เอกสารประกอบการศึกษา

การอบชุบ

แผนกวิทยาการ กองวิทยาการ กรมช่างอากาศ

ชีกิโ

บทที่ ๒

กรรมวิธีและขั้นตอนการอบชุบ

๒.๑ กล่าวโดยทั่วไป

โลหะอลูมินั่มเจือได้ถูกผลิตขึ้นมาใช้อยู่หลายรูปหลายลักษณะ เช่น ด้วยวิธีการหล่อ, แผ่น (Sheet), แผนหนา (Plate), แท่งสี่เหลี่ยม (Bar), ท่อนกลม (Rod), รูปฉาก (โดยวิธีปูดขึ้นรูป, rolled หรือวิธีดึงยืด) และการตีขึ้นรูปต่าง ๆ (Forgings) เหล่านี้ เป็นต้น การที่โลหะอลูมินั่มเจือถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ รูปแบบเช่นนี้ ก็เนื่องจากโลหะนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าโลหะอื่น ๆ หลายกรณี เช่น มี น.น.เบา เมื่อเทียบต่อปริมาตรกันกับโลหะหลาย ๆ ชนิด ต่อต้านการผุกร่อนในสภาพบรรยากาศปกติตามธรรมชาติได้ดี และยังมีความคงทนต่อสภาพทางเคมีได้ดี เป็นสื่อตัวนำทางไฟฟ้าที่ดี นอกจากนั้นโลหะนี้ยังสามารถสะท้อนกลับต่อการแผ่รังสีของคลื่นต่าง ๆ ได้ดีอีกด้วย ที่สำคัญคือโลหะอลูมินั่มเจือนี้สามารถนำมาทำการขึ้นรูป หรือการทำให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือกลหลาย ๆ ชนิดได้ดีและง่าย

จากคุณสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นและการที่โลหะอลูมินั่มเจือบางชนิดสามารถนำมาทำการขึ้นรูปในขณะที่ยังมีสภาพอ่อนนิ่มอยู่ และเมื่อได้นำมาผ่านกรรมวิธีอบชุบโลหะด้วยความร้อน (Heat Treated) ก็สามารถให้โครงสร้างที่แข็งแรงได้เช่นเดียวกับเหล็ก ด้วยเหตุนี้อลูมินั่มเจือจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น ในการสร้างเครื่องบินและชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอาวุธปล่อย (Missile) ได้ดี

๒.๑.๑ การเรียกและแยกประเภทอลูมินั่มเจือ

ในการเรียกและแยกแยะประเภทของโลหะอลูมินั่มเจือในปัจจุบันได้มีการแยกประเภทเรียกขานด้วยระบบตัวเลข ๔ ตัวดังนี้

ชีกิโ

ตัวเลขแรกแสดงถึงธาตุที่ใช้เจือเป็นธาตุหลัก (ตามตารางผนวก ก.)

เช่น ๑ xxx แสดงว่า เป็นอลูมินั่มแท้ ๙๙.๐๐ % เป็นอย่างน้อย

๒ xxx แสดงว่า เป็นอลูมินั่มเจือ ซึ่งมีธาตุทองแดงเป็นธาตุเจือหลัก เป็นต้น รายละเอียดตามผนวก ก.

ถึงแม้ว่าอลูมินั่มเจือส่วนใหญ่จะเป็นโลหะที่เจือด้วยธาตุหลักใหญ่เพียงตัวเดียว แต่ก็มีอีกพวกหนึ่ง คือ ๖ xxx จะประกอบด้วยธาตุหลักผสมอยู่ถึง ๒ ธาตุ คือ แม็กนีเซียม และซิลิกอน

ตัวเลขที่ ๒ หมายถึงการจำกัด impurity เช่น ถ้าตัวเลขตัวที่ ๒ เป็น ๐ ก็หมายถึงว่า ไม่ได้ใช้วิธีพิเศษอะไรในการควบคุมจำกัด impurity แต่สำหรับเลข ๑ – ๙ หมายถึงได้ใช้กรรมวิธีต่าง ๆ ในการควบคุม impurity ด้วย เช่น A1.1040 หมายถึงโลหะนี้มีอลูมินั่ม ๙๙.๔๐ % เป็นอย่างต่ำ และไม่มีการควบคุม impurity ส่วน A1.1140, A1.1240 ฯลฯ หมายถึงว่าได้มีการควบคุมพิเศษในการจำกัด impurity (ดูตารางในผนวก ก.)

ตัวเลข ๒ ตัวหลัง มีไว้เพื่อบอกให้ทราบถึงกรรมวิธีขึ้นรูปชนิดต่าง ๆ

อย่างไรก็ดีในการเรียกขานแยกประเภทของโลหะอลูมินั่มเจือนี้ แต่ก่อนก็ใช้เรียกแบบตัวเลขและพยัญชนะรวมกัน ซึ่งสามารถเทียบให้เห็นทั้งแบบเก่าและแบบใหม่ได้ตามตาราง ผนวก ข.

<u>การ Clad</u> เป็นกรรมวิธีในการฉาบเคลือบอลูมินั่มเจือ เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มการต่อต้านการผุกร่อน ซึ่งก็จะเรียกโลหะเจือประเภทนั้น ๆ ว่า Alclad เช่น Alclad 2014, Alclad 7075

๒.๑.๒ <u>สภาพต่าง ๆ ของอลูมินั่มเจือ</u>

สภาพของโลหะอลูมินั่มเจือที่ได้ผ่านกรรมวิธีทำให้แข็ง (Temper) นั้น ได้ถูกผลิตขึ้นมาใช้งานตามความจำเป็นเฉพาะงาน ซึ่งจะมีกรรมวิธีการทำให้แข็งได้ ๓ กรรมวิธี คือ

๑. กรรมวิธีทำงานในสภาพเย็น (หรือเรียกว่า Strain Hardening)

๒. กรรมวิธีอบชุบด้วยความร้อน

๓. กรรมวิธีรวมกันทั้งการทำงานในสภาพเย็น และกรรมวิธีอบชุบด้วยความร้อน

<u>โลหะอลูมินั่มเจือนั้น ยังได้แยกชนิดออกไว้เป็น ๒ ชนิด คือ</u>

๑. ชนิดที่ทำการอบชุบด้วยความร้อนได้ (Heat - treatable)

๒. ชนิดที่ทำการอบชุบด้วยความร้อนไม่ได้ (Non - Heat - Treatable) โลหะชนิดนี้ได้แก่ ๑๑๐๐, ๓๐๐๓, Alclad ๓๐๐๓, ๓๐๐๔, Alclad ๓๐๐๔, ๕๐๕๐, ๕๐๕๒ สภาพความแข็งของโลหะจำพวกนี้อยู่ในรูปสัญลักษณ์ H_1 , H_2 , H_3 , H_4 , F และ O

สภาพของค่าความแข็งแรง จากกรรมวิธีการทำ Strain Hardening นั้น จะบอกได้โดยการเพิ่มหมายเลขห้อยท้ายเข้าไป เช่น

๒ = $\frac{๑}{๔}$ ของความแข็ง ($\frac{๒}{๔}$) - H_{12} , H_{22} , H_{32}

๔ = $\frac{๒}{๔}$ ของความแข็ง ($\frac{๔}{๔}$) - H_{14} , H_{24} , H_{34}

๖ = $\frac{๓}{๔}$ ของความแข็ง ($\frac{๖}{๔}$) - H_{16} , H_{26} , H_{36}

๘ = แข็งเต็มที่ ($\frac{๘}{๔}$) - H_{18} , H_{28} , H_{38}

แต่ก่อนนั้นการเรียกสภาพของโลหะที่อยู่ในสภาพแข็ง (Temper) ใช้สัญลักษณ์ -- เพิ่มต่อท้ายเลขเรียกชานแยกประเภทแบบ ๔ ตัว เช่น ๑๑๐๐ - H_{12} , ๕๐๕๒ - H_{24} , ๓๐๐๔ - H_{34} ฯลฯ โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว จะใช้สัญลักษณ์เหล่านี้สำหรับโลหะอลูมินั่มเจือ ที่ไม่สามารถทำการอบชุบด้วยความร้อนได้ สัญลักษณ์พวกนี้คือ

F = สภาพโลหะที่สร้างด้วยเครื่องจักรกล

O = อบอ่อน

H_{21} = โลหะที่ผ่านกรรมวิธี Strain Hardening เท่านั้น

H_2 = โลหะที่ผ่านกรรมวิธี Strain Hardening แล้วผ่านกรรมวิธีอบอ่อน

H_3 = โลหะที่ผ่านกรรมวิธี Strain Hardening แล้วทำให้อยู่ในสภาพลงตัว

ภาคผนวก

โลหะอลูมินั่มเจือ Alclad 2014, 2024 Alclad 2024, 6061 7075, Alclad 7075 และ 7178 โลหะพวกนี้เป็นชนิดที่สามารถทำการอบชุบด้วยความร้อนได้ คุณสมบัติทางกลของโลหะเจือเหล่านี้ ได้มีการปรับปรุงพัฒนาขึ้นโดยกรรมวิธีอบชุบด้วยความร้อน หรือโดยกรรมวิธี ทั้งการอบชุบด้วยความร้อนและ Strain Hardening รวมเข้าด้วยกัน

สภาพความแข็งของโลหะเจือเหล่านี้ จะเรียกด้วยสัญญลักษณ์ดังนี้ F, O, W, T, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}

F = สภาพที่สร้างด้วยเครื่องจักรกล

O = สภาพอบอ่อน

W = สภาพที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat แล้วแต่ยังไม่คงตัว

T = สภาพที่ถูกผลิตขึ้นมีความแข็งคงตัวกว่าสภาพ F และ O

T_2 = สภาพอบอ่อน เฉพาะชิ้นงานหล่อ (Casting) เท่านั้น

T_3 = สภาพที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat แล้วนำไปทำงานในสภาพเย็นทันทีภายในระยะเวลากำหนด

T_4 = สภาพที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat แล้ว และคงตัวในระยะเวลากำหนด

T_5 = สภาพโลหะที่ผ่านกรรมวิธีอบให้แก่ตัวที่อุณหภูมิเฉพาะอุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น (Artificial Aged)

T_6 = สภาพโลหะที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat แล้ว, นำไปอบให้แก่ตัวอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ตามที่กำหนด

T_7 = สภาพโลหะที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat แล้ว และอยู่ในสภาพคงตัว

T_8 = สภาพโลหะที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat แล้ว นำไปทำงานในสภาพเย็น และนำมาอบให้แก่ตัวอีกครั้งหนึ่ง

ภาคผนวก

T_9 = สภาพโลหะที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat แล้ว, นำไปอบให้แก่ตัวก่อน แล้วจึงนำไปทำงานในสภาพเย็น

T_{10} = สภาพโลหะที่ผ่านกรรมวิธีอบให้แก่ตัวเท่านั้น แล้วนำไปทำงานในสภาพเย็น

ตัวเลขที่อาจจะเห็นเพิ่มเติมมากกว่าสภาพข้างบนดังกล่าวมาแล้ว ก็จะเป็นการบ่งชี้ถึงการดัดแปลงสภาพความแข็งมาตรฐาน ตัวอย่างเช่น หมายเลข "๖" ตามหลัง T_3 จะชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของการทำงานในสภาพเย็น (หลังจากที่โลหะผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treat มาแล้ว จากสภาพที่ใช้ใน "T_3" เช่น AL 2024 - T_{36} ตัวเลข ๖ ที่เพิ่มเข้ามาเป็นการชี้ให้เห็นว่าได้มีการดัดแปลงหรือใช้วิธีสำคัญ ๆ เพิ่มขึ้นจากสภาพความแข็งตามมาตรฐานกำหนด และคุณลักษณะเฉพาะของโลหะเจือนี้จะใช้เป็นประโยชน์ในการคำนวณข้อมูลเฉพาะ

สภาพการดัดแปลงมาตรฐานตัวเลขเหล่านี้จะกำหนดมาจากกรรมวิธีการผลิตวัสดุโลหะนั้นเลย เช่น T_x - 51 หมายถึง การลดแรงเครียดโดยวิธี Stretching คือ หลังจากที่โลหะผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treatment แล้ว จึงนำไปใช้กรรมวิธี Stretching ภายหลัง วัสดุโลหะที่เป็นแผ่นหนา (Plate) จะลดลงได้ ๑ $\frac{๑}{๒}$ - ๓ % ของสภาพถาวร ท่อนกลม, แท่งเหลี่ยมและรูปอื่น ๆ จะได้ ๑ - ๓ % ของสภาพถาวร

ถ้าใช้วิธีโดยตรงกับวัสดุที่เป็นแผ่น (Plate) หรือโลหะที่ผ่านการรีด (Rolled) หรือการทำท่อนกลมในสภาพเย็น หรือแท่งเหลี่ยม วัสดุโลหะเหล่านี้ก็ไม่ต้องรับการทำ Straightening (การจัดเข้ารูประเบียบ) หลังจากกรรมวิธี Stretching ด้วยแรงกระทำขนาดเท่าแรงทนทานที่ยอมให้ตามมาตรฐานก็ได้

T_{x510} - หมายถึงสภาพโลหะที่ใช้กรรมวิธีปูดขึ้นรูป (Extrude) เป็นท่อนกลม, แท่งเหลี่ยม หรือเป็นรูปอื่น ๆ ภายหลังกรรมวิธี Stretching แล้ว ก็ไม่ต้องใช้กรรมวิธี Straightening เข้าช่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร

T_{x511} – หมายถึงสภาพโลหะที่ใช้กรรมวิธี Stretching ให้เป็นท่อนกลม แท่งเหลี่ยม หรือเป็นรูปอื่น ๆ แล้ว จำเป็นต้องได้รับการทำกรรมวิธี Straightening ในภายหลังด้วยแรงขนาดเท่าแรงทนทานที่ยอมให้ตามมาตรฐาน

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วมีกรรมวิธีการอบชุบโลหะอลูมินั่มเจือให้แข็งได้ ด้วยความร้อน ๒ วิธี คือ

๑. Solution Heat Treatment

๒. Precipitation Heat Treatment

โลหะอลูมินั่มเจือบางชนิด เช่น Al.2017 และ Al.2024 ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาในเรื่องคุณสมบัติทางกลมาอย่างเต็มที่แล้ว โดยใช้วิธีการอบให้แก่ตัวในสภาพบรรยากาศธรรมดา (อุณหภูมิปกติห้อง) นานประมาณ ๔๖ ชั่วโมง ภายหลังจากผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treatment แล้ว สำหรับโลหะเจือชนิดอื่น ๆ เช่น Al.2014, Al.7075, Al.7178 หลังจากที่ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treatment แล้วจำเป็นต้องนำไปอบให้แก่ตัวอีกครั้งในช่วงระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมอีกครั้งหนึ่ง

๒.๑.๓ กรรมวิธี Solution Heat Treatment

ในกรรมวิธี Solution Heat Treatment นี้ จะประกอบด้วยการอบเผาอลูมินั่มเจือไปจนถึงอุณหภูมิวิกฤติจนเหล่าธาตุเจือที่ประกอบอยู่ในโลหะนั้นจะเปลี่ยนไปสู่สภาวะ Solid Solution (สารละลายของแข็ง) โดยจะพบว่าธาตุเจือต่าง ๆ เหล่านั้น ในแต่ละส่วนที่สำคัญ ๆ จะเพิ่มค่าความแข็งแรงทางแรงดึงและความแข็ง ณ ที่อุณหภูมิสูง ๆ มากกว่าอุณหภูมิต่ำ ๆ ฉะนั้นเพื่อที่จะให้เกิดผลของการเปลี่ยนสภาวะเป็น Solid Solution ได้มากที่สุด เราก็จะคงอุณหภูมิสูงไว้ในเวลาที่เหมาะสมเป็นระยะเวลาหนึ่ง นั่นคือการ อบแช่ (Soaking) หลังจากนั้นจึงนำเอาโลหะออกมาจุ่มชุบอย่างรวดเร็วในน้ำเย็น เพื่อที่จะคงสภาวะที่ต้องการเอาไว้ ในทันทีที่การจุ่มชุบเสร็จแล้ว อลูมินั่มเจือก็จะมีความแข็งแรงแต่ยังอยู่ในสภาวะที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ยังไม่คงตัว คือยังไม่แข็งตัวเต็มที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากมันจะให้ค่าความแข็งแรงที่อิ่มตัวอีกครั้งหนึ่งด้วยการเก็บโลหะนั้นไว้ในอุณหภูมิปกติของห้อง ค่าของความแข็งแรงของโลหะที่เพิ่มขึ้นในภายหลังนั้น คือการแก่ตัว หรือเรียกว่า Precipitate

ในการเร่งรัดให้เกิดรูปแบบอย่างรุนแรงสุดของอนุภาคอันเล็กละเอียดในระหว่างปฏิกริยาเร่งให้เกิดแรงดึงเพิ่มขึ้นเหล่านี้ เป็นผลมาจากทฤษฎีซึ่งโมเลกุลของอลูมินั่มและธาตุเจือต่าง ๆ ที่สำคัญ ๆ ได้เกิดการเรียงตัวจัดลำดับใหม่เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง (Hardness) ของโลหะนั่นเอง

กรรมวิธี Solution Heat Treatment นั้น ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจในสิ่งสำคัญที่ประกอบเป็นกระบวนการในการปฏิบัติก่อน กล่าวคือ เราจะต้องยึดถือการควบคุมอุณหภูมิในการอบเผา และการจุ่มชุบ (Quenching) เป็นหลักอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบเผานี้โดยปกติแล้วเราจะเลือกอุณหภูมิสูงสุดเท่าที่จะสูงได้ แต่ต้องระวังว่าไม่สูงจนเกินไปจนกระทั่งอุณหภูมินั้น ทำให้เหล่าธาตุเจือต่าง ๆ นั้น หลอมละลาย โดยวิธีนี้ก็จะทำให้เราได้คุณสมบัติทางกลตามที่เราต้องการเพิ่มขึ้นเป็นประการสำคัญ ถ้าอุณหภูมิสูงที่กำหนดนั้นสูงมากเกินไปจนกระทั่งโลหะเกิดจุดหลอมยูเทคติก (Eutectic Melting) ผลที่ตามมาคือจะทำให้คุณสมบัติทางแรงกลสูญเสียไป เราจะสังเกตเห็นได้ว่าตามผิวของโลหะจะมีรอยพองทั่ว ๆ ไป เป็นตุ่ม ๆ ในทางกลับกันถ้าเราให้อุณหภูมิต่ำเกินไป โลหะก็จะไม่ได้ความแข็งแรงสูงสุดตามที่ต้องการ

เวลาที่ใช้ในการอบเผา โดยปกติแล้วเราเรียกว่าเวลาในการอบแช่ (Soaking Time) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพึงระวังในการปฏิบัติงาน เวลาที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับความหนาของพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นส่วนของงานที่นำมาอบชุบ เวลาที่ใช้ควรเป็นเวลาน้อยที่สุดในช่วงระยะเวลาที่กำหนดให้ แต่อย่างไรก็ดี อาจใช้การทดลองหลาย ๆ ครั้ง เพื่อคำนวณหาเวลาที่เหมาะสมในการอบเผาก็จะได้เวลาที่แน่นอนในการทำงาน สำหรับเวลาที่ใช้ในการอบแช่ตามกำหนดโดยเฉลี่ยนั้น รายละเอียดตามตาราง ผนวก ก – ๑ และ ผนวก ก – ๒

สำหรับอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบเผานั้น ในแต่ละชนิดของอลูมินั่มเจือจะมีค่าแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุเจือหลักที่ผสมอยู่ และกรรมวิธีในการผลิตวัสดุโลหะ เช่น จากการรีด การตีขึ้นรูป เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบเผานี้จะให้ค่าออกเป็นย่านจากต่ำสุดถึงสูงสุด ในการเลือกอุณหภูมิที่จะใช้ต้องไม่น้อยหรือมากไปกว่าย่านอุณหภูมิที่กำหนด รายละเอียดตามผนวก ง – ๑, ง – ๒, ง – ๓

ชิ้นส่วน บ.บางชิ้นไม่สามารถสร้างด้วยเครื่องมือกลต่าง ๆ ได้ หรือทำได้ก็ต้องใช้เวลาในการสร้างนานมากและไม่สะดวก จึงมีบางชิ้นต้องสร้างด้วยวิธีหล่อ (Casting) และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเผาในกรรมวิธี Solution Heat Treatment ตามตาราง ผนวก ง – ๓ และเวลาที่ใช้ในการอบแช่ตามตาราง ผนวก ค – ๒

