บทที่2
โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสม

2.1 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะอลูมิเนี่ยม

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางแทบทุกชนิด และทองแดงได้ในหลายๆด้านของงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรม อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางการหล่อหลอมที่ดี โดยมีคุณสมบัติหลอมเหลวต่ำสามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆเป็นโลหะผสมได้ง่าย ส่วนข้อเสียคืออะลูมิเนียมมีขอบเขตการยืดหยุ่น(Elastilimit)ต่ำทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก

2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	26.97
ระบบผลึก (Crystal Structure)	FCC (a=b=c=4.041 Å)
ความหนาแน่น (20°C)	2.70 g/cm
จุดหลอมเหลว	658°C
จุดเดือดกลายเป็นไอ	1800°C
ความร้อนจำเพาะ (0-100°C)	0.2259 Cal/g°C
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Solidification Shrinkage)	6.6%
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20°C)	23.8 10^{-6}/ °C
ความต้านทานจำเพาะ (20°C)	2.699 microhm.cm
สภาพตัวนำความร้อน (20°)	0.52 Cal.cm/cm^2.°C.sec

2.1.2 คุณสมบัติเชิงกล

ความแข็งแรง (Tensile Strength)	8-10	kg/mm^2
พิกัดความยืดหยุ่น (Elatic limit)	3	kg/mm^2
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40-45%	
ความแข็ง (Hardness)	16-20	H
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	7800	kg/mm^2

2.2 การจำแนกประเภทของโลหะผสมอลูมิเนี่ยม

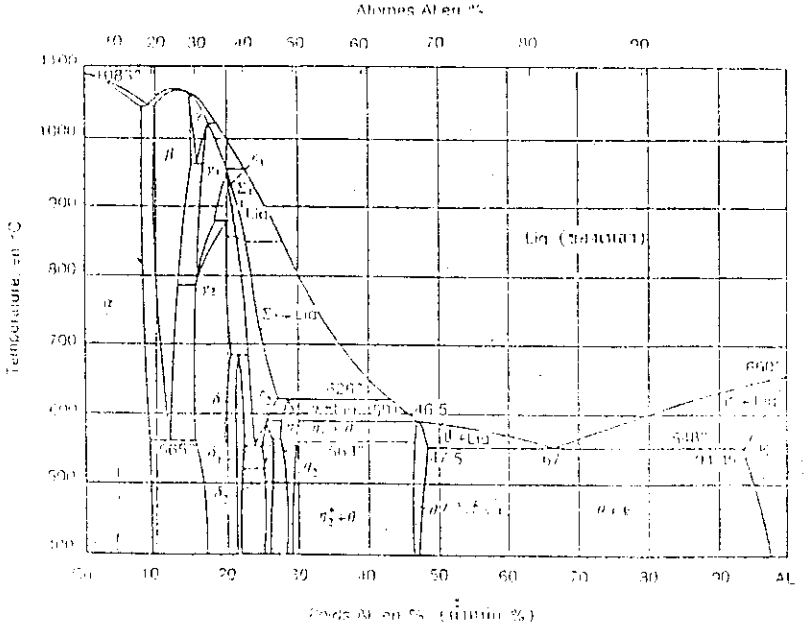
โลหะอลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่นๆได้หลายชนิด เช่นโลหะผสมอลูมิเนียม-ทองแดง, อลูมิเนียม-ซิลิคอน, อลูมิเนียม-แมกนีเซียม, อลูมิเนียม-สังกะสี หรืออาจจะมีโลหะผสมอลูเนียมกับหลายๆธาตุร่วมกัน ดังเช่น อลูมิเนียม-ทองแดง-ซิลิคอน และแมกนีเซียม ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน สามารถเลือกใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โลหะผสมอลูมิเนียมจำแนกออกได้สองประเภทที่สำคัญคือ

2.2.1 โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น Wrought เป็นโลหะผสมที่จะผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดการอัดขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่น หรือเป็นแท่ง ซึ่งจะมีทั้งที่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat treatable) และที่อบชุบแข็งไม่ได้ ส่วนใหญ่จะมีทองแดง, ซิลิคอน และแมกนีเซียมเป็นธาตุผสม

2.2.2 โลหะผสมประเภทหล่อหลอม (Castable) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติการไหลดี ช่วยให้การหล่อเป็นรูปพรรณกระทำได้ง่าย ส่วนใหญ่จะสามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ โลหะผสมที่สำคัญได้แก่ซิลิคอน (ประมาณ10-20%)

2.3 โลหะผสมอลูมิเนี่ยม-ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น F.C.C. เหมือนกับอลูมิเนียม ซึ่งมีผลให้สามารถละลายได้ดีในอลูมิเนียม และมีผลให้คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป ทองแดงเมื่อละลายในอลูมิเนียมจะให้สารละลายของแข็ง เฟส K โดยมีปริมาณทองแดงละลายได้สูงสุด 5.65% ที่อุณหภูมิ 548°C และปริมาณทองแดงจะละลายในเฟส K ได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 548°C จะเหลือเพียงประมาณ 0.5% ที่อุณหภูมิ 200°C ที่ประมาณ 54% ทองแดง หรือ 46% อลูมิเนียม ปรากฏว่าอลูมิเนียมจะรวมกับทองแดงให้สารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ซึ่งจะมีสูตร $CuAl_2$ หรือเรียกว่าเฟส θ มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอลเชิงซ้อน (Complex Tetragonal) มีความแข็งปานกลางแต่เปราะแตกง่าย (Brittle) ทองแดงยังสามารถรวมกับอลูมิเนียมเป็นสารประกอบ $CuAl$ โดยมีทองแดง 70% คังปรากฏในแผนภูมิสมดุล อลูมิเนียม-ทองแดง



