

ผลของปริมาณโครเมียมต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งและออสเตนไนต์เหลือค้างของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการบำบัดเย็น

Effect of Chromium Content on Variation of Hardness and Retained Austenite of High Chromium Cast Iron following Sub-zero treatment

ทิณกร กุระอิม,¹ สุตสาคร อินธิเดช,^{*2}

Thinnakorn Kura-im,¹ Sudsakorn Inthidech ^{*2}

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาผลของโครเมียมต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งและปริมาณออสเตนไนต์เหลือค้างขณะทำการวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 10 - 26% Cr ที่ผ่านการบำบัดเย็น ทำการอบอ่อนและชุบแข็งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1323 K เป็นเวลา 5.4 ks เย็นตัวในอากาศและบำบัดเย็นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์ ทำการอบคืนตัวชิ้นงานชุบแข็งที่อุณหภูมิ 673- 823K เป็นเวลา 7.2 ks ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคในสภาพชุบแข็งประกอบด้วยออสเตนไนต์เหลือค้าง มาร์เทนไซต์ และคาร์ไบด์ลำดับที่สอง ความแข็งในสภาพชุบแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในช่วง 10-20% จากนั้นความแข็งจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม ปริมาณออสเตนไนต์เหลือค้างลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม ในสภาพอบคืนตัวพบว่ากราฟความแข็งแสดงการเกิด Secondary hardening เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสจากออสเตนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์และการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สอง ปริมาณออสเตนไนต์เหลือค้างลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบคืนตัว ค่าความแข็งหลังการอบคืนตัวสูงสุด (H_{Tmax}) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 723K ค่า H_{Tmax} สูงสุดคือ 832 HV30 ได้รับในเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม 20%Cr โดยมีปริมาณออสเตนไนต์เหลือค้างน้อยกว่า 5%

คำสำคัญ: กรรมวิธีทางความร้อน เหล็กหล่อโครเมียมสูง การบำบัดเย็น ความแข็ง ออสเตนไนต์เหลือค้าง

Abstract

The effect of Cr content on variation of hardness and retained austenite during heat treatment of high Cr cast irons with 10 - 26%Cr was investigated. The annealed specimens were hardened at 1323K for 5.4 ks and then, cooled by air and followed by dry-ice with alcohol. The hardened specimens were tempered at 673 - 823K for 7.2 ks. It was found that the microstructure in as-hardened state consisted of retained austenite, martensite and secondary carbides. The hardness increased in the range of 10-20%Cr and then decreased with raising the Cr content. The amount of retained austenite decreased gradually as the Cr content increased. In the tempered state, the hardness provided a secondary hardening due to the transformation of austenite to martensite and the precipitation of secondary carbides. The amount of retained austenite decreased gradually as the tempering temperature increased. The maximum tempered hardness (H_{Tmax}) was obtained at 723K in all specimens. The highest value of H_{Tmax} , 832 HV30, was obtained in 20%Cr specimen where the amount of retained austenite was less than 5%.

Keywords: Heat treatment, high Cr cast iron, sub-zero treatment, hardness, retained austenite

¹นิสิตปริญญาโท, รองศาสตราจารย์², สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150, ¹Graduate student, ²Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand., ^{*2} Corresponding author, Email: sudsakorn.i@msu.ac.th



บทนำ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงเป็นเหล็กหล่อในกลุ่มเหล็กหล่อทนการสึกหรอแบบขดสีที่ใช้งานโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมหนัก ใช้ทำเป็นลูกรีดในการผลิตเหล็กกล้า ชิ้นส่วนหลักของเครื่องบดในอุตสาหกรรมซีเมนต์และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า¹⁻⁵ นอกจากนี้ยังใช้เป็นชิ้นส่วนทนการสึกหรอในอุปกรณ์อื่นๆ เนื่องจากเหล็กหล่อชนิดนี้มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติในการต้านทานการสึกหรอแบบขดสีได้ การสึกหรอแบบขดสีในสภาพการใช้งานจริงขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพการใช้งาน รูปแบบการสึกหรอ ความเค้น สิ่งแวดล้อม หรือ สภาพการกัดกร่อน เป็นต้น^{1,3,4}

ในอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์พบว่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะเป็นตัวกำหนดสมรรถนะและอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นๆ¹ การใช้งานเหล็กหล่อชนิดนี้โดยปกติจะใช้ในสภาพที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยทั่วไปจะคล้ายกับเหล็กกล้า คือการทำ Destabilization หรือการชุบแข็งและการอบคืนตัว² การอบชุบแบบ Destabilization คือการอบเหล็กหล่อที่อุณหภูมิ 1223 - 1373K และเย็นตัวโดยใช้ลมเป่า จากนั้นทำการอบคืนตัวชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 773 - 873K และเย็นตัวในอากาศ การอบชุบวิธีนี้ใช้ผลิตชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงประมาณ 750-800 HV^{2,6} นอกจากนี้การทำการกรรมวิธีทางความร้อนแบบ Cryogenic treatment คือการทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง 77 K หลังการอบชุบด้วยไนโตรเจนเหลว พบว่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขดสีให้กับเหล็กหล่อโครเมียมสูงได้¹ แต่ยังคงมีความเสี่ยงคือชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนอาจจะแตกหักได้ เนื่องจากชิ้นงานมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในระหว่างการแช่ในไนโตรเจนเหลว

เครื่องจักรในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมซีเมนต์หรืออุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้ามักพบว่าชิ้นงานมี

อายุการใช้งานสั้นเพราะมีการขัดสีอย่างรุนแรง ทำให้เสียเวลาและเสียต้นทุนในการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยผลจากการขัดสีที่รุนแรงทำให้มีชิ้นงานสึกหรอง่ายและแตกหัก ดังนั้นความต้องการที่จะพัฒนาเหล็กหล่อ

โครเมียมสูงที่มีความต้านทานต่อการสึกหรอได้มากขึ้นนั้นเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการปรับปรุงความแข็งแรงชิ้นงานให้สูงกว่า 800 HV ทั้งนี้ต้องสามารถผลิตชิ้นงานที่ซับซ้อนได้

การเย็นตัวด้วยไนโตรเจนเหลวหลังการทำการกรรมวิธีทางความร้อนแม้ว่าจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงจากสภาพหล่อได้ประมาณ 200 HV^{1,8} แต่ปัญหาคือการเย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำมากโดยใช้ไนโตรเจนเหลวอาจส่งผลให้ชิ้นงานแตกง่ายได้ง่ายในชิ้นงานมีความหนาหรือซับซ้อนสูง ดังนั้นแนวทางที่คาดว่าจะสามารถทำได้คือการใช้การบำบัดเย็น (Sub-zero treatment) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการผลิตเหล็กกล้าเครื่องมือในขั้นตอนการชุบแข็งและอบคืนตัว¹ การอบชุบเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยทั่วไปจะเย็นตัวโดยใช้ลมเป่า^{2,6,8} ส่วนการบำบัดเย็นด้วยน้ำแข็งแห้งและแอลกอฮอล์ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 186K คาดว่าจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้เมื่อเทียบกับการชุบแข็งตามปกติและไม่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย

แม้ว่าจะมีงานวิจัยเกี่ยวกับการทำการกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูง¹⁻⁸ แต่งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นที่การเย็นตัวในอากาศอย่างเดียว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชุบแข็งและอบคืนตัวควบคู่กับการทำบำบัดเย็นของเหล็กหล่อโครเมียมสูงยังมีน้อย¹ โดยเฉพาะเหล็กหล่อที่เติม 10, 16, 20 และ 26% Cr ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ใช้งานโดยทั่วไปยังไม่มีรายงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาผลของโครเมียมต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวควบคู่กับการทำบำบัดเย็น โดยเน้นที่การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างซึ่งมีผลต่อความต้านทานการสึกหรอ

กระบวนการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยหลอมวัสดุดิบที่อุณหภูมิ 1853K ด้วยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่สูง ทำการเทหน้าโลหะที่อุณหภูมิ 1773-1793K ลงในแบบหล่อทรายที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm ยาว 65 mm ทำการตัดชิ้นงานหล่อให้มีขนาดความหนา 7 mm โดยใช้การตัด

ลวด (EDM Wire-cutting) ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ แสดงดัง Table 1

Table 1 Chemical composition of test specimens.

