คู่มือองค์ความรู้เพื่อการใช้ประโยชน์จริง
กิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรม

เรื่อง

การจัดการความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีการหล่อใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียม บรอนซ์

Knowledge management and transfer of research technology of nickel aluminum bronze propeller casting

โดย

นาวาเอก เสวียง เถื่อนบุญ

กรมอู่ทหารเรือ

ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรม
โครงการจัดการความรู้การวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์เชิงความมั่นคง
จาก สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2564

คำนำ

ภารกิจหลักของกรมอู่ทหารเรือ (อร.) ซึ่งเป็นหน่วยเทคนิคของกองทัพเรือ คือ การซ่อม/สร้างเรือรบให้มีความพร้อมในการปฏิบัติภารกิจให้กองทัพเรือ ในการปกป้องอธิปไตย รักษาผลประโยชน์ทางทะเล รวมถึงการช่วยเหลือผู้ประสบภัยต่างๆ ทำให้กรมอู่ทหารเรือ ต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีในด้านการซ่อม/สร้างเรือเพื่อให้มีความพร้อมต่อภารกิจหลักอยู่เสมอ ที่ผ่านมา อร. มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ เพื่อการพึ่งพาตนเองอยู่เสมอ งานวิจัยที่โดดเด่นจะเป็นการพัฒนาทางด้านโลหะเพื่อการผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรมทดแทนการนำเข้า โครงการที่สำคัญ คือการพัฒนาการผลิตใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ (NAB) เพื่อทดแทนการนำเข้า แต่ด้วยการผลิตใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์เป็นงานที่มีความซับซ้อน ความซับซ้อนในการหล่อจึงจำเป็นต้องมีทักษะและความชำนาญสูง ดังนั้นจึงต้องวางแผนการพัฒนาการผลิตใบจักรจากงานวิจัย เพื่อพัฒนาองค์ความรู้พื้นฐานไปจนถึงขั้นการนำไปใช้งานจริงเพื่อให้เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืน กรมอู่ทหารเรือจึงดำเนินการวิจัยด้านการผลิตใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์อย่างต่อเนื่อง โดยมีโครงการวิจัยที่สำคัญดังนี้ ได้แก่โครงการวิจัยการหล่อใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ (2553-2555) และโครงการวิจัยการหล่อใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์สำหรับเรือตรวจการณ์ชายฝั่ง (PCF) (2558-2560)

จากการดำเนินการวิจัยด้านการหล่อใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ทั้ง 2 โครงการใช้เวลามากกว่า 9 ปี ซึ่งนักวิจัยได้สะสมองค์ความรู้จากการวิจัยไว้จำนวนมาก โครงการฯ นี้จะทำการถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่คณะผู้วิจัยได้มีการสะสมความรู้ไว้ ไปยังกลุ่มเป้าหมายซึ่งเป็นบุคลากรของกรมอู่ทหารเรืออย่างเป็นระบบ ด้วยการถ่ายทอดความรู้ทั้งในด้านทฤษฎี และด้านปฏิบัติ ตั้งแต่พื้นฐานจนถึงการนำไปใช้งาน และจะรวบรวมความรู้เหล่านั้นโดยจัดทำเป็นคู่มือ หรือแนวปฏิบัติที่ดี (Best practices) เพื่อนำไปใช้ในหน่วยงาน

สารบัญ

หน้า

1. ข้อมูลทั่วไปของใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์.....1
2. อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์.....9
3. การหล่อนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์.....14
4. กระบวนการทางความร้อนสำหรับนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์.....29
5. การตรวจสอบนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการหล่อ.....31
6. ขั้นตอนการผลิตใบจักรนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์.....33
7. อ้างอิง.....57

สารบัญภาพ

หน้า

1. เฟสไดอะแกรมของ นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่มีส่วนผสมของ นิกเกิล 5% และ เหล็ก 5%.....6
2. โครงสร้างทางจุลภาคของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ (a) ที่กำลังขยายสูง และ (b) โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ประกอบด้วยโครงสร้าง α เป็นโครงสร้างพื้น และโครงสร้างของ κ ชนิดต่าง ๆ โดยโครงสร้าง κ_I มีลักษณะคล้ายรูปดอกกุหลาบ (Rosette) โครงสร้าง κ_{II} มีลักษณะเป็นเม็ดกลม (Globular) โครงสร้าง κ_{III} มีลักษณะเป็นแถบ (Lamellar) และโครงสร้าง κ_{IV} มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก (Fine Precipitate).....6
3. ความเค้นแรงดึงและความเค้นแรงดึงพิสูจน์ของแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี 1. Al 8%-Mn 0-20%-Fe 3%-Ni 2% 2. Mn 12%-Al 6-9%-Fe 3%-Ni 2%.....10
4. ลักษณะการออกแบบชิ้นงานหล่อที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง.....20

5. ลักษณะการเย็นตัวของโลหะทองแดงผสมที่มีช่วงการเย็นตัวแคบ เช่น นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์.....22
6. การหล่อใบจักรโดยใช้ static mold ซึ่งสามารถควบคุมการเย็นตัวในทางเดียว.....24
7. ใบจักรเรือ PCF ออกแบบให้ควบคุมการเย็นตัวในทางเดียว.....25
8. เกณฑ์การยอมรับของชิ้นงานใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ของกองทัพเรือ.....29

สารบัญตาราง

หน้า

1. ส่วนผสมทางเคมีกลุ่มโลหะทองแดงผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ตามมาตรฐาน ASTM B148-97.....2
2. สมบัติทางกลของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ เกรด C95800.....2
3. ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างต่าง ๆ ของ นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ จากการศึกษาของ (a) Weily-Couly และ Arnaud (b) Culpan และ Rose.....7
4. ความสัมพันธ์ระหว่างแมงกานิสกับส่วนผสมของอะลูมิเนียมสำหรับแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์ ซึ่งทำให้แมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์มีสมบัติทางกลดี.....11

นิยามศัพท์สำคัญ

ภาษาไทย

นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์, ใบจักร

ภาษาอังกฤษ

nickel aluminum bronze, propeller

1. ข้อมูลทั่วไปของใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

(1) สมบัติทางกลของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

ก่อนช่วงสงครามระหว่างปี ค.ศ. 1939-1945 ใบจักรเรือทำด้วยวัสดุแมงกานิสบรอนซ์ (High tensile brass) [1] หลังจากนั้นมีการพัฒนาเรือรบทำให้ความเร็วเรือเพิ่มสูงขึ้นจึงมีความต้องการวัสดุที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากความล้า (Corrosion fatigue) ซึ่งนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากความล้าสูงเป็นสองเท่าของแมงกานิสบรอนซ์และเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ยังสามารถซ่อมได้โดยวิธีการเชื่อมซ่อม ตารางที่ 1. แสดงส่วนผสมทางเคมีและตารางที่ 2. แสดงสมบัติทางกลของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ดังนั้นนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จึงเป็นที่นิยมสำหรับใช้ทำใบจักร คุณสมบัติเด่นของอะลูมิเนียมบรอนซ์มีดังนี้

(1.1) ความแข็งแรงสูง อะลูมิเนียมบรอนซ์บางเกรดมีความแข็งแรงเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

(1.2) ความต้านทานการกัดกร่อน อะลูมิเนียมบรอนซ์บางเกรดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

(1.3) ความต้านทานการเกิด Cavitation erosion จึงเหมาะสำหรับใบพัดหรือใบจักรเรือ

(1.4) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการหล่อ (Castable) อะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการหล่อ เช่น การหล่อในแบบทราย การหล่อเหวี่ยงเป็นต้น

(1.5) ความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปเย็นหรือขึ้นรูปร้อนได้ เพื่อทำชิ้นงานโลหะแผ่น หรือ แท่ง

(1.6) ความสามารถในการเชื่อม (Weldable) การขึ้นรูปสามารถทำได้โดยกระบวนการหล่อหรือการตีขึ้นรูป ส่วนการซ่อมสามารถทำได้โดยกระบวนการเชื่อมซ่อม

(1.7) ความสามารถในการกลึงไส (Machinability) สามารถกลึงไสในง่ายกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม

(1.8) ความสามารถในการต้านทานแรง Shock เหมาะสำหรับใช้ทำใบจักรเรือ

(1.9) ความต้านทานต่อความล้า อะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถต้านทานต่อความล้าได้ดี

ตารางที่ 1. ส่วนผสมทางเคมีกลุ่มโลหะทองแดงผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ตามมาตรฐาน ASTM B148-97 [17]

Copper Alloy UNS No.	Nominal compositions (wt.%)					
	Cu	Ni	Fe	Al	Si	Mn
C95500	78.0 min	4.2-6.0	4.0-5.5	10.0-11.5	0.15 Max	1.5 MAX
C95800	79.0 min	4.0-5.0	3.5-4.5	8.5-9.5	0.1 max	0.8-1.5
C95820	77.5 min	4.5-5.8	4.0-5.0	9.0-10.0	0.1 max	1.5 max

ตารางที่ 2. สมบัติทางกลของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ เกรด C95800 [17]

Properties	Nickel Aluminum Bronze
Tensile strength (MPa)	585
Yield strength (MPa)	240
Elongation in 50 mm	15 %
Brinell hardness (HB)	159

(2) โครงสร้างทางจุลภาคของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

อะลูมิเนียมบรอนซ์เป็นโลหะทองแดงผสมที่มีสมบัติทางกลและสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาคดังนั้นในกระบวนการผลิตจะต้องควบคุมปริมาณธาตุผสมและใช้กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้ได้โครงสร้างทางจุลภาคตามที่ต้องการ ด้านทางกลอะลูมิเนียมบรอนซ์ควรมีโครงสร้างแบบผสมคือประกอบด้วย α และ β เพื่อให้มีความแข็งแรงสูง ในด้านการป้องกันกันการกัดกร่อนการเติมอะลูมิเนียมช่วยสร้างออกไซด์ฟิล์มซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อน ในกรณีที่ออกไซด์ฟิล์มได้รับความเสียหายก็สามารถสร้างใหม่ได้เอง ทำให้อะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี อย่างไรก็ตามการเติมอะลูมิเนียมในปริมาณสูงจะทำให้โครงสร้าง β เพิ่มขึ้น การเรียงตัวเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง β ทำให้เกิดการกัดกร่อนอันเนื่องจากการสูญเสียธาตุผสมเพราะ β มีปริมาณอะลูมิเนียมสูงส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลง จากการศึกษาพบว่าอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีโครงสร้างเฟสเดียวคือโครงสร้าง α จะมีความต้านทานการกัดกร่อนอันเนื่องจากการสูญเสียธาตุผสม (อะลูมิเนียม) ดีกว่าโครงสร้างแบบผสม แต่โครงสร้างแบบเฟสเดียวมีความแข็งแรงต่ำจึงไม่เหมาะสำหรับใช้งานที่ต้องรับภาระสูง เช่น ใบจักรเรือ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมส่วนผสมของอะลูมิเนียมให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดเพื่อให้ได้โครงสร้าง α และโครงสร้าง β ในปริมาณที่เหมาะสม

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมบรอนซ์มีความซับซ้อน เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวจะเกิดโครงสร้าง α และโครงสร้าง β เมื่ออุณหภูมิลดลงโครงสร้าง β จะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์โดยโครงสร้าง β จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้าง α และ γ_2 (Cu_9Al_4) โครงสร้างแบบผสมของโครงสร้าง α และโครงสร้าง β ทำให้อะลูมิเนียมบรอนซ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องเติมธาตุผสมเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ของ

