บทที่ 4

การเกิดผลึกใหม่และการเติบโตของเกรน

Recovery , Recrystalliztion and Grain Growth

พลังงานที่ใช้ในขบวนการแปรรูปขณะเย็นจะปรากฏออกมาเป็นความร้อน แต่มีบางส่วนที่ตกค้างในโครงสร้างของโลหะ ทำให้โครงสร้างโลหะไม่มีเสถียรและมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป จึงต้องนำปรับปรุงคุณสมบัติก่อนใช้งานหรือก่อนเข้าสู่กระบวนการต่อไป การปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวเป็นการกระทำความร้อนเรียกว่า การอบอ่อน (annealing) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นสองลักษณะคือ

ก. โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงอย่างสิ้นเชิง (เกิดผลึกใหม่) ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ข. เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ โดยโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงเพียงแต่โครงสร้างกลับสภาพเดิมเท่านั้น เรียกว่าการคืนตัว หรือ Recovery

4.1การคืนตัว (Recovery)

เมื่อนำงานแปรรูปขณะเย็นไปอบที่อุณหภูมิต่ำเพื่ออบคืนตัว จะมีเฉพาะจุดบกพร่องที่เคลื่อนที่ได้เท่านั้นที่จะจัดเรียงตัวใหม่ ตอนแรกจุดว่าง (Vacancies) และอะตอมที่แทรกตัวบนระนาบเลื่อนกำจัดออกไป ดิสโลเกชั่นที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามจะมาบรรจบกันพอดี กลายเป็นผลึกที่สมบูรณ์แต่ไม่สามารถขจัดดิสโลเกชั่น ส่วนใหญ่ไปได้

จะเห็นว่าเมื่องานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ ข้อบกพร่องต่างๆ ภายในเกรนจะลดน้อยลงโดยขอบเกรนไม่เปลี่ยนแปลง ลักษณะนี้เรียกว่า Recovery

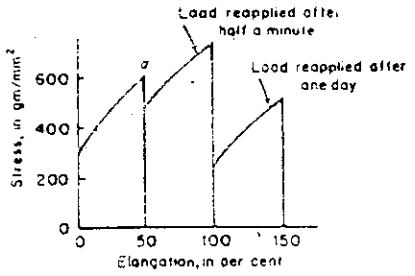
ในขบวนการ Recovery นั้น คุณสมบัติทางกลและกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการแปรรูปขณะเย็นจะกลับคืนสู่สภาพเดิมและคุณสมบัติอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้างโดยโครงสร้างไม่เปลี่ยน

4.1.1 Recovery ในผลึกเดี่ยว

ความสลับซับซ้อนของงานที่ผ่านการแปรรูปขณะเย็นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความซับซ้อน deformation ทำให้เกิดสภาวะแปรรูปขณะเย็นขึ้นมา ดังนั้นผลึกเดี่ยวที่เปลี่ยนรูปได้ง่าย (เกิด slip ระบบเดี่ยว) โครงผลึกจะบิดตัวได้ง่ายกว่าในผลึกเดี่ยวที่เกิด Slip หลายระบบ

ถ้าผลึกเดี่ยวเกิด Slip บนระนาบเดียวโดยโครงผลึกไม่บิดตัวก็ยิ่งทำให้ความแข็งของผลึกสู่สภาพเดิมได้ง่าย โดยไม่เกิดผลึกใหม่ขึ้นมา แต่ที่จริงแล้วการทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนไปเพียง

ระนาบเดียวนั้นเป็นไปได้ยาก แม้ว่าจะทำให้ความร้อนสูงถึงจุดหลอมเหลวก็ตาม รูปที่ 4.1 แสดง Stress Strain curve ของสังกะสีผลึกเดี่ยวเมื่อได้รับแรงดึงที่อุณหภูมิห้องและเกิดการเลื่อน



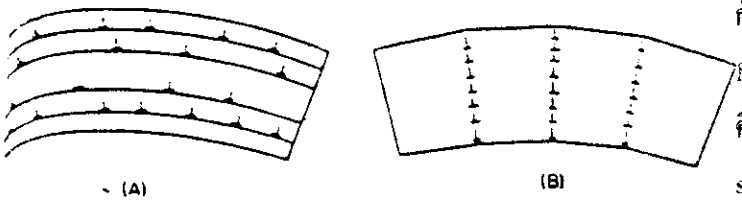
รูปที่ 4.1 การเกิด Recoveryของ Yeild Streingth ในผลึกเดี่ยวของสังกะสีที่อุณหภูมิห้อง

สมมุติว่าครั้งแรกผลึกได้รับแรงจนถึงจุดแล้วหยุดให้แรงทันที หลังจากนั้นประมาณครึ่งนาทีให้แรงอีกครั้ง ผลึกจะไม่เกิดการล้าตัวจนกว่าเกิดความเค้นขึ้นเท่ากับความเค้นที่เกิดขึ้นก่อนที่จะหยุดให้แรงในช่วงแรก อย่างไรก็ตามความเค้นลดลงเมื่อผลึกเริ่มเกิดการไหลเป็นครั้งที่สอง stress ที่ทำให้ผลึกเกิดการไหลไปนี้จะเท่ากับความเค้นก่อนหยุดให้แรงในช่วงแรก ถ้าหากว่าสามารถเอาแรงออกและให้เกิดแรงกระทำอีกโดยไม่เสียเวลา ดังนั้นจุดจำนนจะเริ่มคืนตัวได้เร็วมาก จุดจำนนในผลึกสังกะสีจะคืนตัวที่อุณหภูมิห้องได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 1 วัน ดังแสดงใน load cycle ที่สามในรูปที่ 4.1

4.1.2 Polygonization

Recovery ที่ใช้กับงานที่เปลี่ยนรูปอย่างถาวรง่าย ๆ นั้นเป็นการขจัดดิสโลเกชั่นออกจาก ส่วน Recovery ที่ใช้กับงานที่ได้จากการดัดงอเรียกว่า Polygoniztion

ในรูปที่ 4.2 A เป็นผลึกทีนำไปดัดงอให้เปลี่ยนรูปอย่างถาวร สมมุติว่าระนาบเลื่อนขนาดผิวล่างและบนของผลึก จะเกิด Edge dislocation ในทางบวก (T) เรียงอยู่ตามแนวระนาบจำนวนมาก จึงทำให้มี strain energy สูง เมื่อผ่านขบวนการ Polygonization แล้ว Edge dislocation จะเรียงตัวตั้งฉากกับระนาบเลื่อน (รูปที่ 4.2 B) Strain energy ต่ำลง



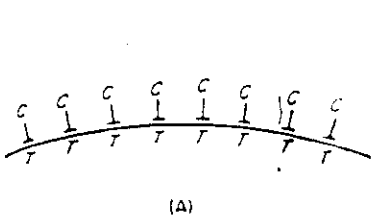
รูปที่ 4.2 การจัดเรียงตัวใหม่ของ Edge dislocation หลังจากทำ Polygonlization

a. ดิสโลเคชั่นที่หลงเหลืออยู่บนระนาบเลื่อนหลังจากดัดงอ

b. ดิสโลเคชั่นจัดเรียงตัวใหม่หลังจากทำ Polygolization

เมื่อ Edge dislocation ที่มีเครื่องหมายเหมือนกันสะสมอยู่บนระนาบเลื่อนเดียวกัน Strain field ของผลึกจะมากขึ้น (รูปที่ 4.3 A) เมื่อ C คือ Compressive strain และ T คือ tension strain ดังรูปที่ 4.2 ที่ผ่านมาจะเห็นว่าในผลึกที่ผ่านมาจะเห็นว่าในผลึกที่ผ่านการดัดงอมาแล้วจะเกิด Tensile และ comprssive strain ขึ้นจำนวนมาก(รูป A)แต่ถ้าทำให้เกิดดิสโลเกชั่นจัดตัวอยู่ในแนวดิ่ง (ตั้งฉากกับระนาบเลื่อน) strain field

ดิสโลเกชั่นที่อยู่ถัดไปจะมีบางส่วนหักล้างซึ่งกันและกัน (รูป B)



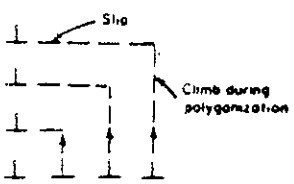
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของ Edge dislocation เรียงกันในแนวดิ่งทำให้ Strain energy

การทำให้ Strain energy ต่ำลงโดยให้ Edge dislocation จัดเรียงตัวใหม่ในแนวดิ่งทำให้ขอบเกรนอื่นต่ำ หรือที่เรียกว่าขอบเกรนมุมแคบ (Low angle boundary) นอกจากนี้ยังทำให้ส่วนโค้งของผลึกหายไป กลายเป็นรูปหลายเหลี่ยม (polygon) ผลึกที่อยู่ระหว่างขอบเกรนมุมแคบแต่ละค่าความเครียดน้อยมาก แต่ผลึกที่อยู่ชิดกันจะมีลักษณะจัดเรียงตัวแตกต่างกันเล็กน้อยตามลักษณะขอบเกรน

ขอบเกรนมุมแคบที่เกิดในขบวนการ Polygonization เรียกว่า Subboundaries และผลึกอยู่ระหว่างขอบเกรนมุมแคบ เรียกว่า Subgrain ขนาด , ลักษณะและการเรียงตัวของ Subgrain เป็น Substructure ของโลหะความแตกต่างอย่างหนึ่งของ Grain และ Subgrain คือ Subgrain จะเรียงตัวอยู่ภายใน Grain

4.1.3 การเคลื่อนที่ของดิสโลเกชั่นในขบวนการ Polygonization

Edge dislocation สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการเลื่อนบนระนาบเลื่อนหรือปีน (Clin) ขึ้นไปในทิศทางตั้งฉากกับระนาบเลื่อน ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จำเป็นมากสำหรับขบวนการ Polygonizrion ดังรูปที่ 4.4 แสดงว่า Edge dislocation แต่ละตัวปีนขึ้นไปแล้วจึงเลื่อนไปอยู่ในแนวเกิดแรงที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวเช่นนี้ได้มาจาก Strain energy ของดิสโลเกชั่นซึ่งจะลดลงเมื่อเกิด Polygonization หรืออาจกล่าวได้ว่า Strain fied ของกลุ่มดิสโลเกชั่นบนระนาบเลื่อนจะทำให้เกิดแรงพอที่ดิสโลเกชั่น ให้หายเข้าไปใน Subboundries ได้ และเกิดขึ้นเสมอไม่ว่าจะมีอุณหภูมิเท่าใด แต่ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ Edge dislocation ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้



รูปที่ 4.4 Edge dislocation จัดเรียงตัวกันใหม่ในแนวดิ่งโดยการปีนและเลื่อน

4.1.4 ขบวนการ Recovery ที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

ขบวนการ Polygoniztion สลับซับซ้อนมาก เพราะมีการปืนเกิดขึ้นด้วย ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำจะเกิดขบวนการ Polygonization เร็วขึ้น ดังนั้นโลหะที่มีหลายผลึกจะควรกำจัดดิสโลเกชั่น และทำ Polygonization ที่อุณหภูมิสูง ถ้าหากใช้อุณหภูมิต่ำจะขจัดที่ว่างและดิสโลเกชั่นได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

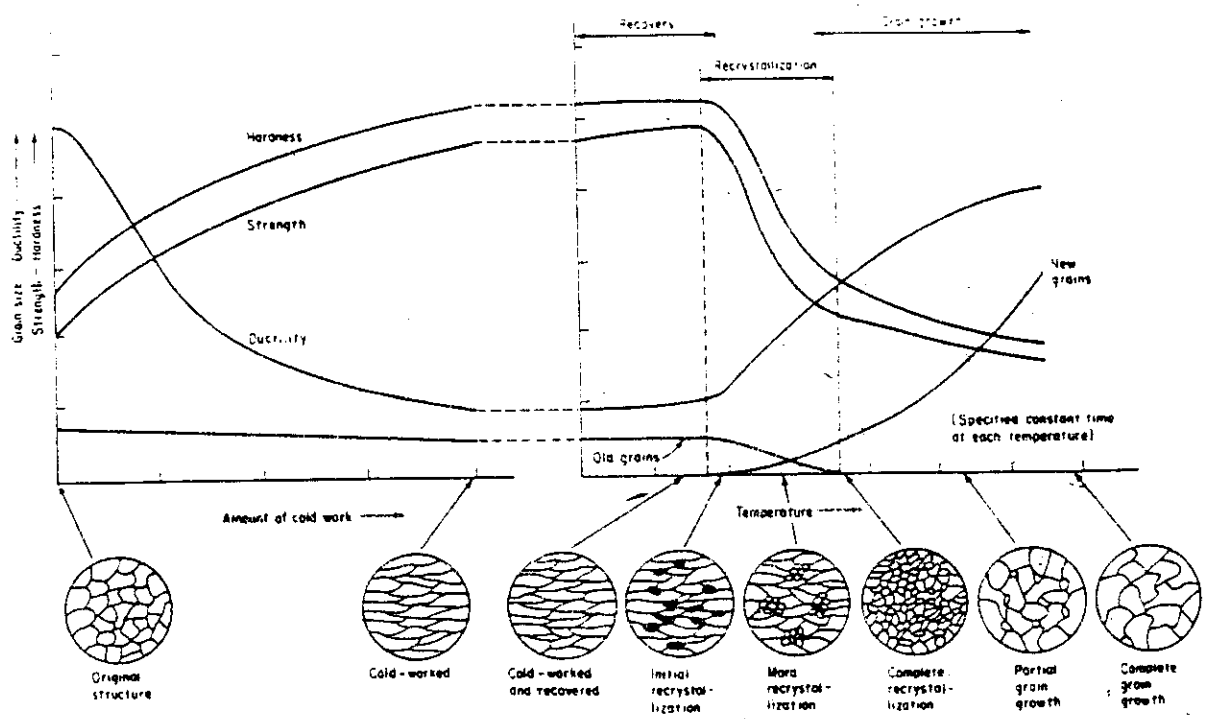
4.2 การเกิดผลึกใหม่ (RECRYSTALLIZATION)

Recovery และ Recrystallization เป็นปรากฏการณ์ที่แตกต่างกัน อัตราการเกิด Recovery จะลดลงเมื่อเวลานานขึ้น คือ จะเริ่มเกิดอย่างรวดเร็วและต่อไปจะค่อย ๆ ช้าลงเรื่อย ๆ เมื่อแรงดันน้อยลง ส่วนการเกิดผลึกใหม่จะเริ่มด้วยการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) และการเติบโต (growth) การเกิดผลึกใหม่นี้จะเริ่มได้ช้ามากและจะเพิ่มขึ้นจนมีอัตราการเกิดสูง

4.2.1 กฎของการเกิดผลึกใหม่

จุดมุ่งหมายของการอบเพื่อให้เกิดผลึกใหม่คือการทำให้วัสดุอ่อนลง การเกิดผลึกใหม่ทำให้ ductility ของโลหะดีขึ้นและลดพลังงานที่จะใช้ในขบวนการแปรรูปต่อไป

จุดมุ่งหมายข้อที่สอง คือ เพื่อควบคุมขนาดเกรน เพราะวัสดุที่มีเกรนละเอียดจะมี Flow Strain สูงกว่า ductility ดีกว่า



รูปที่ 4.5 การอบอ่อนงานแปรรูปขณะเย็น แสดงการเกิดขั้นตอนการคืนตัว (Recovery) การเกิดผลึก (Recrystalliztion) และการเติบโตของเกรน

แผนภาพซ้ายมือแสดงคุณสมบัติเชิงกลของงานรีดเย็นก่อนอบอ่อน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อรีดเย็นอย่างแรงงานจะมีความแข็งแรงสูงขึ้นแต่ ductility ลดลงและในวงกลมใต้แผนภาพแสดงลักษณะเกรนก่อนและหลังรีดเย็น

แผนภาพขวามือแสดงขบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อนำงานรีดเย็นไปอบอ่อนซึ่งมี 3 ขบวนการ คือ การคืนตัว , การเกิดผลึกใหม่และการเติบโตของเกรน งานที่ผ่านการรีดเย็นมาแล้วจะมีเกรนเรียวยาวตามลักษณะการรีด , ductility ต่ำ , ความแข็งและความแข็งแรงสูง เมื่ออบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำเกรนจะพยายามกลับสู่สภาพเดิม ductility จะเริ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงพอจะมีผลึกใหม่เกิดขึ้นตามบริเวณขอบเกรนเดิม (เรียวยาว) ซึ่งถือว่าเป็นขบวนการ Recrystallization โดยความแข็งและความแข็งแรงของงานจะลดลงแต่ ductility สูงขึ้น จากรูปใต้แผนภาพบริเวณสีดำ คือผลึกใหม่ที่ก่อตัวขึ้นมาเมื่ออบอ่อนต่อไปอีก ผลึกใหม่จะเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ กลายเป็นเกรนใหม่ ส่วนเกรนเรียวยาวเดิมนั้นจะลดลงและหายไปในที่สุด ครั้งสุดท้ายจะได้เกรนหยาบสม่ำเสมอมีความแข็งแรงและความแข็งต่ำ (อ่อน) และความสามารถแปรรูปสูง

แกนในแนวดิ่ง แสดงค่าขนาดเกรน ductility ความแข็ง-ความแข็งแรง ส่วนแกนนอนแสดงจำนวนการรีดเย็น , อุณหภูมิ

รูปซ้ายมือแสดงลักษณะเกรน 2 ลักษณะ คือ รูปซ้ายมือเป็นเกรนก่อนรีดเย็น และรูปขวามือเกรนหลังรีดเย็น ซึ่งเกรนจะกลายสภาพเป็นเกรนเรียวยาว

รูปขวามือแสดงลักษณะเกรนในขั้นตอนต่าง ๆ โดยรูปแรกเป็นเกรนหลังจากอบที่อุณหภูมิต่ำเกิดการคืนตัว ขนาดเกรนยังคงเดิม รูปที่สอง อุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดผลึกใหม่ (สีดำ) ขนาดของเกรนลดลง รูปที่สาม เกิดผลึกใหม่มากขึ้น ขนาดของเกรนลดลงและผลึกใหม่เติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนรูปที่สี่ เกิดผลึกใหม่สมบูรณ์ เกรนเดิมสลายตัวและผลึกใหม่จะเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 3.6

เมื่อนำโลหะแปรรูปขณะเย็นไปอบเพื่อให้เกิดผลึกใหม่ขึ้นมาภายในเวลาที่กำหนด ให้อุณหภูมิขึ้นอยู่กับเวลา , จำนวน cold work และปัจจัยอื่น ๆ อีก ซึ่งเป็นไปตามกฎดังนี้

1. อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ (RT) เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาอบอ่อนลดลง คือ โลหะสามารถเกิดผลึกใหม่ได้หลายช่วงอุณหภูมิ ถ้าหากใช้อุณหภูมิสูงเวลาจะน้อยลง

2. อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่จะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นของ Strain เพิ่มขึ้นหรือเมื่อจำนวน cold work ในขบวนการแปรรูปเพิ่มขึ้น

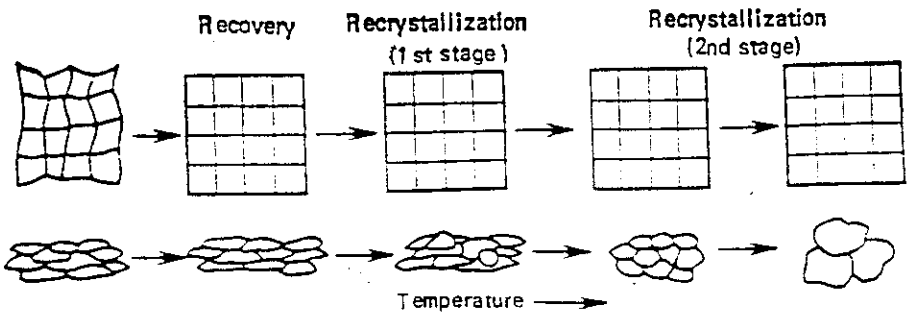
3. ขนาดผลึกใหม่ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นการแปรรูป ถ้างานแปรรูปขณะเย็นมี Workdone มากขึ้นขนาดเกรนของผลึกที่เกิดใหม่จะยิ่งละเอียด

4. เมื่อกำหนดเปอร์เซ็นการแปรรูปคงที่ อุณหภูมิที่เกิดผลึกใหม่จะเพิ่มขึ้นเมื่อ

ก. โลหะที่นำมาแปรรูปมีเกรนหยาบ

ข. อุณหภูมิการแปรรูปขณะเย็นสูงกว่าปกติ

ค. ให้ความร้อนอย่างช้า ๆ



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโลหะเมื่อนำงานที่ผ่านการแปรรูปมาแล้วไปอบ

จากค่าสัมประสิทธิ์ความบริสุทธิ์ของโลหะ (a) จะสามารถคำนวณอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่โลหะในงานวิศวกรรมทั่วไปได้ เหล็กโดยทั่วไปมีอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ประมาณ 450° C ทองแดง 270° C และ อลูมิเนียม 50° C สำหรับโลหะเบา เช่น สังกะสี ดีบุก หรือตะกั่ว มีอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ต่ำกว่าอุณหภูมิโลหะ

นอกจากความบริสุทธิ์ของโลหะแล้ว สิ่งที่มีอิทธิพลต่อระดับอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ต่ำสุด ได้แก่ ของการเปลี่ยนรูปก่อนอบ ถ้าชิ้นงานนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรุนแรง โครงสร้างจะบิดเบี้ยวมากขึ้นเสถียรภาพไม่ดี จะมีแนวโน้มที่เปลี่ยนไปสู่สภาวะที่มีเสถียรภาพดีมากขึ้น งานที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรมากจะเกิดผลึกใหม่ได้ง่าย และใช้อุณหภูมิเพื่ออบให้เกิดผลึกใหม่ต่ำลง

อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่นับว่ามีความสำคัญมากต่อภาคปฏิบัติ เมื่อต้องการให้โลหะมีโครงสร้างและคุณสมบัติคืนสู่สภาพเดิม เช่น โลหะที่เกิด strain - hardened มาแล้ว (เช่น นำไปรีดหรือดึงรูปขึ้น) จะต้องอบโลหะให้สูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ ขบวนการนี้เป็นการอบชุบโลหะวิธีหนึ่งเรียกว่า Recrystallzation annealing

การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรที่เกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิเกิดผลึกใหม่จะสามารถทำให้โลหะมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่คุณสมบัติดังกล่าวจะหายไปอย่างรวดเร็วเพราะโลหะเกิดผลึกใหม่ ที่จริงแล้วการเกิดผลึกใหม่ไม่ได้เกิดขึ้นขณะเปลี่ยนรูป แต่จะเกิดหลังจากเปลี่ยนรูปและจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ถ้าอุณหภูมิสูงมากอาจเกิดผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ภายใน 2 - 3 วินาที

ดังนั้น โลหะที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่จะทำให้เกิดStrain - hardening แต่เกิดเพียงระยะเวลาอันสั้น และจะหายไปอย่างรวดเร็ว ขบวนการแปรรูปโลหะที่ไม่เกิดStrain (work) hardening นี้เรียกว่าการแปรรูปขณะร้อน หรือ Hot plastic working

หรือ Hot working ส่วนขบวนการแปรรูปที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดผลึกใหม่เรียกว่า การแปรรูปขณะเย็น Cold plastic workingหรือ Cold working

ดังนั้น การแปรรูปเหล็กที่ 600° C ถือว่าเป็นการแปรรูปขณะร้อน และที่ 400° C เป็นการแปรรูปขณะเย็น สำหรับตะกั่วและดีบุก ซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรที่อุณหภูมิห้องนั้น ถือเป็นการแปรรูปขณะร้อน เพราะมีอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ต่ำกว่า 20°C โลหะเหล่านี้จึงจัดเป็นประเภท non-strain-hardenable

ถ้าต้องการเพิ่ม ductility และป้องกัน Strain hardening ควรแปรรูปโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ที่ต่ำที่สุด

ในวงการอุตสาหกรรมนิยมนำโลหะที่เกิด Work-hardended ไปอบอ่อนเช่นเดียวกันที่เหนือ

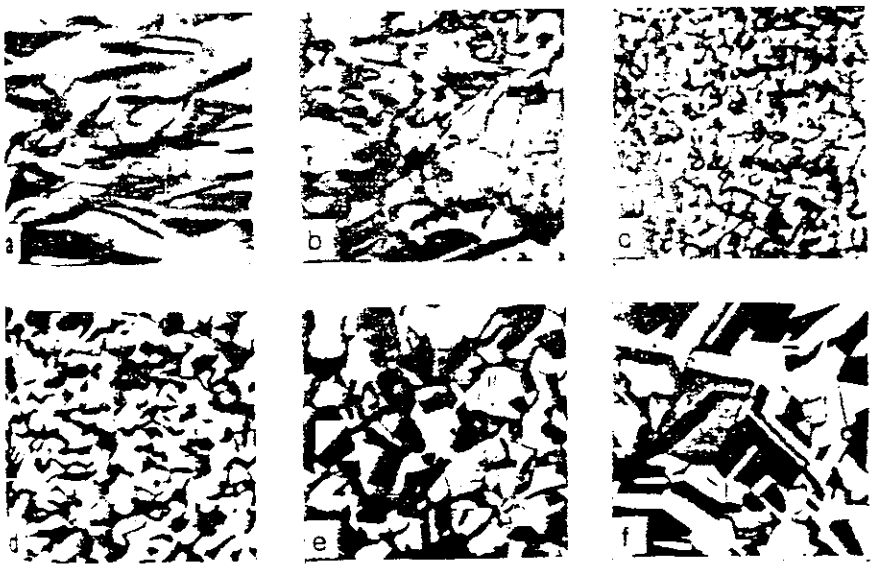
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่และการแปรรูปร้อนของโลหะต่าง ๆ

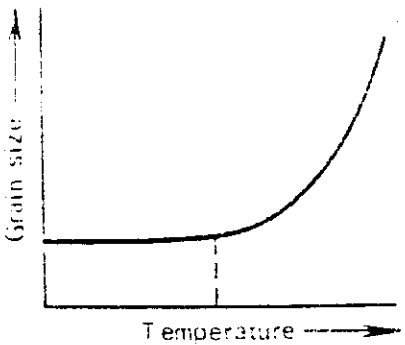
	อุณหภูมิ,° C,ของ		
โลหะ	การเกิดผลึกใหม่ (ตามทฤษฎี a = 0.4)	การอบอ่อนเพื่อให้เกิดผลึกใหม่	การแปรรูปขณะร้อน
เหล็กอ่อน	450	600 - 700	1300 - 800
เหล็กกล้า	488	600 - 700	1300 - 800
ทองแดง	270	450 - 500	800 - 600
ทองเหลือง	250	400 -500	750 - 600
อลูมิเนียม	50	250 - 350	460 -350
โมลิบดินัม	900	1400 - 1600	1400 - 2000

อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ต่ำสุด เพื่อให้แน่ใจว่าโลหะได้เกิดผลึกใหม่ตามที่ต้องการ ตารางที่ 4.1 เป็นค่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ตามทฤษฎี อุณหภูมิเพื่ออบอ่อนให้เกิดผลึกใหม่และอุณหภูมิแปรรูปร้อนของโลหะบางชนิด

ขณะนำงานที่เกิด work-hardened มาแล้วไปอบ โครงสร้างจุลภาคจะเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.7,รูป a เป็นโครงสร้างก่อนอบซึ่งจะเกรนเรียวยาวและระนาบเลื่อนจำนวนมาก เมื่ออบที่อุณหภูมิต่ำ ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย(เนื่องจากเกิด Recovery) และโครงสร้าง เปลี่ยนเพียงเล็กน้อย (รูป b), เมื่ออบถึงอุณหภูมิ 350° C จะเกิดผลึกใหม่และทำให้ ผลึกมีขนาดสม่ำเสมอแต่ยังมีขนาดไม่โตมากแสดงว่าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่เพียงเล็กน้อย เมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นอีก (550-800° C) จะทำให้เกรนหยาบ ถ้าเขียน กราฟสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและขนาดเกรนจะได้กราฟดังรูปที่ 4.8

รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของทองเหลืองที่เกิด ⇒
Strain-hardened เมื่ออบที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน,*100,
a) ก่อนอบ , b) 300° C ,c) 350° C , d) 450° C
e) 550° C , f) 650° C ,g) 750° C , h) 800° C





รูปที่ 4.8 อิทธิพลของอุณหภูมิที่อบที่มีต่อขนาดเกรนของโลหะที่ผ่านขบวนการแปรรูปมาแล้ว

4.2.3 ขบวนการเกิดผลึกใหม่

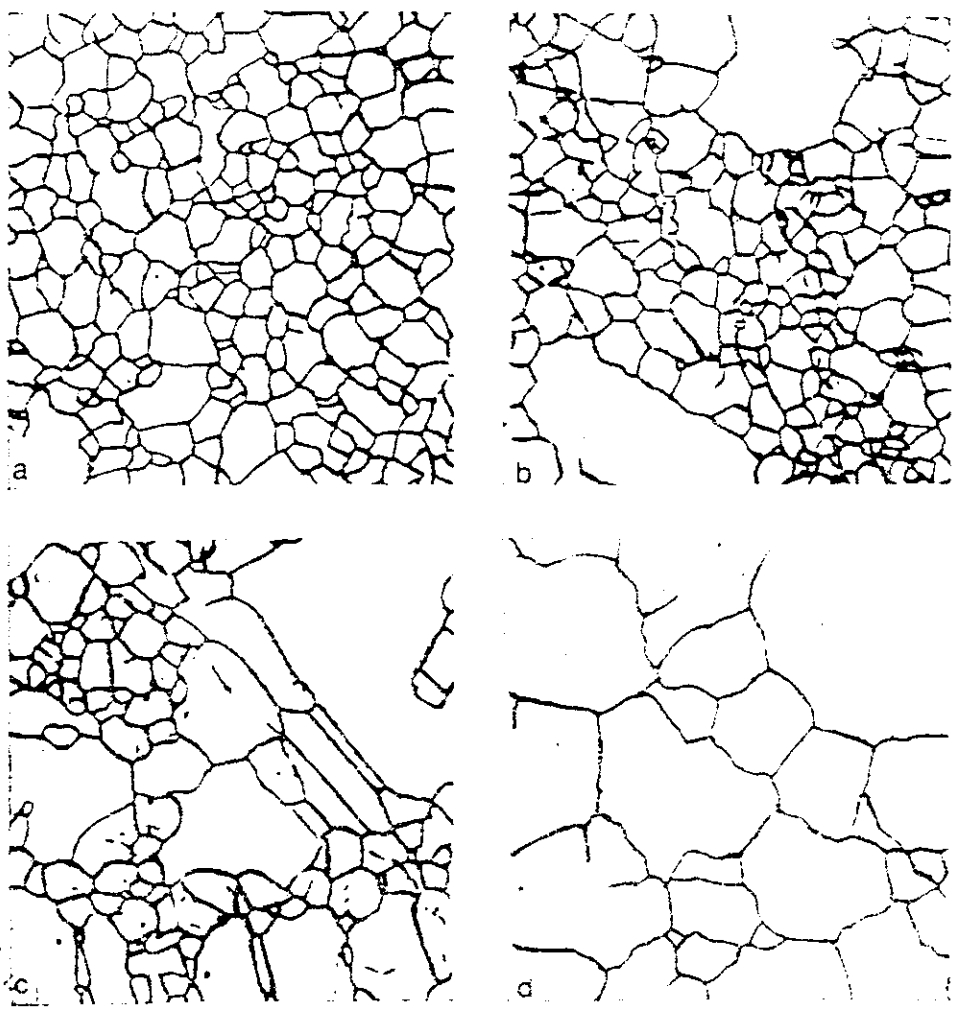
ขบวนการผลึกใหม่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

ก. การเกิดผลึกใหม่ครั้งแรก (Primary Recrystallization) ได้แก่ช่วงที่เกรนยาว (เนื่องจากการเปลี่ยนรูป) เปลี่ยนเป็นเกรนมุมมนละเอียดแต่ยังคงเรียงตัวไม่สม่ำเสมอ

ข. การเกิดผลึกใหม่ครั้งที่สอง (Secondary Recrystallization) หรือการเติบโตของเกรน (Grain growth) ได้แก่ช่วงที่เกรนที่เกิดขึ้นใหม่เติบโตขึ้นและเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นตอน

โครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.9 แสดงขบวนการเติบโตของเกรนโดยทั่วไป รูป a เป็นโครงสร้างของโลหะผสม (สารละลายของแข็งของโครเมียมในนิเกิล) หลังจากเกิดผลึกใหม่ครั้งแรกซึ่งจะเห็นเกรนละเอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นบางเกรนจะเติบโตขึ้นโดยรวมตัวกับเกรนอื่นข้างเคียง โครงสร้างจึงประกอบด้วยเกรนขนาดใหญ่ และล้อมรอบด้วยเกรนขนาดเล็ก (รูป b) เมื่ออุณหภูมิขึ้นอีกเกรนขนาดใหญ่จะเพิ่มจำนวนมากขึ้น (รูป c) และในที่สุดเกรนขนาดเล็กทั้งหมดจะถูกเกรนขนาดใหญ่กลืนโครงสร้าง จึงมีเฉพาะเกรนขนาดใหญ่ (รูป d)

การเกิดผลึกใหม่ครั้งแรกประกอบด้วยการเกิดเกรนใหม่ ซึ่งมีขนาดเล็กมากและแทรกอยู่ระหว่างเกรนที่บิดเบี้ยวหรือเรียวยาว



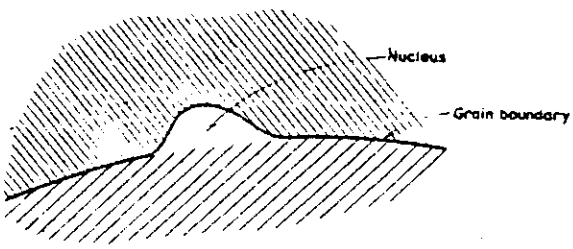
รูปที่ 4.9 การเติบโตของเกรนขณะเกิดผลึกใหม่, X100

4.2.4 การเกิดนิวเคลียสของผลึกใหม่

การเกิดผลึกใหม่จะมีเกรนใหม่ชุดหนึ่งเกิดขึ้นมา นิวเคลียสของผลึกใหม่จะก่อตัวขึ้นในบริเวณที่ปราศจากความเครียด (Strain-free region) ซึ่งเกิดขึ้นตามบริเวณที่ Slip line ตัดกัน,

บริเวณที่เกิด twinning และใกล้กับขอบเกรน จะเห็นว่าบริเวณต่าง ๆ ที่กล่าวมาต่างก็เป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรุนแรง แต่ก็สามารถเกิดบริเวณปลอดความเครียดจนก่อตัวเป็นนิวเครียสของผลึกใหม่ขึ้นมาได้ การเกิดนิวเครียสในลักษณะนี้เรียกว่า Preformed nuclei บริเวณผลึกดังกล่าวสามารถก่อตัวเป็นนิวเครียสและเติบโตขึ้นได้เพียงแต่มีขนาดโตกว่าค่าวิกฤติ เช่น ในโลหะที่เปลี่ยนรูปและเกิดดิสโลเกชั่น 10^{12} / ซม.^{2} นิวเครียสควรจะมีขนาดโตกว่า 150° A จึงจะสามารถเติบโตต่อไปได้

เงื่อนไขอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้นิวเครียสก่อตัวขึ้นได้คือ เนื้อเกรนบางส่วนจะถูกล้อมรอบด้วยขอบเกรนมุมกว้าง (high-angle boundary) เพราะขอบเกรนมุมแคบจะเคลื่อนที่ได้ช้า จากเงื่อนไขสองประการที่กล่าวมาอาจเป็นเหตุให้เกิดนิวเครียสขึ้นมา ส่วนที่เกิดในลักษณะใดนั้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการเปลี่ยนรูปของงานที่นำมาอบ เมื่อคำนึงถึงข้อนี้ ผลึกเดี่ยวจะไม่มีบริเวณตามขอบเกรนบริเวณที่ขอบเกรนคัดกัน (ซึ่งเป็นแหล่งเกิดนิวเครียสในโลหะหลายผลึก) ทั้งบริเวณที่ขอบเกรนทั้ง 3 กัน และตามบริเวณขอบเกรนจะเป็นบริเวณที่มีขอบเกรนมุมกว้างล้อมรอบอยู่ จึงสามารถก่อตัวเป็นนิวเครียสขึ้นมาได้ สำหรับในกรณีของโลหะหลายผลึกอาจยึดถือหลักของ Bailey และ Hirsch ซึ่งกล่าวว่าความหนาแน่นของ dislocation ของแต่ละเกรนในโลหะที่ผ่านการแปรรูปขณะเย็นมาแล้วนั้นแตกต่างกัน เมื่อนำไปอบอ่อนบริเวณเกรนที่สมบูรณ์จะเคลื่อนเข้าไปในบริเวณเกรนที่ไม่สมบูรณ์โดยอาศัยแรงผลักดันจาก Strain energy ที่แตกต่างกันของแต่ละเกรนส่งข้ามขอบเกรนไป โดยขอบเกรนจะเคลื่อนไปข้างหน้าลักษณะที่ถูกดันให้โป่งออกไป



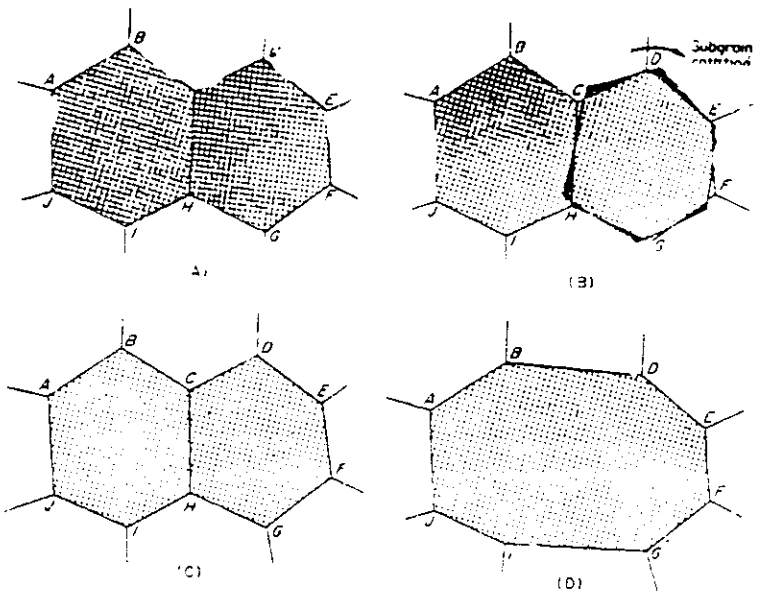
ขอบเกรนที่เคลื่อนที่ไปนี้จะกวาดเอา dislocation ไปด้วย ทำให้เกิดบริเวณปลอดความเครียดขนาดเล็ก ๆ จนมีขนาดวิกฤติของนิวเครียส บริเวณดังกล่าวก็จะเกิดเป็นนิวเครียสและเติบโตไปเป็นผลึก

รูปที่ 4.10 กลไกการเกิดนิวเครียสที่ขอบเกรน

ในกรณีของผลึกเดี่ยว เมื่อนำไปอบคืนตัวจะเกิด Subgrain (เป็นผลของ Polygonization) ถ้า Subgrain รวมตัวกันก็จะเกิดบริเวณปลอดความเครียด

การขจัดของของ Subgrain ให้ได้ผล Subgrain ทั้ง 2 ตัวต้องหมุนไปในขณะเดียวกัน ในรูปที่ 4.11 สมมุติมีเพียง Subgrain เดียวที่หมุนไป รูป A ทั้ง 2 Subgrain เกือบจะรวมตัวกันอยู่แล้วแต่ภายใน Subgrains) จนการเรียงตัวใน Subgrain ทั้งสองเหมือนกัน (รูป B , C) พลังงานผิวจะดึงเอาส่วน BCD และ GHI ให้เป็นแนวเส้นตรง (รูป D) การรวมตัวของ Subgrain นี้เป็นเสมือนการเคลื่อนที่ของ dislocation จากขอบเกรนเดิม (CH) ซึ่งเคยแบ่งแยก Subgrain ทั้งสอง ต่อมาขอบ Subgrain CH จะเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับผิวของ Subgrain ที่ยังคงมีอยู่ ดังนั้นจะทำให้ผิวด้านใดด้านหนึ่งมีพลังงานสูง ขบวนการดังกล่าวมาอาจจะเกิดการปีน (Climb) และการเลื่อน (Slip)

ขึ้นในขณะเดียวกันได้โดยการปีนนั้นเป็นผลของที่ว่างเคลื่อนที่ไป ต้องการอุณหภูมิปานกลางต่อมาจะทำให้เกิดเป็นบริเวณเล็ก ๆ ภายในเกรนล้อมรอบด้วยขอบเกรนมุมกว้าง และมีขนาดโตพอที่จะเติบโตต่อไปใน Polygonized



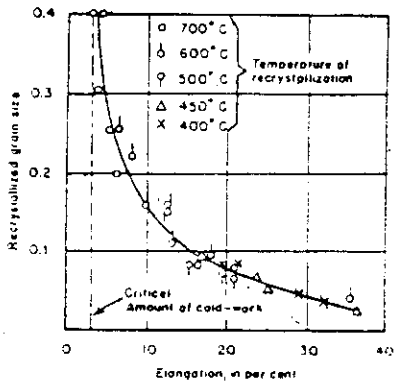
รูปที่ 4.11 การรวมตัวของ Subgrain โดยการหมุนของ Subgrain เพียงตัวเดียว

4.2.5 แรงผลักดันเพื่อให้เกิดผลึกใหม่

แรงผลักดันเพื่อให้เกิดผลึกใหม่ได้มาจากพลังงานที่ถูกกักเก็บเอาไว้ในงานที่ผ่านการแปรรูปจะเย็น ในกรณีนี้จะต้องเกิด Polygonization อย่างสมบูรณ์ก่อนเกิดผลึกใหม่ พลังงานจะถูกกักเอากับดิสโลเกชั่นภายในผนังหลายเหลี่ยมของผลึก การขจัด Subboundaries เป็นการเริ่มต้นของขบวนการเกิดผลึกใหม่

4.2.6 ขนาดของผลึกเกิดใหม่

องค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการศึกษาการเกิดผลึกใหม่ก็คือ ขนาดของผลึกใหม่ จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าขนาดเกรนของผลึกใหม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นกับงานก่อนนำไปอบอ่อนเมื่อเปลี่ยนรูปน้อยขนาดของเกรนจะเติบโตอย่าง



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของจำนวน cold work ที่มีต่อขนาดเกรนของทองเหลืองแอลฟ่า

รวดเร็ว แต่หากมีการเปลี่ยนรูปน้อยมากจะไม่เกิดผลึกใหม่แม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตาม จึงมีหลักการกำหนดจำนวน cold work วิกฤติขึ้น ซึ่งบ่งถึงจำนวน

Cold work ที่น้อยที่สุดที่ยินยอมให้เกิดผลึกใหม่ขึ้นได้ (ภายในเวลาที่เหมาะสม) รูปข้างบนเป็นผลจากเมื่อนำทองเหลืองไปดึงซึ่งยืดตัว 3 % (elongation) ก่อนขาด การเปลี่ยนรูปวิกฤติไม่ใช่คุณสมบัติของโลหะ (เช่นเดียวกับอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่) เพราะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงรูป (ดึง, บิด, รีด ฯลฯ) ในผลึกเดี่ยวของโลหะที่มีโครงผลึกแบบหกเหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนรูปไปอย่างง่ายดาย รูปวิกฤติอาจจะมาถึงหลายร้อยเปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเมื่อนำวัสดุชนิดเดียวกันนี้ไปบิดจนเกิดความเครียดขึ้น 3 - 4 % อาจเพียงพอที่จะทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้นได้

หลักการของการเปลี่ยนรูปวิกฤติสำคัญมาก เพราะอาจทำให้ผลึกเกิดใหม่หยาบเกินไปก็ได้ ไม่เหมาะที่จะนำไปเปลี่ยนรูปในขั้นต่อไป เช่น ในกรณีโลหะแผ่นที่ต้องนำไปขึ้นรูปขณะเย็นให้มีรูปร่างซับซ้อน ถ้าหากมีเกรนละเอียด (เส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 0.05 มม.) จะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรขึ้นโดยผิวหน้าหยาบ ถ้าเกรนหยาบเกินไปงานที่ได้ออกมาจะมีผิวหยาบด้วย ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า Orange-peel effect) เพราะมีลักษณะเหมือนกับผิวของเปลือกส้ม ผลึกยิ่งหยาบการเปลี่ยนรูปก็ยิ่งไม่สม่ำเสมอ

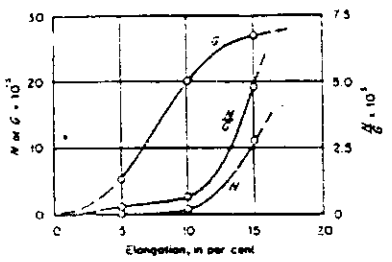
ในการหาข้อมูลการเกิดผลึกใหม่ มักจะใช้อัตราส่วนการเกิดนิวเคลียสและเติบโต (N/G) สมมุติว่าทั้ง N และ G คงที่และอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่คงที่ จะสามารถหาขนาดเกรนผลึกใหม่จากอัตราส่วนนี้ได้ โดยถ้าอัตราส่วนสูงจะเกิดนิวเคลียสขึ้นมากก่อนเกิดผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์จึงให้เกรนละเอียด ถ้าอัตราส่วนต่ำจะได้เกรนหยาบ ในรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดนิวเคลียส (N) อัตราการเติบโต (G) อัตราส่วน N/G และ elongation ที่เกิดขึ้นในงานอลูมิเนียม จะเห็นว่าเมื่องานเกิดการเปลี่ยนรูปไปน้อยก่อนนำมาอบอ่อน อัตราการเกิดนิวเคลียสจะต่ำกว่าอัตราการเติบโต อัตรา N/G จะลดลงเมื่อความเครียดลดลง

ดังนั้น จะสรุปได้ว่าจำนวน cold work วิกฤติก็คือจำนวน cold work ที่สามารถทำให้เกิดนิวเครียสโตพอที่จะเติบโตต่อไปได้ ดังที่กล่าวในเบื้องต้นแล้วว่านิวเครียสจะเกิดขึ้นที่จุดที่มีพลังงานความเครียดสูง ถ้าเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรุนแรงจุดเหล่านี้จะมีมากขึ้น ส่วนบริเวณที่มีความเครียดต่ำจะไม่มีจุดเหล่านี้

องค์ประกอบอีกอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับขนาดของผลึกใหม่ (ตอนท้ายของการเกิดผลึกใหม่และก่อนที่จะเติบโต) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 ขนาดของผลึกใหม่ (ของทองแดง) จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่เพราะแม้ว่าจะใช้อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ต่างกัน แต่ยังคงได้กราฟเส้นเดียวกัน โลหะอื่นจะมีลักษณะนี้เหมือนกัน

อัตราการเกิดผลึกใหม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่อไปนี้

1. อุณหภูมิการอบอ่อน
2. จำนวนการเปลี่ยนรูป



รูปที่ 4.13 การผันแปรของอัตราการเกิดนิเครียส อัตราการเติบโต (G) และอัตราส่วน N/G กับการเปลี่ยนรูปก่อนอบอ่อน (ชิ้นงานเป็นเตรียมอบอ่อนที่ 350° ซ)

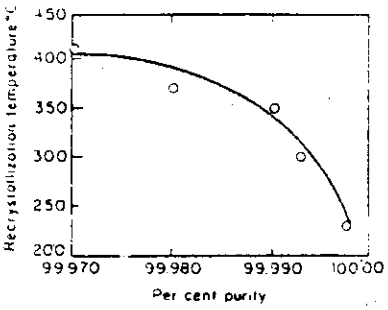
แต่ในโลหะหลายชนิดขนาดเกรนผลึกใหม่จะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการอบอ่อน แต่ขึ้นอยู่กับจำนวนความเครียดในชิ้นงาน ขบวนการเกิดผลึกใหม่ ยังขึ้นอยู่กับองค์การอื่นอีกหลายอย่าง เช่น

1. ความบริสุทธิ์ (Purity) หรือส่วนผสมของโลหะ
2. ขนาดเกรนก่อนแปรรูป

4.2.7 ความบริสุทธิ์ของโลหะ

โลหะบริสุทธิ์มากยิ่งเกิดผลึกใหม่ได้เร็วมาก และถ้าหากโลหะมีธาตุอื่นผสมอยู่ อุณหภูมิเกิดใหม่จะเปลี่ยนไป

เช่น ในสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ถ้าหากมีอะตอมของธาตุอื่นปะปนอยู่เพียง 0.01 % อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่อาจเพิ่มขึ้นอีกหลายร้อยองศา



รูปที่4.14 ผลของสารมลพิษที่มีต่ออุณหภูมิเกิดใหม่ เมื่อนำงานอลูมิเนียมไปรีดเย็นให้เล็กลงและอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่สูง ถ้ายิ่งบริสุทธิ์มาก อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ลดต่ำลง ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมธาตุต่าง ๆ ลงไปในทองแดงบริสุทธิ์เป็นจำนวน 0.01 % โดยอะตอมเท่า ๆ กัน แม้จะเติมธาตุที่เป็นตัวถูกละลายลงไปเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเกิดผลึกใหม่อย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้เนื่องจากว่าอะตอมของธาตุที่เติมเข้าไปมีปฏิกิริยาต่อขอบเกรน เช่นเดียวกับปฏิกิริยาที่เกิดระหว่าง dislocation และอะตอมของธาตุถูกละลาย เมื่ออะตอมของธาตุดังกล่าวเคลื่อนที่ไปยังขอบ elastic field ของอะตอมและเกรนจะต่ำลง การเกิดผลึกใหม่นั้นขอบเกรนจะเคลื่อนที่ก็ต่อนิวเคลียสก่อตัวและเติบโต ถ้ามีอะตอมของธาตุอื่นปะปนอยู่ตามขอบเกรนจะทำให้ขอบเกรนเคลื่อนที่ยากขึ้นอัตราการเกิดผลึกใหม่จึงต่ำลง

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ของทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมธาตุต่าง ๆ ลงไป 0.01 % (โดยอะตอม)

ธาตุที่เติม	อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ที่เพิ่ม (° C)
Ni	0
Co	15
Fe	15
Ag	80
Sn	180
Te	240

4.2.8 ขนาดเกรนเริ่มแรก

เมื่อนำโลหะหลายผลึกไปแปรรูปขณะขอบเกรนจะคอยขัดขวางขบวนการเลื่อนที่เกิดภายในผลึกบริเวณที่อยู่ใกล้ขอบของเกรน ยิ่งเกรนแรกละเอียดมากบริเวณขอบเกรนก็ยิ่งมาก ปริมาณของโลหะที่อยู่ใกล้กับขอบเกรนและเกิดบิดตัวมากขึ้นจึงทำให้บริเวณที่จะก่อตัวเป็นนิวเคลียสมากขึ้นด้วย ดังนั้นจะกล่าวได้ว่ายิ่งโลหะมีเกรนเริ่มแรกละเอียดเท่าไรเมื่อนำมาอบอ่อนก็ยิ่งมีอัตราเครียดสูง ขนาดของเกรนผลึกใหม่ก็ยิ่งละเอียด

ที่ช่วงสุดท้ายของการเกิดผลึกใหม่ครั้งแรกโครงสร้างจะประกอบด้วยเกรนใหม่ขนาดเล็กมาก (ขนาดประมาณ 2-3 um) หลังจากนั้นเกรนใหม่ที่เกิดขึ้นมาจะเติบโตขึ้นซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นการเกิดผลึกครั้งที่สอง

4.3 การเติบโตของผลึกใหม่

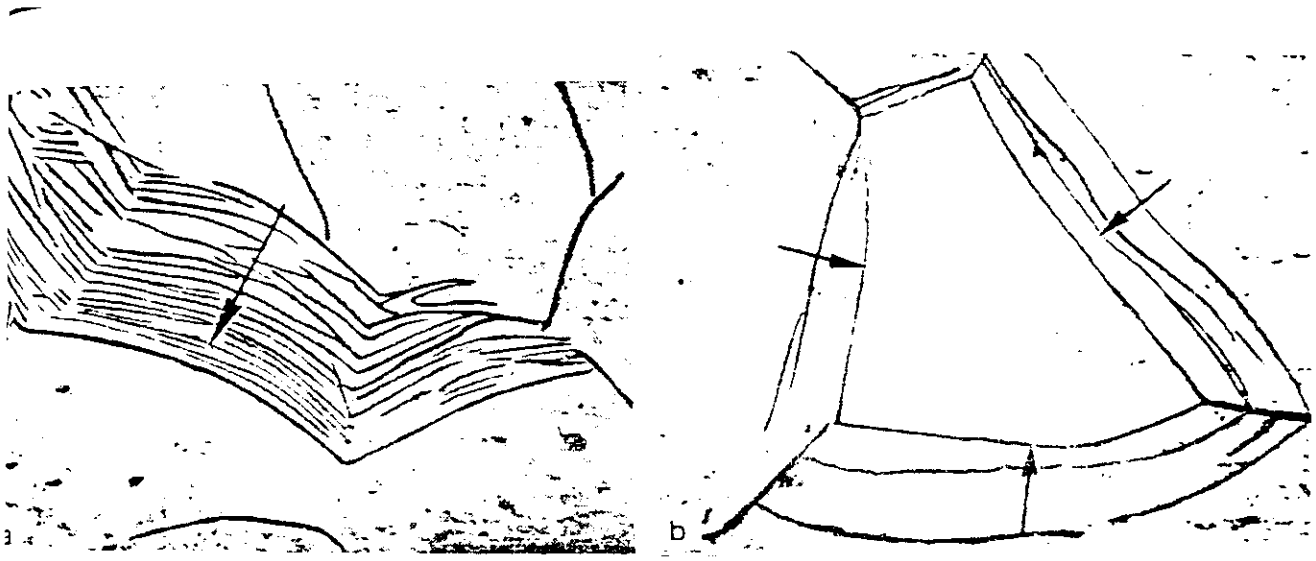
การเติบโตของผลึกเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากระบบมีพลังงานภายในถ้าสมมุติว่าระบบมีพลังงานผิวต่อหน่วยพื้นที่จำนวนหนึ่ง จึงจะสามารถกลืนเกรนขนาดเล็กและเติบโตเป็นเกรนขนาดใหญ่ขึ้น (มีจำนนเกรนน้อยลง) ขบวนการเติบของเกรนดังกล่าวจะทำให้พื้นที่ผิวของเกรนลดลง จึงทำให้พลังงานอิสระของระบบลดลงด้วย

ขนาดเกรนของโลหะจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของโลหะหลายประการ จึงควรศึกษากลไกของการเติบโตของเกรนด้วย ซึ่งถ้ารู้จักกลไกการเติบโตของเกรนแล้วอาจจะสามารถควบคุมขนาดเกรนโดยอบชุบที่เหมาะสมได้

การเติบโตของเกรนอาจเกิดขึ้นได้ 3 กรณี คือ

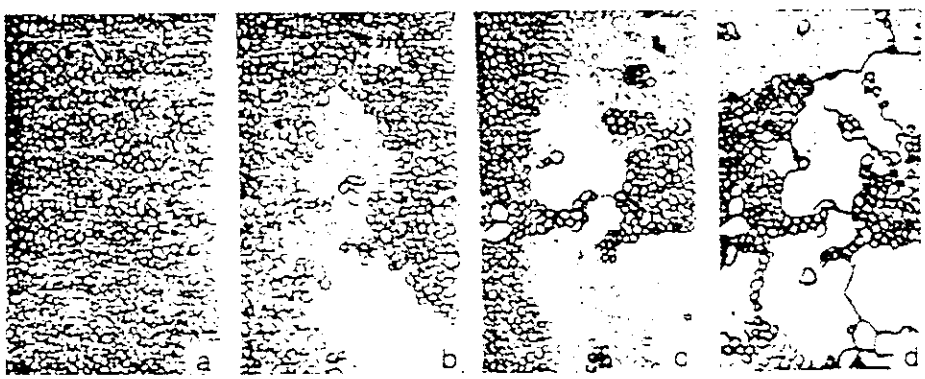
1. เนื่องจากเกิดนิวเคลียส : การเกิดผลึกใหม่ครั้งแรกเกิดขึ้นเนื่องจากนิวเคลียสซึ่งเป็นศูนย์กลางของผลึกใหม่ และผลึกเหล่านี้จะเติบโตเป็นเกรนใหม่ กรณีนี้เกิดขึ้นไม่บ่อยนัก

2. เนื่องจากการเคลื่อนที่ของขอบเกรน : ขนาดเกรนโตขึ้นเนื่องจากขอบเกรนที่ออกไป (รูปที่ 4.15) เนื่องจากเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า จะมีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ดีกว่าขนาดเล็ก (เกรนขยาดเล็กมีอัตราส่วน S/V ต่ำกว่า เมื่อ S = พื้นที่ผิวและ V = ปริมาตร) ขอบขนาดใหญ่จึงขยายตัวรุกล้ำและกลืนเกรนที่มีขนาดเล็กกว่า กรณีนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิด Selt-
มักจะเกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิเกิดผลึกใหม่



รูปที่ 4.15 การเคลื่อนที่ของขอบเกรน โดยลูกศรแสดงทิศทางของการเคลื่อนที่. a) ในบอรนซ์. * 225 , b) ในแทนทาลัม, * 100

3. เนื่องจากการรวมตัวของเกรน เช่น ขอบเกรนที่อยู่ใกล้เคียงกันจะค่อยรวมเข้าด้วยกัน เกรนละเอียดหลาย ๆ เกรนจึงรวมตัวกันกลายเป็นเกรนใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.16) ทั้งนี้เนื่องจากขอบเกรนเป็นแหล่งที่มีตำหนิ ดิสโลเกชั่นและสารมลทินต่างสะสมกันอยู่



รูปที่ 4.16 การรวมตัวของเกรน, a) ขั้นตอนแรก, b) และ c) ขอบเกรนค่อย ๆ รวมตัวกัน , d) ขั้นตอนสุดท้าย

ถ้าโลหะเกิดขบวนการรวมตัวกันของเกรนไม่สมบูรณ์จะมีโครงสร้างประกอบด้วยเกรนจำนวนเล็กน้อยพร้อมด้วยเกรนละเอียดจำนวนมาก โลหะที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอเช่นนี้จะมีคุณสมบัติและไม่เสถียร

อาจกล่าวสรุปได้ว่า การรวมตัวกันของเกรนจะมีผลเสียต่อทั้งโครงสร้างและคุณสมบัติโลหะ เพราะว่าถ้าเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้เกรนหยาบและถ้าเกิดไม่สมบูรณ์จะได้ทั้งเกรนหยาบปนกัน ทำให้โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ จึงต้องควบคุมขบวนการอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันผลเสีย

ดังกล่าวมาแล้วว่ากลไกการเติบโตของเกรนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำเกรนจะเติบโตรวมตัวกัน ที่อุณหภูมิสูงเกรนจะเติบโตเนื่องจากขอบเกรนเคลื่อนที่ นอกจากนี้แล้วองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ สภาวะของโครงสร้างโลหะก่อนอบ (ว่าผ่านการแปรรูปรุนแรงแค่ไหน)

ถ้าโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเพียงเล็กน้อย ความหนาแน่นของตำหนิจะต่ำการเกิดเกรนใหม่ที่ปราศจากตำหนิจะไม่ให้พลังงานอิสระที่เป็นประโยชน์เลย ด้วยเหตุนี้การเกิดผลึกขั้นแรกในโลหะที่เปลี่ยนรูปไปเพียงเล็กน้อยจะดำเนินต่อเนื่องไปได้ยาก (และจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและหลังจากการเกิดผลึกใหม่ขั้นที่สองเกรนแทบไม่โตขึ้นเลย)

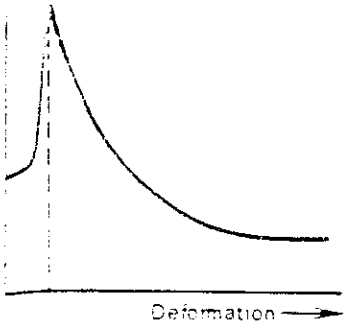
ที่ระดับการเปลี่ยนรูปของโลหะระดับหนึ่งซึ่งค่อนข้างต่ำ และเกิดดิสโลเกชั่นเพียงเล็กน้อย (ส่วนมากเกิดตามขอบเกรน) แต่เกรนจะรวมตัวกันเติบโตขึ้นมากลายเป็นเกรนหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

ระดับการเปลี่ยนรูปของโลหะที่ทำให้เกรนรวมตัวกันง่ายขณะได้รับความร้อนจนกลายเป็นเกรนขนาดใหญ่นั้นเรียกว่า ระดับการเปลี่ยนรูปวิกฤติ (critical degree of deformation) หรือเรียกง่าย ๆ ว่าการเปลี่ยนรูปวิกฤติ (critical deformation)

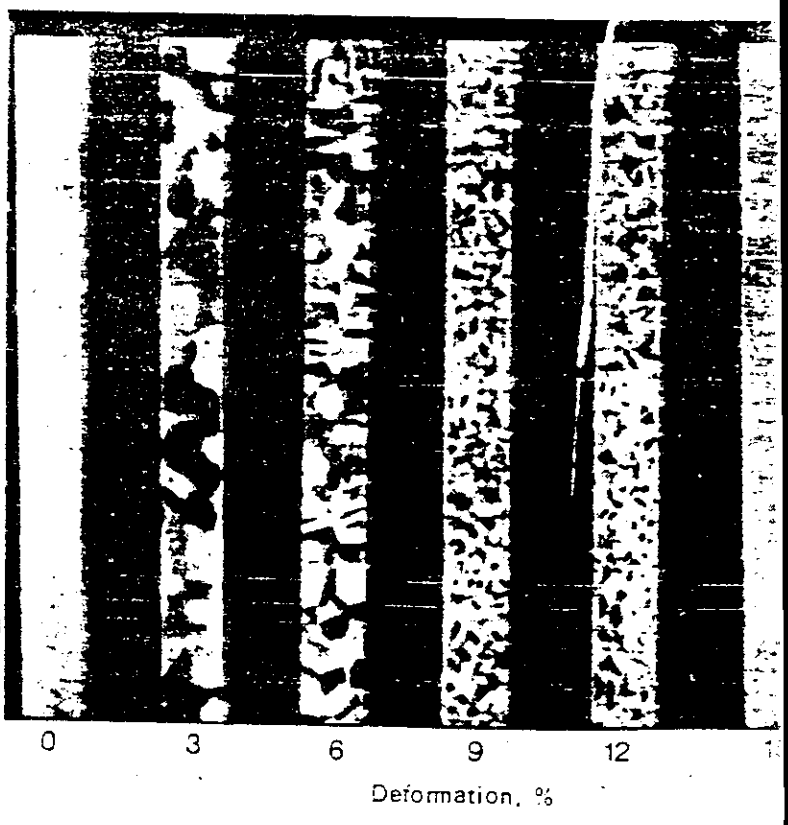
ค่าการเปลี่ยนรูปวิกฤติดังกล่าวไม่สูง ปกติประมาณ 3-8% ถ้าหากต้องการอบอ่อนแบบ Recrystallization annealing หลังจากแปรรูปควรหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนรูปวิกฤติด้วย

ถ้าโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรุนแรง จะเกิดตำหนิอย่างหนาแน่นมากจนเกรนไม่สามารถรวมตัวกัน การเติบโตของเกรนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากขอบเกรนเคลื่อนที่ ซึ่งจะได้เกรนที่ละเอียดกว่าเมื่อเกิดเนื่องจากการรวมตัวกันของเกรน

รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างของอลูมิเนียมที่ผ่านการแปรรูปจนเกิด Work-hardening โดยการดึง แล้วนำไปอบให้เกิดผลึกใหม่ที่ 550°C เป็นเวลา 30 นาที รูปซ้ายมือเป็นโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูปซึ่งละเอียดมากจนมองด้วยสายตาไม่เห็นเกรน รูปที่สองจากซ้ายมือเป็นเกรนที่หยาบที่สุด โดยเปลี่ยนรูป 3% ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการเปลี่ยนรูปวิกฤติ เมื่อระดับการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นขนาดเกรนของผลึกใหม่จะลดลง ดังนั้นขนาดเกรนเฉลี่ยของผลึกใหม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดผลึกใหม่ (รูปที่ 4.8) และระดับการเปลี่ยนรูปก่อนอบ (รูปที่ 4.17) แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนของผลึกใหม่ และอุณหภูมิและระดับการเปลี่ยนรูปเรียกว่า Full recrystallization diagram (แผนภาพการเกิดผลึกใหม่)

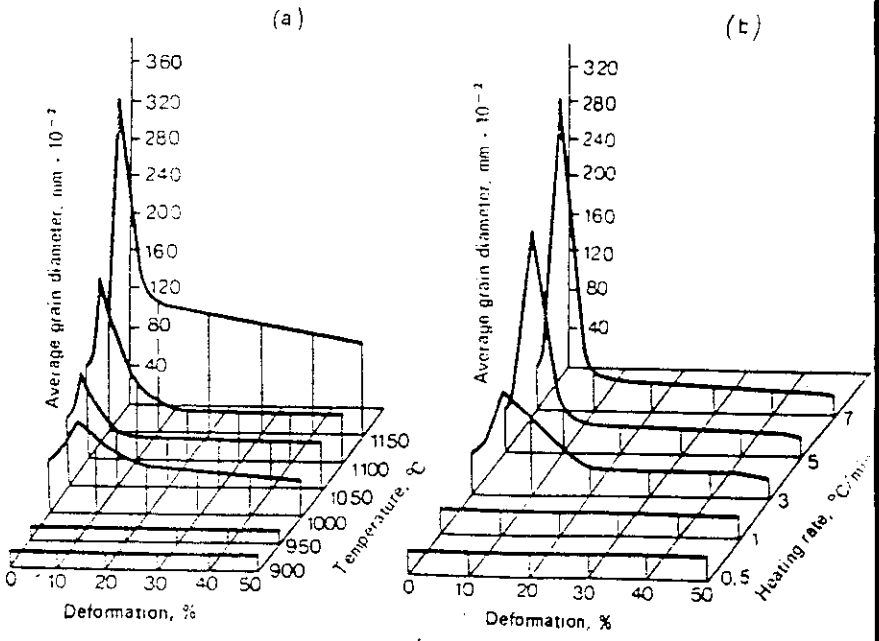


รูปที่ 4.17 อิทธิพลของการเปลี่ยนรูปที่มีต่อขนาดเกรนในกระบวนการเกิดผลึกใหม่



รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหาภาคของ⟹ อลูมิเนียมที่เกิดผลึกใหม่หลังจากผ่านการแปรรูปจนเกิดการเปลี่ยนรูปที่ระดับต่างๆกัน

รูปที่ 4.19 Full recrystallization diagram⟹
ของนิเกิลผสมทนความร้อน,a)อัตราให้ความ
ร้อน 7°C/นาที,b)อุณหภูมิ108°C



ในรูปที่ 4.19, a แสดงแผนภาพการเกิดผลึกใหม่ของนิเกิลผสม ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดเกรนจะลดลงเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น และอุณหภูมิอบอ่อนลดลง เกรนจะเติบโตเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ (สูงกว่า 950° C) ถ้างานเปลี่ยนรูปไม่มากนัก (ประมาณ 5%) จะทำให้เกรนเติบโตดี โดยเฉพาะเมื่อใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเห็นได้เฉพาะเมื่อให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ถ้าให้ความร้อนช้า (รูปที่ 4.19, b) ขบวนการ Polygonization มีเวลาพอที่จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการเติบโตโดยการรวมตัวกันของเกรนขนาดเล็กหลายเกรนจึงไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนผลึกใหม่ธรรมดาโดยทั่วไป เช่น เกิดนิวเคลียสใหม่ และนิวเคลียสจะเติบโตขึ้น การให้ความร้อนอย่างช้า ๆ อาจแทนด้วยการให้ความร้อนเป็นขั้นตอนและแช่ไว้ที่ได้อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ประมาณ 30-50° C

4.4 กลไกการเติบโตของผลึกใหม่

ในโลหะที่เกิดผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์แล้ว แรงขับดันเพื่อให้เกิดผลึกเติบโตจะอยู่ในรูปของพลังงานผิวของขอบเกรน เมื่อเกรนโตขึ้นจำนวนเกรนจะลดน้อยลง ขอบเกรนจะหายไป และพลังงานผิวตามสัดส่วน

เซลของฟองสบู่เติบโตขึ้นได้โดยพลังงานผิวของฟิล์มสบู่ลดลง การเติบโตของผลึกโลหะมีองค์ประกอบต่าง ๆ เกี่ยวข้องจำนวนมากไม่เหมือนในกรณีของฟองสบู่ แต่เพื่อให้เข้าใจกลไกการเติบโตของผลึกได้ง่ายขึ้นจึงขออธิบายการเติบโตของฟองสบู่ก่อนที่จะศึกษาการเติบโตของผลึกใหม่ของโลหะต่อไปนี้

แก๊สที่อยู่ภายในฟองสบู่จะมีความดันมากกว่าบรรยากาศภายนอก เพราะว่าฟิล์มของฟองสบู่ ความตึงผิว จะสามารถหาค่าความแตกต่างของความดันภายนอกและภายในฟองสบู่ได้จากสูตร

ต่อไปนี้

$\Delta P = \frac{4r}{R} = \frac{8r}{D}$ เมื่อ r = ความตึงผิวที่ฟิล์มด้านหนึ่งของฟองสบู่

R = รัศมีของฟองสบู่

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองสบู่

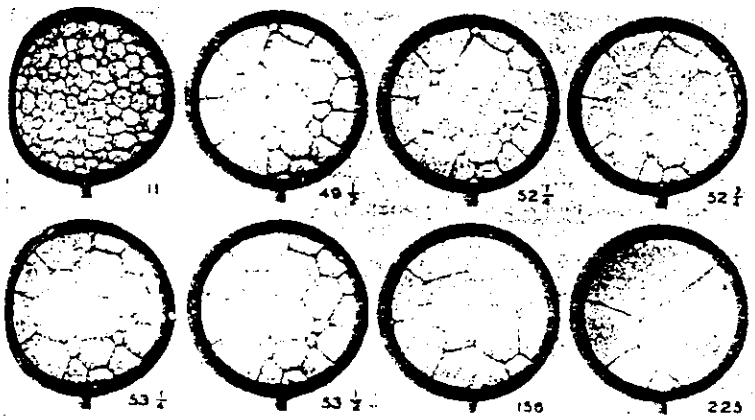
เนื่องจากความดันภายในและภายนอกผิวฟองสบู่แตกต่างกัน แก๊สจึงซึมจากด้านที่มีความดันสูงไปยังด้านที่มีความดันต่ำ หรืออะตอมจะแพร่จากภายในออกไปสู่ภายนอก ทำให้ขนาดฟองสบู่ลดลง ฟองสบู่จะเคลื่อนเข้าสู่ศูนย์กลางของฟองสบู่จนหายไปในที่สุด

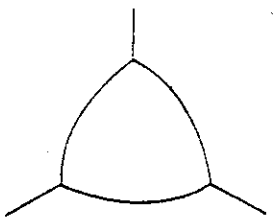
รูปที่ 4.20 แสดงการเติบโตของฟองสบู่ใน 2 มิติ ที่มุมล่างขวามือ แต่ละรูปเป็นเวลา (นาที) ที่ใช้กวนเพื่อให้เกิดฟองสบู่ และยังแทนเวลาระหว่างที่ฟองสบู่เติบโตขึ้น ในแต่ละรูปนั้นจะเห็นเกรนที่มี 3 ด้าน (3 - sied cells) อยู่จำนวนมาก

เมื่อด้านทั้งสามของเซลมีความตึงผิวเท่ากันพบกัน จะเกิดเป็นมุมประมาณ 120 องศา ส่วนโค้งส่วนเว้าของเซลจะพุ่งเข้าหาศูนย์กลางเซล ผนังเซลจึงมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางของเซลปิมาตรของเซลจะลดลงและหายไปในที่สุด

จากรูปที่ 4.20 ผนังเซลที่มีด้านน้อยกว่า 6 ด้านจะเว้าเข้าหาศูนย์กลางของเซล ส่วนเซลมากกว่า 6 ด้าน ผนังจะนูนเข้าหาศูนย์กลางเซล เซลที่มีน้อยกว่า 6 ด้าน จึงไม่เสถียรและค่อย ๆ หดจนหายไป ส่วนเซลที่มีมากกว่า 6 ด้านเสถียรกว่าจึงมีโอกาสเติบโตต่อไป

ในรูปที่ 3 จากซ้ายมือแถวบนปรากฏเมื่อเวลา 9 นาฬิกา และรูปแรกจากซ้ายมือแถวล่างปรากฏเมื่อเวลา 10 นาฬิกา เมื่อนำเซล 3 ด้านมาขยายให้ใหญ่ขึ้นจะได้ดังในรูปที่ 4.21

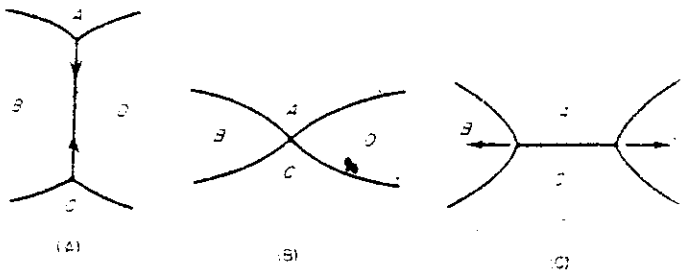




⇑ รูปที่ 4.21 แสดงเซล 3 ด้าน ขอบเกรนจะโค้งโดยด้านเว้าจะพุ่งไปยังศูนย์กลางเซล

รูปที่ 4.20การเติบโตของฟองสบู่ในภาชนะแบน

รูปที่ 4.22กลไกการเปลี่ยนแปลงจำนวนด้าน⟹ของเกรนระหว่างการเติบโต

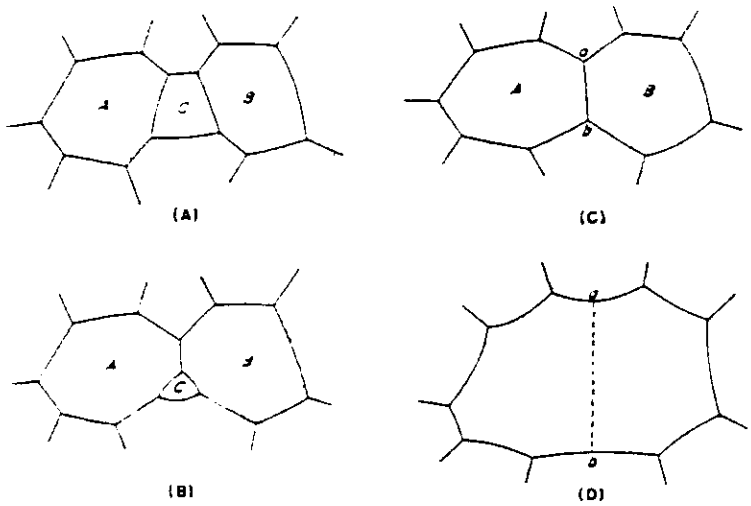


เซลยิ่งเล็กยิ่งมีน้อยด้าน ดังนั้นเซล 3 ด้านจึงสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีขนาดเล็กและมีด้านอยู่น้อย ความแตกต่างของความดันภายนอก-ในสูง อัตราการแพร่และอัตราที่ผนังเคลื่อนที่สูง ส่วนเซลที่มี 4 ด้านจะไม่สลายตัวไปทันทีแต่จะกลายเป็นเซล 3 ด้านก่อนจึงสลายตัวไป

ตลอดเวลาการเติบโตเซลอาจจะมีจำนวนด้านเพิ่มขึ้นหรือลดลง (ดูรูปที่ 4.22) เนื่องจากส่วนโค้งของขอบเซลที่แบ่งเซล B และ D ออกจากเซล A และ C และขอบเกรนเคลื่อนที่ไป ดังนั้น ขอบเกรนระหว่างเซล B และ C จึงถูกขจัดไปและเกิดขอบเกรนระหว่าง A และ C ขึ้นมาใหม่ เซล B และ D ต่างก็สูญเสียด้านไป ส่วยเซล A และ C มีด้านเพิ่มขึ้น

4.4.1 การรวมตัวกันของเกรนตามลักษณะทางเรขาคณิต

เป็นการรวมตัวกันของ 2 เกรนที่มีการจัดเรียงตัวสัมพันธ์กันแต่ขอบเกรนระหว่างเกรนทั้งมีพลังงานผิวต่ำก็คือ Subgrain boundary ลักษณะการสร้างขอบเกรนแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 การรวมตัวกันของเกรน เกรน A และ จะสัมผัสกันได้เมื่อเกรน C ไป ถ้าเกรนA และBมีการจัดเรียงตัวเหมือนกัน ขอบก็จะเป็นเสมือน Subgrain boundaryเกรน A และ อาจถือว่าเป็นเกรนเดียวกัน

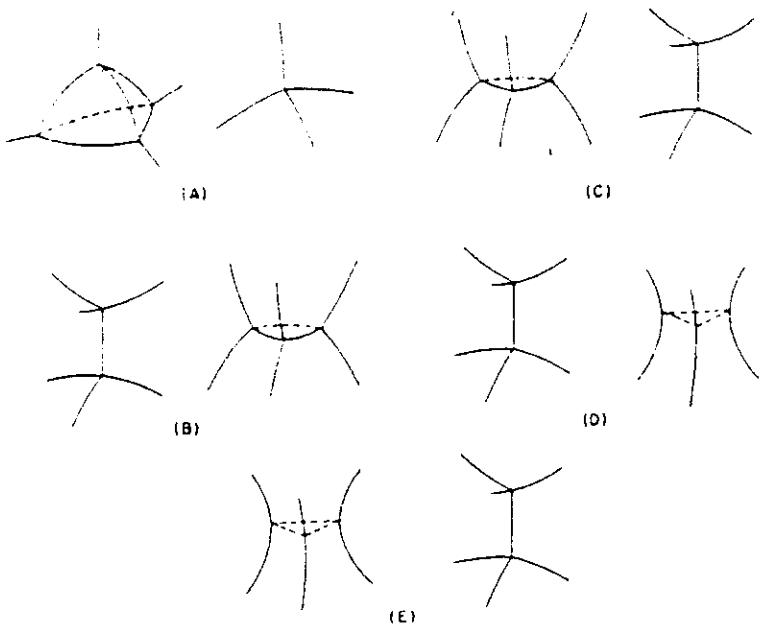
รูปที่ 4.23.A แสดงเกรน A,B ที่ยังแยกกันอยู่ ถ้าขอบเกรนที่เกิดขึ้นเมื่อเกรนทั้ง 2 พบกันเป็นขอบเกรนมุมกว้าง พลังงานผิว (γG) ของขอบเกรนดังกล่าวจะเท่ากันกับขอบเกรนอื่น ขอบเกรนจะกลายเป็นดังรูป C ถ้าหากเกิดขอบเกรนมุมแคบ ค่าพลังงานที่ผิวในขอบเกรน ab ต่ำมาก แรงดึงต่ำ ab น้อยมากขอบเกรนจะเป็นดังรูป D ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการรวมตัวกันแบบนี้ทำให้เกรนเติบโตเร็วมาก

4.4.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเรขาคณิตของเกรนใน 3 มิติ

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่กล่าวมาอยู่ในลักษณะ 2 มิติ แต่เกรนของโลหะจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ 3 มิติ ดังในรูปที่ 4.24

รูป A เป็นรูป 3 มิติของเซลในรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นเกรน 4 ด้าน หรือ tetrahedrail grain เมื่อขอบเกรนทั้ง 4 หายไป เกรนดังกล่าวจะสลายตัวไปด้วย รูป B เป็นรูป 3 มิติของเกรนในรูปที่

4.24 ขอบเกรน BD ในรูปที่ 4.24 จะกลายเป็นจุดพบกันของเกรน 3 เกรน เมื่อเกรนล่างและเกรนบนรวมตัวกัน เส้นดังกล่าวจะหายไป เกิดเป็นขอบเกรนในแนวนอนกั้นระหว่างเกรนล่างและบน ทำให้ขอบเกรนเพิ่มขึ้น ในกรณีดังรูปที่ 4.24,C จะเกิดในทางตรงข้ามกับที่กล่าวมา ในรูปที่ 4.24,D เป็นลักษณะการรวมตัวกันของเกรนใน 3 มิติ เกรนล่างและบนจะสามารถเคลื่อนตัวมาใกล้ชิดกันได้ดังรูปที่ 4.24,B แต่กรณีนี้เกรนที่เกิดขึ้นเป็นขอบเกรนมุมแคบ เกรนล่างและบนจึงรวมตัวกันอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนรูปที่ 4.24,E เป็นการแยกตัวของเกรนเดียวออกเป็น 2 เกรน



รูปที่ 4.24 ขบวนการเปลี่ยนแปลงขณะเกรนเติบโตใน 3 มิติ

4.4.3 กฎการเติบโตของเกรน

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าขณะที่จำนวนเซลลดลงเมื่อเวลานานขึ้นลักษระการเรียงตัวกันของเซลจะเหมือนกันตลอดเวลา แม้ว่าเซลจะมีขนาดโตอยู่แล้วก็ตาม ไม่ว่าอัตราการการเติบโตจะเร็วสักเท่าไร เซลจะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเฉลี่ยเสมอ และขนาดเฉลี่ยจะเติบโตเมื่อนานขึ้น ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงขนาดของเซลฟองสบู่ หมายถึงเส้นผ่าศูนย์กลางเซลเฉลี่ยของฟองสบู่ ในกรณีของโลหะก็เช่นเดียวกันเมื่อกล่าวถึงขนาดเกรนก็คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเกรน การเติบโตของเกรนหรือของเซลก็คือ การที่ขนาดเฉลี่ยของเกรนหรือของเซลโตขึ้น

ในกรณีการเติบโตของเซลโลหะจะมีลักษณะคล้ายกับการเติบโตของฟองสบู่ แรงขับดันเพื่อให้เกรนเติบโตก็คือพลังงานผิวของขอบเกรน การเคลื่อนที่ของขอบเกรนโลหะเหมือนกับการเคลื่อนที่ของผนังฟองสบู่ โดยขอบเกรนจะเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางของส่วนโค้ง เซลฟองสบู่เติบโตได้โดยโมเลกุลของแก๊สแพร่ผ่านผนังฟองสบู่ ในกรณีของโลหะอะตอมจะข้ามขอบเกรนไปยังด้านตรงข้าม ดังนั้น จะเห็นว่าอะตอมที่อยู่ในขอบเกรนของผลึกมีลักษณะคล้ายเลนส์เว้า (concave side) เสถียรกว่าอะตอมที่อยู่ตามขอบเกรนนูน (convex side) เพราะว่าอะตอมที่อยู่ด้านเว้าจะมี

อะตอมอื่นในเกรนเดียวกันล้อมรอบอยู่อย่างหนาแน่น แรงยึดเหนี่ยวจึงมากกว่า ส่วนอะตอมที่อยู่ในด้านนูนมีแรงยึดเหนี่ยวน้อยกว่า จึงไม่ค่อยเสถียรและมีโอกาสกระโดดข้ามขอบเกรนไปยังด้านที่มีขอบเกรนเว้าได้มากกว่า ยิ่งขอบเกรนมีความโค้งมากก็ยิ่งเกิดผลดังกล่าวได้มาก ขอบเกรนก็ยิ่งเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น แต่เนื่องจากความรู้เกี่ยวกับขอบเกรนของโลหะยังมีอยู่น้อยมาก กลไกของการที่อะตอมโดดข้ามขอบเกรนจึงยังไม่กระจ่างนัก