

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 โลหะผสม อะลูมิเนียม-ซิลิกอน

การใช้งานส่วนใหญ่ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนคืองานหล่อ การใช้งานด้านงานเชื่อมและงานตีขึ้นรูปมีบ้าง ถ้าเป็นโลหะผสมที่ไม่มีส่วนผสมของทองแดงมักใช้กับงานหล่อที่ต้องการความแข็งแรงปานกลางและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี ส่วนอะลูมิเนียมผสมที่มีส่วนผสมของทองแดงใช้กับงานที่มีความแข็งแรงสูงซึ่งไม่ต้องการคุณสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนมากนัก เนื่องจากการที่มีคุณสมบัติความสามารถในการหล่อดี โลหะผสมกลุ่มนี้จึงสามารถนำมาหล่อเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้และทำให้มีคุณสมบัติทางกลดีกว่าชิ้นงานหล่อจากโลหะผสมอื่นที่มีความแข็งแรงสูงและไม่สามารถหล่อได้ดี

ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมกลุ่มอะลูมิเนียม-ซิลิกอนซึ่งเปรียบเทียบกับส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมตามมาตรฐาน JIS H5202 ที่ได้นำมาศึกษาครั้งนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

2.1.1 การใช้งานของอะลูมิเนียมผสมเกรด AC2B และ AC4B

อะลูมิเนียมผสมเกรด AC2B เทียบเท่าเกรด AA319.0 มีคุณลักษณะในการหล่อได้ดีเป็นที่นิยมแพร่หลาย สำหรับงานหล่อทั่ว ๆ ไป ทำการหล่อได้ทั้ง แบบหล่อโลหะหรือแบบหล่อทรายหรือแบบหล่อเปลือก (Shell mould) ตัวอย่างงานเห็นได้ทั่วไปคือใช้ทำวาล์ว เสื้อสูบเครื่องยนต์ กระจุกคลัชเป็นต้น

อะลูมิเนียมผสมเกรด AC4B เทียบเท่าเกรด AA333.0 มีความสามารถในการหล่อดี มีความแข็งแรงสูง แต่อัตราการยึดตัวค่อนข้างต่ำ ใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับงานหล่อทั่วไป ตัวอย่างงานคือใช้ทำ เสื้อสูบเครื่องยนต์ ฝาสูบเครื่องยนต์ ท่อไอเสีย อุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับอากาศยาน

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมกลุ่ม Al-Si⁽⁹⁾ เปรียบเทียบกับ AC2B (319.0) และ AC4B (333.0) ตามมาตรฐาน JIS H 5202

ส่วนประกอบทางเคมี	กลุ่ม Al-Si (wt.%)	AC2B (wt.%)	AC4B (wt.%)	
Si	5 -25.0	5.0 - 7.0	7.0 - 10.0	
Cu	0 - 5.0	2.0 - 4.0	2.0 - 4.0	
Mg	0 - 2.0	0.5 max	0.5 max	
Fe	0 - 3.0	1.0 max	1.0 max	
Mn	0 - 2.0	0.5 max	0.5 max	
Ni	}	0.35 max	0.35 max	
Cr		0.2 max	0.2 max	
Co		< 3.0	-	-
Mo		-	-	-
Be		-	-	-
Zr	}	-	-	
Ti		-	0.2 max	0.2 max
Pb		-	0.2 max	0.2 max
Sn		-	0.1 max	0.1 max
Na,Sr		< 0.02	-	-
P	< 0.01	-	-	

2.1.2 อิทธิพลของส่วนประกอบทางเคมี

1. ซิลิคอน (Si) อิทธิพลที่สำคัญของซิลิคอนในอะลูมิเนียมผสมคือปรับปรุงความสามารถในการหล่อเช่น เมื่อเติม Si ลงในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ จะทำให้ความสามารถในการไหลตัวดีขึ้น มีความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น การป้อนโลหะหลอมเหลวขณะทำการหล่อดีขึ้น ชิ้นงานหล่อทนการเสียดสีดีขึ้น มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและความถ่วงจำเพาะลดลง

2. ทองแดง (Cu) โลหะผสมที่นิยมในการใช้งานจะมีทองแดง 4-10% ทองแดงมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะผสม โดยการเกิดสารละลายแข็ง (Solid Solution Strengthening) และการเกิดผลึกที่ละเอียด (Precipitation Hardening) ทองแดงจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลงเนื่องจากเกิดกัลวานิกเซลล์เฉพาะที่ขึ้นที่อุณหภูมิสูงทองแดงจะเพิ่มความต้านทานต่อการแตกร้าวลดลงและความสามารถในการหล่อจะลดลงด้วย

3. แมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งในอะลูมิเนียมผสม Al-Si โดยการตกผลึกที่ละเอียด (Precipitation Hardening) รวมทั้งอะลูมิเนียมผสม Al-Si ที่มีธาตุอื่นผสมด้วย เช่น ทองแดง นิกเกิล ถ้าเป็นโลหะผสม Al-Mg แมกนีเซียมจะทำให้ผิวของชิ้นงานเป็นเงางาม ทนการกัดกร่อนดี รวมทั้งจะเพิ่มความแข็งแรงโดยสารละลายแข็ง (Solid Solution Hardening) และความเหนียวดีขึ้น

4. เหล็ก (Fe) มีผลในการเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดการแตกร้าวที่อุณหภูมิสูง และลดปัญหาชิ้นงานหล่อติดแบบ⁽²⁾ ถ้าปริมาณของเหล็กเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเหนียวลดลง และเกิดเฟสต่าง ๆ ขึ้น เช่น $FeAl_3$, $FeMnAl_6$ และ $\alpha AlFeSi$ ซึ่งเฟสเหล่านี้จะเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้ามีสัดส่วนของเฟสเหล่านี้มากขึ้นจะมีผลเสียต่อความสามารถในการไหลและลักษณะการป้อนโลหะหลอมเหลวได้

5. แมงกานีส (Mn) ปกติถือว่าเป็นสารมลทินในงานหล่อ จึงต้องควบคุมให้มีปริมาณต่ำ แต่แมงกานีสจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการรีดขึ้นรูป แมงกานีสจะมีผลมากในโลหะผสมกลุ่มที่ได้ความแข็งแรงจากการทำให้เกิดความเครียด (Strain Hardening)

6. นิกเกิล (Ni) มีผลในการเพิ่มคุณสมบัติต้านทานความเคืบเนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีผลทำให้เกิดการลุดของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากการความรอน

7. สังกะสี (Zn) การเติมสังกะสีลงในอะลูมิเนียม จะไม่ค่อยมีประโยชน์นัก แต่เติมสังกะสีพร้อม ๆ กับทองแดงหรือแมกนีเซียม สังกะสีรวมตัวกับธาตุเหล่านี้เกิดสารประกอบเชิงโลหะและจะมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความรอน

8. ไทเทเนียม โบรอน และเซอร์โคเนียม การเติมไทเทเนียมปริมาณเล็กน้อย ในอะลูมิเนียมผสมในงานหล่อแบบทรายและแบบถาวร มีผลทำให้ขนาดของเกรนอะลูมิเนียมปฐมภูมิละเอียด โบรอนเติมในปริมาณ 0.005%-0.1% โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปจะเติมพร้อม กับไทเทเนียม เพื่อปรับปรุงระดับความละเอียดของเกรนและผลของโบรอนยังคงอยู่แม้ว่าจะทำการหลอมหลายครั้ง เซอร์โคเนียมก็เป็นธาตุที่ทำให้เกรนละเอียดแต่ใช้ปริมาณที่มากจึงจะทำให้มีผลเท่ากับการเติมไทเทเนียมหรือไทเทเนียม - โบรอน

9. โซเดียม (Na) และสตรอนเทียม (Sr) เป็นธาตุที่ใช้ในการปรับโครงสร้างจุลภาคยูเทคติกของ Al-Si มีผลให้เปลี่ยนโครงสร้างแบบเข็มหรือแผ่นเป็นรูปร่างทรงกลมละเอียด ซึ่งมีผลให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น การเติมโซเดียมจะเติมในสภาพที่เป็นธาตุประมาณ 0.001-0.003% โดยน้ำหนัก สตรอนเทียมจะเติมในรูปโลหะผสมหลัก(Master alloy) ปกติประมาณ 0.01-0.03% โดยน้ำหนักความแตกต่างของทั้ง 2 ธาตุนี้คือ ปริมาณโซเดียมจะ สูญเสียในระหว่างการปรับโครงสร้างมากกว่าและทำให้มีผลต่อการปรับโครงสร้างน้อยกว่าสตรอนเทียม

10. บิสมัท (Bi) ตะกั่ว (Pb) และดีบุก (Sn) บิสมัทและตะกั่วจะทำให้เกิดเฟสที่ไม่ละลายในโครงสร้างงานหล่อและทำเศษโลหะหัก (Chip Breaker) ในระหว่างการตัดเฉือนซึ่งมีผลให้สามารถตัดเฉือนที่ความเร็วตัดสูงได้ดี ดีบุกก็มีผลต่อการตัดเฉือนเช่นกัน นอกนั้นยังมีผลต่อคุณสมบัติแข็งของโลหะผสมอีกด้วย

11. ฟอสฟอรัส (P) ประโยชน์ที่ได้รับเมื่อเติมฟอสฟอรัส 0.01-0.03% โดยน้ำหนักในอะลูมิเนียมผสมกลุ่มไฮเปอร์ยูเทคติก คือ จะทำให้ซิลิคอนปฐมภูมิละเอียดโดยเฟส อะลูมิเนียม-ฟอสฟอรัส จะเกิดขึ้นก่อนซิลิคอนปฐมภูมิ และทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้

กับซิลิคอนปฐมภูมิ ถ้าเติมฟอสฟอรัสพร้อมกับโซเดียม ต้องพิจารณาผลกระทบซึ่งกันและกัน ดังนั้นในกลุ่มไฮเปอร์ยูเทคติกต้องให้มีโซเดียมต่ำเพื่อให้ฟอสฟอรัสมีผลในการทำให้เกรนละเอียดขณะที่ กลุ่มไฮเปอร์ยูเทคติกต้องมีฟอสฟอรัสต่ำเพื่อให้โซเดียมสามารถปรับโครงสร้างได้

2.1.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมกลุ่มอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