๒.๑.๔ กรรมวิธี Precipitation Heat Treatment

Precipitation (Age) Hardening เป็นการเรียกขบวนการอบชุบ ซึ่งประกอบด้วย การอบให้แก่ตัวในโลหะที่ได้ผ่านกรรมวิธี Solution Heat Treatment มาแล้ว โดยใช้อบด้วยอุณหภูมิปกติห้อง (ในสภาพบรรยากาศธรรมชาติ) หรือ การอบให้แก่ตัว ณ ที่อุณหภูมิพอเหมาะอีกอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Artificial Aging

กรรมวิธี Artificial Aging ประกอบด้วยกรรมวิธีให้ความร้อนกับอลูมินั่มเจือในอุณหภูมิกำหนด และคงเอาไว้ในช่วงระยะเวลาอันยาวนาน ระยะหนึ่ง ในระหว่างการอบนี้ ธาตุเจือหลักที่สำคัญก็จะถูกเร่งเร้าให้เกิดสภาวะ Solid Solution ขึ้น ขณะที่กรรมวิธีกำลังดำเนินการไปเรื่อย ๆ ค่าของความแข็งแรงของโลหะก็จะเพิ่มจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด (เวลาที่ใช้ในการอบถ้ามากเกินไปก็จะเป็นสาเหตุทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงได้) จนกระทั่งเกิดสภาวะคงตัว การจัดรูประเบียบของโลหะจะเกิดขึ้นในระหว่างการจัดเรียงลำดับรูปแบบของโมเลกุลทางโครงสร้างของอลูมินั่มและเหล่าธาตุเจือที่สำคัญ ๆ นั้น

ตัวอย่าง

ในการทำ Artificial Aging ของอลูมินั่มเจือนั้น โดย-มากมักจะทำในลักษณะ Overaged เพียงเล็กน้อยเพื่อเพิ่มค่าของการต้านทานการ-ผุกร่อน โดยเฉพาะโลหะที่มีธาตุทองแดงผสมอยู่เป็นหลัก ส่วนการทำเพื่อที่จะลดอำนาจของการเกิดการผุกร่อนภายใน ก็ทำโดยลักษณะ Under - Aging

โลหะเจือที่สามารถแก่ตัวเองโดยธรรมชาตินั้นก็สามารถนำมาทำการ Artificial Aging ได้ เพื่อช่วยเพิ่มอำนาจการต่อต้านการผุกร่อนภายใน และถ้าจะให้เกิดประโยชน์ได้เต็มที่ ควรจะเป็นโลหะที่เป็นแผ่น Clad หรือโลหะที่ได้จากการปูดขึ้น รูป หรือโลหะที่ได้จากกรรมวิธีอื่น ๆ ที่คล้ายคลึงกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการ-อบ ตามตารางผนวก จ - ๑ สำหรับโลหะทั่ว ๆ ไป ยกเว้นโลหะที่ได้จากการดึงขึ้นรูป ใช้ในตารางผนวก จ - ๒ และโลหะที่ไดจากการหล่อใช้ตารางผนวก จ - ๓

๒.๑.๕ <u>กรรมวิธี Annealing (อบอ่อน)</u>

กรรมวิธี Annealing คือการอบอ่อน ใช้ในการทำให้โลหะที่แข็งอยู่เดิมให้อ่อนลง ไม่ว่าจะแข็งเนื่องจากโลหะที่แข็งมาจากการทำ Strain Hardening หรือจากกรรมวิธี Heat Treatment ก็ตาม ทั้งนี้มีจุดมุ่ง-หมายเพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูปโลหะ (Forming) ในลักษณะต่าง ๆ โดยไม่แตกร้าว หรือแตกหัก

ในกรรมวิธี Annealing นี้ จะต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะข้อกำหนดและเวลาที่ยอมให้กระทำในกรรมวิธีที่กำหนดในการทำอบชุบซ้ำ รวมทั้งการขึ้นรูปในทันทีหรือการดึงยืดโลหะ ที่ได้ผ่านการอบอ่อน ข้อกำหนดต่าง ๆ รวมทั้งจำนวนครั้งที่ยอมให้ทำและอุณหภูมิสำหรับการอบอ่อนเป็นไปตามชนิดของโลหะเจือดังนี้

๒.๑.๕.๑ การอบอ่อนอลูมินั่มเจือที่เกิดความแข็งมาจากการทำงานในสภาพเย็น เกือบทั้งหมดยกเว้น Al.3003 จะใช้กรรมวิธีอบอ่อนดังนี้

- นำโลหะเข้าอบเผาที่อุณหภูมิ ประมาณ ๖๕๐° F และไม่สูงเกิน ๗๗๕° F คงไว้ที่อุณหภูมินี้จนกระทั่งอุณหภูมิที่ให้เป็นไปโดยตลอดทั้งย่านชิ้นงาน

ตัวอย่าง

ชีวิโค

– นำโลหะออกจากเตาให้เย็นในอากาศ (บางชนิดให้เย็นภายในเตา)

ในการทำอบอ่อน อุณหภูมิที่ให้ไม่ควรเกิน ๗๗๕° F ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันการเกิด Oxidation และการเกิด Grain โต

สำหรับโลหะเจือ A1.3003 นั้น ก็สามารถทำการอบอ่อนได้โดยอบเผาที่อุณหภูมิ ๗๗๕° F

๒.๑.๕.๒ การอบอ่อนโลหะเจือที่เกิดความแข็งมาจากการอบชุบ (โลหะโกลน) อลูมินั่มเจือยกเว้น A1.7075 ทำการอบอ่อนดังนี้

– นำโลหะเข้าอบเผาที่อุณหภูมิ ๗๗๕° F นานไม่ต่ำกว่า ๑ ชั่วโมง แต่เวลารวมทั้งหมดต้องไม่เกิน ๒ – ๓ ชั่วโมง

– จากนั้นทำให้โลหะเย็นตัวลงในอัตราที่ไม่มากกว่า ๕๐° F /ชั่วโมง (ในทางปฏิบัติจะให้เย็นภายในเตา โดยที่เมื่ออบแช่ได้เวลาตามต้องการแล้ว ไม่ต้องนำโลหะออกจากเตาทำการปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เตาทำงานต่อไปทันที) จนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ ๕๐๐° F แล้วจึงนำออกมาเย็นนอกเตา สำหรับอัตราการเย็นตัวของโลหะที่ผ่านการ Clad ไม่จำกัด

ส่วนโลหะอลูมินั่มเจือ ๗๐๗๕ ทำการอบอ่อนเต็มที่ ดังนี้

– อบเผาที่อุณหภูมิ ๗๗๕° F – ๘๕๐° F (อุณหภูมิที่ใช้จะสูงกว่าที่ใช้กับวัสดุที่ผ่านการทำงานสภาพเย็น)

– อบแช่ที่อุณหภูมินี้นาน ๒ ชั่วโมง

– นำโลหะออกมาให้เย็นตัวในอากาศ

– ทำการอบเผาซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ ๘๕๐° F

– อบแช่ที่อุณหภูมินี้นาน ๖ ชั่วโมง

– นำโลหะออกมาให้เย็นตัวในอุณหภูมิปกติห้อง

ชีวิโค

ปกติ

ในกรณีที่ใช้กรรมวิธีอบอ่อน ๗๐๗๕ วิธีสลับขั้นตอน กระทำได้ดังนี้

– ถ้าการขึ้นรูปโลหะกระทำทันที หลังจากผ่านการอบอ่อนแล้วให้อบเผาที่อุณหภูมิ ๗๗๕° F นาน ๒ – ๓ ชั่วโมง แล้วนำออกมาเย็นในอากาศ

– ถ้าจะนำโลหะเข้าไปเก็บไว้ในตู้แช่หลังจากผ่านการอบอ่อนเพื่อยืดเวลาในการขึ้นรูป ให้อบเผาที่อุณหภูมิ ๖๗๐° – ๗๐๐° F นาน ๒ ชั่วโมง แล้วนำเอาออกมาให้เย็นในอากาศ เสร็จแล้วให้ทำการอบเผาซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ ๔๕๐° F แช่ไว้นาน ๔ ชั่วโมง แล้วนำออกมาให้เย็นในอากาศ

– การอบอ่อนวิธีสลับขั้นตอน ระหว่างการทำงานในสภาพเย็นของโลหะนั้น ให้อบเผาที่อุณหภูมิ ๖๗๐° – ๗๐๐° F แช่นาน ½ ชั่วโมง เป็นอย่างสูง หรืออบเผาที่อุณหภูมิ ๔๑๐° – ๔๓๐° F จนอุณหภูมิทั่วถึงทั้งหมดแล้วนำเอาออกมาให้เย็นในอากาศ และชิ้นงานต่าง ๆ ไม่ควรใช้กรรมวิธีอบอ่อนที่อุณหภูมิ ๔๑๐° – ๔๓๐° F มากเกินกว่า ๓ ครั้ง

๒.๑.๕.๓ การอบอ่อนชิ้นงานหล่อ ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทำการอบเผาอุณหภูมิ ๖๕๐° – ๗๕๐° F แช่ไว้นาน ๒ ชั่วโมง แล้วนำเอาออกมาเย็นที่อุณหภูมิปกติห้อง จุดประสงค์ของการอบอ่อนนี้เพื่อลดแรงเครียดและทำให้เกิดเสถียรภาพ

ในกรรมวิธีอบอ่อนใช้ตารางตาม ผนวก ฉ ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ในการอบอ่อนโลหะอลูมินั่มเจือของบริษัท Hawker De Hevilland Australia Pty.Ltd. และจากตารางที่ใช้นี้ ในช่องตารางจะมี หมายเหตุ ๑ – ๔ ซึ่งมีรายละเอียดอธิบายไว้ดังนี้

หมายเหตุ ๑ ใช้กรรมวิธีนี้เท่านั้น เมื่อจะจำกัดผลของการทำงานในสภาพเย็น เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์ในการทำการขึ้นรูป

หมายเหตุ ๒ เพื่อให้ได้ผลอย่างสูงสุด การขึ้นรูปชิ้นส่วน ให้ทำภายใน ๑๒ ชั่วโมง หลังจากทำ Partial Anneal

หมายเหตุ ๓ เป็นการทำ Fully Anneal ต่อโลหะเพื่อการขึ้นรูป และเพื่อป้องกันผลเสียต่าง ๆ ต่อการขึ้นรูปเย็น

ปกติ

หมายเหตุ ๔ Partial Anneal เพื่อขจัดผลเสียต่าง ๆ ของการทำงานในสภาพเย็น และจากการทำ Strain Hardening ของวัสดุ หรือเพื่อทำให้วัสดุที่ผ่านการอบชุบให้แข็งมาแล้ว มีสภาพอ่อนเพื่อที่จะนำไปขึ้นรูปต่อไป

หมายเหตุ ๕ Fully Anneal เฉพาะ ๗๐๗๕ เพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้เต็มที่

หมายเหตุ ๖ Partial Anneal สำหรับการขึ้นรูป

หมายเหตุ ๗ Partial Anneal ของวัสดุอลูมินั่ม ๑๑๐๐, ๓๐๐๓ และ ๕๐๕๒ ไม่ต้องใช้

หมายเหตุ ๘ เวลาอบแช่ของโลหะที่ใช้ในการทำชิ้นส่วนของบริษัท Boeing ไม่มีอ้างถึง

๒.๑.๖ การจุ่มชุบ (Quenching)

โพรงอากาศ ที่ - ร ... spray ของน้ำ อลูมินัมเจือที่ได้จากการตีขึ้นรูป (Forging) เช่น Al. ๒๐๒๔, ๒๐๑๗, ๒๑๑๗ และ ๗๐๗๕ ต้องทำการจุ่มชุบในน้ำที่มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า ๑๐๐°F ส่วนโลหะ Al.๗๐๗๕ ที่ได้จากการตีขึ้นรูปนั้น ปกติจะชุบชุบในน้ำที่มีอุณหภูมิน้อยกว่า ๑๐๐°F ทั้งนี้เพื่อคงคุณสมบัติทางแรงกลเอาไว้ อย่างไรก็ดี น้ำร้อนที่ใช้ในการจุ่มชุบ (อุณหภูมิ ๑๘๐°F) ควรที่จะใช้ต่อเมื่อต้องการความแข็งแรงขั้นต่ำตามต้องการ น้ำร้อนจะทำให้แรงเครียดที่เหลืออยู่มากลดต่ำลง อันนี้เป็นสิ่งพึงประสงค์สำหรับการที่จะลดการเกิด Stress Corrosion

ในการใส่ชิ้นงานเข้าเตาอบ ในแต่ละชิ้นงานควรใส่ตะกร้า (ถ้ามีขนาดเล็ก) หรือใช้ Jig รองรับเพื่อป้องกันการบิดตัว แต่ต้องให้ความร้อนเข้าถึงชิ้นงานได้มากเท่าที่จะเป็นไปได้ และการจุ่มชุบในน้ำ ก็ต้องให้น้ำสามารถเข้าไปถึงชิ้นงานได้ทั่วถึงทั้งหมด การใช้วิธีกังกล่าว เพื่อต้องการรักษารูปร่างของโลหะและ

ทำให้สะดวกต่อการอบเผาโลหะตามอุณหภูมิที่กำหนดและสามารถนำเอาชิ้นงานออกมาทำการอบชุบได้สะดวกและรวดเร็วอีกด้วย

การใช้ Jig เพื่อป้องกันการบิดตัว จำเป็นต้องเตรียม Jig ยึดติดชิ้นงานให้แน่น โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่มีรูปร่างโดยรอบหลาย ๆ ลักษณะ อย่างไรก็ตามในการใช้ Jig ก็มีความยุ่งยากในการสร้างและตัว Jig เอง ยังจำกัดการให้ความร้อนเข้าถึงชิ้นงานที่จะอบชุบได้ด้วยเหมือนกัน

ปกติ ชิ้นส่วนมีขนาดเล็กนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้การยึดด้วย Jig แต่ควรจะนำไปขึ้นรูปซ้ำอีกครั้งหนึ่งทันที ภายหลังการจุ่มชุบแล้ว

โลหะเจือที่ผลิตออกมาในรูปลักษณะเป็นวัสดุโกลน อาจจะใช้วิธีจุ่มชุบด้วยน้ำเย็นแรง ๆ โดยมีหัวฉีด ที่จะทำให้น้ำสามารถพุ่งออกมาอย่างแรง โดยที่หัวฉีดสำหรับให้น้ำพุ่งออกมานั้น ถ้าจะให้มีประสิทธิภาพสูงควรติดตั้งใน Chamber พิเศษ และชิ้นส่วนที่ผ่านกรรมวิธีจุ่มชุบด้วยวิธีนี้ ควรนำไปตรวจสอบการผุกร่อนตาม Spec MIL - H - 6088 โดยจะมีเรื่องของคุณลักษณะเฉพาะของโลหะ และคุณสมบัติทางแรงกลที่ต้องการที่จะนำไปใช้ประโยชน์ด้วย

ส่วนการจุ่มชุบชิ้นงานหล่อและชิ้นงานที่ได้จากการตีขึ้นรูปนั้น ก็จะต้องปฏิบัติไปตามประเภทของการทำงาน ถ้าเป็นชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมา จะต้องจุ่มชุบในน้ำที่มีอุณหภูมิ ๑๕๐° – ๒๑๒° F ในชิ้นงานที่ได้จากการตีขึ้นรูป ควรจุ่มชุบในน้ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน ๑๘๐° F ชิ้นงานที่ตีขึ้นรูปมาและชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการปูดขึ้นรูปแบบ Impact Extrusion จะอยู่ในสภาพ T_{41} หรือ T_{61} มาก่อน ควรจุ่มชุบในน้ำที่เดือด

สำหรับชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เช่น Rivet, ข้อต่อเล็ก ๆ, Washer, Spacer ฯลฯ ควรจุ่มชุบลงในน้ำเย็น

ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อคุณภาพของวัสดุที่เราทำงานในโลหะอลูมินั่มเจือที่ต้องการนั้น มีสิ่งสำคัญอยู่เรื่องหนึ่งคือ ช่วงระหว่างการนำเอาชิ้นงานที่ผ่านการอบเผาได้ตามอุณหภูมิและเวลาแช่แล้วออกจากเตาไปทำการจุ่มชุบในน้ำนั้น ช่วงเวลานี้มีความสำคัญ

อย่างมากจะต้องคงไว้ไม่ให้มากไปกว่าตารางที่กำหนดไว้ ในตารางผนวก ช. ถ้าเป็นเตาแบบเก่าที่แยกส่วนของการอบเผาและส่วนของการจุ่มชุบออกจากกัน ผู้ทำงานจะต้องคำนึงถึงช่วงเวลาที่นำโลหะออกจากเตาด้วย โดยต้องพยายามนำออกไปจุ่มชุบให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ในปัจจุบันถ้าเป็นเตาอบที่มีส่วนของการจุ่มชุบอยู่ในส่วนของเตาโดยที่วิศวกรออกแบบมาเพื่อสะดวกต่อการทำงานแล้ว วิศวกรเหล่านั้นก็จะคำนึงถึงเวลาของการนำชิ้นส่วนออกจากเตาเพื่อทำการจุ่มชุบได้อย่างรวดเร็วด้วย รายละเอียดตามผนวก ช

๒.๑.๗ <u>การทำ Resolution Heat Treatment</u>

ในการอบชุบโลหะที่ได้ผ่านการอบชุบมาก่อนแล้ว นั้น ถือเป็นการอบชุบซ้ำ เพราะฉะนั้นในการอบชุบครั้งแรกของวัสดุที่ซื้อมาซึ่งได้ผ่านการอบชุบมาก่อนแล้ว จึงถือว่าเป็นการอบชุบซ้ำอีกครั้งหนึ่ง แต่ในกรณีที่โลหะได้ผ่านการอบอ่อนและการทำ Precipitation มาก่อน เราไม่ถือว่าเป็นการอบชุบซ้ำ จำนวนครั้งที่ยอมให้ทำการอบชุบซ้ำ รายละเอียดตามผนวก ช.

สำหรับโลหะที่ไม่ผ่านการ Clad มาก่อน ยกเว้น Rivets อาจทำการอบชุบซ้ำได้ แต่ต้องกระทำ Anodising ก่อน เพื่อป้องกันผิวหน้าของโลหะเกิดการ Oxidation และโลหะที่จะทำการ Resolution มากกว่าในตารางที่กำหนดให้แล้ว จะต้องเป็นไปตามข้อแนะนำของวิศวกร รวมทั้งต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางแรงกลที่จะเกิดขึ้นภายหลังการอบชุบด้วย

๒.๑.๘ <u>การปฏิบัติงานภายหลังการอบชุบ</u>

ชิ้นส่วนที่ต้องนำไปขึ้นรูปภายหลังเสร็จสิ้นการอบชุบแล้วจะต้องนำไปทำงานทันทีภายใน ๑ $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ภายหลังผ่านการชุบน้ำ ถ้ายังไม่ทำงานทันทีจะต้องนำไปเก็บไว้ในตู้แช่ ซึ่งต้องคงไว้ที่อุณหภูมิ – ๑๐°F (–๒๓° C)

ช่วงระยะเวลาก่อนที่จะนำไปเก็บไว้ในตู้แช่นั้น ต้องพยายามให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ และต้องไม่มากกว่า ๒๐ นาที

โลหะที่นำออกจากตู้แช่เพื่อที่จะนำไปขึ้นรูปนั้น จะต้องทำการขึ้นรูปให้หมดภายในเวลา ๑ ชั่วโมง ยกเว้น Al. ๖๐๖๑ ซึ่งสามารถยอมให้ช้าได้ถึง ๔ ชั่วโมง

ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้วิธีแช่ในตู้แช่ ไม่ควรแช่ไว้นานเกินกว่า ๗ วัน และควรได้นำตัวอย่างไปทำการขึ้นรูปดูก่อน เพื่อความมั่นใจก่อนการทำงานจนหมดเพื่อจะได้ไม่เสียเวลาในการทำงาน

สำหรับ Rivet 2017 - T_4 (D) และ 2117 - T_4 (AD) ไม่ต้องแช่ในตู้เย็น (นอกจากข้อบังบอกเฉพาะ) และสามารถเก็บไว้ที่อุณหภูมิปกติห้องได้ไม่จำกัดเวลาก่อนนำไปใช้งาน

๒.๒ ขั้นตอนการอบชุบ

๒.๒.๑ การเตรียมวัสดุก่อนการอบชุบ

– การทำความสะอาด

ผิวของชิ้นงานทั้งหมดจะต้องทำความสะอาดเพื่อให้ปราศจากการเปื้อนต่อสิ่งต่าง ๆ ก่อนที่จะทำการอบชุบ ถ้าผิวของโลหะเปื้อนมากควรใช้ Trichlore-thylene กำจัดออก และบริเวณผิวของโลหะจะต้องทำให้แห้งก่อนนำเข้าอบเผาในเตา

– การเตรียมวางชิ้นงานเพื่อให้เหมาะกับการจุ่มน้ำธรรมดา

ถ้าหากไม่มีข้อแนะนำหรือข้อกำหนดเป็นอย่างอื่นแล้ว ระยะห่างของชิ้นงานจะต้องวางให้ห่างกันไม่น้อยกว่า ๒ นิ้ว ยกเว้นการสัมผัสกันของระแนงต่าง ๆ ที่ใช้ห้อย และยอมให้ชิ้นงานเล็ก ๆ สัมผัสกันได้ในกรณีที่ใช้ตะแกรงลวดใส่ชิ้นงาน

– การเตรียมวัสดุเพื่อให้เหมาะกับการชุบด้วย Spray น้ำ

เมื่อจะชุบโลหะที่ทำการอบเผาด้วยการใช้ Spray น้ำ ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของงานควรห้อยไว้ในแนวดิ่งเป็นแถวเดียว ต้องทำการยึดตรึงให้แน่น โดยไม่ให้ชิ้นงานหมุนเมื่อถูก Spray ระยะห่างของชิ้นงาน ควรไม่ต่ำกว่า ๓ นิ้ว สำหรับชิ้นงานที่กว้างไม่เกิน ๖ นิ้ว ส่วนชิ้นงานที่กว้างเกินกว่า ๖ นิ้ว จะต้องวางห่างกันไม่ต่ำกว่า ๖ นิ้ว

ปกติ

– ขนาดของชิ้นงาน

ขนาดและจำนวนของชิ้นงานที่จะทำการอบชุบแต่ละครั้งนั้น ควรพิจารณาดูว่าในการให้ความร้อนต่อชิ้นงานจะสามารถทำได้รวดเร็ว และทั่วถึงสม่ำเสมอกัน ไม่ควรใส่ชิ้นงานมากเกินไป และต้องคำนึงถึงการนำเอาออกมาจุ่มชุบได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย

– การอบเผาชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน

เมื่อชิ้นงานที่จะทำการอบเผามี ภาคหน้าตัด หนา บาง ไม่เท่ากันทั้งหมด เวลาที่ใช้ในการอบแช่ หรือใช้สำหรับในการทำ Precipitation ต้องใช้เกณฑ์ของความหนาของชิ้นงานมากสุดเป็นเกณฑ์ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดขนาดของชิ้นงานเสียก่อน เพื่อความแน่ใจในการทำงาน และใช้เวลาตามตารางผนวก ช. (เวลาที่ใช้ในการอบแช่ ในข้อ ๒.๑.๓)

ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ แต่มีความหนาน้อย จะต้องมีการจัดเรียงให้เหมาะสมเพื่อป้องกันมิให้แผ่นเกิดการคิดกันในขณะที่อบให้ความร้อนและโลหะอยู่ในสภาพนิ่ม ถ้าเป็นไปได้ในการอบชุบชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง หรือชิ้นเล็ก ๆ ควรทำให้อยู่ในลักษณะม้วนหรือขด ระยะห่างจะต้องคงไว้ด้วยเช่นกัน

ชิ้นส่วนจะต้องจัดเรียงเพื่อให้กระแสลมร้อนจากการอบเผาเข้าถึงได้ และในการจุ่มชุบก็จะต้องระลึกถึงการให้น้ำเข้าถึงได้ทั่วเช่นกัน

๒.๒.๒ <u>อุณหภูมิที่ใช้ในการอบเผา และเวลาในการอบแช่</u>

อุณหภูมิที่ใช้เฉพาะในการอบชุบ จะต้องให้เป็นไปตามตารางกำหนดไว้ เตาอบชุบควรจะได้ให้ความร้อนไว้ก่อนการนำชิ้นงานเข้าเตา อุณหภูมิของเตาจะต้องไม่สูงมากกว่าย่านสูงสุดที่กำหนดให้ โดยเฉพาะแต่ละชนิดของโลหะอลูมินั่มเจือ และประเภทของกรรมวิธีในการทำงาน ในการอบให้แก่ตัว เตาที่ใช้ในการทำงานอาจใส่ชิ้นงานในขณะเตายังเย็นอยู่ได้

ปกติด

การตั้งอุณหภูมิที่เครื่องวัดอุณหภูมิ ควรตั้งที่อุณหภูมิกึ่งกลางของย่านที่กำหนดให้ เช่น Al.๒๐๒๔ กำหนดให้อบเผาที่อุณหภูมิ ๔๑๐° – ๔๓๐° F ควรใช้อุณหภูมิ ๔๒๐° F เป็นต้น เครื่องควบคุมอุณหภูมิของเตาต้องมีความแน่นอนให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± ๕° F

ภายหลังที่บรรจุชิ้นงานเข้าภายในเตาอบ และอุณหภูมิของเตาเริ่มขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งเอาไว้แล้ว ชิ้นงานจะต้องแช่ไว้ตามระยะเวลาที่กำหนดให้

๒.๒.๓ การลดแรงเครียดของชิ้นงาน

วัสดุโลหผสมอลูมินั่มเจือทุกประเภทในตารางผนวก ฉ. (กรรมวิธีการอบอ่อน) อาจใช้เป็นการลดแรงเครียดได้อย่างเต็มที่ โดยใช้เวลาและอุณหภูมิที่ให้ไว้ตามตารางเฉพาะ Partial Anneal การลดแรงเครียดที่ผิวของชิ้นงานจะใช้ที่อุณหภูมิ ๓๓๕° – ๓๔๕° C เป็นเวลานาน $\frac{๑}{๒}$ – ๑ ชั่วโมง และนำออกมาเย็นในอากาศ

โลหะทุกชนิดที่ผ่านการลดแรงเครียดตามตารางผนวก ฉ. โดยทำแบบ Fully Stress (คือใช้ทำ Partial Anneal) ควรจะได้นำมาอบชุบให้แข็งเสียใหม่

โลหะอลูมินั่มเจือที่ได้จากการหล่อ เมื่อทำการอบชุบให้แข็งแล้ว ควรนำมาลดแรงเครียดด้วย โดยใช้เวลาอย่างสูง ๑ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการ Aging ๒๐๗° C แต่ควรกระทำภายหลังการตบแต่งชิ้นงานให้เรียบร้อยก่อน เช่น การขัดผิว หรือการลบคมต่าง ๆ โดยเครื่องจักรกลต่าง ๆ

อลูมินั่มเจือ ประเภท ๗๐๗๕ – T_6และ T_{73}; ๗๐๗๕ – T_6 และ ๗๐๗๔ – T_6 อาจใช้การลดแรงเครียดที่อุณหภูมิ ๑๒๖° C ± ๕° เวลารวมในการทำงานอย่างสูงไม่เกิน ๑ ชั่วโมง

๒.๒.๔ การใช้สาร Sodium Fluoborate

การใช้สาร Sodium Fluoborate เมื่อทำการอบชุบโลหะที่ไม่ได้ผ่านการ Clad (ยกเว้นวัสดุที่ได้จากการหล่อและการตีขึ้นรูป) และใช้

ปกติด

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางจำพวกธาตุเจือหลัก

หมายเหตุ	ธาตุเจือหลักที่ผสม
1 xxx.....	อลูมินั่ม ๙๙.๐๐ % เป็นอย่างต่ำ หรือมากกว่านี้
2 xxx.....	ทองแดง
3 xxx.....	แมงกานีส
4 xxx.....	ซิลิกอน
5 xxx.....	แม็กนีเซียม
6 xxx.....	แม็กนีเซียม และซิลิกอน
7 xxx.....	สังกะสี
8 xxx	ธาตุอื่น ๆ
9 xxx	ยังไม่มีใช้

ภาคผนวก

ผนวก ข. ตารางเปรียบเทียบการเรียกชื่อแยกประเภทแบบเก่าและแบบใหม่

แบบเก่า	แบบใหม่	ชาตุเจือหลัก
2S	๑๑๐๐	ไม่มีชาตุเจือ (อลูมิเนี่ยม ๙๙.๐๐ %)
3S	๓๐๐๓	แมงกานีส
4S	๓๐๐๔	แมงกานีส
11S	๒๐๑๑	ทองแดง
14S,R301 Core	๒๐๑๔	ทองแดง
17S	๒๐๑๗	ทองแดง
A17S	๒๑๑๗	ทองแดง(ควบคุมวิธีพิเศษจำกัด impurities)
18S	๒๐๑๘	ทองแดง
24S	๒๐๒๔	ทองแดง
19S	๒๒๑๙	ทองแดง
32S	๔๐๓๒	ซิลิกอน
50S	๕๐๕๐	แม็กนีเซียม
52S	๕๐๕๒	แม็กนีเซียม
56S	๕๐๕๖	แม็กนีเซียม
61S	๖๐๖๑	แม็กนีเซียม & ซิลิกอน
62S	๖๐๖๒	แม็กนีเซียม & ซิลิกอน
63S	๖๐๖๓	แม็กนีเซียม & ซิลิกอน
72S	๗๐๗๒	สังกะสี
75S	๗๑๗๕	สังกะสี
78S	๗๐๗๘	สังกะสี
79S	๗๐๗๙	สังกะสี

ผนวก ค. – ๑ เวลาที่ใช้ในการอบแช่สำหรับ Solution Heat Treatment

สำหรับวัสดุโกลน

ความหนาของวัสดุ (นิ้ว)	เวลาอบแช่ (Soaking Time) (นาที)			
	เตาเกลือ		เตาบรรยากาศ	
	เวลาต่ำสุด	เวลาสูงสุด	เวลาต่ำสุด	เวลาสูงสุด
๐.๐๑๖ และต่ำกว่า	๑๐	๑๕	๒๐	๒๕
๐.๐๑๗ – ๐.๐๒๐	๑๐	๒๐	๒๐	๓๐
๐.๐๒๑ – ๐.๐๓๒	๑๕	๒๕	๒๕	๓๕
๐.๐๓๓ – ๐.๐๖๓	๒๐	๓๐	๓๐	๔๐
๐.๐๖๔ – ๐.๐๙๐	๒๕	๓๕	๓๕	๔๕
๐.๐๙๑ – ๐.๑๒๕	๓๐	๔๐	๔๐	๕๐
๐.๑๒๖ – ๐.๒๕๐	๓๕	๔๕	๕๐	๖๐
๐.๒๕๑ – ๐.๕๐๐	๔๕	๕๕	๖๐	๗๐
๐.๕๐๑ – ๑.๐๐๐	๖๐	๗๐	๘๐	๑๐๐
๐.๐๐๑ – ๑.๕๐๐	๘๐	๑๐๐	๑๒๐	๑๓๐
๐.๕๐๑ – ๒.๐๐๐	๑๐๕	๑๑๕	๑๕๐	๑๖๐
๒.๐๐๑ – ๒.๕๐๐	๑๒๐	๑๓๐	๑๘๐	๑๙๐
๒.๕๐๑ – ๓.๐๐๐	๑๕๐	๑๖๐	๒๑๐	๒๒๐
๓.๐๐๑ – ๓.๕๐๐	๑๖๕	๑๗๕	๒๔๐	๒๕๐
๓.๕๐๑ – ๔.๐๐๐	๑๘๐	๑๙๐	๒๗๐	๒๘๐

ภาคผนวก

ผนวก ก. – ๒ เวลาที่ใช้ในการอบแช่ (Soaking Time) ของชิ้นหล่อ

ชิ้นหล่อจากแบบทราย (Sand Cast Alloys)

ประเภทของอลูมินัมเจือ	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)
๑๒๒	๖ – ๑๘
๑๘๒	๒ – ๑๐
๑๙๕	๖ – ๑๘
S ๑๙๕ (๑๐๙)	๖ – ๒๔
๒๒๐	๑๒ – ๒๘
๓๑๙	๖ – ๑๘
๓๕๕	๖ – ๑๘
๓๕๖	๖ – ๑๘
ชิ้นหล่อจากแบบถาวร (Permanent Mold Cast Alloys)	
๑๒๒	๖ – ๑๘
A ๑๓๒	๖ – ๑๘
๑๘๒	๒ – ๑๐
B ๑๙๕	๙๐ – ๑๒
๓๐๗	๖ – ๑๘
๓๕๖	๖ – ๑๘

ภาคผนวก

* ผนวก ง. - ๑ อุณหภูมิที่ใช้อบเผาในกรรมวิธี Solution Heat Treatment

* *สำหรับวัสดุโลหะต่าง ๆ ยกเว้นโลหะที่ได้จากการดึงขึ้นรูป

ประเภทของอลูมินั่มเจือ	อุณหภูมิที่ใช้ (องศา F)	สภาพที่ได้
๒๐๑๔	๙๒๕ – ๙๔๕	๒๐๑๔ – T_4
๒๐๑๗	๙๒๕ – ๙๔๕	๒๐๑๗ – T_4
๒๑๑๗	๙๒๕ – ๙๕๐	๒๑๑๗ – T_4
* ๒๐๒๘	๙๑๐ – ๙๓๐ 488°C – 499°C	๒๐๒๘ – T_4
* ๖๐๖๑	๙๖๐ – ๑๐๑๐ 516°C – 543°C	๖๐๖๑ – T_4
๖๐๖๒	๙๖๐ – ๑๐๑๐	๖๐๖๒ – T_4
๖๐๖๖	๙๖๐ – ๙๘๐	๖๐๖๖ – T_4
๗๐๗๕ (จากการรีดหรือดึงขึ้นรูป)	๘๖๐ – ๙๓๐	๗๐๗๕ – W
๗๐๗๔ (จากการปูดขึ้นรูป)	๘๖๐ – ๘๘๐	๗๐๗๕ – W
* ๗๐๗๕ (แผ่นหนา .๐๕๑ นิ้ว หรือต่ำกว่า)	๙๑๐ – ๙๓๐ [illegible]	๗๐๗๕ – W
๗๑๗๘ (จากการรีดหรือดึงขึ้นรูป)	๘๖๐ – ๙๓๐	๗๑๗๘ – W
๗๑๗๘ (จากการปูดขึ้นรูป)	๘๖๐ – ๘๘๐	๗๑๗๘ – W
๗๐๗๙	๘๒๐ – ๘๙๐	๗๐๗๙ – W

หมายเหตุ สำหรับ ๗๐๗๕ อาจใช้อุณหภูมิอื่น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ หน้าตัด และข้อจำกัดอื่น ๆ

ผนวก ง. – ๒ อุณหภูมิที่ใช้อบเผาในกรรมวิธี Solution Heat Treatment

สำหรับวัสดุที่ได้จากการตีขึ้นรูป (Forgings)

ประเภทของอลูมินั่มเจือ	อุณหภูมิที่ใช้ (องศา F)	สภาพที่ได้
๒๐๑๔	๙๒๕ – ๙๕๐	๒๐๑๔ – T_4
๒๐๑๗	๙๒๕ – ๙๕๐	๒๐๑๗ – T_4
๒๐๑๘	๙๔๐ – ๙๗๐	๒๐๑๘ – T_4
๒๐๒๕	๙๕๐ – ๙๗๐	๒๐๒๕ – T_4
๘๐๓๒	๙๔๐ – ๙๗๐	๘๐๓๒ – T_4
๖๐๕๑	๙๕๐ – ๙๘๐	๖๐๕๑ – T_4
๖๐๖๑	๙๖๐ – ๑๐๑๐	๖๐๖๑ – T_4
* ๗๐๗๕	๗๖๐ – ๘๕๐	๗๐๗๕ – W
* ๗๐๗๙	๘๒๐ – ๘๙๐	๗๐๗๙ – W

หมายเหตุ สำหรับวัสดุ ๗๐๗๕ และ ๗๐๗๙ อาจใช้อุณหภูมิอื่น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน้าตัดและข้อจำกัดอื่น ๆ ที่ต้องการ

ผนวก ง. – ๓ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบเผาในกรรมวิธี Solution Heat Treatment

ชิ้นหล่อจากแบบทราย

ประเภทของอลูมินั่มเจือ	อุณหภูมิที่ใช้ (องศา F)	สภาพที่ได้
๑๒๒	๙๓๐ – ๙๖๐	T_4
๑๙๒	๙๕๐ – ๙๘๐	T_4
๑๙๕	๙๘๐ – ๙๗๐	T_4
๓๒๐	๘๐๐ – ๘๒๐	T_4
๓๑๙	๙๒๐ – ๙๕๐	T_4
๓๕๕	๙๖๐ – ๙๙๐	T_4
๓๕๖	๙๘๐ – ๑๐๑๐	T_4
ชิ้นหล่อจากแบบถาวร (Permanent Mold Cast Alloys)		
๑๒๒	๙๓๐ – ๙๖๐	T_4
A ๑๓๒	๙๘๐ – ๙๗๐	T_4
๑๙๒	๙๕๐ – ๙๘๐	T_4
B ๑๙๕	๙๓๗ – ๙๖๕	T_4
๓๕๕	๙๖๐ – ๙๙๐	T_4
๓๕๖	๙๘๐ – ๑๐๑๐	T_4

ผนวก จ. – ๑ กรรมวิธี Precipitation Aging

วัสดุต่าง ๆ ยกเว้นที่ได้จากการดีขึ้นรูป

ประเภทของโลหะและสภาพของโลหะก่อนการ Aging	เวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง) **	อุณหภูมิที่ใช้ (องศา F)**	สภาพของโลหะภายหลังการอบ
๒๐๑๗ – หลังชุบ (W)	๔๖	อุณหภูมิห้อง	๒๐๑๗ – T_4
๒๑๑๗ – หลังชุบ (W)	๔๖	อุณหภูมิห้อง	๒๑๑๗ – T_4
๒๐๒๔ – หลังชุบ (W)	๔๖	อุณหภูมิห้อง	๒๐๒๔ – T_4
๖๐๖๑ – หลังชุบ (W)	๔๖	อุณหภูมิห้อง	๖๐๖๑ – T_4
๖๐๖๑ – T_4	๗ ๑/๒ – ๘ ๑/๒	๓๔๐ – ๓๖๐ 171°C – 182°C	๖๐๖๑ – T_6
๒๐๒๐ – W	๑๘	๓๑๐ – ๓๖๐	๒๐๒๐ – T_6
๒๐๒๔ – T_{41} – T_{42}	๑๖	๓๗๐ – ๓๘๐ 188°C 193°C	๒๐๒๔ – T_{61} – T_{62}
๒๐๒๔ – T_4	๑๑ – ๑๓	๓๗๐ – ๓๘๐	๒๐๒๔ – T_6
๒๐๒๔ – T_3	๑๑ – ๑๓	๓๗๐ – ๓๘๐	๒๐๒๔ – T_{81}
๒๐๒๔ – T_{36}	๗ – ๙	๓๗๐ – ๓๘๐	๒๐๒๔ – T_{86}
๒๐๑๔ – T_{41} – T_{42}	๘ – ๑๒	๓๐๕ – ๓๓๐	๒๐๑๔ – T_{61} – T_{62}
๒๐๑๔ – T_4	๑๗ – ๒๐	๓๐๕ – ๓๓๐	๒๐๒๔ – T_6
๖๐๖๖ – T_4	๗ ๑/๒ – ๘ ๑/๒	๓๔๐ – ๓๖๐	๖๐๖๖ – T_6
๖๐๖๑ – T_4	๗ ๑/๒ – ๘ ๑/๒	๓๔๐ – ๓๖๐	๖๐๖๑ – T_6
๗๐๗๕ – W	๒๔	๒๔๐ – ๒๖๐ 116°C 127°C	๗๐๗๕ – T_6
๗๑๗๘ – W	๒๒	๒๔๐ – ๒๖๐	๗๑๗๘ – T_6
๖๐๖๓ – F	๑ – ๒	๔๕๐ – ๕๖๐	๖๐๖๓ – T_5
๗๐๗๔ – หลังชุบ (W)	๕ วันที่อุณหภูมิห้อง และ ๔๘ ชม.	๒๓๐ – ๒๕๐	๗๐๗๔ – T_6

หมายเหตุ

* สำหรับ ๙๐๗๕ – ๗ นั้น สามารถใช้กรรมวิธีอบโดยเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบได้ แต่เฉพาะโลหะที่เป็นแผ่นที่หนาน้อยกว่า ๐.๕ นิ้ว เท่านั้น โดยอบที่อุณหภูมิ ๒๓๐° – ๒๕๐° F เป็นเวลา ๓ – ๔ ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ ๓๑๕° – ๓๓๕° F เป็นเวลา ๓ – ๔ ชั่วโมง, อุณหภูมิที่เปลี่ยนนั้นสามารถให้อุณหภูมิเพิ่มได้โดยตรงจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำ ๆ ไปยังอุณหภูมิที่สูงกว่าในทันที หรือจะนำชิ้นงานออกมาให้เย็นก่อนในระหว่างเปลี่ยนขั้นตอนการทำก็ได้

** เวลาและอุณหภูมิที่ใช้นั้น เริ่มนับเมื่ออุณหภูมิที่ให้ถึงย่านกำหนด (ไม่ใช่นับตั้งแต่เริ่มให้อุณหภูมิต่ำ ๆ) และใช้เฉพาะโลหะที่หนาตั้งแต่ ๐.๕ นิ้ว และต่ำกว่า และให้เพิ่มอีก $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง สำหรับวัสดุที่หนาเพิ่มขึ้นอีก แต่ละความหนา $\frac{1}{2}$ นิ้ว

ผนวก จ. – ๒ กรรมวิธี Precipitation Aging สำหรับโลหะที่ได้จากการตีขึ้นรูป

ประเภทของโลหะและสภาพของโลหะก่อนการ Aging	เวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิที่ใช้ (องศา F)	สภาพของโลหะภายหลังการอบ
๒๐๑๔ – T_4	๕ – ๑๕	๓๔๐ – ๓๖๐	๒๐๑๔ – T_6
๒๐๑๔ – หลังการชุบ	๔๖ อย่างต่ำ	อุณหภูมิห้อง	๒๐๑๔ – T_6
๒๐๑๗ – หลังการชุบ	๔๖ อย่างต่ำ	อุณหภูมิห้อง	๒๐๑๗ – T_6
๒๐๑๘ – T_4	๔ – ๑๒	๓๓๐ – ๓๕๐	๒๐๑๘ – T_6
๒๐๒๕ – T_4	๖ – ๑๔	๓๓๐ – ๓๕๐	๒๐๒๕ – T_6
๔๐๓๒ – T_4	๔ – ๑๒	๓๓๐ – ๓๕๐	๔๐๓๒ – T_6
๖๑๕๑ – T_4	๔ – ๑๒	๓๓๐ – ๓๕๐	๖๑๕๑ – T_6
๗๐๗๕ – W	๒๔	๒๓๐ – ๒๖๐	๗๐๗๕ – T_6
X ๗๐๗๘	๕ วัน ที่อุณหภูมิห้องและตามด้วย ๔๘ ชม.	๒๓๐ – ๒๕๐	๗๐๗๘ – T_6

ตัวอย่าง

ผนวก ข. – ๓ กรรมวิธี Precipitation Aging สำหรับชิ้นงานแผ่น

ประเภทของโลหะและสภาพของโลหะก่อนการ Aging	เวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิที่ใช้ (องศา F)	สภาพของโลหะภายหลังการอบ
๑๕๒ – T_{41}	๑ – ๓	๔๐๐ – ๔๕๐	๑๔๒ – T_{61}
๑๔๕ – T_4	๑ – ๓	๓๐๐ – ๓๒๐	๑๔๒ – T_6
๑๔๕ – T_4	๑ – ๔	๓๐๐ – ๓๒๐	๑๔๕ – T_6
๒๒๐ – W	๔๖ อย่างต่ำ	อุณหภูมิห้อง	๒๒๐ – T_4
๓๑๔ – T_4	๑ – ๒	๓๐๐ – ๓๒๐	๓๑๔ – T_6
๓๓๕ – T_4	๑ – ๒	๓๐๐ – ๓๒๐	๓๓๕ – T_6
๓๕๖ – T_4	๑ – ๒	๓๐๐ – ๓๒๐	๓๕๖ – T_6
๓๕๖ – F	๒ – ๑๒	๔๓๐ – ๔๕๐	๓๕๖ – T_6
๔๐	๔ – ๑๑	๓๔๕ – ๓๖๕	๔๐ – E
๔๐	๒๑ วัน	อุณหภูมิห้อง	๔๐ – E
ชิ้นหล่อจากแบบถาวร			
๑๔๒ – T_{41}	๑ – ๓	๔๐๐ – ๔๕๐	๑๔๒ – T_{61}
B ๑๔๕ – T_4	๑ – ๔	๓๐๐ – ๓๒๐	๑๔๕ – T_6
๓๑๔ – T_4	๑ – ๒	๓๐๐ – ๓๓๐	๓๑๔ – T_6
๓๔๕ – T_4	๑ – ๒	๓๐๐ – ๓๒๐	๓๔๕ – T_6
๓๕๖ – T_4	๑ – ๒	๓๐๐ – ๓๒๐	๓๕๖ – T_6
A ๑๓๒ – T_{45}	๑๔ – ๑๘	๓๐๐ – ๓๔๐	๑๓๒ – T_{65}

ภาคผนวก

ผนวก ง. กรรมวิธีการอบอ่อน (Annealing)

แบบของการอบอ่อน		ประเภทของโลหะ ใหม่	ประเภทของโลหะ เก่า	อุณหภูมิ ^{o}c	เวลาที่ใช้อบแช่ (ชั่วโมง)	การทำให้เย็น
Full Anneal	ทำในเตาอัตรา	๑๑๐๐	2S	๓๓๕ – ๓๔๕	ไม่ต้องการอบแช่	เย็นในอากาศ
		๓๐๐๓	3S	๓๕๐ – ๔๐๐		
		๕๒๕๐	52S	๓๓๕ – ๓๔๕		
		๕๐๕๖	56S	๓๓๕ – ๓๔๕		
	๑ ชั่วโมง/นิ้ว	๒๐๑๔	14S	๔๐๐ – ๔๒๕	๒ (เป็นอย่างน้อย)	เย็นในเตาอัตรา ๒๕°c/ชม. จนถึง ๒๓๐° – ๒๖๐° แล้วเย็นในอากาศ
		๒๐๑๗	17S	๔๐๐ – ๔๒๕	๒ (")	
		๒๐๒๔	24S	๔๐๐ – ๔๒๕	๒ (")	
		๖๐๖๑	61S	๔๐๐ – ๔๒๕	๒ (")	
		๖๐๖๓	63S	๔๐๐ – ๔๒๕	๒ (")	
	๑ ชั่วโมง/นิ้ว	๗๐๗๕	75S	๔๑๕ – ๔๔๐	๑ (เป็นอย่างน้อย)	เย็นในเตาอัตรา ๒๕°c/ชม. จนถึง ๒๗๔° – ๒๖๐° แล้วแช่ที่อุณหภูมินี้นาน ๑ ชม. (เป็นอย่างน้อย) แล้วเย็นในอากาศ
Partial Anneal	๑ ชั่วโมง/นิ้ว	๒๐๑๔	14S	๓๓๕ – ๓๔๕	หมายเหตุ ๗	เย็นในอากาศ
		๒๐๑๗	17S	๓๓๕ – ๓๔๕		
		๒๐๒๔	24S	๓๓๕ – ๓๔๕		
		๖๐๖๑	61S	๓๓๕ – ๓๔๕	๒½ – ๑	
		๖๐๖๓	63S	๓๓๕ – ๓๔๕		
	๒ ชั่วโมง/นิ้ว	๗๐๗๕	75S	๔๑๕ – ๔๔๐ แล้วต่อที่อุณหภูมิ ๒๒๐ – ๒๔๕	๒ (อย่างน้อย)	เย็นในอากาศ เย็นในอากาศ
		๗๐๗๕ หมายเหตุ ๑	75S	๓๓๕ – ๓๔๕	๒½ – ๑ หมายเหตุ ๘	เย็นในอากาศ
Anneal	โลหะหลอทุกชนิด			๓๔๕ – ๓๔๕	ประมาณ ๒	เย็นในอากาศ

ผนวก ช. เวลาที่ยอมให้ในระหว่างการนำเอาชิ้นส่วนออกจากเตาถึงการจุ่มชุบ

ความหนาของชิ้นงาน (นิ้ว)	เวลาที่ยอมให้ได้มากที่สุด (วินาที)
ต่ำกว่า ๐.๐๑๖ – ๐.๐๑๖	๕
๐.๐๑๗ – ๐.๐๓๑	๗
๐.๐๓๒ – ๐.๐๔๑	๑๐
๐.๐๔๑ มากกว่า ๐.๐๕๑	๑๕

หมายเหตุ เวลาที่ยอมให้นี้เริ่มนับตั้งแต่ในทันทีที่ประตูของเตาเริ่มเปิดออก หรือทันทีที่ยกชิ้นงานออกจากเตาเกลือ แล้วนำไปจุ่มชุบลงในน้ำ และเวลาที่ยอมให้นี้อาจจะมากกว่านี้ได้สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดภาคหน้าตัดมาก ๆ และอุณหภูมิของโลหะยังคงสูงอยู่กว่า ๗๗๕°F ก่อนจุ่มลงในน้ำ

ผนวก ข. ตารางสำหรับใช้ในการทำ Resolution ของ Alclad

ประเภทของโลหะ	ความหนา (นิ้ว)	จำนวนครั้งที่ยอมให้ในการอบชุบซ้ำ
๒๐๑๔ ๒๐๒๔ ๗๐๗๕	.๐๒๕ และต่ำกว่า	๑
๒๐๑๔ ๒๐๒๔ ๗๐๗๕	.๐๒๖ – .๑๒๕	๒
๒๐๑๔ ๒๐๒๔ ๗๐๗๕	มากกว่า .๑๒๕	๓