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลทองแดง-อะลูมิเนียม

จากแผนภูมิสมดุลจะปรากฏจุดยูเทคติคที่อุณหภูมิ 548°c ส่วนผสม 33% ทองแดงปฏิกิริยายูเทคติคจะเป็นดังนี้ คือ ไลเมื่อหลอมเหลวอะลูมิเนียมทองแดงที่33% ทองแดง เมื่อเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิ 548°c จะแตกตัวให้เฟส K (5.65% Cu) กับเฟส θ หรือ $CuAl_2$ (52.75 % Cu)

$$L \rightleftharpoons K + \theta$$

โครงสร้างของยูเทคติคจะประกอบด้วยแถบบางๆ ระหว่างเฟส α และ θ สลับกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูง แต่ความเหนียวน้อย (Brittle) ลักษณะคล้ายเพิร์ไลท์ (Pearlite) ในเหล็กกล้าคาร์บอน

โครงสร้างไฮโปรยูเทคติก ในที่นี้จะแยกออกเป็นสองลักษณะคือ ไฮโปรยูเทคติกที่มีถึง 5% ทองแดงและที่ต่ำกว่า 5%

โครงสร้างไฮโปรยูเทคติกที่ส่วนผสมเกินกว่า 5% ทองแดง ในสภาพการเย็นตัวที่เป็นอัตราการเย็นตัวสมดุล โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K เป็นโครงสร้างพื้นฐานโดยมีลักษณะโครงสร้างยูเทคติก(K+θ) กระจัดกระจายอยู่ตามบริเวณขอบเกรน(grain boundary)ซึ่งมีผลทำให้ความเหนียวลดลง

สำหรับโครงสร้างไฮโปรยูเทคติกที่ส่วนผสมน้อยกว่า5% ลักษณะโครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K เป็นโครงสร้างพื้นฐาน อาจจะปรากฏการตกผลึกการตกของเฟส θ อยู่บ้างตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของอะตอมทองแดงมาจับตัวเป็น θ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 548°C ลักษณะที่สำคัญของเฟส K กับเฟส θ มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมทองแดงเป็นอย่างมากคือที่เฟส K เป็นเฟสที่มีความเหนียวสูง โดยที่เฟส θ มีความแข็งสูงแต่เปราะไม่ทนต่อ

เช่นนี้ถ้าเฟส θ แม้จะมีอยู่เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่ต่อเนื่อง จะมีผลทำให้โลหะผสมขาดคุณสมบัติความเหนียว ถ้าจะเปรียบก็จะเหมือนเอาเม็ดทรายผสมในขี้ผึ้ง ถ้าตรายใดที่ขี้ผึ้งยังสามารถหุ้มเม็ดทรายได้หมดก็จะยังคงรักษาความเป็นขี้ผึ้งไว้ได้ แต่ถ้าขี้ผึ้งไม่สามารถหุ้มเม็ดทรายอยู่ได้ก็จะขาดความเหนียวอย่างเห็นได้ชัด

จากหลักความจริงนี้ ตัดรายการเด่นด้านของโลหะผสมจากสภาพหล่อมาแล้ว จึงมีผลต่อลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงกลในที่สุด การทำให้เฟส θ เกิดขึ้นในลักษณะฝังแทรกอยู่ในเฟส K โดยไม่ต่อเนื่องกัน จะทำให้คุณสมบัติความเหนียวของโลหะผสมไม่ลดลง

ในกรณีที่โลหะอะลูมิเนียมทองแดง มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 5% ใกล้ 33% เข้าไปเท่าไร โครงสร้างของโลหะผสมก็จะยิ่งมีเฟส θ เกิดขึ้นในปริมาณสูง ยิ่งเป็นโลหะผสมประเภทไฮเปอร์ยูเทคติก (มากกว่า 33% ทองแดง) ด้วยแล้วจะมีเฟส θ ปริมาณมากกว่าเฟส K โลหะผสมจะมีความเหนียวและความแข็งแรงน้อยมาก จนไม่มีคุณประโยชน์ในการใช้งานด้านวิศวกรรม

เมื่อพูดถึงลักษณะโครงสร้างของไฮโปยูเทคติกที่ปรากฏเฟส θ อยู่ในสภาพต่อเนื่องตามบริเวณของเกรน ซึ่งเป็นโครงสร้างของโลหะผสมที่ผ่านงานหล่อด้วยแบบทราย (Sand Casting) สามารถปรับปรุงคุณภาพด้านความเหนียวให้ดีได้ด้วยการอาบชุบความร้อน โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 544°C ใช้เวลาทิ้งไว้ประมาณ 48 ชั่วโมง ให้เฟส θ สลายตัว คืนอะตอมของทองแดงให้กลับไปเป็นสารละลายของแข็ง K หรือไม่ก็อาจจะปรับตัวให้เป็นเม็ดกลมกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปอย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำไปทำให้เย็นโดยรวดเร็วโดยการชุบน้ำไม่เปิดโอกาสให้เกิดเฟส θ ได้ทัน จะได้เฟส K เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่หุ้มเฟส θ ไว้ได้เป็นส่วนใหญ่ โลหะผสมที่ผ่านการอาบชุบความร้อนดังกล่าวนี้ จะมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ดี