โครงสร้าง β เป็นผลให้มีโครงสร้าง β เพิ่มขึ้น ธาตุเหล่านี้ได้แก่ แมงกานิส เหล็ก และนิกเกิล การยับยั้งการเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ของโครงสร้าง β ยังช่วยลดการเกิดโครงสร้าง γ_2 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่สูงจึงเป็นโครงสร้างที่เกิดการกัดกร่อนอันเนื่องจากการสูญเสียธาตุอะลูมิเนียมได้ง่าย รูปที่ 1. [2] แสดงการเปรียบเทียบเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียมบรอนซ์กับนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ นอกจากนี้เหล็กและนิกเกิล ทำให้เกิดโครงสร้าง κ ซึ่งจะแทรกตัวอยู่ทั่วโครงสร้างของอะลูมิเนียมบรอนซ์ทำให้ความแข็งแรงของอะลูมิเนียมบรอนซ์เพิ่มขึ้น รายละเอียดโครงสร้างต่างๆ ของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์มีดังนี้

(2.1) โครงสร้าง α จะเริ่มเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1030 $^{\circ}$C โดยเป็นโครงสร้างแบบ fcc (Face-centered cubic) ซึ่งมีทองแดงเป็นส่วนประกอบหลัก (Copper rich phase) และมีส่วนผสมของอะลูมิเนียม เหล็ก นิกเกิล และแมงกานิส จำนวนเล็กน้อย ส่วนผสมของโครงสร้าง α ค่อยข้างคงที่ยกเว้นเหล็ก เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 850 $^{\circ}$C เหล็กจะเกิดการตกผลึก (precipitate) เป็นโครงสร้าง κ_{IV} เมื่อชิ้นงานเย็นตัว โครงสร้าง α ช่วยเพิ่มเหนียวให้กับชิ้นงาน

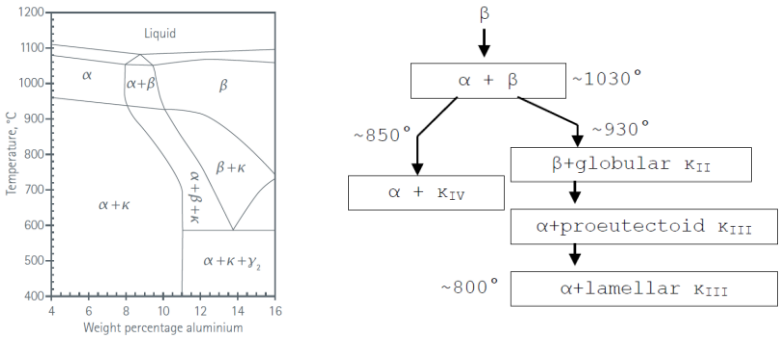
(2.2) โครงสร้าง β จะเริ่มเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1030 $^{\circ}$C โดยเป็นโครงสร้างแบบ bcc (Body-centered cubic) โครงสร้าง β มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมมากกว่าของโครงสร้าง α เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 930 $^{\circ}$C โครงสร้าง β จะสลายตัวเป็น α, κ_{II}, และ κ_{III}

(2.3) โครงสร้าง retained β หรือ มาเทนไซต์ β คือโครงสร้าง β ที่ไม่สามารถสลายตัวเป็นโครงสร้าง α, κ_{II}, และ κ_{III} ได้ทันเนื่องจากอุณหภูมิลดต่ำลง retained β จะมีโครงสร้างแบบ hcp (Closed-packed hexagonal)

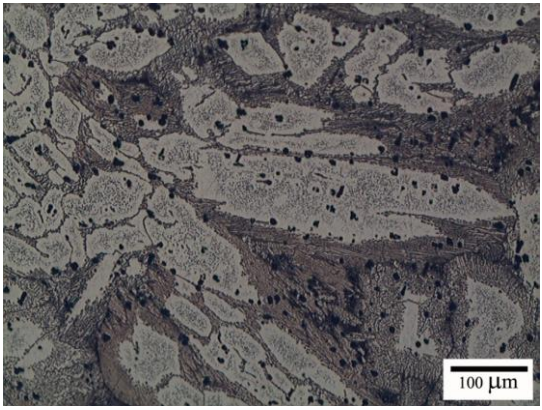
(2.4) โครงสร้าง γ (Cu_9Al_4) มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ 15.6% จึงเป็นโครงสร้างที่มีโอกาสกัดกร่อนได้ง่ายเนื่องจากมีอะลูมิเนียมอยู่สูง

(2.5) โครงสร้าง κ ที่มีอะลูมิเนียมในปริมาณสูง ในช่วงส่วนผสมของอะลูมิเนียม 8-11 % ที่สามารถลดการเกิดโครงสร้างระหว่างอะลูมิเนียมและทองแดงในรูปของแกมมา (Cu_9Al_4 หรือ γ_2) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนโครงสร้างของ β ไปเป็นโครงสร้างยูเทคตอยด์ของ α และ γ_2 ที่จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนและการสูญเสียสมบัติทางกลอย่างรวดเร็ว [3]

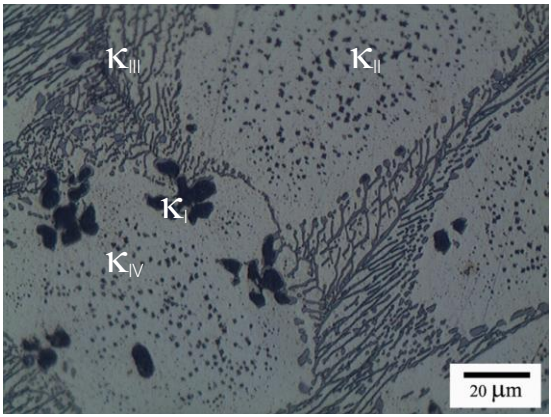
โครงสร้าง κ ที่เกิดขึ้นในนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถเกิดได้ในหลายรูปแบบ ดังนี้ โครงสร้าง κ_I มีลักษณะคล้ายรูปดอกกุหลาบ (Rosette) โครงสร้าง κ_{II} มีลักษณะเป็นเม็ดกลม (Globular) โครงสร้าง κ_{III} มีลักษณะเป็นแถบ (Lamellar) และโครงสร้าง κ_{IV} มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก (Fine Precipitate) รูปที่ 2. โดยโครงสร้างแคปป้าชนิดต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีที่มีองค์ประกอบหลักของ เหล็ก นิกเกิล และทองแดง ที่ต่างกัน โดยตารางที่ 3. แสดงส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างต่าง ๆ ของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์



รูปที่ 1. เฟสไดอะแกรมของ นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่มีส่วนผสมของนิกเกิล 5% และ เหล็ก 5% [2]



(a)



(b)

รูปที่ 2. โครงสร้างทางจุลภาคของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ (a) ที่กำลังขยายสูง และ (b) โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ประกอบด้วยโครงสร้าง α เป็นโครงสร้างพื้น และโครงสร้างของ κ ชนิดต่าง ๆ โดยโครงสร้าง κ_I มีลักษณะคล้ายรูปดอกกุหลาบ (Rosette) โครงสร้าง κ_{II} มีลักษณะเป็นเม็ดกลม (Globular) โครงสร้าง κ_{III} มีลักษณะเป็นแถบ (Lamellar) และโครงสร้าง κ_{IV} มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก (Fine Precipitate) [4]

ตารางที่ 3. ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างต่าง ๆ ของ นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ จากการศึกษาของ

(a) Weily-Couly และ Arnaud [6]

โครงสร้าง	
κ_I	69% Fe, 13% Cu, 13% Ni และ 6% Al
κ_{II} และ κ_{III}	26-43% Fe, 13-20% Cu, 23-24% Ni และ 18-20% Al
κ_{IV}	-

(b) Culpan และ Rose [7]

โครงสร้าง	Al	Mn	Fe	Ni	Cu
α	8.3±1.7	1.4±0.1	2.7±2.0	2.5±1.4	85.4±4.0
Retained	8.7	1.0	1.6	3.5	85.2
β					
κ_I	13.0±5.0	2.0±0.4	55.0±7.0	15.0±3.0	15.0±5.0
κ_{II}	19.0±3.0	2.2±0.6	32.0±3.0	27.0±4.0	21.0±5.0
κ_{III}	18.0±6.0	2.0±0.3	22.0±0.7	32.0±2.0	26.0±4.0
κ_{IV}	20.0±3.0	1.5±0.3	62.0±4.0	4.0±1.0	13.0±1.0

2. อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

รายละเอียดของอิทธิพลของธาตุผสมมีดังนี้

(1) อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นส่วนผสมหลักเพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยควบคุมการเกิดโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมบรอนซ์ สำหรับนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ การเติมอะลูมิเนียมน้อยกว่า 6% ทำให้เกิดโครงสร้างแบบเฟสเดียวคือโครงสร้าง α ซึ่งมีความแข็งแรงและความแข็งต่ำ แต่สามารถยืดตัวได้ดี โดย

อะลูมิเนียมบรอนซ์บางเกรดสามารถยืดตัวได้มากถึง 75% เมื่อเติมอะลูมิเนียมระหว่าง 6-10% จะทำให้ความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการยืดตัวลดลง เมื่อเติมอะลูมิเนียมมากกว่า 10% จะทำให้ได้โครงสร้าง β เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงแต่ความแข็งเพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานจึงเปราะและแตกหักได้ง่าย อะลูมิเนียมจะมีผลต่อสมบัติทางกลมากกว่าเหล็กและนิกเกิล เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลดี มีความเหนียว และสามารถต้านทานการเกิดการกัดกร่อนได้ การควบคุมส่วนผสมของอะลูมิเนียมให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดจึงมีความสำคัญ ตัวอย่างเช่น โลหะทองแดงผสมที่มีอะลูมิเนียม เหล็ก และ นิกเกิล เป็นส่วนผสม ต้องควบคุมส่วนผสมของอะลูมิเนียมให้อยู่ในช่วง 8-9% [1]

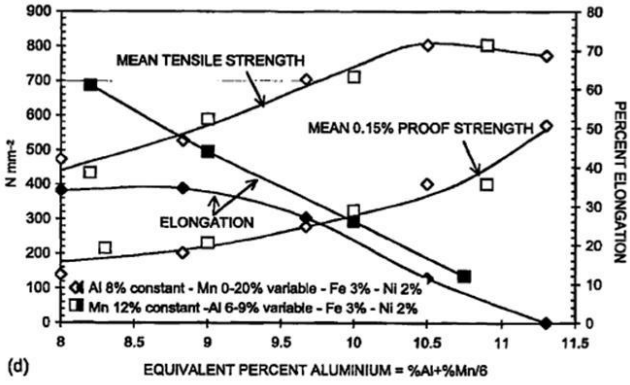
สำหรับสมบัติด้านความต้านทานต่อความล้าซึ่งจำเป็นต้องต้องนำมาพิจารณาสำหรับชิ้นงานที่ต้องรับภาระแบบ cyclic load เช่น ใบจักร การเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมในอะลูมิเนียมบรอนซ์ จะทำให้ความต้านทานต่อการเกิดความล้าเพิ่มสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงกระแทกไม่แปรผันตามปริมาณอะลูมิเนียม โดยความต้านทานต่อแรงกระแทกของอะลูมิเนียมบรอนซ์อยู่ระหว่าง 70-95 จูล [1]

(2) แมงกานิส

นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จะมีส่วนผสมของแมงกานิสไม่เกิน 2% ส่วนอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผสมแมงกานิสสูงเรียกว่า แมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์ แมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์ซึ่งเติมแมงกานิส 8-15% นิยมใช้ทำใบจักรเรือขนาดใหญ่เนื่องจากความแข็งแรงสูงและการเติมแมงกานิสในปริมาณสูงส่งผลดีต่อสมบัติทางกลเช่นเดียวกับอะลูมิเนียม นอกจากนี้การเติมแมงกานิสยังช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ของทองแดง (Deoxidize) ก่อนเติมอะลูมิเนียม ซึ่งจะช่วยให้น้ำโลหะไหลได้ดีขึ้น สามารถเติมเต็มทุกส่วนของชิ้นงานโดยเฉพาะส่วนบาง

แมงกานิสเป็นธาตุซึ่งสนับสนุนให้เกิดโครงสร้าง β (β Stabilizer) จึงทำให้ปริมาณโครงสร้าง β เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น และป้องกันการสลายตัวของโครงสร้าง β เป็นโครงสร้าง α และโครงสร้าง γ_2 ซึ่งโครงสร้าง γ_2 เป็นโครงสร้างที่จะเกิดการสูญเสียธาตุอะลูมิเนียม การเติมแมงกานิสในแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์ต้องเติมอย่างน้อย 6% จึงจะทำให้เกิดโครงสร้าง α และ β ที่อัตราการเย็นตัวปกติ

P.J. Macken และ A.A. Smith [8] ศึกษาอิทธิพลของแมงกานิสในแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์โดยศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมต่างกันแต่มีส่วนผสมของแมงกานิสคงที่ 12% เปรียบเทียบกับสมบัติทางกลของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมคงที่ 8% แต่มีส่วนผสมของแมงกานิสแตกต่างกัน ผลการศึกษาสมบัติทางกล ซึ่งได้แก่ ความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ความเค้นแรงดึงพิสูจน์ (Proof strength) และ ระยะยืด (Elongation) ของการทดลองทั้งสองชุดเป็นไปในแนวเดียวกัน ดังนั้น P.J. Mackenและ A.A. Smith จึงสรุปว่า การเติมแมงกานิส 6% ให้ผลต่อสมบัติทางกล เทียบเท่าอะลูมิเนียม 1% (รูปที่ 3.) ดังนั้นการพิจารณาสมบัติทางกลของแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์จึงสามารถพิจารณาจากค่าอะลูมิเนียมสมมูล (Equivalent percent aluminum) ซึ่งเป็นการรวมส่วนผสมของอะลูมิเนียมและแมงกานิสเข้าด้วยกันในสัดส่วน %Al+(%Mn/6)



รูปที่ 3. ความเค้นแรงดึงและความเค้นแรงดึงพิสูจน์ของแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี 1. Al 8%-Mn 0-20%-Fe 3%-Ni 2% 2. Mn 12%-Al 6-9%-Fe 3%-Ni 2% [8]

Edward และ Whittaker [9] ศึกษาอิทธิพลของโลหะผสมที่มีแมงกานิสผสม 6-8% และ 11-14% ผลการศึกษาได้กำหนดช่วงวิกฤตของส่วนผสมของอะลูมิเนียมและแมงกานิส ถ้าสามารถควบคุมส่วนผสมของอะลูมิเนียมและแมงกานิสให้อยู่ในช่วงวิกฤตนี้ได้จะทำให้สมบัติทางกลดีที่สุด ตารางที่ 4. แสดงช่วงวิกฤตของส่วนผสมของแมงกานิสซึ่งสัมพันธ์กับส่วนผสมของอะลูมิเนียม

ตารางที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างแมงกานิสกับส่วนผสมของอะลูมิเนียมสำหรับแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์ ซึ่งทำให้แมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์มีสมบัติทางกลดี

Al Content %	Critical Mn Range %
7.0	16.5–24.0
7.5	13.5–20.0
8.0	10.5–16.0
8.5	8.0–12.0
9.0	6.0–8.0
9.5	4.0–4.0
10.0	2.0–0

(3) เหล็ก

เหล็กช่วยปรับขนาดเกรนของอะลูมิเนียมบรอนซ์ให้มีขนาดเล็กลง (Grain Refinement) ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลโดยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแต่ทำให้ความเหนียวลดลง โครงสร้างเกรนขนาดเล็กก็ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระแทก (Toughness) ของอะลูมิเนียมบรอนซ์เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการเติมเหล็กเพื่อปรับสภาพเกรนของอะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถเติมได้สูงสุด 2.5-3.0% หากเติมเหล็กมากกว่านี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลและการกัดกร่อน

(4) นิกเกิล

นิกเกิลส่งผลกระทบต่ออะลูมิเนียมบรอนซ์ในลักษณะเดียวกันกับแมงกานิสโดยเป็นธาตุซึ่งสนับสนุนให้เกิดโครงสร้าง β (β Stabilizer) และยับยั้งการเกิดโครงสร้าง γ_2 โดยถ้าเติมนิกเกิลเพียง 2% ก็สามารถยับยั้งการสลายตัวของโครงสร้าง β ไปเป็นโครงสร้าง α และโครงสร้าง γ_2 ได้แม้ว่าน้ำโลหะจะเย็นตัวช้า นอกจากนี้นิกเกิลยังรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นโครงสร้าง κ ในอะลูมิเนียมบรอนซ์ซึ่งมีโครงสร้างแบบเดียวกับ β โครงสร้าง κ จะกระจายตัวทั่วโครงสร้างของอะลูมิเนียมบรอนซ์และช่วยเพิ่มความแข็งแรง ขนาดของโครงสร้าง κ สามารถควบคุมได้โดยควบคุมการเย็นตัวโดยถ้าอะลูมิเนียมบรอนซ์เย็นตัวช้าจะได้โครงสร้าง κ ขนาดใหญ่ [10]

การเติมนิกเกิลน้อยกว่า 1% จะทำให้ความเค้นแรงดึงพิสูจน์ลดลง แต่ไม่ควรเกิน 2% เพราะจะทำให้ความเหนียวลดลง อย่างไรก็ตามการเติมนิกเกิลมากกว่า 2% สามารถทำได้ในกรณีที่ต้องการใช้ชิ้นงานมีความต้านทานการคืบ (Creep resistance) เพิ่มขึ้น

เนื่องด้วยนิกเกิลและเหล็กส่งผลต่อสมบัติทางกล ดังนั้นจึงมีการศึกษาผลกระทบของการเติมนิกเกิลและเหล็กในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดย Sarkar

และ Bates [11] ศึกษาพบว่าการเติมนิกเกิลและเหล็กในสัดส่วนต่ำๆ ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงกระแทก Thomson [12] พบกว่าการเติมนิกเกิลและเหล็กในสัดส่วน 6 ต่อ 3 เมื่อทำให้เย็นตัวช้า จะทำให้สมบัติทางกลทั้งหมดลดลงซึ่งรวมทั้งความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วย แต่ถ้าเติมนิกเกิลและเหล็กในสัดส่วน 3 ต่อ 5 เมื่อทำให้เย็นตัวช้า จะทำให้ความเค้นแรงดึงและความต้านแรงกระแทกได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อย

(5) สารมลทิน (Impurities)

สังกะสีเป็นธาตุมลทินซึ่งมักตรวจพบในอะลูมิเนียมในปริมาณไม่เกิน 1% ซึ่งสังกะสีจะไม่ส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลหรือการกัดกร่อน ยกเว้นมีการเจือปนในปริมาณสูง

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุมลทินที่เจือปนในอะลูมิเนียมบรอนซ์แล้วจะส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลอย่างร้ายแรง ดังนั้นต้องคบคุมส่วนผสมของอะลูมิเนียมบรอนซ์ให้มีฟอสฟอรัสเกิน 0.08% [13]

3. การหล่อนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

(1) วิธีการหลอมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

การหลอมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ขนาดเล็กนิยมใช้เตาเป้า (Crucible furnace) ซึ่งใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเตาหรือแก๊ส ส่วนชิ้นงานขนาดใหญ่นิยมใช้เตาหลอมเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) เนื่องจากสามารถหลอมได้เร็วกว่า ในขณะทำการหลอมจะต้องระวังออกไซด์ฟิล์มซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าของน้ำโลหะ ถ้าออกไซด์ฟิล์มแตกอาจจะทำให้ตะกรัน(dross) แทรกตัวเข้าไปในน้ำโลหะ และเป็นสาเหตุให้สมบัติทางกลของชิ้นงานลดลง [8]

นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ประกอบด้วยส่วนผสมหลายชนิดซึ่งมีจุดหลอมเหลวแตกต่างกัน เมื่อนำส่วนผสมทั้งหมดมาหลอมรวมกันจึงทำให้ส่วนผสมบางอย่างเกิดการสูญเพลิง การควบคุมส่วนผสมทั้งหมดให้ถูกต้องตาม

มาตรฐานในการหลอมครั้งเดียวจึงเป็นเรื่องยาก ดังนั้นการหลอมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จึงนิยมใช้การหลอมสองครั้ง ครั้งแรกหลอมส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นอินก๊อตก่อน (Pre-ingoting) จากนั้นตรวจสอบส่วนผสมซึ่งทำให้ทราบว่าส่วนผสมของธาตุใดขาดหรือเกิน จากนั้นนำอินก๊อตมาหลอมครั้งที่สองโดยจะปรับแต่งส่วนผสมโลหะให้ถูกต้องในการหลอมครั้งที่สอง โลหะที่นำมาหลอมเป็นส่วนผสมของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถใช้โลหะบริสุทธิ์ซึ่งต้องมีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99% หรือใช้โลหะผสม (master alloying) ซึ่งการใช้โลหะผสมจะสามารถหลอมได้เร็วกว่าเนื่องจากจุดหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างโลหะผสม เช่น Cu30Ni, Cu30Mn, และ Cu30Fe เป็นต้น การหลอมครั้งแรกอาจจะหลอมอินก๊อตในเตาเหนี่ยวนำเพื่อให้สามารถหลอมได้รวดเร็วแต่เตาเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดการกวนน้ำโลหะ จึงมีโอกาสที่ออกไซด์ฟิล์มจะแตก จากนั้นนำอินก๊อตมาหลอมครั้งที่สองในเต้าเบ้าซึ่งอินก๊อตจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะบริสุทธิ์จึงหลอมได้ง่ายและไม่เกิดการกวนน้ำโลหะ รายละเอียดเกี่ยวกับการหลอมอินก๊อต (Pre-ingoting) และการหลอมโดยใช้โลหะผสม (master alloying) มีดังนี้

การหลอมอินก๊อต (Pre-ingoting) จะหลอมทองแดง 90% ของปริมาณทองแดงทั้งหมด ร่วมกับเหล็กและนิกเกิล โดยใช้ถ่านคลุมผิว เมื่อถ่านได้รับความร้อนจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งช่วยไล่ก๊าซออกซิเจน (Oxidizing atmosphere) อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส เมื่อส่วนผสมทั้งหมดละลายเข้าด้วยกันแล้วเติมทองแดงอีก 10% ที่เหลือ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิการหลอมลดลง จากนั้นเอาถ่านที่หลุมผิวหน้าน้ำโลหะออก แล้วเติมอะลูมิเนียมซึ่งเมื่อเติมอะลูมิเนียมอุณหภูมิของน้ำโลหะจะสูงขึ้น และเกิดออกไซด์ฟิล์มที่ผิวหน้าน้ำโลหะซึ่งมีโอกาสที่ตะกรันจะแทรกตัวเข้าไปในน้ำโลหะ ดังนั้นจึงต้องเติมฟลั๊กเพื่อกำจัดตะกรันในน้ำโลหะซึ่งจะทำให้น้ำโลหะสะอาด จากนั้นเทน้ำโลหะลงในแบบอินก๊อต

