

ผลของธาตุผสมต่อความแข็งขณะทำการมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมหลายชนิด

Effect of Alloying Elements on Hardness during Heat Treatment of Multi-alloyed White Cast Iron

รุจิภาส สีลาดเลา,¹ สุตสาคร อินธิเดช,^{2*} เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป³

Rujipas Seeladlao,¹ Sudsakorn Inthidech,^{2*} Kiattisak Sriprateep³

บทคัดย่อ

เตรียมเหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมหลายชนิดที่มีปริมาณธาตุผสมแตกต่างกันเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแข็งในการทำการมวิธีทางความร้อน ทำการอบอ่อนชิ้นงานที่ 1173 K ทำการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1323 และ 1373 K เย็นตัวโดยการใช้ลมเป่า ทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 673-873 K พบว่าความแข็งในสภาพชุบแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มคาร์บอน (C) แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าทั้งสเตนสมมูล (Weq) และโคบอลต์ (Co) ความแข็งในสภาพการอบคืนตัวแสดงการเกิด secondary hardening เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองและการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ ความแข็งในชิ้นงานผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1373 K สูงกว่าที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1323 K ค่าความแข็งสูงสุด (H_{Tmax}) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 723 K ค่า H_{Tmax} เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณ C และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อเพิ่มปริมาณ Co และค่า Weq โดยค่า H_{Tmax} สูงสุดคือ 840 HV30 ได้มาจากชิ้นงานที่เติม 2.07%C, 2.07%Co และค่า Weq เท่ากับ 6.18

คำสำคัญ: กรรมวิธีทางความร้อน เหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมหลายชนิด ความแข็ง ธาตุผสม

Abstract

The multi-alloyed white cast irons with varying alloy contents were prepared in order to clarify variation of hardness during subcritical heat treatment. After annealing at 1173 K, the specimens were hardened at 1323 and 1373 K and subsequently cooled by force air. As-hardened specimens were tempered at 673-873 K. It was found that the hardness in as-hardened state increased greatly with an increase in C content and increased a little with increasing Tungsten equivalent value (Weq) and Cobalt (Co) content. In tempered state, the hardness curves showed a secondary hardening due to the precipitation of secondary carbides and the transformation of austenite into martensite. The hardness of specimen hardened from 1373 K was higher than that of hardened from 1323 K. The maximum tempered hardness (H_{Tmax}) was obtained at 723 K. The H_{Tmax} increased remarkably

¹นิสิตปริญญาโท, ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150, ¹Graduate student, ²Asst. Prof., ³Assoc. Prof. Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand., ^{*} Corresponding author, Email: sudsakorn.i@msu.ac.th

with rising the C content and increased gradually with increasing Weq value and Co content. The largest H_{Tmax} value of 840 HV30 was obtained in the specimen with 2.07%C, 2.07%Co and Weq value of 6.18.

Keywords: Heat treatment, multi-alloyed white cast iron, hardness, alloying element

บทนำ

เหล็กหล่อขาวเติมธาตุผสมหลายชนิด (Multi-component white cast iron) เป็นหนึ่งในกลุ่มเหล็กหล่อทนการสึกหรอแบบขัตสีที่ใช้งานในปัจจุบัน เหล็กหล่อชนิดนี้ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ในประเทศญี่ปุ่นช่วงระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา¹ โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ทดแทนชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กหล่อโครเมียมสูง เนื่องจากมีความแกร่งและทนต่อการสึกหรอดีกว่า^{1,2} การใช้งานโดยทั่วไปจะใช้อุตสาหกรรมหนักได้แก่ ชิ้นส่วนหลักของเครื่องจักรกลสำหรับการบดในอุตสาหกรรมซีเมนต์และลูกรีดในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้า นอกจากนี้ยังใช้เป็นชิ้นส่วนทนการสึกหรอในอุปกรณ์อื่นๆ เนื่องจากมีความแข็งสูงและมีสมบัติในการต้านทานการสึกหรอแบบขัตสีดีเยี่ยม

การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้เวลาเป็นสมบัติในการประเมินความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัตสี อย่างไรก็ตามแม้ว่าเหล็กหล่อที่แข็งจะทนต่อการสึกหรอแบบขัตสีได้ดี แต่จะมีความเปราะสูงทนการกระแทกได้น้อย ในสภาพการใช้งานจริง เช่น หัวฉ้อนสำหรับการทุบหรือย่อยเศษหินหรือซีเมนต์ จำเป็นต้องคำนึงถึงความต้านทานต่อการกระแทกร่วมด้วย

เหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมหลายชนิดจะมีปริมาณคาร์บอน (C) ระหว่าง 1.0-2.5%โดยน้ำหนัก (จากนี้ไปแทนด้วย %) และมีธาตุผสมที่สามารถฟอร์มคาร์ไบต์ได้แรงเช่น โครเมียม (Cr) วาเนเดียม (V) โมลิบดีนัม (Mo) และทังสแตน

(W)¹⁻⁵ นอกจากนี้ยังมีการเติมโคบอลต์ (Co) เพื่อความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิสูงด้วย⁶ ธาตุแต่ละชนิดที่ฟอร์มคาร์ไบต์จะเกิดเป็นคาร์ไบต์ชนิดพิเศษ (special carbide) ซึ่งมีความแข็งสูงมากกว่าคาร์ไบต์ในเหล็กกล้าหรือในเหล็กหล่อโครเมียมสูงมาก¹ ทำให้เหล็กหล่อชนิดนี้มีความแข็งสูงและทนการสึกหรอได้ดี มีความแข็งสูง มีความสามารถในการคงสภาพผิวเรียบได้สูงและที่สำคัญคือมีความแกร่งสูงกว่าเหล็กหล่อทนการสึกหรอชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีสัดส่วนของยูเทคติกคาร์ไบต์ต่ำ^{5,6,8}

ความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัตสีและความแกร่งที่เหมาะสมแก่การใช้งานของเหล็กขาวที่เติมธาตุผสมหลายชนิดจะได้รับเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเท่านั้น^{1,5,6} ซึ่งขั้นตอนของกรรมวิธีทางความร้อนได้แก่ การอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1223-1373 K และเย็นตัวโดยใช้ลมเป่า จากนั้นทำการอบคืนตัว การทำกรรมวิธีทางความร้อนนี้จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเนื้อพื้นและสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน

แม้ว่ามีการวิจัยที่เกี่ยวกับการทำกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อขาวที่เติมธาตุผสมหลายชนิด⁴⁻⁸ แต่ปริมาณธาตุผสมต่างๆในส่วนผสมที่เคยศึกษามีปริมาณสูงคือ แต่ละชนิดมากกว่า 5% จึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูงส่งผลให้ชิ้นงานหลอมมีราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาในเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมของธาตุผสมบางชนิดน้อยกว่า 5% ซึ่งไม่เคยมีการวิจัยมาก่อน เพื่อลดต้นทุนการผลิตต่อไป

กระบวนการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการหล่อทำการหลอมวัสดุดิบในเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า ความถี่สูงที่อุณหภูมิ 1853 K ทำการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 1773-1793 K ลงในแบบหล่อทรายที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm ยาว 65 mm ทำการคลุมที่ผิวหน้าของไรเซอร์ด้วยผงคายความร้อนทันทีเพื่อควบคุมอุณหภูมิงานหล่อไม่ให้เย็นเร็วเกินไป ทำการตัดชิ้นงานหล่อให้มีขนาดความหนา 7 mm โดยใช้การตัดด้วยลวด (Wire-cutting) ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานแสดงดัง Table 1

Table 1 Chemical composition of test specimens.