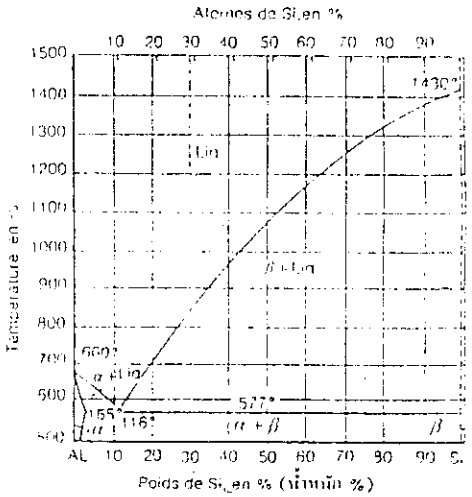
การตกผลึกของเฟส θ ในเฟส K ภายหลังการอาบชุบความร้อนโดยการทำให้เย็นโดยเร็วจะมีผลทำให้เกิดคุณสมบัติเพิ่มความแข็งที่เรียกว่า Precipitation หรือ Age Hardening ซึ่งจะอธิบายในรายละเอียดของการอาบชุบความร้อนโลหะผสมอะลูมิเนียม - ทองแดง

2.4 โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน

เนื่องจากซิลิคอน มีคุณลักษณะหลายประการที่แตกต่างกับอะลูมิเนียม โดยเฉพาะโครงสร้างระยางผลึก และจุดหลอมเหลว ดังนั้นการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนจึงมีขอบเขตจำกัดมาก โดยซิลิคอนจะละลายให้สารละลายของแข็งกับอลูมิเนียมได้สูงสุด 1.65% ที่อุณหภูมิ 577°C ให้เฟส K และปริมาณของซิลิคอนจะละลายในเฟส K ได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงกว่า 544°C จะเหลือปริมาณซิลิคอนในเฟส K เพียง 0.1% ที่อุณหภูมิ 200°C

จากแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จะมีลักษณะเด่นชัดที่ซิลิคอนแยกตัวไม่ละลายในอะลูมิเนียม โดยให้ปฏิกิริยายูเทคติกมีอุณหภูมิ 557°C และมีส่วนผสมของซิลิคอน 11.6% การตก

ตัวให้ทำปฏิกิริยายูเทคติคจากโลหะผสมหลอมเหลว 11.6% ซิลิคอน จะให้เฟส K หรือ (α 1.65% ซิลิคอนและเฟส βซึ่งเป็นเฟสที่ไม่อาจจะบอกได้ว่าเป็นสารละลายของแข็งของซิลิคอนกับอะลูมิเนียม หรือเป็นซิลิคอนบริสุทธิ์ เพราะจากแผนภาพสารหลายเล่ม จะเขียนเส้นแสดงขอบเขตการละลายของอะลูมิเนียมในซิลิคอนไว้เป็นเส้นไข่ปลา ซึ่งแสดงถึงความไม่แน่นอนมีมาก อย่างไรก็ตามเฟส β มีคุณสมบัติที่แข็งและเปราะ ถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของเฟส β ขนาดใหญ่ จะเกิดมีลักษณะต่อเนื่อง มีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำ และจะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียว อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นโลหะผสมที่จุดส่วนผสมยูเทคติค ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (577°C) ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีคุณสมบัติทางด้านการหล่อที่ดี (High Castability) มีอัตราการหดตัวต่ำ (Low Shrinkage) และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนอยู่ในเกณฑ์ดีพอสมควร(Good Corrosion Resistance) แต่ด้านความแข็งแรง และความเหนียวจะไม่สูงเทียบเท่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง



รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

หมายเหตุ เฟสαในภาพนี้ คือ เฟส K นั่นเอง คือเป็นสารละลายของอะลูมิเนียมกับซิลิคอน

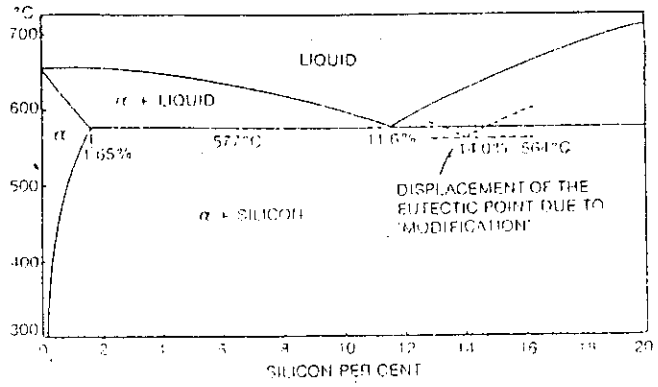
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไม่สามารถเพิ่มความแข็งให้สูงขึ้น ได้ด้วยวิธีการตามกลไกการเพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมสามารถกระทำได้หลายวิธีคือ

1) โดยการทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีอัตราการเย็นตัวภายในแบบหล่อให้สูงโดยการใช้แบบหล่อที่เป็นโลหะ เช่น เหล็กหล่อ

2) ใช้เทคนิคการเพิ่มปริมาณของนิวเคลียสให้มีปริมาณมาก เพื่อลดขนาดของเกรนให้เล็กลงโดยการใช้นิวเคลียสเทียม (Heterogeneous Nucleation) กล้ายคลึงกับวิธีอินนีคูเลท (inoculate)ที่ใช้กับเหล็กหล่อสีเทา

3) ใช้เทคนิกโมดิฟิเคชัน (Modification) ทำให้โลหะผสมเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากสภาพหลอมเหลว โดยใช้โซเดียมประมาณ 0.01% โดยน้ำหนัก บรรจุในภาชนะที่เป็นอะลูมิเนียมจุ่มลงในโลหะหลอมเหลวก่อนเทลงแบบหล่อ ซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวลดต่ำลงมาอยู่ที่อุณหภูมิ 564°C

และจุดยูเทคติคจะเคลื่อนไปทางขวา ไปอยู่ที่ส่วนผสม 14% ซิลิคอน ดังภาพแสดงแผนภูมิสมดุลภาพหลังการทำโมดิฟิเคชัน



รูปที่ 2.3 The Aluminium-Silicon Thermal-equilibrium Diagram,Showing the Effect of "Modification"
แสดงผลการทำโมดิฟิเคชัน

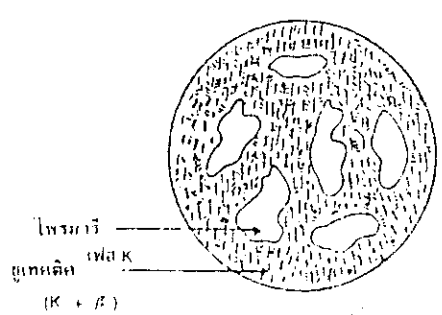
2.5 ลักษณะโครงสร้างของโลหะผสมอลูมิเนี่ยม-ซิลิคอน

ในสภาพการเย็นตัวตามปกติในแบบหล่อทราย โดยไม่ได้ทำโมดิฟิเคชั่น แบ่งการศึกษาออกได้ 3 ลักษณะ คือ

โลหะผสมประเภทยูเทคติค (ต่ำกว่า 11.6%ซิลิคอน) ซึ่งจะแยกออกเป็นสองลักษณะคือ โลหะผสมที่มีซิลิคอนต่ำกว่า 1.65% ซิลิคอน โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K หรือ α เพียงเฟสเดียว เป็นลักษณะของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มขึ้นรูปเย็น (Wrought)

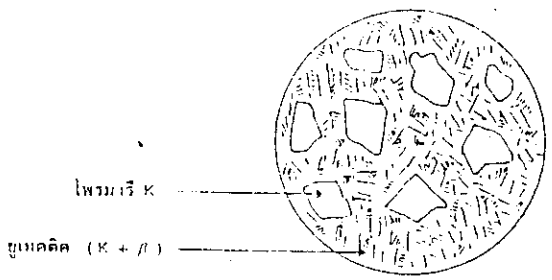
โลหะผสมที่มีซิลิคอนสูงกว่า 1.65% แต่ไม่เกิน 11.6% ซิลิคอน โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K โดยมีโครงสร้างยูเทคติค (K+β) อยู่รอบบริเวณขอบเกรน

โลหะผสมยูเทคติค (11.6% ซิลิคอน) โครงสร้างประกอบด้วย ผลึกขนาดเล็กของเฟส K กับเฟส β ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปเข็มเล็กๆ แทรกสลับกันอยู่ในเฟส K



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างโลหะผสมยูเทคติค (11.6 % ซิลิคอน)

โลหะผสมไฮโปยูเทคติค (มากกว่า 11.6% ซิลิคอน) โครงสร้างประกอบด้วยเฟส β เป็นลักษณะรูปไพลายเหนี่ยมกระจัดกระจาย โดยมีโครงสร้างยูเทคติค (K+β) ล้อมรอบดังภาพแสดง

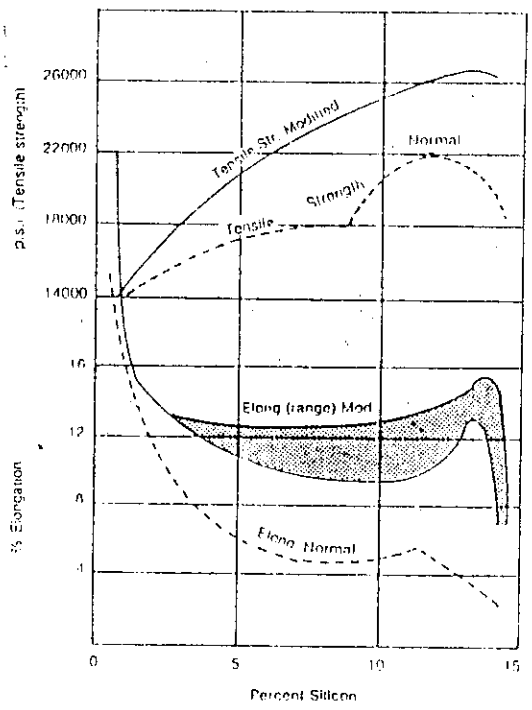


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างภายหลังการทำโมดิฟิเคชัน

สำหรับโครงสร้างภายหลังการทำโมดิฟิเคชัน จะปรากฏจุดยูเทคติคต่ำลง และเคลื่อนไปอยู่ที่ 14% โครงสร้างของโลหะผสมประเภทไฮโปยูเทคติค ไม่ค่อยมีผลทางด้านการเปลี่ยนแปลง เพียงแต่ลักษณะของเกรนจะเล็กละเอียดเพราะการเกิดปฏิกิริยายูเทคติคที่ให้เฟส K และ β พร้อม ๆ กันที่อุณหภูมิต่ำ (564°C) และมีเฟส K ชนิดไพมารีมีปริมาณสูงขึ้น

โครงสร้างของโลหะผสมยูเทคติค (11.6%Si) เมื่อจุดยูเทคติคเปลี่ยนไปอยู่ที่ 14%Si ภายหลังการทำโมดิฟิเคชัน โลหะผสมจึงให้โครงสร้างใหม่มีลักษณะเป็นโลหะผสมไฮโปยูเทคติคที่มี เฟส K ขนาดเล็กเกิดขึ้น และมีโครงสร้างยูเทคติคที่ประกอบด้วยเฟส K และเฟส β ขนาดเล็กเกิดขึ้นล้อมรอบเฟส K ที่เป็นไพมารีมีผลทำให้โลหะผสมภายหลังการทำโมดิฟิเคชันมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น

โครงสร้างของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติค (มากกว่า 11.6% Si) ในที่นี้ถ้าจะพิจารณาโลหะผสมที่ 14% ซิลิคอนภายหลังเมื่อทำโมดิฟิเคชั่นจะทำให้โลหะผสมนี้ กลายเป็นโลหะผสมยูเทคติค ซึ่งจะได้โครงสร้างภายหลังเย็นตัวเป็นลักษณะโครงสร้างยูเทคติค (K+ β) ที่มีขนาดเล็กละเอียดเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมที่ให้ผลสูงมาก ทั้งความแข็งแรงและความเหนียวดังปรากฏในภาพ ดังแสดงผลเปรียบเทียบระหว่าง Tensile strength ของโลหะผสมที่ปริมาณซิลิคอนต่างๆ กันระหว่างสภาพการเย็นตัวปกติในแบบทรายกับสภาพการเย็นตัวโดยผ่านการทำโมดิฟิเคชั่น



รูปที่ 2.6 Tensile Strength elongation on green sand cast Al-Si, normal and modified with Na

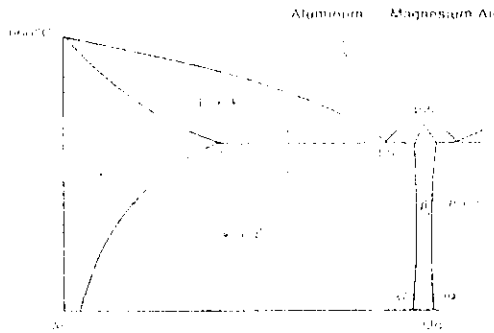
การเพิ่มคุณสมบัติปรับปรุงความแข็งด้วยการอบชุบความร้อน สามารถกระทำได้โดยการผสมธาตุอื่น เช่น แมกนีเซียม หรือ ทองแดง จะเกิดการรวมตัวให้สารประกอบกึ่งโลหะ เช่น Mg_2Si และ $CuAl_2$ ซึ่งเมื่อเกิดการตกผลึกในช่วงอุณหภูมิต่ำ จะมีผลต่อความแข็งของโลหะผสม โลหะผสมอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ที่ใช้ในงานผลิตชิ้นงานหล่อในเชิงพาณิชย์มีหลายชนิด ดังตัวอย่างในตารางแสดง

ตารางที่ 2.1 Commircial Al-Si Alloys

Alloy No.	% Si	Others	Use
43	5	None	Sand Casting
356	7	0.3 % Mg	Sand Casting
360	9.5	0.5 % Mg	Die Casting
45	10	None	Sand Casting
47	12	Na to modify	Sand Casting
13	12	None	Die Casting
132	12	0.8 % Cu 1.2 % Mg 2.5 % Ni	Perm.Mold. Casting
32 S	12.5	0.9 % Cu 1.0 % Mg 0.9 % Ni	Forging

2.6 โลหะผสมอลูมิเนี่ยม-แมกนีเซี่ยม

แมกนีเซียมเป็นโลหะผสมที่มีน้ำหนักเบา แต่มีจุดหลอมเหลวต่ำอยู่ในช่วงเดียวกับอะลูมิเนียม คือมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 651°C แต่เนื่องจากมีผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม จึงมีผลทำให้การละลายของแมกนีเซียมอลูมิเนียมไม่ได้มากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ คือประมาณ 3% ที่อุณหภูมิห้อง และได้สูงสุด 15.35% ที่อุณหภูมิ451°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยายูเทคติค โดยมีส่วนผสมยูเทคติคที่ 34.5% แมกนีเซียม ปฏิกิริยายูเทคติก จะให้เฟส K (F.C.C) กับเฟส β ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะมีสูตร Al_3Mg_2 มีแมกนีเซียม 37-39% มีความแข็งและเปราะ ดังรายละเอียดในแผนภูมิสมดุล



รูปที่ 2.7 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม

จากแผนสมดุลอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม จะเห็นว่าอัตราการละลายของแมกนีเซียมจะลดลงมากเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ดังนั้น โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม จึงมีแนวโน้มให้คุณสมบัติเพิ่มความแข็งได้ด้วยการอบชุบความร้อน โดยปรากฏการณ์ Precipitation Hardening ดังตัวอย่างเช่น โลหะผสม 9-11% แมกนีเซียม ภายหลังการทำให้เป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียว (Solution Treatment) ที่ 435 °C และทำให้เกิดความแข็งด้วยการตกผลึก (Aging) ที่อุณหภูมิระหว่าง 150°C -170°C จะได้ความแข็งแรงสูง 28 kg/mm^2 อัตราการยืดตัว 9% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง ภายหลังการทำ Aging แล้วจะได้ความแข็งแรง ต่ำกว่าเล็กน้อย

นอกจากโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม จะให้คุณสมบัติการอบชุบแข็งด้วยความร้อนแล้ว ยังให้ผลทางด้านเพิ่มความแข็งทางด้านขึ้นรูป (work hardening) ดีด้วยโดยจะเพิ่มความแข็งแรงภายหลังการขึ้นรูปเย็น ดังเช่นตัวอย่างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม 7% ภายหลังการทำ Solution Treatment และผ่านการรีดเย็นโดยลดขนาดให้เล็กลงประมาณ 40% จะได้ Tensile Strength เพิ่มขึ้นเป็น 40 kg/mm^2 แต่ขณะเดียวกันคุณสมบัติด้านความเหนียวจะลดลงเหลือยืดตัวเพียง 5%

โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเป็นโลหะผสมที่ให้คุณสมบัติด้านการหล่อไม่ดี เมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน การหล่อหลอมต้องกระทำด้วยการระมัดระวังเพราะแมกนีเซียมรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย และลุกไหม้ ต้องใช้ฟลักซ์ (Flux) ชนิดพิเศษคลุมผิวหน้าของโลหะหลอมเหลวไว้ เพื่อป้องกันการสูญเสียแมกนีเซียม การหล่อในแบบหล่อทราย จะมีการสูญเสีย

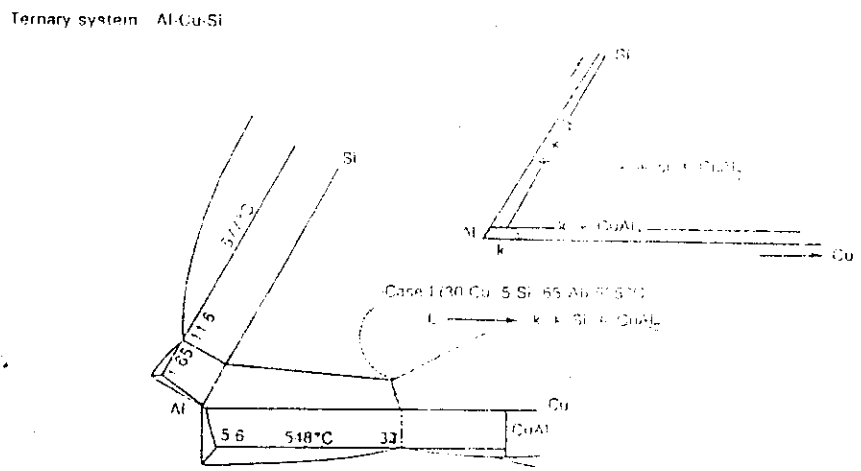
แมกนีเซียมได้ง่าย งานหล่อส่วนใหญ่จึงใช้แบบหล่อที่เป็นโลหะ และโดยเฉพาะการหล่อโดยการขึ้นรูป (Die Casting) จะลดการสูญเสียแมกนีเซียม

เบ้าที่ทำจากโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมมีน้ำหนักเบามีความต้านทานแรงดึงอยู่ในเกณฑ์ดี และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า จึงเหมาะกับลักษณะของงานที่ต้องการน้ำหนักเบา และทนการกัดกร่อน เช่นอุปกรณ์ที่ใช้ในเรือ ในเครื่องบิน หรือในเครื่องบินทะเล

โลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติทางด้านการหล่อหลอม และให้คุณสมบัติอบชุบแข็งด้วยความร้อน จะเป็นโลหะผสมที่ผสมทองแดง ซิลิคอน และแมกนีเซียม และอาจจะผสมโลหะผสมอื่นอีกบ้างเล็กน้อย เช่น แมงกานีส นิกเกิล และเหล็ก เป็นต้น ดังปรากฏรายละเอียดในตารางที่6

2.7 โลหะผสมอลูมิเนี่ยม-ทองแดง-ซิลิคอน

โลหะผสมชนิดนี้มีคุณสมบัติทางด้านการหล่อหลอมสูงมาก (Good Castability) และสามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อน (Age Hardening) อยู่ในเกณฑ์ดีพอสมควร โครงสร้างภายหลังการหล่อจะประกอบด้วยเฟส K , θ ($CuEl_2$) และ Si ซึ่งไม่ปรากฏสารประกอบเชิงโลหะของทั้งสามธาตุ (Ternary Intermetallic Phase) ดังนั้น ในส่วนผสมที่อยู่ใกล้ทางด้านอะลูมิเนียมและซิลิคอนจะมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยเฟส K และSi และถ้าส่วนผสมมาอยู่ใกล้ทางด้านอะลูมิเนียมและทองแดง โครงสร้างของโลหะผสมจะประกอบด้วยเฟส K กับ θ ($CuAl_2$) และเมื่อพิจารณาโลหะผสมในลักษณะระบบสามธาตุจะพบว่ามีปฏิกิริยายูเทคติคเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 525°C โดยโลหะหลอมเหลวส่วนผสม 65% Al,30% Cu และ 5% Si จะให้เฟส K , θ และ Si พร้อมกัน ดังภาพแสดงในแผนภูมิสมดุล $L \rightleftharpoons K + \theta + Si$



รูปที่ 2.8 แผนภูมิสมดุลแสดงสามธาตุ Al-Cu-Si

หมายเหตุ สารละลายของแข็งของอลูมิเนียมกับธาตุผสมแมกนีเซียม,ทองแดงหรือซิลิคอน จะเรียกเฟส α หรือบางทีก็เรียกเฟส K จะมีความหมายเหมือนกันก็คือเป็นสารละลายของแข็ง

การอบชุบแข็งด้วยความร้อนสำหรับโลหะผสม Al-Cu-Si คงอาศัยหลักการอย่างเดียวกันการทำแอจจิง (Aging) โลหะผสม Al-Cu โดยจะเริ่มด้วยการทำ Solution Treatment ก่อนในกรณีนี้สามารถทำให้เฟส θ หมดไปแต่เฟส Si จะสลายตัวได้ยากมาก เพราะต้องใช้อุณหภูมิสูงจึงจะทำให้ Si หมดไป การทำ Solution Treatment ที่อุณหภูมิประมาณ 500° C จึงมีผลเพียงแต่ทำให้ Si ซึ่งมีลักษณะเป็นเข็มแหลมให้เปลี่ยนเป็นลักษณะเป็นรูปกึ่งทรงกลม ย่อมมีผลทำให้โลหะผสมมีความเหนียวเพิ่มขึ้นมาก ภายหลังการทำ Solution Treatment นำโลหะผสมมาทำแอจจิงที่อุณหภูมิประมาณ 155° C เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกของเฟส θ ในสภาพ Coherent Precipitate จะเป็นการเพิ่มทั้งความแข็งและความแข็งแรงให้กับโลหะผสม โลหะผสมชนิดนี้ภายหลังการหล่อในแบบโลหะ ไม่จำเป็นต้องผ่านการทำ Solution Treatment สามารถทำแอจจิงได้เลย แต่ต้องทำที่อุณหภูมิประมาณ 230° C เพื่อจะได้มีผลทำให้เฟส ซิลิคอนมีการปรับตัวให้เป็นเม็ดกลมไปด้วย ซึ่งจะช่วยให้มีคุณสมบัติด้านความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ดี ตัวอย่างโลหะผสมกลุ่มนี้แสดงไว้ในตาราง

ตารางที่ 2.2 - โลหะผสมอลูมิเนียมสำหรับงานหล่อ

Alloys of this group are excellent for casting and have moderately good age hardening characteristics.

Alloy No.	% Cu	% Si	% Mg	Use
355	1.3	5	0.5	Sand Casting
319	3.5	6	–	Perm. Mold Casting
380	3.5	8.5	–	Die Casting
333	3.8	9	0.4	Perm. Mold Casting
108	4	3	–	Sand Casting
85	4	5	–	Die Casting
113	7	2	(1.7 Zn)	Sand Casting
162	7	5.5	0.3	Perm. Mold Casting
138	10	4	0.3	Perm. Mold Casting

For the most part, heat treatments are applied only to these alloys in which the [illegible]

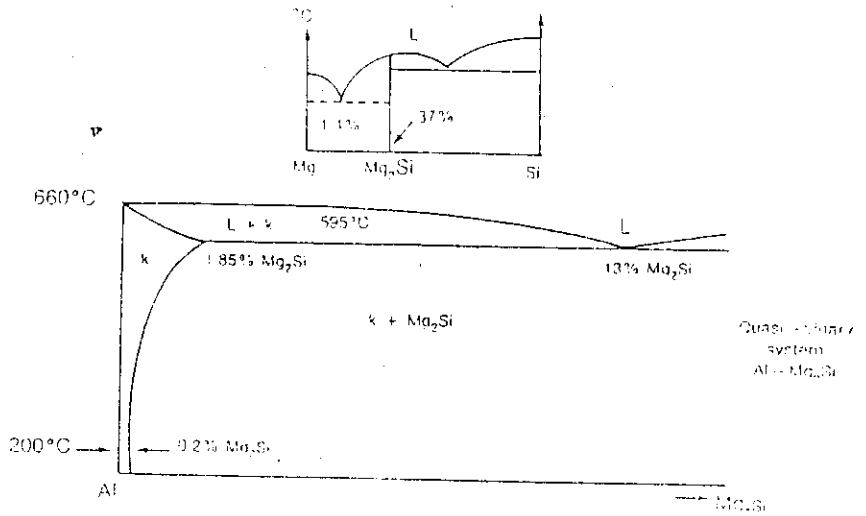
หรือเฟสพอก Coherent Precipitate หมายถึงการตกผลึกภายในสภาวะของแข็ง โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะเรียงตัวเรียงเรียงเป็นรูปแบบ (Matrix) ผิวการตกผลึกเกิดได้สมบูรณ์แรงเชื่อมประสานระหว่างผลึกไปเรียก Incoherent Precipitate

2.8 โลหะผสมอลูมิเนี่ยม-แมกนีเซี่ยม-ซิลิคอน

โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน เป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติทางด้านหล่อดีและให้คุณสมบัติทางด้านอบชุบแข็งได้ดีอีกด้วย เพราะถ้าพิจารณาระหว่างอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม โลหะผสมคู่นี้ให้ปรากฏการณ์ทางด้าน Precipitation Hardening หรือแอจจิง ถ้าพิจารณาโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียม-ซิลิคอนจะไม่ให้คุณสมบัติด้านชุบแข็ง แต่จะให้คุณสมบัติทางด้านหล่อ แต่ถ้าพิจารณาระหว่างแมกนีเซียมกับซิลิคอนปรากฏว่าแมกนีเซียมจะจับกับซิลิคอนให้สารประกอบเชิง