	Alloy (wt%)				
	C	Si	Mn	Cr	Fe
No.1	2.95	0.55	0.65	10.53	bal
No.2	3.02	0.62	0.76	16.64	bal
No.3	2.97	0.60	0.78	20.34	bal
No.4	2.96	0.58	0.75	26.10	bal

กรรมวิธีทางความร้อน

ชิ้นงานที่ผ่านการตัดจะถูกอบอ่อนที่ 1173K เป็นเวลา 10.8 ks และเย็นตัวในเตา ทำการชุบแข็งโดยอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1323K เป็นเวลา 5.4 ks จากนั้นทำให้เย็นตัวโดยใช้ลมเป่าเป็นเวลา 600 s และบำบัดเย็นต่อเนื่องโดยใช้น้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์ ทำการอบคืนตัวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 673-873 K ทุกๆ 50K เป็นเวลา 7.2 ks เย็นตัวโดยใช้ลมเป่าและบำบัดเย็นต่อเนื่องโดยใช้น้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์เช่นเดียวกับชิ้นงานชุบแข็ง

การวัดความแข็งและการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ทำการเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบโดยการขัดหยาบและขัดละเอียด ทำการทดสอบความแข็งแบบมาโครด้วยเครื่อง Vickers โดยใช้แรงกดทดสอบขนาด 30 กิโลกรัม และทดสอบความแข็งของเนื้อพื้นหรือความแข็งแบบไมโครโดยใช้เครื่องทดสอบ Micro-Vickers ด้วยน้ำหนักกด 100 กรัม ทำการกัดผิวชิ้นงานทดสอบด้วยน้ำยา Vilella (1 g Picric Acid, 5 mL HCl และ 95 mL Alcohol)¹ และทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ OM และ SEM เพื่อยืนยันผลการทดลอง

การวัดปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้าง

ทำการวัดปริมาณของออสเทนไนต์เหลือค้างโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction สำหรับการทดสอบชิ้นงานที่มีรูปทรงเป็นแท่งโดยเฉพาะ^{2, 6-8} ชิ้นงานจะถูกทำให้หมุนและแกว่งอัตโนมัติเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องการเรียงตัวในบางทิศทางเป็นพิเศษของออสเทนไนต์ ทำการเตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดหยาบและขัดละเอียด สัดส่วนเชิง

ปริมาตรของออสเทนไนต์เหลือค้าง ($V\gamma$) จะคำนวณโดยใช้พื้นที่ใต้กราฟของระนาบ (200) และ (220) ซึ่งเป็นของเฟอร์ไรท์หรือมาร์เทนไซต์ และ ระนาบ (220) และ (311) สำหรับออสเทนไนต์ ทำการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟโดยใช้โปรแกรม Image Analyzer ทำการคำนวณหาปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับหาสัดส่วนเชิงปริมาตรของออสเทนไนต์เหลือค้างโดยเฉพาะ โดยทดสอบสามครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย^{2,6}

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

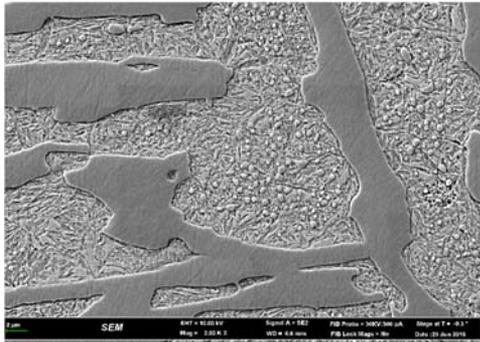
สภาพชุบแข็ง

Figure 1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ 10% และ 20%Cr ที่ผ่านการบำบัดเย็นในสภาพชุบแข็ง พบว่าเนื้อพื้นประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ออสเทนไนต์เหลือค้างและคาร์ไบด์ลำดับที่สอง จากผลการทดลองนี้ยืนยันว่าออสเทนไนต์ขาดเสถียรภาพเนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในระหว่างการแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง คาร์ไบด์ลำดับที่สองที่เกิดขึ้นนี้จะลดปริมาณธาตุคาร์บอนและโครเมียมในออสเทนไนต์ลงหรือทำให้ออสเทนไนต์ขาดเสถียรภาพและส่งผลให้ออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ในระหว่างเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณคาร์ไบด์ลำดับที่สองจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม โดยพบว่ามีปริมาณคาร์ไบด์ลำดับที่สองมากที่สุดในชิ้นงานเติม 20%Cr ซึ่งน่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณโครเมียมส่งผลให้มีการละลายของธาตุโครเมียมในออสเทนไนต์มากขึ้น โครเมียมและคาร์บอนจึงสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ง่ายขึ้นเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิชุบแข็ง โดยการเพิ่มขึ้นของคาร์ไบด์ลำดับที่สองนี้จะลดธาตุผสมในออสเทนไนต์ลง



(a) 10%Cr



(b) 20%Cr

Figure 1 As-hardened microstructure of 10% and 20%Cr specimen hardened from 1373 K and cooled by sub-zero treatment.