	Alloy (wt%)						
	C	Cr	Mo	V	W	Co	Weq
No.1	1.58	9.06	2.01	5.09	1.07	0.00	5.09
No.2	1.95	3.05	1.96	4.95	1.07	0.00	4.99
No.3	2.07	3.01	3.09	5.07	0.00	2.07	6.18

* $W_{eq} = \%W + 2\%Mo$, Si=0.55%, Mn= 0.55%, S and P<0.01

กรรมวิธีทางความร้อน

ทำการอบอ่อนชิ้นงานที่ 1173 K เป็นตัวในเตา ทำการชุบแข็งโดยอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1323 และ 1373 K เป็นเวลา 3.6 ks จากนั้นทำให้เย็นตัวโดยใช้ลมเป่า

ทำการอบคืนตัวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 673-873 K ทุกๆ 50 K โดยมีระยะเวลาในการอบ 12.6 ks และทำให้เย็นตัวโดยใช้ลมเป่า

การวัดความแข็งแรงและการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ทำการเตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายและขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ทำการทดสอบความแข็งแรงแบบมหภาคโดยใช้เครื่อง Vickers hardness ด้วยแรงกดทดสอบขนาด 30 กิโลกรัม และทดสอบความแข็งแรงแบบจุลภาคโดยใช้เครื่อง Micro-Vickers hardness tester ด้วยแรง

กดทดสอบขนาด 0.1 กิโลกรัม ทำการกัดผิวชิ้นงานด้วยน้ำยา Vilella ที่มีส่วนผสมของ 1 g Picric Acid, 5 cc HCl และ 95 cc Alcohol ทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อยืนยันผลการทดลอง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

สภาพหล่อ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบประกอบด้วยเดนไดรต์ของออสเทนไนต์และกลุ่มยูเทคติก (γ +คาร์ไบด์)³ ดังตัวอย่างใน Figure 1 สำหรับชิ้นงานที่ 1 (1.58% C) และชิ้นงานที่ 3 (2.07% C) โดยยูเทคติกคาร์ไบด์ในทุกชิ้นงานประกอบด้วยคาร์ไบด์ชนิด MC ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลม และ ชนิด M_2C ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นยาว³ นอกจากนี้ยังพบคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 ในชิ้นงานที่ 1 เนื่องจากมีปริมาณโครเมียมสูง¹ ที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1373 K โครงสร้างพื้นของชิ้นงานที่ 1 ประกอบด้วยคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่มีขนาดใหญ่ เฟอร์ไรต์และเพอร์ไรต์ ส่วนชิ้นงานที่ 2 และชิ้นงานที่ 3 เนื้อพื้นประกอบด้วยคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่มีขนาดเล็ก ออสเทนไนต์เหลือค้างและมาร์เทนไซต์ จากโครงสร้างจุลภาคหลังการชุบแข็งสามารถกล่าวได้ว่าชิ้นงานที่ 2 และชิ้นงานที่ 3 มีความสามารถในการชุบแข็งดีกว่าชิ้นงานที่ 1 เนื่องจากมีธาตุผสมคือ C และ Mo ในปริมาณที่สูงกว่า ทำให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง โดยเฉพาะ Mo เป็นธาตุที่สามารถป้องกันการเกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์ได้ดีเยี่ยมทั้งในสภาพหล่อและสภาพชุบแข็ง²

ผลของธาตุผสมต่อความแข็งแรงในสภาพชุบแข็งแสดงดัง Figure 2 เนื่องจากธาตุ Mo และ W มีสมบัติที่คล้ายกันคือเป็นธาตุที่สามารถฟอร์มคาร์ไบด์ได้แรงทั้งคู่ และมีผลต่อการเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์เหมือนกัน²

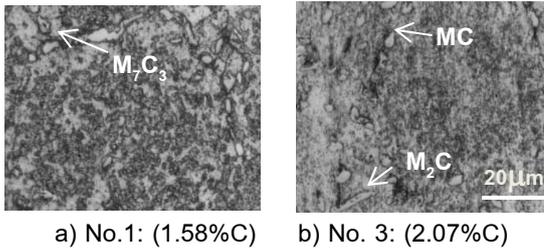


Figure 1 As-hardened microstructure of specimens hardened from 1373 K.

