

ผลของทั้งสแตนและกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr

Effects of Tungsten and Heat Treatment on Microstructure and Hardness of 28 wt.%Cr High Chromium Cast Irons

ศศิธร ยี่คว และ อัมพร เวียงมูล*

Sasitorn Yeekew and Amporn Wiengmoon*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University

Received : 12 June 2017

Accepted : 11 September 2017

Published online : 21 September 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของทั้งสแตนและกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr ที่เติมทั้งสแตน 1 wt.% โดยนำเหล็กที่ผ่านการหล่อไปปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1025°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าเหล็กหล่อที่ไม่เติมทั้งสแตนมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์ของออสเตนไนต์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ยูเทกติกชนิด M_7C_3 ส่วนเหล็กหล่อที่เติมทั้งสแตนประกอบด้วยเฟสคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ยูเทกติก M_7C_3 หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนพบคาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนในมาร์เทนไซต์ หลังการอบคืนตัวปริมาณคาร์ไบด์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้น โดยเหล็กหล่อที่ไม่เติมทั้งสแตนและเติมทั้งสแตนในสภาพหล่อมีความแข็ง 507 และ 576 HV30 หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 736 และ 780 HV30 หลังการอบคืนตัวมีค่าเท่ากับ 743 และ 805 HV30

คำสำคัญ : เหล็กหล่อโครเมียมสูง การปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน การอบคืนตัว โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง

Abstract

In this research, effect of tungsten and heat treatment on microstructure and hardness of 28 wt.%Cr high chromium iron with 1 wt.%W addition was studied. The as-cast samples were destabilised at 1025°C for 4 h and tempering at 450°C for 4 h. It was found that the as-cast microstructure of the iron without W addition consisted of primary austenite dendrite with eutectic M_7C_3 carbides. The iron with W addition consisted of primary and eutectic M_7C_3 carbides. After destabilisation, precipitation of secondary carbide within martensite matrix was occurred in both irons. Tempering increased the amount of secondary carbide. The as-cast hardness of the irons without and with W addition were 507 and 576 HV30. After destabilisation, the hardness increased up to 736 and 780 HV30. After tempering, the hardness were 743 and 805 HV30.

Keywords : high chromium cast iron, destabilisation, tempering, microstructure, hardness

*Corresponding author. E-mail : ampornw@nu.ac.th

บทนำ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีโครเมียม 25-30 wt.% และคาร์บอน 2-3 wt.% มักนำไปใช้งานในสภาวะที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอและการกัดกร่อน เช่น ปัมป์สูบลำดับชั้นเหลวในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากการหล่อ (As-cast) ประกอบด้วยเดนไดรต์ของออสเตนไนต์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ยูเทคติกและยูเทคติกออสเตนไนต์ มีความแข็ง 450-550 HV อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบออสเตนไนต์จะมีความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงโดยการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (Destabilisation) และการเติมธาตุ (Pearce, 1986; Tabrett, 1996)

การปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 950-1100°C ในระยะเวลาที่เหมาะสม แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จะทำให้คาร์บอนและโครเมียมในเนื้อพื้น (Matrix) รวมกันเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Secondary carbide) และส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนในเนื้อพื้น (Matrix) ของออสเตนไนต์ลดลง ทำให้ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) ของออสเตนไนต์เพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ง่ายขึ้น หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในมาร์เทนไซต์และมีออสเตนไนต์ตกค้างบางส่วน ทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น (Wiengmoon, 2005; Agunsoye, 2012) อย่างไรก็ตามออสเตนไนต์ตกค้างมักจะทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการใช้งานทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก จึงจำเป็นต้องทำการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 450-650°C เพื่อให้ออสเตนไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเพิร์ลไลต์ หรือเฟอร์ไรท์+คาร์ไบด์ $M_{23}C_6$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของออสเตนไนต์ตกค้าง (Maratray, 1982; Tabrett, 1996) จากงานวิจัยของ Wiengmoon (2005) ที่ได้ศึกษาการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนในเหล็กหล่อโครเมียมสูง 30 wt.%Cr ที่อุณหภูมิ 900-1100°C เป็นเวลา 2-8 ชั่วโมง พบว่าความแข็งมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1025°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากงานวิจัยของ Agunsoye (2012) ได้ศึกษาการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 680°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในเหล็กหล่อ 22 wt.%Cr-2.93 wt.%C พบว่าเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังการหล่อก็มีความแข็ง 630 HV30 หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและอบคืนตัวความแข็งมีค่าเป็น 760 และ 660 HV30 ตามลำดับ

การเติมธาตุ เช่น ทังสเตน วาเนเดียม และโมลิบดีนัม โดยธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง ทำให้ความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อสูงขึ้น (Mousavi, 2007; Scandian, 2009; Ma, 2013; Imurai, 2014, 2015) การเติมทังสเตนในเหล็กหล่อโครเมียมสูง 25 wt.%Cr-4.5 wt.%C ทำให้ความแข็งของคาร์ไบด์ M_7C_3 เพิ่มขึ้น (Yamamoto, 2014) และในปี 2015, Imurai และคณะ ได้ศึกษาผลของการเติมทังสเตนในเหล็กหล่อ 28 wt.%Cr พบคาร์ไบด์หลายชนิดและความแข็งหลังจากการหล่อเพิ่มขึ้นจาก 495 HV เป็น 671 HV เมื่อเติมทังสเตน 10 wt.% อย่างไรก็ตามในงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ศึกษาผลของกระบวนการทางความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาผลของการเติมทังสเตน การปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและการอบคืนตัวต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr

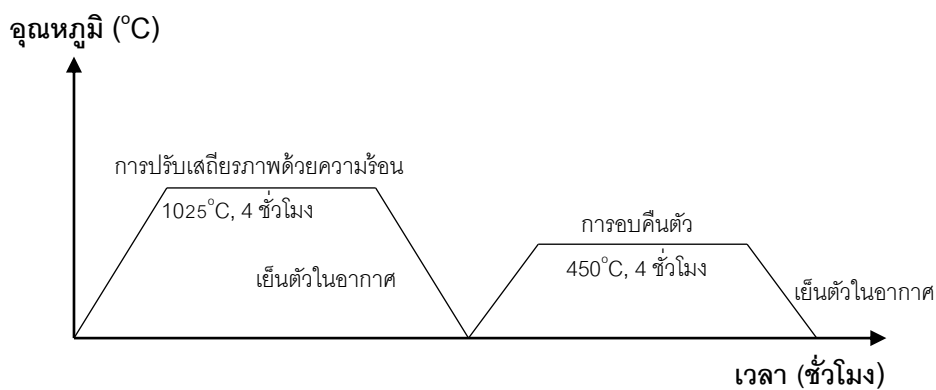
วิธีดำเนินการวิจัย

เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลองเตรียมโดยการหล่อในแบบหล่อทราย มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยเหล็กหล่อที่ไม่เติมทังสเตน (R) และเติมทังสเตน 1 wt.% (W1) โดยนำเหล็กหล่อไปปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1025°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ (Air cooling) จากนั้นนำไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

ดังแสดงในภาพที่ 1 จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 360, 600 และ 1000 ตามลำดับ นำไปขัดละเอียดด้วยผงขัดเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ กัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 50 มิลลิลิตร ผสมกับโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำชิ้นงานไปศึกษาชนิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์โดยใช้น้ำหนักในการกด 30 กิโลกรัม (HV30) เป็นเวลา 15 วินาที (Dwell time) โดยทำการกด 8 จุดต่อชิ้นงาน และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อที่ใช้ในการทดลอง

เหล็กหล่อ	Element (wt.%)									
	Cr	C	W	Mo	Mn	Ni	S	Si	P	Fe
R	27.86	2.36	0.01	0.03	0.11	0.20	0.01	0.02	0.02	Bal.
W1	26.67	2.87	0.99	0.03	0.15	0.22	0.01	0.44	0.03	Bal.

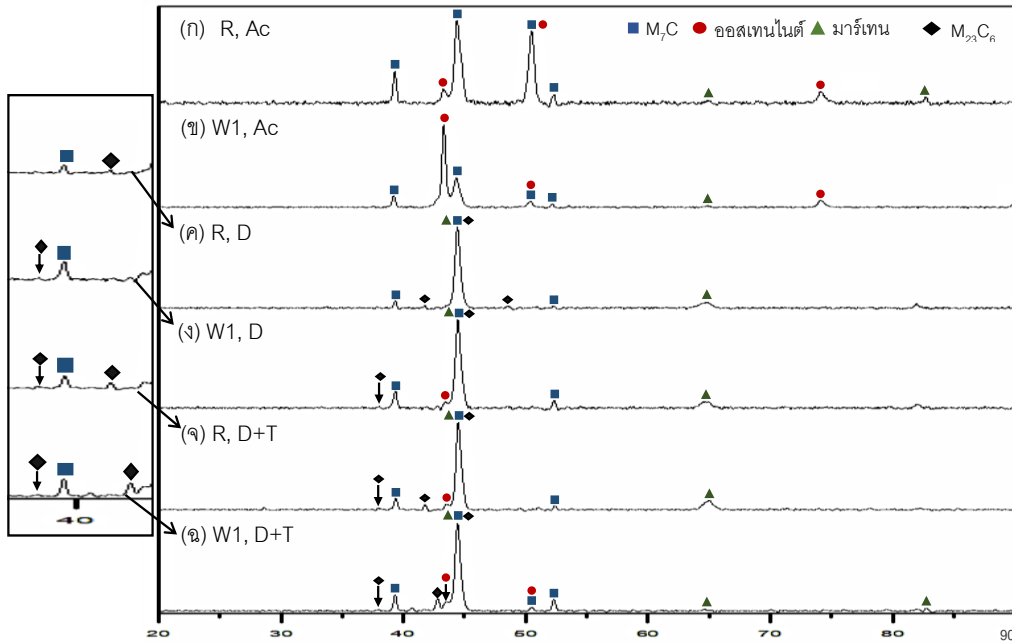


ภาพที่ 1 กระบวนการทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลอง

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การศึกษาชนิดเฟสด้วยเทคนิค XRD

ภาพที่ 2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr จากการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS พบว่าเหล็กหล่อที่ไม่เติมทั้งสแตน (R) และเติมทั้งสแตน (W1) ประกอบด้วยเฟสออสเทนไนต์ มาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 ดังแสดงในภาพที่ 2(ก-ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Imurai (2015) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนพบว่าเหล็กหล่อทั้งสองประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์ M_7C_3 , M_{23}C_6 และออสเทนไนต์ ตกค้างเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 2(ค-ง) หลังการอบคืนตัวพบว่ามีเฟสเช่นเดียวกับการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ M_{23}C_6 เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2(จ-ฉ) เนื่องจากในระหว่างการอบคืนตัวจะเกิดการตกตะกอนของเฟสคาร์ไบด์ รวมทั้งเฟสออสเทนไนต์ตกค้างจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ โดยเฟสคาร์ไบด์ M_{23}C_6 น่าจะเป็นคาร์ไบด์ทุติภูมิหรือเทมเปอคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนหรือการอบคืนตัว (Maratray, 1982)

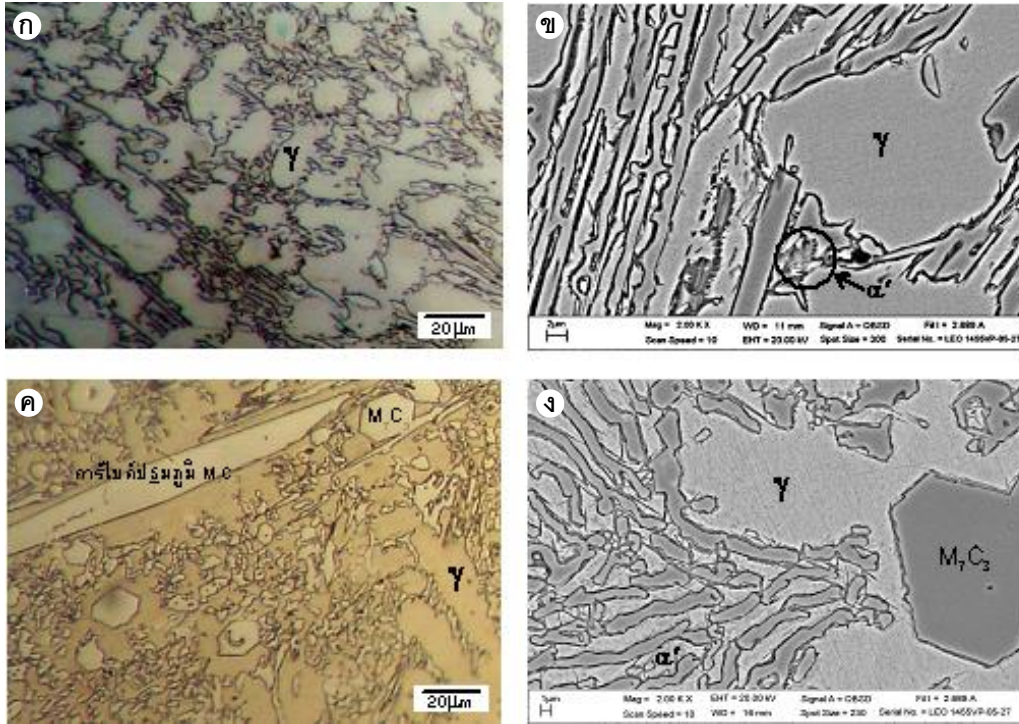


ภาพที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr ที่ไม่เติมทั้งสแตน (R) และเติมทั้งสแตน , W1 (ก-ข) หลังการหล่อ, AC (ค-ง) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน, D (จ-ฉ) หลังการอบคืนตัว, D+T

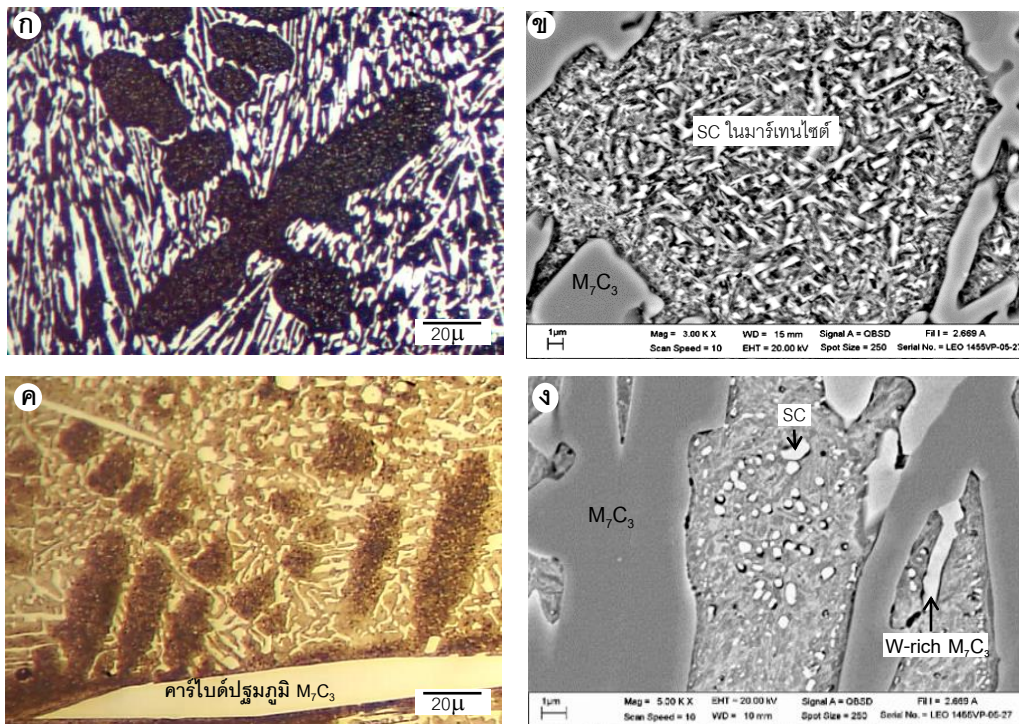
2. โครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังจากการหล่อพบว่าเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมทั้งสแตน (R) มีโครงสร้างแบบไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) ที่ประกอบด้วยเฟสเดนไดรต์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ (γ) คาร์ไบด์ยูเทคติก M_7C_3 และยูเทคติกออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ (α') ดังแสดงในภาพที่ 3(ก-ข) ส่วนเหล็กหล่อ W1 มีโครงสร้างแบบไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ที่ประกอบด้วยคาร์ไบด์ปฐมภูมิ M_7C_3 ที่มีขนาดใหญ่ คาร์ไบด์ยูเทคติกชนิด M_7C_3 และยูเทคติกออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ดังแสดงในภาพที่ 3(ค-ง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Imurai (2015) การเติมทั้งสแตนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนจากไฮโปยูเทคติกไปเป็นไฮเปอร์ยูเทคติกอาจเนื่องมาจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเปลี่ยนไปอยู่ในช่วงของไฮเปอร์ยูเทคติกซึ่งทำให้เกิดเฟสคาร์ไบด์ปฐมภูมิ M_7C_3 โดยทั้งสแตนจะเข้าไปแทนที่อะตอมของเหล็กและโครเมียมในคาร์ไบด์ยูเทคติกและเนื้อพื้น