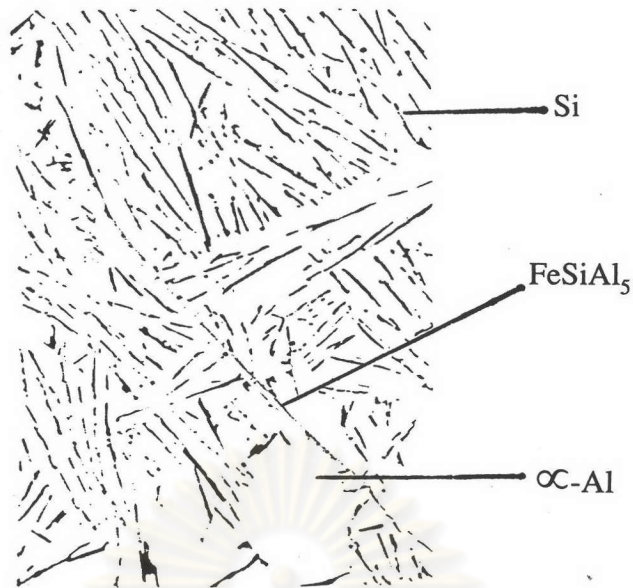
โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Al-Si ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีในกลุ่มไฮโปยูเทคติกที่ได้จากหล่อขึ้นรูป โดยพื้นฐานจะประกอบด้วย เฟสปฐมภูมิ α -Al และโครงสร้างยูเทคติกของอะลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นหลัก ดังแสดงในรูป 1.1 ซึ่งปริมาณของแต่ละเฟสจะขึ้นปริมาณของซิลิคอนที่มีอยู่ในเนื้อโลหะ นอกจากนี้ธาตุผสมอื่น เช่น Fe Mg Cu ยังก่อให้เกิดเฟสอื่นอีกในอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ซึ่งส่วนมากเฟสเหล่านี้มักจะอยู่ที่ขอบเกรนของ α -Al ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏยังสามารถแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการเย็นตัวของแบบหล่อโลหะและการปรับโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 2.1 ถึง 2.5



รูปที่ 2.1⁽⁹⁾ อะลูมิเนียมผสม 12% Si 0.3% Fe ผ่านการปรับโครงสร้าง หล่อในแบบทราย กำลังขยาย 250 เท่า ไม่ผ่านการกัดด้วยกรด รูปเข็มสีเทาจากคือ FeSiAl₅ รูปร่างก่อนข้างกลม และสีเทาเข้มกว่าคือ Si

ตารางที่ 2.2 เฟสที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน
 PHASES FORMED IN THE ALUMINUM-SILICON ALLOYS⁽⁹⁾

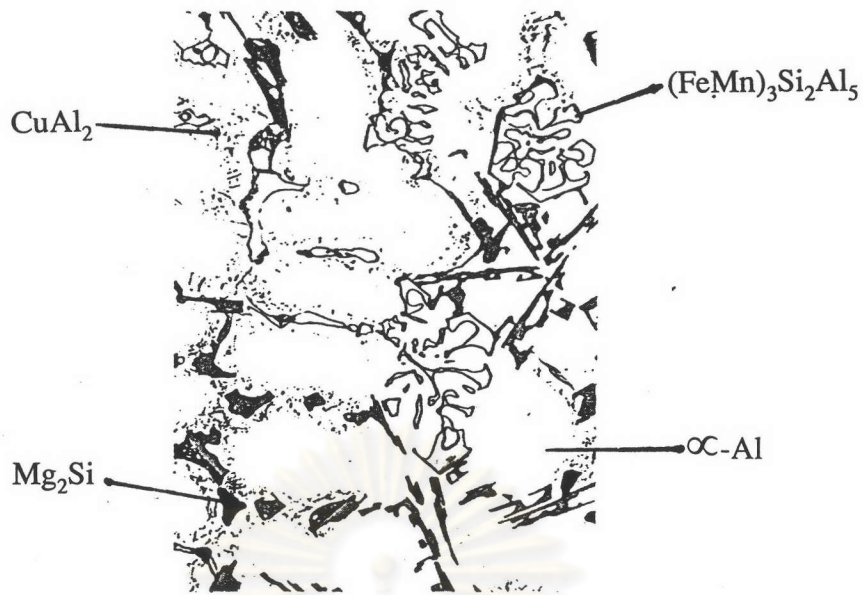
Si < 12%	Si > 12%	Mg > 0.2%	Fe > 0.05%	Mn > 0.1%	Cr > 0.1%	Fe > Mg	Mg > 2 Cu
Si eutectic	eutectic and primary	Mg ₂ Si	FeSiAl ₅	(FeMn) ₃ Si ₂ Al ₁₅	(CrFe) ₄ Si ₄ Al ₁₃	FeMg ₃ Si ₆ Al ₈	Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ Al ₅
Na < 0.01%	Na > 0.01%						
Na dispersed	(NaAl)Si ₂						
P < 0.01%	P > 0.01%						
P dispersed	AlP, often inside Si crystals						
Fe < 0.7%	Fe > 0.7%	Co > 0.1%	Cr > 0.1%	Mn > 0.2%	Mo > 0.1%	Ni > 0.1%	Mg < Fe
Fe eutectic	FeSiAl ₅ primary	(CoFe) ₂ Al ₉	(CrFe) ₄ Si ₄ Al ₁₃ or (CrFe) ₅ Si ₈ Al ₂	(FeMn) ₃ Si ₂ Al ₁₅	AlFeMo(?)	FeNiAl ₉	FeMg ₃ Si ₆ Al ₈
Mg < 0.2%	Mg > 0.2%, Cu < 0.2%, Fe < Mg						
Mg in solid soln.	Mg ₂ Si			Cu < 1/2 Mg	Fe > Mg		
				Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ Al ₅	Fe > Mg ₃ Si ₆ Al ₈		
Cu < 1%	Cu > 1%, Mg < 0.2%, Fe < 0.3%						
Cu in solid soln.	CuAl ₂					Cu > 1%, Mg > 2Cu	
							CuMg ₈ Si ₆ Al ₅
Co	(CoFe) ₂ Al ₉						
Cr	(CrFe) ₄ Si ₄ Al ₁₃ or (CrFe) ₅ Si ₈ Al ₂						
Mn	(FeMn) ₃ Si ₂ Al ₁₅						
Zn	in solid soln.						



