บทที่ 3

ผลกระทบของกระบวนการความร้อนเชิงกลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขอบเกรน

3.1 คำนำ

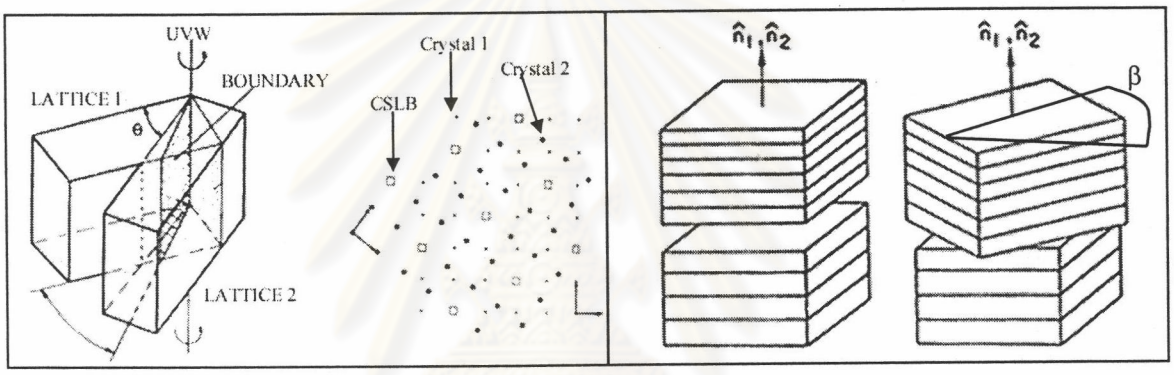
กระบวนการความร้อนเชิงกลเป็นกระบวนการที่สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของวัสดุได้เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโครงข่ายของขอบเกรน เมื่อการจัดเรียงตัวของโครงข่ายของขอบเกรนมีการเปลี่ยนแปลงไปจึงมีผลทำให้คุณสมบัติโดยรวมของวัสดุเปลี่ยนไปด้วย เช่น ความต้านทานต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน ความต้านทานต่อการเสียรูปที่อุณหภูมิสูง วิธีการในการปรับปรุงขอบเกรนเหล่านี้รู้จักกันในนามของ วิศวกรรมขอบเกรน หรือ Grain Boundary Engineering จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดย T. Watanabe [25,26] ได้บอกให้ทราบถึงผลกระทบของขอบเกรนชนิดพิเศษ (speacial grain boundary) ที่มีต่อการเลื่อนไถลของขอบเกรน และการเพิ่มความต้านทานต่อการคืบของวัสดุ

3.2 Grain Broundary Geometry

เนื่องจากขอบเกรนเกิดจากการจัดเรียงตัวและการทำมุมแตกต่างกันระหว่างเกรนที่อยู่ติดกันซึ่งถือได้ว่า ขอบเกรนเป็นส่วนบกพร่อง (plane defect) ของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอย่างหนึ่ง โดยปกติแล้วขอบเกรนจะมีความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงตัวสูง ซึ่งทำให้เป็นส่วนที่มีพลังงานสูงกว่าในเกรน ดังนั้นการจำแนกลักษณะของขอบเกรนจึงสามารถจำแนกโดยพลังงานที่ขอบเกรนหรือมุมการจัดเรียงตัวระหว่างขอบเกรนได้ พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับจำแนกลักษณะของขอบเกรนได้แก่ มุมการจัดเรียงตัวของโครงผลึกระหว่างเกรน เช่น LAB (Low Angle Boundary), HAB (High Angle Boundary) และ CSLB (Coincident-Site Lattice Boundary) มุมระหว่างจุดต่อของสามเกรน (dihedral angle) และความลาดเอียงของขอบเกรน (grain boundary inclination) ซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.2.1 มุมการจัดเรียงตัวของโครงร่างผลึกระหว่างเกรน (Grain boundary misorientation)

ขอบเกรน (grain boundary) เป็นบริเวณที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวของโครงร่างผลึกของขอบเกรนที่อยู่ติดกัน การบอกถึง Grain boundary misorientation นั้นมีตัวบ่งชี้ทั้งหมดรวมกันเป็น 5 degree of freedom ได้แก่ มุมและแกนของการจัดเรียงตัว (angle/axis of misorientation) ซึ่งถือว่าเป็น 3 ใน 5 ของ degree of freedom แทนด้วยสัญลักษณ์ θ/UVW และระนาบของผิวหน้าเกรนซึ่งเป็น 2 ตัวสุดท้ายของ degree of freedom แทนด้วยสัญลักษณ์ N_1,N_2



รูปที่ 3.1 a) แสดงถึงขอบเกรนที่เกิดจาก 2 เกรน ทำมุมต่อกัน θ บนแกนอ้างอิง UVW b) แสดงถึงเกรน 2 เกรนที่มีระนาบ N_1 และ N_2 ทำมุม β ต่อกัน

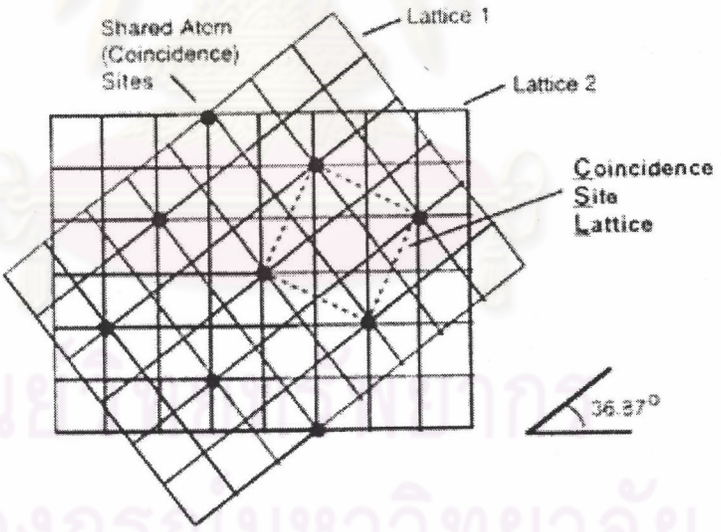
รูปที่ 3.1 a และ b [27] แสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงตัวของเกรน 2 เกรนที่ติดกันซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะของการจัดเรียงตัวของขอบเกรนได้จากค่า θ/UVW

ตามที่กล่าวมาแล้ว เมื่อพิจารณาตามแกนและมุมของการจัดเรียงตัวแล้วสามารถแบ่งลักษณะของขอบเกรนได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ LAB (Low Angle boundary) มีทิศทางการจัดเรียงตัวผลึกที่ทำมุมแตกต่างกันน้อยกว่า 15 องศา และ HAB (High Angle boundary) มีการจัดเรียงตัวผลึกทำมุมแตกต่างกันมากกว่า 15 องศา แต่จะมีขอบเกรนบางชนิดที่มีการจัดเรียงตัวผลึกที่ทำมุมกันเฉพาะบนแกนบางแกนที่นำไปสู่ coincidence point ในกลุ่มของ HAB ซึ่งกลุ่มนี้ถูกเรียกว่า CSLB (Coincidence Site Lattice

Boundary) แต่จาก Brandon's Criterion มุมการจัดเรียงตัวของ CSL สามารถเบี่ยงเบนองศาไปจากเดิมได้เล็กน้อยตามสมการ

$$\Delta\theta = 15^{\circ} \times \Sigma^{-1/2} \qquad 3.1$$

โดยที่ $\Delta\theta$ เป็นมุมที่สามารถเบี่ยงเบนได้จากองศาของ CSL และ Σ บ่งบอกถึงความหนาแน่นของอะตอมที่อยู่ร่วมกันของสองผลึก เช่น $\Sigma 5$ บอกถึง อะตอมของผลึก 2 ผลึกที่อยู่ติดกันมีอะตอมอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน 1 อะตอมสำหรับทุก 5 อะตอม ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งบาง CSL ที่มีค่า $\Sigma \leq 29$ จะเรียกว่า special grain boundary ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติขอบเกรนทางด้านกายภาพและทางเคมี เช่น พลังงานที่ต่ำลง ลดความไวต่อ solute segregation การแพร่ลดลง ต้านทานการ sliding cavitation การกัดกร่อนและการแตกร้าว



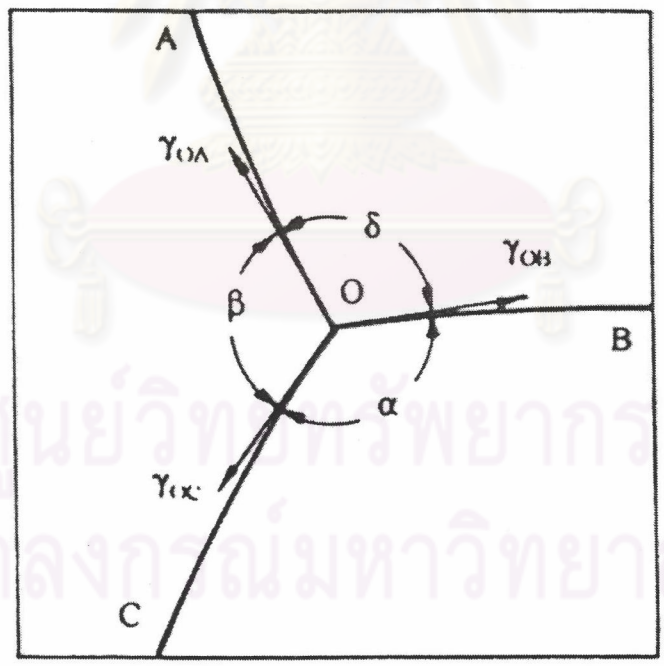
รูปที่ 3.2 แสดง CSL ที่มีค่าเท่ากับ $\Sigma 5$

3.2.2 มุมระหว่างจุดต่อของเกรนสามเกรน (dihedral angle)

ขอบเกรนแต่ละประเภทมีพลังงานอิสระต่างกัน แต่พลังงานอิสระของขอบเกรนเหล่านั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับมุมที่มาบรรจบกันของขอบเกรนนั้น ๆ ณ triple junction ซึ่งสามารถบอกความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูป 2 มิติของ dihedral angle กับสามขอบเกรนดังสมการ [28]

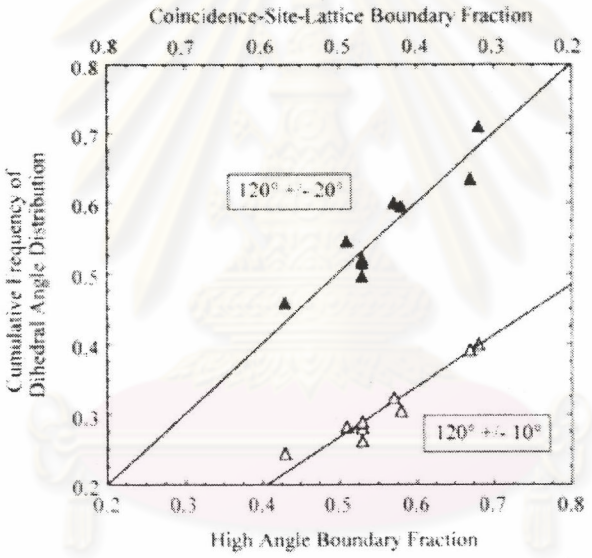
$$\gamma a / \sin\alpha = \gamma b / \sin\beta = \gamma c / \sin \qquad 3.2$$

ซึ่ง γa γb และ γc เป็นพลังงานของแต่ละขอบเกรนที่มารวมกันที่ triple junction และ α, β และ δ เป็นมุมที่เกิดขึ้น แสดงว่า dihedral angle สามารถใช้ในการวัดพลังงานของขอบเกรนได้ ถ้ามุมทั้งสาม α, β และ δ ทำมุมเท่ากัน (120 องศา) นั้น สามารถบอกได้ว่าพลังงานของขอบเกรนเข้าสู่สภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 มุมและพลังงานของขอบเกรนที่เกิดขึ้น ณ Triple junction

จากการศึกษาวิจัยของ V. Thaveeprungsriporn และคณะ [21] ได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับจำนวนสัดส่วนของ CSLB ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเชิงกลแบบ Iterative strain annealing โดยการวัดการกระจายตัวของมุม dihedral angle ที่เกิดขึ้นของขอบเกรนที่จุด triple junction และแสดงผลออกมาเป็นการกระจาย cumulative frequency of dihedral angle (CFDA) รอบมุม 120^{o} ดังรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์โดยตรงของสัดส่วนจำนวนของขอบเกรนทั้ง CSL และ HAB รอบมุม 120^{o}+/-10^{o} และ 120^{o}+/-20^{o}



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจาย cumulative frequency of dihedral angle และการกระจายคุณสมบัติของขอบเกรน

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า อัตราส่วนของ CFDA มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัดส่วนจำนวนของ CSL และ HAB คืออัตราส่วน CFDA ลดลงเมื่อสัดส่วนจำนวน HAB ลดลงหรือสัดส่วนจำนวน CSL เพิ่มขึ้น

โดยปกติแล้ววิธีการตรวจสอบหาอัตราส่วนของ CSLB ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ EBSP (Electron Backscatter Diffraction Pattern) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวต้องใช้เวลานานและยากต่อการ

เตรียมตัวอย่าง ดังนั้นเทคนิคการหาอัตราส่วน CSLB โดยใช้วิธีหาอัตราส่วนของ CFDA จึงเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายกว่า

3.2.3 ความลาดเอียงของขอบเกรน (Grain Boundary Inclination)

ถึงแม้ว่าขอบเกรนประเภท CSLB สามารถเป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติของวัสดุได้ก็ตาม แต่เป็นการอธิบายจากเพียง 3 degrees of freedom ของ grain boundary model เท่านั้น ส่วนอีก 2 degrees of freedom ที่เหลือนั้นจะอยู่ในรูปของระนาบขอบเกรน (grain boundary plane) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การบอกถึงระนาบขอบเกรนนั้นทำได้ยาก ดังนั้นพารามิเตอร์ที่นำมาใช้แทนระนาบของขอบเกรนได้อีกอย่างหนึ่งคือ ความลาดเอียงของขอบเกรน งานวิจัยของ Mark Caul และคณะ [22] ได้ใช้หลักการดังกล่าวศึกษาถึง ความลาดเอียงของขอบเกรน (grain boundary inclination) ของ austenitic stainless steel ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700° Cและ 800° C ซึ่งชิ้นงานทั้งสองมีสัดส่วนจำนวน CSL ในรูปของ $\sum 3^n$ ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อศึกษาถึง ความลาดเอียงของขอบเกรน grain boundary inclination โดยใช้เทคนิค serial sectioning technique ของทั้งสองชิ้นงานพบว่ามุมของความลาดเอียงของขอบเกรนของชิ้นงานทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งมุมของความลาดเอียงของขอบเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการอบที่ 800^0C มีค่าใกล้แนวตั้งฉากกับ free surface มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบ 700° C เนื่องจากขอบเกรนเคลื่อนตัวได้มากที่อุณหภูมิสูงและเป็นผลให้พลังงานขอบเกรนต่ำลงด้วย

3.3 กระบวนการความร้อนเชิงกล

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า คุณสมบัติของ special grain boundary หรือ CSLB นั้น สามารถทำให้วัสดุสามารถต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุเนื่องจากการเลื่อนไถลของขอบเกรน การคืบ [25,26] นอกจากนั้นการวิจัยก่อนหน้านี้โดย E.A. TRILLO และ L.E. MURR [29] แสดงให้เห็นว่าการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์และการถูกกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนไม่เกิดขึ้นบน special grain boundary, $\sum 3$

กระบวนการความร้อนเชิงกลเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายของขอบเกรนได้ เช่น ทำให้มีปริมาณสัดส่วนของ CSLB เพิ่มขึ้น สำหรับกระบวนการความร้อนเชิงกลนั้น สามารถจำแนกได้ตามวิธีการดังต่อไปนี้

Iterative recrystallization เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิด recrystallization ซ้ำหลายครั้งแต่ยังคงทำให้เกรนมีขนาดเล็ก

One-Step recrystallization เป็นกระบวนการที่ผ่านการอบอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้น หลังจากผ่านการ deformation ระดับกลาง เป็นผลทำให้เพิ่มความหนาแน่นของ twin ในขณะที่เกรนยังมีขนาดเล็ก

Iterative strain annealing เป็นกระบวนการที่ผ่าน deformation เพียงเล็กน้อยไม่เกิน 6% หลังจากผ่านการอบแล้วมีผลทำให้ $\sum 3^n$ เพิ่มมากขึ้นโดยไม่ผ่านการเกิด recrystallization

One-step strain annealing เป็นกระบวนการที่ผ่านการอบเพียงครั้งเดียวหลังจากการให้ความเครียดเล็กน้อย เช่น ในนิกเกิลหลังจากให้ความเครียด 6% และการอบอ่อน $\sum 3^n$ มีแนวโน้มของมุมการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนไปน้อยลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบ ซึ่งเป็นผลในการปรับปรุงทั้ง grain boundary plane

เพื่อจุดประสงค์ในการควบคุมขนาดเกรนจากชิ้นงานที่ได้รับมาจากโรงงาน ดังนั้นกระบวนการความร้อนเชิงกลที่ใช้ในการปรับปรุงโครงข่ายผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในงานวิจัยครั้งนี้จึงเป็นแบบ strain annealing ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและขนาดเกรนยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย