

การหล่อใบจักรนิกเกิลลูมินัมบรอนซ์

นาวาเอก ประดิษฐ์ สำอางค์อินทร์

รองผู้อำนวยการอุทกหารเรือธนบุรี กรมอุทกหารเรือ

นาวาโท พินัย มุ่งสันติสุข

หัวหน้าช่างโรงงานหล่อหลอมและไม้แบบ

แผนกโรงงานเครื่องกล กองโรงงาน อุทกหารเรือธนบุรี กรมอุทกหารเรือ

นาวาตรี เสวียง เลื่อนบุญ

ประจำแผนกทดสอบวัสดุ

กองควบคุมคุณภาพ กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกหารเรือ



บทคัดย่อ

นิกเกิลลูมินัมบรอนซ์มีความแข็งแรง ความแข็ง และความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่าแมงกานีสบรอนซ์ จึงถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย ทั้งด้วยวิธีการหล่อและการขึ้นรูป นอกจากนี้นิกเกิลลูมินัมบรอนซ์ยังมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าแมงกานีสบรอนซ์ประมาณ 8% ดังนั้นจึงทำให้นิกเกิลลูมินัมบรอนซ์ได้เปรียบเชิงน้ำหนักในการนำไปใช้งาน หรือสามารถออกแบบให้ชิ้นงานบางลงกว่าเดิมได้ในสภาวะการใช้งานเดียวกันกับแมงกานีสบรอนซ์ แต่เนื่องจากนิกเกิลลูมินัมบรอนซ์มีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนจากสภาพโลหะหลอมเหลวไปเป็นของแข็งที่แคบมาก และธาตุผสมมีจุดหลอมเหลวและความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันมาก ทำให้มักเกิดปัญหาความไม่สม่ำเสมอของธาตุผสมในชิ้นงาน เกิดโพรงหดตัว และโพรงแก๊สในชิ้นงานหล่อง่าย จึงทำให้การผลิตนิกเกิลลูมินัมบรอนซ์ด้วยวิธีการหล่อมีความซับซ้อนและยังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศไทย อุทกหารเรือธนบุรี กรมอุทกหารเรือ จึงได้ทดลองหล่อชิ้นงานจากนิกเกิลลูมินัมบรอนซ์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของนิกเกิลลูมินัมบรอนซ์ เช่น การเย็นตัว การเกิดออกซิเดชัน การเกิดโพรงหดตัวและโพรงแก๊ส เป็นต้น เพื่อนำไปสู่การหล่อใบจักรนิกเกิลลูมินัมบรอนซ์สำหรับการใช้งานจริงต่อไป

1. บทนำ

ใบจักรเรือเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนการหมุนของเพลลา ซึ่งได้รับแรงขับเคลื่อนจากเครื่องยนต์ให้กลายเป็นกำลังขับเรือให้เกิดการเคลื่อนที่ ใบจักรเรือจึงต้องมีความแข็งแรงสูงเพียงพอเพื่อที่จะรับภาระได้โดยไม่เกิดความเสียหาย มีความแข็ง และความเหนียวที่เหมาะสมที่จะทำให้ใบจักรสามารถทนต่อการเสียดสีและการกระแทกของวัตถุใต้น้ำโดยไม่เกิดการแตกหัก รวมถึงต้องมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในน้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำจืด ซึ่งเรือจะต้องเดินทางไปปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี ดังนั้นใบจักรเรือจึงจำเป็นต้องผลิตจากวัสดุที่มีการผสมผสานกันอย่างลงตัวระหว่างความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว และความต้านทานต่อการกัดกร่อน ตลอดจนต้องใช้เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตที่ถูกต้องจึงจะทำให้ได้ใบจักรที่มีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งาน

2. วัสดุสำหรับทำใบจักร

วัสดุที่ใช้ในการผลิตใบจักรมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น ทองเหลือง บรอนซ์ และสแตนเลส ใบจักรส่วนมากที่ใช้งานในกองทัพเรือจะผลิตจากแมงกานีสบรอนซ์ และนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ โดยใบจักรแมงกานีสบรอนซ์จะผลิตโดยโรงงานหล่อหลอมและไม้แบบแผนกโรงงานเครื่องกล กองโรงงาน อุทกศาสตร์เรือธนบุรี กรมอุทกศาสตร์เรือ เพื่อใช้ทดแทนใบจักรเดิมที่เกิดการชำรุดเสียหาย ในส่วนของใบจักรนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์มักจะเป็นใบจักรที่สั่งนำเข้ามาจากต่างประเทศเพื่อติดตั้งให้กับเรือลำใหม่ หรือเพื่อเปลี่ยนทดแทนใบจักรเดิมที่เกิดการชำรุดเสียหายและมีความจำเป็นต้อง