การหลอมโดยใช้โลหะผสม (master alloying) จะหลอมทองแดงทั้งหมดร่วมกับโลหะผสม CuFe, CuMn และ CuNi โดยใช้ถ่านคลุมผิวเพื่อสร้างบรรยากาศคาร์บอนมอนนอกไซด์เช่นเดียวกับการหลอมอินก๊อต อุณหภูมิในการหลอมประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส เนื่องจากโลหะผสมมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะบริสุทธิ์ จากนั้นเอาถ่านที่หลุมผิวหน้าน้ำโลหะออก แล้วเติมโลหะผสม CuAl จากนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจนกวนน้ำโลหะเพื่อไล่แก๊สที่เจือปนในน้ำโลหะและทำให้ส่วนผสมทั้งหมดละลายเข้าด้วยกัน

นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์เป็นโลหะทองแดงผสมที่หล่อยากกว่า gunmetal และ ฟอสฟอรัสบรอนซ์ เนื่องจากมีปริมาณอะลูมิเนียมผสมอยู่มากจึงเกิดออกไซด์ของอะลูมิเนียมคลุมที่ผิวหน้าของน้ำโลหะ ซึ่งอาจจะจับตัวกันเป็นตะกรัน ดังนั้นในการเทน้ำโลหะลงสู่แบบจะต้องระวังไม่ให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อป้องกันไม่ให้ตะกรันติดเข้าไปในน้ำโลหะ นอกจากนี้นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จัดอยู่ในกลุ่มโลหะทองแดงผสมที่มีช่วงการเย็นตัวแคบซึ่งมีลักษณะการเย็นตัวคล้ายกับของโลหะบริสุทธิ์ อุณหภูมิของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ในขณะหลอมเหลวอาจจะมากกว่าในขณะที่แข็งตัวเพียง 10 องศาเซลเซียส น้ำโลหะจะเย็นตัวจากด้านนอกเข้าสู่ด้านในโดยจะเรียงตัวกันเป็นชั้น ข้อดีคือถ้าน้ำโลหะถูกจ่ายเต็มระบบจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎี แต่ถ้าออกแบบระบบการจ่ายน้ำโลหะไม่ดีชิ้นงานจะมีการหดตัวมากจนทำให้เกิดโพรงในชิ้นงาน

(2) การออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะสำหรับนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

(2.1) ส่วนประกอบของระบบจ่ายน้ำโลหะ

การหล่อโลหะจำเป็นต้องมีระบบจ่ายน้ำโลหะเพื่อจ่ายน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งจะเติมน้ำโลหะและควบคุมความเร็วการไหลของน้ำโลหะที่จะไหลเข้าสู่ชิ้นงานทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ โดยจะตัดระบบจ่ายน้ำโลหะออกภายหลัง ระบบจ่ายน้ำโลหะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ อ่างเท รูเท รูวิ่ง และรูเข้า เพื่อผลิตชิ้นงานหล่อที่มีสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้น

จำเป็นต้องออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะอย่างรอบคอบเพื่อให้น้ำโลหะที่จะไหลเข้าสู่แบบหล่อมีลักษณะดังนี้ [14]

- สะอาดปราศจากสิ่งสกปรกที่ติดมากับน้ำโลหะ
- กระจายน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่ออย่างราบเรียบปราศจากการไหลวน
- กระจายส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะได้อย่างสม่ำเสมอ
- น้ำโลหะจะต้องไหลได้สะดวกโดยไม่กระทบหรือชนกับสิ่งใดๆ ในโพรงแบบหล่อ

<u>อ่างเท</u>

อ่างเทถูกติดตั้งบริเวณด้านบนของรูเท โดยวางตำแหน่งของรูเทไว้บริเวณขอบด้านหนึ่งของอ่างเท เมื่อเทน้ำโลหะเข้าบริเวณอ่างเท น้ำโลหะจะไหลจากอ่างเทเข้าสู่บริเวณรูเทจึงช่วยหลีกเลี่ยงหรือลดการจับอากาศของน้ำโลหะ ซึ่งเกิดจากการเทน้ำโลหะเข้าโดยตรงที่รูเทแล้วเกิดการหมุนวนของน้ำโลหะ เนื่องจากน้ำโลหะส่วนแรกที่ไหลเข้าสู่รูเทมักจะประกอบด้วยสิ่งสกปรก เช่น ตะกรัน หรือออกไซด์ ซึ่งมักจะมีความหนาแน่นต่ำและลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำโลหะดังนั้นบริเวณอ่างเทควรมีที่กั้นเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกบนเข้ากับน้ำโลหะ

<u>รูเท (Spure)</u>

หลังจากน้ำโลหะไหลจากอ่างเทจะไหลลงสู่รูเท ส่วนบนของรูเทซึ่งเปิดสู่บรรยากาศทำให้ความดันแต่ละจุดตลอดความสูงของลำของไหลจะมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการดูดซับก๊าซของน้ำโลหะในขณะที่น้ำโลหะไหลลงในรูเท รูเทจะทำเป็นทรงกระบอกซึ่งมีความลาดเอียง 2-7 องศา เพื่อความสะดวกในการทำแบบทรายของรูเท ความเร็วการไหลของน้ำโลหะที่บริเวณด้านล่างของรูเทสามารถคำนวณได้จากความสูงของรูเท

อัตราการไหลของน้ำโลหะที่บริเวณด้านล่างของรูเทจะถูกควบคุมโดยขนาดพื้นที่หน้าตัดของด้านล่างของรูเท ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของด้านล่างรูเทต่อพื้นที่หน้าด้านบนของรูเทควรอยู่ระหว่าง 2-4 เท่า เพื่อป้องกันการเพิ่มขึ้นของกำลังดันของน้ำโลหะ นอกจากนี้จะขยายขนาดบริเวณฐานของรูเททำให้ฐานของรูเทมีพื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อน้ำโลหะไหลลงมากระทบฐานของรูเทความเร็วของน้ำโลหะจะลดลงและลดการไหลแบบปั่นป่วน

รูวิ่ง (Runner)

เมื่อน้ำโลหะไหลผ่านรูเทแล้วจะเข้าสู่รูวิ่งซึ่งเป็นส่วนที่ออกแบบไว้สำหรับดักจับสิ่งเจอปนที่อยู่ในน้ำโลหะอันได้แก่ ตะกรัน เม็ดทราย และสารประกอบออกไซด์ที่สามารถเจือปนมากับน้ำโลหะโดยเฉพาะโลหะทองแดงผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ซึ่งมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมจึงมีโอกาสเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจากน้ำโลหะก่อนที่สิ่งเจอปนเหล่านี้จะเข้าสู่ชิ้นงาน บริเวณรูวิ่งยังติดตั้งเซรามิกฟิวเตอร์เพื่อช่วยให้การกรองสิ่งสกปรกออกจากน้ำโลหะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

รูเข้า (Gate)

เมื่อน้ำโลหะไหลผ่านรูวิ่งจะเข้าสู่รูเข้าแล้วเข้าสู่ชิ้นงาน โดยนิยมวางตำแหน่งรูเข้าบริเวณด้านล่างของชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานใบจักรจะวางตำแหน่งของรูเข้าไว้บริเวณด้านล่างของดุมใบจักร น้ำโลหะส่วนแรกที่เข้าสู่ดุมใบจักรมีโอกาสที่จะไหลกระแทกกับดุมใบจักรและทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนและเกิดรูพรุนบริเวณดุม ใบจักรส่วนล่างดังนั้นบริเวณดุมใบจักรส่วนล่างที่ต่อกับรูเข้าจึงต้องเพิ่มความยาวของดุมใบจักรให้ยาวมากกว่าความยาวใบจักรจริงโดยจะตัดส่วนนี้ออกภายหลัง เนื่องจากน้ำโลหะจะไหลเข้าบริเวณด้านล่างของดุมใบจักรดังนั้นบริเวณด้านล่างของดุมใบจักรจะต้องเป็นส่วนที่แข็งตัวช้าที่สุด

ดังนั้นบริเวณด้านล่างของดุมใบจักรจะเคลือบผิวด้วยทรายโครไมต์ซึ่งจะให้ความร้อนแก่น้ำโลหะทำให้น้ำโลหะแข็งตัวช้า

<u>รูล้น(Riser)</u>

รูล้นคือแอ่งกักสำรองน้ำโลหะในส่วนที่ไม่ใช่ชิ้นงาน น้ำโลหะในรูล้นจะต้องแข็งตัวช้ากว่าน้ำโลหะในแบบหล่อ ทั้งนี้เพื่อให้น้ำโลหะจากรูล้นสามารถไหลป้อนเติมเข้าไปในแบบหล่อในระหว่างกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะในแบบหล่อ รูล้นจะถูกตัดออกจากชิ้นงานก่อนส่งมอบงาน ตำแหน่งของรูล้นควรจะเป็นตำแหน่งที่น้ำโลหะชิ้นงานแข็งตัวช้าที่สุด รวมทั้งห่างจากรูเทมากๆ ดังนั้นรูล้นสำหรับใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จะวางไว้บริเวณด้านบนของดุมใบจักรโดยขยายขนาดให้ส่วนฐานของรูล้นให้ใหญ่กว่าดุมใบจักรเพื่อให้บริเวณนี้กลายเป็นจุดร้อน (Hot Point) ซึ่งช่วยให้น้ำโลหะจากรูล้นสามารถไหลป้อนเติมเข้าสู่โพรงแบบหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้รูล้นแข็งตัวช้ากว่าชิ้นงาน นอกจากนี้ส่วนของรูล้นที่สัมผัสกับดุมใบจักรจะทำเป็นคอคอดขนาดเล็กเรียกว่า คอรูล้น (Riser Neck) คอรูล้นช่วยลดเวลาในการตัดรูล้นออกจากชิ้นงานได้ นอกจากนี้ทรายหล่อส่วนที่ขึ้นรูปเป็นคอรูล้นจะสัมผัสน้ำโลหะทั้งจากชิ้นงานและรูล้นทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าทรายหล่อบริเวณอื่นๆ เนื่องจากทรายหล่อบริเวณนี้จะมีมวลน้อยมาก ทำให้น้ำโลหะจากรูล้นสามารถไหลป้อนเติมเข้าสู่ชิ้นงานได้ง่ายและดีกว่ารูล้นแบบที่ไม่มีคอรูล้น รูล้นของใบจักรจะเป็นรูล้นแบบเปิดโดยส่วนบนของรูล้นยื่นโผล่สูงเท่ากับผิวด้านบนของทรายหีบหล่อและเปิดสู่อากาศ ทำให้ด้านบนของรูล้นได้รับแรงกดของบรรยากาศทำให้ผิวด้านบนของน้ำโลหะมีแรงดันเพิ่มขึ้น แต่การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำโลหะที่บริเวณด้านบนของรูล้นจะ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้รูล้นแข็งตัวไวและไม่สามารถป้อนเติมน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงานได้ ดังนั้นบริเวณด้านบนของรูล้นจะเติมผง Exothermic Powder เพื่อคลุมผิวหน้าของรูล้นเพื่อช่วยเพิ่มความร้อนและทำให้รูล้นแข็งตัวช้า และเคลือบผิว

รูล้นด้วยทรายโครไมต์ซึ่งจะให้ความร้อนแก่น้ำโลหะทำให้น้ำโลหะแข็งตัวช้า ประสิทธิภาพการป้อนเติมน้ำโลหะของรูล้นจะเพิ่มสูงขึ้น

(2.2) อัตราส่วนรูเท (Gating ratio)

เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำโลหะจะถูกกำหนดโดยขนาดพื้นที่หน้าตัดของระบบจ่ายน้ำโลหะ ดังนั้นการที่จะทำให้การไหลของน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่อมีลักษณะราบเรียบและปราศจากสิ่งสกปรกเจือปน อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของระบบที่เรียกว่า อัตราส่วนรูเท (Gating ratio) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของ รูเท:รูวิ่ง:รูเข้า จึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้น้ำโลหะมีลักษณะดังกล่าว อัตราส่วนของ รูเท: รูวิ่ง: รูเข้า หรือ gating ratio สามารถแบ่งออกได้สองแบบคือ 1) ระบบเพิ่มความดัน 2) ระบบลดความดัน ทั้งสองระบบใช้กฎความต่อเนื่องของการไหล คืออัตราการไหลในทุกบริเวณในแบบหล่อมีค่าเท่ากัน ดังนั้นความเร็วในการไหลจึงแปรผกผันต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัด ถ้าขนาดพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของรูเข้ามีขนาดเล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของรูวิ่งความเร็วของน้ำโลหะที่รูเข้าจะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความดันในรูวิ่งเพิ่มสูงขึ้น จึงเรียกระบบนี้ว่าระบบเพิ่มความดัน ระบบเพิ่มความดันจะทำให้ความเร็วการไหลของน้ำโลหะจากรูเข้าเข้าสู่แบบหล่อสูงขึ้นและมักทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะได้ง่าย ส่วนระบบไม่เพิ่มความดันคือน้ำโลหะจากรูเข้าจะไหลอย่างราบเรียบเข้าสู่แบบหล่อ เนื่องจากโลหะทองแดงผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์มีโอกาสเกิดออกซิไดซ์ได้ง่ายเพราะมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมดังนั้นในการหล่อโลหะทองแดงผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จึงเลือกใช้ระบบไม่เพิ่มความดัน โดยใช้อัตราส่วนของ รูเท: รูวิ่ง: รูเข้า คือ 1:4:4 [14]

(2.3) ลักษณะการออกแบบชิ้นงานหล่อที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง

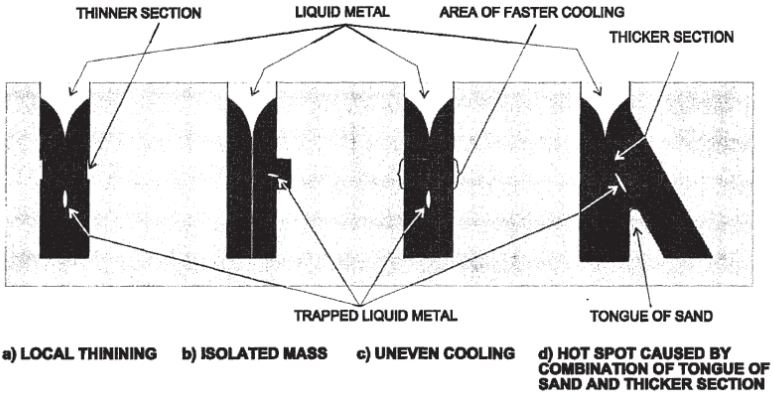
ในการออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะและแบบหล่อต้องระวังไม่ให้มีน้ำโลหะทั้งในระบบจ่ายน้ำโลหะและชิ้นงานแข็งตัวตัวก่อน ซึ่งส่วนที่แข็งตัวก่อนจะขัดขว้างการป้อนเติมน้ำโลหะในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่อง ลักษณะการออกแบบแบบหล่อดังต่อไปนี้มีความเสี่ยงต่อการเกิดข้อบกพร่องภายในชิ้นงาน [1]

(2.3.1) แบบหล่อมีบางส่วนที่บาง (Local thinning) ซึ่งทำให้ชิ้นงานส่วนนี้เย็นตัวไว และบริเวณส่วนหนาจะเย็นตัวช้ากว่า การเย็นตัวของชิ้นงานจึงไม่สม่ำเสมอและมีโอกาสที่ส่วนหนาจะเกิดโพรงหดตัว แนวทางการแก้ไขคือการเพิ่มเนื้อโลหะในส่วนบาง และทำการกลึงออกภายหลังจากชิ้นงานเย็นตัวแล้ว

(2.3.2) แบบหล่อมีชิ้นส่วนยื่นออกจากโครงสร้างหลัก (Isolated mass) ชิ้นงานส่วนที่ยื่นออกจากโครงสร้างหลัก เช่น ปีกใบจักรซึ่งยื่นออกจากดุมใบจักร ปีกใบจักรจึงเย็นตัวไวกว่าดุมใบจักร ซึ่งทำให้ดุมใบจักรมีความเสี่ยงที่เกิดโพรงหดตัว แนวทางการแก้ไขคือการใช้วัสดุเร่งการเย็นตัว (Chill) ต่อกับโครงสร้างหลัก ซึ่งจะช่วยให้บริเวณนี้เย็นตัวไว

(2.3.3) แบบหล่อทำด้วยวัสดุ เช่น ทราย ซึ่งมีความสามารถในการนำความร้อนแตกต่างกัน กรณีนี้เกิดขึ้นได้กรณีใช้ทรายทำแบบซึ่งต้องผสมส่วนผสมเพื่อให้ทรายอยู่ตัว เช่น โซเดียมซิลิเกต การผสมอาจจะไม่สม่ำเสมอทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของทรายในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน

(2.3.4) จุดร้อน (Hot spot) ซึ่งเป็นส่วนที่เย็นตัวช้า ซึ่งอาจเกิดจากชิ้นงานมีความหนามาก หรือ มีทรายแบบยื่นเข้าใกล้ชิ้นงาน (Tongue of sand) แนวทางการแก้ไขคือการใช้วัสดุเร่งการเย็นตัว (Chill) ต่อกับชิ้นส่วนที่เป็นจุดร้อนเพื่อเร่งการเย็นตัว รูปที่ 4. แสดงลักษณะการออกแบบชิ้นงานหล่อที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง



รูปที่ 4. ลักษณะการออกแบบชิ้นงานหล่อที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง [1]

(2.4) การควบคุมการแข็งตัวของน้ำโลหะ

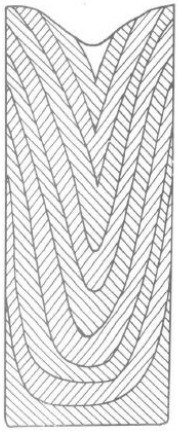
รูปแบบการแข็งตัวของน้ำโลหะทองแดงผสมแต่ละส่วนผสมทางเคมีจะแตกต่างกันไปอย่างกว้างขวาง การแบ่งโลหะทองแดงผสมแต่ละส่วนผสมออกเป็นกลุ่มตามพฤติกรรมการแข็งตัวของน้ำโลหะที่คล้ายคลึงกัน จะทำให้ความสามารถควบคุมปริมาณรูพรุน รูปแบบรูพรุนที่เกิดขึ้น และทำให้สามารถกำหนดเทคนิคที่จะทำให้น้ำโลหะสามารถไหลป้อนเติมเข้าสู่แบบหล่อได้เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้ในการปฏิบัติ จะสามารถแบ่งโลหะทองแดงผสมออกตามพฤติกรรมการแข็งตัวของน้ำโลหะเป็น 2 กลุ่มคือ

กลุ่มที่ 1 คือทองแดงผสมชนิดแข็งตัวจากผิวนอกเข้าสู่ภายใน หรือกลุ่มที่มีระยะการแข็งตัวสั้น เช่น นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ซิลิกอนบรอนซ์ เป็นต้น เมื่อน้ำโลหะทองแดงผสมกลุ่มนี้ถูกเทลงในแบบหล่อทราย น้ำโลหะส่วนที่สัมผัสผนังแบบหล่อจะถ่ายเทความร้อนให้กับแบบหล่อทราย ทำให้ทรายร้อนขึ้น ในขณะเดียวกันอุณหภูมิของน้ำโลหะที่สัมผัสผิวแบบหล่อจะลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิแข็งตัวของน้ำโลหะ การแข็งตัวของน้ำโลหะจะเริ่มจากการเกิดผลึกก้อนโลหะแข็งขนาดเล็กหรือ นิวเครียส จำนวนมากบนผิวสัมผัสผนังแบบหล่อ นิวเครียสเหล่านี้จะถูกพอกโตขึ้นทั้งด้านข้างและยาวพุ่งลึกเข้า

ไปในน้ำโลหะใจกลางโพรงแบบหล่ออย่างรวดเร็ว การแข็งตัวของน้ำโลหะจะเรียงตัวเป็นชั้น เริ่มจากบริเวณส่วนบางซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนได้เร็วไปสู่บริเวณส่วนหนาซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนได้ช้า บริเวณใจกลางความหนาของชิ้นงานที่น้ำโลหะไม่สามารถป้อนเติมได้ จะแสดงให้เห็นโพรงหดตัวในศูนย์กลางความหนาของชิ้นงานที่เรียกว่า Centerline Shrinkage การยื่นยาวของเดนไดส์จะบรรจบกันในแนวศูนย์กลางของความหนาของชิ้นงานพอดีพร้อมกับปิดล้อมไม่ให้น้ำโลหะสามารถป้อนเติมเข้าสู่แนวศูนย์กลางความหนาชิ้นงานได้ เมื่อน้ำโลหะในบริเวณดังกล่าวแข็งตัวจะเกิดการหดตัวโดยไม่มีน้ำโลหะใหม่ไหลเข้ามาเติมจึงเกิดรูพรุนในลักษณะที่เป็นโพรงใหญ่ที่มีผิวค่อนข้างเรียบ (รูปที่ 5.)

กลุ่มที่ 2 คือ โลหะผสมที่มีการแข็งตัวในลักษณะ Mushy stage หรือกลุ่มที่มีช่วงการเย็นตัวยาว เช่น ทินบรอนซ์ เป็นต้น โลหะทองแดงผสมกลุ่มนี้จะมีพฤติกรรมการแข็งตัวในช่วงระหว่างอุณหภูมิที่เริ่มต้นการแข็งตัวและจุดสิ้นสุดการแข็งตัวห่างกันมากกว่า 50 องศาเซลเซียส เริ่มต้นการแข็งตัวโดยการที่มีก้อนผลึกโลหะเล็กๆ แขวนลอยในน้ำโลหะ สภาวะนี้น้ำโลหะจะยังคงมีความสามารถในการไหลดีมาก การพอกโตขึ้นของผลึกโลหะแข็งตัวแล้วจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและจมลงสู่ที่อยู่ต่ำลงไป ความสามารถในการไหลตัวของน้ำโลหะจะคงสภาพไว้ได้ตราบเท่าที่มวลของผลึกโลหะแข็งยังคงมีน้อยกว่า 70% ของปริมาตรโลหะรวมทั้งหมด ถ้าปริมาณผลึกโลหะแข็งเพิ่มมากกว่านี้น้ำโลหะจะมีสภาพข้นหนืด ในสภาวะที่โลหะมวลรวมประกอบด้วยน้ำโลหะและโลหะแข็งอยู่รวมกันเข้าใกล้จุดสิ้นสุดการแข็งตัวทีละน้อยๆ นี้โพรงหดตัวระหว่างเดนไดส์ที่อยู่ด้านล่างจะถูกโลหะแข็งตัวตกลงไปอุดค้างในโพรงดังกล่าวตลอดเวลา การอุดตันของผลึกแข็งดังกล่าวจะสามารถเติมเต็มโพรงหดตัวดังกล่าวได้ประมาณ 2/3 ของปริมาตรโพรงหดตัว โลหะทองแดงผสมกลุ่มนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วไปทั้งมวลของเนื้อโลหะ

เนื่องจากโลหะทองแดงผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จัดอยู่ในกลุ่มโลหะทองแดงผสมที่มีระยะการแข็งตัวสั้น ลักษณะการแข็งตัวคล้ายกับโลหะบริสุทธิ์ เมื่อแข็งตัวจะแข็งตัวเป็นชั้นๆ เริ่มจากบริเวณส่วนบางซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนได้เร็วไปสู่บริเวณส่วนหนาซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนได้ช้า บริเวณส่วนหนาที่เย็นตัวช้าจะเกิดโพรงหดตัว ดังนั้นการหล่อโลหะทองแดงผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จึงต้องใช้รูล้นขนาดใหญ่เพื่อช่วยป้อนเติมน้ำโลหะ กรณีใบจักรส่วนที่เย็นตัวช้าคือบริเวณดุมใบจักร ด้านบนของดุมใบจักรจึงต้องใช้รูล้นขนาดใหญ่

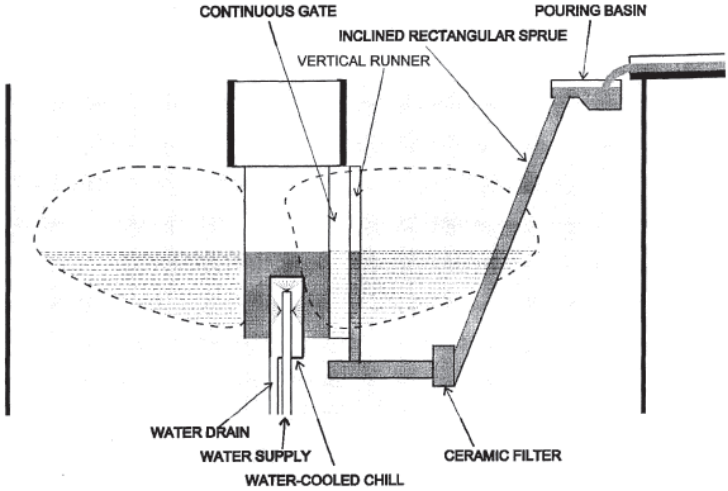


รูปที่ 5. ลักษณะการเย็นตัวของโลหะทองแดงผสมที่มีช่วงการเย็นตัวแคบ เช่น นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

(2.5) การควบคุมการเย็นตัวของน้ำโลหะในทิศทางเดียว (Directional Solidification)

การควบคุมการเย็นตัวสามารถทำได้ง่ายในการหล่อแบบ tilting process ซึ่งคือกระบวนการที่แบบหล่อถูกหมุนในขณะที่เทน้ำโลหะลงสู่แบบ แต่สำหรับการเทน้ำโลหะใน static mold ซึ่งคือกระบวนการที่แบบหล่ออยู่

กับที่การควบคุมการเย็นตัวทำได้ยากเนื่องจากการเย็นตัวเกิดทุกส่วนของแบบหล่อ และด้านล่างของแบบหล่อเป็นส่วนที่ร้อนที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนที่ต่อกับรูเท ดังนั้นการเย็นตัวของน้ำโลหะจึงไม่สามารถเริ่มจากด้านล่างของแบบหล่อได้ เพราะฉะนั้นต้องใช้การออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะ Charles Meigh [1] ได้เสนอแนวคิดเพื่อให้การหล่อใบจักรแบบ static mold สามารถควบคุมการเย็นตัวในทางเดียวได้โดยใช้รูวิ่งในแนวตั้ง (Vertical runner) และรูเข้าแบบต่อเนื่อง (Continuous gate) ต่อเข้าตลอดความยาวของดุมใบจักร บริเวณด้านล่างของดุมใบจักรต่อกับท่อซึ่งระบายความร้อนด้วยน้ำ ทำให้ด้านล่างของดุมใบจักรเย็นตัวเร็วและทำให้เกิดการเย็นตัวในทางเดียวจากด้านล่างของดุมใบจักรขึ้นสู่ด้านบน รูปที่ 6.



รูปที่ 6. การหล่อใบจักรโดยใช้ static mold ซึ่งสามารถควบคุมการเย็นตัวในทางเดียว

การควบคุมการเย็นตัวให้เป็นแบบการเย็นตัวในทางเดียว (Directional Solidification) เริ่มจากด้านล่างของใบจักรขึ้นสู่ด้านบน แต่ระบบการป้อนเติมน้ำโลหะที่บริเวณด้านล่างของดุมใบจักรทำให้เกิดจุดร้อนบริเวณด้านล่างของใบจักรและไม่สามารถทำให้เกิดการเย็นตัวให้เป็นแบบการ

เย็นตัวในทางเดียวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้รูเทจำนวน 2 รู รูเทแรกอยู่บริเวณด้านล่างของดุมใบจักรและรูเทที่สองอยู่บริเวณด้านบนของดุมใบจักร เมื่อเติมน้ำโลหะผ่านทางรูเทแรกจนระดับน้ำโลหะถึงด้านบนของดุมใบจักรจึงหยุดเติมน้ำโลหะจากรูเทแรกโดยเติมน้ำโลหะจากรูเทที่สองที่อยู่บริเวณด้านบนของดุมใบจักร ทำให้จุดร้อนย้ายมาอยู่บริเวณด้านบนของดุมใบจักร วิธีการนี้จะช่วยควบคุมการเย็นตัวของน้ำโลหะให้เป็นแบบการเย็นตัวในทางเดียว

(a)

(b)

รูปที่ 7. ใบจักรเรือ PCFออกแบบให้ควบคุมการเย็นตัวในทางเดียว(a)รูเทแรกอยู่บริเวณด้านล่างของดุมใบจักร(b)รูเทที่สองอยู่บริเวณด้านบนของดุมใบจักร

4. กระบวนการทางความร้อนสำหรับนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

อัตราเร็วในการเย็นตัวมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ดังนี้

(1) ชิ้นงานเย็นตัวในอัตราเร็ว เช่น การขึ้นรูปโดยวิธีการฉีด (die casting) จะได้โครงสร้างแบบละเอียด ได้ชิ้นงานที่มีความเค้นแรงดึงและความเค้นแรงดึงพิสูจน์สูง แต่การยืดตัวต่ำ โดยมีโครงสร้างของ retained β ซึ่งตกค้างอยู่จำนวนมาก โดยไม่สามารถเปลี่ยนเป็น α และ κ_{III} ได้ทัน

(2) ชิ้นงานเย็นตัวในอัตราค่อนข้างช้า เช่น การหล่อในทราย จะมีโครงสร้าง retained β ซึ่งตกค้างอยู่จำนวนเล็กน้อย ซึ่งสามารถใช้กระบวนการทางความร้อนในการสลายโครงสร้าง retained β ได้

(3) ชิ้นงานเย็นตัวในอัตราค่อนข้างช้ามาก เช่น การหล่อในทรายและชิ้นงานมีความหนามาก จะมีโอกาสเกิดโครงสร้าง γ_2 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เปราะและสามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

กระบวนการทางความร้อนใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติโครงสร้างของอะลูมิเนียมบรอนซ์ซึ่งจะช่วยให้ทั้งสมบัติทางกลอันได้แก่ ความแข็ง ความเหนียว ความเค้นแรงดึง ความต้านทานความล้า และความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชั่นได้ดี โดยจะเกิดออกไซด์บางๆ ที่ผิวชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นในขั้นตอนการทำกรรมวิธีทางความร้อนจึงสามารถให้ความร้อนกับชิ้นงานในบรรยากาศปกติได้ กระบวนการทางความร้อนที่นิยมใช้สำหรับอะลูมิเนียมบรอนซ์มีดังนี้

(3.1) นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์อบที่อุณหภูมิ 675 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2-6 ชม. ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน แล้วทำให้เย็นตัวในอากาศ ทำให้เกิดการสลายโครงสร้าง β ที่ตกค้างจากการหล่อ (residual β phase) ซึ่งเป็นโครงสร้างมาเทนไซต์และเกิดการกัดกร่อน โดยโครงสร้าง β จะเปลี่ยนเป็น $\alpha+\kappa_{III}$ ชิ้นงานจะมีความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนและมีสมบัติทางกลดี

ขึ้น ถ้าอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 650 °C จะไม่สามารถทำให้เกิดโครงสร้าง $\alpha+\kappa_{III}$ ได้ ตามมาตรฐาน MIL-B-24480A แนะนำให้อบชิ้นงานนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิ 675±10 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชม.จากนั้นทำให้เย็นตัวในอากาศ ยกเว้นกรณีใบจักรสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องทำการอบ เพื่อป้องกันใบจักรบิดตัว [15]

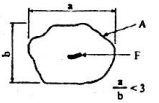
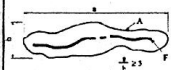
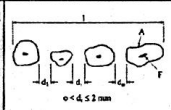
(3.2) นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์อบที่อุณหภูมิสูงกว่า 675 °C เล็กน้อย แล้วให้เย็นตัวในอากาศ จะให้ผลเช่นเดียวกันกับการอบที่อุณหภูมิ 675 °C เป็นเวลานานคือโครงสร้าง β จะเปลี่ยนเป็น $\alpha+\kappa_{III}$ แต่ถ้าอบที่อุณหภูมิสูง เช่น 820-850 °C จะเกิดโครงสร้าง β เพิ่มขึ้น ถ้าปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวเร็ว

(3.3) การชุบแข็ง (Quenching) ที่อุณหภูมิ 950 °C จากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำหรือน้ำมัน ซึ่งอัตราการเย็นตัวจะเร็วกว่าการเย็นตัวในอากาศ แล้วทำเทมเปอร์ (Tempering) ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 2 ชม. จะช่วยเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกกร่อน (Wear) และจะเกิดโครงสร้าง κ ขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วโครงสร้าง ทำให้ชิ้นงานสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี

5. การตรวจสอบนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หลังการหล่อ

นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์จัดอยู่ในกลุ่ม CU3 ตามมาตรฐาน GL โดย GL กำหนดให้ตรวจสอบชิ้นงานโดยวิธีใช้สารแทรกซึมซึ่งวิธีการนี้เหมาะสำหรับการตรวจสอบรอยร้าวที่เปิดสู่ผิว โดยสารแทรกซึมจะซึมเข้าสู่รอยแตก หลังจากนั้นจะใช้น้ำยาดีเวลลอปเปอร์เพื่อดึงน้ำยาที่ซึมเข้าไปในรอยแตกให้ไหลออกมา บริเวณที่มีสารแทรกซึมไหลออกมาคือบริเวณที่มีรอยแตกร้าว การตรวจสอบโพรงหดตัวภายในชิ้นงานซึ่งไม่สามารถใช้สารแทรกซึมตรวจสอบได้ ต้องใช้วิธีการถ่ายภาพรังสี (X-ray) หรือใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic)

แต่การถ่ายภาพรังสีสำหรับนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ทำได้ยากเนื่องจากเนื้อวัสดุสามารถดูดซับรังสีได้ดีกว่าเหล็ก ดังนั้นรังสีจึงไม่สามารถทะลุผ่านชิ้นงานที่หนามากๆ ได้ GL แนะนำให้ใช้รังสีเอ็กเรย์ 300 kV สำหรับชิ้นงานที่มีความหนาไม่เกิน 50 มม. และ Co60 สำหรับชิ้นงานที่มีความหนาไม่เกิน 160 มม. ส่วนการตรวจสอบโดยใช้คลื่นรังสีความถี่สูงเหมาะสำหรับการตรวจสอบโพรงหดตัวที่อยู่ใกล้กับผิวของชิ้นงาน [16]

ข้อบกพร่อง	สมาคมของจัดชั้นเรือ GL ที่ กภค.ฯนำมาใช้ (ต่อ 100 mm^2 ของพื้นที่อันตราย)
1. รอยหมายแบบไม่เป็นเส้น (Non-linear or Rounded)	 ขนาด a ต้องน้อยกว่า 4 มม. และจำนวนสูงสุดไม่เกิน 5 จุด
2. รอยหมายแบบเป็นเส้น (Linear)	 ขนาด a ต้องน้อยกว่า 3 มม. และจำนวนสูงสุดไม่เกิน 2 จุด
3. รอยหมายหลายจุดเรียงตัวกัน (In-rows or Aligned)	 ขนาด a ต้องน้อยกว่า 3 มม. และจำนวนสูงสุดไม่เกิน 2 จุด
4. รอยหมายที่กระจายตัวกันเป็นบริเวณกลม	ไม่ได้กำหนด
5. พื้นที่รวมทั้งหมดของรอยหมาย	ไม่ได้กำหนด
6. จำนวนรอยหมายทุกชนิดรวมสูงสุด	7 จุด

รูปที่ 8. เกณฑ์การยอมรับของชิ้นงานใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ของกองทัพเรือ

6. ขั้นตอนการผลิตใบจักรนิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์

ขั้นตอนการทำไม้แบบใบจักร

การทำแบบใบจักร มีวัตถุประสงค์เพื่อจะใช้เป็นแบบฝังลงในแบบทรายเพื่อที่จะทำการหล่อเป็นชิ้นงาน ก่อนที่จะนำไปปรับแต่งหาศูนย์ใบจักร และนำไปติดตั้ง การสร้างกระสวนแบบ (Pattern) โดยกระสวนส่วนใหญ่จะสร้างขึ้นมาจากไม้ โลหะ โฟม พลาสติก ขี้ผึ้ง โดยการเลือกใช้ชนิดกระสวนนี้ขึ้นอยู่กับขนาดความซับซ้อนชิ้นงาน เหตุผลและความจำเป็น โดยจะต้องเผื่อขนาดให้ใหญ่กว่าชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อเป็นการเผื่อการหดตัว (Shrinkage) ของโลหะ เผื่อการตกแต่งผิว (Machine finish allowance) เผื่อความลาดเอียง (Draft allowance) เผื่อการบิดตัว (Distortion) และเผื่อการคลอนแบบ

กระสวนจะถูกสร้างจากแบบหรือนำชิ้นงานมาสร้างแบบกระสวน โดยส่วนใหญ่ใบจักรจะไม่มีแบบ Drawing ที่สมบูรณ์ที่สามารถนำมาสร้างกระสวนได้ ดังนั้นจึงต้องนำใบจักรที่ผ่านการใช้งานแล้วมาสร้างกระสวน ซึ่งใบจักรที่ผ่านการใช้งานแล้วอาจมีการบิดตัวทำให้แต่ละปีกมีมุมพิทใบจักรที่แตกต่างกันได้ ซึ่งช่างไม้แบบจะต้องพิจารณาเลือกปีกใบจักรที่สมบูรณ์นำมาถอดแบบเพื่อสร้างกระสวน กระสวนใบจักรจะนิยมสร้างด้วยไม้สักเพื่อให้มีความแข็งแรงทนทาน สามารถใช้งานได้หลายครั้ง โดยแบบกระสวนจะประกอบด้วยดุม ใบจักรและปีกใบจักรจำนวน ๑ ปีก เมื่อนำไปกดแบบทำให้ชิ้นงานหล่อที่ได้มีมุมพิทใบจักรเท่ากัน

(1) ขั้นตอนที่สำคัญในการสร้างกระสวนใบจักร

กระสวนงานหล่อ (Patterns) คือ แม่แบบ ต้นแบบ หรือหุ่นจำลองที่จะทำให้แบบหล่อเกิดเป็นโพรงทำให้ได้ขนาดและรูปร่างที่ต้องการหล่อออกมาตามความต้องการ กระสวนที่ดีจะต้องมีสมบัติต้านทานต่อสารเคมี ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี มีผิวเรียบ มีขนาดเที่ยงตรง

(1.1) ตรวจสอบใบจักร โดยเลือกปีกใบจักรที่สมบูรณ์ที่สุดเพื่อทำแบบ

(1.2) พ่นสีใบจักร หน้าใบ หลังใบ

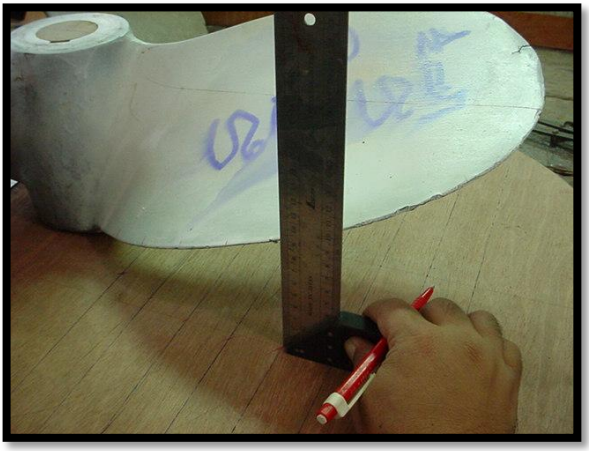
(1.3) ตัดไม้อุดรู ดุมใบจักร

(1.4) หาศูนย์กลางของดุมใบจักร

(1.5) ลากเส้นศูนย์กลางดุมใบจักรผ่านไปยังศูนย์กลางปลายใบจักร

(1.6) หาระยะความยาวของปีกใบจักรถ่ายลงบนแผ่นไม้อัดโดยแบ่งระยะจากโคนใบถึงปลายใบไว้ประมาณ 8 จุด หมายเหตุ ระยะจุดต่างๆ ขึ้นอยู่กับความยาวของปีกใบจักร

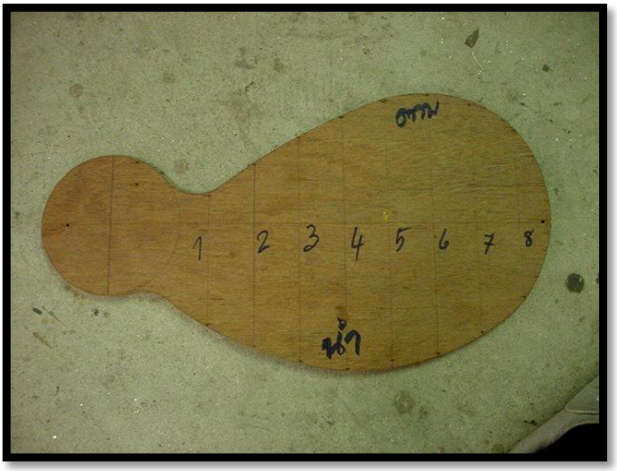
(1.7) นำใบจักรมาวางทาบบนแผ่นไม้อัดที่กำหนดจุดไว้ หาขอบใบจักร ตรงขอบนำ (Leading Edge) หมายตำแหน่งตามจุดที่กำหนดระยะไว้บนขอบนำของใบจักร พร้อมกับวัดระยะความสูงของขอบนำและพื้นแผ่นไม้อัดทั้ง 8 จุด



(1.8) หาขอบตาม (Trailing Edge) หมายตำแหน่งตามจุดที่กำหนดระยะไว้บนขอบตามของใบจักร พร้อมกับวัดระยะความสูงของขอบตามและพื้นแผ่นไม้อัดทั้ง 8 จุด

(1.9) ลากเส้นจากจุดที่หมายไว้บนขอบนำและขอบตามให้ครบทั้ง 8 จุด

(1.10) ตัดไม้ให้ได้ตามแบบใบจักรโดยกำหนด ขอบนำ และ ขอบตาม เพิ่มขนาด 1.5% เพื่อการเผื่อหดของเนื้อโลหะ(นิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์) และการกลึงปรับแต่ง แล้วลากเส้นแบ่งระยะตามช่องจากจุดศูนย์กลางดุมใบจักรไป 8 ช่อง ตามที่ได้กำหนดไว้ เพื่อในการตรวจสอบ



(1.11) ตัดแผ่นไม้อัดบางๆ เพื่อทำกระสวน ไว้สำหรับตรวจสอบพิชใบจักร ทั้ง 8 จุด หน้าใบและหลังใบ

(1.12) ทำการตัดไม้เพื่อจะนำมาเพาะไม้

(1.13) เพาะไม้ให้ได้ขนาดตามต้องการ

(1.14) นำไม้ที่ได้ไปหาศูนย์และเจาะรูตรงบริเวณที่เป็นดุมใบจักรเพื่อนำไปเสียบเข้ากับหลักแกน

(1.15) ตีเส้นตามแบบที่หาไว้ในครั้งแรกพร้อมทั้งหาความสูงของขอบใบทั้งหน้าใบและหลังใบที่หาไว้แล้วทั้ง 8 จุด

(1.16) ทำการเลื่อยตามแนวเส้นโดยไม่ให้เกินเส้นของขอบใบและสกัดด้วยสิ่วปรับแต่งให้ได้ขนาด

(1.17) นำกระสวนมาทาบวัดเพื่อตรวจสอบพิชให้ได้ตามต้องการ (ตามลำดับเส้นที่แบ่งไว้ทั้ง 8 เส้น)

(1.18) ตัดไม้ชิ้นกลมเจาะรูกลางเพื่อเสริมดุมใบจักรทั้ง 2 ด้าน

(1.19) ปรับแต่งให้เรียบร้อยพร้อมทั้งเสริมดุมทั้ง 2 ด้าน

(1.20) กลับข้างเพื่อดำเนินการทำหลังใบต่อ ขั้นตอนเช่นเดียวกับการทำหน้าใบ ทำการเลื่อยตามแนวเส้นของขอบใบ

(1.21) สกัดด้วยสิ่วปรับแต่งให้ได้ขนาด นำกระสวนมาทาบวัดเพื่อตรวจสอบพิชให้ได้ขนาดตามต้องการ

(1.22) ทำการตรวจสอบวัดขนาดความหนาของใบจักรตามจุดต่างๆ นำมาเทียบกับกระสวนและปรับแต่งให้ได้ขนาด

(1.23) เสริมดุมใบจักร เพื่อในการจับกลึงบนแท่นกลึง ทาแลคเกอร์เสร็จ ขั้นตอนการทำกระสวนใบจักร

(1.24) กระสวนใบจักรที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

(2) ขั้นตอนที่สำคัญในการทำแบบหล่อใบจักร

ขั้นตอนในการทำแบบหล่อ คือ ขั้นตอนที่นำกระสวนหรือแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมาทำแบบหล่อโลหะ วัสดุที่ใช้ทำแบบมีหลายประเภท แต่ทุกประเภทต้องเป็นวัสดุทนไฟ โดยขั้นตอนที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

(2.1) เตรียมพื้นที่ทำแบบใบจักร

(2.2) ปรับพื้นที่ทำแบบใบจักรโดยใช้ระดับน้ำปรับหาระดับ

(2.3) ผสมทราย CO_2 เพื่อใช้ทำแบบ โดยใช้อัตราส่วน ทรายซิลิกา 50 กก. ต่อน้ำแก้ว (โซเดียมซิลิเกต) 6 กก. ทำฐานล่างของแบบใบจักรเพื่อให้ฐานแข็งแรง

(2.4) หามุมองศาของแบบใบจักรที่จะทำแบบ โดยใช้มุม 360 องศา หารด้วยจำนวนใบของใบจักร 1 พวง

(2.5) นำแบบ (Pattern) วางบนฐานแบบที่ใช้กำหนดองศาให้ตรงตาม ตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ และใช้ทราย CO_2 ทำแบบฐานล่างของใบจักร

(2.6) กำหนดวางรูเทน้ำโลหะโดยใช้ทราย CO_2 ทำแบบ ทำการฉีด CO_2 เพื่อให้ทรายแข็งตัวโดยใช้เวลาประมาณ 20 วินาทีต่อรู และมีระยะห่าง ระหว่างรูประมาณ นิ้ว 3

(2.7) ทำแบบด้านล่างของใบจักรด้วยทราย CO_2 ตกแต่งทรายแบบให้ได้ขนาด ทำการคลอนแบบเพื่อป้องกันทรายติดแบบ ฉีด CO_2 เพื่อให้ทรายแข็งตัว และเมื่อทรายแข็งตัวดีแล้ว ทำการตกแต่งแบบให้เรียบร้อย เพื่อเตรียมการทำฝาบน

(2.8).นำเหล็กเส้นมาดัดให้เข้ารูปเป็นโครงสำหรับทำฝาบนเพื่อให้ทรายยึดเกาะและเพิ่มความแข็งแรงของฝาบน

(2.9) โรยผงแยกแบบเพื่อป้องกันมิให้ทรายฝาบนติดกับทรายแบบตัวล่าง ดำเนินการทำแบบฝาบนโดยใช้โครงเหล็กกับทราย CO_2 และตกแต่งแบบทรายให้เรียบร้อย

(2.10) เจาะรูบนแบบสำหรับฉีด CO_2 คลอนแบบไม่ให้ทรายติดแบบ ฉีด CO_2 เพื่อให้ทรายแข็งตัว และทำเครื่องหมายระหว่างฝาบนและฝาล่างของแบบทราย

(2.11) เริ่มทำใบจักรใบที่ 2 และใบต่อๆไป โดยใช้ขั้นตอนเช่นเดียวกับการทำใบจักรใบแรก แต่ต้องนำกระดาษวางขั้นระหว่างใบจักรใบแรกและใบต่อๆไป เพื่อมิให้ทรายแบบติดกัน

(2.12) เมื่อเสร็จขั้นตอนการทำแบบใบจักร ทำการแยกแบบฝาบนและฝาล่างออกจากกัน ทาเซอลามอลเพื่อเคลือบผิวหน้าทรายให้แข็งแรง และใช้ความร้อนเผาไล่ความชื้นออกจากแบบหล่อเพื่อป้องกันการเกิดแก๊สในชิ้นงานหล่อ

(2.13) ปิดฝาแบบใบจักร นำทรายยาแบบปิดรอยต่อของฝาแบบใบจักรบนและล่างป้องกันน้ำโลหะรั่ว และใช้ความร้อนเผาแบบเพื่อไล่ความชื้นออกจากแบบหล่อ

(2.14) นำหีบครอบแบบทรายของใบจักรไว้ นำแบบรูเทและรูเลี้ยงมาวางไว้ในตำแหน่งที่กำหนดเหนือใบจักร นำทรายชื้นเททับทราย CO_2 และตกแต่งทรายชื้นให้เรียบร้อย สุดท้ายนำเหล็กมาวางทับแบบเพื่อป้องกันแรงดันของน้ำโลหะดันแบบใบจักรให้ลอยตัว

(3) ขั้นตอนที่สำคัญในการปรับแต่งใบจักร

การปรับแต่งใบจักรเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ทั้งนี้เพื่อให้ใบจักรมีขนาดและรูปทรงรวมถึงความสวยงามตามที่ต้องการ ในกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้ความละเอียด เพราะต้องมีการเจาะคว้านเพื่อให้รูของใบจักรสามารถติดตั้งเข้ากับขนาดของเพราเรือที่จะนำไปติดตั้งพอดี โดยขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

(3.1) ดำเนินการเจาะและกลึงคว้านรูเทเปอร์ให้ได้ขนาดของเพลาเรือ เช่น PCF เพลาขนาด 3 ½.” นำไปใช้กับเรือ ต.218

(3.2) นำใบจักรไปดำเนินการหาพีทช์ Pitch ตีดัดและเจีย ปรับแต่ง

(3.3) ดำเนินการวัดตัดแบบใบจักรให้เท่ากันทั้งสามปีก

(3.4) เจียปรับแต่งส่วนเกินให้ได้ขนาดเท่ากันทั้ง 3 ปีก จากนั้นให้ดำเนินการปรับแต่งหาบาลานซ์ Balance

(3.5) ดำเนินการเซาะร่องริ่มใบจักร ให้ได้ตามขนาดลิ่มของเพลาใบจักร

(3.6) ใบจักรที่เสร็จสมบูรณ์แล้วพร้อมส่งงาน

7. อ้างอิง

1. Harry Meigh, “ Cast and Wrought Aluminium Bronzes Properties, Process and Structure,” IMO Communication Ltd, ๒๐๐๐

2. Kenneth Brent Faires, characterization of microstructure and microtexture in longitudinal sections from friction stir processed nickel-aluminum bronze, naval postgraduate school, june 2003

3. Wharton, J.A. and Stokes, K.R., The Influence of Nickel-Aluminum Bronze Microstructure and Crevice Solution on the Initiation of Crevice Corrosion, Electrochemica Acta, Vol. 53, 2008, 2563-2473.

4. น.ต.ดร.เสวียง เถื่อนบุญ, ดร.นคร ศรีสุขุมบวรชัย, ดร.ปรีชา เติมสุขสวัสดิ์, “รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การพัฒนากระบวนการหล่อใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์”, แผนงานวิจัยการพัฒนาศักยภาพการป้องกันการกัดกร่อนของเรือหลวงตามแนวปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2553

5. Robert J.F. and Thomas E.C, Review of Dealloying of Cast Aluminum Bronze and Nickel-Aluminum Bronze Alloys in Sea Water Service, Material Performance, Vol. 431, 1982, 30-34.

6. Weill-Couly, P. and Arnaud D., “Influence De La Composition Et De La Structure Des Cupro-Aluminiums Sur Leur Comportment En Service,” Fonderie, no. 322, p. 123-135, 1973.

7. Culpan, E.A. and Rose, G., “Microstructural Characterization Of Cast Nickel Aluminum Bronze,” Journal of Materials Science, v. 13, p. 1647-1657, 1978.

8. P.J. Macken และ A.A. Smith, The aluminium bronzes, CDA (UK) Publication No. 31, 1966.

9. Edward และ Whittaker, Aluminium bronzes containing manganese, nickel and iron: chemical composition, effect on structure and properties, Trans. A.F.S., 1961, 69, 862-872

10. L.R. Vaidyanath, “The manufacture of aluminium bronze castings”, NML, Jamshedpur, 1969

11. Sarkar และ Bates, “Impact resistance of sand-cast aluminium bronze BS.1400๑๔ AB2”, British Foundaryman 1967, 60, 30.

12. R. Thomson, “Charpy impact properties of bronze propeller alloys” Modern castings, April 1968, 53, 189-199

13. M. Kanamori, S. Ueda, S. Matsuo and H. Sakagughi, “On the properties of Cu-Al-Ni-Fe Alloys in slowly-cooled castings”, Nippon Kinzoku Gakkai-Si, 1960, 24(5), 265-8

14. ผศ.สุภชัย ประเสริฐกุล, “เทคโนโลยีงานหล่อโลหะ”, สำนักพิมพ์ไซน์แอนด์เอ็นจีเนียริ่ง

15. Military Specifications For Bronze, Nickel-Aluminum (UNS C95800), Castings For Seawater Service (MIL-B-24480A), 20 June 1985.

16. GL Rules for Classification and Construction, “Materials for Propeller Fabrication”, Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft, 2009

17. ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1990

18. JIS H 5120:2009, Copper and copper alloy castings, Japanese Standards Association, 2009

19. JIS Z 2201:1998, Test pieces for tensile test for metallic materials, Japanese Standards Association, 1998

20. ASM Handbook, vol. 8, Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, 2000

21. Joseph E.Shigley, Mechanical Engineering Design, 6 th edition, Mc-Graw Hill

22. http://www.magmasoft.com/en/company/company-profile.html, MAGMA Giessereitechnologie GmbH, Germany

23. JIS Z 2274:1978, Method of rotating bending fatigue testing of metals, Japanese Standards Association, 1978

24. น.ท.ดร.เสวียง เถื่อนบุญและคณะ, “รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การผลิตและซ่อมแซมใบจักรเรือแบบแมงกานิสอะลูมิเนียมบรอนซ์เพื่อทดแทนการนำเข้า”, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2558

25. Ernest J. Czyryca and Robert B. Niederberger, “Mechanical, Fatigue and Corrosion Properties of Propeller Bronzes”, Propeller 75,The Society of Naval Architects and Marine Engineers, July 22-23, 1975

26. Brown, John, ed. Foseco ferrous foundryman's handbook. Butterworth-Heinemann, 2000.

27. ISO 1940-1:2003 Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state — Part 1: Specification and verification of balance tolerances, 2003

28. ISO 484-2:1981 Shipbuilding — Ship screw propellers — Manufacturing tolerances — Part 2: Propellers of diameter between 0,80 and 2,50 m inclusive, 2003

ข้อมูลผู้รับทุนวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นาวาเอก.ดร.เสวียง เถื่อนบุญ

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Capt. Swieng Thuanboon

2. หมายเลขประจำตัวประชาชน 3 7006 00246 41 6

3. ตำแหน่งปัจจุบัน หน.ทดสอบเครื่องวัด กองควบคุมคุณภาพ กรมพัฒนาการช่าง กรมอู่ทหารเรือ

4. ตำแหน่งทางวิชาการ (ศ./รศ./ผศ.) -

5. หน่วยงานและที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร และ e-mail เลขที่ 2 ถนนอรุณอมรินทร์ แขวงศิริราช เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ 10700

โทรศัพท์ 02 4754 052 / 02 4754 388

โทรศัพท์มือถือ 08 6306 2852

E-mail : vspproject88@gmail.com

6. ประวัติการศึกษา

6.1 สถาบันการศึกษา: University of Utah สาขาวิชา:Metallurgical Engineering ปีที่จบการศึกษา: พ.ศ.2551 ระดับการศึกษา: ปริญญาเอก

6.2 สถาบันการศึกษา: Colorado School of Mines

สาขาวิชา: Metallurgical Engineering

ปีที่จบการศึกษา: พ.ศ.2547 ระดับการศึกษา: ปริญญาโท

6.3 สถาบันการศึกษา: โรงเรียนนายเรือ

สาขาวิชา:วิศวกรรมเครื่องกลเรือ

ปีที่จบการศึกษา: พ.ศ.2544 ระดับการศึกษา: ปริญญาตรี

7. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ ผลิตภัณฑ์ยาง งานหล่อโลหะ และ . การกัดกร่อนและการป้องกันการกัดกร่อน

8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการความรู้และการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากผลงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

8.1 การเขียนเอกสารวิชาการด้านงานวิจัยลงวารสารกรมอู่ทหารเรือ

8.2 การจัดการองค์ความรู้การพัฒนาคุณภาพงานหล่อสังกะสีกันกร่อน

8.3 หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “การหล่อใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์สำหรับเรือตรวจการณ์ชายฝั่ง (PCF)”

8.4 หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “การหล่อใบจักรนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์สำหรับเรือในกองทัพเรือ

8.5 การเข้าร่วมแสดงผลงานวิจัยในงานต่างๆ เช่น งานนาวีวิจัย และงานวันนักประดิษฐ์ เป็นต้น