

บทที่ 2

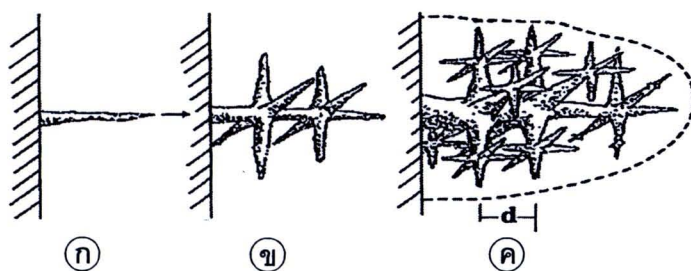
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อ

อะลูมิเนียมผลิตจากแร่บอกไซต์โดยใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กคาร์บอน คุณสมบัติเด่นคือไม่เป็นสนิมเนื่องจากมีฟิล์มของ Al_2O_3 เคลือบผิว สมบัติการขึ้นรูปดีเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Centered Cubic) นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี และมีน้ำหนักเบา ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ ไม่เป็นสารแม่เหล็ก และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่สูญเสียคุณภาพการใช้งาน จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตาม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ยังมีความแข็งและความแข็งแรงต่ำ จึงมีการเติมธาตุในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เรียกว่า "อะลูมิเนียมผสม" (ชาวลิต ลิ้มณวิจิตร, ม.ป.ป.) โดยธาตุที่เติม เช่น สังกะสี ซิลิกอน ทองแดง แมงกานีส แมกนีเซียม ลิเทียม เงิน ดีบุก นิกเกิล เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีการนำไฟฟ้าที่ดี การเติมธาตุในอะลูมิเนียมจะทำให้ผลที่แตกต่างกันไปตามปริมาณที่เติม เช่น การเติมทองแดงจะทำให้สมบัติการไหลตัว (Fluidity) ลดลง แต่หากเติมในปริมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) และการเติมในปริมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางด้านความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) การเติมธาตุในอะลูมิเนียมสามารถทำได้ทั้งในระบบสองธาตุ เช่น อะลูมิเนียม-ซิลิกอน อะลูมิเนียม-ทองแดง อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม หรืออาจเติมหลายธาตุก็ได้ เช่น อะลูมิเนียม-ทองแดง-ซิลิกอน หรือ/และแมกนีเซียม ซึ่งอะลูมิเนียมผสมแต่ละประเภทจะมีสมบัติแตกต่างกันตามความต้องการในการใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของธาตุผสมกลุ่มนั้นๆ ในอะลูมิเนียมด้วย (Black and Kohser, 2007, p. 145)

โลหะอะลูมิเนียมผสมที่หล่อขึ้นรูปมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวาง และได้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลกันอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมหล่อเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความสามารถในการไหลตัวดี จึงทำให้สามารถหล่อขึ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ขึ้นงานจากการหล่อจะมีผิวเรียบสวยงาม และสามารถปรับสภาพด้วยความร้อน (ชัยรัตน์ แก้วดวง, 2538, หน้า 23-35) รวมทั้งสามารถใช้เทคนิคในการหล่อได้หลายวิธี ในปัจจุบันกรรมวิธีการหล่ออะลูมิเนียมที่นิยมนำมาใช้โดยทั่วไป คือการหล่อแบบฉีดด้วยความดัน (Pressure Die Casting) การหล่อแบบเทขึ้นรูป (Gravity Die Casting) การหล่อแบบโฟม (Lost Foam

Process) การหล่อแบบกึ่งของแข็ง (Semi-solid Casting) และการหล่อแบบทราย (Sand Casting) ตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุของสหรัฐอเมริกาหรือ ASTM (2553) โครงสร้างของชิ้นงานหล่อจะมีลักษณะการโตแบบกิ่งก้านในทุกทิศทางอย่างสม่ำเสมอหรือเรียกว่า เดนไดรต์ (Dendrite) และมักเริ่มเกิดขึ้นในบริเวณที่ใกล้ผนังของแบบหล่อ เพราะบริเวณที่ใกล้ผนังของแบบหล่อจะมีอัตราเร็วการเย็นตัวสูง (Smith and Hashemi, 2008, p. 108) แสดงดังในภาพ 1



โดย d คือ ระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิ

ภาพ 1 ลักษณะการโตของ (ก) แกนเดนไดรต์ปฐมภูมิ (ข) แกนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (ค) แกนเดนไดรต์ไตรภูมิ

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกาได้แบ่งโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อเป็นกลุ่มต่างๆ โดยให้ตัวเลขตัวแรกของรหัสแสดงถึงธาตุหลักที่เติมเข้าไปในโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อ ดังนี้

1xx.x เป็นโลหะหล่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการเติมธาตุผสมเข้าไป มีเปอร์เซ็นต์อะลูมิเนียมเท่ากับ 99.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือมากกว่า

2xx.x มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก

3xx.x มีซิลิกอน และแมกนีเซียมหรือทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก

4xx.x มีซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลัก

5xx.x มีแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลัก

7xx.x มีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก

8xx.x มีดีบุกเป็นธาตุผสมหลัก

9xx.x มีธาตุอื่นๆ เป็นธาตุผสมหลัก

ในกลุ่ม 1xx.x ตัวเลขลำดับที่ 2 จากทางซ้ายมือแสดงปริมาณอะลูมิเนียมอย่างต่ำในโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อ เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อรหัส 190.x จะมีอะลูมิเนียม 99.0

เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกลุ่ม 2xx.x ถึง 9xx.x ตัวเลขลำดับที่ 2 จากทางซ้ายไม่มีความสำคัญแต่อย่างไร แต่ช่วยในการบ่งชี้ธาตุผสมที่แตกต่างกันในกลุ่มนั้น ส่วนตัวเลขหลังจุดทศนิยมบอกลักษณะของผลิตภัณฑ์ ได้แก่เลข 0 คือผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียม เลข 1 คือผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอินก๊อต และเลข 2 คือผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอินก๊อตที่มีการเติมธาตุอื่นๆ ลงไปด้วย นอกจากนั้นอะลูมิเนียมผสมบางกลุ่มยังมีการใช้ตัวอักษรแบ่งกลุ่มย่อยตามความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีเพียงเล็กน้อยของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มเดียวกัน เช่น 356.0, เอ356.0, บี356.0 หรือ เอฟ356.0 สำหรับโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ319 ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นกลุ่มโลหะอะลูมิเนียมผสมที่เติมซิลิกอนและทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก

โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อประกอบด้วย โครงสร้างพื้น (Matrix) ของเฟส α -Al และเฟสที่เกิดจากการรวมตัวกับอะลูมิเนียมหรือธาตุผสม (Alloying Elements) อื่นๆ ซึ่งจะแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตาราง 1

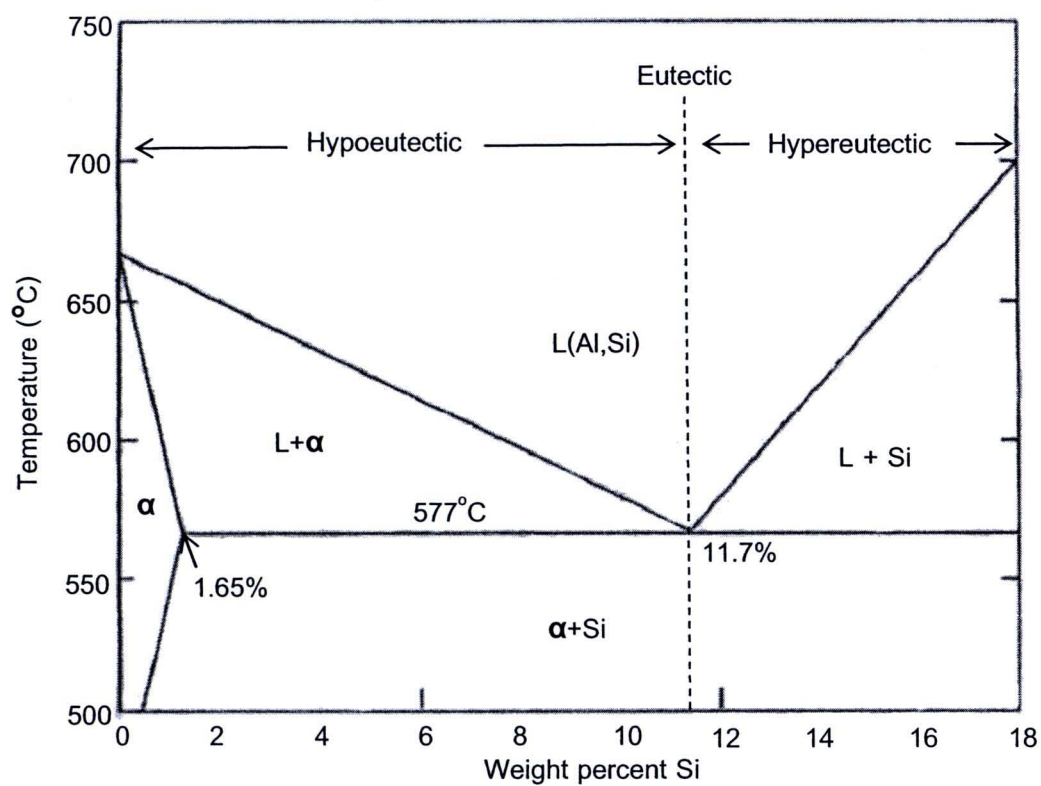
ตาราง 1 โครงสร้างหลักในโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ

อะลูมิเนียมผสมหล่อ	โครงสร้างหลัก
213.0	α -Al, (Al-Cu), α (Al-Cu-Fe), α (Al-Fe-Si)
295.0	α -Al, (Al-Cu), α (Al-Fe-Si)
242.0	α -Al, (Al-Cu), α (Al-Ni), (Mg-Si), (Al-Cu-Ni)
222.0	α -Al, (Al-Cu), α (Al-Cu-Fe)
443.0	α -Al, (Si), α (Al-Fe-Si)
355.0	α -Al, (Si), P(Al-Fe-Si), (Al-Si)
356.0	α -Al, (Si), P(Al-Fe-Si), (Al-Mg)
319.0	α -Al, (Si), (Al-Cu), α (Al-Fe-Si)
514.0	α -Al, (Mg-Si), α (Al-Fe)
520.0	α -Al, α (Al-Mg), (Mg-Si), α (Al-Fe)
710.0	α -Al, (Mg-Si), α (Al-Fe-Si)
850.0	α -Al, (Sn), α (Al-Ni)
712.0	α -Al, (Mg-Si), α (Al-Fe-Si)

โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน

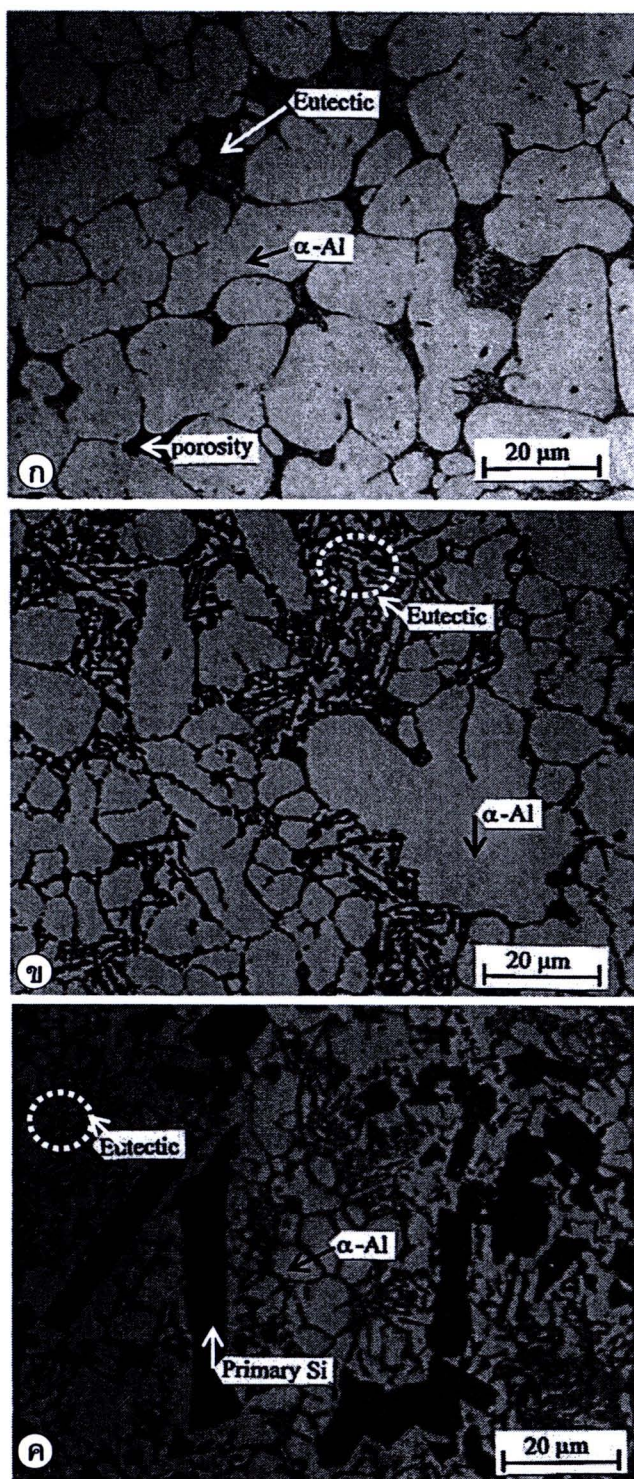
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในภาพ 2 คือ โลหะผสมไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) จะมีซิลิกอนน้อยกว่า 11.7 เปอร์เซ็นต์ เช่น ASTM 319, ASTM A356 โลหะผสมยูเทคติก (Eutectic) จะมีซิลิกอนเท่ากับ 11.7 เปอร์เซ็นต์ เช่น ASTM A413, ASTM 384 และโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ซึ่งมีซิลิกอนมากกว่า 11.7 เปอร์เซ็นต์ เช่น LM28 (UK standard) เนื่องจากจุดหลอมเหลวและโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน จึงทำให้อะลูมิเนียมกับซิลิกอนรวมตัวกันได้น้อยมาก โดยซิลิกอนมีโครงสร้างผลึกเป็น Simple Cubic และมีจุดหลอมเหลวสูงเท่ากับ 1,414 องศาเซลเซียส ส่วนอะลูมิเนียมมีโครงสร้างผลึกเป็น FCC และมีจุดหลอมเหลวต่ำเท่ากับ 660 องศาเซลเซียส โดยซิลิกอนละลายได้สูงสุดในเฟส α เพียง 1.65 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส (มนัส สกิวจินดา, 2536, หน้า 17)

โครงสร้างของโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน ไฮโปยูเทคติก (ซิลิกอนน้อยกว่า 11.7 เปอร์เซ็นต์) แบ่งเป็นสองลักษณะ คือโลหะผสมที่มีซิลิกอนน้อยกว่า 1.65 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างประกอบด้วยเฟส α เพียงเฟสเดียว เป็นลักษณะของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มขึ้นรูปเย็น ส่วนโลหะผสมที่มีซิลิกอนอยู่ในช่วง 1.65-11.7 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟส α ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติกของ α +Si ยกตัวอย่างเช่น Al-5Si ดังแสดงในภาพ 3(ก) ส่วนโลหะผสมยูเทคติก (ซิลิกอนเท่ากับ 11.7 เปอร์เซ็นต์) โครงสร้างประกอบด้วยเฟสขนาดเล็กของ α ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติกของเฟส α +Si ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปเข็มเล็กๆ แทรกสลับกันอยู่ในเฟส α ยกตัวอย่างเช่น โลหะผสมใกล้ยูเทคติก Al-8Si ดังแสดงในภาพ 3(ข) ส่วนในโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (ซิลิกอนมากกว่า 11.7 เปอร์เซ็นต์) โครงสร้างประกอบด้วยเฟส Si ที่มีลักษณะเป็นแผ่นรูปหลายเหลี่ยมกระจายโดยมีโครงสร้างยูเทคติกของ α +Si ล้อมรอบ ยกตัวอย่างเช่น Al-18Si ดังแสดงในภาพ 3(ค) (Niu, et al., 2000, pp. 119-127)



ภาพ 2 แผนภูมิสมดุลของระบบอะลูมิเนียม-ซิลิกอน

ที่มา: ขวาลิต เชียงกุล (2542, หน้า 117)



ภาพ 3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมหล่อ (ก) Al-5Si (ไฮโปยูเทคติก) (ข) Al-8Si (ไฮโปยูเทคติก) (ค) Al-18Si (ไฮเปอร์ยูเทคติก)

ที่มา: Niu, X. P., et al. (2000, pp. 119-127)

การเติมซิลิกอนในอะลูมิเนียมเป็นการเพิ่มสมบัติการไหลตัว ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน สามารถหล่อขึ้นรูป (Castability) ชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการก่อสร้างและอุตสาหกรรมการยานยนต์สำหรับงานรีดขึ้นรูป เนื่องมาจากมีราคาถูก เช่น A4032 ใช้ดีให้เป็นลูกสูบรถยนต์ แต่ยังคงไม่เป็นที่นิยมนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีความแข็งแรงต่ำและความสามารถในการงานกลึงตัดหรือเชื่อมไม่ดี ส่วนสมบัติทางด้านการเหนียวยังคงรักษาไว้ได้หากมีส่วนผสมของซิลิกอนในปริมาณที่น้อยๆ (Kaufman, 2000, pp. 1-8) อย่างไรก็ตามโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน มีสมบัติเชิงกลต่ำ การเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงทำได้ด้วยการเติมธาตุอื่นลงในโลหะหลอมเหลว เช่น แมกนีเซียม และทองแดง ทำให้เกิดการรวมตัวของสารประกอบเชิงโลหะขึ้น เช่น Mg_2Si และ $CuAl_2$ และการปรับสภาพด้วยความร้อน จะเพิ่มความสามารถในงานกลึงตัดหรือเชื่อม (Tsao, et al., 2002, pp. 341-346) ตาราง 2 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงและค่า 0.2% ความเค้นพิสูจน์ของโลหะอะลูมิเนียมและโลหะอะลูมิเนียมผสม

ตาราง 2 สมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมและโลหะอะลูมิเนียมผสม

โลหะผสม	ความแข็งแรง (HB)	0.2% ความเค้นพิสูจน์ (MPa)
Al	25	30
Al-5.2Si	45	55
Al-7.0Si-0.3Mg	50	95
Al-5.5Si-4.5Cu	70	110
Al-6.0Si-3.5Cu	85	130
Al-10.5Si-2.5Cu	75	150

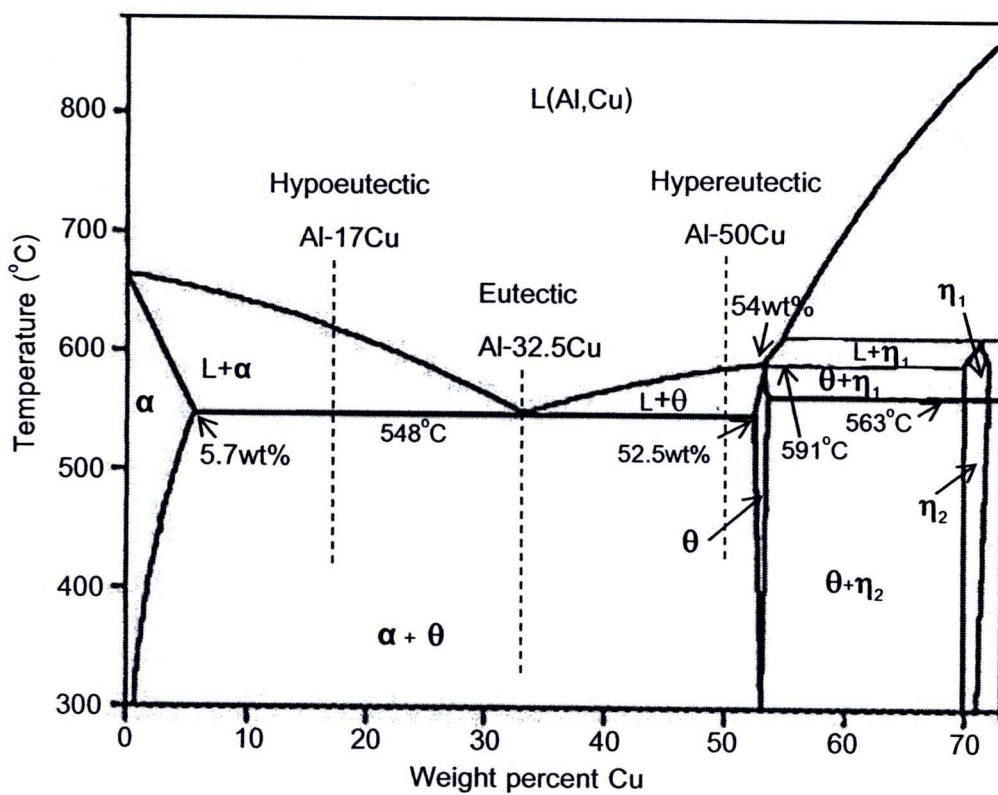
ที่มา: Kaufman, J. G. and Rooy, E. L. (2004)

โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ทองแดง

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในภาพ 4 คือ โลหะผสมไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) จะมีซิลิกอนน้อยกว่า 32.5 เปอร์เซ็นต์ โลหะผสมยูเทคติก (Eutectic) จะมีซิลิกอนเท่ากับ 32.5 เปอร์เซ็นต์ และโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ซึ่งมีซิลิกอนมากกว่า 32.5 เปอร์เซ็นต์ ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงสามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม โดยจะเห็นว่าทองแดงสามารถละลายได้สูงสุดถึง 5.7 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส และความสามารถของการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง โดยละลายได้เพียง 0.1-0.2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส (มนัสสิกรจินดา, 2536, หน้า 14-16)

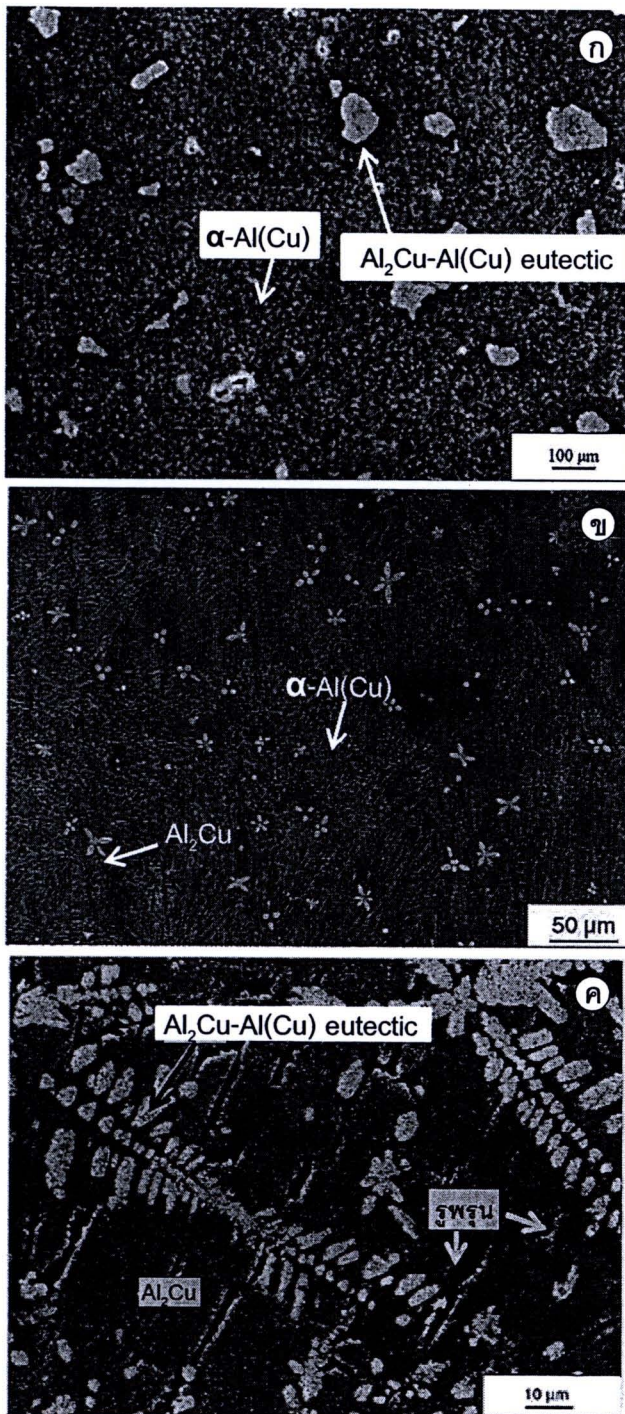
โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ โลหะผสมไฮโปยูเทคติก โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างพื้นของ α -Al(Cu) และโครงสร้างยูเทคติกของ Al_2Cu -Al(Cu) ดังภาพ 5(ก) ในโลหะผสมยูเทคติก โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเดนไดรต์ α -Al(Cu) ล้อมรอบด้วยสารประกอบโลหะที่มีรูปร่างคล้าย ribbon ของเฟส Al_2Cu ดังภาพ 5(ข) ส่วนโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติกประกอบด้วยโครงสร้างพื้นของ Al_2Cu และโครงสร้างยูเทคติกของเฟส Al_2Cu -AlCu ดังภาพ 5(ค) (Aravind, et al., 2004, pp. 384-393) อย่างไรก็ตามโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ทองแดง โดยเฉพาะส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคติกมักจะทำให้เกิดการหดตัวของโครงสร้าง ทำให้มีปัญหาเรื่องการแตกหักขณะร้อน และมีรูพรุนขนาดเล็กระดับไมครอนจำนวนมากในโครงสร้าง นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการไหลตัวต่ำ การขึ้นรูปโดยการหล่อจึงต้องอาศัยแรงดันช่วยการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ หรือออกแบบช่องทางเดินน้ำโลหะให้มีขนาดกว้าง และต้องเผื่อรูล้น (Riser) ให้ดีและมีประสิทธิภาพด้วย (สุทธาว์ลย์ อิมอุไร, 2551)