ผนวก ฆ. คุณสมบัติทางแรงกลของโลหะอลูมินั่มเจือสภาพต่าง ๆ

ชนิดและสภาพของอลูมินั่มเจือ	Tensile Strength (PSI)	Yield Stnength (เพิ่ม ๒ %) (PSI)	Elongation เปอร์เซนต์ใน ๒ นิ้ว ชิ้นทดลองแผน Sheet หนา ๑/๑๖ นิ้ว	ค่าความแข็ง Brinell ๕๐๐ กก. load 10 mm. ball	Shearing Strength (PSI)
1100 - O	๑๓,๐๐๐	๕,๐๐๐	๓๕	๒๓	๙,๐๐๐
1100 - H_{12}	๑๖,๐๐๐	๑๕,๐๐๐	๑๒	๒๘	๑๐,๐๐๐
1100 - H_{14}	๑๘,๐๐๐	๑๗,๐๐๐	๙	๓๒	๑๑,๐๐๐
1100 - H_{16}	๒๑,๐๐๐	๒๐,๐๐๐	๖	๓๘	๑๒,๐๐๐
1100 - H_{18}	๒๔,๐๐๐	๒๒,๐๐๐	๕	๔๔	๑๓,๐๐๐
3003 - O	๑๖,๐๐๐	๖,๐๐๐	๓๐	๒๙	๑๑,๐๐๐
3003 - H_{12}	๑๙,๐๐๐	๑๘,๐๐๐	๑๐	๓๕	๑๒,๐๐๐
3003 - H_{14}	๒๒,๐๐๐	๒๑,๐๐๐	๘	๔๐	๑๔,๐๐๐
3003 - H_{16}	๒๖,๐๐๐	๒๕,๐๐๐	๕	๔๗	๑๕,๐๐๐
3003 - H_{18}	๒๙,๐๐๐	๒๗,๐๐๐	๔	๕๕	๑๖,๐๐๐
Alclad 3003	๒๖,๐๐๐	๑๐,๐๐๐	๒๐	๔๕	๑๖,๐๐๐
3004 - O	๓๑,๐๐๐	๒๕,๐๐๐	๑๐	๕๒	๑๗,๐๐๐
3004 - H_{32}	๓๕,๐๐๐	๒๙,๐๐๐	๙	๖๓	๑๘,๐๐๐
3004 - H_{34}	๓๘,๐๐๐	๓๓,๐๐๐	๕	๗๐	๒๐,๐๐๐
3004 - H_{36}	๔๑,๐๐๐	๓๖,๐๐๐	๕	๗๗	๒๑,๐๐๐
3004 - H_{38}	๒๕,๐๐๐	๑๐,๐๐๐	๒๑	—	๑๘,๐๐๐
Alclad 3004	๖๓,๐๐๐	๔๐,๐๐๐	๒๐	—	๓๗,๐๐๐
Alclad 2014-O	๖๙,๐๐๐	๓๗,๐๐๐	๒๓	—	๓๗,๐๐๐
Alclad 2014-T_3	๖๘,๐๐๐	๖๐,๐๐๐	๑๐	—	๔๑,๐๐๐
Alclad 2014-T_4					
Alclad 2014-T_6					

ชนิดและสภาพของอลูมิเนียมผสม	Tensile Strength (PSI)	Yield Strength (เพิ่ม ๒ %)	Elongation (เปอร์เซนต์ใน ๒ นิ้ว), ชิ้นทดลองแผ่นหนา $\frac{๑}{๑๖}$ นิ้ว	ทดความแข็ง Brinell ๕๐๐ กก. Load 10mm.ball	Shearing Strength (PSI)
2024 - O	๒๗,๐๐๐	๑๑,๐๐๐	๒๐	๔๗	๑๘,๐๐๐
2024 - T_3	๗๐,๐๐๐	๕๐,๐๐๐	๑๘	๑๒๐	๔๑,๐๐๐
2024 - T_{36}	๗๒,๐๐๐	๕๗,๐๐๐	๑๓	๑๓๐	๔๒,๐๐๐
2024 - T_4	๖๘,๐๐๐	๔๗,๐๐๐	๒๐	๑๒๐	๔๑,๐๐๐
Alclad2024-O	๒๒,๐๐๐	๑๑,๐๐๐	๒๐	—	๑๘,๐๐๐
Alclad2024-T_3	๖๔,๐๐๐	๔๕,๐๐๐	๑๘	—	๔๐,๐๐๐
Alclad2024-T_{36}	๖๗,๐๐๐	๕๓,๐๐๐	๑๑	—	๔๑,๐๐๐
Alclad2024-T_4	๖๔,๐๐๐	๔๒,๐๐๐	๑๔	—	๔๐,๐๐๐
Alclad2024-T_{81}	๖๕,๐๐๐	๖๐,๐๐๐	๖	—	๔๐,๐๐๐
Alclad2024-T_{86}	๗๐,๐๐๐	๖๖,๐๐๐	๖	—	๔๒,๐๐๐
5005 - O	๑๘,๐๐๐	๖,๐๐๐	๓๐	๒๘	๑๑,๐๐๐
5005 - H_{32}	๒๐,๐๐๐	๑๓,๐๐๐	๑๑	๓๖	๑๔,๐๐๐
5005 - H_{34}	๒๓,๐๐๐	๒๐,๐๐๐	๘	๔๑	๑๔,๐๐๐
5005 - H_{36}	๒๖,๐๐๐	๒๔,๐๐๐	๖	๔๖	๑๕,๐๐๐
5005 - H_{38}	๒๘,๐๐๐	๒๗,๐๐๐	๔	๕๑	๑๖,๐๐๐
5050 - O	๒๑,๐๐๐	๘,๐๐๐	๒๘	๓๖	๑๕,๐๐๐
5050 - H_{32}	๒๕,๐๐๐	๒๑,๐๐๐	๙	๔๖	๑๗,๐๐๐
5050 - H_{34}	๒๘,๐๐๐	๒๔,๐๐๐	๘	๕๓	๑๘,๐๐๐
5050 - H_{36}	๓๐,๐๐๐	๒๘,๐๐๐	๗	๕๘	๑๙,๐๐๐
5050 - H_{38}	๓๒,๐๐๐	๒๙,๔๐๐	๖	๖๓	๒๐,๐๐๐
5052 - O	๒๘,๐๐๐	๑๓,๐๐๐	๒๕	๔๗	๑๘,๐๐๐
5052 - H_{32}	๓๓,๐๐๐	๒๘,๐๔๐	๑๖	๖๐	๒๐,๐๐๐

ชนิดและสภาพของอลูมินั่มเจือ	Tensile Strength (PSI)	Yield Strength (เพิ่ม ๒ %) (PSI)	Elongation (เปอร์เซนต์ใน ๒ นิ้ว) ชิ้นทดลองแผ่นหนา $\frac{๑}{๑๖}$ นิ้ว	ค่าความแข็ง Brinell ๕๐๐ กก. load 10mm. ball	Shearing Strength (PSI)
5052 - H_{34}	๓๘,๐๐๐	๓๑,๐๐๐	๑๐	๖๘	๒๑,๐๐๐
5052 - H_{36}	๔๐,๐๐๐	๓๕,๐๐๐	๘	๗๓	๒๓,๐๐๐
5052 - H_{38}	๔๒,๐๐๐	๓๗,๐๐๐	๗	๗๗	๒๔,๐๐๐
5154 - O	๓๕,๐๐๐	๑๗,๐๐๐	๒๗	๕๘	๒๒,๐๐๐
5154 - H_{112}	๓๕,๐๐๐	๑๗,๐๐๐	๒๕	๖๓	—
5154 - H_{32}	๓๔,๐๐๐	๓๐,๐๐๐	๑๕	๖๗	๒๒,๐๐๐
5154 - H_{34}	๔๒,๐๐๐	๓๓,๐๐๐	๑๓	๗๘	๒๔,๐๐๐
5154 - H_{36}	๔๕,๐๐๐	๓๖,๐๐๐	๑๒	๘๓	๒๖,๐๐๐
5154 - H_{38}	๔๘,๐๐๐	๓๙,๐๐๐	๑๐	๘๗	๒๘,๐๐๐
5357 - O	๑๙,๐๐๐	๗,๐๐๐	๒๕	๓๒	๑๒,๐๐๐
5357 - H_{32}	๒๒,๐๐๐	๑๙,๐๐๐	๙	๔๐	๑๓,๐๐๐
5357 - H_{34}	๒๕,๐๐๐	๒๒,๐๐๐	๘	๔๕	๑๕,๐๐๐
5357 - H_{36}	๒๘,๐๐๐	๒๖,๐๐๐	๗	๕๑	๑๗,๐๐๐
5357 - H_{38}	๓๒,๐๐๐	๓๐,๐๐๐	๖	๕๕	๑๘,๐๐๐
6061 - O	๑๘,๐๐๐	๘,๐๐๐	๒๕	๓๐	๒๒,๐๐๐
6061 - T_4	๓๕,๐๐๐	๒๑,๐๐๐	๒๒	๖๕	๒๔,๐๐๐
6061 - T_6	๔๕,๐๐๐	๑๐,๐๐๐	๑๒	๔๕	๓๐,๐๐๐
7075 - O	๓๓,๐๐๐	๑๕,๐๐๐	๑๗	๖๐	๒๒,๐๐๐
7075 - T_6	๘๓,๐๐๐	๗๓,๐๐๐	๑๑	๑๕๐	๔๘,๐๐๐
Alclad 7075-O	๓๒,๐๐๐	๑๔,๐๐๐	๑๗	—	๒๒,๐๐๐
Alclad 7075-T_6	๗๖,๐๐๐	๖๗,๐๐๐	๑๑	—	๔๖,๐๐๐
Alclad 7079-T_6	๗๐,๐๐๐	๖๐,๐๐๐	—	—	
7178 - O	๔๐,๐๐๐	๒๑,๐๐๐	๑๐	—	
7178 - T_6	๘๓,๐๐๐	๗๒,๐๐๐	๖	—	
7079 - T_6	๗๖,๐๐๐	๖๒,๐๐๐	—	—	

บรรณานุกรม

๑. T.O. 1 - 1A - 9, Section 3 Aluminium Alloys

๒. Hawker De Havilland Australia Pty.Ltd., "Heat Treatment of Aluminum Alloys.", 1971

๓. Kent R.Van Horn, "Aluminum" Vol.I. Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams, February, 1967

๔. MIL - H - 6088E

๕. ที่ระลึก กองทัพอากาศ ครบรอบ ๕๐ ปี, ๒๗ มีนาคม ๒๕๐๘, โรงพิมพ์กรมสารบรรณทหารอากาศ

๖. ๔๐ ปี กองทัพอากาศ, ข่าวทหารอากาศ ปีที่ ๔๕, ฉบับที่ ๑๑ - ๑๒ กุมภาพันธ์ - มีนาคม ๒๕๒๘, โรงพิมพ์ กรมสารบรรณทหารอากาศ