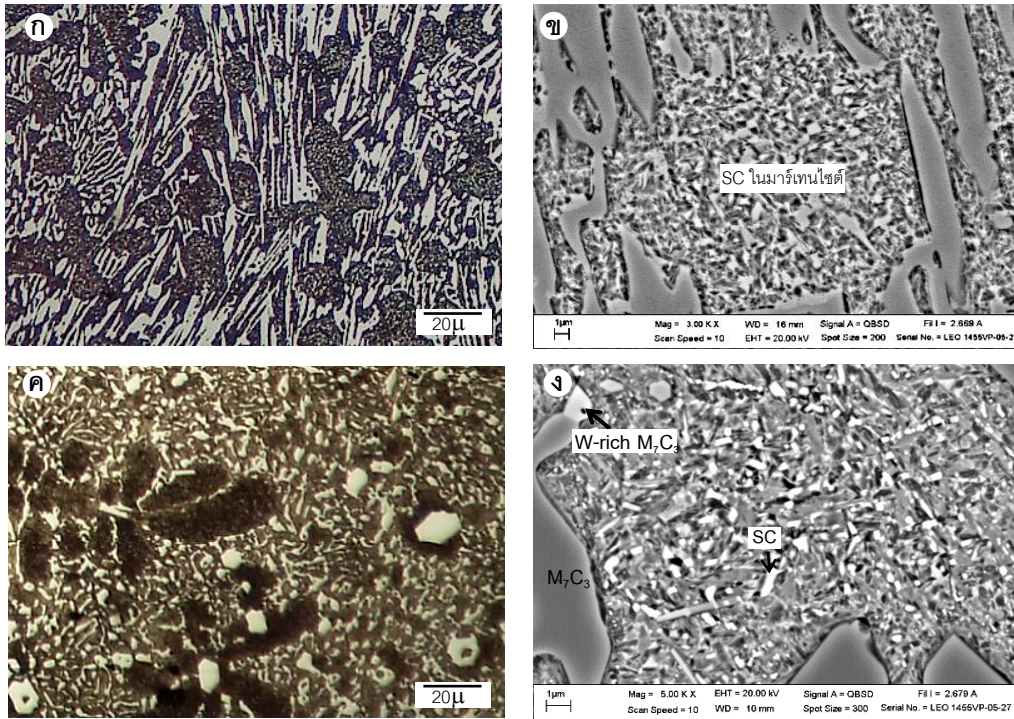
หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนพบคาร์ไบด์ทุติยภูมิ (SC) ตกตะกอนในเดนไดรต์ของออสเทนไนต์ซึ่งเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ขณะเย็นตัวในอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4 หลังการอบคืนตัวพบว่าในเหล็กหล่อทั้งสองชนิดจะมีคาร์ไบด์ทุติยภูมิเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่ น่าจะเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่เกิดระหว่างการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและโตในระหว่างการอบคืนตัว ส่วนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก น่าจะเกิดขึ้นในระหว่างการอบคืนตัว (Temper carbide) โดยคาร์ไบด์ทุติยภูมิและเทมเปอคาร์ไบด์เกิดจากคาร์บอนและโครเมียมในเนื้อพื้นรวมกัน เกิดเป็นสารประกอบของคาร์ไบด์ จากภาพถ่ายแบบ BEI ในภาพที่ 4(ง) และ 5(ง) จะเห็นบริเวณที่มีคอนทราสต์ต่างกัน จากการวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าบริเวณคาร์ไบด์ยูเทคติกที่มีคอนทราสต์สว่างกว่า (W-rich M_7C_3) ในบริเวณที่ 1 จะมีปริมาณทั้งสแตนมากกว่าบริเวณที่ 2 ส่วนเมทริกซ์จะมีธาตุเหล็กปริมาณสูง (บริเวณที่ 3) ดังแสดงในภาพที่ 6



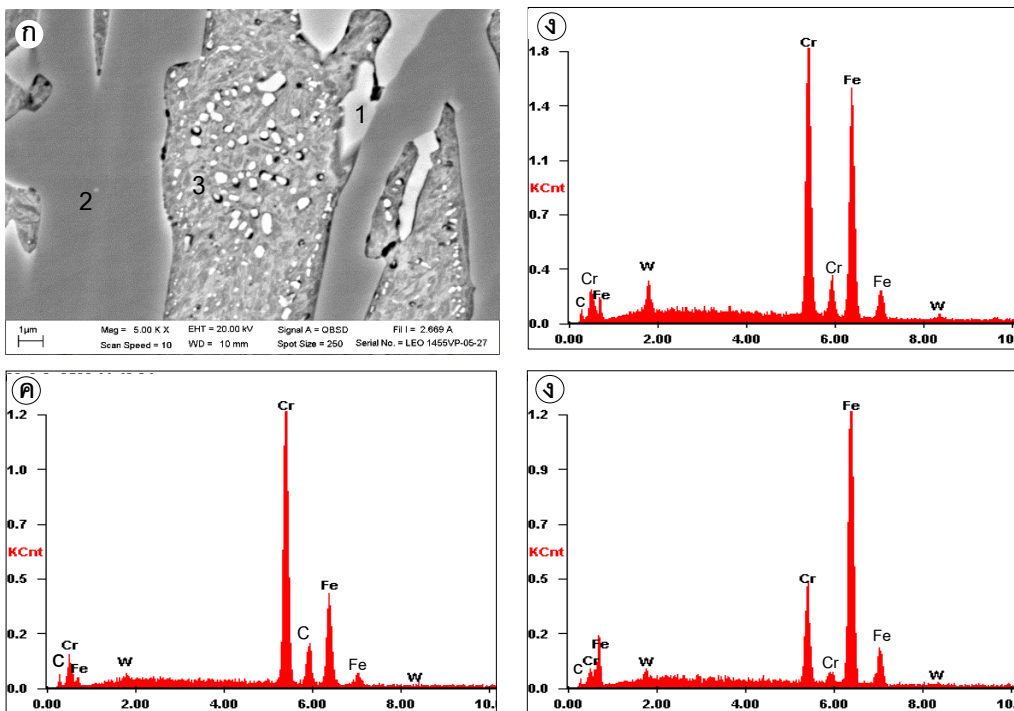
ภาพที่ 3 ภาพถ่ายจากกล้อง OM และกล้อง BEI-SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังจากการหล่อ (ก-ข) เหล็กหล่อที่ไม่เติมทั้งสแตน (ค-ง) เหล็กหล่อที่เติมทั้งสแตน



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายจากกล้อง OM และกล้อง BEI-SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (ก-ข) เหล็กหล่อที่ไม่เติมทั้งสแตน (ค-ง) เหล็กหล่อที่เติมทั้งสแตน



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายจากกล้อง OM และกล้อง BEI-SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังการอบคืนตัว (ก-ข) เหล็กหล่อที่ไม่เต็มทั้งสแตน (ค-ง) เหล็กหล่อที่เต็มทั้งสแตน

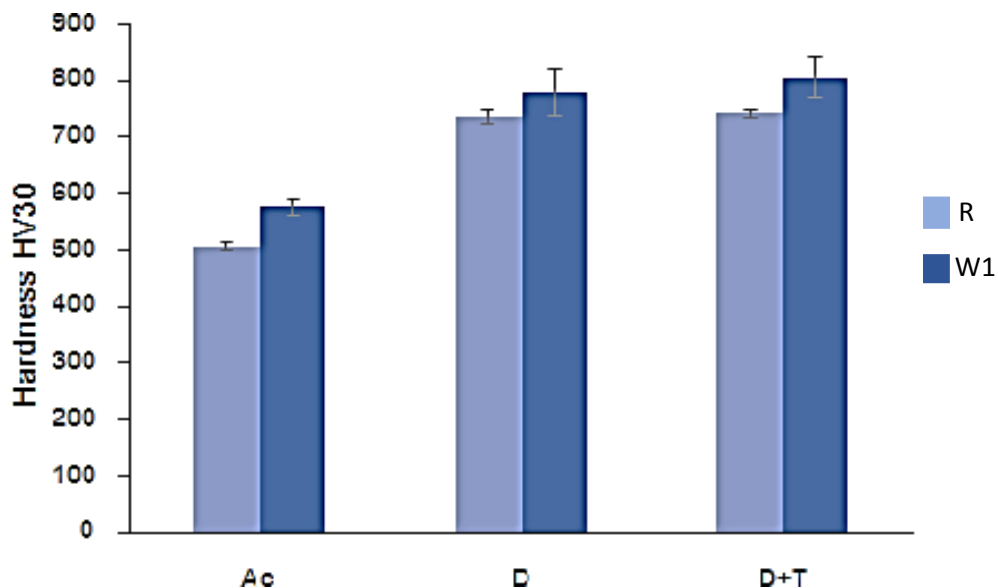


ภาพที่ 6 (ก) ภาพถ่าย BEI-SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อที่เต็มทั้งสแตนหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (ข-ง) สเปกตรัมของธาตุจาก EDS บริเวณ (1) W-rich M_7C_3 (2) คาร์ไบด์ยูเทคติก M_7C_3 (3) เมทริกซ์

3. ผลของทั้งสแตนและกระบวนการทางความร้อนต่อความแข็ง

จากการวัดความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลังจากการหล่อ (AC) พบว่าเหล็กหล่อที่ไม่เต็มทั้งสแตน (R) และเหล็กหล่อที่เต็มทั้งสแตน (W1) มีความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 507 และ 576 HV30 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 7 การเติมทั้งสแตนทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ยูเทคติกเพิ่มขึ้น (Imurai, 2015) โดยอะตอมของทั้งสแตนจะเข้าไปแทนที่อะตอมของเหล็กในคาร์ไบด์ ($\text{Fe,Cr,W}_7\text{C}_3$) (Yamamoto, 2014)

หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (D) ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 736 และ 780 HV30 ตามลำดับ ส่วนหลังการอบคืนตัว (D+T) มีความแข็งเท่ากับ 743 และ 805 HV30 การปรับเสถียรภาพทางความร้อนทำให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการหล่อ เนื่องจากมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิและเมทริกซ์ออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ที่แข็งกว่า ส่วนการอบคืนตัวส่งผลให้ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิและเทมเปอคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น รวมทั้งออสเทนไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ (Inthidech, 2010) อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของออสเทนไนต์ที่ตกค้างมีปริมาณต่ำ หรือระยะเวลาในการอบคืนตัวสั้นเกินไปทำให้การตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิและเทมเปอคาร์ไบด์ยังไม่สมบูรณ์



ภาพที่ 7 ผลของทั้งสแตนและกระบวนการทางความร้อนต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr ที่ไม่เต็มทั้งสแตน (R) และเต็มทั้งสแตน (W1) หลังจากการหล่อ (AC) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (D) และการอบคืนตัว (D+T)

สรุปผลการวิจัย

1. โครงสร้างจุลภาคหลังจากการหล่อของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr ที่ไม่เต็มทั้งสเดนประกอบด้วย เคนไดรท์ของอสเทนไนต์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ยูเทคติก M_7C_3 และยูเทคติกอสเทนไนต์ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ เมื่อเต็มทั้งสเดน 1 wt.% จะพบคาร์ไบด์ปฐมภูมิ M_7C_3
2. โครงสร้างจุลภาคหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เต็มและเต็มทั้งสเดน ประกอบด้วยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในมาร์เทนไซต์ และเฟสอสเทนไนต์ตกค้าง
3. การอบคืนตัวหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน ทำให้เฟสอสเทนไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ส่งผลให้ เเทมเปอร์คาร์ไบด์และคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีปริมาณเพิ่มขึ้น
4. การเต็มทั้งสเดนและการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น การอบคืนตัวทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ทนุอดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

เอกสารอ้างอิง

- Agunsoye, J.O. and Ayeni, A.A. (2012). Effect of heat treatment on the abrasive wear behavior of high chromium iron under dry sliding condition, *Tribology in Industry*, 34(2), 82-91.
- Inthidech, S., Boonmak, K., Sritharoenchai, P., Sasaguri, N. and Matsubara, Y. (2010). Effect of repeated tempering on hardness and retained austenite of high chromium cast iron containing molybdenum, *Materials Transactions*, 51(7), 1264-1271.
- Imurai, S., Thanachayanont, C., Pearce, J.T.H., Tsuda, K., and Chairuangstri, T. (2014). Effect of Mo on microstructure of as-cast 28 wt.%Cr-2.6 wt.%C-(0-10) wt.%Mo irons, *Materials Characterization*, 90, 99-112.
- Imurai, S., Thanachayanont, C., Pearce, J.T.H., Tsuda, K. and Chairuangstri, T. (2015). Effect of W on microstructure of as-cast 28 wt.%Cr-2.6 wt.%C-(0-10) wt.%W iron, *Materials Characterization*, 99, 52-60.
- Ma, Y., Li, X., Liu, Y., Zhou, S. and Dang, X. (2013). Microstructure and properties of Ti-Nb-V-Mo-alloyed high chromium cast iron, *Bulletin of Materials Science*, 36(5), 839-844.
- Maratray, F. and Poulalion, A. (1982). Austenite retention in high-chromium white irons, *AFS Transactions*, 90, 795-804.
- Mosavi Anijden, S.H., Bahrami, A., Varahram, N., and Davamic, P. (2007). Effect of tungsten on erosion-corrosion behavior of high chromium white cast iron, *Materials Science and Engineering*, 454-455, 623-628.

- Pearce, J.T.H. and Elwell, D.W.L. (1986). Duplex nature of eutectic carbides in heat treated 30% chromium cast iron, *Journal of Materials Science Letters*, 5, 1063-1064.
- Scandian, C., Boher, C., Melloc de, J.D.B. and Rézaï-Ariab, F. (2009). Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear, *Wear*, 267, 401-408.
- Tabrett, C.P., Sare, I.R. and Ghomashchi, M.R. (1996). Microstructure–property relationships in high chromium cast iron alloys, *International Materials Reviews*, 41, 59-82.
- Wiengmoon, A., Chairuangsi, T., Brown, A., Brydson, R., Edmonds, D.V., and Pearce, J.T.H. (2005). Microstructural and crystallographical study of carbides in 30 wt.%Cr cast irons, *Acta Materialia*, 53, 4143-4154.
- Yamamoto, K., Inthidech, S., Sasaguri, N. and Matsubara, Y. (2014). Influence of Mo and W on high temperature hardness of M_7C_3 carbide in high chromium white cast iron, *Materials Transactions*, 55 (4), 684-689.