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณทองแดง (Zor, et al., 2010, pp. 185-191) และยังสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ด้วยการเติมสตรอนเทียมและสังกะสีในอะลูมิเนียมผสม (Wang, et al., 2001, pp. 104-109) นอกจากนี้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ยังมีความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง จึงมักนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งชิ้นงานหล่อและรีด แต่โลหะผสมที่มีส่วนผสมของทองแดงจะด้อยด้านสมบัติความต้านทานแรงดึง จึงมีการเติมธาตุอื่นลงในโลหะผสมกลุ่มนี้ เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียม เพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึง โดยมักใช้ในงานผลิตเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ระบบไฮดรอลิก (Mohamed, et al., 2009, pp. 3943-3957)



ภาพ 4 แผนภูมิสมดุลของระบบอะลูมิเนียม-ทองแดง

ที่มา: Aravind, M., et al. (2004, p. 385)



ภาพ 5 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) Al-17Cu (ไฮโปยูเทคติก) (ข) Al-32.5Cu (ยูเทคติก) (ค) Al-50Cu (ไฮเปอร์ยูเทคติก)

ที่มา: Aravind, M., et al. (2004, pp. 384-393)



โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง

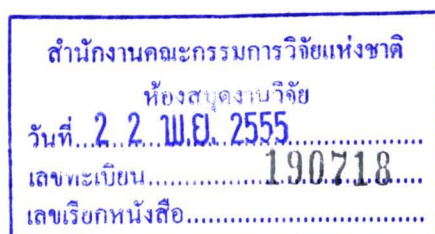
โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง เป็นการพัฒนามาจากสมดุสองระบบของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความแข็งแรงและการไหลแทรกซึมเข้าแบบหล่อได้ดี และเหมาะสำหรับงานหล่อชิ้นงานที่มีความซับซ้อน เช่น อุปกรณ์ที่ใช้จับและตักอาหาร หมุดย้ำโครงสร้างเรือ เป็นต้น (D' Elia and Ravindran, 2009, pp. 315-319)

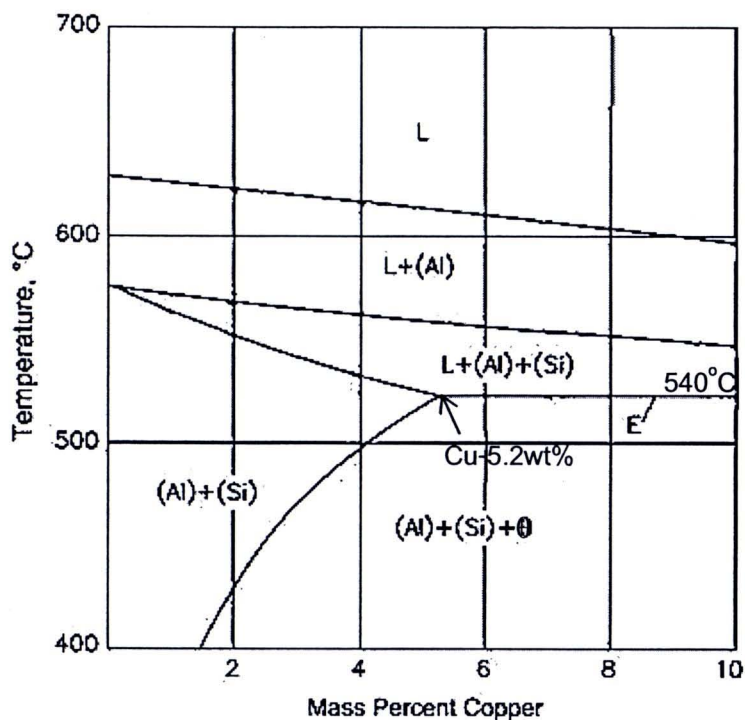
องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง เกรด เอ319 แสดงดังตาราง 3 มักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตส่วนเครื่องยนต์ เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลและความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี แก๊สไฮโดรเจนละลายได้น้อย ส่งผลให้ผิวของชิ้นงานหล่อมีความเรียบสวยและมีราคาถูก (Martínez D., et al., 2005) ธาตุที่มักผสมในโลหะผสมนี้ เช่น แมกนีเซียม แมงกานีส สทรอนเทียม เซอร์โคเนียม และเหล็ก ซึ่งทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงทั้งในอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง แต่ความเหนียวจะลดลง วิธีการปรับปรุงความเหนียวประมาณ 0-3 เปอร์เซ็นต์ ทำได้โดยการเติมธาตุเพื่อให้เกิดสารประกอบโลหะของเฟส θ -(Al_2Cu) เฟส Mg_2Si เฟส π -($\text{Al}_6\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$) เฟส α -($\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$) และเฟส β -(Al_5FeSi) (Rincón, et al., 2007) จากภาพ 6 แสดงแผนภูมิสมดุของโลหะผสมหล่อ Al-5Si-Cu จะเห็นว่าทองแดงสามารถละลายในสารละลายของแข็งของเฟส Al+Si ได้สูงสุดประมาณ 5.2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส

ตาราง 3 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม เอ319

ธาตุ	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Ti	Ni	Al
Wt%	5.5-6.5	3.0-4.0	Max 1.0	Max 1.0	Max 1.0	Max 0.5	Max 0.25	Max 0.35	Bal.

ที่มา: Chandler, H. (2006, p. 252)





ภาพ 6 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสม Al-5Si-Cu

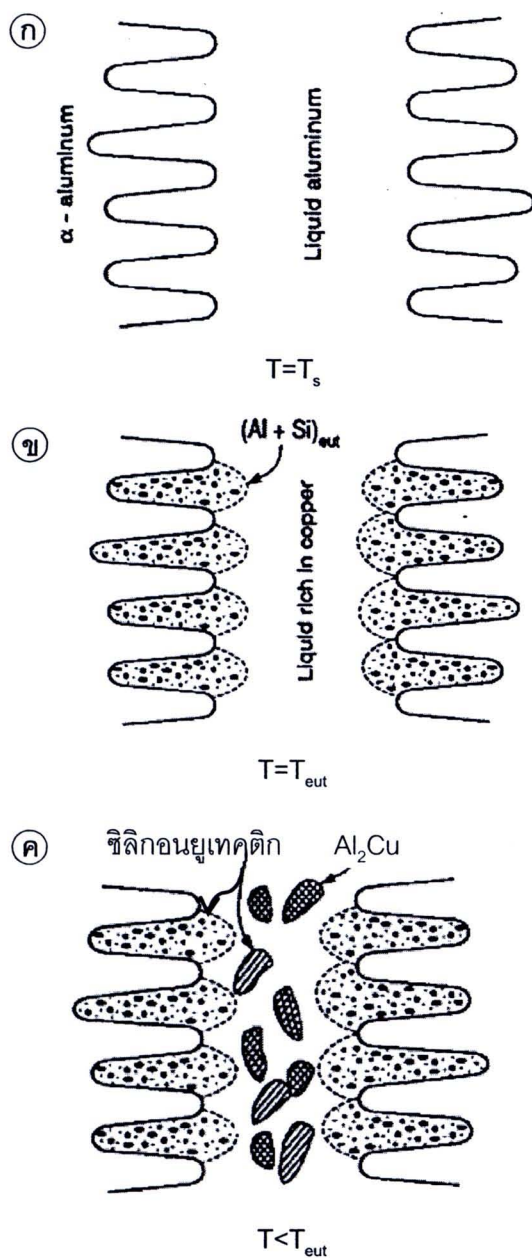
ที่มา: Raghavan, V. (2007, p. 181)

การแข็งตัวของอะลูมิเนียม เอ319 อธิบายไว้โดย Samuel, F. H., Samuel, A. M. and Doty, H. W. (1996, pp. 893-901) ดังภาพ 7 แสดงการแข็งตัวของอะลูมิเนียม เอ319 (Al-5.5-6.5Si-3.0-4.0Cu) โดยเริ่มจากเกิดเฟส α -Al เป็นโครงสร้างพื้นมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ที่อุณหภูมิประมาณ 610 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพ 7(ก) โดยเดนไดรต์นี้จะมีธาตุทองแดงและซิลิกอนผสมอยู่ได้เพียงเล็กน้อย จึงมีการผลึกสองธาตุนี้ลงสู่บริเวณขอบระหว่างเดนไดรต์ เมื่ออุณหภูมิลดลงประมาณ 560 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นเฟสซิลิกอนยูเทคติกบริเวณขอบของเดนไดรต์ที่มีทองแดงผสมอยู่ แสดงดังภาพ 7(ข) โดยเฟสซิลิกอนยูเทคติกจะมีรูปร่างทั้งแบบเป็นแผ่นขนาดใหญ่หรือรูปร่างกลมมน ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว และเฟส Al_2Cu จะมีการแข็งตัวขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 520 องศาเซลเซียส ซึ่งมีรูปร่างกลมมนขนาดเล็กกว่าเฟสซิลิกอนยูเทคติก แสดงดังภาพ 7(ค) ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อประกอบด้วยเดนไดรต์ของ α -Al ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติกของเฟสซิลิกอนยูเทคติกที่มีรูปร่างเป็นแผ่นกลม และเฟส Al_2Cu มีรูปร่างกลม โดยทั้งสองเฟสของโครงสร้างยูเทคติกจะมีการรวมตัวกันอยู่ และมีความแข็งแรงต่ำ เพราะ

มีความเหนียวต่ำ มีความเครียดสูง เป็นสาเหตุของการเกิดช่องว่างระดับไมครอนหรือการแตกหักระดับอนุภาคภายในโครงสร้าง

Garcia-Hinojosa, J. A., et al. (2003, pp. 306-310) รายงานผลการศึกษาปริมาณร้อยละของรูพรุนในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน และอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง โดยปริมาณร้อยละของรูพรุนในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ และลดลงเหลือน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง ทำให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

ตาราง 4 แสดงการเกิดเฟสของสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสม เกรด 319 ที่มีธาตุอื่นผสมของ Bäckerud, et al. ซึ่งรวบรวมข้อมูลโดย Martínez D., E. J. et al., (2005, pp. 439-443)



โดยที่ T_s คืออุณหภูมิการแข็งตัว และ T_{eut} คืออุณหภูมิยูเทคติก

ภาพ 7 แผนภาพวงจรลำดับขั้นตอนการแข็งตัวของอะลูมิเนียม เอ319 โดยที่ (ก) ลำดับที่ 1 การเกิดโครงสร้างเดนไดรท์ของ α -Al (ข) ลำดับที่ 2 การเกิดเฟส ซิลิกอนยูเทคติก (ค) ลำดับที่ 3 การรวมตัวกันของ α -Al กับซิลิกอนยูเทคติก และเกิดเฟส Al_2Cu

ตาราง 4 การเปลี่ยนเฟสระหว่างกระบวนการแข็งตัวของโลหะผสม เอ319 จากงานวิจัย
ของ Bäckerd, et al.

Bäckerd, et al.	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
(Al) Dendritic Network	609
Liq. $\rightarrow$ (Al) + $Al_{15}Mn_3Si_2$ + (Al_5FeSi)	590
Liq. $\rightarrow$ (Al) + Si + Al_5FeSi	575
Liq. $\rightarrow$ (Al) + Al_2Cu + Si + Al_5FeSi	525
Liq. $\rightarrow$ (Al) + Al_2Cu + Si + $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$	507

ที่มา: Martinez D., E. J., et al. (2005, p. 440)

การเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค

การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อสามารถปรับปรุงได้หลายวิธี เช่น การเติมธาตุ การปรับขนาดของเกรนให้ละเอียดขึ้น (Grain Refining) การดัดแปลงโครงสร้าง (Modification) และการแก้ไขรูป (Tash, 2006, pp. 207-217) แต่ส่วนใหญ่จะทำโดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat Treatment) โดยมีการกำหนดสัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อนโดยสมาคมทดสอบวัสดุของอเมริกา (ASTM) ดังนี้

F โลหะหล่อโดยไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน

O โลหะหลังการอบอ่อน (Annealing) หรือ T2 เพื่อลดความเครียดด้วยความร้อน และป้องกันการขยายตัวในขณะใช้งาน มีสมบัติด้านความเหนียวดี แต่ความต้านทานแรงดึงต่ำ

T1 โลหะที่เย็นตัวภายในบรรยากาศปกติจนถึงอุณหภูมิห้องหลังจากการหล่อ จากนั้นนำไปทำการบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging) ซึ่งจะให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวิธี F และ O

T4 โลหะขึ้นงานที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) หลังจากนั้นบ่มแข็งธรรมชาติ เพื่อให้ได้สมบัติความต้านทานแรงดึงที่ดี

T5 โลหะหลังบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) เพียงอย่างเดียว เพื่อป้องกันการขยายตัวของเกรน และเพิ่มความมีเสถียรภาพขนาดของโลหะผสม



T6 โลหะขึ้นงานที่ผ่านการอบละลาย แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นนำมา บ่มแข็งเทียม ทำให้สมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยไม่สูญเสียสมบัติการยึดตัว ทำให้ โครงสร้างยูเทคติกที่รวมตัวอยู่กับสารประกอบโลหะละลายตัวลงสู่โครงสร้างพื้น ซึ่งทำให้ความแข็งแรง เพิ่มขึ้น

T7 โลหะขึ้นงานที่ผ่านการอบละลาย แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นนำมา บ่มแข็งเทียม เป็นเวลานาน (Over-aging) เพื่อให้สมบัติการยึดตัวสูงขึ้น

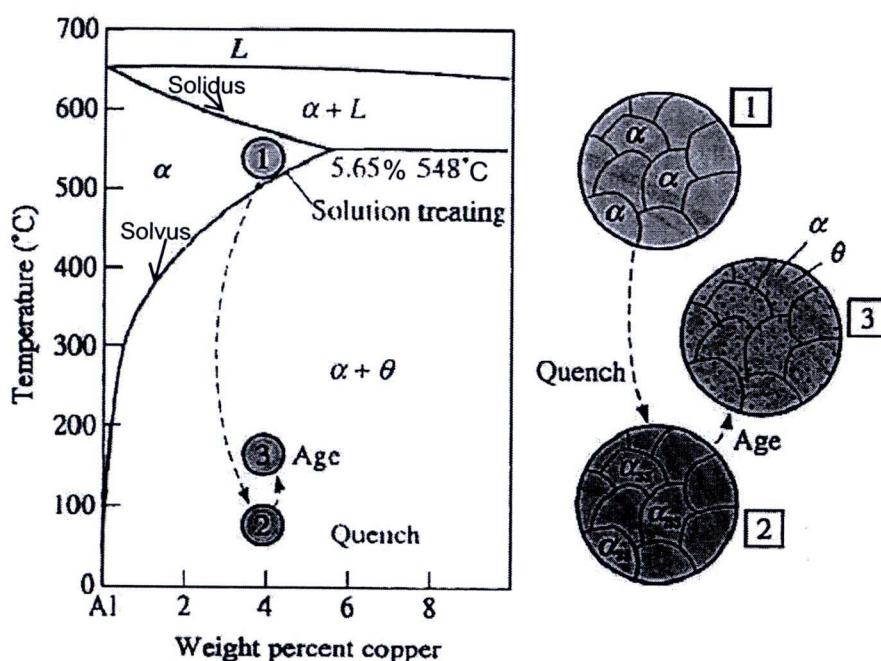
T1-T7 เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงด้วยวิธีการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (Precipitation Hardening) โดยโลหะผสมจะยอมให้ธาตุผสมละลายเป็นสารละลายของแข็ง ได้สูงสุดที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ ปริมาณของธาตุผสมที่ละลายลงในโครงสร้าง พื้นจะลดลงและละลายได้น้อยลงที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ปริมาณของธาตุผสมที่เกินจุดอิ่มตัวรวมตัว กับธาตุผสมหลักในโครงสร้างพื้น เกิดเป็นสารประกอบหรือเฟสใหม่ตกตะกอนอยู่ภายในโครงสร้าง พื้น ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังภาพ 8 คือ

1. การอบละลาย (Solution Treating) ขั้นตอนนี้โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการหล่อ จะ ถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างเส้นโซลิวสและโซลิดัส หลังจากนั้นจะทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ เป็นเวลานาน ทำให้เกิดเป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution) โดยสารประกอบโลหะจะมีการ สลายในเฟส α จนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ในทางเชิงพาณิชย์แล้วอุณหภูมิที่ใช้ ในการอบละลายมักขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี ซึ่งจะมีผลต่อความเหนียวและความแข็งแรงของ โลหะ (Chandler, 2006, p. 5) ข้อควรระวังในการอบละลายคือต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุด ยูเทคติก ซึ่งการอบละลายเหนืออุณหภูมิของยูเทคติกจะทำให้เกิดภาวะ Overheating ที่ทำให้มี การสลายของขอบเกรนมากเกินไปและมีการสูญเสียสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานแรงดึง ความ เหนียว และความทนทานต่อการแตกหัก นอกจากนี้ยังควรใช้อุณหภูมิเหนือเส้นโซลิวส การอบ ละลายที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจะเกิดภาวะ Underheating ทำให้การอบละลายไม่สมบูรณ์และความ แข็งแรงต่ำ นอกจากนั้นแล้วควรควบคุมเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการอบละลายให้เหมาะสม ซึ่งมีผลต่อ ปริมาณการสลายของเฟสต่างๆ เพื่อให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และทำให้กลายเป็น สารละลายของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดก่อนการบ่มแข็ง (Black and Kohser, 2007, p. 94)

2. การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) ในตัวกลาง เช่น ในน้ำหรือน้ำมัน ซึ่งนิยม ใช้ น้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 65-80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการลดอัตราการเย็นตัวของโลหะ เนื่องจากการ เย็นตัวเร็วเกินไปจะทำให้เกิดการแตกหักภายในเนื้อโลหะผสม หลังการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะได้ สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) ที่มีโครงสร้างบิดเบี้ยวไม่เป็น

ระเบียบ ทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น เนื่องจากมีความเครียดในโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนและการแตกหักได้ โดยที่เฟสของโลหะผสมชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายจะอยู่ในสภาวะกึ่งเสถียร อย่างไรก็ตามสารละลายของแข็งที่มีปริมาณของธาตุผสมในอะลูมิเนียมสูงกว่าปริมาณที่จะมีได้ในสภาวะสมดุล ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนไปจะทำให้สารละลายของแข็งเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะเสถียรทันที (Askeland, 1996, p. 256)

3. การบ่มแข็ง (Aging) และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลได้มากกว่าขั้นตอนการอบละลาย ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรง โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้องในขั้นตอนที่ 1-2 นำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ถ้าใช้อุณหภูมิห้องจะเรียกว่า การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging) กรณีใช้อุณหภูมิในการบ่มแข็งที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องจะเรียกว่า การบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging)



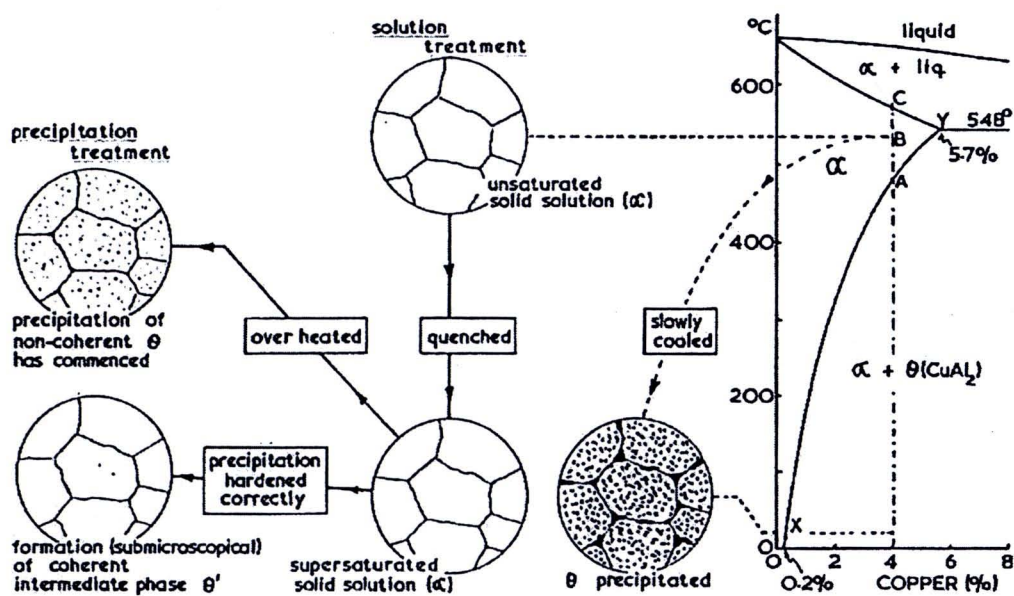
ภาพ 8 ขั้นตอนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค

ที่มา: สุทธาวัดย์ อิมอุไร (2551)

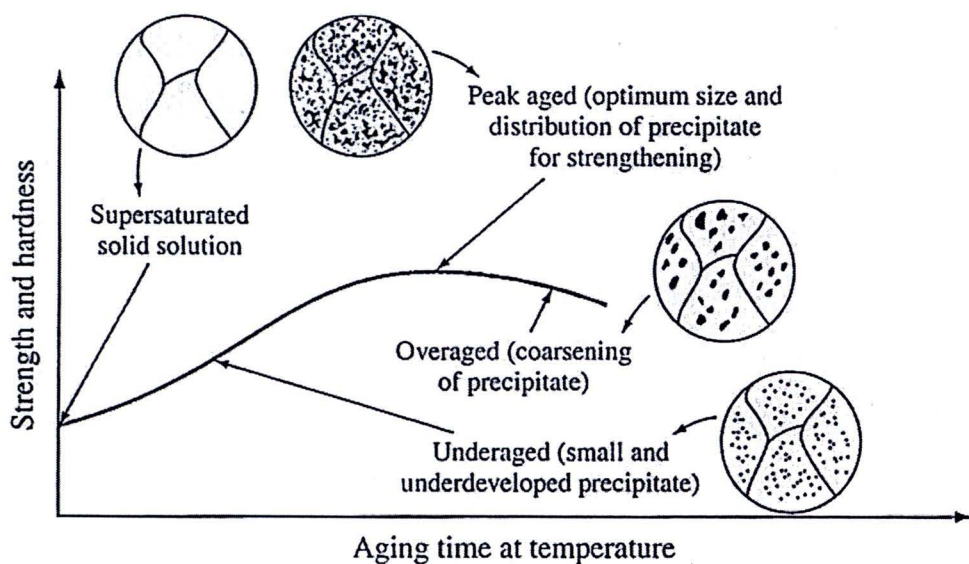
การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของอนุภาคที่ตกตะกอนของโลหะผสม Al-4Cu แสดงดังในภาพ 9 โดยในปรากฏการณ์ Precipitation Hardening อะลูมิเนียมจะยอมให้ทองแดงละลายได้สูงสุด 5.7 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส โลหะผสมในสภาพหล่อที่ถูกปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ปริมาณของทองแดงจะละลายได้น้อยลงมากที่ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณทองแดงที่เกินจุดอิ่มตัวจะไปรวมอยู่กับอะลูมิเนียม ให้เฟส θ ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ผสมทองแดงต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงด้วยการบ่มแข็งได้ เนื่องจากไม่ว่าจะอบโลหะผสมให้ร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ก็จะไม่สามารถเกิดเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างได้ และหากโลหะอะลูมิเนียมที่ผสมทองแดงมากกว่า 5.7 เปอร์เซ็นต์ การบ่มแข็งจะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะผสมที่ผสมทองแดงใกล้จุดสูงสุดที่ทองแดงละลายได้ในสารละลายของแข็ง ส่วนโลหะผสมหลังผ่านการอบละลายแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด แล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิที่เหมาะสม จะทำให้เกิดตกตะกอน θ' ที่มีขนาดที่เหมาะสมระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นตะกอนแบบ Coherency แต่หากนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้เกิดตะกอน θ ที่เป็นตะกอนแบบ Non-coherency

ผลของเวลาในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิคงที่ต่อความแข็งแรงและความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย และลักษณะการตกตะกอนของอนุภาค ดังภาพ 10 แบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการบ่มแข็งที่เวลาน้อยจะทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงต่ำ เรียกว่า Under-aged ซึ่งอนุภาคที่ตกตะกอนมีขนาดเล็ก เมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จนถึงช่วงที่ 2 จะมีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงสุด เรียกว่า Peak-aged ซึ่งอนุภาคที่ตกตะกอนมีขนาดที่พอเหมาะและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นจากช่วงนี้ ความแข็งแรงและความแข็งแรงจะลดลงในช่วงที่ 3 เรียกว่า Over-aged ซึ่งอนุภาคที่ตกตะกอนมีขนาดใหญ่เกินไป (Black and Kohser, 2007, pp. 93-96)

การเลือกใช้อุณหภูมิและเวลาในการบ่มแข็งต้องพิจารณาจากส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสม ซึ่งจะมีผลต่อการตกตะกอนของอนุภาค หากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำเกินไปและเวลาน้อยเกินไป ทำให้การเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงไม่ได้ผลตามต้องการ (ขวลิต เชียงกุล, 2542, หน้า 169-172)

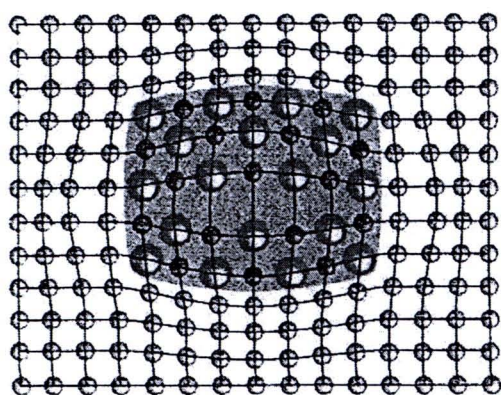


ภาพ 9 ลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคของโลหะผสม Al-4Cu
ในแต่ละสภาวะต่างๆ

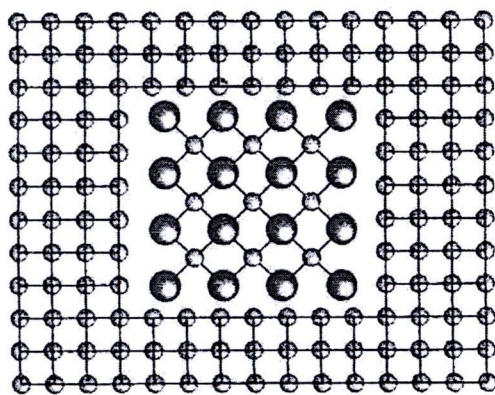


ภาพ 10 ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อความแข็งและความแข็งแรง และลักษณะการ
ตกตะกอน

ในขณะที่บ่มแข็งจะเกิดปรากฏการณ์ Age Hardening หรือความแข็งที่เกิดจากการบ่มแข็ง เนื่องจากเกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึก ทำให้การเกิด Coherency ของอนุภาคนาขนาดเล็กที่ตกตะกอนในโครงสร้างพื้น ดังภาพ 11(ก) โดยมีพลังงานบนพื้นผิวและพลังงานความเครียดระหว่างอนุภาคที่ตกตะกอนและโครงสร้างพื้นมีค่าสูงเนื่องจากกระบวนการเกิดอนุภาคที่ตกตะกอนซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) เมื่อถูกแรงภายนอกมากระทำ ส่งผลให้โลหะผสมมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงเกินไปและเวลานานเกินไปจะเกิดสภาวะที่เรียกว่า Over-aging ทำให้เกิด Non-coherency หรือตกตะกอนมีขนาดใหญ่และจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังภาพ 11(ข) ซึ่งความแข็งที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มลดลง เนื่องจากพลังงานบนพื้นผิวและพลังงานความเครียดระหว่างอนุภาคที่ตกตะกอนและโครงสร้างพื้นลดลง (Black and Kohser, 2007, pp. 95-96)



(ก)

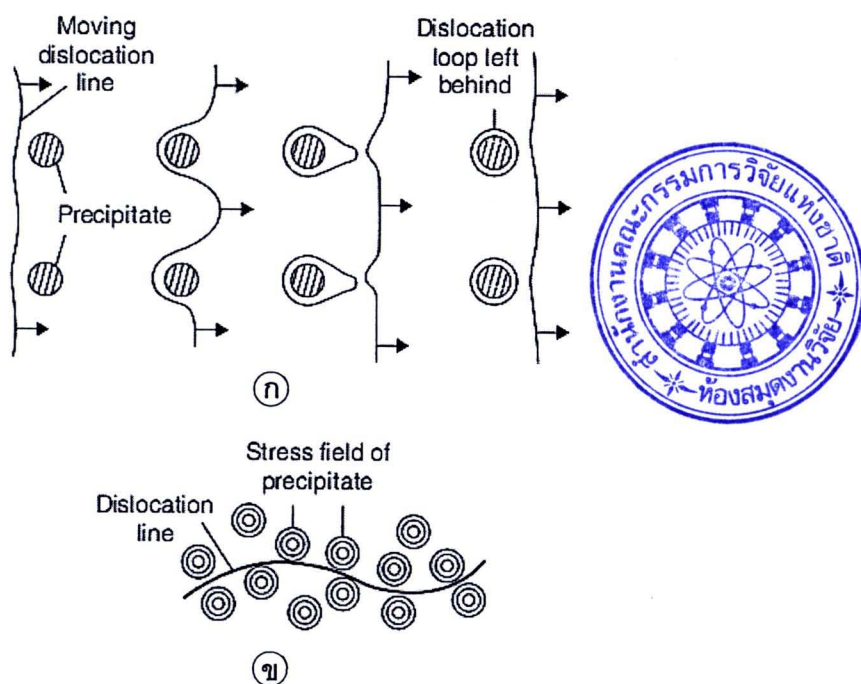


(ข)

ภาพ 11 การตกตะกอนของอนุภาคนาขนาดเล็ก (Precipitate Phases) (ก) Coherent Forms และ (ข) Non-coherent Forms

ที่มา: Black, J. T. and Kohser, R. A. (2007, p. 95)

การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นการเคลื่อนที่ของแรงเค้นอิสระที่เป็นไปตามกระบวนการทางความร้อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ตกตะกอน โดยพลังงานของดิสโลเคชันที่ใช้ในการเคลื่อนที่แปรผันตามพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตะกอนและเมทริกซ์ ดิสโลเคชันที่เคลื่อนที่ผ่านอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ที่อยู่ในสภาวะ Non-coherent จะใช้พลังงานต่ำ ดังภาพ 12(ก) ซึ่งดิสโลเคชันสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างตะกอนได้เลย จึงทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำ ส่วนตะกอนที่มีขนาดเล็ก ดังภาพ 12(ข) จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคและโครงสร้างพื้นมาก ถ้าตะกอนจะมีลักษณะเป็น Coherent Forms จะทำให้ดิสโลเคชันจะต้องใช้พลังงานสูงในการเคลื่อนที่ โดยจะต้องเบนตัวเป็นเส้นโค้งตามแนวของสนามความเค้นของอนุภาคนั้นๆ เพื่อหลบเลี่ยงสนามความเค้นที่เป็นรัศมีมากกว่า ดังนั้นตะกอนที่มีขนาดเล็กและมีสนามความเครียดจึงทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงมากกว่าตะกอนที่มีขนาดใหญ่ (Smallman and Ngan, 2007, pp. 386-388)



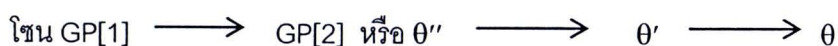
ภาพ 12 การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (ก) การเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างตะกอน
(ข) การเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งตามสนามความเค้นของตะกอน

ที่มา: Smallman, R. E. and Ngan, A. H. W. (2007, p. 387)

การตกตะกอนของอนุภาคในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง โดยเริ่มแรกของกระบวนการตกตะกอนจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากในสภาพหล่อ แม้ว่าอนุภาคที่ตกตะกอนจะไม่สามารถมองเห็นได้ แต่จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก การบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดการจับกลุ่มของอะตอมของตัวถูกละลายกับตัวทำละลายในโครงผลึก เป็นตะกอนที่มีลักษณะ Coherent กับโครงสร้างพื้น โดยโซนหรือแนวระนาบจะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยจุลทรรศน์ศาสตร์ (Black and Kohser, 2007, p. 94)

การบ่มแข็งในอะลูมิเนียม-ทองแดง ทำให้เกิดตะกอนของอนุภาคนาโนขนาดเล็กของ θ - Al_2Cu ภายในโครงสร้างพื้น โดยมีลำดับการตกตะกอนตามที่ Smallman, R. E. and Ngan, A. H. W. (2007, pp. 397-399) รายงานไว้ดังนี้



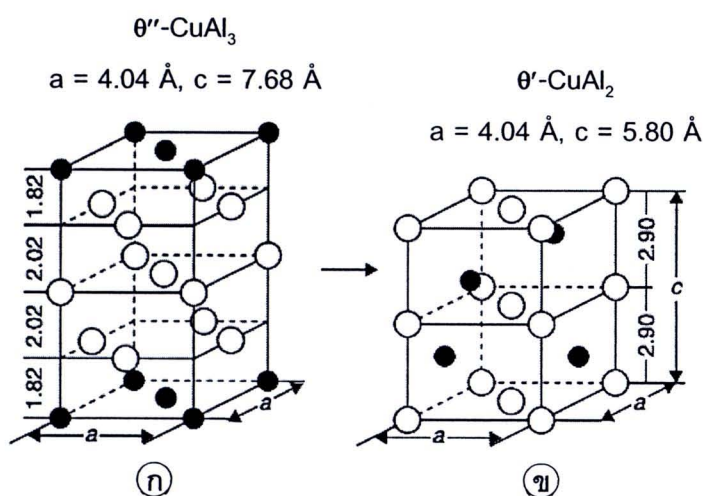
โดยช่วงแรกของการบ่มแข็งจะเกิดโซน GP[1] ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของอะตอมของทองแดงบนระนาบ {100} ของ α -Al โดยมีรูปร่างเป็นแผ่น (Plate-like) มีความหนาเทียบเท่ากับระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม และมีความยาวประมาณ 10 นาโนเมตร เมื่อถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอนจะเกิดเป็นเส้นมืดและสว่างเรียงตัวสลับกัน ในบางบริเวณจะมีการเกิดความเครียดขึ้นรอบๆ โซน ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

เมื่อเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็งนานขึ้น โซน GP[1] จะสลายลงสู่เมทริกซ์ หลังจากนั้นจะเกิดการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นเป็นโซน GP[2] หรือเฟส θ'' มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) โดยมีค่าคงที่โครงผลึก $c = 0.78$ นาโนเมตร ซึ่งต่างจากอะลูมิเนียม (0.404 นาโนเมตร) โดยผลึกของเฟส θ'' มีการโตในแนวแกน c จึงทำให้โครงสร้างของ α -Al บิดเบี้ยว จากสภาวะความเครียดระหว่างการโตของผลึกที่มีการยึดตัวของโครงผลึกของเฟส θ'' กับโครงสร้างพื้น ส่งผลทำให้เกิดความเครียดรอบๆ เฟส θ'' ทำให้เกิดสภาวะ Coherency โลหะผสมอะลูมิเนียมจะมีความแข็งแรงและความแข็งแรงมีค่าสูงสุด โดยอนุภาคที่ตกตะกอนจะมีความหนาสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 150 นาโนเมตร

หลังจากนั้นเกิดการเปลี่ยนเฟส θ'' เป็นเฟส θ' แสดงดังภาพ 13 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล โดยมีค่าคงที่โครงผลึก $a = 0.404$ และ $c = 0.58$ นาโนเมตร ที่มีการโตตามโครงสร้างพื้นในแนวระนาบ $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ พลังงานความเครียดรอบๆอนุภาค θ' จะถูกปลดปล่อย จะ

ปรากฏดิสโลเคชันมีลักษณะเป็น Loop อยู่รอบๆ อนุภาค θ' ที่มีขนาดเล็กๆ เมื่อถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน จะพบว่าสนามความเครียดของอนุภาคและดิสโลเคชันขนาดใหญ่จะลดลงในช่วงนี้ ดังนั้นจึงทำให้ดิสโลเคชันสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อรับแรงภายนอกกระทำ โดยส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลง

ในช่วงสุดท้ายเฟส θ' จะเปลี่ยนเป็นเฟส θ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล โดยมีค่าคงที่ โครงผลึก $a = 0.606$ และ $c = 0.487$ nm ซึ่งมีสถานะเป็น Non-coherent กับโครงสร้างพื้น และมีการเปลี่ยนรูปได้เสมอเมื่อได้รับแรงกระทำภายนอก จึงทำให้โลหะมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากสนามความเครียดระหว่างเฟสของอนุภาคที่ตกตะกอนกับโครงสร้างพื้นหายไป หรือที่เรียกว่ามีลักษณะเป็น Non-coherency



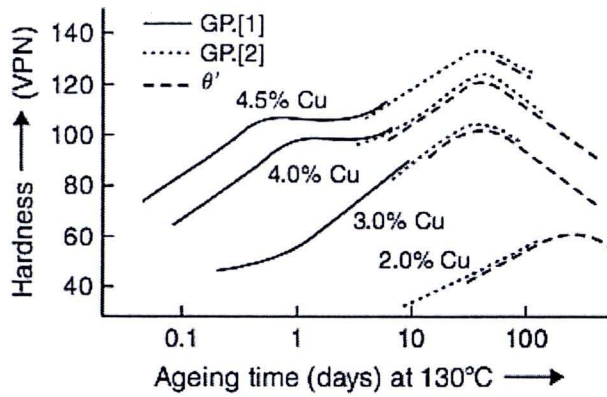
โดยที่ ● คืออะตอมของอะลูมิเนียม และ ○ คืออะตอมของทองแดง

ภาพ 13 แผนภาพการเปลี่ยนรูปโครงสร้างผลึกของ θ'' เป็น θ' ในโลหะผสม อะลูมิเนียม-ทองแดง โดยกลไกของช่องว่าง

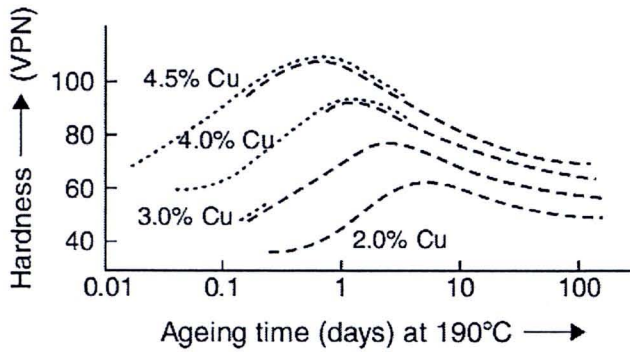
ที่มา: Smallman, R. E. and Ngan, A. H. W. (2007, p. 402)

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำที่ 130 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพ 14(ก) จะทำให้เกิดการตกตะกอนของจีพีโซนหนึ่ง เมื่อบ่มแข็งเป็นเวลานานขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนของจีพีโซนสอง จะทำให้ความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุด ในขณะที่เดียวกันก็จะเริ่มเปลี่ยนเป็นเฟส θ' อยู่ในช่วงสุดท้ายของการบ่มแข็ง ซึ่งความแข็งแรงจะลดลง โดยโลหะผสมที่ผสมทองแดงมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ในช่วงจีพีโซนสอง โลหะผสมที่ผสมทองแดงเท่ากับ 3-4 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ในช่วงการเปลี่ยนจีพีโซนสองเป็นเฟส θ' ส่วนโลหะผสมที่ผสมทองแดงน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ในช่วงของเฟส θ' นอกจากนี้โลหะผสมที่ผสมทองแดงมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงสูง 2 ค่า คือ ช่วงของการเกิดจีพีโซนหนึ่งและจีพีโซนสอง อย่างไรก็ตามช่วงจีพีโซนสองจะให้ค่าความแข็งแรงสูงที่สุด และโลหะผสมที่ผสมทองแดง 2 เปอร์เซ็นต์ จะไม่พบการเกิดจีพีโซนหนึ่ง

ส่วนการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงที่ 190 องศาเซลเซียส ดังภาพ 14(ข) จะไม่มีการเกิดจีพีโซนหนึ่ง เมื่อบ่มแข็งเป็นเวลานานขึ้นทำให้ความมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเพียงค่าเดียว ในโลหะผสมที่ผสมทองแดงมากกว่าหรือเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ในช่วงการเปลี่ยนจากจีพีโซนสองเป็นเฟส θ' แต่ในโลหะผสมที่ผสมทองแดงน้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ในช่วงของการเกิดเฟส θ' (Smallman and Ngan, 2007, pp. 386-388)



(ก)



(ข)



ภาพ 14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ชี้นำงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็ง (ก) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส (ข) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

ที่มา: Smallman, R. E. and Ngan, A. H. W. (2007, p. 387)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

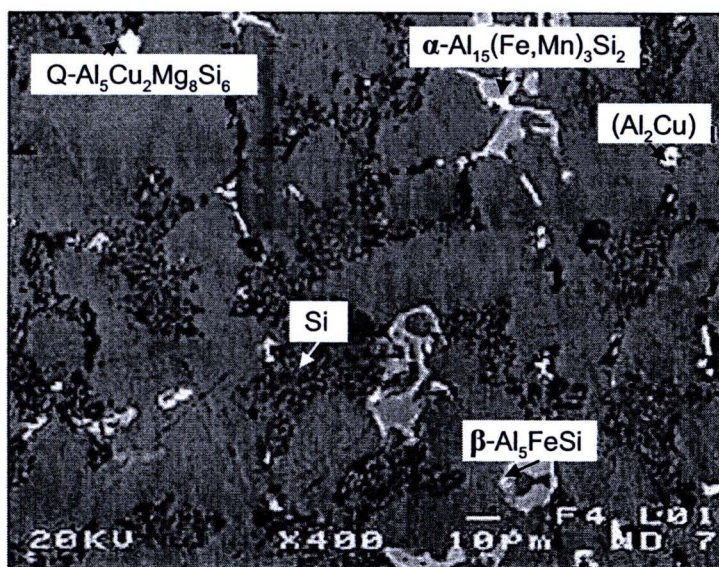
Kaufman, J. G. and Rooy, E. L. (2004, p. 65) รายงานว่าการปรับสภาพด้วยความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง ในขั้นตอนการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบของทองแดงและซิลิกอนในโครงสร้างพื้น และทำให้โครงสร้างซิลิกอนยูเทคติกมีลักษณะกลมมนขึ้น ส่วนเฟส Al_2Cu ที่แยกตัวอยู่หรือรวมตัวกันเป็นกลุ่ม หรือรวมอยู่กับเฟสยูเทคติก จะมีรูปร่างกลมที่มีขนาดเล็กลง

Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D. (2006, pp. 259-262) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพลังงานจลน์ของอนุภาคที่ตกตะกอนในอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T5 โดยอบละลายที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 100-320 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนประกอบด้วยเดนไดรต์ของเฟส $\alpha-Al$ ล้อมรอบด้วยเฟสซิลิกอนยูเทคติกที่มีรูปร่างเป็นแผ่นและสารประกอบโลหะของเฟส $\theta-(Al_2Cu)$, $\alpha-Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ และเฟส $\beta-(Al_5FeSi)$ ดังแสดงในภาพ 15 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อน พลังงานจลน์มีค่าประมาณ 140.4 kJ/mol^1 ซึ่งเป็นค่าที่ประมาณการแพร่ของธาตุ Cu และ/หรือธาตุ Si ใน Al ที่แสดงถึงอัตราการโตของอนุภาค ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟส θ' เฟส $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ และเฟส Si ในระนาบ $[111]_{Al}$ นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการโตของเฟส θ' เฟส Q และเฟส Si ที่มีสถานะเป็น Semi-coherent โดยมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 18.2 นาโนเมตร เป็น 30.9 นาโนเมตร โดยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ขนาดของอนุภาคที่ตกตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งในช่วงสุดท้ายของการบ่มแข็ง ตะกอนจะเปลี่ยนเป็นเฟส θ เฟส Q และเฟส Si ในระนาบ $[001]_{Al}$ ที่อยู่ในสถานะ incoherent และมีขนาดใหญ่กว่า 107 นาโนเมตร

Ovono, D. O. , Guillot, I. and Massinon, D. (2007, pp. 241-246) ได้ศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319 ด้วย TEM และ DSC พบว่าหลังการปรับสภาพด้วยความร้อน แบบ T5 มีการตกตะกอนของเฟส θ' ในโครงสร้างพื้น มีรูปร่างเป็นแผ่นยาว มีความหนาประมาณ 10-15 นาโนเมตร และยาวประมาณ 50-100 นาโนเมตร ดังภาพ 16(ก) ตะกอนของเฟส $\theta-(Al_2Cu)$ มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ค่าพารามิเตอร์ $a = 0.04077$ นาโนเมตร และ $c = 0.581$ นาโนเมตร ในทิศ $(001)_{\theta'}$ ที่ขนานกับระนาบ $[001]_{Al}$ ดังภาพ 16(ข) อย่างไรก็ตามยังปรากฏตะกอนของเฟส θ เฟส Q และเฟส Si ในสถานะ incoherent หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ดังภาพ 16(ค) ส่วนผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสด้วย DSC อุณหภูมิ 100-600 องศา

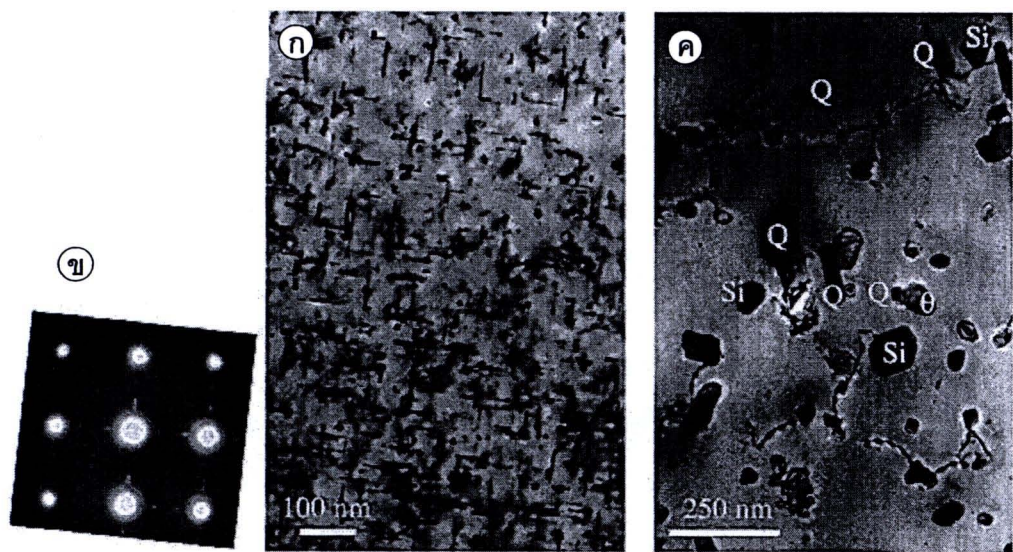
เซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังตาราง 5 พบว่าเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆอยู่ 6 จุด ประกอบด้วยปฏิกิริยาคายความร้อน 1 จุด ที่อุณหภูมิ 243 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาดูดความร้อน 5 จุด ที่อุณหภูมิ 507, 519, 537, 548 และ 573 องศาเซลเซียส

Ammar, H. R., Samuel, A. M. and Samuel, F. H. (2008 pp. 65-75) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม เอ319 (Al-7.50Si-3.52Cu-0.36Mg-0.019Mn) ในสภาพหล่อ พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเดนไดรต์ของ α -Al ที่ล้อมรอบด้วยซิลิกอนยูเทคติกและสารประกอบโลหะของเฟส α -Al₁₂(MnCuFe)₃Si₂, เฟส Al₈Mg₈Cu₂Si₆ และเฟส Al₂Cu



ภาพ 15 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของโลหะอะลูมิเนียมผสม เอ319 ที่ผ่านการปรับสภาพทางความร้อน แบบ T5

ที่มา: Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D. (2006, p. 206)



ภาพ 16 ภาพถ่ายของอะลูมิเนียม เอ319 (ก) ด้วย Bright-field TEM (แกนโซน $[001]_{Al}$) (ข) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน และ (ค) ภาพถ่าย TEM หลังการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ที่มา: Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D. (2007, p. 243)

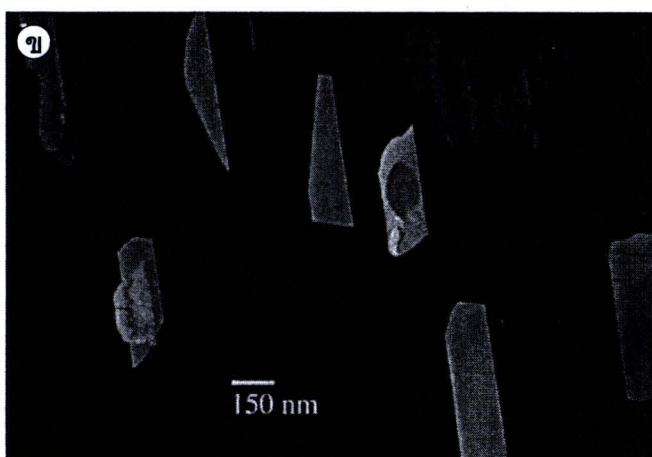
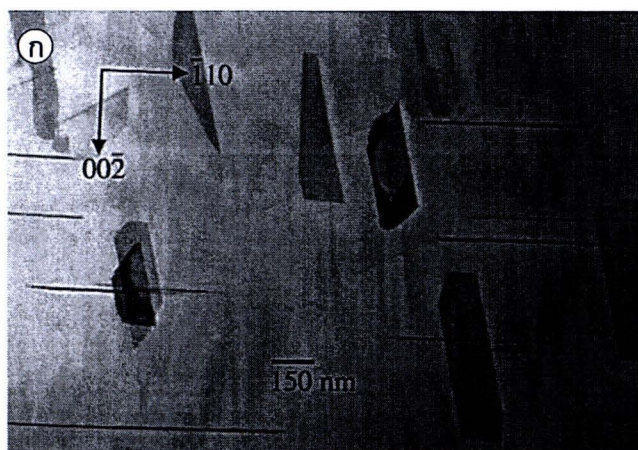
ตาราง 5 ผลการวิเคราะห์ด้วย DSC ของ Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D.

อุณหภูมิ	สิ่งที่เกิดขึ้น
243	การเปลี่ยนอนุภาคของเฟส $\theta' \rightarrow \theta$
507	การสลายตัวของเฟส $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$
519	การสลายตัวของเฟส Al_2Cu
537	การสลายตัวของเฟส $\alpha-Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$
548	การสลายตัวของเฟส $\beta-Al_5FeSi$
573	การสลายตัวของเฟสซิลิกอนยูเทคติก

ที่มา: Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D. (2007, p. 244)

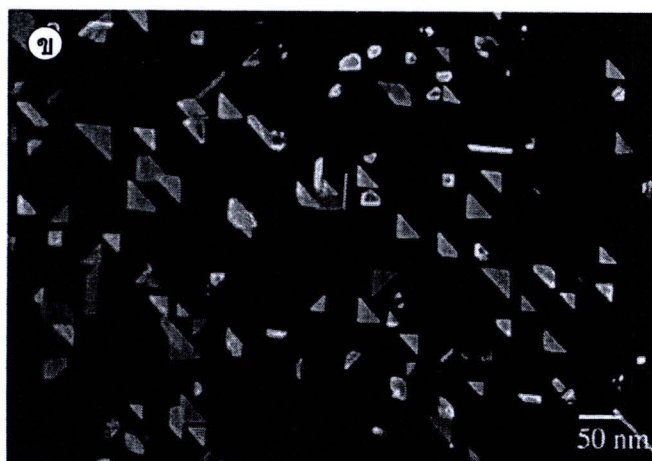
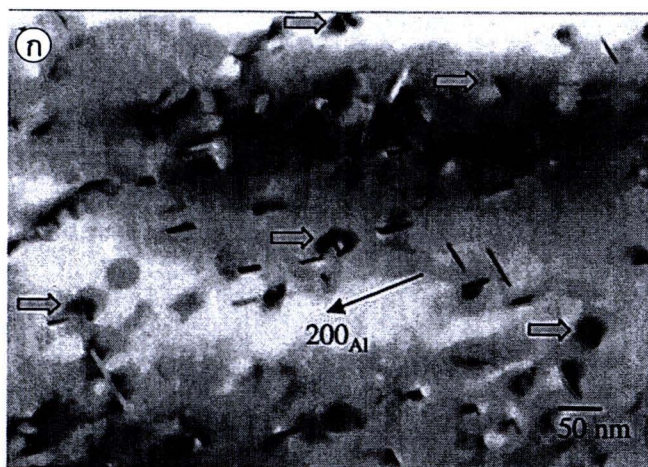
Mitlin, D., Radmilovic, V. and Morris, J. W. (1999, pp. 2000-2697) ศึกษาอนุภาคที่ตกตะกอนของโลหะผสม Al-2Cu, Al-1Si และ Al-2Cu-1Si โดยบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที 6, 24 และ 48 ชั่วโมง และให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าในโลหะผสม Al-2Cu หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง เริ่มมีการตกตะกอนของเฟส θ' ที่มีรูปร่างเป็นเส้น ดังภาพ 17 ส่วนในโลหะผสม Al-1Si พบว่าเกิดตะกอนของเฟส Si อย่างรวดเร็ว หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานเพียง 10 นาที ตะกอนมีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งอาจเป็นท่อนหรือเป็นแท่งยาว และกระจายตัวอยู่ทั่วไปบน α -Al เมทริกซ์ ดังภาพ 18 นอกจากนี้ยังพบตะกอนที่มีความเครียดสูงกับโครงสร้างพื้น สำหรับโลหะผสม Al-2Cu-1Si พบว่าจะเกิดตะกอนของเฟส θ' และเฟส Si ดังภาพ 19 เมื่อเปรียบเทียบเฟส θ' ในโลหะผสม Al-2Cu-1Si และ Al-2Cu พบว่ามีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างหนาแน่นกว่า ส่วนเฟส Si ซึ่งไม่มีส่วนผสมของ Cu จะมีขนาดใหญ่และการกระจายตัวไม่หนาแน่น ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นแผ่นและซ้อนทับกันเป็นคู่ ซึ่งสามารถยืนยันชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้นได้จากแบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนในเมทริกซ์ของโลหะผสม Al-2Cu, Al-1Si และ Al-2Cu-1Si ดังภาพ 20(ก-ค) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าในโลหะผสม Al-2Cu-1Si เมื่อบ่มแข็งเป็นเวลานานขึ้นทำให้เฟส θ' จะมีขนาดและเป็นเส้นยาวมากขึ้น ดังภาพ 21





ภาพ 17 (ก) ภาพถ่าย BF-TEM ของโลหะผสม Al-2Cu แสดงตะกอนของเฟส θ' หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ข) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ $11\bar{2}g'$

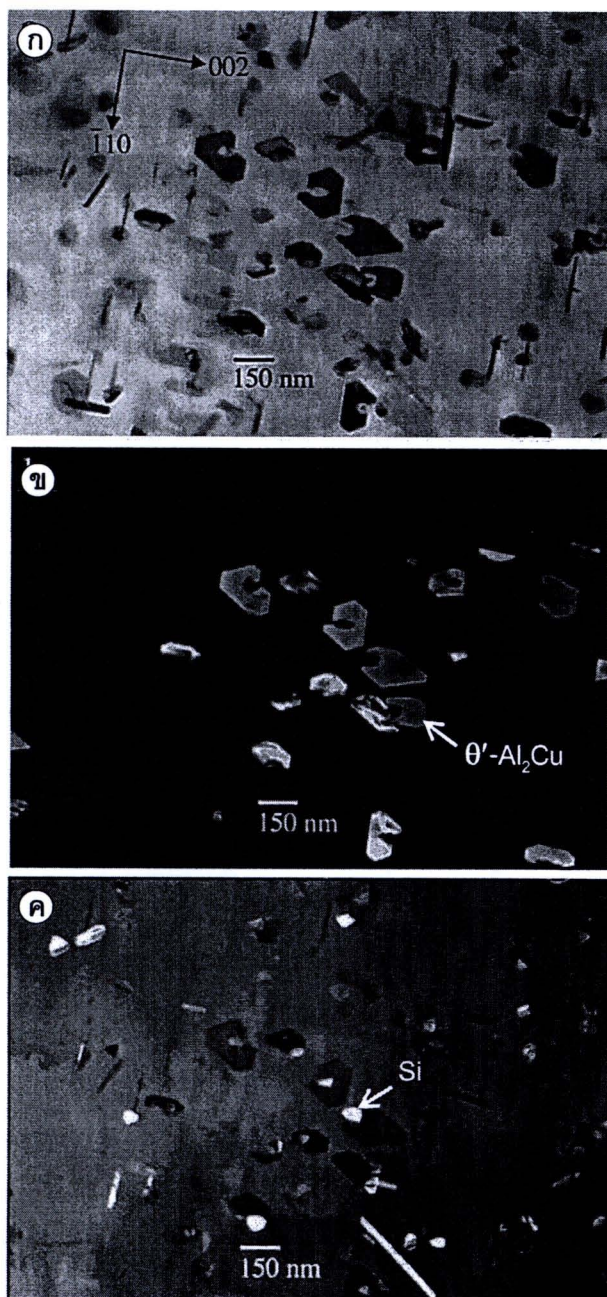
ที่มา: Mitlin, D., Radmilovic, V. and Morris, J. W. (1999, p. 2703)



โดย $\Rightarrow$ แสดงตะกอนที่มีความเครียดสูง

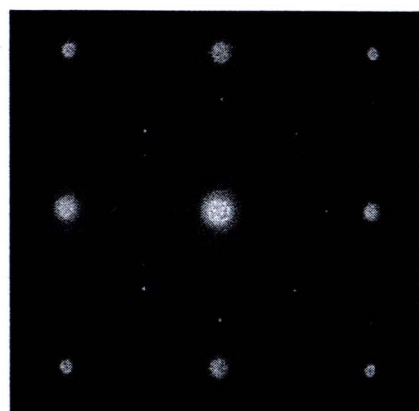
ภาพ 18 (ก) ภาพถ่าย BF-TEM ของโลหะผสม Al-1Si แสดงตะกอนของเฟส Si หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ในทิศ 200_{Al}
(ข) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ 220_{Si}

ที่มา: Mitlin, D., Radmilovic, V. and Morris, J. W. (1999, p. 2701)

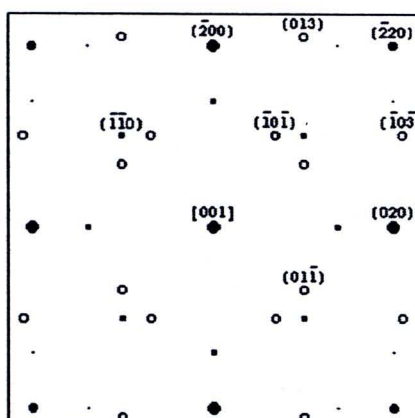


ภาพ 19 (ก) ภาพถ่าย BF-TEM ของโลหะผสม Al-2Cu-1Si แสดงตะกอนของเฟส Si และ θ' -Al₂Cu ในโครงสร้างพื้น หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ข) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ $11\bar{2}\theta'$ (ค) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ $11\bar{1}_{Si}$

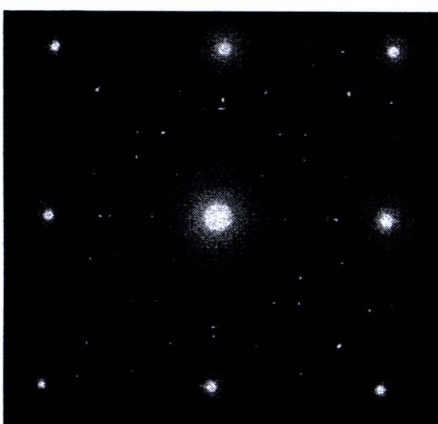
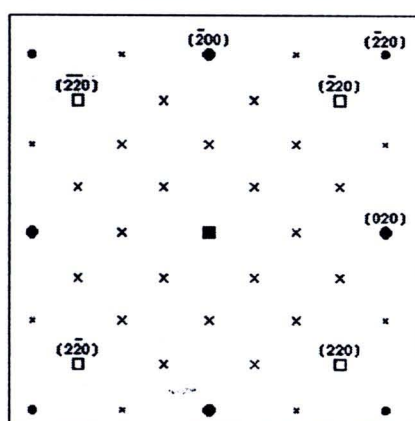
ที่มา: Mitlin, D., Radmilovic, V. and Morris, J. W. (1999, p. 2703)



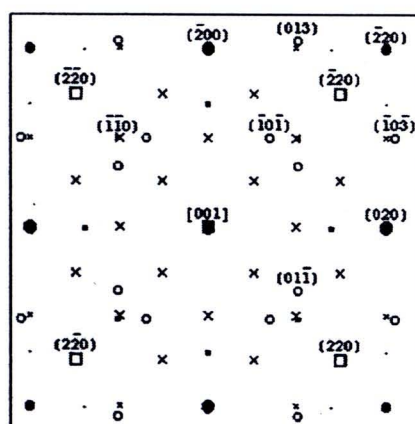
(ก)



(ข)



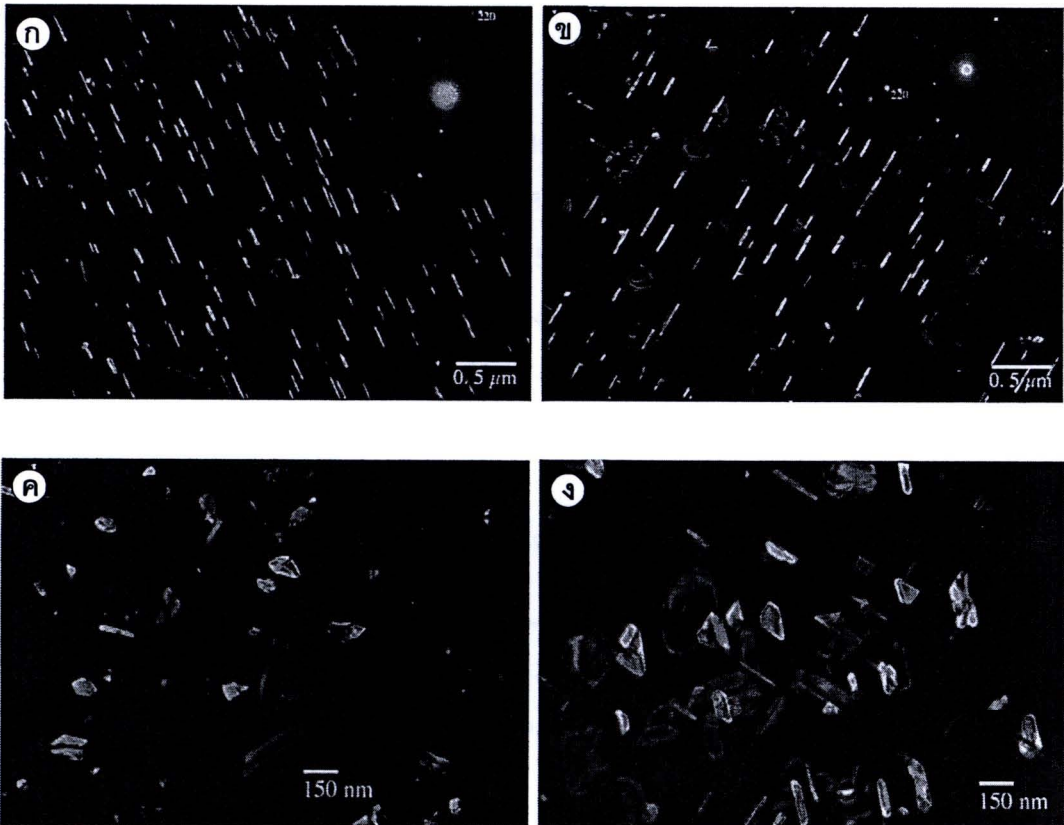
(ค)



โดย $\bullet$ = Al, $\circ$ = θ' -Al₂Cu และ $\square$ = Si

ภาพ 20 (ก) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนยืนยันโครงสร้างผลึกของโลหะผสมหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เวลา 48 ชั่วโมง (แกนโซน $[001]_{Al}$) เฟส θ' ในโครงสร้างพื้นของ Al-2Cu (ข) เฟส Si ในโครงสร้างพื้นของ Al-1Si (ค) เฟส θ' และ เฟส Si ในโครงสร้างพื้นของโลหะผสม Al-2Cu-1Si

ที่มา: Mitlin, D., Radmilovic, V. and Morris, J. W. (1999, pp. 2699-2700)



ภาพ 21 ภาพถ่าย Dark-field แสดงอนุภาคที่ตกตะกอนในโลหะผสม Al-2Cu-1Si หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส (ก) เฟส θ' บ่มแข็งเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ข) บ่มแข็งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ค) เฟส Si บ่มแข็งเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ง) บ่มแข็งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ที่มา: Mitlin, D., Radmilovic, V. and Morris, J. W. (1999, p. 2702)



Kaufman, J. G. and Rooy, E. L. (2004, p. 71) ได้แสดงข้อมูลของลักษณะการปรับสภาพด้วยความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง เอ319 ต่อสมบัติเชิงกล ในโลหะผสมที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อในแบบทรายและแบบหล่อถาวร ตาราง 6 จะเห็นว่าการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T6 ให้ความต้านทานแรงดึงและความแข็งสูงสุด ซึ่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสามารถทำการปรับสภาพด้วยความร้อนได้ทั้งแบบ T4, T5, T6 หรือ T7 แต่ที่นิยมคือแบบ T6 เนื่องจากสามารถเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึงและความแข็งได้สูงที่สุด โดยไม่สูญเสียสมบัติการยึดตัว

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาของการศึกษาผลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อความแข็งสูงสุดของอะลูมิเนียมผสม เอ319 แสดงดังตาราง 7

ตาราง 6 สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสม เอ319.0

Heat Treatment	Tension			Hardness, HB	Shear ultimate strength, MPa	Fatigue ultimate limit, MPa	Modulus of elasticity, GPa
	Ultimate strength, MPa	Yield strength, MPa	Elongation, %				
F	185	125	2	70	150	70	74
T5	205	180	2	80	165	75	74
T6	250	165	2	80	200	75	74

ที่มา: Kaufman, J. G. and Rooy, E. L. (2004, p. 85)

ตาราง 7 งานวิจัยที่ผ่านมาในการปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนของอะลูมิเนียมผสม เอ319

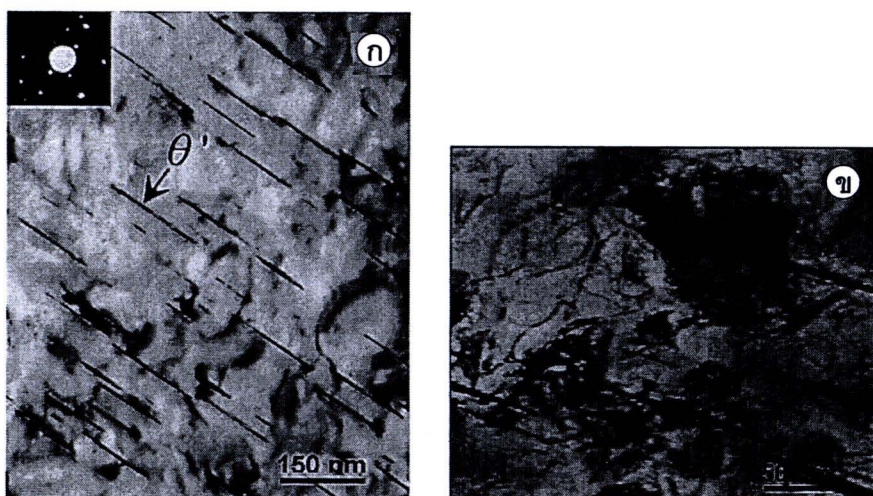
Heat Treatment	Solutionizing		Aging		Peak Hardness
	Temperatures : Times	Temperatures : Times	Temperatures : Times	Temperatures : Times	
T6 (Sokolowski, et al., 1995)	495 °C, 8 h follow by 505, 515, 520, 525, 530, 540 °C :	250 °C : 5 h			109 HV (Sol: 495 °C, 8 h follow by 530 °C, 2 h & Aging)
T4 (Cerri, et al., 2000)	500, 510 °C : 0-10,000 min	-			112 HV (Sol: 510 °C, 100 and 1,000 min)
T5 (Cerri, et al., 2000)	-	170, 220 °C : 0-6,000 min			116 HV (Aging: 170 °C, 10 h)
T6 (Cerri, et al., 2000)	500 °C : 4 h	20, 170, 200, 220 °C : 0-6,000 min			103 HR _F (Aging: 170 °C, 1,000 min)
T6 (Sepehrband, Mahmudi and Khomamizadeh 2005)	503 °C : 4-36 h	195 °C : 0-48 h			116 HV (Sol: 8 h, Aging: 195 °C, 6 h) 115 HV (Sol: 24 h, Aging: 195 °C, 6 h)
T6 (Cavaliere, Cerri and Leo, 2005)	500 °C : 4 h	160, 200 °C : 0.1-1,000 min			107 HV (Aging: 160 °C, 1,000 min)
T6 (Mahmudi, Sepehrband and Ghasemi, 2006)	503 °C : 24 h	175-235 °C : 0-48 h			116 HV (Aging: 175 °C, 10 h and 235 °C, 1 h) 115 HV (Aging: 195 °C, 6 h and 215 °C, 3 h)
T6 (Tash, et al., 2007)	495 °C : 8 h	155, 180, 200, 220 °C : 4 h			112 HV (Aging: 200 °C)
T6 (Sebaie, et al., 2008)	495 °C : 8 h	155, 180, 200, 220 and 240 °C : 5 h			100 HV (Aging: 200 °C) at high cooling rate 101 HV (Aging: 155 °C) at low cooling rate
T6 (Tavitas-Medrano, et al., 2008)	495 °C : 8 h	150, 170, 190, 220, 220 °C : 2, 4, 6, 8 h			110 HV (Aging: 170 °C, 8 h)
T6 (Haro, et al., 2009)	504, 545 °C : 4, 8 h	154, 200 °C : 6 h			77 HV (Sol: 545 °C, 8 h, Aging: 200 °C)

Haro, S., et al. (2009, pp. 886-891) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งต่อสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสม เอ319 โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 504 และ 545 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 154 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าการอบละลายที่อุณหภูมิ 504 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 154 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงและความแข็งสูงสุด โดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เวลาที่ใช้ในการอบละลายที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งจาก 154 เป็น 200 องศาเซลเซียส จะทำให้ความแข็งที่เพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวลดลง อย่างไรก็ตามการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงและเวลานานเกินไป จะทำให้อนุภาคที่ตกตะกอนมีขนาดใหญ่เกินไป และทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง

Rincón, E., et al. (2009, pp. 128-140) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม เอ319 ในสภาพหล่อและหลังการปรับสภาพด้วยความร้อน โดยการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ -90 ถึง 400 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 485 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4.5 ชั่วโมง (T4) และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 485 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4.5 ชั่วโมง แล้วบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4.5 ชั่วโมง (T7) ซึ่งพบว่าสมบัติความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงขึ้นหลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T4 และ T7 แต่การยืดตัวมีค่าต่ำลง เนื่องจากการแตกหักของสารประกอบโลหะของเฟส $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ และเฟส $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T7 โดยการเปลี่ยนรูปของอนุภาคที่ตกตะกอนหลังการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพ 22(ก) เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบแรงดึงสูงขึ้นเป็น 320 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพ 22(ข) มีการเปลี่ยนรูปของเฟส θ มีลักษณะขาดไปตามแนวของดิสโลเคชันที่เคลื่อนที่หลังได้รับแรง

De-Feng, M., et al. (2010, pp. 3420-3426) ได้ศึกษาผลของโครงสร้างจุลภาคต่อพฤติกรรมการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม เอ319 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T6 พบว่าหลังการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานจะเกิดการแตกหักมากขึ้นตามแรงที่ใช้ในดึงจนขาด โดยจุดเริ่มต้นของการแตกหักเกิดขึ้นที่เฟสของสารประกอบธาตุ Si ที่มีความแข็งและเปราะ และบริเวณที่มีรูพรุน ซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับการตำแหน่งขอบหรือกลางชิ้นงานทดสอบ

Sokolowski, J. H., et al. (1995, pp. 385-392) ศึกษาการอบละลายสองครั้งเพื่อกำจัดเฟส Al_2Cu และเพิ่มสมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319 โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการอบละลายต่อที่อุณหภูมิ 505, 515, 520, 525 และ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายในขั้นตอนที่สองโครงสร้างยูเทคติกมีการละลายลงสู่โครงสร้างพื้นมากกว่าการอบละลายเพียงครั้งเดียว และทำให้ความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการอบละลายครั้งที่สองที่อุณหภูมิมากกว่า 520 องศาเซลเซียส จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง



ภาพ 22 ภาพถ่ายของอะลูมิเนียม เอ319 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T7
(ก) การเปลี่ยนรูปโครงสร้างพื้น หลังการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (ข) การเปลี่ยนรูปโครงสร้างพื้น หลังการทดสอบที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส

ที่มา: Rincón, E. et al. (2009, p. 136)

Alfonso, I., et al. (2006, pp. 1945-1952) ศึกษาผลของการเติม Mg และการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Al-6Si-3Cu โดยขึ้นงานในสภาพหล่อ นำไปอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-72 ชั่วโมง พบว่าการเติม Mg ในปริมาณที่มากขึ้นของโลหะผสมไม่มีผลต่อสัญญาณวิทยาของเฟสซิลิกอนยูเทคติก แต่เฟส Al_2Cu มีการเปลี่ยนเป็นเฟส Q ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$) ขึ้นงานที่ผ่านการอบละลายพบว่าการละลายของเฟส Al_2Cu มากกว่าการละลายของเฟส Q ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$)

Ouellet, P. and Samuel, F. H. (1999, pp. 4671-4697) ได้ศึกษาผลของการเติมธาตุแมกนีเซียม ต่อการบ่มแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319 พบว่าการเติมแมกนีเซียม ในปริมาณมากกว่า 0.45% ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงหลังการปรับสภาพด้วยความร้อน แบบ T5 และ T6 โดยความต้านทานแรงดึงในช่วง Under-aging ไม่พบการเปลี่ยนแปลงจากสภาพหล่อนัก สำหรับช่วง Peak-aged ของขึ้นงานหลังอบละลายที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และช่วง Over-aging ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาจากช่วง Peak-aged นอกจากนี้ยังพบว่าการแตกหักจากการทดสอบแรงดึงมีการแตกผ่านเฟสยูเทคติกของสารประกอบที่มีส่วนผสมของซิลิกอน ทองแดง และเหล็ก

Li, Z., et al. (2004, pp. 96-110) ศึกษาการเติมธาตุ Cu, Sr, Fe และ P ในอะลูมิเนียมผสม เอ319 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T5 และ T6 ต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง ซึ่งพบว่าการเติมธาตุ Cu, Sr, Fe และ P ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าความเค้นพิสูจน์ และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง ไม่ว่ากรณีส่วนผสมของธาตุในปริมาณต่างๆ หรือหลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T5 และ T6 ก็ตาม

Sepehrband, P., Mahmudi, R. and Khomamizadeh, F. (2005, pp. 544-549) ที่ได้ศึกษาผลของการเติม Zr หลังการบ่มแข็งในโลหะอะลูมิเนียมผสม เอ319 โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-36 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-48 ชั่วโมง พบว่าในอะลูมิเนียมผสมที่ไม่มีการเติม Zr มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเป็น 117 BHN ขึ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ส่วนโลหะอะลูมิเนียมผสมที่เติม Zr มีความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 119 BHN ขึ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เนื่องจากการเกิดเฟส Al_3Zr ที่เพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสม



Mahmudi, R., Sepehrband, P. and Ghasemi, H. M. (2006, pp. 2606-2610) ได้ศึกษาการเติม Zr ในอะลูมิเนียมผสม เอ319 โดยอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175-235 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-48 ชั่วโมง พบว่าการเติม Zr ทำให้ความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น และความต้านทานการสึกหรอลดลง หลังการบ่มแข็งทำให้ความเค้นจุดครากและความเค้นแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการการยืดตัวลดลง และความต้านทานการสึกหรอลดลงจากสภาพหล่อ

Tavitas-Medrano, F. J., et al. (2008, pp. 356-364) ได้ศึกษาผลของการเติม Mg และ Sr ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแข็งในโลหะอะลูมิเนียมผสม เอ319 โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150-240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-8 ชั่วโมง พบว่าการเติม Sr ทำให้อัตราการยืดตัวลดลงและความต้านทานแรงกระทำเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการเติม Sr ลงในโลหะผสมในปริมาณน้อย จึงทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม ส่วนการเติม Mg ทำให้เกิดเฟส Al_2Cu , Mg_2Si , Al_2CuMg และ $Al_2CuMg_5Si_4$ ทำให้ค่าความเค้น จุดคราก ความเค้นแรงดึง และความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แต่อัตราการยืดตัวและความต้านทานต่อแรงกระทำลดลง อย่างไรก็ตามการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงหรือเวลานานเกินไป จะทำให้สมบัติเชิงกลเริ่มคงที่และมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอยู่ในช่วง Over-aging

Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D. (2008, pp. 425-431) ได้ศึกษาพฤติกรรมของความล้าในอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319 พบว่าการเติม Si, Fe และ Mn (AS9U3G) ทำให้ความต้านทานการแตกหักเนื่องจากความล้าลดลง แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคที่ตกตะกอนหลังการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T5 ส่วนการบ่มแข็งเป็นการเพิ่มความต้านทานการแตกหักเนื่องจากความล้า

Ma, Z., et al. (2010, pp. 3791-3803) ได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งและการเติมธาตุ Mn และ Sr ต่อความแข็งของโลหะผสม Al-11Si-2.5Cu และ Al-9Si-3.5Cu ที่เติม Mg พบว่าการบ่มแข็งของโลหะผสมที่เติม Mn ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากชิ้นงานในสภาพหล่อ ส่วนการเติม Sr ทำให้ความแข็งลดลง และหลังการบ่มแข็งทำให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาพหล่อจนถึงค่าสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มแข็งเป็นเวลานานเกินไป ทำให้ความแข็งลดลง เรียกว่า ช่วง Over-aging อย่างไรก็ตามการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น และความแข็งสูงสุดจะพบที่การบ่มแข็งเป็นเวลาสั้นลง