โลหะ Mg_2Si ที่ 37%Si และให้คุณสมบัติทางด้านหล่อและอบชุบแข็งด้วยกรรมวิธีเอจจิงยิ่งด้วยทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอนมีคุณสมบัติที่ดีทางด้านหล่อและการทำเอจจิง

โลหะผสม Al-Mg_2Si ที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อจะผสมแมกนีเซียมไม่เกิน 5% และผสมซิลิคอนไม่เกิน 2% ทั้งนี้เพราะถ้าผสมสูงกว่านี้ โลหะผสมในสภาพภายหลังการหล่อจะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียว เพราะทั้ง Mg_2Si และ Si มีคุณสมบัติเปราะถ้าตกผลึกภายในเฟส K มีลักษณะต่อเนื่องจะสูญเสียความเหนียว ดังนั้นการผสมซิลิคอนให้ต่ำเพื่อให้ซิลิคอนทั้งหมดไปรวมกับแมกนีเซียมเป็น Mg_2Siและในการศึกษาลักษณะโครงสร้างจะศึกษาจากแผนภูมิสมดุล Al-Mg_2Si



รูปที่ 2.9 แผนภูมิสมดุลกึ่งสองธาตุ Al $\rightleftharpoons$ Mg_2Si

แผนภูมิสมดุล จะเห็นว่าเฟส K ยอมให้ Mg_2Si ละลายได้สูงสุด 1.85% ที่อุณหภูมิ 595°C และให้ปฏิกิริยายูเทคติคที่ส่วนผสม Mg_2Si 13% ปฏิกิริยาที่เกิดจะเป็น $L \rightleftharpoons K+Mg_2Si$ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจาก 595°C จะปรากฏอัตราการละลายของ Mg_2Si ในเฟส K ลดลง จะเหลือ 0.2% ที่ 200°C

2.9 การหลอมละลายโลหะผสมอลูมิเนี่ยม

ในตอนนี้จะได้กล่าวถึงข้อควรระวังต่าง ๆ ในการหลอมละลายโลหะผสมอลูมิเนียมใช้เตาเบ้าเหล็กหล่อ (cast iron crucible furnace) เตาเบ้า (crucible furnace) และเตาสะท้อนความร้อนในการหลอมละลายโลหะผสมอลูมิเนี่ยม เฉพาะหลอมละลาย Al-7Si-0.3Mg และโลหะผสม Al-Mg ให้ใช้เบ้าคาร์บอนเพราะถ้าเหล็กติดเข้ามาในน้ำโลหะจะทำให้คุณสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง

วิธีการหลอมเหลวโดยใช้เบ้าเหล็กหล่อและเบ้าคาร์บอนมีดังนี้ เริ่มโดยการบรรจุเศษอลูมิเนียมแล้วจึงใส่อลูมิเนี่ยมใหม่และโลหะที่เป็นส่วนผสมหลัก แมกนีเซียมนั้นจะต้องกักไว้ที่ก้นเตา โดยใช้

เครื่องมือเช่นที่ใช้ในการเพิ่มฟอสฟอรัส (phosphoriser) แล้วปล่อยให้ละลาย เพราะถ้าปล่อยให้ลอย แมกนีเซียมจะหมดไปโดยปฏิกิริยากับออกซิเจน

เพื่อให้ละลายเร็วและลดการสูญเสียที่เกิดจากปฏิกิริยากับออกซิเจนให้น้อยที่สุดควรตัดโลหะออกเป็นชิ้นเล็กๆแล้วทำให้ร้อนขั้นแรกเสียก่อน เมื่อโลหะในเตาเริ่มละลายก็โปรยฟลักซ์ (flux) คลุม เพื่อมิให้เกิดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและมิให้น้ำโลหะดูดแก๊สจากบรรยากาศ และจะต้องกวนน้ำโลหะบ่อยๆเพื่อให้โลหะผสมกันเข้าแสมอและไม่มีการแบ่งแยก (segregation)

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวยา (flux) สำหรับอลูมิเนียมผสม

ตัวอย่าง ของผสม	เฮกซาฟลูอโร ซิลิซิค เอซิค โซเดียม	เฮกซาฟลูอโร ซิลิซิค เอซิค แคลเซียม	แมกนีเซียม คลอไรด์	แคลเซียม ฟลูอไรด์	โซเดียม คลอไรด์	โปแตสเซียม คลอไรด์	โปแตสเซียม ฟลูอไรด์
1	50		50				
2	60		40				
3		60	40				
4			14	40	38	8	
5			60	5	17.5	17.5	
6			83.5		11		5.5

ตารางข้างบน แสดงตัวอย่างของส่วนผสมของฟลักซ์ การใช้ฟลักซ์ที่ผ่านการทำให้แห้งแล้วประมาณ 1-3% จะช่วยดึงแก๊สออก และลดรูพรุน (blow hole and pin hole) และทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น หลังจากหล่อแล้วการทำด้วยความร้อนเพื่อขจัดความเค้นที่เกิดจากการหล่อ และเพื่อการทำด้วยเครื่องกลโรงงานได้สะดวกขึ้นตลอดจนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล