

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อะลูมิเนียม

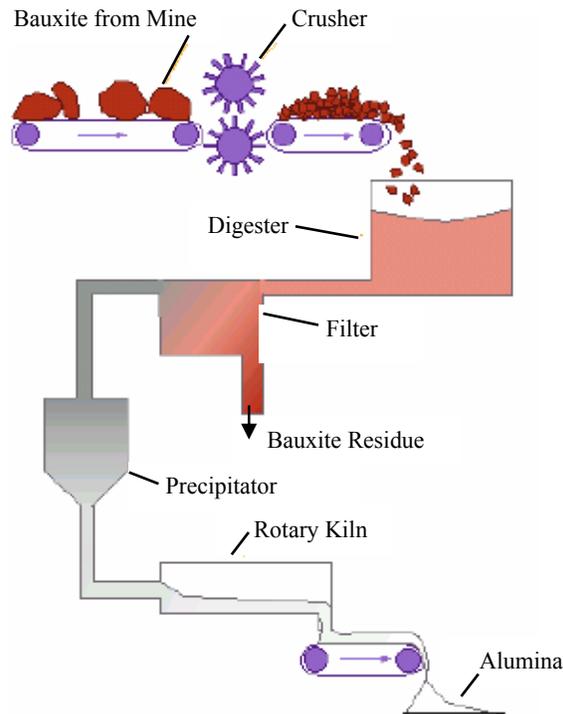
อะลูมิเนียมเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีมากเป็นอันดับสามของโลกรองจากออกซิเจนและซิลิกอน อะลูมิเนียมไม่เหมือนกับทองหรือโลหะอื่นที่จะพบในภาวะบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีมากจึงพบอยู่ในสถานะของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งมีชื่อเรียกกันโดยทั่วไปว่า อะลูมินา

อะลูมินาบริสุทธิ์สามารถสกัดได้จากแหล่งแร่บ็อกไซต์ซึ่งมีส่วนประกอบของแร่ธาตุต่างๆดังต่อไปนี้

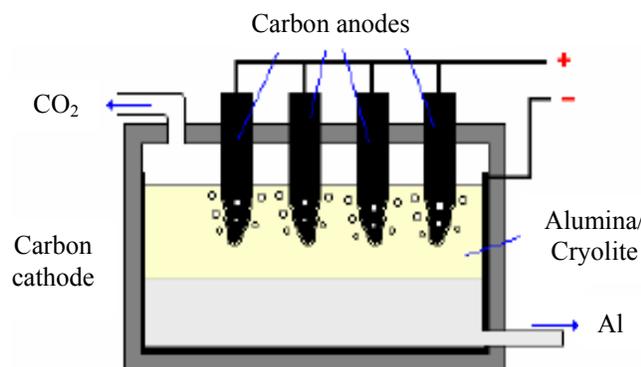
- 1) อะลูมินา 60% โดยประมาณ
- 2) สนิมเหล็กไม่เกิน 28% โดยประมาณ
- 3) ซิลิกาไม่เกิน 6%
- 4) ไททาเนียมออกไซด์ไม่เกิน 3%
- 5) 10 -30% เป็นสารละลายสารเคมีอื่นๆ

การสกัดอะลูมินาบริสุทธิ์ทำได้โดยเอาแร่บ็อกไซต์ไปบดให้ละเอียดและนำมาผสมกับสารละลายโซดาไฟเข้มข้น อะลูมินาจะถูกทำให้ละลายในสารละลายโซดาไฟภายใต้ความร้อนและความดันที่เหมาะสม เมื่อผ่านสารละลายที่ได้นี้ไปยังเครื่องกรอง สารละลายที่มีอะลูมินาจะสามารถผ่านเครื่องกรอง ในขณะที่แร่ธาตุอื่นๆที่ไม่ละลายในโซดาไฟจะตกตะกอน เมื่อนำสารละลายนี้ไปอบที่ความร้อน $1,300^{\circ}\text{C}$ ส่วนที่เป็นของเหลวจะระเหยเป็นไอไปหมดโดยเหลือผงอะลูมินาสีขาวซึ่งมีลักษณะคล้ายแป้งหรือปูนขาวดังแสดงในรูปที่ 2.1

การสกัดโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ออกจากผงอะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ทำได้โดยการแยกธาตุด้วยไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.2 ผงอะลูมินาจะถูกทำให้ละลายในสารละลายโคริโอไลต์ (Na_3AlF_6) ที่อุณหภูมิ 950°C และเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าตรง 150,000 A ที่แรงดันไฟฟ้า 4-5 V จะได้โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สีเงินในสภาพหลอมเหลว การผลิตโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 1 ตัน จะต้องใช้แร่บ็อกไซต์ 4 ถึง 5 ตัน เพื่อที่จะได้จำนวนอะลูมินา 2 ตัน และใช้พลังงานไฟฟ้า 15,000 KWH จะได้โลหะอะลูมิเนียม 1 ตัน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดตั้งแต่สกัดแร่บ็อกไซต์ประมาณ 17,000 KWH ต่ออะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 1 ตัน [7]



รูปที่ 2.1 กระบวนการสกัดสารประกอบอะลูมินาโดยสังเขป [3]



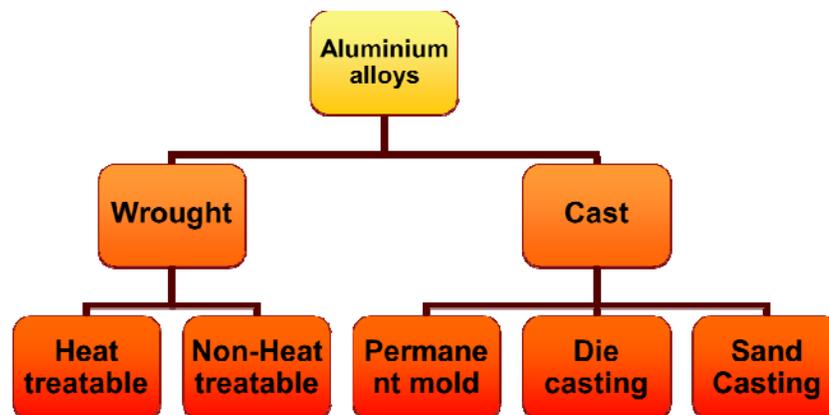
รูปที่ 2.2 การสกัดโลหะอะลูมิเนียมด้วยการแยกธาตุด้วยไฟฟ้า [3]

2.2 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม

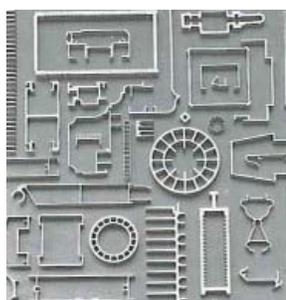
โลหะอะลูมิเนียม หรือ อะลูมิเนียมผสม (aluminum alloy) เป็นวัสดุโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นต่ำประมาณ 2.7 g/cm^3 เมื่อเทียบกับเหล็กซึ่งมีความหนาแน่น 7.9

g/cm³ มีความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักสูง มีค่าความเหนียวสูง (high ductility) ซึ่งง่ายต่อการขึ้นรูป ทนการกัดกร่อนเพราะมีฟิล์ม Al₂O₃ นำไฟฟ้าได้ดีเหมาะกับการทำสายไฟฟ้าที่ต้องการน้ำหนักเบา นำความร้อนสูง เหมาะสำหรับทำภาชนะหุงต้มบางชนิด ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กระจป่อง ผิวขัดมัน ขึ้นเงาง่าย และเคลือบสีหรือทำลวดลายได้ง่าย ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ รีไซเคิลง่าย (ใช้พลังงานในการหลอมเพียง 5% ของพลังงานในการผลิตโลหะ) [7]

โดยทั่วไปโลหะอะลูมิเนียม หรือ อะลูมิเนียมผสมจะถูกแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ โลหะอะลูมิเนียมหรือโลหะอะลูมิเนียมผสมแบบขึ้นรูปทางกล (wrought aluminum and its alloys) และโลหะอะลูมิเนียมหรือโลหะอะลูมิเนียมผสมแบบหล่อขึ้นรูป (casting aluminum and its alloys) ดังแสดงในรูปที่ 2.3, 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



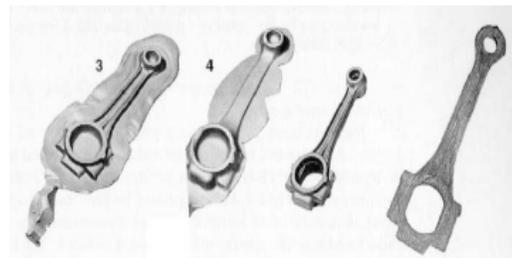
รูปที่ 2.3 การแบ่งกลุ่มของโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม [3]



Aluminum Extrusion

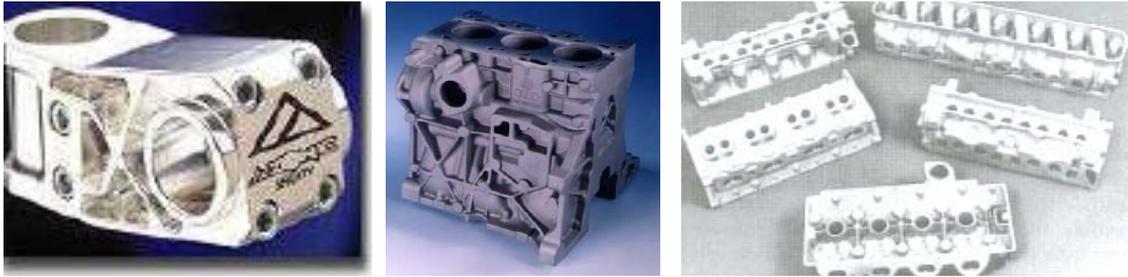


Aluminum Rolling



Aluminum Forging

รูปที่ 2.4 ภาพตัวอย่างของโลหะอะลูมิเนียมขึ้นรูปทางกล (wrought aluminum) [3]