ผลของธาตุ Cr ต่อความแข็งในสภาพชุบแข็งและสัดส่วนเชิงปริมาตรของออสเทนไนต์เหลือค้าง (V_{γ}) แสดงดัง Figure 2 พบว่าความแข็งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึง 20% จากนั้นความแข็งจะลดลง โดยค่า V_{γ} ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณ Cr เพิ่มขึ้น ความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากการเพิ่มโครเมียมจะเพิ่มปริมาณของยูเทคติกคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 ที่มีความแข็งสูงและเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง ทำให้ได้เฟสมาร์เทนไซต์ในขั้นตอนการชุบแข็งมีมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของยูเทคติกคาร์ไบด์ทำให้เหลือคาร์บอนและโครเมียมในออสเทนไนต์น้อยลง เนื่องจากคาร์บอนและโครเมียมจะถูกใช้ในการฟอร์มคาร์ไบด์ ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดมาร์เทนไซต์ (Ms) เพิ่มขึ้น ทำให้มีออสเทนไนต์เหลือค้างหลังการชุบแข็งน้อยลง ดังนั้นเมื่อรวมผลของการเพิ่มขึ้นของมาร์เทนไซต์และการลดลงของออสเทนไนต์เหลือค้างจึงทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่การเพิ่มโครเมียมจนถึง 26% จะทำให้มีส่วนผสมใกล้เคียง

ส่วนผสมยูเทคติก ทำให้เหลือคาร์บอนในออสเทนไนต์ต่ำ เมื่อทำการชุบแข็งจะพบว่าปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ลดลงอย่างมาก เพราะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สอง และหลังการชุบแข็งจะได้มาร์เทนไซต์ที่มีคาร์บอนต่ำ ซึ่งเป็นที่ทราบดีว่ามาร์เทนไซต์ชนิดนี้จะมี ความแข็งต่ำ ดังนั้นความแข็งของชิ้นงานที่เติม 26%Cr จึงลดลงแม้ว่าอุณหภูมิ Ms จะสูงก็ตาม

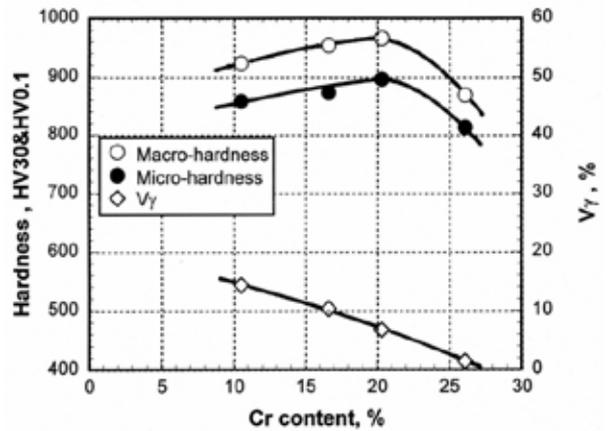


Figure 2 Effect of Cr content on hardness and V_{γ} in the as-hardened state of specimens.

สภาพอบคืนตัว

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความแข็งและปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างในระหว่างการอบคืนตัว จึงได้ทำการวัดความแข็งและ V_{γ} ของทุกชิ้นงานทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบมาโคร ความแข็งแบบไมโคร ปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างและอุณหภูมิการอบคืนตัวแสดงตัวอย่างดัง Figure 3 สำหรับชิ้นงานที่เติม 10% และ 20%Cr โดยได้ใส่ความแข็งและปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างในสภาพชุบแข็งไว้ในแต่ละกราฟเพื่อการเปรียบเทียบ

จาก Figure 3 พบว่ากราฟความแข็งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดสูงสุดแล้วลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่าการเกิด Secondary hardening เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ โดยระดับการเกิด Secondary hardening แตกต่างกันตามส่วนผสมทางเคมี ทั้งนี้ค่าดักการเกิด Secondary hardening จะวัดจากความ

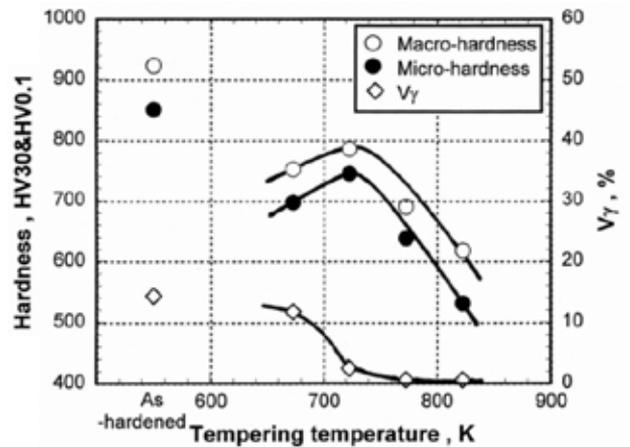
แตกต่างของความแข็งที่อุณหภูมิเริ่มต้นอบคืนตัว (673 K) และอุณหภูมิที่มีค่าความแข็งสูงสุดจากการอบคืนตัว