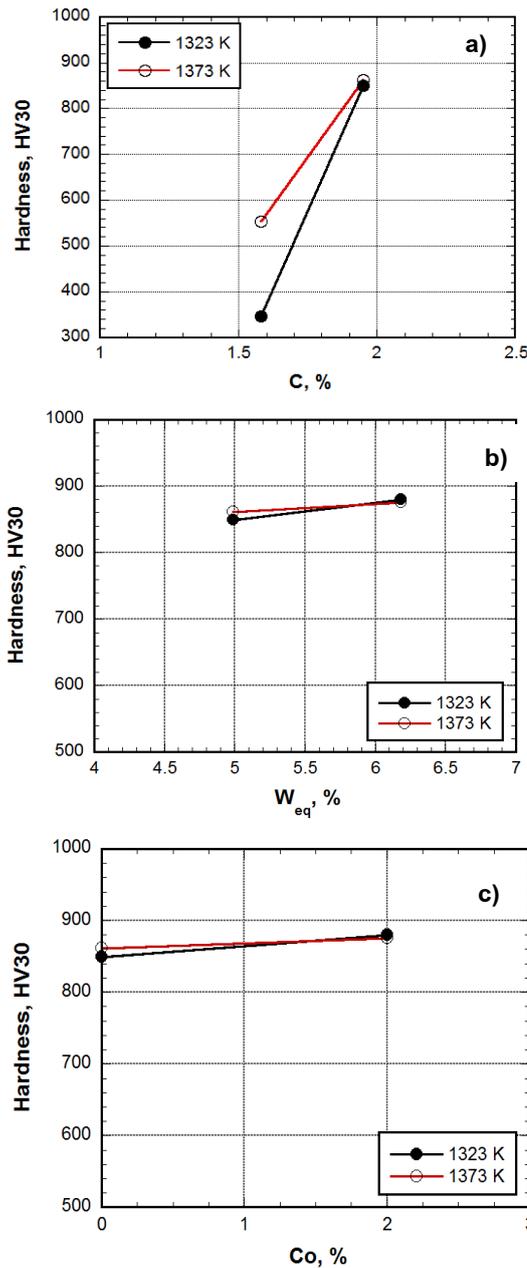


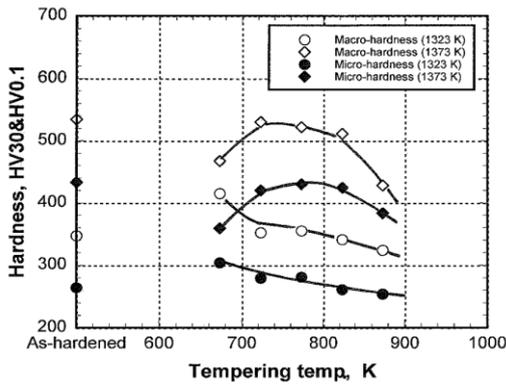
Figure 2 Effect of alloying elements on hardness in the as-hardened state.

ดังนั้นจะอธิบายผลของทั้งสองธาตุในรูปของค่า ทั้งสแตนสมมูล (W_{eq})¹ โดย $W_{eq} = \%W + 2\%Mo$ จาก Figure 2 พบว่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเพิ่มปริมาณ C เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ คาร์บอนจะเพิ่มความสามารถในการละลายของ C ในออสเทนไนต์ ส่งผลให้ความสามารถในการชุบ แข็งดีขึ้นและมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการ ชุบแข็งมีความแข็งสูง ในขณะที่เดียวกันการเพิ่ม C จะส่งผลให้เกิดคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่มีขนาดเล็ก ได้ง่าย คาร์ไบด์ลำดับที่สองเหล่านี้มีความแข็งสูง และกระจายฝังตัวในเนื้อพื้น ทำให้เนื้อพื้นมีความ แข็งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ 2 และชิ้นงาน ที่ 3 ซึ่งมีปริมาณ C ใกล้เคียงกัน พบว่าการเพิ่ม ค่า W_{eq} ไม่ส่งผลมากนักเพราะชิ้นงานทั้งคู่มี ความสามารถในการชุบแข็งสูง ทั้งนี้แม้ว่า Mo และ W จะทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงมาก ขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้เกิดออสเทนไนต์ เหลือค้างที่มีความแข็งต่ำในเนื้อพื้นมากขึ้น เช่นกัน ดังนั้นเมื่อรวมผลทั้งสองอย่างด้วยกันแล้ว ความแข็งจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วน Co ไม่มี ผลต่อความแข็งในสภาพชุบแข็งเพราะไม่มีผลต่อ การเปลี่ยนเฟส⁶ แต่จะมีผลทำให้เหล็กหล่อทนต่อ อุณหภูมิสูงได้ดี

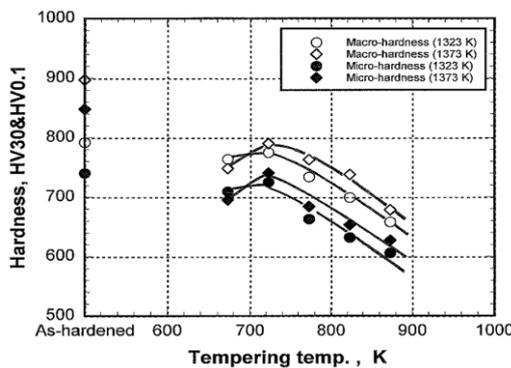
สภาพอบคืนตัว

ในขั้นตอนการอบคืนตัว โครงสร้างจุลภาค จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพหล่อ โดย ออสเทนไนต์ในสภาพหล่อเกิดการเปลี่ยนเฟส เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สอง ในระหว่างการอบคืนตัว ความสัมพันธ์ระหว่าง ความแข็งและอุณหภูมิในการอบคืนตัวแสดงดัง Figure 3 พบว่ากราฟความแข็งแสดงการเกิด Secondary hardening มากน้อยต่างกัน เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สอง และการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทน ไซต์ โดยคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่เกิดขึ้นเป็นชนิด MC, M₂C และ M₂₃C₆⁷ ทั้งนี้คาร์ไบด์เหล่านี้จะมี ความแข็งสูงกว่าคาร์ไบด์ในเหล็กกล้า^{1,2} ความ

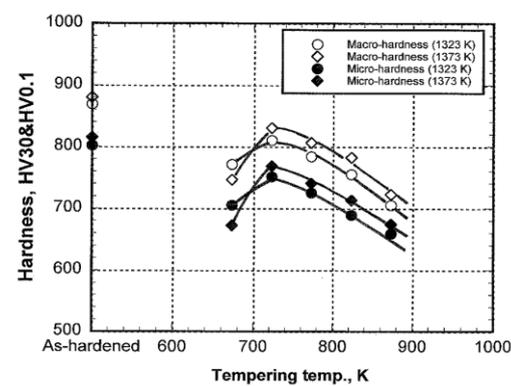
แข็งในชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1373 K สูงกว่าที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1323 K ซึ่งเกิดจากการใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งสูงขึ้นทำให้ธาตุผสมต่างๆสามารถละลายในออสเทนไนต์ได้มากขึ้น หลังการเย็นตัวจะทำให้มีปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างในเนื้อพื้สูงขึ้น



(a) No.1: 1.58%C



(b) No.2: 1.95%C



(c) No.3 : 2.07%C

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

เมื่อทำการอบคืนตัวจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ secondary hardening ได้สูง ส่วนชิ้นงานที่ 1 มีความแข็งแรงหลังการอบคืนตัวต่ำเนื่องจากโครงสร้างพื้ในสภาพชุบแข็งประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์เป็นส่วนใหญ่ โดยออสเทนไนต์เหลือค้างอยู่เพียงเล็กน้อย ทำให้เกิด Secondary hardening ได้น้อย ค่าความแข็งแรงสูงสุดในการอบคืนตัว (H_{Tmax}) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 723 K เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่านี้พบว่าความแข็งแรงลดลงอย่างมากเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Over-tempering ค่าความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองนี้คือ 840 HV30 ได้รับในชิ้นงานที่ 3

ผลของธาตุผสมต่อค่า H_{Tmax} แสดงดัง Figure 4 ค่า H_{Tmax} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณ C การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงนี้เกิดจากการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์และการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองที่มีความแข็งแรงสูง การเพิ่มปริมาณ C จะส่งเสริมให้เกิดคาร์ไบด์ลำดับที่สองมากขึ้นและในขณะเดียวกันจะทำให้ได้เฟสมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงสูง ส่วนการเพิ่มค่า Weq ไม่ส่งผลมากนักต่อค่า H_{Tmax} ซึ่งอาจเกิดจากธาตุ Mo และ W ส่วนใหญ่จะถูกใช้สำหรับการฟอร์มยูเทคติกไปดี เพราะธาตุเหล่านี้สามารถเกิดคาร์ไบด์ได้แรงมาก ทำให้เหลือธาตุเหล่านี้ในออสเทนไนต์เพียงเล็กน้อย เมื่ออบคืนตัวจึงไม่มีผลต่อค่า H_{Tmax} อย่งไรก็ตามที่ปริมาณธาตุผสมเท่ากันพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิสูงจะให้ความแข็งแรงที่สูงกว่า เนื่องจากธาตุผสมต่างๆสามารถละลายในออสเทนไนต์ได้มากขึ้น ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านั้น ส่วน Co มีผลต่อค่า H_{Tmax} เล็กน้อยเพราะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนเฟส แต่ Co มีผลทำให้คงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงเพราะสามารถป้องกันการโตขึ้นของเฟสต่างๆได้ ดังจะเห็นได้จากกราฟความแข็งแรงของชิ้นงานที่ 3 ลดลงช้าที่สุดเมื่อเกิด Over-tempering

ดังนั้นจึงสามารถสรุปจากผลการทดลองได้ว่าการเพิ่มคาร์บอนจะให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

มากที่สุด ส่วนการเพิ่มค่า Weq และ Co มีผลต่อความแข็งเล็กน้อยแต่ยังคงจำเป็นสำหรับเหล็กหล่อที่ต้องการความแข็งสูง กล่าวคือ ถ้าต้องการความแข็งหลังการอบคืนตัวสูงกว่า 800 HV30 ซึ่งเพียงพอกับการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์ เหล็กหล่อควรต้องมี C สูงกว่า 2% ค่า Weq มากกว่า 6 และเติม Co อย่างน้อย 2%

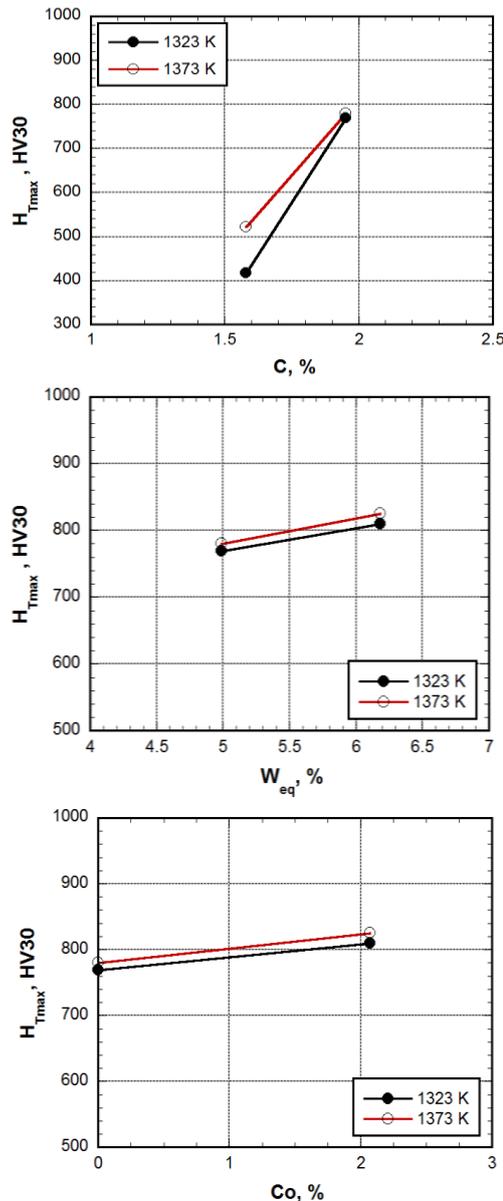


Figure 4 Effect of alloying elements on maximum tempered hardness (H_{Tmax}).

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของธาตุผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งขณะทำการวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อที่เติมธาตุผสมหลายชนิดขณะทำการวิธีทางความร้อนสรุปได้ดังนี้

1. ความแข็งในสภาพชุบแข็งเปลี่ยนแปลงตามชนิดและปริมาณของธาตุผสม โดยความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณ C ความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่าทั้งสเดนสมมูล (Weq) และ ปริมาณ Co เพิ่มขึ้น

2. กราฟความแข็งในสภาพอบคืนตัว แสดงการเกิด Secondary hardening เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สอง และการเปลี่ยนเฟสจากออสเตนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์

3. ค่าความแข็งสูงสุดหลังการอบคืนตัว (H_{Tmax}) เกิดขึ้นเมื่ออบคืนตัวที่อุณหภูมิ 723 K โดยค่า H_{Tmax} เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณ C เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่า Weq และ Co เพิ่มขึ้น

4. ค่า H_{Tmax} สูงสุดในการทดลองนี้คือ 840 HV30 ได้รับในชิ้นงานที่มีปริมาณ 2.07%C-2.07%Co และ Weq เท่ากับ 6.18 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนงานวิจัย และบริษัทพานาพลัสจำกัด (โครงการพัฒนานักวิจัย และงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ปี 2556) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณ Prof. Dr. Yasuhiro Matsubara, Kurume National College of Technology, Japan และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Matsubara Y, Sasaguri N, Hashimoto M. The history and development of cast rolls for hot working mill. The 4th Asian Foundry Congress-Australia; 1996. P. 251-261.
2. Laird, G. Gundlach, R. Rohrig, K. Abrasion-Resistance Cast Iron Handbook. USA: American Foundry Society; 2000.
3. Hong-Qiang Wu et al. Solidification Sequence of Multi-Component White Cast Iron, Journal of Japan Foundry Engineering Society 1996; 68 (8): 637-643
4. Matsubara, Y et al. Continuous cooling transformation behavior of multi-alloyed white cast iron. Journal of Japan Foundry Engineering Society 1999; 71: 183-189.
5. Hashimoto M. Effects of Alloying Element on Compressive and Wear Properties of Multi-component White Cast irons for Steel Rolling Mill Rolls. Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills; 2011. P.183-192.
6. Sasaguri N. et al. Influence of Cobalt Content on Heat Treatment Behavior and Abrasive Wear Characteristics of Multi-Component White Cast Iron. Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills; 2011. P. 77-87.
7. Khanitnantharak W. et al. Effects of Carbon and Heat Treatment on the Hardness and Austenite Content of a Multi-Component White Cast Iron. AFS Transactions 2009; 117: 435-444.
8. Mário Boccalini Jr, Alzira Vicente De O C, Amilton S. Niobium in multi-component white cast iron. Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron for Rolling and Pulverizing Mills; 2008. P. 49-64.