ใช้เรือเร่งด่วน หรือในกรณีที่ใบจักรเรือมีขนาดใหญ่เกินขีดความสามารถที่โรงงานหล่อหลอม จะทำการผลิตด้วยแมงกานีสบรอนซ์ได้

2.1 แมงกานีสบรอนซ์

แมงกานีสบรอนซ์หรือทองเหลืองความแข็งแรงสูง (High - Strength Yellow Brass) ตามมาตรฐาน ASTM ได้แบ่งชั้นของแมงกานีสบรอนซ์หล่อไว้หลายชั้นคุณภาพ โดยชั้น C86500 ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เป็นไปตามตารางที่ 1 และ 2 มีความเหมาะสมในการใช้ทำใบจักร เพราะมีความแข็งแรงสูง มีอัตราการยืดตัวสูง และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของแมงกานีสบรอนซ์ และนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์

Element	Mn Bronze (C86500)	Ni - Al Bronze (C95800)	แท่งโลหะนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์
Cu	55.0% - 60.0%	79.0% min	84.44%
Fe	0.4% - 2.0%	3.5% - 4.5%	4.36%
Al	0.5% - 1.5%	8.5% - 9.5%	6.61%
Mn	1.5% max	0.8% - 1.5%	0.47%
Pb	0.4% max	0.03% max	0.01%
Sn	1.0% max	-	-
Ni	1.0% max	4.0% - 5.0%	3.65%
Zn	balance	-	-
Si	-	0.1% max	0.09%

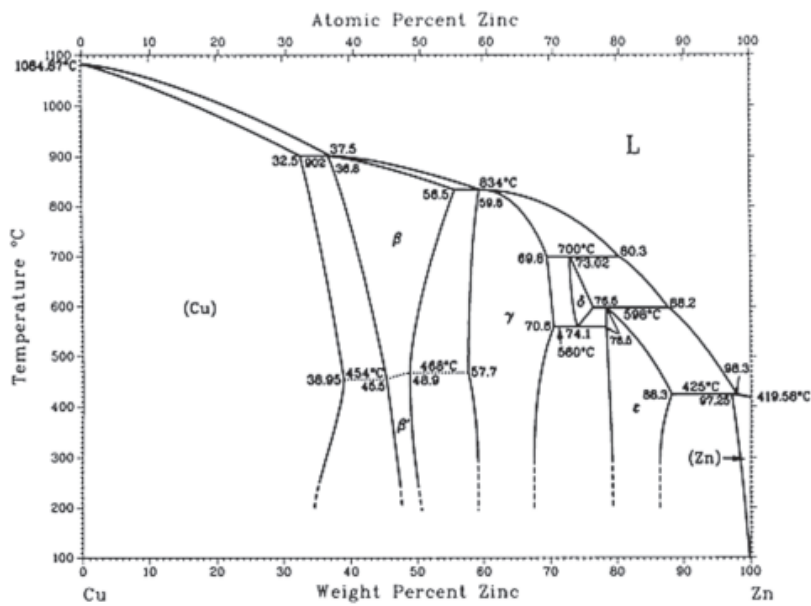
ตารางที่ 2 คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของแมงกานีสบรอนซ์ และนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์

Element	Manganese Bronze (C86500)	Nickel Aluminum Bronze (C95800)
Tensile Strength	490 MPa	585 MPa
Yield Strength	195 MPa	240 MPa
Brinell Hardness	130 HB	159 HB
Elongation in 50 mm	30%	15%
Density	8.3 g/cm ³	7.64 g/cm ³
Liquidus Temperature	880°C	1,060°C
Solidus Temperature	862°C	1,045°C
Shrinkage Allowance	1.9%	1.6%
Castability Rating*	4	8
Fluidity Rating*	2	3

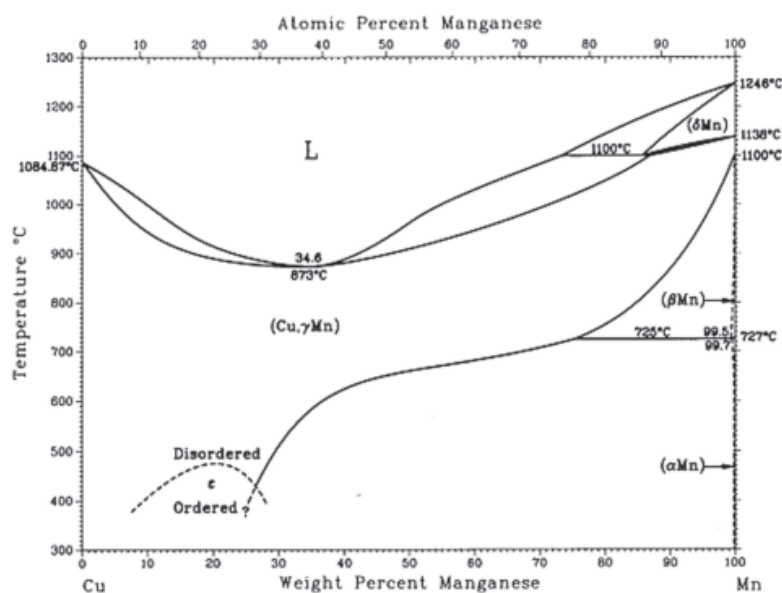
* เป็นค่าที่ได้จากการหล่อในแบบทราย โดย 1 = ดีที่สุด และ 8 = แย่ที่สุด

จากตารางที่ 1 จะพบว่า แมงกานีส
บรอนซ์มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบประมาณ
32% - 44% โดยน้ำหนัก ดังนั้นจาก
แผนภาพสมดุลระหว่าง Cu - Zn แมงกานีส
บรอนซ์มีโครงสร้างประกอบด้วยเฟส α (Cu)
และ β และจากแผนภาพสมดุลระหว่าง Cu -
Mn จะพบว่าแมงกานีสละลายอยู่ในเฟส α

ได้หมด ทำให้เฟส α มีความแข็งแรงเพิ่ม
มากขึ้น อันเนื่องมาจากกลไกที่เรียกว่า Solid
Solution Strengthening สำหรับเหล็กนั้น
ละลายในเฟส α ได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้อง
จึงมักแยกตัวออกมาจากเฟส α และตกผลึก
กระจัดกระจายทั่วไป (Dispersion Strengtheners)
และอาจจะรวมกับอะลูมิเนียมให้สารประกอบ



รูปที่ 1 แผนภาพสมดุลระหว่าง Cu - Zn



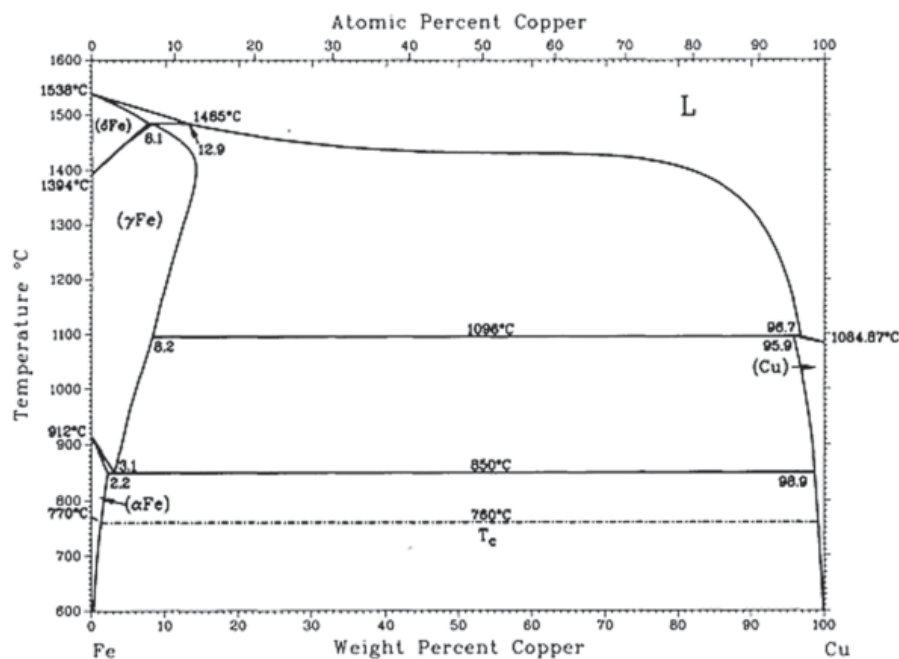
รูปที่ 2 แผนภาพสมดุลระหว่าง Cu - Mn

เชิงโลหะตกผลึกภายในเฟส α และ β โดยเหล็กจะอยู่ในรูปของ Iron-Rich Particle และจะมีลักษณะกลมหรือคล้ายดอกกุหลาบ (Rosette Particle) ซึ่งเหล็กจะทำให้เกรนของแมงกานีสบรอนซ์มีความละเอียดมากขึ้น (Grain Refiner) ซึ่งกลไกทั้งสอง อย่างที่เกิดจากการเติมเหล็กนั้นมีส่วนทำให้แมงกานีสบรอนซ์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ส่วนตะกั่วที่เติมในแมงกานีสบรอนซ์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้าน Machinability และการเติมดีบุกนั้นเพื่อทำให้แมงกานีสบรอนซ์มีความต้านทานต่อการเกิด Dezincification ที่ดีขึ้น แต่การเติมตะกั่วและดีบุกมีผลทำให้ความแข็งแรงและความเหนียวของแมงกานีสบรอนซ์ลดต่ำลง ดังนั้นในกรณีที่ต้องการให้แมงกานีสบรอนซ์ยังคงมีความแข็งแรงและความเหนียวเหมาะสำหรับการใช้งานกับภาระที่สูงจึงไม่ควรเติมตะกั่วและดีบุกเกิน 0.1% โดยน้ำหนัก

2.2 อลูมิเนียมบรอนซ์

อะลูมิเนียมบรอนซ์เป็นโลหะฐานทองแดงที่มีอะลูมิเนียมเป็นธาตุผสมหลัก อลูมิเนียมบรอนซ์มีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติด้านทนต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่าแมงกานีสบรอนซ์ และยังสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิสูงถึง 400°C โดยที่คุณสมบัติทางกลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งต่างจากแมงกานีสบรอนซ์ ที่คุณสมบัติทางกลจะลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 230°C ดังนั้นจึงมีการกำหนดอุณหภูมิใช้งานของแมงกานีสบรอนซ์ ไว้ไม่เกิน 200°C

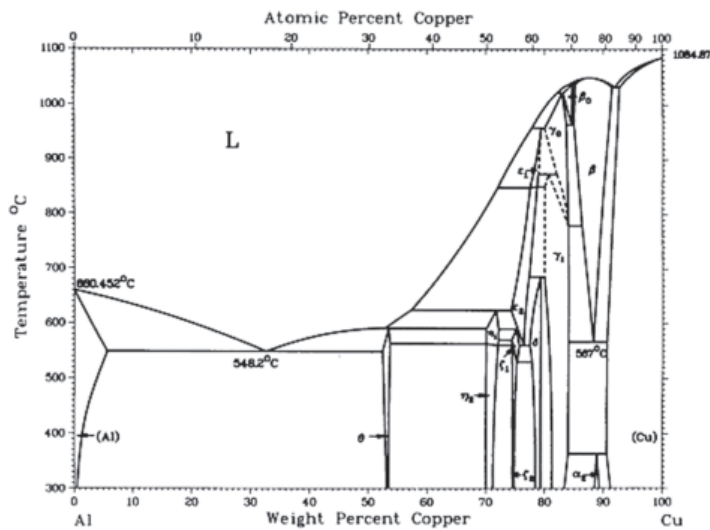
เมื่อพิจารณาจากแผนภาพสมดุลระหว่าง Al - Cu พบว่าอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบไม่เกิน 8% โดยน้ำหนัก จะมีโครงสร้างเป็นเฟส α (Face - Centered Cubic, FCC) ตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ลูมิเนียมบรอนซ์มีความต้านทาน



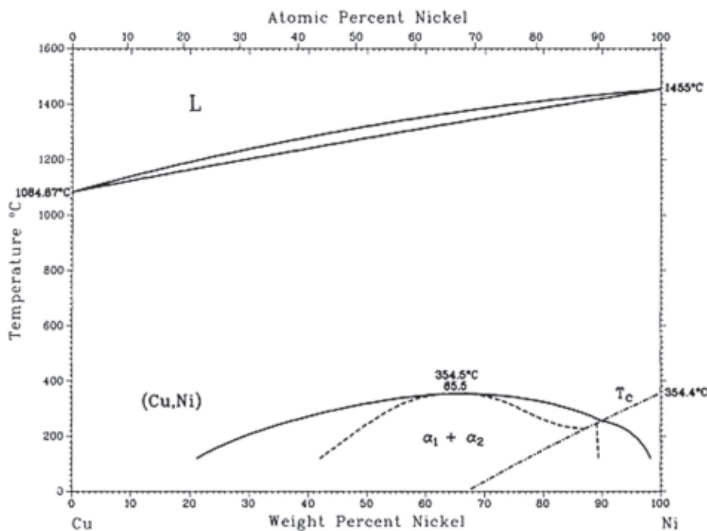
รูปที่ 3 แผนภาพสมดุลระหว่าง Fe - Cu

ต่อการกัดกร่อนที่ดี เมื่ออะลูมิเนียมบรอนซ์มีอะลูมิเนียมผสมอยู่เกินกว่า 8% โดยน้ำหนัก จะเกิดเฟส β (Body - Centered Cubic, BCC) ขึ้น ซึ่งเฟส β เป็นเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงของอะลูมิเนียมบรอนซ์ และยังคงหลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิต่ำอันเนื่องมาจากการเย็นตัวของอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 565°C มาสู่อุณหภูมิต่ำอย่างรวดเร็ว ถ้าเฟส β ถูกอบอยู่ที่อุณหภูมิ $320^{\circ}\text{C} - 565^{\circ}\text{C}$

เป็นระยะเวลาสั้น จะทำให้เฟส β แตกตัวออกเป็นเฟส $\alpha + \gamma_2$ (Eutectoid Structure) โดยเฟส γ_2 เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูงแต่เปราะและแตกหักง่าย ซึ่งจากโครงสร้างต่าง ๆ ของอะลูมิเนียมบรอนซ์ เฟส α จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีที่สุด รองลงมาคือเฟส β และเฟส γ_2 จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยที่สุด



รูปที่ 4 แผนภาพสมดุลระหว่าง Al - Cu



รูปที่ 5 แผนภาพสมดุลระหว่าง Cu - Ni

อลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ประมาณ 9.5% - 15.6% โดยน้ำหนัก จะมีคุณสมบัติในการชุบแข็งได้ การชุบแข็งอลูมิเนียมบรอนซ์สามารถทำได้โดยการให้ความร้อนกับอลูมิเนียมบรอนซ์ที่โครงสร้างเดิมประกอบด้วย α และ γ_2 ให้กลายเป็น β และนำไปชุบน้ำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เฟส β ไม่มีเวลาเพียงพอที่จะแยกตัวออกเป็น α และ γ_2 แต่จะได้เฟส β' (Hard Room - Temperature β Martensite) ซึ่งเป็นโครงสร้างกึ่งสมดุล (Metastable) คล้ายกับมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้าคาร์บอนหลังจากการชุบแข็ง และเมื่อทำการอบคืนตัวอะลูมิเนียมบรอนซ์โครงสร้าง β' จะเกิดการตกผลึกได้เฟส α ที่มีความละเอียดรูปเข็มและเฟส β' จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในสภาวะสมดุลที่เรียกว่า Tempered β Martensite สำหรับอลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ 8.0% - 9.5% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถชุบแข็งได้ ยกเว้นแต่จะมีการเติมธาตุบางชนิดในปริมาณที่มากกว่า 2% โดยน้ำหนักจึงจะสามารถชุบแข็งได้ โดยธาตุที่มีการเติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการชุบแข็งได้แก่ นิกเกิลและแมงกานีส เป็นต้น

อลูมิเนียมบรอนซ์ที่ใช้งานโดยส่วนมากจะมีส่วนประกอบของเหล็กอยู่ประมาณ 0.75% - 4.0% โดยน้ำหนัก เพื่อทำให้อลูมิเนียมบรอนซ์มีเกรนที่ละเอียดและมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยเหล็กมีกลไกในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมบรอนซ์คล้ายคลึงกับกลไกของเหล็กในแมงกานีสบรอนซ์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อแมงกานีสบรอนซ์

อลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่เกิน 8% โดยน้ำหนัก จะมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนแบบสูญเสียธาตุผสม (Dealloying) ได้ง่าย โดยเฟส β และ γ_2 จะถูกกัดกร่อนหายไป เนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดการกัดกร่อนมากกว่าเฟส α ทำให้อลูมิเนียมบรอนซ์มีโพรงขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากและมีผลทำให้คุณสมบัติทางกลลดต่ำลง การปรับปรุงอลูมิเนียมบรอนซ์ให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ Dealloying เพิ่มมากขึ้น สามารถทำได้โดยการชุบแข็งและอบคืนตัวอลูมิเนียมบรอนซ์ ทำให้เฟส β และ γ_2 หายไปและกลายเป็น Tempered β Martensite ซึ่งมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่า

การเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ Dealloying ให้กับอลูมิเนียมบรอนซ์ยังสามารถทำได้โดยการเติมนิกเกิล โดยนิกเกิลจะทำให้เกิดเฟส K ขึ้นในอลูมิเนียมบรอนซ์และนิกเกิลจะทำให้เฟส β มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ Dealloying และ Cavitation - Erosion เพิ่มมากขึ้น อลูมิเนียมบรอนซ์ตามมาตรฐาน ASTM ที่มีส่วนผสมของนิกเกิลและนิยมใช้หล่อใบจักรเรือคือ C95800 ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และการนำอลูมิเนียมบรอนซ์ชั้น C95800 ไปทำการชุบแข็งและอบคืนตัวจะทำให้แมงกานีสบรอนซ์มีความต้านทานต่อ Dealloying เพิ่มสูงขึ้น

3. การหล่อใบจักร

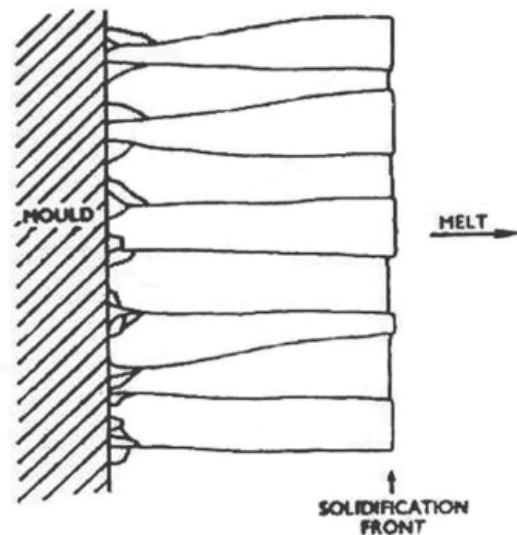
งานหล่อโลหะทองแดงผสมมักจะมีประสบปัญหาการพองในชิ้นงาน เนื่องจากแก๊สต่าง ๆ โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ละลายเข้าไปในทองแดงขณะหลอมเหลว และเมื่อทองแดงหลอมเหลวเย็นตัวลงแก๊สต่าง ๆ จะแยกตัวออกมาจากโลหะทองแดงผสม ถ้าแก๊สไม่สามารถหนีออกจากโลหะหลอมเหลวได้ทัน ก็จะเกิดโพรงแก๊สในบริเวณที่เกิดการเย็นตัวช้าที่สุด เช่น บริเวณกลางชิ้นงานหล่อนอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจนอาจจะเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นไอน้ำ ซึ่งก็เป็นสาเหตุทำให้เกิดตามด หรือโพรงแก๊สในชิ้นงานได้เช่นเดียวกัน

3.1 ใบจักรแมงกานีสบรอนซ์

แมงกานีสบรอนซ์จัดอยู่ในกลุ่มของโลหะที่มีการแข็งตัวช่วงสั้น (Short Freezing Range) จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าแมงกานีสบรอนซ์ชั้นคุณภาพ C86500 จะมีช่วงการแข็งตัวเพียง 18°C เท่านั้น โลหะในกลุ่มนี้เมื่อเทลงแบบหล่อจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณผนังแบบหล่อ การแข็งตัวของตัวของโลหะจะขยายตัวจากผนังแบบหล่อเข้าสู่กลางชิ้นงาน ทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเม็ดเกรนยาวตั้งฉากกับผนังแบบที่เรียกว่า Columnar Grain เมื่อการแข็งตัวดำเนินไปได้ระยะหนึ่งโลหะจะเกิดการหดตัว ถ้าแบบหล่อไม่มีระบบป้อนเติมที่ดีพอจะทำให้เกิดโพรงหดตัวเกิดขึ้นในชิ้นงานบริเวณส่วนที่มีความหนามาก วิธีการแก้ไขโพรงหดตัวอาจจะทำได้โดยการใช้หุ่นเย็น เพื่อควบคุมทิศทางการเย็น

ตัวของโลหะ หรือใช้รูลันเพื่อป้อนเติมน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่อ หรืออาจจะใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน และอาจจะใช้ผงเพิ่มความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับรูลัน

การหลอมแมงกานีสบรอนซ์สามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ การหลอมโลหะทองแดงกับสังกะสีก่อนแล้วใช้โลหะปรับส่วนผสม (Master Alloy) เช่น $50\text{Cu} - 50\text{Al}$, $90\text{Cu} - 10\text{Mn}$, $90\text{Cu} - 10\text{Fe}$ และ $90\text{Cu} - 10\text{Ni}$ ในการปรับส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะให้ได้ตามที่ต้องการ หรือการหลอมแท่งโลหะแมงกานีสบรอนซ์ที่มีส่วนผสมตามที่ต้องการร่วมกับสแครป โดยโรงงานหล่อหลอม ทำการหล่อใบจักรแมงกานีสบรอนซ์ด้วยการใช้ Cartridge Brass ($70\text{Cu}-30\text{Zn}$) และโลหะปรับส่วนผสมในการผลิตใบจักรแมงกานีสบรอนซ์ชั้นคุณภาพ C86500



รูปที่ 6 ลักษณะการแข็งตัวของโลหะที่มีการแข็งตัวช่วงสั้น

การหลอมแมงกานีสบรอนซ์โดยใช้โลหะปรับส่วนผสมนั้น จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีธาตุผสมสม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากการใช้ธาตุบริสุทธิ์ผสมลงในโลหะหลอมเหลวของทองแดงกับสังกะสีโดยตรง เนื่องจากธาตุแต่ละตัวมีความถ่วงจำเพาะและจุดหลอมเหลวต่างจากทองแดง เช่น อะลูมิเนียมมีความถ่วงจำเพาะและจุดหลอมเหลวต่ำกว่าทองแดงมาก เมื่อใส่ลงไปในการหลอมอะลูมิเนียมจะลอยอยู่บนผิว และถึงแม้จะทำการคนให้โลหะผสมเข้ากันดีแล้ว ก็อาจจะเกิดการแยกตัวออกมาภายหลังได้

การหลอมแมงกานีสบรอนซ์ควรจะหลอมให้ละลายในระยะเวลาที่สั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียธาตุผสม และไม่ควรให้อุณหภูมิของน้ำโลหะสูงเกินกว่า $1,100^{\circ}\text{C}$ เพราะจะทำให้สูญเสียสังกะสีเป็นจำนวนมาก ในทางปฏิบัติควรเติมสังกะสีเพิ่มอีกประมาณ 0.5% - 1.5% ก่อนถ่ายลงเบ้าเท เพื่อชดเชยการสูญเสียของสังกะสี สำหรับการใช้ฟลักซ์พิเศษในการหลอมนั้นไม่มีความจำเป็น เพราะแมงกานีสบรอนซ์ไม่ดูดแก๊สมากนัก คงใช้เพียงฟลักซ์คลุมผิวหน้าโลหะหลอมเหลว เพื่อป้องกันการสูญเสียจากออกซิเดชันเท่านั้น และการไล่แก๊สออกซิเจนที่ยังคงเหลืออยู่ในโลหะหลอมเหลวเพื่อให้ชิ้นงานหล่อมีคุณภาพเพิ่มขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยการเติม ทองแดง - ฟอสฟอรัส ไว้ก่อนเบ้าเทหรือใช้วิธีการกดลงไป ที่กันเบ้าก็ได้

อุณหภูมิที่ที่เหมาะสมกับชิ้นงานแมงกานีสบรอนซ์ขนาดต่าง ๆ มีดังนี้

- ความหนาชิ้นงานน้อยกว่า 13 mm
 $1,080^{\circ}\text{C}$
- ความหนาชิ้นงาน 13 - 38 mm
 $1,040^{\circ}\text{C}$
- ความหนาชิ้นงานมากกว่า 38 mm
 $1,000^{\circ}\text{C}$

3.2 การทดลองหล่อใบจักรนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์

อลูมิเนียมบรอนซ์จัดอยู่ในกลุ่มของโลหะที่มีการแข็งตัวช่วงสั้นเช่นเดียวกับแมงกานีสบรอนซ์ โดย C95800 มีช่วงของการเย็นตัวเพียง 15°C ดังนั้นอลูมิเนียมบรอนซ์จึงมีพฤติกรรมการเย็นตัวคล้ายกับแมงกานีสบรอนซ์ และมักจะเกิดโพรงหดตัวเช่นเดียวกัน การแก้ไขสามารถกระทำได้โดยการใช้หุ่นเย็นการวางรูสันในตำแหน่งที่เหมาะสม และการใช้ผงเพิ่มความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้รูสันได้เช่นเดียวกับการหล่อแมงกานีสบรอนซ์

การหลอมอลูมิเนียมบรอนซ์ให้ได้ผลดีควรหลอมโลหะให้ได้ส่วนผสมทางเคมีตามที่ต้องการแล้วเทเป็นแท่งโลหะก่อน วิธีนี้จะทำให้มีปริมาณแก๊สต่าง ๆ หลงเหลืออยู่ในชิ้นงานในปริมาณที่น้อย แล้วจึงนำแท่งอลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้ไปหลอมอีกครั้งโดยใช้ฟลักซ์คลุมผิว เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนไม่ให้ละลายเข้าไปในโลหะหลอมเหลว สำหรับการปรับส่วนผสมครั้งสุดท้ายให้ใช้โลหะปรับส่วนผสม ไม่ควรใช้โลหะบริสุทธิ์เพราะจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องความสม่ำเสมอของธาตุผสมในชิ้นงานหล่อ

จากส่วนประกอบทางเคมีของ C95800 จะพบว่ามีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 9% โดยน้ำหนัก ทำให้ในขณะหลอมอลูมิเนียมบรอนซ์จะมีฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์มาปกคลุมผิวทำให้เกิดก๊าซต่าง ๆ ไม่สามารถละลายเข้าไปโลหะหลอมเหลวได้ แต่ต้องระมัดระวังเรื่องการเติมวัตถุดิบต้องอย่าให้บ่อยมากเกินไป เพราะจะทำให้ฟิล์มที่คลุมผิวอยู่แยกออก ทำให้ก๊าซละลายเข้าไปในอลูมิเนียมบรอนซ์ได้และทำให้เกิดออกไซด์ของอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถ้าไม่สามารถกำจัดออกได้หมดก่อนเทลงแบบจะทำให้ชิ้นงานหล่อเสียหายได้

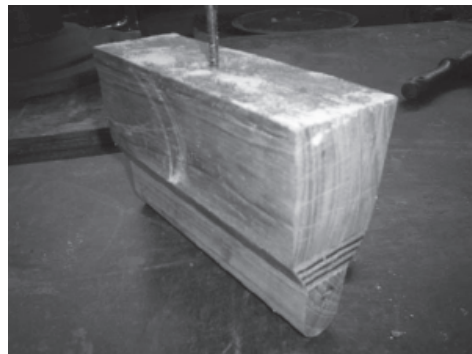
อุณหภูมิที่เหมาะสมกับชิ้นงานอลูมิเนียมบรอนซ์ขนาดต่าง ๆ มีดังนี้

- ความหนาชิ้นงานน้อยกว่า 13 mm
1,250°C
- ความหนาชิ้นงาน 13 - 38 mm
1,200°C
- ความหนาชิ้นงานมากกว่า 38 mm
1,150°C

ข้อควรระวังในการหล่ออลูมิเนียมบรอนซ์คือ ไม่ควรปล่อยให้ชิ้นงานหล่อเย็นตัวในแบบทรายนานเกินไป เพราะจะเกิด Self Annealing ทำให้เนื้อโลหะมีเกรนหยาบ โดยเฉพาะเฟส β ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางกลและความต้านทานต่อการกัดกร่อนของอลูมิเนียมบรอนซ์ลดต่ำลง ดังนั้นเมื่อเทน้ำโลหะลงแบบหล่อและมั่นใจว่าโลหะแข็งตัวดีแล้ว ควรรีบแบบทรายออกและปล่อยให้ชิ้นงานอลูมิเนียมบรอนซ์เย็นตัวในอากาศโดยเร็ว เพื่อป้องกันการเกิด Self Annealing ในชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 7 การเตรียมแท่งโลหะนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์สำหรับการหล่อใบจักร



(a) แบบจำลองตามมาตรฐาน JIS H 5102



(b) แบบทราย CO₂ สำหรับทดลองหล่อใบจักร
รูปที่ 8 แบบจำลองและแบบหล่อสำหรับการทดลองหล่อนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์

โรงงานหล่อหลอม ได้ทำการทดลอง หลอมนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ด้วย Induction Furnace ให้มีส่วนประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับชั้นคุณภาพ C95800 มากที่สุด เพื่อให้เป็นวัตถุดิบในการหล่อใบจักร โดยเมื่อนำแท่ง โลหะนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ไปทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี พบว่ามีส่วนประกอบทางเคมีเป็นไปตามตารางที่ 1 ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของแท่งโลหะที่ได้ยังไม่เป็นไปตามนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ชั้นคุณภาพ C95800 จึงต้องเตรียมการหล่อแท่งโลหะปรับส่วนผสมของ Cu - Al, Cu - Mn และ Cu - Ni เพื่อใช้ในการปรับส่วนผสมทางเคมีในการหลอมนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ครั้งสุดท้ายก่อนหล่อเป็นชิ้นงาน

การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน หล่อว่ามีคุณภาพใกล้เคียงกับนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผลิตจากต่างประเทศหรือไม่นั้น สามารถกระทำได้ด้วยการตรวจสอบคุณสมบัติทางกล โดยวิธี Tensile Test และ Hardness Test และทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่ได้เปรียบเทียบกับของต่างประเทศว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร และควรจะใช้กระบวนการใดเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะให้เป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะจึงเป็นหลักฐานอ้างอิงชิ้นสำคัญในการที่จะทำ Reverse Engineering ให้ประสบผลสำเร็จ

4. บทส่งท้าย

การทดลองหล่อใบจักรนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ นอกจากจะทำให้กองทัพเรือมีใบจักรเรือที่มีคุณสมบัติดีไว้ใช้ในราชการแล้ว ยังทำให้กรมอุทกศาสตร์เรือมีขีดความสามารถที่สูงขึ้นในการที่จะผลิตชิ้นงานหล่อต่าง ๆ ที่ทำจากอลูมิเนียมบรอนซ์เพื่อสนับสนุนงานสร้างและซ่อมเรือของกองทัพเรือต่อไป และเป็นการพัฒนาความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศไทยให้มีศักยภาพที่เพิ่มสูงขึ้นอีกทางหนึ่งเช่นเดียวกัน

บรรณานุกรม

- มนัส สติรจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 2536.
หริส สุตะบุตร และเคนยิ จิยิวา. หล่อโลหะ. ดวงกมล, กรุงเทพฯ, 2543.
ASM International. **ASM Handbook Vol 2 : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials.** 10 th ed. ASM International, Ohio USA, 1991.
ASM International **ASM Handbook Vol 13 : Corrosion.** 9 th ed. ASM International, Ohio USA, 1991.
ASM International **ASM Handbook Vol 15 : Castings.** 9 th ed. ASM International, Ohio USA, 1988.
Brown, J.R. **Foseco Non - Ferrous Foundryman's Handbook.** 11 th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford England, 1999.