

ผลของการบำบัดเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีปริมาณโครเมียมแตกต่างกัน

Effect of Sub-Zero Treatment on variation of Hardness of High Cr Cast irons with Different Cr content

ทิณกร กุระอิม¹, สุดสาคร อินธิเดช^{2*}

Thinnakorn Kura-im¹, Sudsakorn Inthidech^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการบำบัดเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งขณะทำการมรีวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีปริมาณโครเมียมแตกต่างกันคือ 10, 16, 20 และ 26% ทำการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1323K เป็นเวลา 5.4 ks เย็นตัวในอากาศและน้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์ ทำการอบคืนตัวที่ 673, 723, 773 และ 823K เป็นเวลา 7.2 ks พบว่าโครงสร้างเนื้อพื้นในสภาพชุบแข็งประกอบด้วยออสเทนไนต์เหลือค้าง มาร์เทนไซต์ และคาร์ไบด์ลำดับที่สอง ความแข็งในสภาพชุบแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นถึง 20% จากนั้นความแข็งจะลดลง ความแข็งของชิ้นงานที่เย็นตัวในน้ำแข็งแห้งผสมกับแอลกอฮอล์สูงกว่าการเย็นตัวในอากาศ ความแข็งในสภาพอบคืนตัวแสดงการเกิดความแข็งขึ้นอันดับที่สองเนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาเทนไซต์ ค่าความแข็งหลังการอบคืนตัวสูงสุด ($H_{T_{max}}$) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 723-773K ค่า $H_{T_{max}}$ สูงสุดคือ 830 HV 30 ได้รับในเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม 20%Cr ผ่านการเย็นตัวในน้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์

คำสำคัญ: กรรมวิธีทางความร้อน เหล็กหล่อโครเมียมสูง การบำบัดเย็น ความแข็ง

Abstract

In this research, the effect of sub-zero treatment on variation of hardness during heat treatment of high Cr cast irons with different Cr content of 10, 16, 20 and 26%Cr was investigated. The test specimens were hardened at 1323K for 5.4 ks and then, cooled by air and dry-ice with alcohol. The hardened specimens were tempered at 673, 723, 773 and 823K for 7.2 hrs and subsequently, cooled by air and dry-ice with alcohol. In the as-hardened state, the matrix structure consisted of retained austenite, martensite and secondary carbides. The hardness increased with an increase in Cr content up to 20% and then decreased. The hardness of specimen hardened by dry-ice with alcohol was higher than that of cooled by air. In the tempered state, the hardness showed the secondary hardening due to the precipitation of secondary carbides and the transformation of austenite to martensite. The maximum tempered hardness ($H_{T_{max}}$) was obtained at 723-773K. The highest value of $H_{T_{max}}$, 830 HV30, was obtained in 20%Cr cast iron hardened by dry-ice with alcohol.

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

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

บทนำ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงเป็นเหล็กหล่อในกลุ่มเหล็กหล่อทนการสึกหรอแบบขัดสีที่ใช้งานโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมหนักเช่น ใช้ทำเป็นลูกรีดในการผลิตเหล็กกล้า ชิ้นส่วนหลักของเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมซีเมนต์และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังใช้เป็นชิ้นส่วนทนการสึกหรอในอุปกรณ์อื่นๆ เนื่องจากเหล็กหล่อชนิดนี้มีความแข็งแรงสูงและมีคุณสมบัติในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีได้

เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้งานด้านการสึกหรอมีปริมาณคาร์บอน (C) ระหว่าง 2.0-3.6% โดยน้ำหนัก¹ (จากนี้ไปแทนด้วย %) และมีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Cr) ในปริมาณ 10-30% นอกจากโครเมียมแล้วยังมีธาตุผสมชนิดอื่น ๆ ที่นิยมเติมลงในเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการชุบแข็งและเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอเช่น โมลิบดีนัม (Mo) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) และวาเนเดียม (V)¹⁻³ แต่การผสมธาตุเหล่านี้จะทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์พบว่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะเป็นตัวกำหนดสมรรถนะและอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นๆ การใช้งานเหล็กหล่อชนิดนี้โดยปกติจะใช้ในสภาพที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยทั่วไปจะคล้ายกับเหล็กกล้าคือ การอบเหล็กหล่อที่อุณหภูมิ 1223-1373K และเย็นตัวโดยใช้ลมเป่า จากนั้นทำการอบคืนตัวชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 673-873K และเย็นตัวในอากาศ^{1,2,4,5} การอบชุบวิธีนี้ใช้ผลิตชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงกว่า 750 HV^{1,2} ในกรณีที่การใช้งานมีการสึกหรอรุนแรง มีความจำเป็นต้องใช้งานเหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงสูงกว่า 800 HV¹ งานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะศึกษาผลการเติมธาตุผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยการชุบแข็งและเย็นตัวในอากาศ^{2,4-7} แต่งานวิจัยที่เกี่ยวกับผลของการทำบัพัตเย็นต่อความแข็งแรงของเหล็กหล่อยังมีน้อยมาก⁸ โดยเฉพาะการศึกษาผลของการบัพัตเย็นต่อความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงยังไม่มีรายงาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการบัพัตเย็น (Sub-zero treatment) หลังกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัวของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีปริมาณ 10, 16, 20 และ 26%Cr ซึ่งครอบคลุมส่วนผสมที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม โดยโดยคาดว่าวิธีนี้จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเทียบกับโดยการชุบแข็งตามปกติได้

กระบวนการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการหลอมวัสดุดิบในเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่

สูงที่อุณหภูมิ 1853K ทำการเทหน้าโลหะที่อุณหภูมิ 1773-1793K ลงในแบบหล่อทรายที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm ยาว 65 mm ทำการคลุมที่ผิวหน้าของไรเซอร์ด้วยผงคายความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิงานหล่อไม่ให้เย็นเร็วเกินไป ทำการตัดชิ้นงานหล่อให้มีขนาดความหนา 7 mm โดยใช้การตัดด้วยลวด (Wire-cutting) ส่วนผสมทางเคมีและสัดส่วนของคาร์ไบด์ (Vc) ในโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบแสดงดัง Table 1 65

Table 1 Chemical composition of test specimens.

	Alloy (wt%)				Vc (%)
	C	Si	Mn	Cr	
No.1	2.95	0.55	0.65	10.53	26.9
No.2	3.02	0.62	0.76	16.64	31.2
No.3	2.97	0.60	0.78	20.34	32.6
No.4	2.96	0.58	0.75	26.10	35.7

$$* Vc = 12.33\%C + 0.55\%Cr - 15.2^7)$$

กรรมวิธีทางความร้อน

ทำการอบอ่อนชิ้นงานที่ 1173K เย็นตัวในเตา ทำการชุบแข็งโดยอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1323K เป็นเวลา 5.4 ks จากนั้นทำให้เย็นตัวโดยใช้ลมเป่าและบัพัตเย็นโดยใช้น้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์ ทำการอบคืนตัวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 637-873K ทุกๆ 50K เป็นเวลา 7.2ks เย็นตัวโดยใช้ลมเป่าและบัพัตเย็นโดยใช้น้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์

การวัดความแข็งแรงและการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

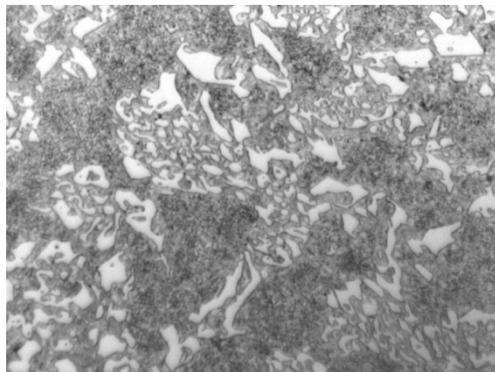
ทำการเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบโดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายและขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ทำการทดสอบความแข็งแรงแบบมาโครโดยใช้เครื่อง Vickers hardness ด้วยแรงกดทดสอบขนาด 30 กิโลกรัม ทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคโดยการกัดผิวชิ้นงานทดสอบด้วยน้ำยา Vilella ที่มีส่วนผสมของ 1 g Picric Acid, 5 cc HCl และ 95 cc Alcohol ทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อยืนยันผลการทดลอง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