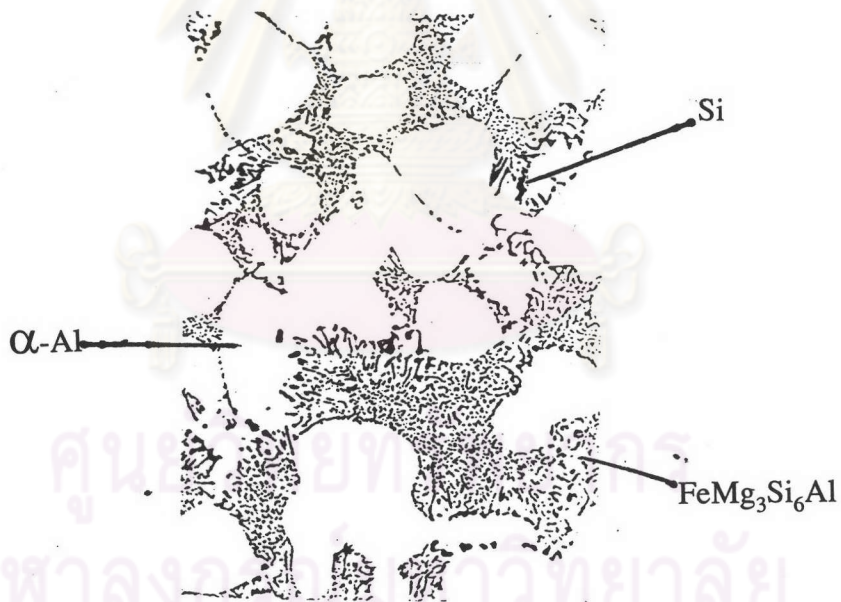
รูปที่ 2.2⁽⁹⁾ อะลูมิเนียมผสม 10% Si 0.9% Fe หล่อในแบบทราย ไม่ผ่านการปรับ
ด้วยกรด กำล้างขยาย 250 เท่า ไม่ผ่านการกัดด้วยกรด รูปร่างเข็มสี่เหลี่ยมคือ Si สี่เหลี่ยมจาง คือ
ผลึกปฐมภูมิของ FeSiAl₅



รูปที่ 2.3⁽⁹⁾ อะลูมิเนียมผสม 5% Si 0.2% Fe และ P กำล้างขยาย 250 เท่า ไม่
ผ่านการทำเอชซิง โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย ผลึกหยาบของ Si และ ยูเทคติกของ
Al - FeSiAl₈ - Si ละเอียด



รูปที่ 2.4⁽⁹⁾ อะลูมิเนียมผสม 5% Si 0.7% Fe 0.35% Mn 1.5% Cu 1% Mg
 หล่อด้วยแบบทราย กำลังขยาย 250 เท่า ผ่านการกัดด้วยสารละลายกรด HF $(\text{FeMn})_3\text{Si}_2\text{Al}_5$
 มีรูปร่างตัวหนังสือจีน CuAl_2 สีเทาจาง Mg_2Si สีดำ Si สีเทาเข้ม



รูปที่ 2.5⁽⁹⁾ อะลูมิเนียมผสม 7% Si 0.5% Fe 0.6% Mg ปรับโครงสร้างจุลภาค
 ด้วยโซเดียม หล่อในแบบโลหะ กำลังขยาย 250 เท่า ไม่ได้กัดด้วยกรด สีเทาจางคือ
 $\text{FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}$ สีเทาเข้มคือ Si

2.1.4 คุณสมบัติของอะลูมิเนียมผสม Al-Si

Lattice parameter ของอะลูมิเนียมผสมลดลงเล็กน้อย ตามปริมาณ Si ที่ละลาย และเพิ่มตามปริมาณของ Cu ดังนั้น lattice parameter มีค่า $a = 4.045 \times 10^{-10}$ m. ถึง $a = 4.05 \times 10^{-10}$ m. โดยขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการปรับคุณสมบัติด้วยความร้อน ความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณของ Si ที่ไม่ละลายใน α -Al และ Mg แต่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของธาตุอื่นและ Si ที่ละลายใน Al ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 2600-2700 kg/m³ การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลงตามปริมาณของซิลิกอน ซึ่งธาตุผสมอื่น เช่น Fe Mn Zn ก็มีผลเช่นเดียวกับซิลิกอนแต่น้อยกว่ามาก ยกเว้นแมกนีเซียม จะมีผลต่อการเพิ่มอัตราการขยายตัวตามความร้อนเล็กน้อย ดังนั้นโดยพื้นฐานแล้วสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะถูกควบคุมด้วยปริมาณของซิลิกอน ดังเฟสในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (10^{-6} m/m/K) ของอะลูมิเนียมผสม Al-Si ซึ่งมี Co Cr Cu Fe Mg Ni Ti Zr ผสมรวมไม่เกิน 2% โดยน้ำหนัก⁽⁹⁾

ปริมาณของ Si (wt.%)	ช่วงอุณหภูมิ (K)	
	300 - 400	300 - 600
5	22.1 - 22.5	24.1 - 24.5
7 - 9	21.4 - 21.7	23.1 - 23.5
12	19.9 - 20.6	21.6 - 23.1
> 14	18 - 19	20 - 21

อัตราการหดตัวในการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้ จะลดลงเมื่อมีปริมาณของซิลิกอนมากขึ้น ซึ่งผลของธาตุอื่นมีผลบ้างเล็กน้อย อัตราการหดตัว 3 - 4% เมื่อมีซิลิกอน 6 - 12% และอัตราการหดตัว 1 - 2% เมื่อมี 20 - 24% Si ค่าความนำความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง

$1.2 - 1.6 \times 10^{-2} \text{ W/m/K}$ ค่าต่ำกว่าเป็นค่าความนำความร้อนสำหรับโลหะผสมสำหรับหล่อ ในแบบหล่อโลหะ ความสามารถในการไหลตัว (Fluidity) ของอะลูมิเนียมผสม Al-Si มีความสามารถในการไหลตัวสูงมาก และมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสมเป็นยูเทคติก (12.5%Si) ธาตุผสมอื่นจะมีผลทำให้ความสามารถในการไหลลดลง

คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม Al-Si ในสภาพหล่อแสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งอะลูมิเนียมรีดขึ้นรูปทั่วไปจะมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดประมาณ $200 - 400 \text{ MN/m}^2$ และอัตราการยืดประมาณ 20 ถึง 2 - 3% การเพิ่มปริมาณของซิลิคอน จะเพิ่มความแข็งแรงแต่สูญเสียความเหนียว การปรับโครงสร้างจุลภาคด้วยโซเดียมสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้จำกัด ความเหนียวจะดีถ้าหล่อในแบบหล่อทราย ผลของขนาดเซลล์ (Cell Size) และระยะระหว่างแขนของเดนไดรต์ (Dendrite arm Spacing) ต่อคุณสมบัติทางกลสำหรับอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนที่มี Si มากกว่า 8% นั้นมีผลค่อนข้างน้อยแต่ถ้ามี Si น้อยกว่า 8% จะมีผลมากกว่า อนึ่งคุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสม AC2B และ AC4B แสดงดังรูปที่ 2.5

ค่าความเค้นอัดสูงสุดจะสูงกว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดประมาณ 10-15% ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดประมาณ 70% ของค่าความเค้นดึงสูงสุด ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าต่ำ ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกสามารถปรับปรุงได้โดยทำให้ซิลิคอนมีรูปร่างกลม ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของโลหะผสมกลุ่มนี้อยู่ระหว่าง $85-95 \text{ GN/m}^2$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ^(๑)

คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม Al-Si

	Sand cast			Permanent mold, die cast			Heat treated, artificially aged					
	H _v	UTS	YS	%E	H _v	UTS	YS	%E	H _v	UTS	YS	%E
Al-Si: 5-7% Si												
n.m.	400-500	80-140	40-60	3-5	450-550	100-200	50-80	5-10				
m.	400-500	100-150	50-70	4-10	450-550	120-200	70-100	8-12				
Al-Si: 9-12% Si												
n.m.	600-700	100-150	50-80	1-5	600-700	150-220	60-100	4-8				
m.	600-700	150-200	70-120	10-14	600-700	200-250	100-150	10-15				
Al-Si: 5-10% Si, 0.2-0.3% Mg												
n.m.	600-700	100-150	60-80	1-3	700-900	150-250	100-200	2-6	800-1000	250-320	200-250	1-6
Al-Si: 5-12% Si, 0.5% Mg, 1-2.5% Cu												
n.m.	700-800	150-200	80-120	1-3	800-1000	200-300	100-200	1-5	800-1300	250-400	200-300	4-0
Al-Si: >12% Si+Mg, Cu, Ni, etc.												
n.m.	700-900	100-150	40-70	0-3	800-1000	100-200	80-120	0-2	1000-1600	200-300	150-250	3-0
Al-Cu-Si: 2-6% Cu, 3-12% Si												
n.m.	600-800	150-200	100-150	0-3	600-900	200-300	120-180	1-4	800-1000	200-300	150-200	0-3
Al-Cu-Si: 3-12% Si, 2-6% Cu, 0.5-1.5% Mg												
n.m.	600-800	150-200	100-150	0-3	750-950	200-300	150-250	0-3	800-1200	250-350	200-300	0-2

n.m. = ไม่ปรับโครงสร้างอุณหภูมิ m = ปรับโครงสร้างอุณหภูมิ H_v, UTS, YS มีหน่วยเป็น MN/m²

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม AC2B และ AC4B จาก JIS H 5202

เกรด	กระบวนการปรับคุณสมบัติ	สัญลักษณ์	ความเค้นแรงดึงสูงสุด N/mm ²	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว %	ค่าความแข็ง HB (10/500/30)
เกรด 2B	สภาพหล่อขึ้นรูป	AC2B-F	ไม่ต่ำกว่า 157	ไม่ต่ำกว่า 1	ประมาณ 70
	อบและชุบและอบบ่ม	AC2B-T6	ไม่ต่ำกว่า 245	ไม่ต่ำกว่า 1	ประมาณ 90
เกรด 4B	สภาพหล่อขึ้นรูป	AC4B-F	ไม่ต่ำกว่า 177	-	-
	อบและชุบและอบบ่ม	AC4B-T6	ไม่ต่ำกว่า 245	-	-

ค่าความต้านการล้าของอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม อะลูมิเนียม-ซิลิกอน มีค่าต่ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าไม่ได้ปรับโครงสร้างจุลภาคของเฟสซิลิกอน หรือทำให้ซิลิกอนมีรูปร่างกลมด้วยกระบวนการทางความร้อน ค่าความต้านการล้าสำหรับกลุ่มไฮโปยูเทคติก อยู่ในช่วง 50-70 MN/m² ในกรณีมีส่วนผสมของทองแดงจะมีค่าความต้านการล้าสูงขึ้นคือ 70-80 MN/m² ส่วนโลหะในกลุ่มไฮเปอร์ยูเทคติกมีค่าต่ำมาก

2.2 การหล่ออะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมผสมเป็นโลหะที่สามารถหล่อได้ง่ายในทุกกระบวนการผลิต การหล่อโลหะโดยมากใช้ การหล่อแบบฉีดโลหะ (Die Casting) หล่อด้วยแบบถาวร หล่อด้วยแบบทราย อินเวสเมนต์คาสติง (Investment Casting) ในการเลือกกรรมวิธีการหล่อที่เหมาะสมของแต่ละงานหล่อนั้นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่าง ตารางที่ 2.6 ได้แสดงปัจจัยที่สำคัญและข้อจำกัดในการเลือกกรรมวิธีการหล่อที่สำคัญสำหรับอะลูมิเนียมผสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 ⁽¹⁴⁾ ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกกรรมวิธีการหล่อ สำหรับอะลูมิเนียมผสม

ปัจจัย	กรรมวิธีการหล่อ		
	แบบทราย	แบบถาวร	แบบฉีดโลหะ
ราคาอุปกรณ์	ถูกที่สุดถ้าหล่อจำนวนน้อยชิ้น	ถูกกว่าแบบฉีดโลหะ	แพงที่สุด
ขนาดของงานหล่อ	โตที่สุดของการหล่อ	จำกัดโดยขนาดของเครื่องหล่อ	จำกัดโดยขนาดของเครื่องหล่อ
รูปร่างภายนอกและรูปร่างภายใน	เหมาะกับงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและต้องการวางแกนคอร์	งานที่วางแกนคอร์ง่าย ๆ แต่ยุ่งยากในการหล่อด้วยแบบทราย	แกนคอร์ต้องสามารถดึงออกได้
ความหนาต่ำสุด	3.0 - 5.0 มม. ปกติ 4.0 มม.	3.0 - 5.0 มม. ปกติ 3.5 มม.	1.0 - 2.5 มม. ขึ้นอยู่กับขนาดงานหล่อ
ประเภทของแกนคอร์ (Core)	สามารถใช้แกนคอร์ทราย	สามารถใช้แกนคอร์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เช่นเหล็กกล้า	แกนคอร์เหล็กกล้าที่ง่ายและตรง สามารถถอดได้
ค่าความแม่นยำที่ทำได้	ดีที่สุด 30 มม./เมตร	10 มม./เมตร	4 มม./เมตร
ความหยาบผิวงานหล่อ	6.5-12.5 ไมครอน	4.0-1.0 ไมครอน	1.5 ไมครอน ซึ่งดีที่สุดใน 3 กรรมวิธีการหล่อ

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

ปัจจัย	กรรมวิธีการหล่อ		
	แบบทราย	แบบถาวร	แบบฉีดโลหะ
รูพรุนอากาศ	ต่ำสุดถ้าเทคนิคถูกต้อง	เกิดรูพรุนน้อยถ้าเทคนิคถูกต้อง	อาจเกิดรูพรุนได้
อัตราการเย็นตัว	0.1-0.5°C/วินาที	0.3-1.0°C/วินาที	50-500°C/วินาที
ขนาดเกรน	หยาบ	ละเอียด	ละเอียดมากที่สุด
ความแข็งแรง	ต่ำที่สุด	ดีเลิศ	สูงที่สุดปกติใช้ในสภาพหล่อ
คุณสมบัติด้านการสึกหรอ	ดี	ดี	ดีเลิศ
คุณภาพโดยรวม	ขึ้นอยู่กับเทคนิคการหล่อ	คุณภาพสูงที่สุด	ยอมรับได้และความสามารถผลิตซึ่งได้ดีมาก
หมายเหตุ	สามารถปรับเปลี่ยนได้หลากหลาย เช่น ขนาดรูปร่าง ลักษณะภายใน	-	ดีเลิศสำหรับอัตราการผลิตสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เกรดของอะลูมิเนียมผสมที่มักใช้ในการหล่อด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบฉีดและการใช้งานโลหะผสมต่าง ๆ แสดงไว้ต่อไป ดังนี้

โลหะผสม	ชิ้นงาน
380.0	กระปุกเกียร์ ฝาสูบเครื่องยนต์ระบายความร้อนด้วยอากาศ
A380.0	โครงหลอดไฟถนน โครงพิมพ์ดีด อุปกรณ์ทำฟัน
360.0	ฝาครอบ ชิ้นส่วนที่ป้องกันการกัดกร่อน
413.0	ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ใช้งานกลางแจ้ง เช่น ลูกสูบ ก้านสูบ
518.0	ชิ้นส่วนอุปกรณ์ขนถ่าย อากาศยานและเรือเดินทะเล

ชนิดการใช้งานของอะลูมิเนียมผสมที่ผลิตขึ้นด้วยกรรมวิธีการหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

366.0	ลูกสูบริดยนต์
355.0 C355.0 A357.0	เฟือง ใบพัด คอมเพรสเซอร์ ชิ้นส่วนอากาศยานและจรวด
356.0 A356.0	ชิ้นส่วนเครื่องมือกล ขอบล้ออากาศยาน ชิ้นส่วนปั๊ม ตัววาล์ว
B443.0	คาบูเรเตอร์ เตารีด
513.0	ลูกกรง และข้อต่อในงานสถาปัตยกรรม

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อด้วยแบบทราย แสดงไว้ดังนี้

C355.0	ข้อต่อคอมเพรสเซอร์ลม เครื่องยนต์ กระปุกเกียร์
A356.0	กระปุกเกียร์รถยนต์ อ่างน้ำมันเครื่อง กระปุกเพลาลัง
357.0	เครื่องยนต์หล่อเย็นด้วยน้ำ ปั๊มน้ำ
443.0	ข้อต่อท่อ อุปกรณ์ครัว
520.0	ข้อต่อต่าง ๆ ในอากาศยาน โครงรถโดยสาร รถบรรทุก
713.0	งานหล่อใช้งานทั่วไปที่ต้องการความแข็งแรงโดยไม่ต้องผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน

2.3 พฤติกรรมการล้าของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ในสภาพหล่อ

อายุการล้าเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบชิ้นงานหล่อ เพื่อด้านการล้า อายุการล้าหรือที่เรียกว่า เส้นโค้ง S-N นี้ ได้จากทดสอบชิ้นทดสอบให้รับแรงสลับที่ระดับต่าง ๆ กันและวัดจำนวนรอบของการรับแรงสลับ ณ จุดที่เกิดแตกหักเกิดขึ้น

ชิ้นงานหล่อ โดยทั่วไปจะมีอายุการล้าต่ำกว่าชิ้นงานที่ได้จากการรีดขึ้นรูป เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน กล่าวคือ โครงสร้างจุลภาคในงานหล่อมักมีสภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีข้อบกพร่องต่าง ๆ เช่น รูพรุน มลทิน ซึ่งข้อบกพร่องเหล่านี้จะมีผลในการลดคุณสมบัติเชิงกลอย่างมาก M.K. Surappa และคณะ⁽¹⁰⁾ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของรูพรุนต่อความเค้นแรงดึงสูงสุดและความเหนียว (ductility) ของ Al-7Si-0.3Mg ผ่านการหล่อแบบฉีด ซึ่งผ่านกรรมวิธีปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลด้วยความร้อนพบว่า (1) ความเหนียวและความเค้นแรงดึงสูงสุดของ Al-7Si-0.3Mg ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนมากกว่าขึ้นอยู่กับปริมาณ (2) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ระหว่างอัตราการยืดตัว (Percentage of Elongation) และความยาวของรูพรุนบนผิวของการแตกหักของชิ้นงานหล่อ (3) ความแข็งแรงและความเหนียวสามารถกำหนดได้ถ้าทราบขนาดของรูพรุน นอกจากนี้ มีการศึกษาผลของข้อบกพร่องงานหล่อต่อพฤติกรรมการล้าของชิ้นงานหล่อของนักวิจัยหลายท่าน (Evans et al.; 1956, Heuler et al.; 1992, Gungor และ Ddwards, 1993 Skalleurd et al.; 1993) สรุปได้ว่า (1) รอยร้าวในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมและเหล็กกล้า เริ่มต้น ณ ตำแหน่งที่มีข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อ (2) ข้อบกพร่องที่ผิวและใกล้ผิวเป็นจุดเริ่มต้นรอยร้าวก่อนข้อบกพร่องตรงใจกลางชิ้นทดสอบ และในเอกสารต่อไปนี้จะกล่าวถึงการศึกษาถึงอิทธิพลของรูพรุนและข้อบกพร่องอื่นต่อการขยายรอยแตกร้าวโดย Gerard และ Koss (1991)⁽¹¹⁾ พบว่าการมีรูพรุนช่วยขยายของรอยร้าวเนื่องจากผลการเกิดการแปรรูปถาวรเฉพาะที่ J.M. Boileau และ J.E. Allison⁽¹¹⁾ ได้ศึกษาพฤติกรรมการล้าของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด 320 (7.45%Si 3.63%Cu 0.36%Fe 0.28%Mg 0.26%Mn 0.12%Ti 0.12%Zn 0.02%Ni) มีวัตถุประสงค์ต้องการศึกษาผลการปรับโครงสร้างจุลภาคด้วยสตรอนเทียม (0.025% Sr) ต่ออายุการล้า จากผลการศึกษาพบว่า การปรับโครงสร้างจุลภาคด้วย สตรอนเทียมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอายุการล้าของอะลูมิเนียมผสม 320-T4

เนื่องจากรูพรุนมีผลต่อพฤติกรรมกลศาสตร์ของชิ้นทดสอบจึงทำให้การปรับโครงสร้างจุลภาคไม่มีผลต่ออายุการล้าได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาลักษณะการแตกหักแบบล้าของอะลูมิเนียมผสม A380⁽¹²⁾ (9.08%Si 0.92%Fe 3.26%Cu 0.04%Mg 2.81%Zn 0.25%Mn 0.07%Cr) ซึ่งนำมาจากชิ้นส่วนที่รับแรงบิดในรถยนต์ ชิ้นงานได้จากการหล่อแบบฉีด ถูกนำมาทดสอบความล้าแบบคานหมุน (Rotating-Beam) พบว่าการเริ่มต้นรอยร้าวเกิดขึ้นที่รูพรุน เนื่องจากการหดตัวและมลทินฝังในชิ้นงาน ลักษณะผิวของการแตกหักพบว่า ที่ชิ้นทดสอบที่มีอายุมาก (20×10^6 รอบ) จะเรียกว่าชิ้นที่มีอายุต่ำ (5×10^5 รอบ) นอกจากนี้ยังมีสัน (Ridge) ซึ่งรวมไปที่จุดเริ่มต้นการแตกหัก เมื่อดูที่กำลังขยายสูง ๆ 5,000 เท่า พบลักษณะสไตรเอชัน (Striation) บ้างบางพื้นที่

มีการศึกษาลักษณะการแตกหักของอะลูมิเนียมผสมหล่อรับแรงสลับแบบเพลลาหมุนและแบบดิ่งกดในแนวแกน⁽¹²⁾ คือ A356T6 (6.9%Si 0.35%Mg 0.10%Fe 0.01%Zn 0.06%Ti) และ 319T5 (6.7%Si 3.36%Cu 0.49%Fe 0.60%Mg 0.29%Zn 0.13%Ti) ปรับสภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยสตรอนเทียม พบว่า การเริ่มต้นเกิดรอยร้าวที่รูพรุนที่เกิดจากการหดตัว คล้าย ๆ กับกรณีของ A380 มีพบสไตรเอชันบ้างบางพื้นที่ บริเวณรอยต่อของขั้นตอนการขยายตัวของรอยร้าวกับบริเวณการแตกหักขั้นสุดท้ายมีการแบ่งแยกไม่เด่นชัด

2.4 การเปลี่ยนแปลงเฟสของอะลูมิเนียมผสม

การเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นในอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกิดขึ้นขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจากโลหะหลอมเหลวเป็นชิ้นงานหล่อ ซึ่งก็คือการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ ปัจจัยที่ควบคุมลักษณะของเฟสและโครงสร้างจุลภาคคือ ส่วนประกอบทางเคมีและอัตราการเย็นตัว

เมื่อพิจารณาการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสม Al-Si กลุ่มไฮโปยูเทคติก โดยพิจารณาประกอบแผนภูมิเฟส Al-Si รูปที่ 1.1 พบว่า นิวเคลียสที่เริ่มแข็งตัวครั้งแรกเมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวสัมผัสแบบหล่อคือ α -Al มีขนาดเกรนละเอียดเพราะเกิดนิวเคลียสจำนวนมาก เนื่องจากการเกิดการเย็นตัวยิ่งยวด (Undercooling) ผลมาจากความแตกต่างอุณหภูมิของ

แบบงานหล่ออะลูมิเนียมเหลว เมื่อขึ้นเกรนละเอียดแข็งตัวถัดเข้ามาจะเป็นชั้นเกรนยาว (Columnar) และเดนไดรต์ โดยทิศทางการเติบโตคือทิศทางการถ่ายเทความร้อน เมื่อการแข็งตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวดำเนินไป ส่วนผสมทางเคมีของ α -Al จะมี Si ไม่เกิน 1.65% ในขณะที่ในอะลูมิเนียมผสมหลอมเหลวจะมีส่วนผสมเข้าใกล้จุดยูเทคติกคือ 12.5% Si และเมื่ออุณหภูมิใกล้อุณหภูมิยูเทคติก เดนไดรต์จะมีแขนเกือบชิดกันและในระหว่างแขนก็จะมีอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่มีส่วนผสมยูเทคติกและกลายเป็นโครงสร้างยูเทคติกเมื่อขึ้นงานหล่อแข็งตัว อย่างสมบูรณ์

การควบคุมโครงสร้างของอะลูมิเนียมหล่อจะประกอบด้วย

1. ขนาดและรูปร่างเกรน
2. ระยะระหว่างแขนของเดนไดรต์
3. ขนาดและการกระจายของเฟสทุติยภูมิและสารมลทิน

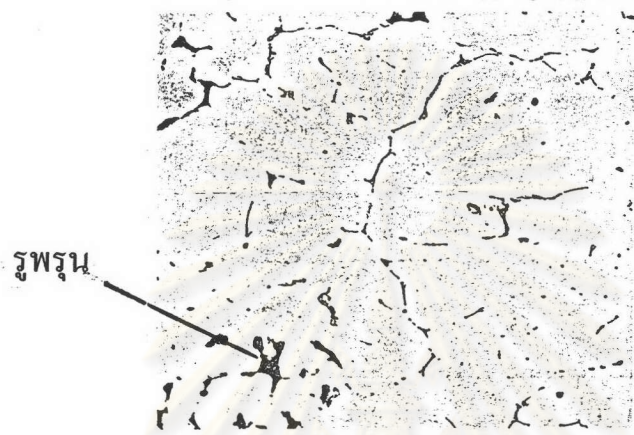
สองหัวข้อแรกจะถูกควบคุมด้วยอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อและการทำให้เกรนละเอียดโดยการเติมไทเทเนียมหรือโบรอนหรือเติมทั้งไทเทเนียมและโบรอน ส่วนรูปร่างของเฟสซิลิคอนในโครงสร้างยูเทคติกถูกควบคุมด้วยการปรับโครงสร้างจุลภาคด้วยการเติมโซเดียมหรือสตรอนเทียม ซึ่งจะทำให้รูปร่างเฟสซิลิคอนในโครงสร้างยูเทคติกเปลี่ยนรูปร่างจากแผ่นให้มีรูปร่างกลมและละเอียดขึ้น ทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น

2.5 การเกิดรูพรุน

รูพรุนในอะลูมิเนียมหล่อเกิดจาก 2 สาเหตุ⁽¹³⁾ ใหญ่คือ การหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนปริมาตรและไฮโดรเจน ในชิ้นงานหล่อเมื่อเกิดการแข็งตัว ปริมาตรจะลดลงเนื่องจากเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็งโดยทั่วไปการหดตัวจะมีประมาณ 5-8% โดยปริมาตร ซึ่งจะเกิดขึ้นในบริเวณที่แข็งตัวสุดท้าย รวมทั้งจุดที่มีส่วนผสมยูเทคติก⁽⁹⁾ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดรูพรุนเนื่องจากลักษณะการแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิกว้าง (Long range Solidification) และมีความสามารถในการไหลดี⁽⁹⁾ (Fluidity)

ไฮโดรเจนเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อ เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถละลายในอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้มากกว่าอะลูมิเนียมในสภาพ

ของแข็ง ดังนั้นในระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ ไฮโดรเจนจะถูกไล่ออกมารวมตัวกันเกิดรูพรุน ซึ่งมี 2 ลักษณะ ตามปริมาณของไฮโดรเจน ถ้ามีไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมผสมมากจะปรากฏเป็นรูพรุนระหว่างแขนเดนไดรต์ (Interdendritic Cavities) ดังแสดงในรูป ที่ 2.6 และในกรณีที่มีปริมาณของไฮโดรเจนน้อยจะเกิดเป็นรูพรุนระดับจุลภาค



รูปที่ 2.6 รูพรุนรูปร่างเป็นมุมที่ระหว่างแขนเดนไดรต์ของแท่งอะลูมิเนียมหล่อ 6063⁽¹³⁾

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย