

ผลของกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo High Chromium Cast Iron

เบญจวรรณ ทองชื่นตระกูล และ อัมพร เวียงมูล *

Benjawan Thongchuentrakool and Amporn Wiengmoon *

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University

Received : 12 June 2017

Accepted : 1 September 2017

Published online : 15 September 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo ที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อทรายและปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเย็นตัวในอากาศ ทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทดสอบความแข็ง จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างหลังการหล่อประกอบด้วยเดนไดรต์ของออสเตนไนต์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ยูเทกติก M_7C_3 และ M_6C หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนพบคาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนในแมทริกซ์มาร์เทนไซต์และมีออสเตนไนต์ตกค้างบางส่วน ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น การอบคืนตัวทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากออสเตนไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์และปริมาณเทมเปอร์คาร์ไบด์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : เหล็กหล่อโครเมียมสูง การปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน อบคืนตัว โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง

Abstract

In this research, effect of heat treatment on microstructure and hardness of 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo high chromium cast iron has been studied. The iron was cast into sand mold and destabilised at 1025°C for 4 h and then air cooled. Tempering was done at 450°C for 2, 4, 6 h. Microstructural investigation was performed by XRD, LM and SEM. Vickers hardness was tested. It was found that the as-cast microstructure consisted of primary austenite dendrite with eutectic carbides including M_7C_3 and M_6C . After destabilisation, precipitation of secondary carbide within martensite matrix and some of retained austenite were occurred. The hardness increased after destabilisation. Tempering increase the hardness due to the transformation of retained austenite to martensite, and more temper-carbide.

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

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

บทนำ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงมักถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอ เช่น ลูกบิดหรือปั๊มสูบสารขึ้นเหลวในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เนื่องจากในโครงสร้างประกอบด้วยคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในงานส่วนใหญ่เป็นแบบไฮโปยูเทคติกที่มีโครเมียม 10-30 wt.% และคาร์บอน 2-3 wt.% โครงสร้างจุลภาคหลังจากการหล่อ (As-cast) ประกอบด้วยเดนไดรต์ของออสเตนไนต์ ระหว่างแกนเดนไดรต์จะประกอบด้วยโครงสร้างของยูเทคติกซึ่งประกอบด้วยคาร์ไบด์ยูเทคติกและยูเทคติกออสเตนไนต์ มีความแข็ง 500-520 HV ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอขึ้นกับชนิดของเมทริกซ์ ชนิด ลักษณะ และปริมาณของคาร์ไบด์ยูเทคติก อย่างไรก็ตามเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีเมทริกซ์เป็นออสเตนไนต์จะมีความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติดังกล่าวได้โดยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่เรียกว่าการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (Destabilisation) และการเติมธาตุ (Alloying element) (Pearce, 1999, Tabrett, 1996, Wiengmoon, 2011)

การปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนจะทำให้คาร์บอนและโครเมียมในเมทริกซ์แยกตัวออกมารวมกันเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ทำให้ปริมาณคาร์บอนในเมทริกซ์ของออสเตนไนต์ลดลง ทำให้ความสามารถในการชุบแข็งของออสเตนไนต์เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ออสเตนไนต์จะเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ได้ยากขึ้นหรือโอกาสที่จะได้มาร์เทนไซต์สูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนประกอบด้วยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในเมทริกซ์มาร์เทนไซต์และมีออสเตนไนต์ตกค้างบางส่วน (Pearce, 1999, Wiengmoon, 2011) ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 700-850 HV อย่างไรก็ตามเฟสออสเตนไนต์ตกค้างมักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการใช้งานทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก การลดปริมาณเฟสออสเตนไนต์ตกค้างหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนมักทำการอบคืนตัว (Tempering) ซึ่งจะทำให้ให้ออสเตนไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ส่งผลให้เหล็กหล่อมีความแข็งสูงขึ้น (Wiengmoon, 2012) ส่วนการเติมธาตุ เช่น ทังสเตน วาเนเดียม ไททาเนียม โมลิบดีนัม เป็นต้น โดยธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง ทำให้ปริมาณคาร์ไบด์ยูเทคติกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อสูงขึ้น (Zni, 2008, Scandian, 2009, Imurai, 2014, Imurai, 2015) การเติมโมลิบดีนัมในเหล็กหล่อโครเมียมสูงมักจะทำให้เกิดคาร์ไบด์ชนิด M_2C หรือ M_6C ขึ้นกับอัตราส่วนของโครเมียมกับคาร์บอน (Tabrett, 1996) นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมการเปลี่ยนแปลงเฟสของออสเตนไนต์ในระหว่างการเย็นตัวในแบบหล่อหรือระหว่างการอบคืนตัว (Maratray, 1982) ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและการอบคืนตัวต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr ที่เติมโมลิบดีนัม 1 wt.%

วิธีดำเนินการวิจัย

เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลองเตรียมโดยการหล่อในแบบหล่อทราย มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ประกอบด้วยการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และนำมาอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 360, 600 และ 1000 ตามลำดับ นำมาขัดละเอียดด้วยผงขัดเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน และกัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 50 มิลลิลิตร ผสมกับโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_5$) 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เพื่อดูโครงสร้างจุลภาคทั่วไป และกรดไฮโดรคลอริก 10 มิลลิลิตร ในเมทานอล 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 18 ชั่วโมง (Deep etching) เพื่อดูลักษณะและรูปร่างของคาร์ไบด์ จากนั้นนำชิ้นงานไปศึกษาชนิดเฟสก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบความแข็งโดยรวมแบบวิกเกอร์ โดยการนำเหล็กที่เตรียมสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่ไม่ได้กัดผิวมาทดสอบ โดยใช้หัวกดแบบเพชร น้ำหนักในการกด 30 กิโลกรัมแรง (HV30) เป็นเวลา 15 วินาที (Dwell time) โดยทำการกด 8 จุดต่อชิ้นงาน และนำมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนความแข็งจุลภาคบริเวณเดนไดรท์ทดสอบแบบวิกเกอร์ โดยการนำเหล็กหล่อที่ผ่านการกัดผิวด้วยสารละลายมาทดสอบ โดยใช้น้ำหนักในการกด 100 กรัมแรง (HV0.1) เป็นเวลา 15 วินาที ชิ้นงานละ 8 จุด และนำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)									
Cr	C	Mo	Mn	S	P	Ni	W	Si	Fe
27.65	2.68	1.42	0.11	0.01	0.03	0.18	0.01	0.26	Bal.