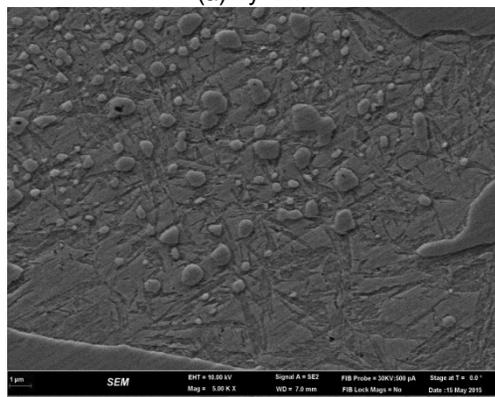
สภาพชุบแข็ง

โครงสร้างจุลภาคของทุกชิ้นงานทดสอบประกอบด้วยเดนไดร์ของออสเทนไนต์และกลุ่มยูเทคติก ($g+M_7C_3$) ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 16%Cr โดยใช้

กล้องจุลทรรศน์ประเภท OM และ SEM แสดงดัง Figure 1 พบว่าโครงสร้างพื้นประกอบด้วย ออสเทนไนต์เหลือค้างเป็นส่วนใหญ่ มาร์เทนไซต์เล็กน้อย และมีคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ในบริเวณ เดนไดรต์ ชิ้นงานทดสอบอื่นมีโครงสร้างจุลภาคคล้ายคลึงกับชิ้นงาน 16%Cr แต่จะมีสัดส่วนเฟสต่างๆแตกต่างกัน



(a) by OM



(b) by SEM

Figure 1 As-hardened microstructure of 16%Cr specimen hardened from 1373 K and cooled by dry-ice with alcohol.

ผลของธาตุ Cr ต่อความแข็งในสภาพชุบแข็งแสดงดัง Figure 2 พบว่าความแข็งเพิ่มขึ้นช้าๆ เมื่อเพิ่มปริมาณ Cr จนถึง 20% จากนั้นความแข็งจะลดลงอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของความแข็งในช่วงแรกเนื่องจากการเพิ่มโครเมียมจะเพิ่มปริมาณคาร์ไบด์ประเภทยูเทคติกชนิด M_7C_3 ที่มีความแข็งสูงดัง Table 1 นอกจากนี้ยังทำให้เหล็กหล่อมีความสามารถในการชุบแข็งดีขึ้น ทำให้ได้เฟสมาร์เทนไซต์ในขั้นตอนการชุบแข็งมากขึ้น ส่วนความแข็งลดลงเมื่อเติมโครเมียมสูงกว่า 20% เนื่องจากการเพิ่มโครเมียมสูงเกินไปจะทำให้มีออสเทนไนต์มีเสถียรภาพสูงและคาร์บอนในออสเทนไนต์น้อยลง ส่งผลให้ความแข็งหลังการชุบแข็งลดลง เมื่อเปรียบเทียบผลของการ

เย็นตัวพบว่าชิ้นงานที่มีการบำบัดเย็นจะมีความแข็งสูงกว่าเย็นตัวในอากาศในทุกส่วนผสม เนื่องจากการบำบัดเย็นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์จะทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิใกล้กับเส้นการเกิดมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์ (M_s) มากกว่าการเย็นตัวในอากาศ ดังนั้น ออสเทนไนต์จึงสามารถเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งที่ได้สูงขึ้น

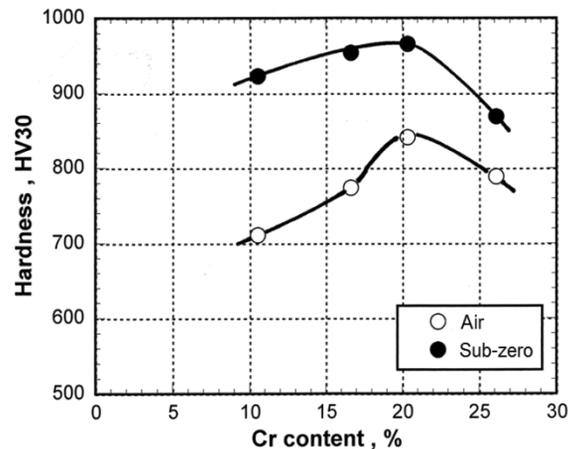


Figure 2 Effect of Cr content on hardness in the as-hardened state.

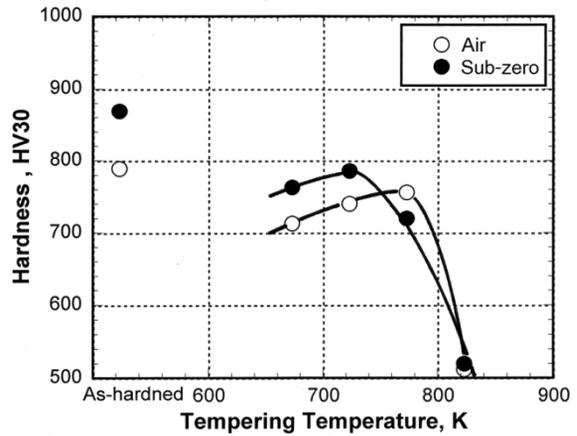
สภาพอบคืนตัว

ในขั้นตอนการอบคืนตัวพบว่าโครงสร้างจุลภาคจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพชุบแข็ง โดยเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในออสเทนไนต์ คาร์ไบด์ลำดับที่สองจะลดธาตุผสมในออสเทนไนต์เหลือค้าง ทำให้ออสเทนไนต์ขาดเสถียรภาพและเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ง่ายขึ้น ส่วนมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการชุบแข็งจะคลายความเค้นและมีความแข็งลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและอุณหภูมิในการอบคืนตัวแสดงดัง Figure 3 พบว่ากราฟความแข็งแสดงการเกิดความแข็งขึ้นลำดับที่สอง (Secondary hardening) โดยความแข็งจะเพิ่มขึ้นในตอนแรกและจากนั้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบคืนตัวสูงขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ โดยคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่เกิดขึ้นเป็นชนิด M_23C_6 ทั้งนี้คาร์ไบด์ลำดับที่สองที่ตกตะกอนจะเพิ่มความแข็งให้กับเนื้อพื้น ความแข็งในชิ้นงานที่ผ่านการบำบัดเย็นจะสูงกว่าที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ ซึ่งเกิดจากการใช้อุณหภูมิเย็นตัวต่ำกว่า ทำให้ออสเทนไนต์มีเวลาในการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ในระหว่างการบำบัดเย็นจะเพิ่มระดับการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองได้มากขึ้น⁸

จาก Figure 3 พบว่าความแข็งลดลงเมื่อผ่านจุดที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดในการอบคืนตัว (H_{Tmax}) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์เป็นเฟอร์ไรต์และ มาร์เทนไซต์ที่ได้จากการชุบแข็งเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสเฟไรต์และคาร์ไบด์ลำดับที่สองขนาดใหญ่ หรือเกิด Over-tempering อุณหภูมิการอบคืนตัวที่เกิด H_{Tmax} ในชิ้นงานที่เย็นตัวโดยการบำบัดเย็นจะต่ำกว่าที่เย็นตัวในอากาศ กล่าวคือ 723K สำหรับการบำบัดเย็นและ 773K สำหรับการเย็นตัวในอากาศ

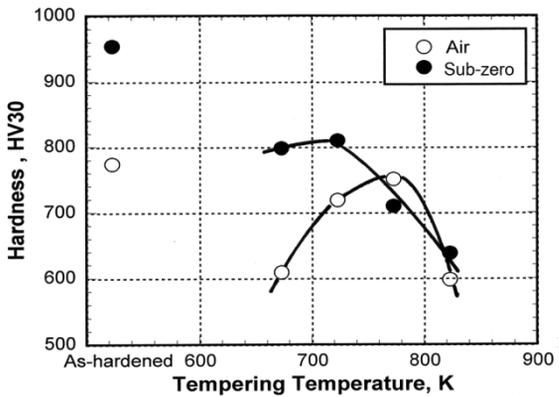
ผลของธาตุ Cr ต่อค่า H_{Tmax} แสดงดัง Figure 4 ค่า H_{Tmax} มีค่าเพิ่มขึ้นช้าๆ เมื่อเพิ่มปริมาณ Cr การเพิ่มขึ้นของความแข็งนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเป็น มาร์เทนไซต์และการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่มีความแข็งสูงเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่า H_{Tmax} ลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มโครเมียมเกินกว่า 20% เนื่องจากออสเทนไนต์มีเสถียรภาพสูง การเปลี่ยนแปลงจาก ออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์เกิดได้ยากขึ้น ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มปริมาณโครเมียมจะลดปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์ ทำให้มาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นมีความแข็งต่ำลง



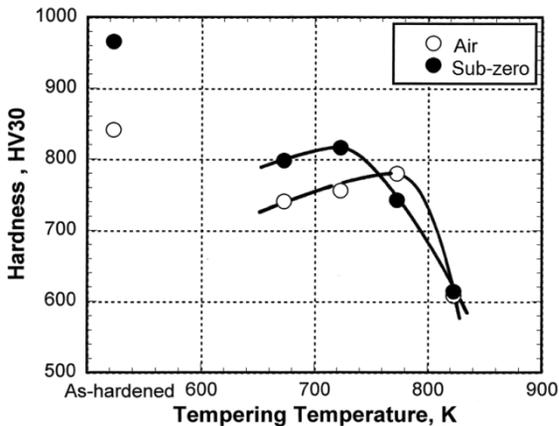
(c) 26%Cr

Figure 3 Relationship between hardness and tempering temperature of test specimens.

เมื่อพิจารณาผลของการเย็นตัวพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบำบัดเย็นจะมีค่า H_{Tmax} สูงกว่าที่เย็นตัวในอากาศในทุกส่วนผสม ซึ่งเหตุผลได้อธิบายไว้ดังก่อนหน้า ชิ้นงานที่ผ่านการบำบัดเย็นจะมีความแข็งเกิน 800 HV30 ในทุกส่วนผสม ยกเว้นชิ้นงาน 10%Cr ที่มีปริมาณคาร์ไบด์ต่ำสุด ค่า H_{Tmax} สูงสุดได้รับในชิ้นงาน 20%Cr คือ 830HV30 สำหรับการบำบัดเย็นและ 780 HV30 สำหรับการเย็นตัวในอากาศ จากผลการทดลองจึงสามารถกล่าวได้ว่าการบำบัดเย็นสามารถเพิ่มความแข็งให้กับเหล็กหล่อโครเมียมสูงได้ประมาณ 50 HV30 ดังนั้นในการใช้งานที่ต้องการความแข็งหลังการอบคืนตัวสูงกว่า 800 HV30 เหล็กหล่อควรต้องมี Cr สูงกว่า 16% และควรทำการชุบแข็งร่วมกับการบำบัดเย็นจึงจะสามารถมีความแข็งในระดับที่ต้องการใช้งาน



(a) 16%Cr



(b) 20%Cr

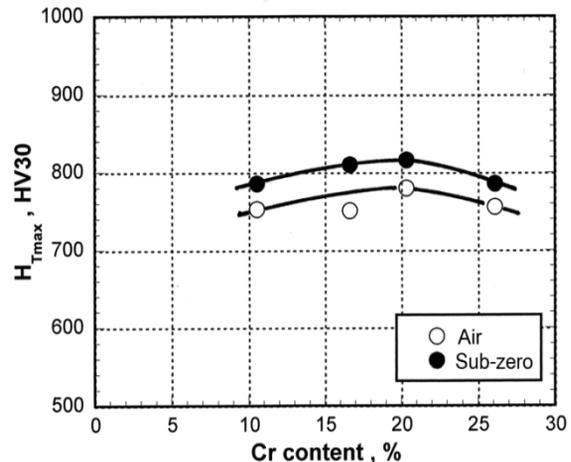


Figure 4 Effect of Cr content on maximum tempered hardness (H_{Tmax}).



สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการบำบัดเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงทางกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีปริมาณโครเมียมแตกต่างกันคือ 10-26%Cr ได้ทำการชุบแข็งที่ 1323K และอบคืนตัวที่ 673-823K เป็นตัวในอากาศและทำบำบัดเย็นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์ ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างเนื้อพื้นในสภาพชุบแข็งของทุกชิ้นงานประกอบด้วยออสเทนไนต์เหลือค้าง มาร์เทนไซต์ และคาร์ไบด์ลำดับที่สอง

2. ความแข็งแรงในสภาพชุบแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นถึง 20% จากนั้นความแข็งแรงจะลดลง โดยความแข็งแรงของชิ้นงานที่บำบัดเย็นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมกับแอลกอฮอล์จะมีค่าสูงกว่าการเย็นตัวในอากาศ

3. ความแข็งแรงในสภาพอบคืนตัวแสดงการเกิดความแข็งแรงอันดับที่สองเนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ ค่าความแข็งแรงหลังการอบคืนตัวสูงสุด ($H_{T_{max}}$) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 723-773K

4. ค่า $H_{T_{max}}$ เพิ่มขึ้นเมื่อโครเมียมเพิ่มขึ้นถึง 20% จากนั้นจะลดลง ชิ้นงานที่ผ่านการบำบัดเย็นจะมีค่า $H_{T_{max}}$ สูงกว่าชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ ค่า $H_{T_{max}}$ สูงสุดคือ 830 HV 30 ได้รับในชิ้นงาน 20%Cr ผ่านการเย็นตัวในน้ำแข็งแห้งผสมแอลกอฮอล์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนงานวิจัย(สกว.) และบริษัทพานาพลัสจำกัด (โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ปี 2557 สัญญาเลขที่ MSD 5710046) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณ Prof. Dr. Yasuhiro Matsubara, Kurume National College of Technology, Japan และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Laird G., Gundlach R. and Röhring K. Abrasion-Resistant Cast Irons Handbook, USA: American Foundry Society. 2000;(n.d.).
2. Inthidech S., Sritharoenchai 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.

3. Laird II G. Microstructure of Ni-hard I Ni-hard IV and High-Cr White cast irons, AFS Transactions. 1991;99:339-357
4. Wang J. et al., Influence of secondary carbides precipitation and transformation on hardening behavior of a 15 Cr-1 Mo-1.5V white iron, Materials Characterization. 2005;55:234-240.
5. Arnaldo Bedolla-Jacudine. Microstructure of vanadium, niobium, and titanium-alloyed high-chromium white cast irons, Int. J. Cast Metals Res. 2001;13:343-361.
6. Inthidech S., Sritharoenchai 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.
7. Maratray F. and Poulalion A. Austenite Retention in High-Chromium White Iron, AFS Transactions. 1982;90:795-804.
8. Wang J., Xiong J., Fan H., Yanga H., Liub, H. and Shenb, B. Effects of high temperature and cryogenic treatment on the microstructure and abrasion resistance of a high chromium cast iron. journal of materials processing technology. 2009; 2009 : 3236-3240