

อิทธิพลของการอบชุบต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni-0.3%Mo

นุชธนา พูลทอง¹
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาปัจจัยในการผลิตต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ADI (Austempered Ductile Iron) 1.5%Ni-0.3%Mo ปัจจัยในการผลิตที่ศึกษาคือ อุณหภูมิออสเทนไนท์ (austenitizing temperature) อุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์ริง (austempering temperature) และเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริง (austempering time) จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิออสเทนไนท์ซึ่งมีผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นเบไนท์ (bainite) ช้าลง อุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์ริงมีผลต่อชนิดของโครงสร้างเบไนท์ โดยเมื่อทำออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 °C จะได้โครงสร้างเบไนท์บน และถ้าทำออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 350 °C จะได้โครงสร้างเบไนท์ล่าง เวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงค่อนข้างวิกฤต และมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ADI ค่อนข้างมาก โดยชิ้นงานหนา 2.5 มม. จะมีค่าการทดสอบแรงดึงสูงสุดคือ 1050 MPa เมื่อทำออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 900 °C และทำออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สำหรับชิ้นงานเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni-0.3% Mo ที่ทำการทดลองมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 313-426 HB และมีความแข็งแรงอยู่ในช่วงระหว่าง 710-1050 MPa จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ADI ขึ้นอยู่กับโครงสร้างเริ่มต้นและปัจจัยในการผลิต

¹ อาจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ
งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี

The influences of Austempering Temperatures on Microstructures and Mechanical Properties of Austempered 1.5%Ni-0.3%Mn Ductile Iron

Nuchthana Poolthong ¹

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

The objective of this research is to study the effects of process parameters on microstructures and mechanical properties of Austempered Ductile Iron (ADI) 1.5 %Ni- 0.3 %Mn. Processing parameters to be study were austenitizing and austempering temperatures and austempering time. It was found that increasing austenitizing temperature resulted in slow transformation rate and coarse structures. Increasing austempering temperature to above 350 °C gave the upper bainite structures and below this temperature, the lower bainite was obtained. The optimum mechanical properties of ADI were found to be critically dependent on austempering time. For 2.5 mm specimen thickness, the highest tensile strength was obtained by austenitizing at 900 °C and austempering at 300 °C for 2 hours. Hardness and tensile strength of the ADI were found to be 313 - 426 HB and 710 - 1050 MPa respectively. The result showed that quality castings and proper heat treatment were required for optimum mechanical properties of the ADI.

¹Lecturer, Division of Materials Technology, School of Energy and Materials

บทนำ

เหล็กหล่อ ADI (Austempered Ductile Iron) ได้รับความสนใจนำมาใช้งานทางวิศวกรรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยนำมาใช้แทนเหล็กกล้าและเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบขึ้นรูปในชิ้นส่วนต่างๆ เช่น เฟือง เพลาข้อเหวี่ยง และข้อต่อก้านลูกสูบเครื่องยนต์ (connecting rod) เป็นต้น เนื่องจากเหล็กหล่อนชนิดนี้มีคุณสมบัติทางกลที่ดี โดยมีคุณสมบัติร่วมระหว่างความเหนียวและความแข็ง ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง (high strength materials) อย่างไรก็ตามการใช้งานในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากยังขาดข้อมูล ขาดความเข้าใจ ความรู้ส่วนใหญ่ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย และผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังขาดข้อมูลในเชิงปฏิบัติ การที่จะผลิตชิ้นงานได้อย่างมีคุณภาพอันเนื่องมาจากวิธีในการอบชุบและความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริง (austemperability)

ชิ้นงานที่มีความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริงจะต้องสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (pearlite) และเฟอร์ไรต์ (ferrite) ในขณะที่อบชุบชิ้นงานและสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเบไนท์ในทั้งสองปฏิกิริยา (reaction) ปฏิกิริยาในขั้นตอนที่หนึ่งคือ ออสเทนไนท์เปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟอร์ไรต์และออสเทนไนท์ที่มีคาร์บอนสูง (carbon-enriched austenite) และปฏิกิริยาในขั้นตอนที่สองคือออสเทนไนท์ที่มีคาร์บอนสูงเปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรต์และคาร์ไบด์ (carbide) เมื่อปฏิกิริยาแรกสิ้นสุดลงชิ้นงานจะมีความเหนียว (toughness) สูงสุด ขณะที่ปฏิกิริยาในขั้นตอนที่สองจะเพิ่มความเปราะ (embrittlement) ให้กับชิ้นงานเนื่องมาจากโครงสร้างคาร์ไบด์ [1, 2] ดังนั้นจึงต้องควบคุมไม่ให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนที่สองเกิดขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้เวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงที่เหมาะสมจนชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาขั้นตอนที่หนึ่งสิ้นสุดลงเท่านั้น ซึ่งเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานด้วย