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. โครงสร้างจุลภาค

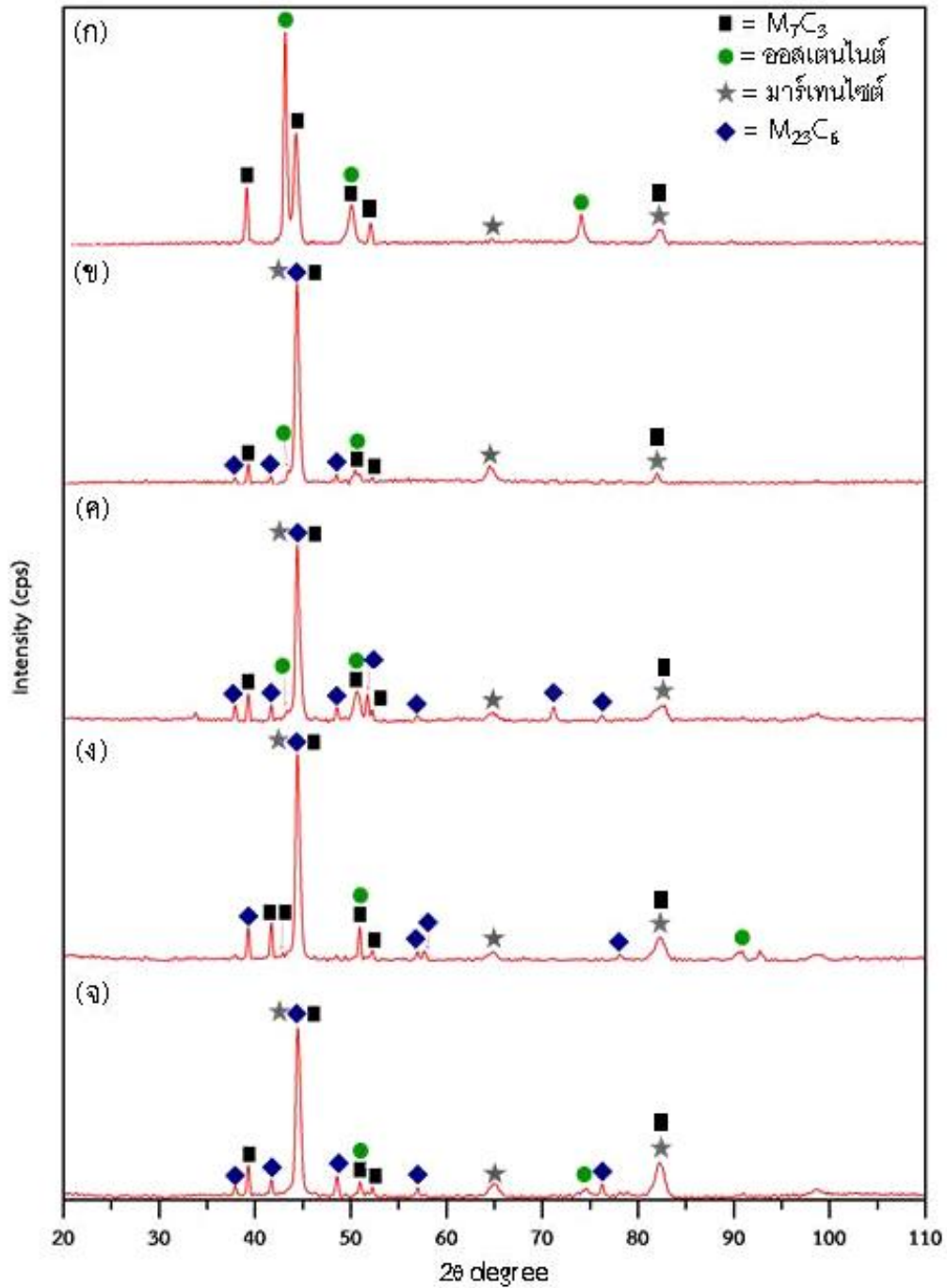
ภาพที่ 1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในเหล็กหล่อโครเมียมสูงก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน พบว่าหลังการหล่อ (ภาพที่ 1ก) ประกอบด้วยเฟสออสเทนไนต์ มาร์เทนไซต์ และคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 ($M = Fe, Cr, Mo$) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ภาพที่ 1ข) และหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง (ภาพที่ 1ค-จ) ประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$, M_7C_3 และออสเทนไนต์ตกค้าง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อประกอบด้วยเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ (γ) ยูเทคติกออสเทนไนต์ ที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ (α') และคาร์ไบด์ยูเทคติกชนิด M_7C_3 และ M_6C ในปริมาณเล็กน้อย (ภาพที่ 2(ก-ข)) จากถ่ายภาพ SEM แบบ Backscattered electron image (BEI) จะสังเกตเห็นว่าคาร์ไบด์ชนิด M_6C จะมีคอนทราสต์สว่างกว่าคาร์ไบด์ M_7C_3 เนื่องจากคาร์ไบด์ M_6C มีปริมาณธาตุโมลิบดีนัมที่มีเลขอะตอมสูงกว่าคาร์ไบด์ M_7C_3 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS) ดังแสดงในภาพที่ 2(ค-จ) อย่างไรก็ตามผลจาก XRD ไม่ปรากฏพีคของคาร์ไบด์ M_6C อาจเนื่องมาจากมีปริมาณน้อยจนไม่สามารถตรวจพบด้วยเทคนิค XRD

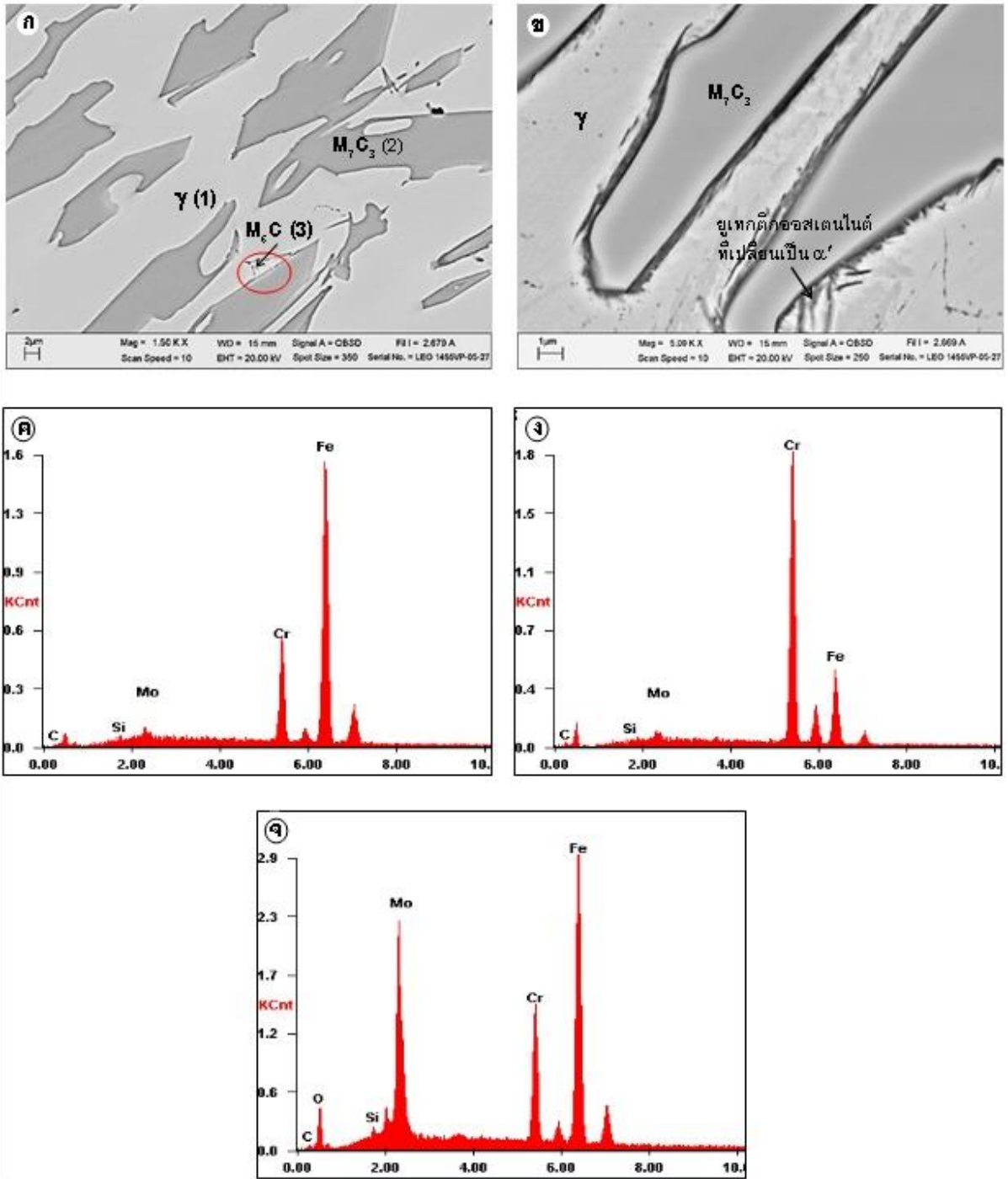
หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูง ประกอบด้วยคาร์ไบด์ ยูเทคติกและคาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Secondary carbide, SC) ที่ตกตะกอนในเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิซึ่งเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ขณะเย็นตัวในอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3(ก-ข) โดยคาร์ไบด์ทุติยภูมิมักมีลักษณะเป็นแท่งยาวและเชื่อมต่อกันเป็นตาข่าย (Fibrous shape) จากงานวิจัยของ Wiengmoon (2011) พบว่าเหล็กหล่อโครเมียมที่มีส่วนผสม 25-30 wt.%Cr จะมีคาร์ไบด์ทุติยภูมิเป็นชนิด $M_{23}C_6$ ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งขนาดเล็กต่อเชื่อมกันเป็นตาข่าย

หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและตามด้วยการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่ามีคาร์ไบด์ขนาดเล็กตกตะกอนในเดนไดรท์ของมาร์เทนไซต์และบริเวณยูเทคติกออสเทนไนต์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน ซึ่งคาร์ไบด์เหล่านี้ อาจเกิดขึ้นระหว่างการปรับเสถียรภาพ

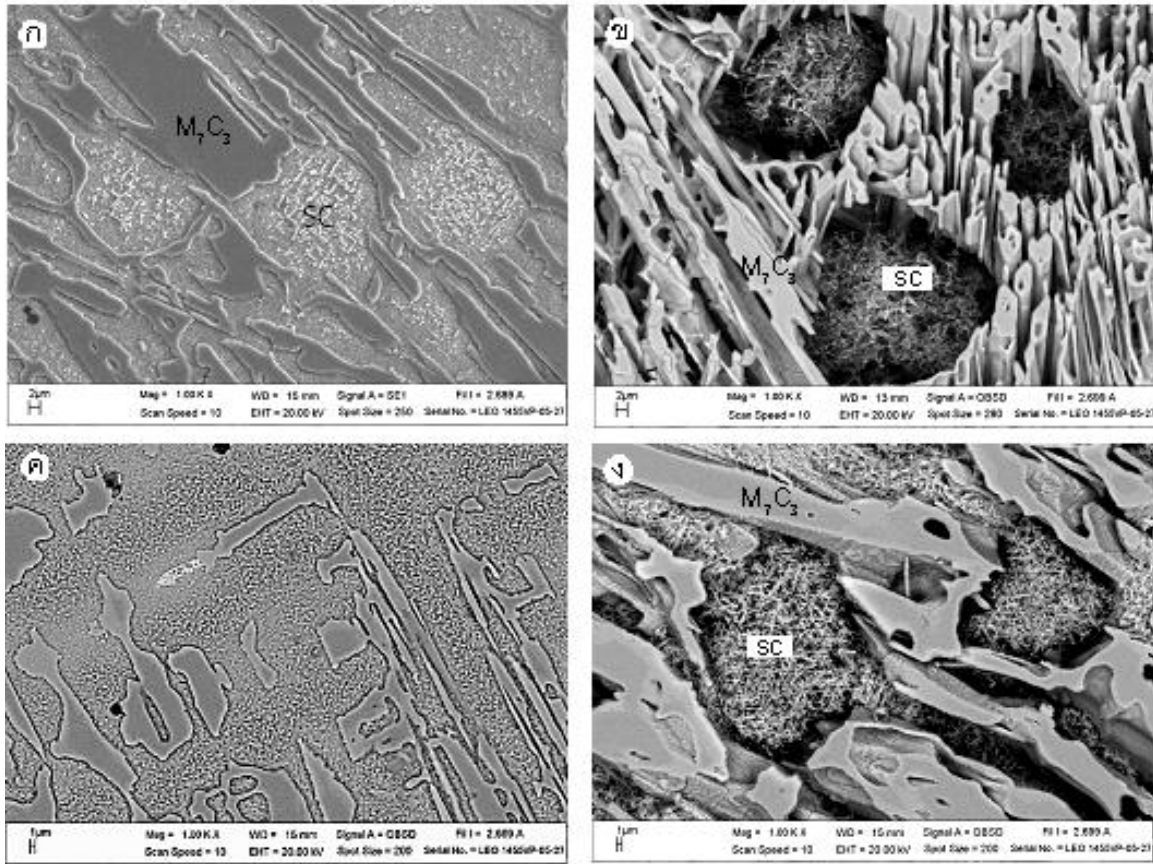
ด้วยความร้อนและโตในระหว่างการอบคืนตัว หรือเกิดการตกตะกอนระหว่างการอบคืนตัวที่เรียกว่า เคมเปอคาร์ไบด์ (Temper-carbide) (Wiengmoon, 2012) โดยเคมเปอคาร์ไบด์จะมีขนาดเล็กกว่าคาร์ไบด์ทุติยภูมิ เมื่อเวลาในการอบคืนตัวนานขึ้นเป็น 6 ชั่วโมง เคมเปอคาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3(ค-ช)



ภาพที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo (ก) หลังการหล่อ (ข) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (ค-จ) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและการอบคืนตัว เป็นเวลา 2, 4, 6 ชั่วโมง



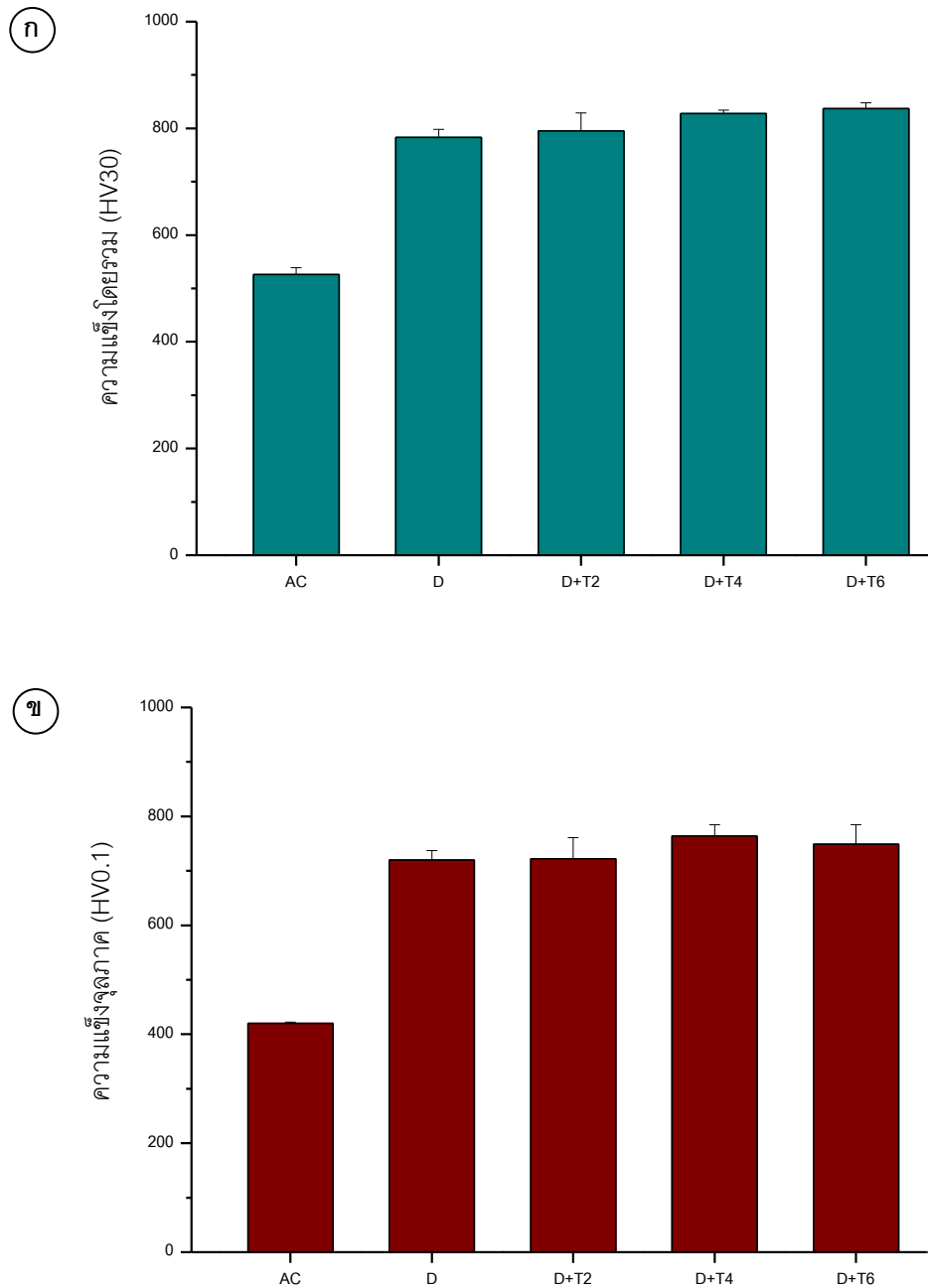
ภาพที่ 2 (ก-ข) ภาพถ่าย SEM-BEI แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo หลังการหล่อ (ค-จ) ผลการวิเคราะห์ด้วย EDS จากบริเวณเมทริกซ์ (1) คาร์ไบด์ยูเทคติก M_7C_3 (2) และคาร์ไบด์ยูเทคติก M_3C (3)



ภาพที่ 3 ภาพถ่าย SEM-BEI แสดงการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตานียม (SC) (ก-ข) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (ค-ง, จ-ฉ, ซ-ช) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและอบคืนตัวเป็นเวลา 2, 4, 6 ชั่วโมง

2. ความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคบริเวณเดนไดรต์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนมีความแข็งโดยรวมเพิ่มขึ้นจากหลังการหล่อที่มีค่าเท่ากับ 526 HV30 เป็น 783 HV30 ส่วนความแข็งจุลภาคมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 420 HV0.1 เป็น 720 HV0.1 เนื่องจาก การตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตานียมในเดนไดรต์ของมาร์เทนไซต์ การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าความแข็งโดยรวมเพิ่มขึ้นเป็น 795, 828 และ 837 HV30 ตามลำดับ และความแข็งจุลภาคเพิ่มขึ้นเป็น 722, 764 และ 749 HV0.1 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณคาร์ไบด์ทิตานียมและเทมเปอคาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นและ ออสเทนไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาในการทำการอบคืนตัวนานขึ้นพบว่าความแข็งเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณออสเทนไนต์ตกค้างที่เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์มีปริมาณต่ำ หรือระยะเวลาในการอบคืนตัวยังสั้นไป ทำให้เทมเปอคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย



ภาพที่ 4 (ก) ความแข็งโดยรวม (ข) ความแข็งจุลภาคบริเวณเดนไดรต์ ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo หลังการหล่อ (AC) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อน (D) หลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนและการอบคืนตัว เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (D+T2), 4 ชั่วโมง (D+T4) และ 6 ชั่วโมง (D+T6)

สรุปผลการวิจัย

1. โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 28 wt.%Cr-1 wt.%Mo หลังการหล่อประกอบด้วยเดนไดรท์ของ ออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ยูเทคติกออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ และคาร์ไบด์ยูเทคติกชนิด M_7C_3 และ M_6C
2. โครงสร้างจุลภาคหลังการปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนประกอบด้วยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในเดนไดรท์ ของมาร์เทนไซต์ หลังการอบคืนตัวทำให้ปริมาณคาร์ไบด์ทุติยภูมิและเทมเปอคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น
3. การปรับเสถียรภาพด้วยความร้อนส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจากสภาพหล่อประมาณ 48% การอบคืนตัวทำให้ ความแข็งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ทนุอดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัย นครสวรรค์ สัญญาเลขที่ R2560B109

เอกสารอ้างอิง

- Imurai, S., Thanachayanont, C., Pearce, J.T.H., Tsuda, K. and Chairuangri, T. (2014). Effect of Mo on microstructure of as-cast 28wt.%Cr-2.6wt.%C-(0-10)wt.%Mo irons. *Materials Characterization*, 90, 99-112.
- Imurai, S., Thanachayanont, C., Pearce, J.T.H., Tsuda, K. and Chairuangri, T. (2015). Effect of W on microstructure of as-cast 28wt.%Cr-2.6wt.%C-(0-10)wt.%Mo irons. *Materials Characterization*, 99, 52-60.
- Pearce, J.T.H. and Thanaboonsombut, B. (1999). *Technology and Metallurgy of Alloy Cast Iron*. Bangkok: Thailand National Metal and Materials Technology Center, 9-26.
- Maratray, F. and Poulalion, A. (1982). Austenite retention in high chromium white irons. *AFS Transactions*, 90, 82-7.
- 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., Pearce, J.T.H. and Chairuangri, T. (2011). Relationship between microstructure, hardness and corrosion resistance in 20wt.%Cr, 27wt.%Cr and 36wt.%Cr high chromium cast irons. *Materials Chemistry and Physics*, 125, 739–748.
- Wiengmoon, A., Pearce, J.T.H. and Chairuangri, T. (2012). Microstructure, hardness, corrosion and dry wear of 17wt.%Cr-3wt.%C-7wt.%Mo cast iron. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 67(2), 166-176.
- Zhi, X., Xing, J.D., Gao, Y., Fu, H., Peng, J. and Xiao, B. (2008). Effect of titanium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron. *Materials Characterization*, 59, 1211-1226.