ความแข็งแบบมาโครและไมโครลดลงอย่างมากจากสภาพชุบแข็งเมื่อทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 673K เนื่องจากมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นในสภาพชุบแข็งถูกอบคืนตัว ทำให้ความแข็งของมาร์เทนไซต์ลดลง และพบว่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบคืนตัว เป็น 723K เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ และการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สอง ความแข็งจะลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบคืนตัวจาก 723 - 823K เนื่องจากเกิด Over-tempering โดยออสเทนไนต์จะเปลี่ยนเป็นเฟิร์ลไลต์แทน ค่าดิกิริการเกิด Secondary hardening จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม ค่าความแข็งสูงสุด (H_{Tmax}) ได้รับในชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 723K

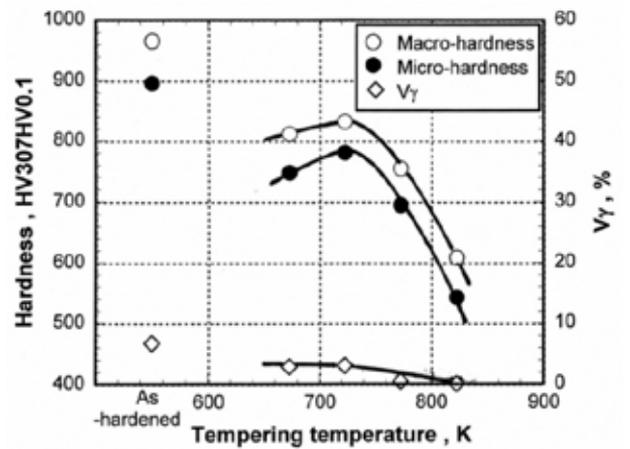
ค่า V_Y จะลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบถึง 723K จากนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ และเกิดการเปลี่ยนเฟสอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 823K ค่า V_Y ที่ให้ความแข็งสูงสุดมีค่าประมาณ 5%

ผลของปริมาณ Cr ต่อค่าความแข็งสูงสุด (H_{Tmax}) และปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างในชิ้นงาน H_{Tmax} แสดงดัง Figure 4 โดยพบว่าค่า H_{Tmax} เพิ่มขึ้นตามปริมาณโครเมียมจนถึงจุดสูงสุดที่ 20%Cr และลดลงเมื่อเพิ่มโครเมียมเป็น 26% กราฟความแข็งแบบไมโครแสดงพฤติกรรมเดียวกับกราฟความแข็งแบบมาโคร ความแข็งสูงสุดที่ได้รับคือ 832 HV30 และ 781 HV0.1 ค่า V_Y ในชิ้นงาน H_{Tmax} น้อยกว่า 5% ในทุกชิ้นงาน โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมเป็น 16% จากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม จากผลการทดลองนี้สามารถกล่าวได้ว่ายังคงมีออสเทนไนต์เหลือค้างอยู่บางส่วนแม้ในชิ้นงานที่มีความแข็งสูงสุด

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงความแข็งให้กับเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีความแข็งเกิน 800 HV30 และทำให้เหล็กหล่อมียุติการอบคืนตัวเหลือค้างในชิ้นงานต่ำกว่า 5% ซึ่งเพียงพอกับการนำไปใช้ในการผลิตลูกกรีดสำหรับรีดเหล็กกล้าที่ต้องการความแข็ง



(a) 10%Cr



(b) 20%Cr

Figure 3 Relationship between hardness, V_Y and tempering temperature of 10% and 20% Cr specimens.

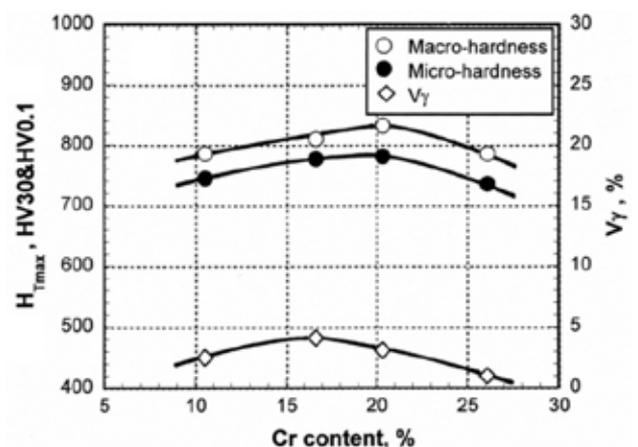


Figure 4 Effect of Cr content on maximum tempered hardness (H_{Tmax}).



ประมาณ 750 HV30 และ หม้ออบดแร่หรือซีเมนต์ที่ ต้องการความแข็งประมาณ 800 HV30 โดยมีออสเตน ไนต์เหลือค้างไม่เกิน 5%¹

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของโครเมียมต่อการเปลี่ยนแปลง ความแข็งและปริมาณ ออสเตนไนต์เหลือค้างของ เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการบำบัดเย็น ได้ทำการ อบอ่อนและชุบแข็งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1323K ทำการอบ คืบตัวที่อุณหภูมิ 673-823K เย็นตัวโดยใช้ลมเป่าและ บำบัดเย็นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์ ทำการวัด ความแข็งและสัดส่วนเชิงปริมาตรของออสเตนไนต์เหลือ ค้าง (V_V) จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เนื้อพื้นในสภาพชุบแข็งประกอบด้วยคาร์ไบด์ ลำดับที่สอง ออสเตนไนต์และมาร์เทนไซต์ โดยสัดส่วน เชิงปริมาตรของออสเตนไนต์เหลือค้าง (V_V) ลดลงอย่าง ต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม

2. ความแข็งในสภาพชุบแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณ โครเมียมที่เพิ่มขึ้นถึง 20% จากนั้นความแข็งจะลดลง โดยความแข็งของชิ้นงานที่บำบัดเย็น ค่า V_V ลดลงอย่าง ต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม

3. กราฟความแข็งในสภาพอบคืบตัวแสดงการ เกิด Secondary hardening เนื่องจากการตกตะกอนของ คาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเตนไนต์ เป็นมาเทนไซต์ ระดับการเกิด Secondary hardening จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม ค่าความแข็งหลังการ อบคืบตัวสูงสุด (H_{Tmax}) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 723K ค่า V_V ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบคืบตัว

4. ค่า H_{Tmax} สูงสุดคือ 832 HV30 ได้รับใน เหล็กหล่อที่มีส่วนผสม 20%Cr ผ่านการบำบัดเย็น โดยมี ออสเตนไนต์เหลือค้างประมาณ 5% ซึ่งเหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตลูกกรีดเหล็กกล้าและหม้ออบดแร่

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนงานวิจัย(สกว.) และ บริษัทพานาพลัสจำกัด (โครงการพัฒนานักวิจัยและ งานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ปี 2557 สัญญาเลขที่

MSD 5710046) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณ Prof. Dr. Yasuhiro Matsubara, Kurume National College of Technology, Japan และ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามสำหรับ อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Laird G., Gundlach R. and Röhring K. Abrasion-Resistant Cast Irons Handbook, USA: American Foundry Society. 2000;(n.d.).
- Inthidech S., Sricharoenchai P. and Matsubara Y. Effect of Alloying Elements on Heat Treatment Behavior of Hypoeutectic High Chromium Cast Iron, Materials Transactions. 2006;47(1):72-81.
- Dogan O.N., Hawk J.A. and Laird II G. Solidification Structure and Abrasive Resistance of High Chromium White Irons, Metall. Mater. Trans. 1997; 28A : 1315-1328.
- Laird, II G., Microstructure of Ni-hard I, Ni-hard IV and High-Cr White Cast Irons, AFS Transactions. 1991; 99 : 339-357.
- Arnoldo Bedolla-Jacudine. Microstructure of vanadium, niobium, and titanium-alloyed high-chromium white cast irons, Int. J. Cast Metals Res. 2001;13:343-361.
- Inthidech S., Sricharoenchai P., Sasaguri N. and Matsubara Y. Behavior of Hardness and Retained Austenite in Heat Treatment of High Chromium Cast iron for Abrasive Wear Resistance, AFS Trans. 2004;112:899 -910.
- Maratray F. and Poulalion A. Austenite Retention in High-Chromium White Iron, AFS Transactions. 1982 ; 90 : 795-804.
- Pattyn, R.L. "Heat Treatment of High-Cr White Irons," AFS Trans., 1993; 1:161-167.