รูปที่ 2.5 ภาพตัวอย่างของโลหะอะลูมิเนียมกลุ่มงานหล่อ (cast aluminum) [3]

2.3 การกำกับภาวะประสงค์สำหรับโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม

(Temper Designation for Aluminum and aluminum alloys)

ในปี ค.ศ. 1948 สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา ได้ตั้งระบบการให้สัญลักษณ์ตามสภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตต่างๆ จนแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของทางกลตามความต้องการของผู้ใช้ โดยใช้สัญลักษณ์เป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษได้แก่ F, O, H, W และ T เขียนตามหลังสัญลักษณ์ของโลหะผสมโดยมีขีดนำหน้า แล้วอาจจะมีตัวเลข 1 หรือ 2 ตัว ตามหลังด้วย เช่น A 132-T 65 เป็นต้น สำหรับความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้คือ

F คือ สภาพเดิม (fabricated) หมายถึงสภาพของโลหะที่ได้จากการผลิตธรรมดาโดยไม่มีกรรมวิธีทางกลหรือกรรมวิธีทางความร้อนเข้ามาช่วยเป็นชิ้นงานสภาพเดิม

O คือสภาพอบอ่อน (annealed) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน เพื่อให้โลหะมีความอ่อนและเหนียวเพิ่มขึ้น

H คือสภาพแข็งโดยการทำงาน work – hardened หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกระบวนการทำงานทางกล เพื่อให้มีความแข็งแรงสูงเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นกรรมวิธีการทำงานแบบร้อนหรือแบบเย็นก็ได้

H1 คือ ทำให้แข็งด้วยความเครียดอย่างเดียว (strain-hardened only) หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการทำให้แข็งด้วยความเครียดอย่างเดียว และจะมีตัวเลขหลักที่สองกำกับอยู่ด้วยเพื่อแสดงปริมาณการถูกทำให้แข็ง เช่น

H12 หมายถึง Quarter hard โลหะจะถูกแปรรูป 20%

H14 หมายถึง Half hard โลหะจะถูกแปรรูป 40 %

H18 หมายถึง Full hard โลหะจะถูกแปรรูป 80%

H19 หมายถึง Extra hard โลหะจะถูกแปรรูป 90%

H2 คือ ทำให้แข็งและอบอ่อนบางส่วน (strain – hardened and partial annealed) หมายถึง สภาพของโลหะที่ถูกทำให้แข็งด้วยความเครียด แล้วนำไปอบอ่อนบางส่วน เพื่อให้โลหะเหนียวขึ้นแต่ความแข็งแรงยังเหมือนกับโลหะที่ใช้สัญลักษณ์ H1

H3 คือ ทำให้แข็งและคงรูป (strain-hardened and then stabilizing) หมายถึงสภาพของโลหะที่ถูกทำให้แข็งและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยผ่านกระบวนการแปรรูปเย็นและกึ่งคุณสมบัติไว้ แล้วนำโลหะไปทำกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำๆ ซึ่งความร้อนนี้ยังไม่สูงพอที่จะทำให้ความเครียดทั้งหมดไป สภาพของโลหะแบบนี้ส่วนมากใช้กับโลหะประเภทอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม

W คือ การอบละลาย (solution-heat treatment) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เกิดการละลายของธาตุผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยอาจปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ โลหะก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดการแยกตัวแข็งโดยอายุ (natural aging) ดังนั้นการกำกับสัญลักษณ์ก็จะต้องบอกถึงระยะเวลาที่ทิ้งไว้ด้วย จะเห็นว่าสภาพดังกล่าวนี้ จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของโลหะผสมที่สามารถเกิดการแยกตัวแข็ง (Precipitation Hardening) ได้เองและไม่เกิดขึ้นกับโลหะทั่วไป เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่มีสัญลักษณ์ 2024-W (1/2 hr) หมายความว่า โลหะนี้ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จนทำให้ทองแดงละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมจนหมดแล้วปล่อยให้เย็นอย่างรวดเร็วในอากาศ เป็นเวลานานครึ่งชั่วโมง

T คือ อบด้วยความร้อน (thermally treated) หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งอาจจะทำร่วมกับกระบวนการทำงานทางกลหรือไม่ร่วมก็ได้และตามหลังอักษร T จะมีตัวเลข 2 ถึง 10 กำกับไว้เพื่อบอกความแตกต่างดังต่อไปนี้

T2 คือ อบอ่อน (annealed) หมายถึง สภาพอบอ่อนซึ่งใช้เฉพาะสำหรับงานหล่อเท่านั้น

T3 คือ อบละลายและกรรมวิธีการทำงานแบบเย็น (solution heat treated and then cold worked) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปแปรรูปเย็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

T4 คือ การอบละลายแล้วแยกตัวแข็งโดยอายุ (solution treated and naturally aged) หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายแล้วปล่อยให้เกิดการแยกตัวแข็งโดยธรรมชาติและมีระยะเวลา หรืออายุด้วย

T6 คือ การอบละลายแล้วแยกตัวแข็ง (solution treated and aged at slightly temperature) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลาย แล้วไปอบทางความร้อนต่อเพื่อให้เกิดการแยกตัวแข็ง

T7 คือ อบละลายแล้วทำให้คงสภาพ หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายโดยการควบคุมทั้งอุณหภูมิและเวลาเพื่อควบคุมการเติบโตของเกรนหรือเพื่อควบคุมความเค้นที่ตกค้างภายในโลหะ หรือเพื่อควบคุมทั้งสองอย่าง

T8 คือ อบละลายแล้วแปรรูปแบบเย็นแล้วอบแยกตัวแข็งหมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปแปรรูปแบบเย็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงต่อจากนั้นจึงนำไปอบแยกตัวแข็ง

T9 คืออบละลายแล้วอบแยกตัวแข็งและแปรรูปแบบเย็น หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายแล้วอบแยกตัวแข็ง หลังจากนั้นจึงนำไปแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง

T10 คือ อบแยกแข็งแล้วแปรรูปเย็น หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เกิดการแยกตัวแข็ง จากนั้นนำไปแปรรูปเย็นอีกเพื่อเพิ่มความแข็งแรง [7]

2.4 การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys Designation System)

ในปี พ.ศ. 2497 สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminum Association of America) ได้จัดโลหะผสมของอะลูมิเนียมขึ้นรูปเป็นหมวดหมู่ตามส่วนผสมและใช้เลข 4 หลักเป็นสัญลักษณ์ในการกำกับชื่อของโลหะ ในปัจจุบันนี้การกำกับชื่อตามนี้เป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายจนเป็นสากลนิยมซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม [8]

| สัญลักษณ์ | ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม |
|-----------|---|
| 1XXX | อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0% |
| 2XXX | ทองแดง (Copper, Cu) |
| 3XXX | แมงกานีส (Manganese, Mn) |
| 4XXX | ซิลิคอน (Silicon, Si) |
| 5XXX | แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) |
| 6XXX | แมกนีเซียม กับ ซิลิคอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si) |
| 7XXX | สังกะสี (Zinc, Zn) |
| 8XXX | ธาตุอื่น ๆ (Other elements) |
| 9XXX | ยังไม่มีใช้ (Unused series) |

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1XXX) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมที่ 99.0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ อะลูมิเนียมในกลุ่มนี้มีความต้านทาน การกัดกร่อนได้ดี สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการผลิตแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัด เชื่อมและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือในด้านของความ

แข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่น เพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (strain hardening) **อะลูมิเนียมเจือทองแดง (อนุกรม 2XXX)** เป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง คุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (solution treatment) และ ชุบ (quenching) จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (precipitation) ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการอบบ่ม (ageing hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลง และความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือจะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกลคือการย้ำหุ้ม

อะลูมิเนียมเจือแมงกานีส (อนุกรม 3XXX) เป็นอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติ เหมือนกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความเหนียวที่ด้านการแตกหักสูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีความสามารถในการเชื่อมที่สูง จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมเจือซิลิกอน (อนุกรม 4XXX) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอะลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมเจือและอะลูมิเนียมหล่อ

อะลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม (อนุกรม 5XXX) อะลูมิเนียมเจือชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับการเชื่อมเหมือนกับอนุกรม 4XXX นอกจากนั้นยังนิยมนำไปทำเป็นถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (storage vessels)

อะลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม - ซิลิกอน (อนุกรม 6XXX) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำอะลูมิเนียมเจือชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

อะลูมิเนียมเจือสังกะสี - แมกนีเซียม (อนุกรม 7XXX) อะลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรอง นอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อย อะลูมิเนียมเจือกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อะลูมิเนียม

ชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอะลูมิเนียมชนิดนี้โดยการผสมแมกนีเซียมและกำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมสูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากการตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.4.1 คุณสมบัติของอะลูมิเนียมผสมแมกนีสิส หมายเลข 3003

ตามมาตรฐานของ ASTM B0221 อะลูมิเนียมผสมแมกนีสิสหมายเลข 3003 จะมีส่วนผสมทางเคมี ตามตารางที่ 2.2 นอกจากนี้อะลูมิเนียมหมายเลขนี้ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลที่สำคัญ ตามตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมเคมีของอะลูมิเนียม-แมกนีสิสหมายเลข 3003 ตามมาตรฐาน ASTM B221M-02 [9]

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Other | Al |
|-------|-------|-----------|-----------|----|----|--------|----|-------|----------|
| ≤ 0.6 | ≤ 0.7 | 0.05-0.20 | 1.0 – 1.5 | - | - | ≤ 0.10 | - | 0.05 | ที่เหลือ |

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมแมกนีสิสหมายเลข 3003 [10]

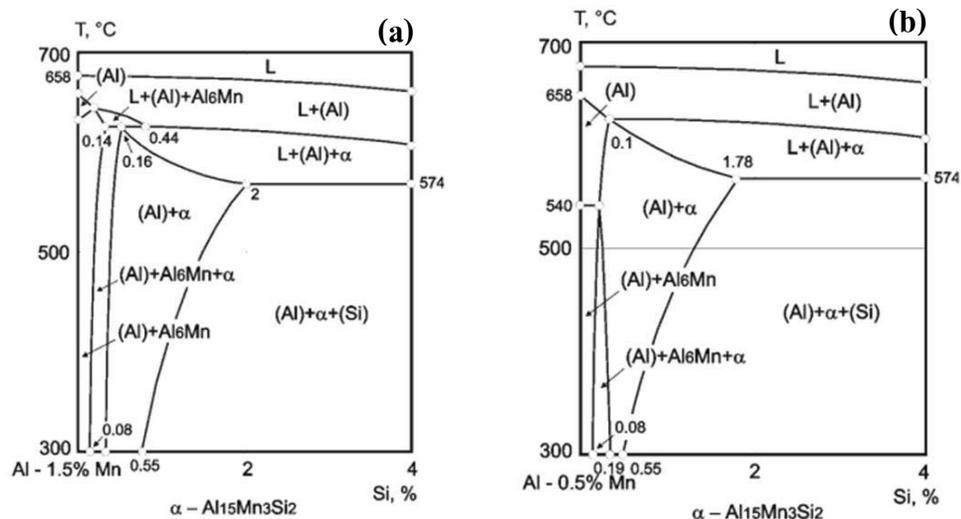
| Average coefficient of thermal expansion at room temperature | Liquidus temperature | Solidus temperature | Density at 20 °C | Temper | Thermal conductivity at 25 °C | Electrical conductivity at 20 °C, %IACS | | Electrical resistivity at 20 °C |
|--|----------------------|---------------------|-------------------|--------|-------------------------------|---|--------------|---------------------------------|
| | | | | | | Equal volume | Equal weight | |
| μm/m · °C | °C | °C | g/cm ³ | | W/m · °C | | | Ω · mm ² /m |
| 23.2 | 654 | 643 | 2.73 | O | 193 | 50 | 163 | 0.035 |
| | | | | H12 | 163 | 42 | 137 | 0.0415 |
| | | | | H14 | 159 | 41 | 134 | 0.0415 |
| | | | | H18 | 154 | 40 | 130 | 0.043 |

ตารางที่ 2.4 ค่าสมบัติทางกลโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมผสมแมกนีสิสหมายเลข 3003 [11]

| Temper | Tensile strength (Mpa) | Proof stress (Mpa) | Elongation (%) | Hardness (HB) | Shear strength (Mpa) |
|--------|------------------------|--------------------|----------------|---------------|----------------------|
| 0 | 110 | 40 | 30 | 28 | 75 |
| H12 | 130 | 125 | 10 | 35 | 85 |
| H14 | 150 | 145 | 8 | 40 | 97 |
| H18 | 200 | 185 | 4 | 55 | 110 |

2.4.2 แผนภาพสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน

แผนภาพสมดุลของโลหะหรือโลหะผสมถือว่าเป็นเครื่องมือสำคัญที่จะช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิการหลอมละลาย พฤติกรรมการแข็งตัวและเฟสที่เกิดขึ้นของโลหะจากสถานะที่เป็นของเหลวมาเป็นสถานะที่เป็นของแข็ง สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 นั้น จะมีธาตุ แมงกานีส เหล็ก และ ซิลิกอนเป็นส่วนผสมหลัก การพิจารณาถึงพฤติกรรมการแข็งตัวและเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 นั้น สามารถพิจารณาได้จากแผนภาพสมดุลของโลหะผสม 3 ธาตุ (ternary system) คือ อะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งพบว่าจะมีเฟสที่เกิดขึ้น 3 เฟส คือ Al, Al_6Mn และ $\alpha-Al_{15}(Mn)_3Si_2$ ซึ่งมีคุณลักษณะทางกายภาพดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.6 แผนภาพสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน [12]

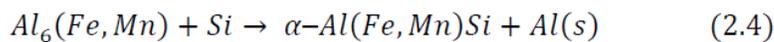
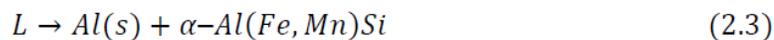
(a) ที่ปริมาณส่วนผสมของธาตุแมงกานีส 1.5%

(b) ที่ปริมาณส่วนผสมของธาตุแมงกานีส 0.5%

ตารางที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน [12]

| Phases | Crystal structure | Lattice Parameters | Density |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| $\alpha-Al_{15}(Mn)_3Si_2$ | Cubic | a=1.260nm | 3.55g/cm ³ |
| Al_6Mn | Orthorhombic | a=0.650nm b=0.755nm c=0.866nm | 3.18g/cm ³ |
| Al | Fcc | a=0.405nm | 2.70g/cm ³ |

จากรูปที่ 2.6 เป็นเพียงแผนภาพสมดุลที่ใช้เพื่อพิจารณาโลหะผสม 3 ชาติของอะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน เท่านั้น แต่เมื่ออ้างอิงถึงส่วนผสมตามมาตรฐานของ ASTM B0221 และการผลิตโดยทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมแล้วโลหะผสมอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 นั้น จะมีธาตุเหล็กเป็นส่วนผสมหลักอยู่ด้วยซึ่งธาตุเหล็กที่เติมเข้าไปนี้จะมีผลทำให้ความสามารถในการละลายของธาตุแมงกานีสไปเป็นสารละลายของแข็งได้น้อยลง และทำให้เกิดการรวมตัวของธาตุผสมภายในให้เป็นสารประกอบมากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเคมียูเทคติก และเพอริเทคติกที่เกิดขึ้นในระหว่างการเย็นตัวโลหะผสมอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 จากสภาวะที่เป็นของเหลวมาเป็นสภาวะที่เป็นของแข็ง อาจเป็นไปได้ตามสมการที่ 2.1 – 2.4 ด้านล่าง [12]



2.5 กระบวนการแข็งตัวและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อหมายเลข 3003

(Solidification and microstructure of as-Cast Aluminum alloy 3003)



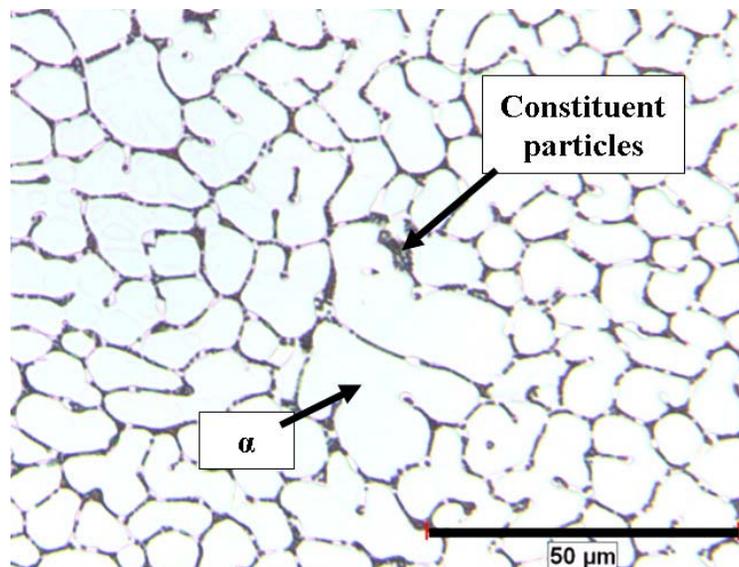
รูป 2.7 กลไกการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียม [13]

กระบวนการแข็งตัวของอะลูมิเนียมจะเริ่มจากการโตของผลึกนิวเคลียส (nucleus) ซึ่งในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมแท่งนั้นจะใช้ไททาเนียมโบรอน ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส (nuclei) เนื่องจากเป็นนิวเคลียสแบบ

เฮตโตโรจีเนียสที่มีโครงสร้างคล้ายกับอะลูมิเนียม ขนาดของเกรน (grain size) ของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นอยู่กับจำนวนนิวคลีโอที่เติมลงไป ถ้ามีจำนวนมากขนาดของเกรนก็จะมีขนาดเล็ก ซึ่งกลไกการแข็งตัวของอะลูมิเนียมนั้นจะมีลักษณะดังรูป 2.7 เริ่มแรกมีนิวคลีโอหรือผลึกเล็ก ๆ เกิดขึ้น จากนั้นผลึกดังกล่าวจะเริ่มโตขึ้นเรื่อยๆ มีโครงสร้างคล้ายกับกิ่งไม้เรียกว่าเดนไดรต์ จากนั้นเดนไดรต์แต่ละเดนไดรต์ก็จะโตขึ้นขยายขนาดเพิ่มขึ้นจนชนกันกลายเป็นขอบเกรน (grain boundary) [13]

ในส่วนของอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 นั้นจะมีส่วนผสมของธาตุแมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) และซิลิกอน (Si) เป็นธาตุผสมหลัก ในช่วงสภาวะของการแข็ง ตัวธาตุแมงกานีสบางส่วนจะไปรวมตัวกับธาตุเหล็กและธาตุซิลิกอนอยู่ในรูปของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก $Al_6(Mn,Fe)$ และ $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ ตามสมการที่ 2.1 – 2.3 ซึ่งสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก เหล่านี้จะอยู่ตามบริเวณขอบเกรนภายหลังจากการหล่อ ในขณะที่ธาตุผสมแมงกานีสส่วนใหญ่จะแยกตัวแทรกอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดภายในโครงสร้างพื้นอะลูมิเนียม (supersaturated solid solution) [12]

รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อหมายเลข 3003 ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสที่เป็นสารละลายของแข็งระหว่างธาตุอะลูมิเนียมกับธาตุแมงกานีส (α Phase) กับส่วนที่เป็นอนุภาคอินเทอร์เมทัลลิกที่เป็นเครือข่ายเนตเวิร์คอยู่ตามบริเวณขอบเกรน

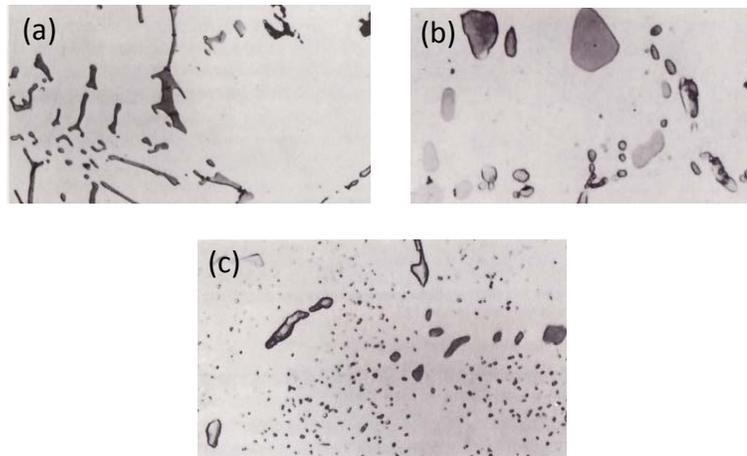


รูป 2.8 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อหมายเลข 3003 [14]

2.6 กระบวนการโฮโมจีไนซ์ (Homogenizing process)

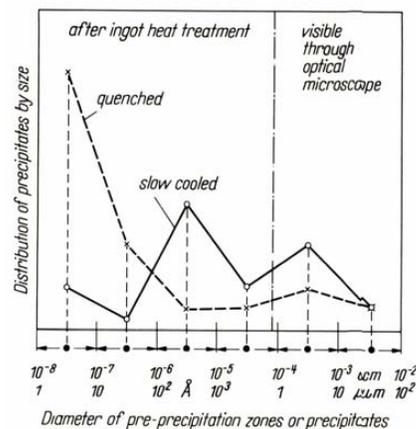
เป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างของโลหะผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อนั้นมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของอะตอมแปลกปลอมในโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ การได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพดีนั้นจะต้องมาจากโครงสร้างที่เหมาะสมและส่งผลที่ดีต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการรีด (rolling) หรือกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (extrusion) โลหะผสมนั้นจะให้ความสำคัญกับอุณหภูมิที่ใช้โฮโมจีไนซ์ในช่วงอบแช่ (soaking temperature) ให้อยู่ในช่วง 550 ถึง 630 °C ก่อนที่โลหะดังกล่าวจะเข้าสู่กระบวนการแปรรูปร้อน (hot working) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ทำให้ธาตุในโครงสร้างของโลหะผสมมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และสมดุล ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจีไนซ์ขึ้นอยู่กับขนาดของเกรน และ อัตราการแพร่ของธาตุในสารประกอบ สำหรับโลหะผสมโดยทั่วไป ประเภทของการเย็นตัวหลังจากกระบวนการโฮโมจีไนซ์ก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากตะกอนที่มีขนาดเล็กละเอียดที่ละลายอยู่ในโครงสร้างอาจตกตะกอนออกมาได้ในขณะที่ผ่านการเย็นตัว ถ้าธาตุที่ผสมในโลหะผสมไม่สามารถละลายในอะลูมิเนียมผสมได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิโฮโมจีไนซ์สูงสุด เมื่ออ้างถึงแผนภาพสมดุลแล้ว จะมีการก่อตัวกันขึ้นของตะกอนขนาดเล็กขึ้นรวมตัวกันภายในขอบเกรนในกรณีที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ตัวอย่างเช่นเดียมแมงกานีส (Mn) 1 เปอร์เซ็นต์ ในโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส ดังรูป 2.9 แสดงถึงโครงสร้างของโลหะผสมดังกล่าวผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง และ โครงสร้างที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน พบว่าในสารละลายอิมตัวยิ่งยวดของแมงกานีสในอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสนั้นจะสังเกตเห็น โครงสร้างที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ ลักษณะของอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่มีลักษณะหยาบปราศจากความกลมมนซึ่งพบในโครงสร้างของโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน และ การก่อตัวของอนุภาคที่ตกตะกอนในสารละลายในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

จากรูป 2.10 แสดงแผนภาพการตกตะกอนที่มีขนาดต่างๆกันของธาตุแมงกานีสและเหล็กที่มีการกระจายตัวหลังจากแท่งโลหะผสมผ่านกระบวนการทางความร้อน ซึ่งจะพบว่าหลังจากที่แท่งโลหะผสมผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะมีตะกอนขนาดเล็กละเอียดเกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ซึ่งการกระจายตัวและการตกตะกอนที่เกิดขึ้นนี้มีผลต่อการปรับปรุงโครงสร้างและการแปรรูปของโลหะผสม



รูป 2.9 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส เกรด 3003 ($1\%Mn+0.67\%Fe + 0.16\%Si$)

- (a) อะลูมิเนียมหล่อที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ ปรากฏเฟสของอะลูมิเนียม-แมงกานีส-เหล็ก บริเวณขอบเกรน
- (b) อะลูมิเนียมรีดที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 72 ชั่วโมง ที่ $600^{\circ}C$ จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ปรากฏตะกอนที่มีลักษณะกลมมน
- (c) อะลูมิเนียมรีดที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 6 ชั่วโมง ที่ $600^{\circ}C$ จากนั้นทิ้งไว้ในเตา 15 ชั่วโมง ที่ $450^{\circ}C$ จะปรากฏตะกอนที่ละเอียดของ อะลูมิเนียม-แมงกานีส-เหล็ก จากการเย็นตัวอย่างช้าๆ ในขณะที่เดียวกันก็เกิดเฟสที่มีลักษณะกลมมนแต่น้อยกว่ารูป (b) เนื่องจากใช้เวลาโฮโมจีไนซ์สั้นกว่า [15]



รูป 2.10 ฟังก์ชันการกระจายตัวของธาตุที่ตกตะกอนในโลหะผสม ตัวอย่างเช่น ตะกอนของแมงกานีสและเหล็กในโลหะผสมอะลูมิเนียมแมงกานีส [15]

จากรูป 2.10 แสดงแผนภาพการตกตะกอนที่มีขนาดต่างๆกันของธาตุแมงกานีสและเหล็กที่มีการ กระจายตัวหลังจากที่แท่งโลหะผสมผ่านกระบวนการทางความร้อน ซึ่งจะพบว่าหลังจากที่แท่งโลหะผสมผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะมีตะกอนขนาดเล็กละเอียดเกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ซึ่งการกระจายตัวและการตกตะกอนที่เกิดขึ้นนี้มีผลต่อการปรับปรุงโครงสร้างและการแปรรูปของโลหะหรือโลหะผสม

2.6.1 กระบวนการโฮโมจิไนซ์ของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003

สำหรับอะลูมิเนียมผสม กระบวนการอบโฮโมจิไนซ์คือกรรมวิธีที่หลังจากที่อะลูมิเนียมบิลเลทถูกขึ้นรูปจากการหล่อหลอม (casting) แล้วถูกนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิสูงในช่วง 550-630°C ตามระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นอะลูมิเนียมบิลเลทจะถูกทำให้เย็นตัว ก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปต่อไป ซึ่งกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์นี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมหรือแท่งบิลเลท ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป (extrude ability) ขนาดเกรนของชิ้นงานหลังการอัดรีดขึ้นรูป (grain size) และปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

สำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 นั้น โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปในระหว่าง กระบวนการอบโฮโมจิไนซ์ คือการลดปริมาณความเข้มข้นของธาตุแมงกานีสที่ละลายอยู่ในสารละลายของแข็ง เปลี่ยนแปลงขนาด ความหนาแน่น และ การกระจายตัวของอนุภาคสารประกอบที่อยู่ภายในของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ อนุภาคสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกขนาดใหญ่(constituent) ที่อยู่ตามบริเวณขอบเกรนที่อยู่ในรูปของ $Al_6(Mn,Fe)$ หรือ $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ และอนุภาคสารประกอบขนาดเล็ก (dispersoids) ที่กระจายตัวอยู่บน โครงสร้างพื้นของอะลูมิเนียมผสม รวมถึงการควบคุมการตกตะกอนของธาตุแมงกานีสภายใต้การควบคุมอุณหภูมิการอบ เวลาการอบและรูปแบบของการอบที่เหมาะสม เพราะ โครงสร้างของบิลเลทที่ได้หลังจากการอบโฮโมจิไนซ์จะมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่ ขนาดของเกรนและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานภายหลังจากนำไปอัดรีดขึ้นรูป [6]

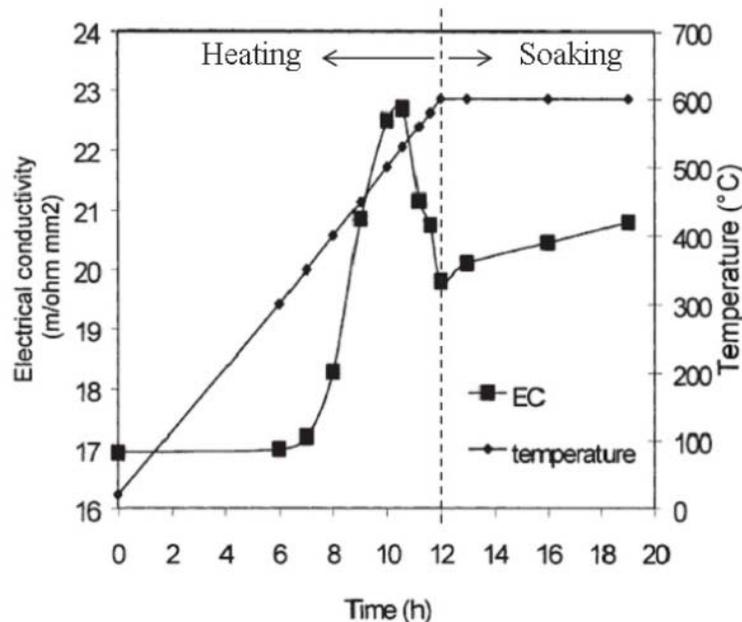
2.6.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในช่วงระยะการให้ความร้อนเริ่มต้น (Heating)

การให้ความร้อนเริ่มต้นสำหรับกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์โดยทั่วไปจะมีการให้อัตราความร้อนอยู่ที่ประมาณ 50 ถึง 250°C/hr [18] และจากงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระหว่างกระบวนการให้ความร้อนของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส พบว่าการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 300°C จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายใน [14] ที่อุณหภูมิ 400°C โครงข่ายเนตเวิร์คของ

อนุภาคอินเทอร์เมทัลลิกที่อยู่ตามบริเวณขอบเกรนจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยเฟสของ $Al_6(Mn,Fe)$ จะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเฟส $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ ปริมาณของส่วนผสมทางเคมีที่มีอยู่ในอนุภาคเดิมนั้นจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงธาตุแมงกานีสจำนวนมากที่อยู่ในสารละลายของแข็งอิมตัวยังยวดยิ่งก็จะเริ่มมีการตกตะกอนในลักษณะที่แพร่กระจายแยกออกมาในเวลาเดียวกันนั้น [14]

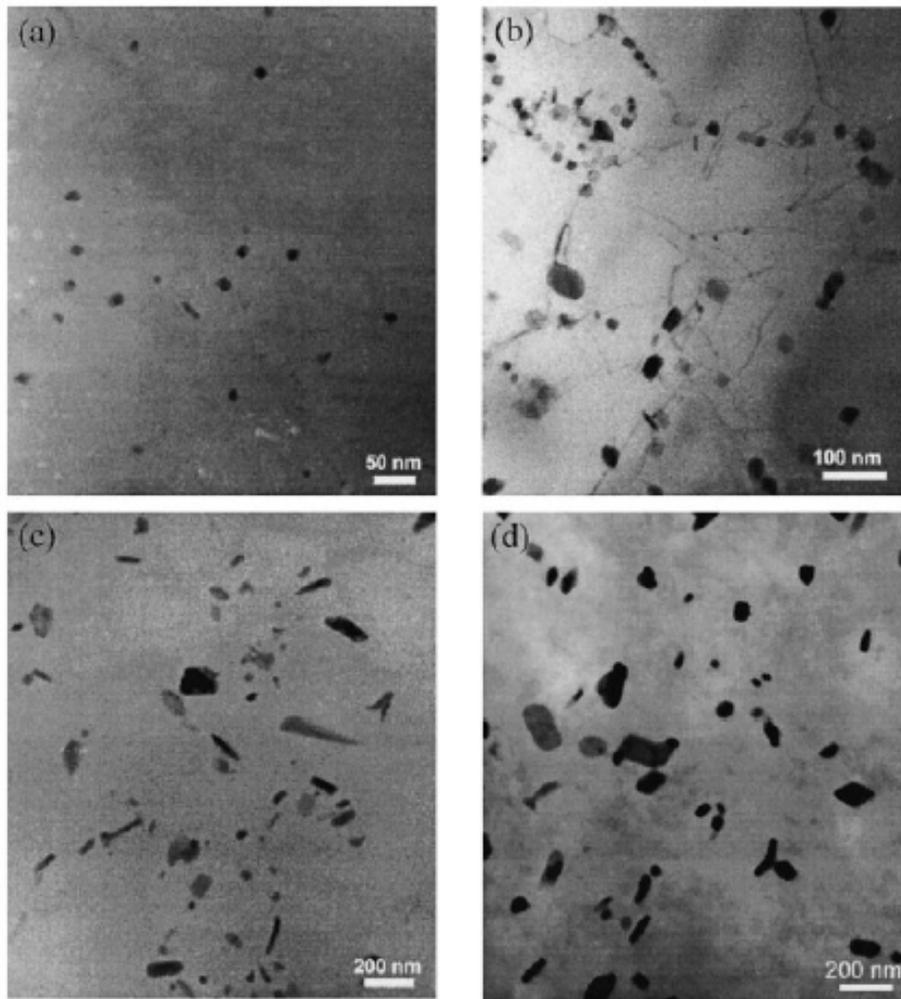
ในช่วงระยะเริ่มต้นของการแพร่กระจายของธาตุแมงกานีสที่ตกตะกอนออกมานั้น ธาตุเหล็กจำนวนน้อยส่วนหนึ่งซึ่งละลายได้ในปริมาณจำกัดในสารละลายของแข็งก็จะมีการตกตะกอนออกมาด้วย ในขณะที่เหล็กที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกนั้นก็เกิดการแพร่และแยกตัวกระจายออกรวมตัวกับธาตุแมงกานีสเป็นอนุภาคสารประกอบขนาดเล็กๆ ในรูปของ $Al_6(Fe,Mn)$ กระจายตัวอยู่บนโครงสร้างพื้น โดยความสามารถในการแพร่จะมีสูงขึ้นตามอุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้น

รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการตกตะกอนและการแพร่กระจายตัวของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของอะลูมิเนียมผสม หมายเลข 3003 ระหว่างการอบไฮโมจีไนซ์ [14]

เมื่อทำการให้ความร้อนต่อเนื่องไปเรื่อยๆจนถึงที่อุณหภูมิ 530°C ก่อนจะถึงอุณหภูมิของการอบแห้งที่อุณหภูมินี้มันเพียงพอที่จะทำให้ธาตุแมงกานีสที่แพร่กระจายตัวตกตะกอนออกมาก่อนหน้านี้เริ่มที่จะค่อยๆละลายกลับเข้าไปอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งเหมือนเดิมอีกครั้งจนถึงอุณหภูมิของการอบแห้งซึ่งค่าความเหนียวทางไฟฟ้าที่วัดได้จะมีแนวโน้มค่อยๆลดลงเนื่องจากการละลายของธาตุแมงกานีสที่ละลายกลับเข้าไป [14] รูปที่ 2.12 เป็นภาพถ่าย TEM ที่แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอนุภาคที่ตกตะกอนในอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 ระหว่างกระบวนการทางความร้อนของการอบอบไฮโดรจีไนซ์ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคที่ตกตะกอนมีแนวโน้มที่ก่อตัวรวมกันมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

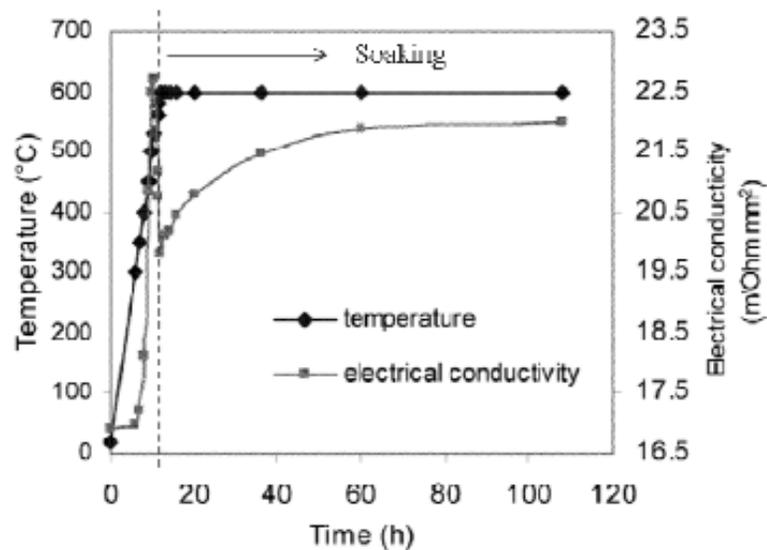


รูปที่ 2.12 ภาพถ่าย TEM การกระจายตัวของอนุภาคในอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003

(a) 350°C , (b) 400°C , (c) 500°C , (d) 580°C [14]

2.6.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในช่วงระยะเวลาของการอบแช่ (Soaking)

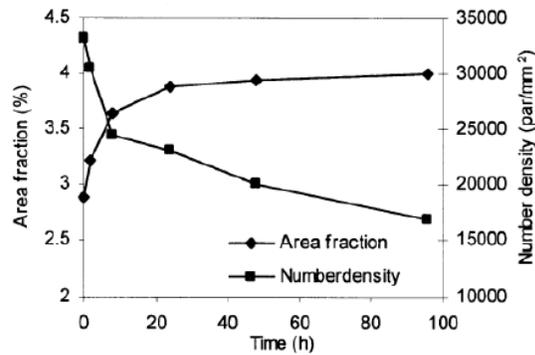
ในช่วงของการอบแช่ ค่าความเหนียวทางไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอบแช่ โดยจะมีอัตราค่าความเหนียวทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการอบ และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบแช่ต่อไปเป็นระยะเวลานานดังแสดงในรูปที่ 2.13 การที่ค่าของความเหนียวทางไฟฟ้าค่อยๆเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากอนุภาคสารประกอบที่เป็นอินเทอร์เมทัลลิกมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแบบเข็มไปเป็นทรงกลมโดยมีอัตราการเปลี่ยนเฟสจาก $Al_6(Mn,Fe)$ ไปเป็นเฟส $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ ในปริมาณที่สูงขึ้นตามระยะเวลาของการอบแช่ [16]



รูปที่ 2.13 ผลการวัดค่าความเหนียวทางไฟฟ้าของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 ในช่วงของการอบแช่ [16]

จากรูปที่ 2.14 ด้านล่างแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของปริมาณพื้นที่ว่างเปล่าบนโครงสร้างพื้นโลหะกับความหนาแน่นของอนุภาคที่ตกตะกอนออกมา ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการอบแช่นั้น ปริมาณพื้นที่ว่างเปล่าจะมีเปอร์เซ็นต์ที่น้อยเนื่องจากการตกตะกอนออกมาของธาตุแมงกานีสขนาดเล็กๆที่ออกมาจากสารละลายของแข็งในปริมาณที่มีความหนาแน่นสูง จากนั้นปริมาณพื้นที่ว่างเปล่าบนโครงสร้างพื้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบแช่ต่อไปเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความเข้มข้นของธาตุแมงกานีสที่ลดลงในสารละลายของแข็งและในช่วงระยะเวลาของการอบแช่ที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องนั้นอนุภาคของธาตุแมงกานีสที่ตกตะกอนจะรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

และธาตุแมงกานีสบางส่วนก็จะไปรวมตัวกับธาตุเหล็กที่มีอนุภาคใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกัน (Mn+Fe) ซึ่งส่งผลให้จำนวนความหนาแน่นของอนุภาคที่ตกตะกอนมีจำนวนน้อยลง

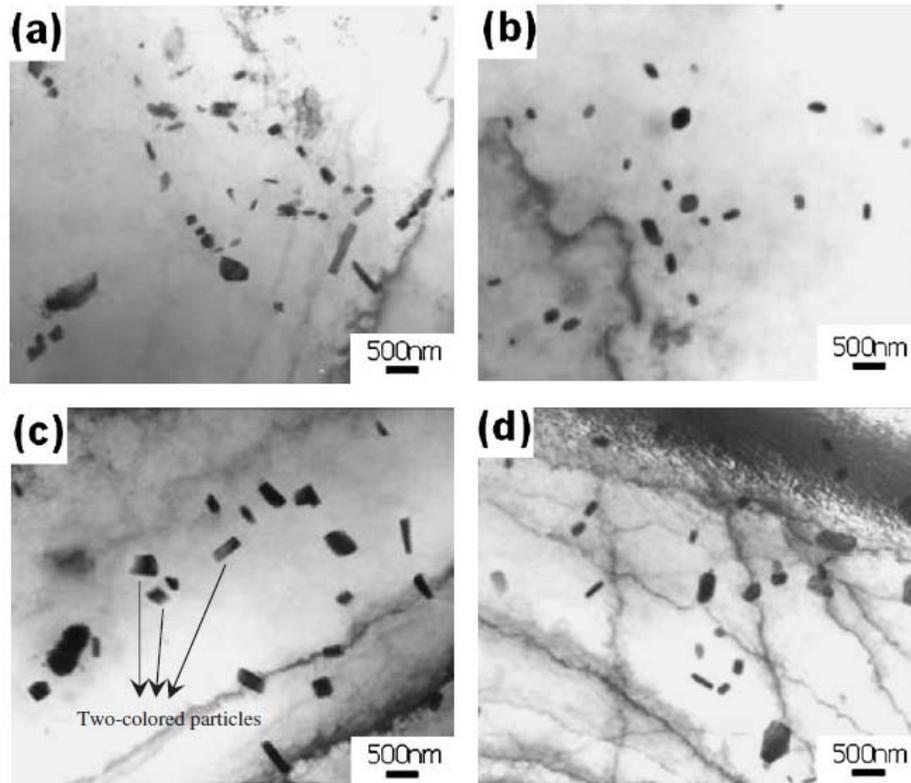


รูปที่ 2.14 พื้นที่การกระจายตัวและความหนาแน่นของอนุภาคที่ตกตะกอนระหว่างการอบแช่ที่อุณหภูมิ 600°C [16]

Dons, A.L. และคณะ ได้ศึกษาการตกตะกอนและการกระจายตัวของธาตุแมงกานีสในแท่งบิลเลทหลังการอบไฮโมจิไนซ์ พบว่ามีผลต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่ของชิ้นงานภายหลังจากนำไปอัดรีดขึ้นรูป ขนาดอนุภาคของการตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 หรือ 2 μm จะส่งผลต่อเกิดเกิดผลึกใหม่ได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดอนุภาคของการตกตะกอนมีความละเอียดขนาดน้อยกว่า 0.1 μm กระจายตัวอยู่ในโครงสร้าง จะช่วยยับยั้งการเกิดผลึกใหม่ในระหว่างการขึ้นรูปร้อน [17]

แท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่มีการการตกตะกอนที่มีความละเอียดและกระจายตัวในปริมาณที่มีความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้เกิดผลึกใหม่ที่มีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอหลังจากการขึ้นรูปร้อน [18]

การอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้อนุภาคที่ตกตะกอนออกมา มีขนาดเล็ก มีรูปร่างที่ซับซ้อนและมีลักษณะของอนุภาคที่ปรากฏแยกตัวออกมาเป็น 2 เฟส คือเฟสที่ปรากฏเป็นสีเทา คือ $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ และเฟสที่ปรากฏเป็นสีดำ คือ $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}$ การอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อนุภาคที่ตกตะกอนออกมา มีรูปร่างในลักษณะที่กลมมน มีขนาดที่ใกล้เคียงกันและปรากฏให้เห็นเฉพาะเฟสที่เป็นสีดำเท่านั้น ส่วนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิสูงร่วมกับอุณหภูมิต่ำที่เป็นรูปแบบ 2 สเตปนั้นพบว่าอนุภาคที่ตกตะกอนออกมาจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น มีรูปร่างที่เป็นสี่เหลี่ยมและปรากฏเฟสที่เป็นสีเทาและสีดำอยู่ร่วมกัน [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพถ่าย TEM การตกตะกอนของอนุภาคสารประกอบในอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003

ที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน [19]

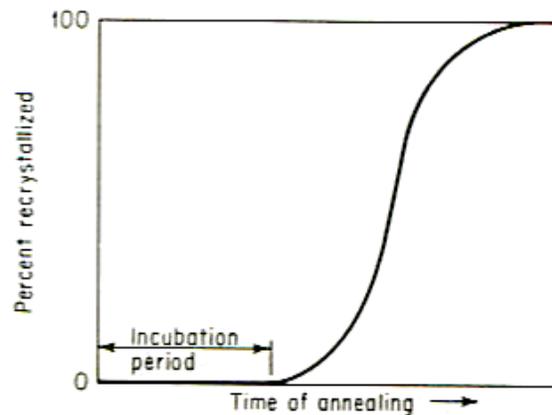
- (a) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 460°C นาน 9 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ
- (b) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 9 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ
- (c) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 9 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อใหม่ที่อุณหภูมิ 460°C นาน 3 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ
- (d) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 460°C นาน 1 ชั่วโมงจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิและอบต่อใหม่ที่ 600°C นาน 9 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ

2.7 การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization)

2.7.1 หลักการแนวคิดพื้นฐานของการเกิดผลึกใหม่ในโลหะและโลหะผสม

ตามความหมายของ Recrystallization จะหมายถึง เกิดการตกผลึกอีกครั้งหนึ่งหลังจากที่เกิดมาแล้วในช่วงการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นของแข็ง ดังนั้น Recrystallization จะเป็นปรากฏการณ์นิวเคลียสและขยายตัวเป็นผลึกใหม่ในสภาพของแข็ง

เมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการอบหรือขึ้นรูปร้อนโลหะมีค่าสูงขึ้นจากช่วงของการคืนตัว(recovery) ผลึกขนาดเล็กมาก ๆ จะปรากฏขึ้นในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งผลึกที่ปรากฏขึ้นนี้จะมีระบบผลึกและส่วนผสมไม่ต่างไปจากผลึกเดิมก่อนที่ถูกทำให้เปลี่ยนรูปไป โดยเฉพาะลักษณะของผลึกใหม่นี้จะสม่ำเสมอในรูปแบบ Equiaxed คือมีแกนยาวใกล้เคียงกัน ไม่มีลักษณะเป็นแนวยาว (Elongated) ผลึกขนาดเล็กที่ปรากฏขึ้นมาใหม่นี้ จะปรากฏตามบริเวณขอบเกรน และตามแนว Slip Plane ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปค่อนข้างมาก (most drastically deformed) การเกิดเกรนใหม่จะต้องเริ่มต้นจากการรวมตัวของกลุ่มอะตอมเป็นนิวเคลียส ดังนั้น Recrystallization จะเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ร่วมกันระหว่างการกำเนิดนิวเคลียสและการขยายตัวให้เกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด [20]



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของการตกผลึกใหม่ [20]

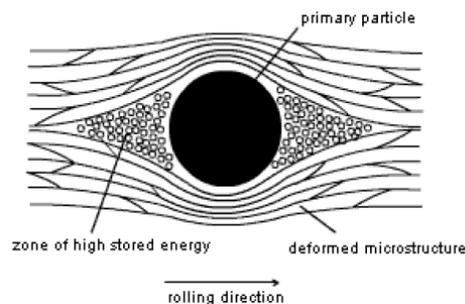
จากรูป 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (time of annealing) กับปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ ของ Recrystallization กระทำที่อุณหภูมิหนึ่งและที่ปริมาณการขึ้นรูป (degree of cold work) คงที่สำหรับโลหะ ส่วนผสมหนึ่ง ซึ่งกราฟที่ปรากฏนี้ เป็นลักษณะของกราฟที่พบเป็นส่วนใหญ่ของกระบวนการ Nucleation และการขยายตัว จุดแรกที่พบก็คือ ช่วงการฟักตัว (incubation period) ของนิวเคลียสที่ต้องใช้เวลาในการถ่ายเทพลังงานภายในของอะตอมและมีเวลาเคลื่อนไหวย้ายมารวมกันก่อกำเนิดนิวเคลียสที่ปราศจากความเครียด (strain free nuclei) และมีขนาดถึงระดับที่มองเห็นด้วยกล้องขยาย (visible microscopic size)

สำหรับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดผลึกใหม่ของโลหะหรือโลหะผสมนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองปัจจัยหลัก คือ

1. ปัจจัยที่มาจากกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิ (temperature) อัตราการให้ความร้อน (heating rate) และ อัตราความเครียดภายใน (internal strain rate) อุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะมีโอกาสที่จะเกิดผลึกใหม่ได้สูงกว่าอุณหภูมิที่ต่ำ การให้อัตราความร้อนอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้โลหะหรือโลหะผสมมีช่วงระยะเวลาของการคืนตัวที่สั้น ทำให้เกิดแรงผลักดัน (driving force) ของการเกิดผลึกใหม่ที่มากขึ้น การเพิ่มความเครียดและอัตราความเครียดภายในของโลหะหรือโลหะผสมจะทำให้โลหะนั้นมีอัตราการเกิดผลึกใหม่ที่มากขึ้น
2. ปัจจัยที่มาจากโครงสร้างจุลภาคภายในของโลหะหรือโลหะผสม เช่น ขนาดเกรน ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเฟสที่สอง ถ้าขนาดของเกรนเริ่มต้นก่อนการเกิดผลึกใหม่มีขนาดเล็กจะทำให้โลหะมีโอกาสที่จะเกิดผลึกใหม่ได้สูงกว่าเกรนที่มีขนาดใหญ่ ขนาดของอนุภาคเฟสที่สองที่ตกตะกอนมีขนาดใหญ่จะส่งผลให้โลหะหรือโลหะผสมมีโอกาสที่จะเกิดการสะสมพลังงานภายในที่มากขึ้นและทำให้โลหะมีโอกาสที่จะเกิดผลึกใหม่ได้ง่ายขึ้นตามกลไก PSN และในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดของอนุภาคเฟสที่สองที่ตกตะกอนมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอก็จะเปรียบเสมือนเป็นแท่งเข็มที่จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของขอบเกรนและยับยั้งการเกิดผลึกใหม่ตามกลไก Pining effect หรือ Zener drag. [21]

2.7.2 กลไกการเกิดผลึกใหม่จาก Particle Stimulated Nucleation (PSN)

Particle Stimulated Nucleation คือกลไกที่อนุภาคของสารประกอบที่มีความแข็งและมีขนาดใหญ่กว่า $2 \mu\text{m}$ ภายในโลหะหรือโลหะผสมเกิดการสะสมดิสโลเคชันตรงบริเวณรอยต่อส่วนที่เสีรูปร่างของโลหะพื้นที่กับส่วนของอนุภาคของสารประกอบที่ไม่เกิดการเสีรูปร่างในระหว่างกระบวนการแปรรูปดังแสดงในรูปที่ 2.17 ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดความเครียดและพลังงานสะสมเฉพาะจุด (locally high store energy) ซึ่งจะทำให้บริเวณดังกล่าวนี้กลายเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียส เกรนย่อย (sub grain) และนำไปสู่การเกิดผลึกใหม่ต่อไป



รูปที่ 2.17 แสดงการสะสมพลังงานตรงบริเวณส่วนที่เสีรูปร่างของโลหะพื้นที่กับส่วนของอนุภาคของสารประกอบ [21]

2.7.3 กลไกยับยั้งหรือขัดขวางการเกิดผลึกใหม่จาก Pinning effect หรือ Zener drag

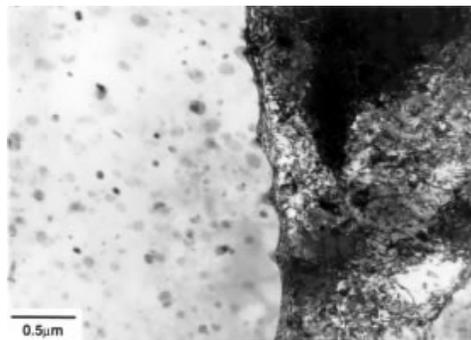
Pinning effect หรือ Zener drag คือกลไกที่อนุภาคขนาดเล็ก (dispersoids) ที่ตกตะกอนอยู่ตามบริเวณขอบเกรนนั้นเปรียบเสมือนกับแท่งเข็ม (pinning) ที่ปักอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่ตกตะกอนนี้จะมีอะตอมที่มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างพื้นที่สูง (coherent) ทำให้ป้องกันการเคลื่อนที่ของขอบเกรนหรือทำให้ขอบเกรนมีการเคลื่อนที่ช้าลงระหว่างที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

รูปที่ 2.18 เป็นภาพถ่าย TEM ที่แสดงให้เห็นถึงอนุภาคขนาดเล็กของสารประกอบแมงกานีสที่ตกตะกอนอยู่ตามบริเวณขอบเกรนของอลูมิเนียมผสมในกลุ่มหมายเลข 3xxx

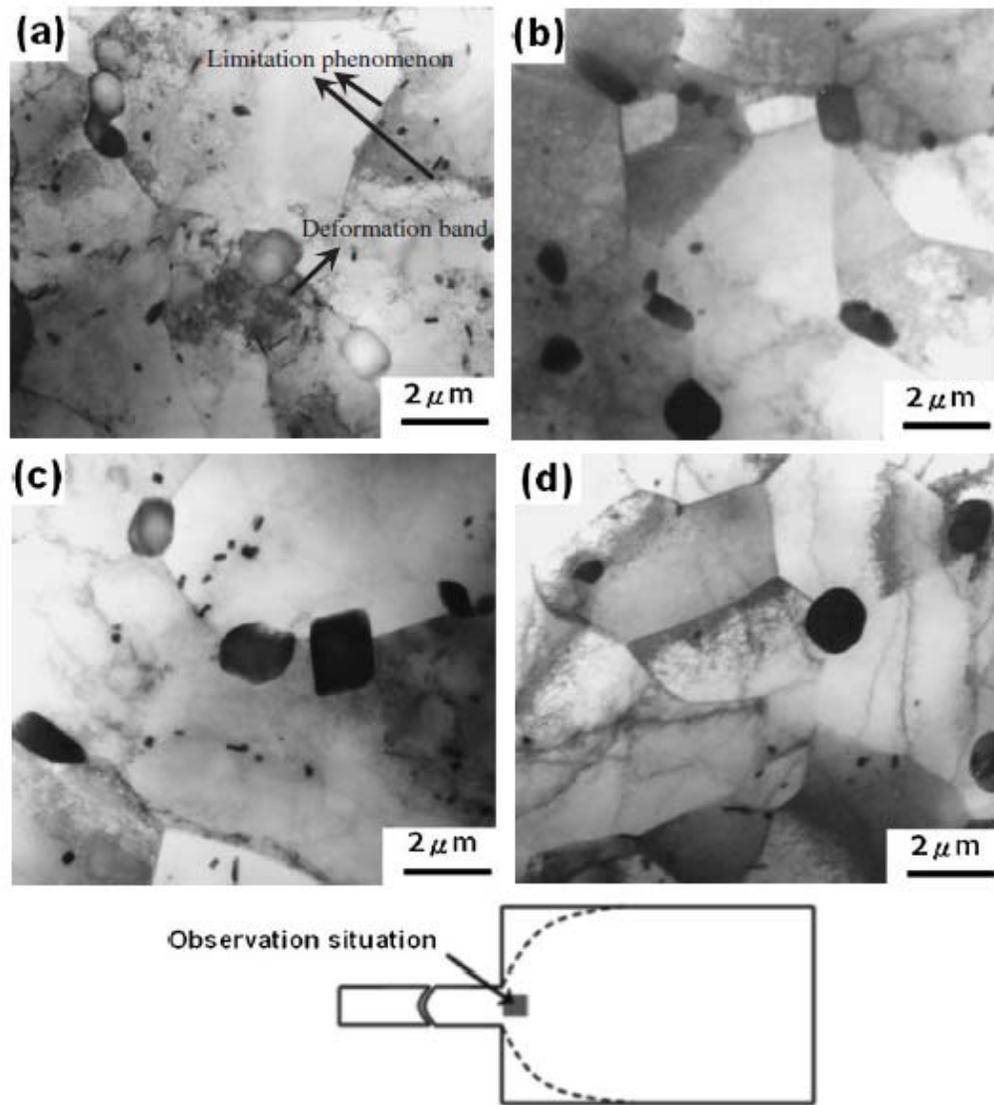
การที่ขอบเกรนจะเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคนี้ไปได้มันจะต้องใช้แรงที่มากขึ้นและใช้พลังงานที่มากกว่าแรงของอนุภาคแท่งเข็มที่ปักขวางอยู่ สำหรับการตกตะกอนและการกระจายตัวที่ไร้แบบแผนของอนุภาคขนาดเล็ก (random distribution) เราสามารถที่จะคำนวณแรงปักของอนุภาคแท่งเข็ม (P_z) ที่อยู่ตามบริเวณขอบเกรนได้ดังสมการที่ 2.5 [21]

$$P_z = \frac{3f_r\gamma}{2r} \quad (2.5)$$

เมื่อ γ คือพลังงานที่บริเวณขอบเกรน f_r คือปริมาณการกระจายตัวของอนุภาคที่ตกตะกอน และ r คือรัศมีความโตของอนุภาคที่ตกตะกอน ซึ่งจากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าแรงปักของอนุภาคแท่งเข็ม (P_z) ที่อยู่ตามบริเวณขอบเกรนจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญคือกระจายตัวและขนาดของอนุภาคที่ตกตะกอน



รูปที่ 2.18 ภาพถ่าย TEM แสดงให้เห็นการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กตามบริเวณขอบเกรน [22]



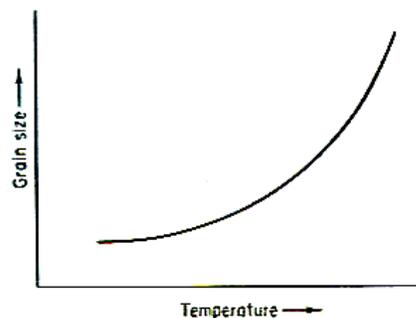
รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย TEM การเสียรูปแบบถาวรตรงบริเวณก่อนทางออกแม่พิมพ์ของการอัดรีด
แท่งอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 ที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ในรูปแบบที่
แตกต่างกัน [19]

- (a) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 460°C นาน 9 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ
- (b) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 9 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ
- (c) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 9 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ
และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 460°C นาน 3 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ
- (d) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 460°C นาน 1 ชั่วโมงจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิและอบ
ต่อเนื่องที่ 600°C นาน 9 ชั่วโมงและทำให้เย็นตัวทันทีในน้ำ

จากรูปที่ 2.19 เป็นภาพถ่าย TEM จากงานวิจัยของ Hsin-Wen Huang และคณะ ซึ่งได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่ของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 ระหว่างการอัดรีดขึ้นรูปร้อน (hot extrusion) พบว่าจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่จะเกิดขึ้นตรงบริเวณก่อนทางออกของแม่พิมพ์อัดรีด โดยโครงสร้างเดิมของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทจะมีการเสีรูปร่างมากตรงบริเวณนี้และจะมีเกรนย่อย (sub grain) เกิดขึ้นมาตามแนวเส้นขอบเกรนเดิม จากนั้นพลังงานความเครียดภายในที่เพิ่มขึ้นจากการอัดรีดบริเวณปากแม่พิมพ์จะผลักดันให้เกรนย่อยเหล่านี้ขยายตัวรวมกันทำให้ได้เกรนใหม่ที่สมบูรณ์ (full recrystallize) ภายหลังจากการรีด อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าในกรณีของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่ไม่สมบูรณ์โดยจะมีลักษณะของการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นแค่เป็นบางส่วน (partial recrystallize) และมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณขอบเกรนเดิมและเกรนย่อยที่เกิดขึ้นบางส่วนจะถูกขัดขวางการเคลื่อนที่ด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ ตามกลไก Pining effect หรือ Zener drag และในทางตรงกันข้ามการเกิดผลึกใหม่จะมีลักษณะที่สมบูรณ์ (full recrystallize) กับชิ้นงานที่รีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิสูงซึ่งมีการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กๆ ในปริมาณความหนาแน่นที่น้อยกว่า [19]

2.8 การขยายตัวของเกรน (Grain growth)

เกรนขนาดใหญ่จะมีพลังงานภายในต่ำกว่าเกรนขนาดเล็ก ทั้งนี้เพราะเกรนขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ตามแนวขอบเกรนน้อยกว่า ดังนั้นภายใต้สภาวะของความเป็นจริง โลหะที่มีเพียงเกรนเดียว (Single Crystal) จะมีสถานะต่ำสุดของพลังงานภายในหรือพลังงานอิสระ ดังนั้นแรงขับเคลื่อนที่จะทำให้เกิดการขยายตัวของเกรนจะต้องถูกต้านด้วยความมั่นคงแข็งแรงของอะตอมใน Lattice เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความมั่นคงแข็งแรงของ Lattice ที่จะต้านการขยายตัวของเกรนจะลดลง ทำให้การขยายตัวของเกรนเกิดได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 2.20



รูป 2.20 ผลของอุณหภูมิต่อขนาดเกรนที่ตกผลึกใหม่ [20]

2.9 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion process)

อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมมีคุณลักษณะอ่อนและง่ายต่อการอัดรีดให้เป็นรูปร่างต่างๆตามที่ต้องการ ในการรีดจะเริ่มต้นด้วยการนำอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านการหล่อมาเป็นแท่งกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 – 12 นิ้ว ไปอบให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 450 – 550°C และป้อนแท่งอะลูมิเนียมดังกล่าวเข้าเครื่องรีด หลังจากนั้นใช้เครื่องรีดซึ่งเป็นระบบไฮดรอลิกอัดแท่งอะลูมิเนียมผ่านแบบพิมพ์ออกมาเป็นอะลูมิเนียมเส้นยาวได้ รูปร่างตามแบบแม่พิมพ์ที่ต้องการเช่น ท่อกลมอะลูมิเนียม แท่งกลมอะลูมิเนียม หรืออะลูมิเนียมที่มีรูปร่างหน้าตัดโปรไฟล์ต่างๆทั้งที่เป็นแบบกลวง (hollow shape) หรือแบบตัน (solid shape)

2.9.1 ส่วนประกอบของเครื่องรีดอัดอะลูมิเนียม

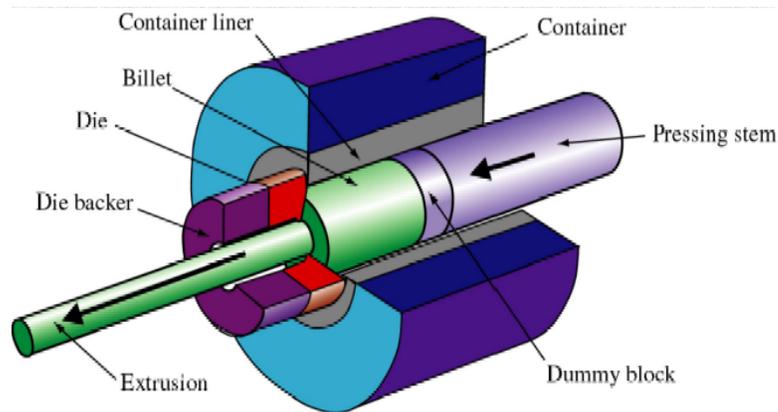
จากรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของเครื่องรีดอัดอะลูมิเนียมซึ่งจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

Pressing stem : เป็นตัวส่งผ่านแรงดันจากระบบไฮดรอลิกไปยังบิลเลท

Dummy block : จะถูกวางอยู่ระหว่าง Pressing stem และ บิลเลท โดยด้านที่สัมผัสกับ Pressing stem จะเป็นเหล็กและด้านที่สัมผัสกับบิลเลทจะเป็นอลูมิเนียม Dummy block จะต้องมีขนาดเล็กกว่า Container liner เล็กน้อย เพราะถ้า Dummy block มีขนาดที่ใหญ่กว่าหรือคับพอดีกับ Container liner จะทำให้ Liner เป็นรอยขีดและจะอัดอากาศเข้าไปในบิลเลทด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้า Dummy block มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้ห่ออะลูมิเนียมติดอยู่ที่ผิวของ Liner ซึ่งมีผลทำให้การรีดบิลเลทถูกกัดไปเกิดปัญหาคุณภาพผิวที่ชิ้นงาน

Container และ Container liner : Container เป็นอุปกรณ์ที่สวมอัดอยู่กับ Container Liner ซึ่งใช้สำหรับบรรจุบิลเลท ผิวของ Container liner จะต้องเรียบตลอดเวลา เพราะหากผิวของ Container liner เป็นรอยแล้วจะทำให้เกิดการสะสมของอะลูมิเนียมตามรอยเหล่านั้น ซึ่งบางครั้งอาจถูกรีดปะปนออกมากับบิลเลท ทำให้คุณภาพผิวไม่ดี ในขณะที่เดียวกันอากาศอาจเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรอยของ Container liner ทำให้เมื่อรีดชิ้นงานออกมามีอากาศเข้าตัวเข้าไปอยู่ในชิ้นงานส่งผลให้ผิวของชิ้นงานมีตุ่มฟองอากาศเกิดขึ้น

Die : คือแม่พิมพ์ที่ถูกเจาะให้เป็นรูปร่างหน้าตัดต่างๆเพื่อให้บิลเลทถูกรีดอัดออกมาเป็นหน้าตัดชิ้นงานตามที่เราต้องการ ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตรูปร่างหน้าตัดต่างๆแบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ได้ 2 ชนิด คือแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานหน้าตัดตัน (solid die) และแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานหน้าตัดกลวง (hollow die)



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องรีดอัดอะลูมิเนียม [3]

2.10 ผิวเปลือกส้มหลังการแปรรูปเย็น (Orange peel surface after cold forming)

ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการดึง (stretching) ตัดโค้ง (bending) หรือ ลากขึ้นรูป (drawing) มีโอกาสที่จะพบกับปัญหาผิวหยาบที่เกิดขึ้นได้บริเวณผิวของชิ้นงาน หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า “ผิวเปลือกส้ม” (orange peel surface) ดังแสดงตัวอย่างในรูป 2.22



รูป 2.22 ตัวอย่างปัญหาผิวเปลือกส้มที่ปรากฏขึ้นตรงบริเวณผิวตัดโค้งของชิ้นงาน

ปัญหาความรุนแรงผิวเปลือกส้มที่ปรากฏขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของเกรนที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน กล่าวคือขนาดของเกรนที่ละเอียดจะปรากฏปัญหาผิวเปลือกส้มให้เห็นที่บริเวณผิวชิ้นงานน้อยมากหรืออาจจะไม่ปรากฏให้เห็นเลยภายหลังการแปรรูปเย็น ในขณะที่เดียวกันถ้าชิ้นงานนั้นมีขนาดของเกรนที่หยาบก็จะส่งผลให้บริเวณผิวของชิ้นงานปรากฏผิวเปลือกส้มที่ค่อนข้างรุนแรงและสามารถมองเห็นได้ชัดเจนภายหลังการแปรรูปเย็น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่มากน้อยเพียงไร ปัญหาของผิวเปลือกส้มที่ปรากฏขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสีรูปของเกรนและทิศ

ทางการเคลื่อนตัวของผลึกที่ไม่เหมือนกันภายในเนื้อวัสดุ ในขณะที่วัสดุถูกแปรรูป การเคลื่อนตัวของตัวของผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างการเรียงตัวของกลุ่มเกรนในแต่ละพื้นที่และจะแปรผันไปตามปริมาณการแปรรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ และเนื่องจากที่บริเวณผิวโดยรอบของชิ้นงานเป็นบริเวณที่เกิดการเคลื่อนที่และเสียรูปร่างของเกรนโดยอิสระจึงทำให้ปรากฏลักษณะของผิวเปลือกส้มที่บริเวณผิวชิ้นงาน [6]

ขนาดของเกรนที่ขยายแต่เกิดขึ้นลงไปไม่ลึกจากผิวของชิ้นงานจะส่งผลให้ปรากฏผิวเปลือกส้มที่มองเห็นได้รุนแรงน้อยกว่าขนาดของเกรนที่ขยายเท่ากันแต่เกิดขึ้นลึกมากลงไปจากผิวของชิ้นงาน และสำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นจะปรากฏลักษณะของผิวหยาบหรือผิวเปลือกส้มที่บริเวณผิวของชิ้นงานในลักษณะที่รุนแรงและมองเห็นได้ชัดเจนกว่าผิวของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน [6]