วิธีหนึ่งในการเพิ่มความความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริงคือการเติมธาตุผสมที่มีคุณสมบัติในการเลื่อน curve ของ TTT-diagram ไปทางขวามือ เพื่อให้ชิ้นงานมีช่วงเวลาฟักตัว (incubation period) ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเพิ่มขึ้น [3] การเติมธาตุผสมจะต้องเลือกธาตุผสมและปริมาณให้มีการเกิดการแยกตัวของธาตุผสมน้อยที่สุด และมีความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริงที่ดี ธาตุผสมที่เกิดการแยกตัวมากที่สุดคือแมงกานีส ซึ่งแมงกานีสเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดคาร์ไบด์ในชิ้นงานเป็นผลให้ความสามารถในการกลึงไสตอกแต่งชิ้นงาน (machinability) ไม่ดี และส่งผลต่อการเกิดการแยกตัวของธาตุผสมในขณะที่ทำออสเทมเปอร์ริง แต่เนื่องจากแมงกานีสเป็นธาตุหลักในเหล็กหล่ออยู่แล้ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมแต่ไม่ควรเติมธาตุแมงกานีสเกิน 0.3% โมลิบดีนัมมีผลต่อการเพิ่มความความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) แต่มีผลต่อการแยกตัวของธาตุผสมเช่นเดียวกับแมงกานีสคือทำให้เกิดคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน การเติมโมลิบดีนัมตั้งแต่ 0.3% ขึ้นไปจะทำให้ค่าในการทดสอบแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง นิเกิลเป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความความสามารถในการชุบแข็งการเติมนิเกิลในเหล็กหล่อเหนียวมากกว่า 2% จะทำให้เกิดการแยกตัวของนิเกิลบริเวณกราไฟท์และทำให้เกิดมาร์เทนไซต์ในบริเวณที่เกิดการแยกตัวหลังการอบชุบ เป็นสาเหตุให้ความเหนียวลดลง [4] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเติมธาตุผสมเพียงธาตุใดธาตุหนึ่งจะทำให้เกิดผลเสียมากกว่าผลดี ดังนั้นในการเติมธาตุเพื่อเพิ่มความความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริงจึงควรเติมทั้งสองธาตุคือนิเกิลและโมลิบดีนัมร่วมกัน

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของธาตุผสมและความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริงของชิ้นงานแล้ว เหล็กหล่อ ADI 1.5% Ni-0.3% Mo เป็นส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมในการศึกษา โดยจะศึกษาเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อ ADI ที่ไม่มีธาตุผสมจากการทดลองในอดีต [5]

วัตถุประสงค์ในการทำการวิจัยคือศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การผลิตต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของเหล็กหล่อ ADI โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคืออุณหภูมิออสเทนไนท์ซึ่ง อุณหภูมิและเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริง เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงปฏิบัติการที่ละเอียดสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้การใช้งานแพร่หลายมากขึ้น

การทดลอง

ในการทำการวิจัยครั้งนี้ได้หล่อชิ้นงานเป็นลักษณะ Y-block ในแบบหล่อทราย CO₂ ตามมาตรฐาน JIS G 5502 ว่าด้วยการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกราไฟท์กลม ขนาดฐาน Y-block 25 มม. การหลอมโลหะใช้เตาเหนี่ยวนำ (induction furnace) ขนาดความจุ 150 กก. ทำการเติมแมกนีเซียมด้วยวิธีวางแมกนีเซียมไว้ก้นเบ้า (sandwich open ladle) ทำอินออกคิวเลชัน (innoculation) ด้วยเฟอร์โรซิลิกอน (75%Si) หล่อหลอมชิ้นงานจำนวน 4 ชิ้น มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ 3.4 %C, 2.5%Si, 0.4%Mn, 0.05%Mg, 1.5%Ni และ 0.3%Mo จากนั้นตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหล่อด้วยเครื่อง Emission Spectrometer ยี่ห้อ BAIRD รุ่น V-25

เมื่อหล่อเสร็จแล้วได้ตัดชิ้นงานบริเวณฐาน Y-block เพื่อนำไปทำชิ้นทดสอบดังในรูปที่ 1 การอบชุบชิ้นงานทำโดยอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิในช่วง 850-950 °C เป็นเวลา 30 นาที และทำออสเทมเปอร์ริงโดยใช้เตาเกลือซึ่งมีเกลือโซเดียมไนเตรท (sodium nitrate) และโปแตสเซียมไนเตรท (potassium nitrate) อย่างละ 1 ส่วน อบชุบที่อุณหภูมิ 250-400 °C ในช่วงเวลา 5-180 นาที แล้วทำให้เย็นตัวโดยชุบลงในน้ำ รายละเอียดดังในตารางที่ 1

การทดสอบคุณสมบัติทางกล ทำการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่อง UTM (universal testing machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Autograph AGB-10T และทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ ALBERT GNEHM รุ่น OM-150 โดยใช้หัวกดเป็นลูกบอลขนาด 2.5 มม. ใช้แรงกด 187.5 กก. ใช้เวลาทดสอบประมาณ 15 วินาที

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคทำโดยตัดชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงดึงในบริเวณด้านบนมาทำที่จับยึดชิ้นงาน (mounting) ทำการขัดหยาบจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 1200 ขัดละเอียดจนถึงผงเพชรขนาด 1 μm. กัดกรดด้วยกรดไนตริก 2% ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และวัดความหนาของแผ่นเฟอร์ไรต์โดยใช้ Image Analysis ยี่ห้อ Laika

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของธาตุผสมและความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริงของชิ้นงานแล้ว เหล็กหล่อ ADI 1.5% Ni-0.3% Mo เป็นส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมในการศึกษา โดยจะศึกษาเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อ ADI ที่ไม่มีธาตุผสมจากการทดลองในอดีต [5]

วัตถุประสงค์ในการทำการวิจัยคือศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การผลิตต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของเหล็กหล่อ ADI โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคืออุณหภูมิออสเทนไนท์ซิง อุณหภูมิและเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริง เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงปฏิบัติการที่ละเอียดสมบูรณ์ ซึ่งจะทำการใช้งานแพร่หลายมากขึ้น

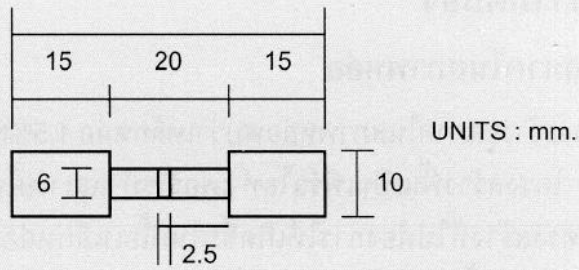
การทดลอง

ในการทำการวิจัยครั้งนี้ได้หล่อชิ้นงานเป็นลักษณะ Y-block ในแบบหล่อทราย CO₂ ตามมาตรฐาน JIS G 5502 ว่าด้วยการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกราไฟท์กลม ขนาดฐาน Y-block 25 มม. การหลอมโลหะใช้เตาเหนี่ยวนำ (induction furnace) ขนาดความจุ 150 กก. ทำการเติมแมกนีเซียมด้วยวิธีวางแมกนีเซียมไว้ก้นเบ้า (sandwich open ladle) ทำอินออกคูลชัน (innoculation) ด้วยเฟอร์โรซิลิกอน (75%Si) หล่อหลอมชิ้นงานจำนวน 4 ชิ้น มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ 3.4 %C, 2.5%Si, 0.4%Mn, 0.05%Mg, 1.5%Ni และ 0.3%Mo จากนั้นตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหล่อด้วยเครื่อง Emission Spectrometer ยี่ห้อ BAIRD รุ่น V-25

เมื่อหล่อเสร็จแล้วได้ตัดชิ้นงานบริเวณฐาน Y-block เพื่อนำไปทำชิ้นทดสอบดังในรูปที่ 1 การอบชุบชิ้นงานทำโดยอบออสเทนไนท์ซิงที่อุณหภูมิในช่วง 850-950 °C เป็นเวลา 30 นาที และทำออสเทมเปอร์ริงโดยใช้เตาเกลือซึ่งมีเกลือโซเดียมไนเตรท (sodium nitrate) และโปแตสเซียมไนเตรท (potassium nitrate) อย่างละ 1 ส่วน อบชุบที่อุณหภูมิ 250-400 °C ในช่วงเวลา 5-180 นาที แล้วทำให้เย็นตัวโดยชุบลงในน้ำ รายละเอียดดังในตารางที่ 1

การทดสอบคุณสมบัติทางกล ทำการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่อง UTM (universal testing machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Autograph AGB-10T และทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ ALBERT GNEHM รุ่น OM-150 โดยใช้หัวกดเป็นลูกบอลขนาด 2.5 มม. ใช้แรงกด 187.5 กก. ใช้เวลาทดสอบประมาณ 15 วินาที

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคทำโดยตัดชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงดึงในบริเวณด้านบนบนมาทำที่จับยึดชิ้นงาน (mounting) ทำการขัดหยาบจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 1200 ขัดละเอียดจนถึงผงเพชรขนาด 1 μm. กัดกรดด้วยกรดไนตริก 2% ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และวัดความหนาของแผ่นเฟอร์ไรท์โดยใช้ Image Analysis ยี่ห้อ Laika



รูปที่ 1 แสดงภาพชิ้นงานที่ใช้ในการอบชุบและทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 1 แสดงการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการทำออสเทมเปอร์

No.	Austenitizing Temp. ("C)	Austempering Temp. ("C)	Austempering Time (min.)
1	850	350	120
2	900	250	120
3	900	300	120
4	900	350	5
5	900	350	10
6	900	350	20
7	900	350	30
8	900	350	60
9	900	350	90
10	900	350	120
11	900	350	150
12	900	350	180
13	900	400	120
14	950	350	120

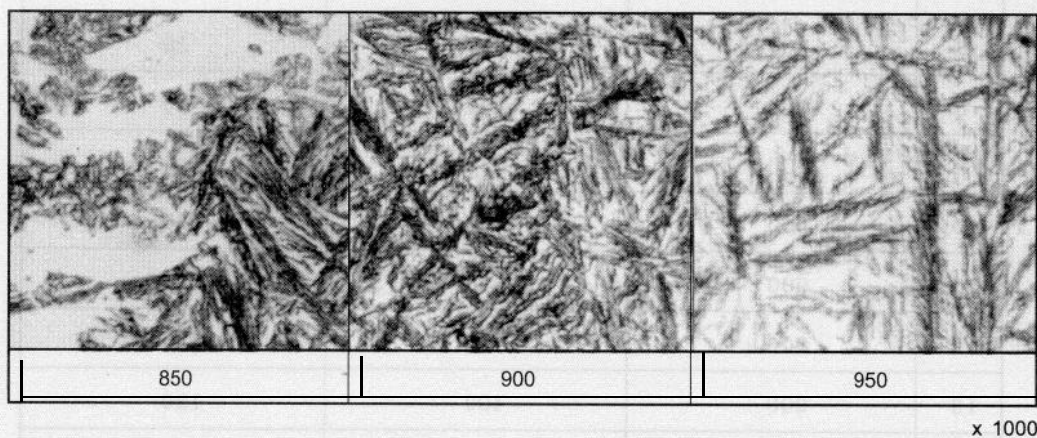
ผลและอภิปรายผลการทดลอง

1. โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อ

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อพบว่าเหล็กหล่อ 1.5%Ni - 0.3%Mo มีโครงสร้างประกอบไปด้วยกราฟไฟท์ โครงสร้างพื้นเป็นเฟิร์สไลท์-เฟอร์ไรท์ และพบโครงสร้างคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนคาร์ไบด์ เป็นโครงสร้างที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กหล่อเหนียวเพราะจะทำให้ความเหนียวและความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง สาเหตุที่เกิดคาร์ไบด์ในงานวิจัยนี้เนื่องมาจากส่วนผสมทางเคมีที่ไม่เหมาะสมคือมีปริมาณซิลิกอน 2.2% ซึ่งต่ำกว่าที่คำนวณไว้ ซิลิกอนมีคุณสมบัติเป็นกราฟไฟท์-ไดเซอรัลคือจะผลักรวมตัวกันกลายเป็น กราไฟท์ ซึ่งเป็นผลให้โอกาสที่คาร์บอนจะรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นคาร์ไบด์มีน้อยลง เมื่อมีซิลิกอนน้อยจึงทำให้เกิดคาร์ไบด์มาก [6]

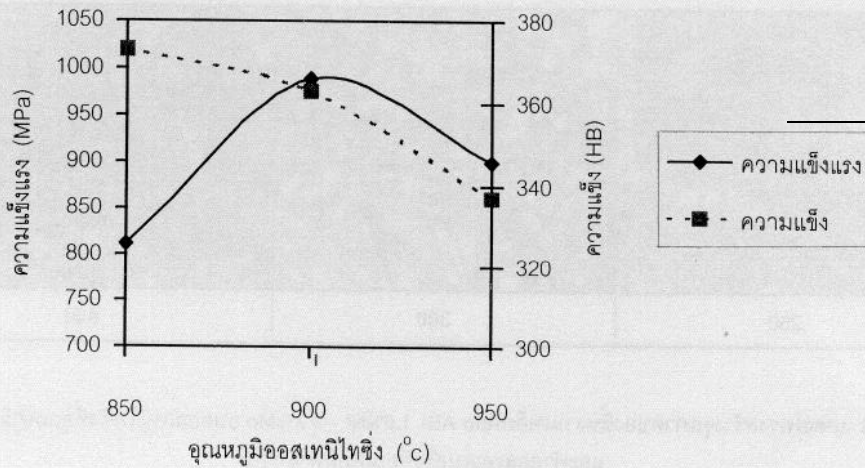
2. อิทธิพลของอุณหภูมิการอบออสเทนไนท์ซึ่ง

ในการทดลองได้ออบออสเทนไนท์ซึ่งชิ้นงานที่ 3 อุณหภูมิ คือ 850, 900 และ 950 °C และนำไปทำออสเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 350 °C เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบกัน ปรากฏว่าชิ้นงานที่อบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 850 °C ยังมีคาร์ไบด์อยู่ในโครงสร้างพื้น แสดงว่าการอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมินี้ไม่สามารถละลายคาร์ไบด์ได้ เมื่อทำการอบชุบจะได้โครงสร้างพื้นที่เป็นเบไนท์และคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni-0.3%Mo
อบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิต่างๆ และทำออสเทมเปอริงที่ 350 °C

เมื่อนำไปทดสอบแรงดึงเปรียบเทียบกัน ปรากฏว่าชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 900 °C มีค่าการทดสอบแรงดึงสูงที่สุด และชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 850 °C มีค่าการทดสอบแรงดึงต่ำที่สุด การทดสอบความแข็งเปรียบเทียบกันปรากฏว่าชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 850 °C มีค่าในการทดสอบสูงที่สุด แสดงในกราฟรูปที่ 1

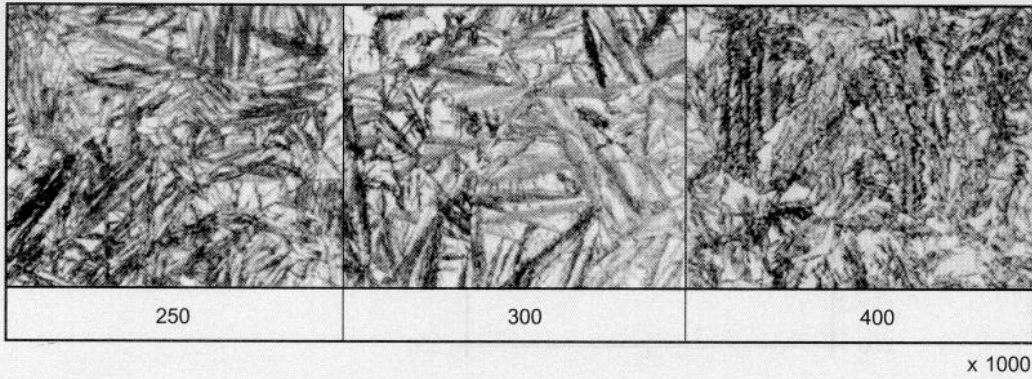


กราฟรูปที่ 1 แสดงค่าการทดสอบความแข็งแรงและความแข็งเมื่ออบเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni - 0.3%Mo อบอสเทนิไทซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ และทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 350 °C

อุณหภูมิและเวลาในการอบอสเทนิไทซ์ซึ่งมีผลต่อปริมาณคาร์บอนที่ละลายอยู่ในโครงสร้างพื้นซึ่งจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการทำออสเทมเปอร์และพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยชั้นงานที่อบที่อุณหภูมิสูงจะมีปริมาณคาร์บอนที่ละลายในโครงสร้างพื้นสูงกว่า เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอะตอมของคาร์บอนจะมีอัตราเร็วในการแพร่มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และจะมีขนาดเกรนของออสเทนไนท์ที่ใหญ่กว่าชั้นงานที่อบที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างชั้นงานที่มีปริมาณของคาร์บอนละลายต่ำกว่าและมีขนาดของเกรนออสเทนไนท์เล็กกว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้เร็วกว่า [7] ดังนั้นชั้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 850 °C จะมีปริมาณเบไนท์ในโครงสร้างพื้นมากที่สุด แต่อุณหภูมินี้ต่ำเกินกว่าที่จะอบละลายคาร์ไบด์จากโครงสร้างในสภาพหล่อ ซึ่งโครงสร้างคาร์ไบด์เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงและเปราะ จึงเป็นผลให้การทดสอบแรงดึงชั้นงานที่อุณหภูมินี้มีค่าต่ำที่สุดและมีค่าในการทดสอบความแข็งแรงสูงที่สุด

3. อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์

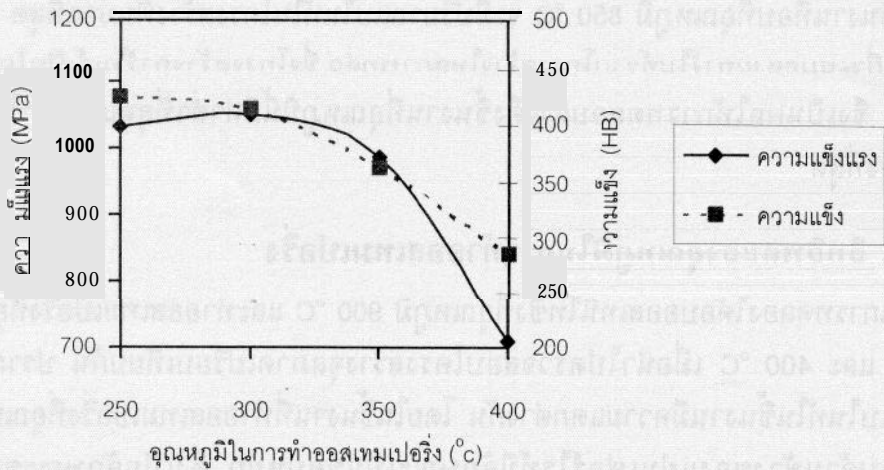
ในการทดลองได้ออบอสเทนิไทซ์ที่อุณหภูมิ 900 °C และทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 250, 300, 350 และ 400 °C เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบกัน ปรากฏว่าลักษณะโครงสร้างเบไนท์ในชั้นงานมีความแตกต่างกัน โดยในชั้นงานที่ทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 400 °C บริเวณขอบด้านข้างของแผ่นเฟอร์ไรท์มีลักษณะเป็นขอบหยัก ซึ่งเป็นลักษณะของเบไนท์บนในเหล็กหล่อเหนียว ในขณะที่ชั้นงานที่ทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 °C ขอบของแผ่นเฟอร์ไรท์จะมีลักษณะเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของเบไนท์ล่างและชั้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 350 °C แผ่นเฟอร์ไรท์ที่ได้มีลักษณะร่วมกันระหว่างเบไนท์บนและเบไนท์ล่าง เมื่อนำไปวัดขนาดของแผ่นเฟอร์ไรท์พบว่าในชั้นงานที่ทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 400, 350, 300 และ 250 °C ได้ขนาดของแผ่นเฟอร์ไรท์เท่ากับ 0.9, 0.6, 0.2 และ 0.09 μm . ตามลำดับ แสดงว่าชั้นงานที่อบที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีขนาดของแผ่นเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างเบไนท์ที่หนามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni - 0.3%Mo ออบอสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 °C และทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

เมื่อนำไปทดสอบแรงดึงและความแข็งเปรียบเทียบกัน ปรากฏว่าชิ้นงานที่ทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่าในการทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งต่ำสุด และชิ้นงานที่ทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าในการทดสอบแรงดึงสูงที่สุด ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2

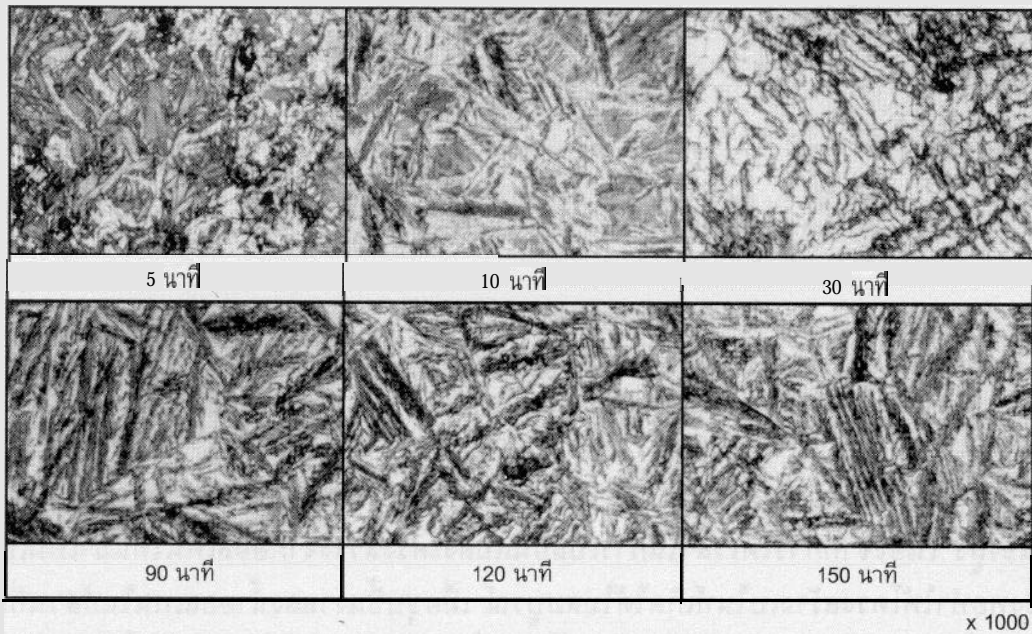
อุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์มีอิทธิพลต่อการทดสอบคุณสมบัติทางกลคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์จะทำให้ความแข็งแรงลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากขนาดของแผ่นเฟอร์ไรท์ที่โตขึ้นหรือหยาบมากขึ้น อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางกลนี้จะขึ้นอยู่กับเวลาในการทำออสเทมเปอร์ด้วย [8]



กราฟรูปที่ 2 แสดงค่าการทดสอบความแข็งและความแข็งแรงของเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni - 0.3%Mo เมื่ออบอสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 °C และทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

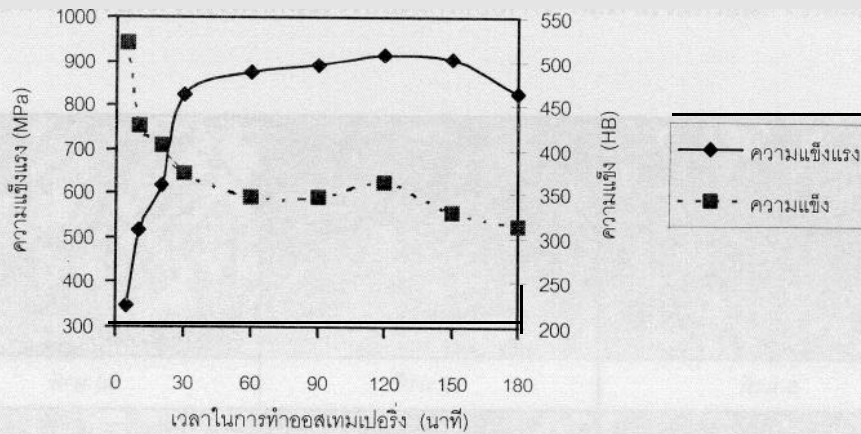
4. อิทธิพลของเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริง

ในการทดลองได้อบชุบชิ้นงานที่เวลา 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที และชุบลงน้ำทันที เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบกัน ปรากฏว่าชิ้นงานที่อบที่เวลา 5 นาที โครงสร้างที่ได้ส่วนใหญ่เป็นมาร์เทนไซต์และชิ้นงานที่อบที่เวลา 150 นาที ได้โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเบไนท์ แสดงว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงจะเกิดโครงสร้างเบไนท์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4



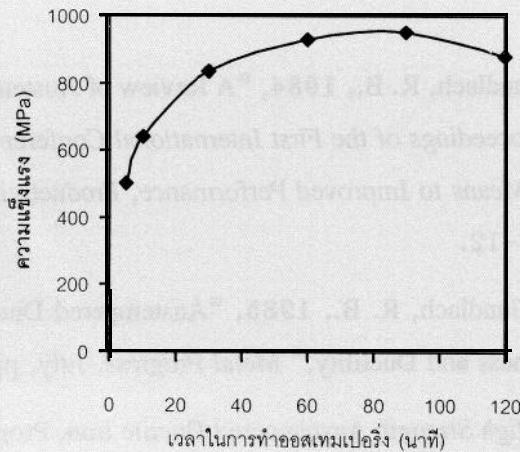
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni - 0.3% Mo อบออสเทนไทท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 °C ทำออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 350 °C ที่เวลาต่างๆ กัน

เมื่อนำไปทดสอบแรงดึงเปรียบเทียบกัน ปรากฏว่าชิ้นงานที่ทำอสเทมเปอร์เป็นเวลา 120 นาที มีค่าการทดสอบแรงดึงสูงที่สุด และชิ้นงานที่ทำอสเทมเปอร์เป็นเวลา 5 นาที มีค่าการทดสอบแรงดึงต่ำที่สุด และการทดสอบความแข็งเปรียบเทียบกันพบว่าชิ้นงานมีความแข็งสูงมากเมื่อทำอสเทมเปอร์ที่เวลาต่ำกว่า 1 ชั่วโมง ค่าในการทดสอบความแข็งแสดงในกราฟรูปที่ 3



กราฟรูปที่ 3 แสดงค่าการทดสอบความแข็งแรงและความแข็งเมื่อทำอสเทมเปอร์เหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni - 0.3%Mo โดยอบ ออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 °C และทำอสเทมเปอร์ซึ่งที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้เวลาต่าง ๆ

การทำอสเทมเปอร์โดยใช้ช่วงเวลาดำกว่า 60 นาที จะได้ค่าในการทดสอบแรงดึงต่ำในขณะที่ความแข็งสูง เนื่องจากการให้เวลาในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนท์มาเป็นเบไนท์ไม่เพียงพอทำให้โครงสร้างเบไนท์เกิดได้ไม่สมบูรณ์ เมื่อชุบชิ้นงานลงในน้ำออสเทนไนท์ส่วนที่เหลือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งมาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเบไนท์ [1] จากการเปรียบเทียบการทดสอบความแข็งแรงของเหล็กหล่อ ADI 1.5%Ni-0.3%Mo กับเหล็กหล่อ ADI ที่ไม่มีธาตุผสม [5] พบว่าค่าการทดสอบแรงดึงของเหล็กหล่อ ADI ที่ไม่มีธาตุผสม จะเริ่มลดลงเมื่อทำอสเทมเปอร์ที่เวลา 90 นาที ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4 ในขณะที่ชิ้นงานเหล็กหล่อ ADI 1.5% Ni-0.3% Mo จะมีค่าการทดสอบแรงดึงที่เริ่มลดลงเมื่อเวลาในการทำอสเทมเปอร์ผ่านไป 120 นาที จากการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมนิเกิลและโมลิบดีนัม จะช่วยในการหน่วงเหนี่ยวการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเบไนท์ในขั้นตอนที่สอง ทำให้เหล็กหล่อเหนียวมีความสามารถในการทำอสเทมเปอร์ดีขึ้น



กราฟรูปที่ 4 แสดงค่าการทดสอบความแข็งแรงเมื่อทำออสเทมเปอร์ริงเหล็กหล่อ ADI ที่ไม่มีธาตุผสม โดยอบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 °C และทำออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 350 °C โดยใช้เวลาต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

1. โครงสร้างเริ่มต้นเป็นสิ่งที่มียุทธูปผลต่อโครงสร้างหลังทำออสเทมเปอร์ริง โดยถ้ามีคาร์ไบด์ในโครงสร้างเริ่มต้นจะยากต่อการทำให้สลายไปโดยการอบให้เป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิต่ำ
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการอบออสเทนไนท์ซึ่งมียุทธูปผลต่อขนาดของแผ่นเฟอไรท์และปริมาณเบไนท์ ซึ่งงานที่อบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 950 °C จะมีความหนาของแผ่นเฟอไรท์มากที่สุดการทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่าชิ้นงานที่อบออสเทนไนท์ซึ่งที่อุณหภูมิ 900 °C มีค่าการทดสอบแรงดึงสูงที่สุด
3. อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริงมียุทธูปผลต่อชนิดของโครงสร้างเบไนท์และขนาดของแผ่นเฟอไรท์ โดยชิ้นงานที่อบชุบที่อุณหภูมิ 400 °C มีโครงสร้างเป็นเบไนท์บน และชิ้นงานที่อบชุบที่อุณหภูมิ 250 และ 300 °C มีโครงสร้างเป็นเบไนท์ล่าง การทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่าชิ้นงานที่อบชุบที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่าการทดสอบแรงดึงต่ำที่สุด
4. เวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงมียุทธูปผลต่อคุณสมบัติทางกล เวลาที่ดีที่สุดในการทำออสเทมเปอร์ริงถ้ามีอุณหภูมิในการอบออสเทนไนท์ซึ่ง 900 °C อบชุบที่อุณหภูมิออสเทมเปอร์ริง 350 °C คือ 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นถ้าเพิ่มเวลาในการอบค่าการทดสอบแรงดึงจะลดลงอีกครั้ง
5. ธาตุผสมที่เติมในเหล็กหล่อเหนียวเป็นสิ่งที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริง โดยจะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเบไนท์เป็นไปได้อย่างช้าลง ทำให้มีช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้มากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นในชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่

เอกสารอ้างอิง

1. Janowak, J. F and Gundlach, R. B., 1984, "A Review of Austempered Ductile Cast Iron Metallurgy," *Proceedings of the First International Conference on Austempered Ductile Iron : Your Means to Improved Performance, Productivity, and Cost*, April 2-4, Chicago, pp. 1-12.
2. Janowak, J. F. and Gundlach, R. B., 1985, "Austempered Ductile Iron Combines Strength with Toughness and Ductility," *Metal Progress*, July, pp. 19-26.
3. Dorazil, E., 1991, *High Strength Austempered Ductile Iron*, Progus, Ellis Horwood, 248 p.
4. Blackmore, P. A. and Harding, R. A., 1984, "Austempered Ductile Cast Iron," *Proceedings of the First International Conference on Austempered Ductile Iron : Your Means to Improved Performance, Productivity, and Cost*, April 2-4, Chicago, pp.117-134.
5. Poolthong, N., 1995, *Influences of Austempering Temperatures and Compositions on Structures and Properties of Austempered Ductile Iron*, M. Eng. Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Thailand.
6. QIT, 1990, *Ductile Iron Data for Design Engineers*, Quebec, QIT-Fer et Titane Inc., pp. (4-1)-(4-34).
7. Reed - Hill, R. E., 1992, *Physical Metallurgy Principles*, New York, PWS-KENT, pp. 644-645.
8. Moore, D. J., Rouns, T. N. and Rundman, K. B., 1985, "The Effect of Heat Treatment, Mechanical Deformation, and Alloying Element Additions on the Rate of Bainite Formation in Austempered Ductile Irons," *Journal of Heat Treatment*, Vol. 4, No. 1, pp. 7-23.