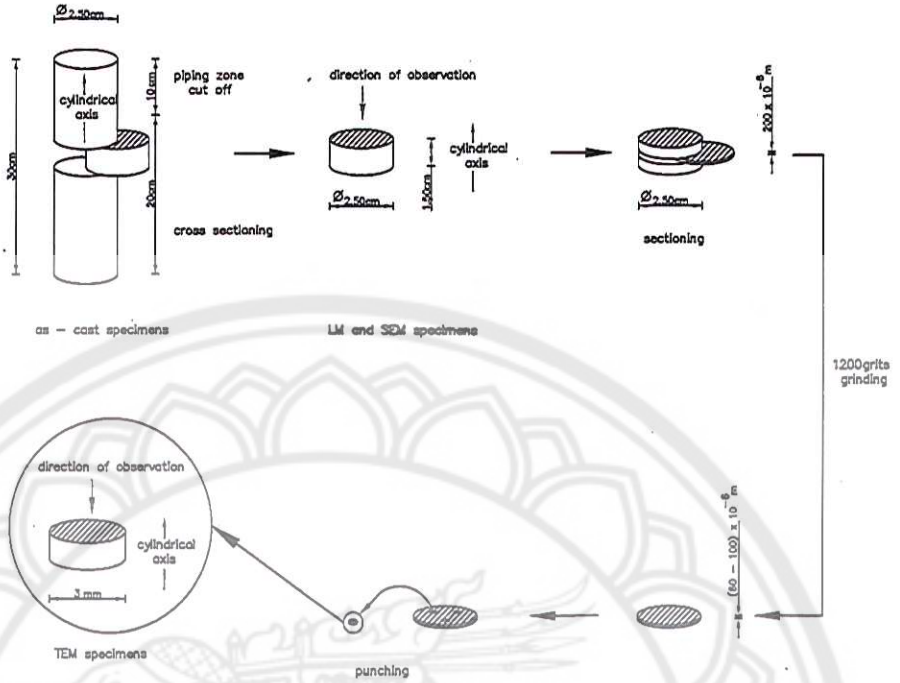
การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ชิ้นงานที่เตรียมเพื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง สามารถนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กำลังขยายสูงขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเฟสต่างๆ ด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive spectroscopy, EDS) แบบ point analysis และ line scanning

การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

ในการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูง สำหรับการเตรียมชิ้นงานนั้นเริ่มจากการตัดชิ้นงานด้วยใบตัด CBN ให้เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 200 ไมโครเมตร และนำมาขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อลดความหนาให้เหลือประมาณ 80-100 ไมครอน จากนั้นนำมาเจาะด้วย puncher เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และนำมาขัดเงาด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมีด้วยเครื่อง twin jet electropolishing โดยใช้สารละลายของ 10% perchloric acid และ 30% ของ 2-butoxyethanol ในเอธานอล จนกระทั่งชิ้นงานทะลุ โดยบริเวณรอบๆรูที่ทะลุจะมีพื้นที่บางพอที่อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้

รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาพด้วยกล้อง LM, SEM และ TEM รูปที่ 3.3-3.5 แสดงกล้องที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง LM และ SEM

รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์แสง (light optical microscope : LM)

รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของบริษัท LEO รุ่น 1455VP

รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของบริษัท Philips รุ่น Tecnai 12

3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness measurement)

โดยนำชิ้นงานที่ยังไม่กัดกรดไปทดสอบความแข็งมหภาคหรือความแข็งโดยรวมแบบวิคเกอร์ (Vickers macrohardness) โดยใช้น้ำหนัก 30 Kgf เป็นเวลา 15 วินาที วัดแบบสุ่มจำนวน 5 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย สำหรับการทดสอบความแข็งจุลภาค (Vickers microhardness) ภายในเกรนของออสเทนไนท์ โดยใช้ชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจุลภาค โดยใช้น้ำหนัก 0.015 Kgf เป็นเวลา 15 วินาที วัดแบบสุ่มจำนวน 10 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

บทที่ 4

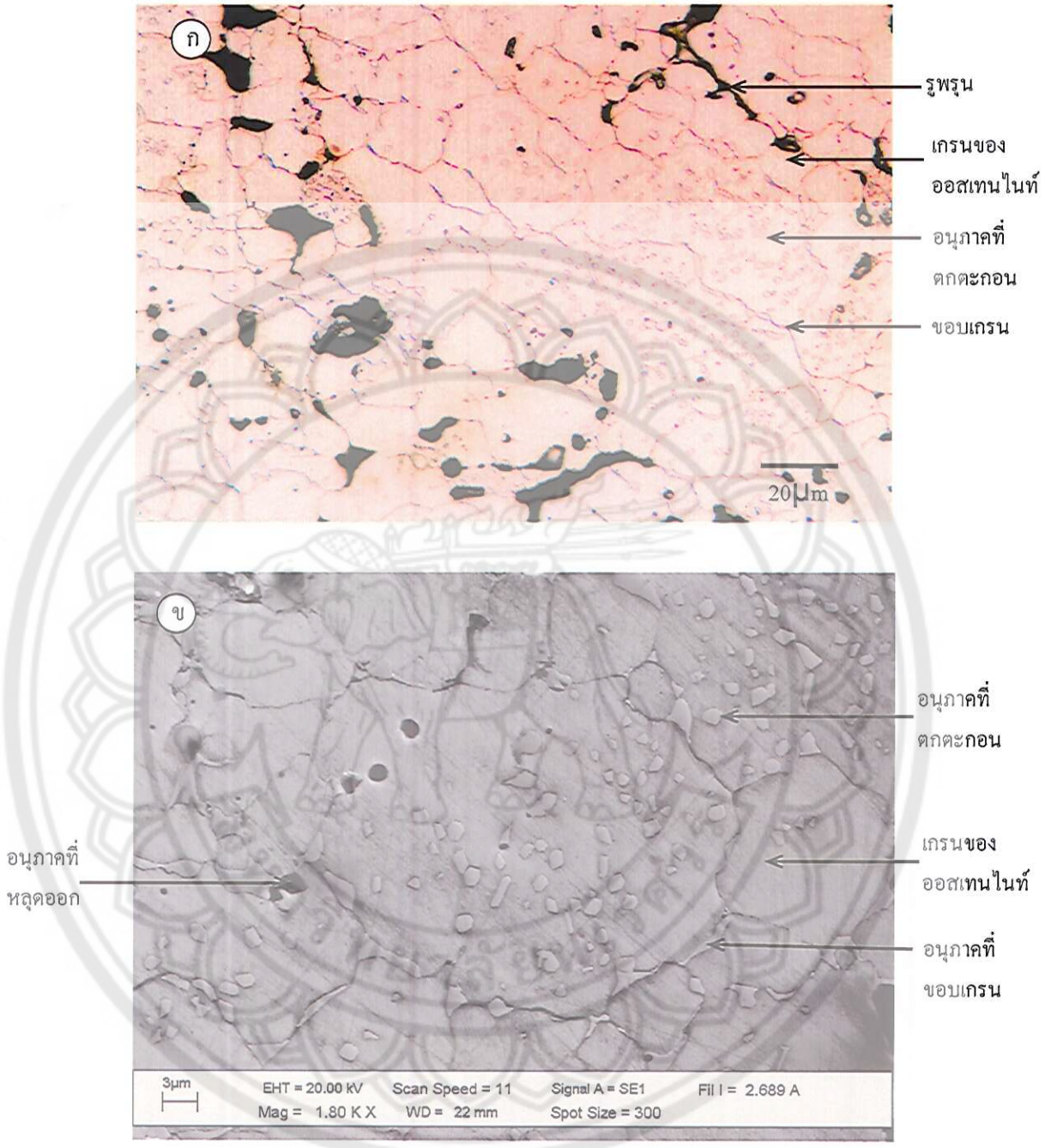
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไป (General microstructure)

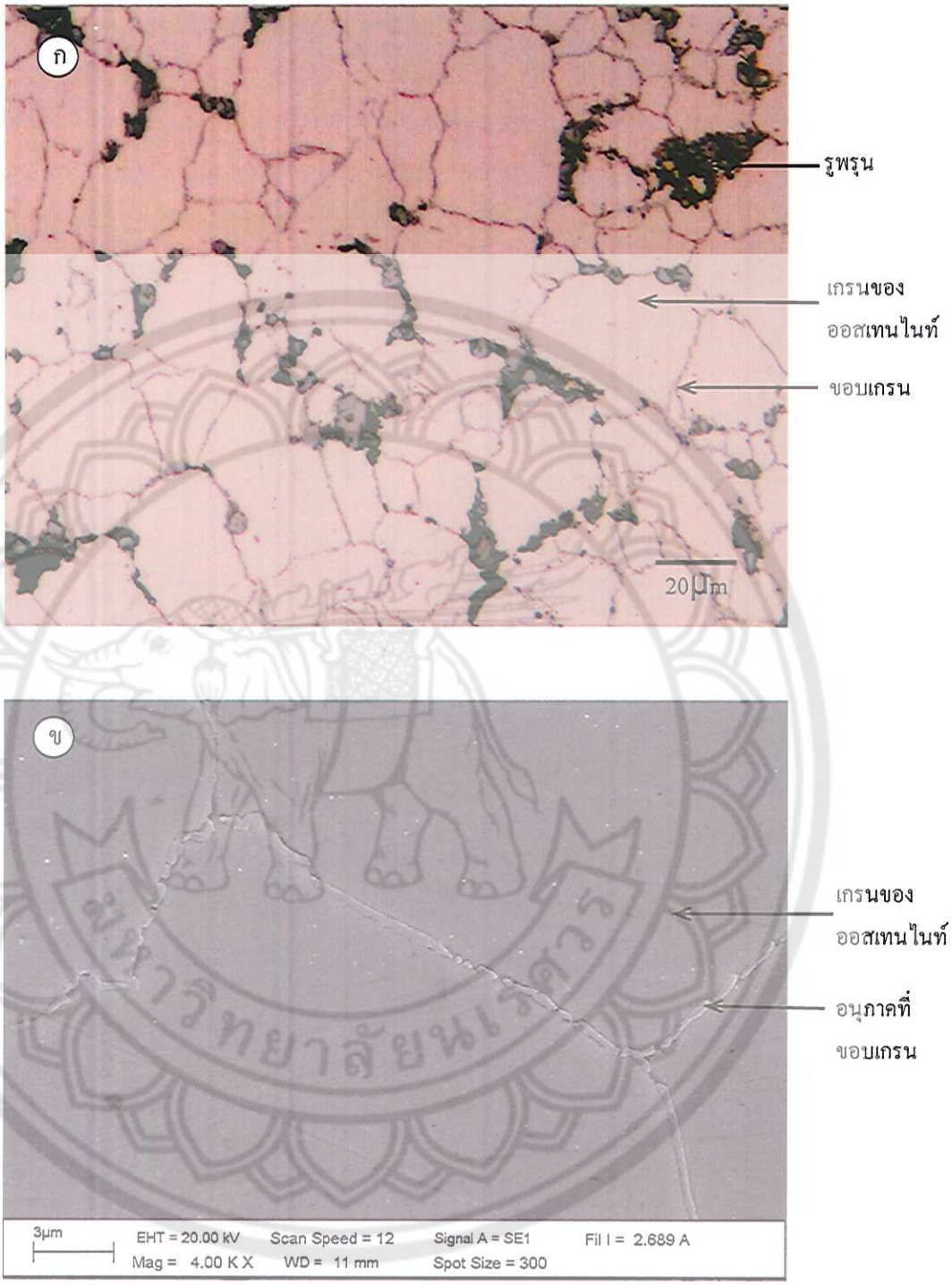
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยายต่ำ พบว่า โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์ และอนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและขอบเกรนของออสเทนไนท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงขึ้น พบว่าอนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์มีลักษณะเป็นแท่ง ทรงกลม และรูปเหลี่ยม และมีขนาดเกรนระหว่าง 0.5 – 6.0 μm โดยบริเวณกลางเกรนของออสเทนไนท์จะมีอนุภาคที่ตกตะกอนปริมาณมากกว่าบริเวณขอบเกรน นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนมีลักษณะการเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข)

สำหรับเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์ และอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์ แต่อย่างไรก็ตามไม่พบการตกตะกอนของอนุภาคภายในเกรนของออสเทนไนท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงขึ้น พบว่าอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์มีลักษณะการเรียงตัวแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข)

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองส่วนผสมจะมีรูพรุนปริมาณสูง เนื่องจากการเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการโลหะผงวิทยา โดยรูพรุนมักจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของเกรนออสเทนไนท์และเชื่อมต่อกันมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบการหลุดออกของอนุภาคที่ตกตะกอน ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นระหว่างการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายหรือการขัดเงาด้วยผงขัดเพชร



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์ อนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและขอบเกรนของออสเทนไนท์ (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

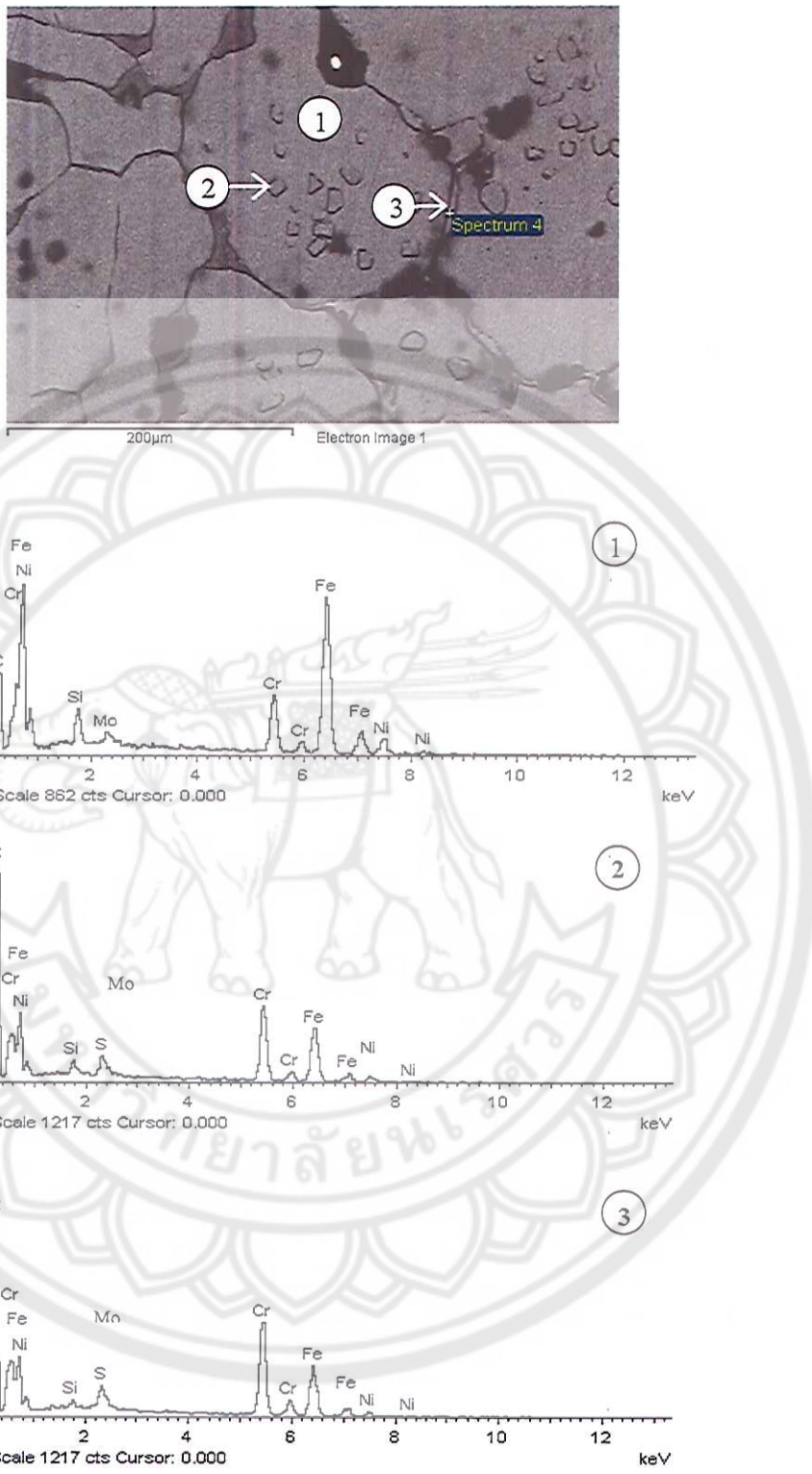


รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์ และอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรน (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

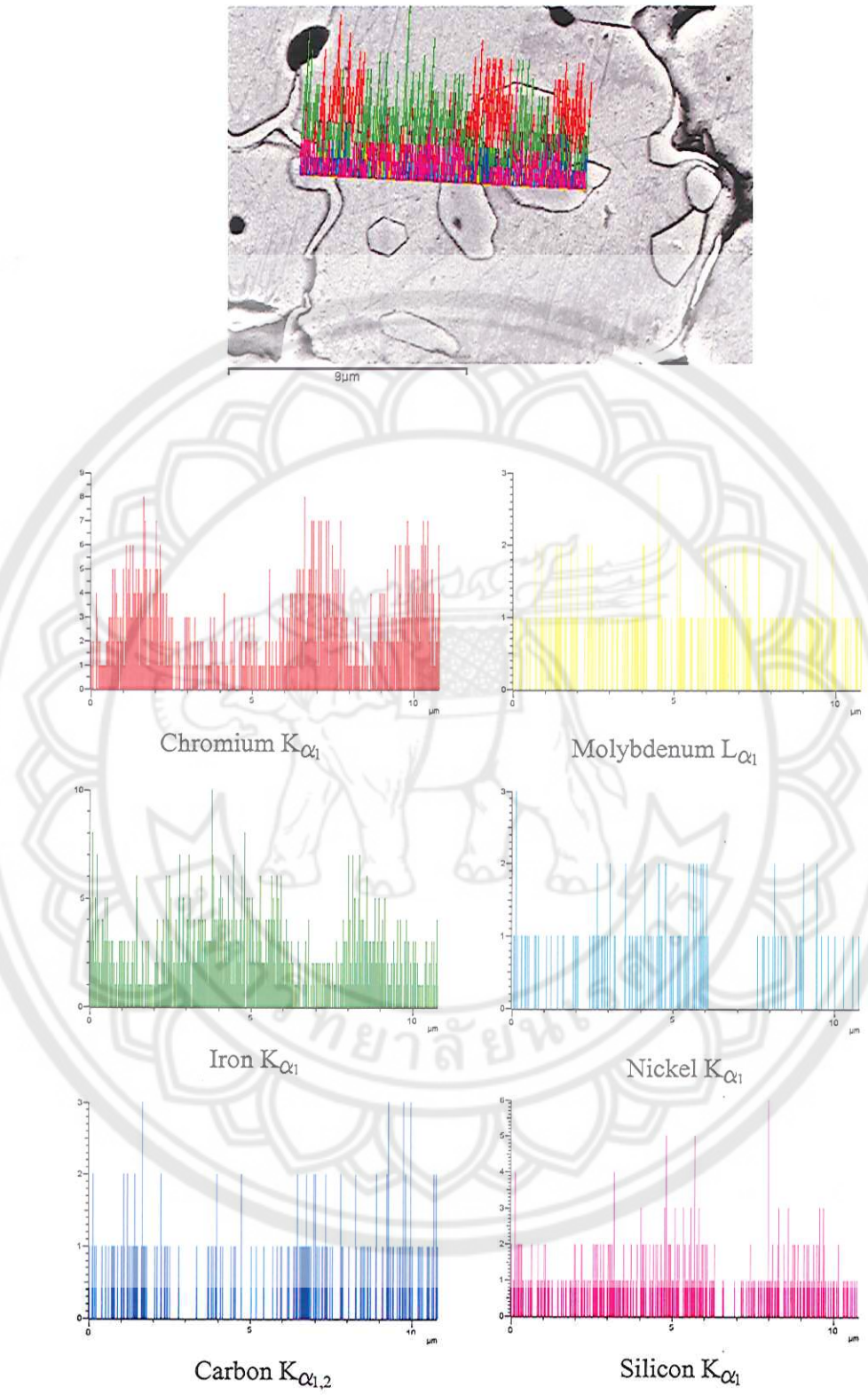
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive spectroscopy, EDS) แบบ point analysis ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ พบว่าเกรนของออสเทนไนท์และอนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์ประกอบด้วยธาตุ เหล็ก โครเมียม นิกเกิล ซิลิกอน โมลิบดินัม และคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray line scanning พบว่าเกรนของออสเทนไนท์จะมีธาตุ เหล็ก นิกเกิล โมลิบดินัม ละลายอยู่ปริมาณมาก ในขณะที่อนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์จะมีธาตุโครเมียมละลายอยู่มาก เมื่อพิจารณาอนุภาคที่ตกตะกอน พบว่ามีการธาตุเหล็กในปริมาณสูงบริเวณกลางเกรนและมีธาตุโครเมียมมากที่บริเวณขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งอาจเนื่องมาจากธาตุเหล็กมีอัตราการแพร่จากเกรนของออสเทนไนท์เข้าสู่อนุภาคที่ตกตะกอนได้มากกว่าธาตุโครเมียม นอกจากนี้จะเห็นว่าธาตุซิลิกอนและคาร์บอนละลายในอนุภาคที่ตกตะกอนมากกว่าเกรนของออสเทนไนท์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและขอบเกรนมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกันจึงน่าจะเป็นเฟสชนิดเดียวกัน

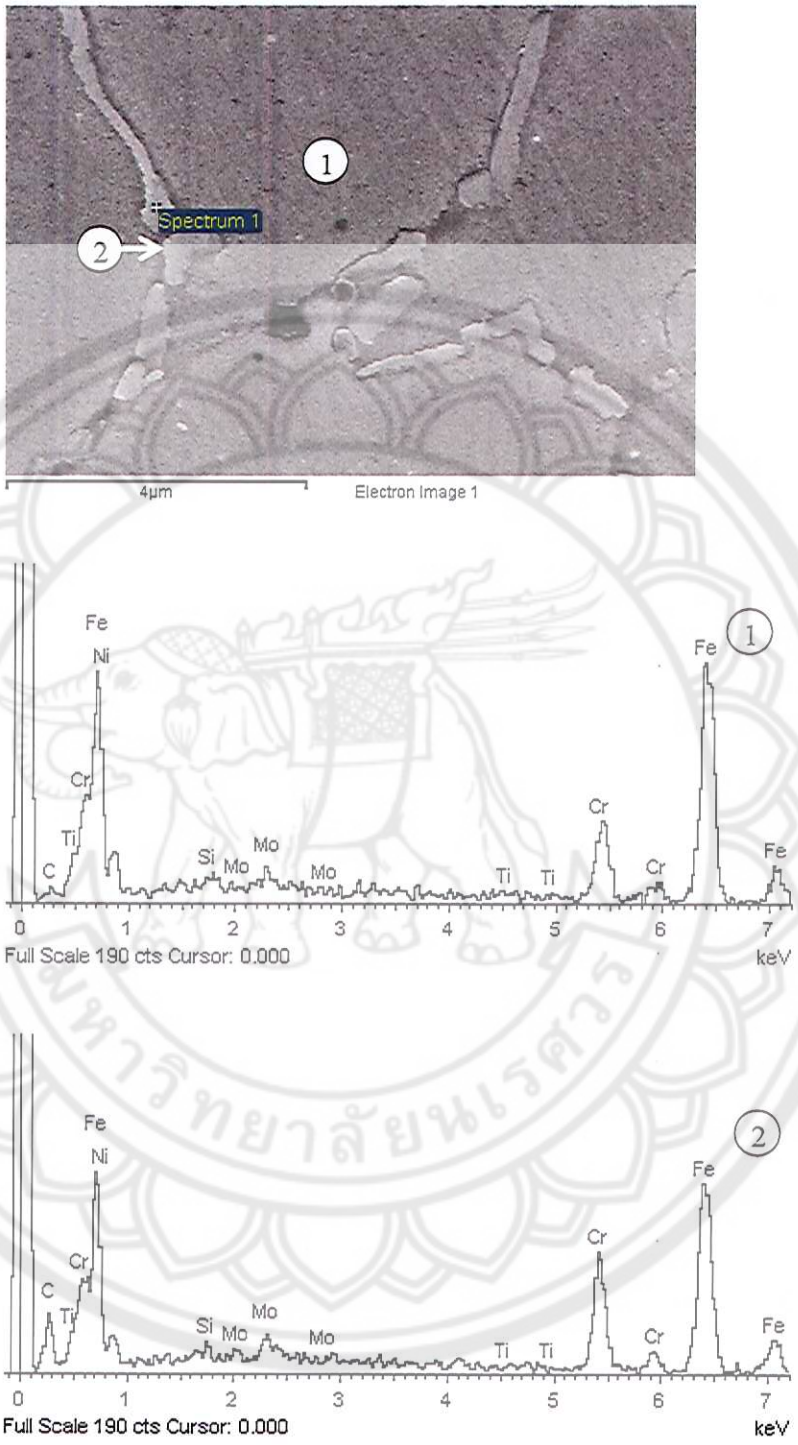
สำหรับเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย point analysis พบว่าเกรนของออสเทนไนท์และอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์ประกอบด้วยธาตุ เหล็ก โครเมียม นิกเกิล ไททาเนียม โมลิบดินัม และคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray line scanning พบว่าเกรนของออสเทนไนท์ ประกอบด้วยธาตุเหล็ก โครเมียม นิกเกิล และโมลิบดินัม ละลายอยู่ในปริมาณมาก ในขณะที่อนุภาคบริเวณขอบเกรนประกอบด้วยธาตุไททาเนียมและคาร์บอนในปริมาณที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.8



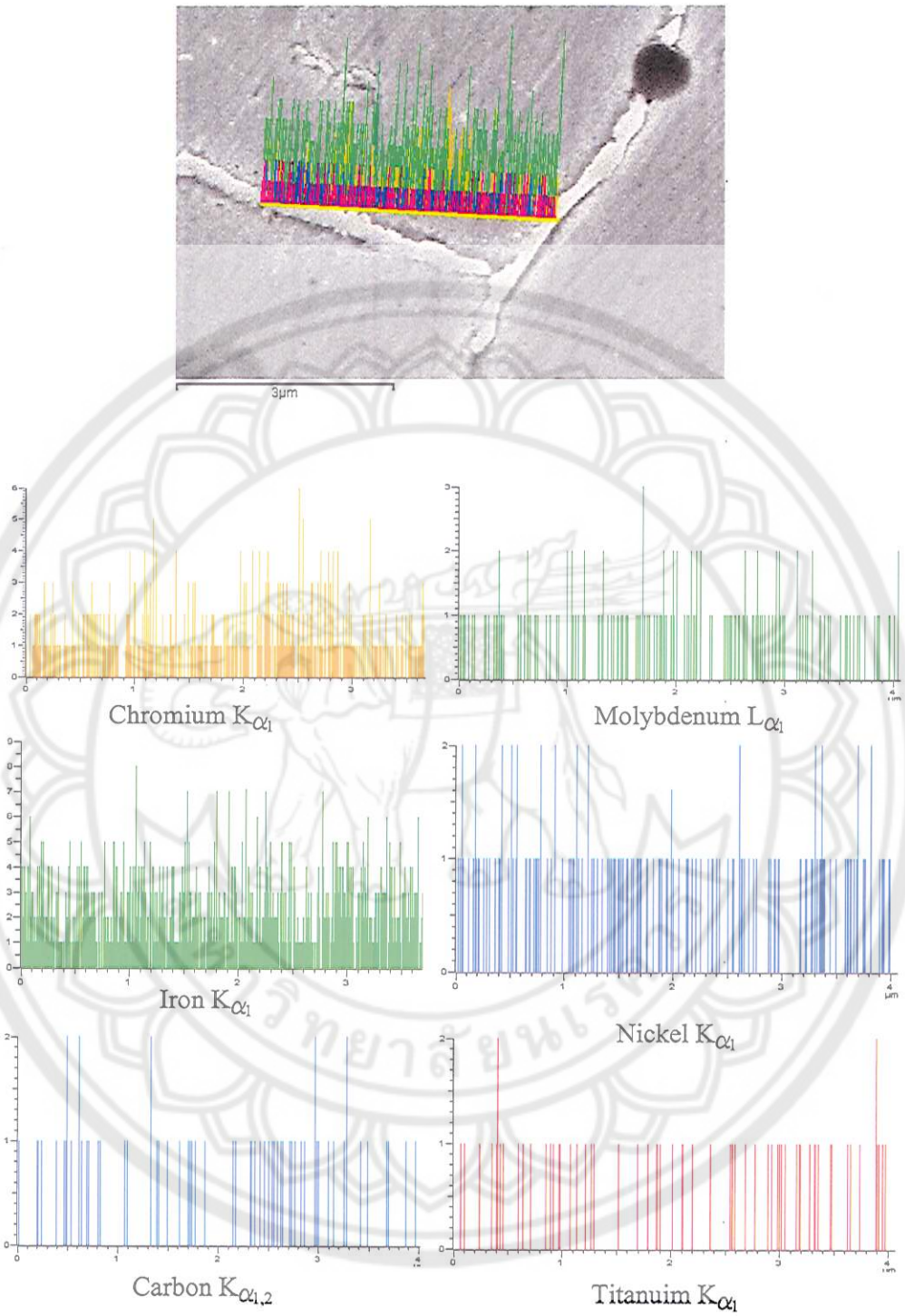
รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย point analysis ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยที่ (1) เกรนของออสเทนไนท์ (2) อนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรน (3) อนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรน



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray line scanning ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ point analysis ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ โดยที่ (1) เกรนของออสเทนไนท์ (2) อนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray line scanning ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์

4.4 ความแข็ง (Hardness)

จากผลการทดสอบสมบัติทางด้านความแข็ง พบว่าเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่ไม่เสริมแรงมีความแข็งเท่ากับ 91 HV_{30} เมื่อเสริมแรงด้วยอนุภาคคาร์ไบด์จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ มีความแข็งมหภาคเท่ากับ 113.39 HV_{30} และความแข็งจุลภาคภายในเกรนของออสเทนไนท์เท่ากับ 167.31 $HV_{0.015}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.3 ตามลำดับ ส่วนเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคไททาเนียมคาร์ไบด์ พบว่าความแข็งมหภาคมีเท่ากับ 97.72 HV_{30} และความแข็งจุลภาคภายในเกรนออสเทนไนท์เท่ากับ 126.01 $HV_{0.015}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.4 ตามลำดับ

การที่เหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์มีความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ อาจเนื่องมาจากในเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์มีการตกตะกอนของอนุภาคภายในเกรนของออสเทนไนท์ รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งมหภาคและจุลภาคในเกรนของออสเทนไนท์

ตารางที่ 4.1 ความแข็งมหภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์

ครั้งที่	d_1	d_2	ค่าความแข็ง (HV_{30})
1	725.8	685.8	111.68
2	698.2	729.2	109.22
3	735.8	688.8	109.65
4	691.0	679.8	118.42
5	685.2	688.0	118.01
ค่าเฉลี่ยค่าความแข็ง เท่ากับ 113.39 HV_{30}			

ตารางที่ 4.2 ความแข็งมหภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์

	d_1	d_2	ค่าความแข็ง (HV_{30})
1	777.4	724.0	98.72
2	722.0	800.4	96.01
3	766.8	678.0	106.60
4	728.8	807.6	94.27
5	818.8	731.8	92.55
ค่าเฉลี่ยค่าความแข็ง เท่ากับ 97.72 HV_{30}			

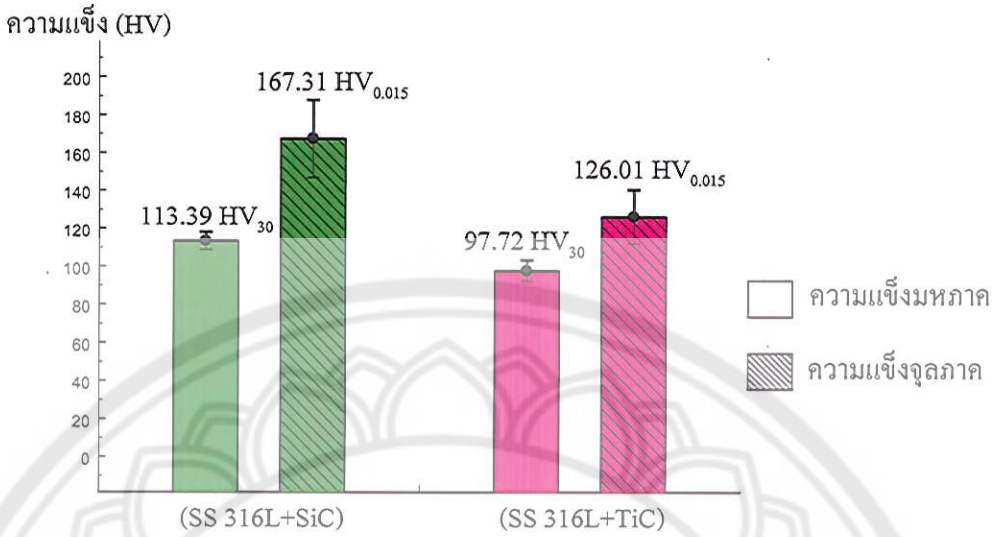
QD
906
.E37
0455
2550
สำนักหอสมุด
- 5 JUL 2011

ตารางที่ 4.3 ความแข็งจุลภาคภายในเกรนออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์

	d_1	d_2	ค่าความแข็ง ($HV_{0.015}$)
1	12.31	11.86	190.5
2	14.44	13.45	143.1
3	14.22	13.79	141.9
4	12.52	13.60	163.2
5	12.43	12.48	179.4
6	13.29	13.86	150.9
7	13.87	13.46	149.0
8	12.41	13.97	172.7
9	12.27	11.44	197.9
10	11.82	12.74	184.5
ค่าเฉลี่ยค่าความแข็ง เท่ากับ 167.31 $HV_{0.015}$			

ตารางที่ 4.4 ความแข็งจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์

	d_1	d_2	ค่าความแข็ง ($HV_{0.015}$)
1	12.99	13.74	155.8
2	14.18	14.44	135.9
3	15.20	16.09	113.6
4	14.24	13.87	140.8
5	15.34	16.20	111.8
6	15.19	14.53	125.9
7	15.74	15.09	117.0
8	15.61	15.75	113.1
9	15.10	15.20	121.2
10	15.25	14.58	125.0
ค่าเฉลี่ยค่าความแข็ง เท่ากับ 126.01 $HV_{0.015}$			



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความแข็งมหภาคและความแข็งจุลภาคในเกรนออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SS 316L+SiC) และไททาเนียมคาร์ไบด์ (SS 316L+TiC)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์และอนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนของออสเทนไนท์และบริเวณขอบเกรนที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง

2) เหล็กกล้าสเตนเลส 316L ที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์ และอนุภาคที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนซึ่งมีธาตุไททาเนียมสูงและมีลักษณะต่อเชื่อมกัน

3) เหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์มีความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการตกตะกอนของอนุภาคคาร์ไบด์ภายในเกรนออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

1) ควรมีการศึกษาตั้งแต่กระบวนการผลิตของชิ้นงานและการขึ้นรูป

2) ควรมีการศึกษาการเสริมแรงด้วยอนุภาคคาร์ไบด์อื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล

3) ควรมีการการทดสอบคุณสมบัติทางกลทางด้านอื่นๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เพื่อเป็นแนวทางพัฒนาโลหะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

4) เนื่องจากการเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีความยุ่งยาก ซับซ้อน อันเนื่องมาจากชิ้นงานมีรูพรุน ทำให้ยังไม่สามารถเตรียมชิ้นงานที่ดีและระบุถึงชนิดของอนุภาคที่ตกตะกอนได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาชนิดของอนุภาคที่ตกตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และสาโรช ฐิติเกียรติพงศ์ (2535) วัสดุในงานวิศวกรรม . กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[2] ชาตรี หลักทอง และคณะ (2540) วัสดุวิศวกรรมเบื้องต้น เล่ม 1 . กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล.

[3] พรศักดิ์ อรรถวานิช (2536) วัสดุศาสตร์ . กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

[4] สมศรี มีมา . วิทยานิพนธ์ (2548) "สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิทเหล็กกล้าสเตนเลสที่เสริมแรงด้วยอนุภาคสารประกอบคาร์ไบด์" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[5] A. Pyzalla, C. Genzel and W. Reimers, (1986), *Mater. Sci. Eng.*, A212, 130.

[6] E. Haimi, M. Talvitie and E.O. Ristolainen, (1995), *Scr. Metall. Mater.*, 30, 1333.

[7] F. Velasco and W.M. Lima., (2003), *Tribology International*, 36, 547-551.

[8] J. Abenojar, F. Velasco, A. Bautista and M. Campos, (2003), Composites Science and Technology, 63, 69-79.

ภาคผนวก

ผลงานที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ

Microstructure and Hardness of Stainless Steel 316L Reinforced with Silicon Carbide and Titanium Carbide

P. Apichai, A. Wiengmoon*
Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000
Corresponding Author: E-mail: ampornw@nu.ac.th

บทคัดย่อ: โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิทเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (โอเอ็ม) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (เอสอีเอ็ม) ส่วนผสมทางเคมีของคอมโพสิทวิเคราะห์ด้วยอีดีเอส และวัดสมบัติด้านความแข็งแบบวิคเกอร์ จากผลการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์จะประกอบด้วยเกรนของออสเตนไนท์และอนุภาคที่ไม่ต่อเนื่องบริเวณขอบเกรนและตกตะกอนอยู่ภายในเกรนของออสเตนไนท์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการแพร่ระหว่างอนุภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมและธาตุในอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ในกระบวนการซินเตอร์ริ่ง ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไททาเนียมคาร์ไบด์พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเกรนของออสเตนไนท์และอนุภาคของสารประกอบที่มีธาตุไททาเนียมสูงซึ่งมีลักษณะต่อเนื่องบริเวณขอบเกรนของออสเตนไนท์ อย่างไรก็ตามไม่พบการตกตะกอนของอนุภาคภายในเกรนของออสเตนไนท์ จากผลการวัดค่าความแข็งพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์มีความแข็งมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ อันเนื่องมาจากการตกตะกอนของอนุภาคภายในเกรนของออสเตนไนท์ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์

คำสำคัญ : โครงสร้างจุลภาค เหล็กกล้าไร้สนิม กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ ไททาเนียมคาร์ไบด์

Abstract: The microstructure of stainless steel 316L reinforced with silicon carbide and titanium carbide have been studied by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The chemical composition was analyzed by energy dispersive spectroscopy (EDS). Vickers hardness was also measured. It was found that the microstructure of SiC-added 316L composite consisted of austenite grains, and discontinuous particles phase at grain boundaries and within austenite grains. This is due to reaction between 316L powder particles and free elements diffused from SiC particles during sintering. In the case of TiC-added 316L composite, the microstructure consisted of austenitic grains, and continuous Ti-rich particles at grain boundaries. However, no particles precipitated within austenite grains. Vickers hardness of SiC-added 316L was higher than TiC-added 316L. This is due to the precipitation of particles within austenite grains in SiC-added 316L composite.

Keywords: microstructure, stainless steel, electron microscopy, SiC, TiC

โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์

ปัทมา อภิชัย และ อัมพร เวียงมูล
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะวิทยาศาสตร์ Faculty of Science

บทนำ

โดยทั่วไป แม่พิมพ์ (เช่น die และ punch) และเครื่องมือช่างมักจะทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ (tool steels) ที่มีสมบัติเด่นด้านความแข็งและความทนทานต่อการเสียดสี (wear resistance) อย่างไรก็ตาม die และ punch ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ มักเกิดเสนิมที่บริเวณผิว ทำให้เกิดการสะดุดระหว่างการใช้งาน ดังนั้นจึงมีความพยายามปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานกัดกร่อนให้ดีขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าสเตนเลส (Stainless Steels) เป็นวัสดุหนึ่งที่มีความต้านทานการกัดกร่อน แต่มีข้อด้อยคือความแข็งและความทนทานต่อการเสียดสีต่ำเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว สามารถทำได้โดยการผสมวัสดุที่มีความแข็งและทนทานต่อการเสียดสีได้ดี เช่น เซรามิก เพื่อทำให้เป็นวัสดุคอมโพสิท ดังนั้นจึงมีการพัฒนาคอมโพสิทเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิกเพื่อใช้ทดแทนเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีปัญหาด้านการกัดกร่อน [1-2]

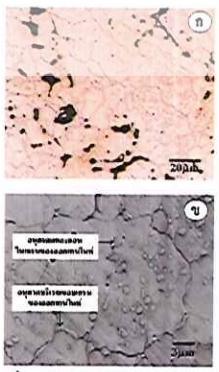
งานวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์

วิธีการทดลอง

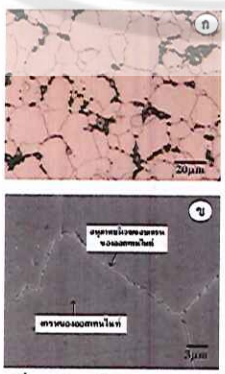
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316L ที่มีส่วนผสมทางเคมี คือ 0.03%C, 16-18.5%Cr, 10-14%Ni, 2-3%Mo, <2%Mn, <1%Si, <0.045%P, <0.03%S, Fe และเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และไททาเนียมคาร์ไบด์ในปริมาณ 6% โดยปริมาตร ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเฟสต่างๆ ด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive spectroscopy, EDS) และวัดค่าความแข็งมหภาคและจุลภาคแบบวิคเกอร์ (Vickers macrohardness & microhardness)

ผลการทดลอง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง OM พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยเกรนออสเทนไนท์ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และอนุภาคที่ตกตะกอนภายในเกรนและขอบเกรนของออสเทนไนท์ ดังรูปที่ 1(ก) จากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 1(ข) จะเห็นลักษณะของอนุภาคที่ขอบเกรนมีการเรียงตัวที่ไม่ต่อเนื่อง ส่วนโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์และอนุภาคบริเวณขอบเกรนที่มีการเรียงตัวอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2) อย่างไรก็ตามไม่พบอนุภาคภายในเกรนของออสเทนไนท์



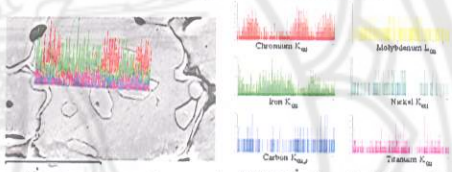
รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (ก, ข) ภาพถ่ายจากกล้อง OM และ SEM



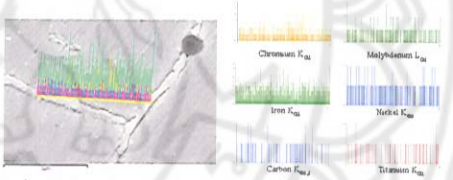
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ (ก, ข) ภาพถ่ายจากกล้อง OM และ SEM

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray line scanning (รูปที่ 3 & 4) พบว่าเกรนของออสเทนไนท์จะมีธาตุเหล็กละลายอยู่สูง ส่วนอนุภาคที่ตกตะกอนในเกรนและขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ จะมีซิลิกอนและคาร์บอนสูง ซึ่งน่าจะเป็นอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตาม พบว่ามีธาตุอื่นละลายอยู่ในอนุภาคทั้ง 2 บริเวณ ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของธาตุจากเกรนออสเทนไนท์ในกระบวนการซินเตอร์ริ่ง ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ พบว่าอนุภาคที่ขอบเกรนจะมีไททาเนียมและคาร์บอนสูง และมีการกระจายตัวของธาตุอื่นๆ เช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์

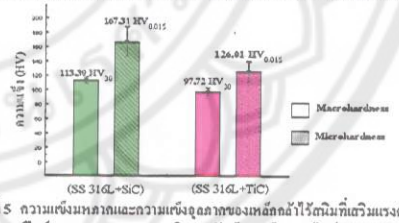
จากการวัดค่าความแข็งมหภาคและจุลภาคภายในเกรนของออสเทนไนท์ ดังรูปที่ 5 พบว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์สูงกว่าที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ อาจเป็นผลมาจากการตกตะกอนของอนุภาคในเกรนออสเทนไนท์



รูปที่ 3 X-ray line scanning ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4 X-ray line scanning ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์



รูปที่ 5 ความแข็งมหภาคและความแข็งจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SS 316L+SiC) และเสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ (SS 316L+TiC)

สรุปผลการทดลอง

1. โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์และสารประกอบซิลิกอนคาร์ไบด์ในเกรนและขอบเกรนของออสเทนไนท์ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ประกอบด้วยเกรนออสเทนไนท์และสารประกอบไททาเนียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน
2. เหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์มีความแข็งมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือตรวจชิ้นงานและกล้อง SEM และภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดความแข็ง

เอกสารอ้างอิง

[1] บัญชา ธนบุญสมบัติ. เทคโนโลยีและโลหะวิทยาของเหล็กหล่อผสม . กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ , มปป .

[2] สมศรี มีมา. วิทยานิพนธ์ "สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิทเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคสารประกอบคาร์ไบด์" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2548