

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

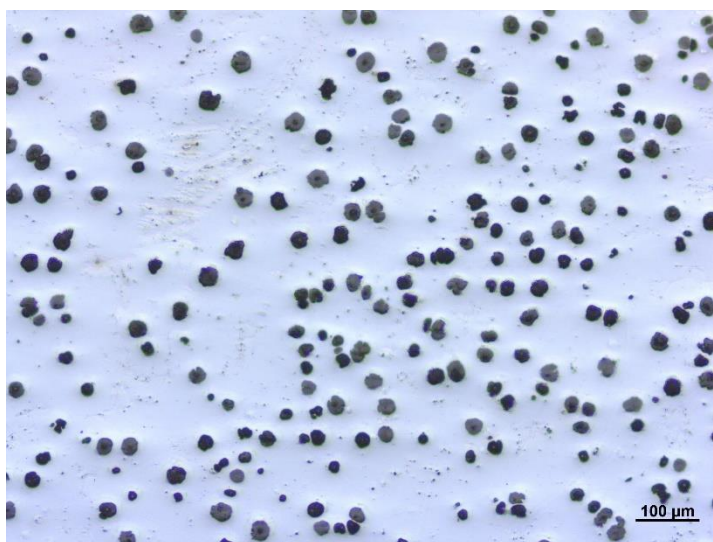
เหล็กหล่อคล้ายกับเหล็กกล้าตรงที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักเช่นเดียวกัน แต่มีปริมาณคาร์บอนและสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน จากแผนภูมิเฟสไดอะแกรมของเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ เหล็กหล่อมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2% ซึ่งมากกว่าเหล็กกล้าหลายเท่า ปริมาณคาร์บอนที่สูงนี้ทำให้เหล็กหล่อมีสมบัติในการหล่อที่ดี และสามารถผลิตเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ สำหรับเหล็กหล่อขาวเมื่อปริมาณคาร์บอนเกินกว่า 4.0% อาจทำให้เหล็กหล่อมีลักษณะเปราะ แตกหักง่ายเนื่องจากคาร์บอนจะอยู่ในรูปของซีเมนไทต์

เหล็กหล่อเหนียวได้ถูกวิจัยและค้นพบในปี ค.ศ.1950 และเริ่มผลิตในงานอุตสาหกรรมในปี ค.ศ.1960 เหล็กหล่อเหนียวเริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้นในหลายประเทศทั่วโลกและได้เริ่มนำเข้ามาใช้แทนที่เหล็กหล่อเทามากขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะสามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่าเหล็กหล่อเทา มีความเหนียว ทำให้ได้ชิ้นงานมีขนาดและน้ำหนักน้อยลงกว่าใช้เหล็กหล่อเทา ปัจจุบันมีการใช้เหล็กหล่อเหนียวแทนเหล็กหล่อเทาในส่วนที่ต้องรับแรงมากขึ้นแต่น้ำหนักน้อยลงเมื่อเทียบกับเหล็กหล่อเทา ทำให้ง่ายในการเคลื่อนย้ายและบำรุงรักษา

เหล็กหล่อเหนียวถือเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำและคุณสมบัติที่ดีทั้งในด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานสูง รวมถึงความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกและความยืดหยุ่นที่ดี ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น ในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร ยานยนต์ ท่อประปา และอุปกรณ์ก่อสร้าง เป็นต้น เหล็กหล่อเหนียวนั้นเหนือกว่าเหล็กหล่อเทาในด้านของความแข็งแรงและความเหนียว โดยมีสาเหตุหลักมาจากความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาของเกรไฟต์ เกรไฟต์แบบกลมที่มีอยู่ในเหล็กหล่อเหนียว ช่วยลดการสะสมความเครียด เมื่อเทียบกับเกรไฟต์แบบแผ่นที่พบในเหล็กหล่อเทา ความต้านทานแรงดึงโดยทั่วไปของเหล็กเหนียวอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 MPa ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะของเกรไฟต์ และโครงสร้างพื้น เป็นต้น นอกจากนี้ การมีเกรไฟต์ที่ละเอียดขึ้นยังมีแนวโน้มช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลอีกด้วย

2.2 เหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron)

เหล็กหล่อเหนียว หรือ เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม (Spheroidal cast iron) หรือ เหล็กหล่อโนดูล่า (Nodular cast iron) เหตุผลที่ถูกเรียกแบบนี้เพราะลักษณะของแกรไฟต์มีรูปร่างกลม (Nodule หรือ spheroid) ตกผลึกอยู่ในเนื้อของเหล็กหล่อและด้วยลักษณะของแกรไฟต์ที่กลม ดังรูปที่ 2.1 ทำให้เหล็กหล่อชนิดนี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเหล็กหล่อเทาค่อนข้างมาก สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่า มีความแข็งแรงสูงอยู่ในช่วง $40\text{--}70\text{ kg/mm}^2$ หรือประมาณ $392\text{--}686\text{ MPa}$ และมีความเหนียวสูงอยู่ในช่วง $8\text{--}25\%$ เหล็กหล่อเหนียวนิยมใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ท่อประปา อุปกรณ์เครื่องจักรกล และอื่น ๆ ที่ต้องการความทนทานและอายุการใช้งานที่ยาวนาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว

2.2.1 สมบัติเหล็กหล่อเหนียว

เหล็กหล่อเหนียว มีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการที่ทำให้มันเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานต่าง ๆ ดังนี้:

1. ความเหนียว (Ductility) มีความเหนียวสูง ซึ่งทำให้สามารถทนต่อการบิดเบี้ยวและการกระแทกได้ดี โดยไม่เกิดการแตกหักง่าย
2. ความแข็งแรง (Strength) มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กหล่อเทา ทำให้สามารถรับน้ำหนักและแรงกระแทกได้มากขึ้น
3. ความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear Resistance) มีความทนทานต่อการสึกหรอและการกัดกร่อน ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนาน

4. ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก (Impact Resistance) สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี ทำให้ลดโอกาสในการเกิดการแตกร้าว
5. ความสามารถในการขึ้นรูป (Castability) สามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่ายและมีความแม่นยำสูงในกระบวนการหล่อ
6. การต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเคลือบป้องกันเพิ่มเติม
7. ความสามารถในการเชื่อม (Weldability) สามารถเชื่อมได้ดี ทำให้ง่ายต่อการประกอบและการซ่อมแซม

2.2.2 การใช้งานเหล็กหล่อเหนียว

เหล็กหล่อเหนียวมีการใช้งานหลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติที่แข็งแรงและทนทานมาก นี่คือตัวอย่างบางส่วนของการใช้งานเหล็กหล่อเหนียว แสดงดังรูปที่ 2.2

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ ใช้ทำเพลาค้อนเหวี่ยง เกียร์ ตัวกันโครงรถ และชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องการความแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสี
2. ท่อประปาและท่อส่งน้ำ ใช้ทำท่อส่งน้ำและท่อน้ำเสีย เพราะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการแตกร้าว
3. เครื่องจักรกล ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น ตัวเครื่อง โครงสร้าง และส่วนประกอบที่ต้องรับแรงมาก
4. งานก่อสร้าง ใช้ทำโครงสร้างสะพาน เสา และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ต้องการความแข็งแรง
5. อุตสาหกรรมพลังงาน ใช้ทำชิ้นส่วนในโรงงานผลิตพลังงาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง



เพลาค้อเหวี่ยง



เหล็กกันโคลงรถ

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กหล่อเหนียว

2.3 รูปร่างของแกรไฟต์

โดยทั่วไปแล้วลักษณะรูปร่างของแกรไฟต์ที่ต้องการในงานหล่อนั้น ควรมีขนาดเล็กละเอียด และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดี โดยทั่วไปการเกิดแกรไฟต์ในเหล็กหล่อเทา จะเกิดเป็นกลุ่มๆ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโค้งไปมาในสามมิติ เนื่องจากเมื่อเริ่มเกิดเป็นนิวเคลียสที่อยู่ในเหล็กหลอมเหลว การขยายตัวตอนแรกจะเป็นอิสระและมีทิศทางไปตามแกน C ในระบบผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งเป็นทิศทางที่เหมาะสมในการขยายตัว ซึ่งแกรไฟต์ต้องอาศัยอะตอมของคาร์บอนเมื่อขึ้นเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกันทำให้เกิดการแย่งอะตอมของคาร์บอนซึ่งกันและกัน จึงพยายามเปลี่ยนทิศทางไปยังบริเวณที่มีคาร์บอนมากกว่า รูปร่างแกรไฟต์สามารถแบ่งออกเป็น 6 ชนิด แสดงดังในรูปที่ 2.3

ประเภท A เกิดขึ้นที่อุณหภูมิเยือกตกให้สมบัติเชิงกลที่ดี เพราะมีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ลักษณะการเกิดเป็นกลุ่มก้อนถูกห่อหุ้มด้วยออสเทนไนต์ แล้วจึงแตกแขนงออกเป็นแผ่นโค้งในสามมิติ แต่ละเซลล์เชื่อมต่อกันเมื่อการแข็งตัวสมบูรณ์

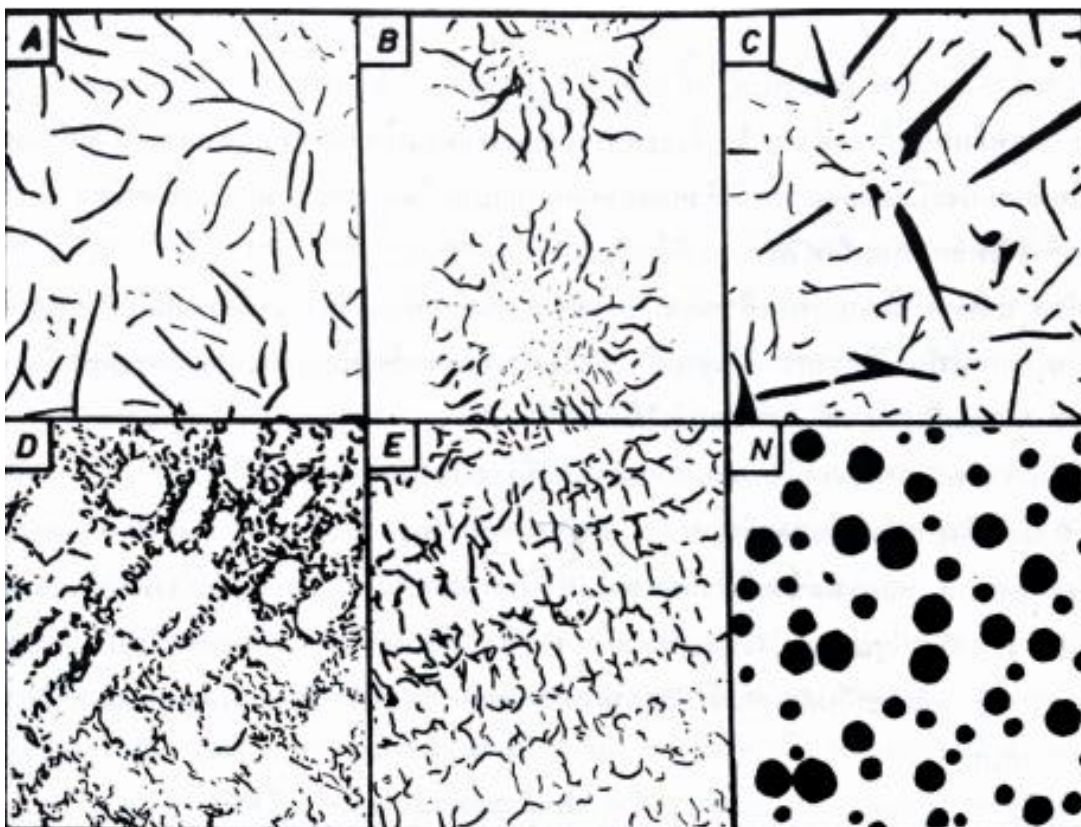
ประเภท B เป็นแกรไฟต์ขนาดเล็ก แต่การเกิดจะอยู่เป็นกลุ่มๆ มีลักษณะพุ่งไปบริเวณใจกลางคล้ายกลีบดอกไม้ม (Rosette) จัดเป็นยูเทคติกแกรไฟต์แต่มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากมีจำนวนนิวเคลียสน้อย มักพบในบริเวณใจกลางของชิ้นงานหรือเหล็กหล่อมอดเติล

ประเภท C เป็นแกรไฟต์ที่มีทั้งขนาดใหญ่ (Primary or Kish graphite) และขนาดเล็ก (Eutectic graphite) เกิดแบบสลับกันซึ่งพบในเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนและซิลิคอนสูงหรือมีค่าคาร์บอนสมมูลมากกว่า 4.3% (Hypereutectic) อัตราการเย็นตัวค่อนข้างช้าและเกิดก่อนที่จะถึงอุณหภูมิเยือกตก ซึ่งลักษณะแกรไฟต์ที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลแต่ส่งผลดีต่อการนำความร้อน ดังนั้นเหล็กหล่อที่มีแกรไฟต์ประเภทนี้เป็นองค์ประกอบจึงเหมาะสำหรับการใช้งานในบางประเภท

ประเภท D เป็นแกรไฟต์ขนาดเล็กละเอียดมากเกิดในเหล็กหล่อที่มีอัตราการเย็นตัว แต่มีค่าคาร์บอนสมมูลต่ำ ทำให้การแข็งตัวอยู่ห่างจากสมดุลเปรียบเสมือนว่ามีส่วนผสมไฮโปยูเทคติกมากขึ้น (เกิดออสเทนไนต์มากขึ้นกว่าสมดุล) ลักษณะแกรไฟต์จะเป็นเกล็ดเล็กๆคล้ายกับยูเทคติกแกรไฟต์ มักเกิดที่บริเวณขอบเกรนของออสเทนไนต์และเกิดแบบไม่มีทิศทาง หากมีแกรไฟต์ประเภทนี้ในชิ้นงานจะทำให้เหล็กเปราะและแตกหักได้ง่าย

ประเภท E เป็นแกรไฟต์ที่มีลักษณะคล้ายกับประเภท D แต่เป็นการเกิดแบบมีทิศทาง (orientation)

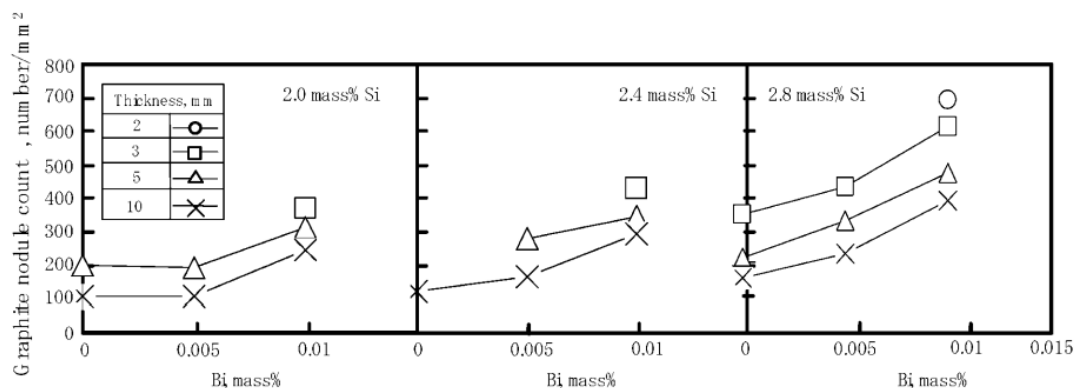
ประเภท N เป็นแกรไฟต์ที่มีลักษณะกลมพบในเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งเกิดขึ้นจากการเติมธาตุผสมบางตัวเช่น Ce, Mg ซึ่งเป็นธาตุที่ส่งเสริมให้เกิดคาร์ไบด์ แต่นิยมใช้แมกนีเซียมมากกว่าเนื่องจากได้ผลกับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมทางเคมีกว้างกว่าซีเรียม ทำให้แกรไฟต์ที่ได้อยู่ในรูปทรงกลม มีจุดรวมความเค้นน้อย จึงทำให้มีสมบัติเหนียวและความแข็งแรงดึงสูงกว่าปกติ



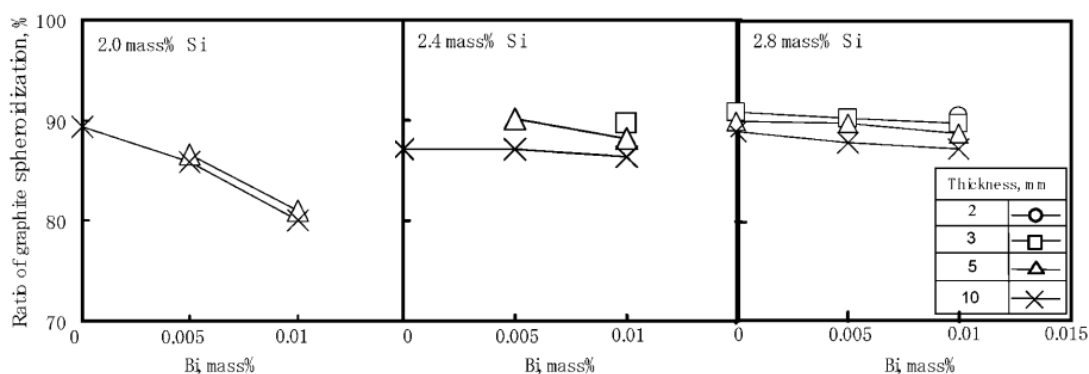
รูปที่ 2.3 ลักษณะของแกรไฟต์แต่ละประเภท [1]

2.4 การออกแบบการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความละเอียดของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียวได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ รวมถึงอัตราการเย็นตัวและการทำอินน็อคูเลชัน นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณต่อโครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อเหนียว จากผลการทดลองของ H. Takeda และคณะ [2] พบว่าการเติมปริมาณ 0.005 – 0.010 % ลงในเหล็กหล่อเหนียว ช่วยเพิ่มจำนวนโหนดของแกรไฟต์ (โหนด/ตารางมิลลิเมตร) และทำให้แกรไฟต์มีค่าความกลมสูงมากกว่า 80% ในทุกชิ้นงาน ผลกระทบนี้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อมีปริมาณซิลิคอน 2.0 % เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ซิลิคอนที่สูงกว่าคือ 2.4% และ 2.8 % ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ดังนั้น จากการศึกษาสรุปได้ว่าปริมาณช่วยลดแนวโน้มการเกิดซิลล์ (chill) และเพิ่มอัตราส่วนเฟอร์ไรต์ในเมทริกซ์

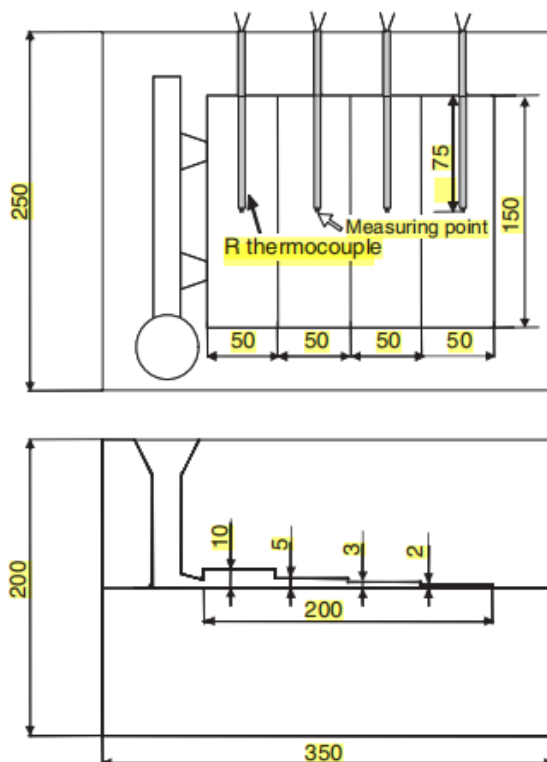


รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมีทและจำนวนโนดของแกรไฟต์ [2]

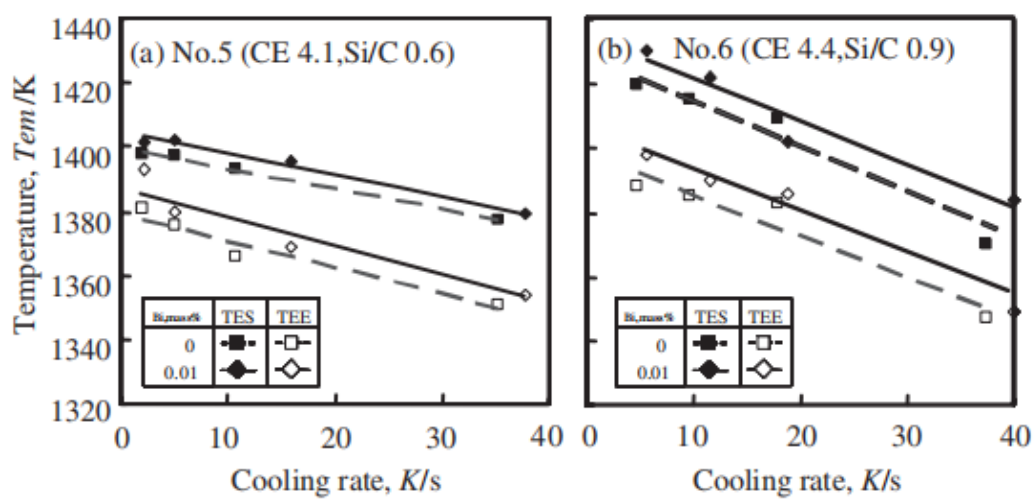


รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมีทและอัตราส่วนของการเกิดทรงกลมของแกรไฟต์[2]

จากรูปที่ 2.6 แสดงผลการทดลองของ Takeda และคณะ [3] ได้ขยายการวิจัยโดยใช้วิธีการฝังเทอร์โมคัปเปิลในแต่ละความหนาทั้งหมด 4 ชั้น เพื่อใช้การวิเคราะห์ทางความร้อน และจากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าการเติมบิสมีทในปริมาณ 0.010 % ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของยูเทคติก (TES) และอุณหภูมิสิ้นสุดของยูเทคติก (TEE) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ผลการศึกษาจาก EPMA ซึ่งให้เห็นว่าอนุภาคของบิสมีทโลหะ บิสมีทออกไซด์ และบิสมีทซิลไฟด์ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสที่ต่างกัน ส่งผลให้เกิดแกรไฟต์ที่ละเอียดขึ้นอีกด้วย

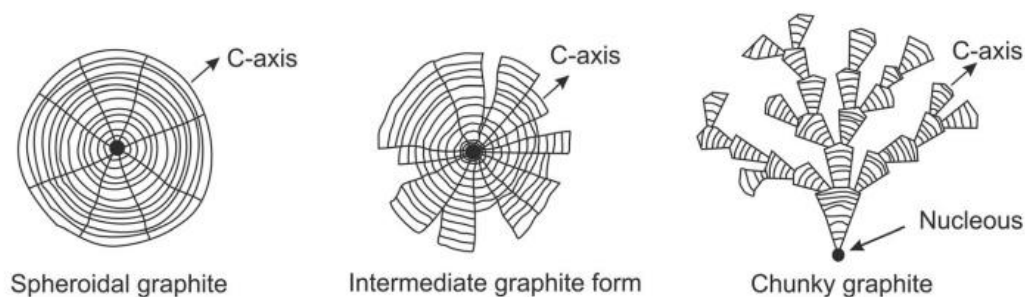


รูปที่ 2.6 การออกแบบการทดลองของ H. Takeda และคณะ [3]

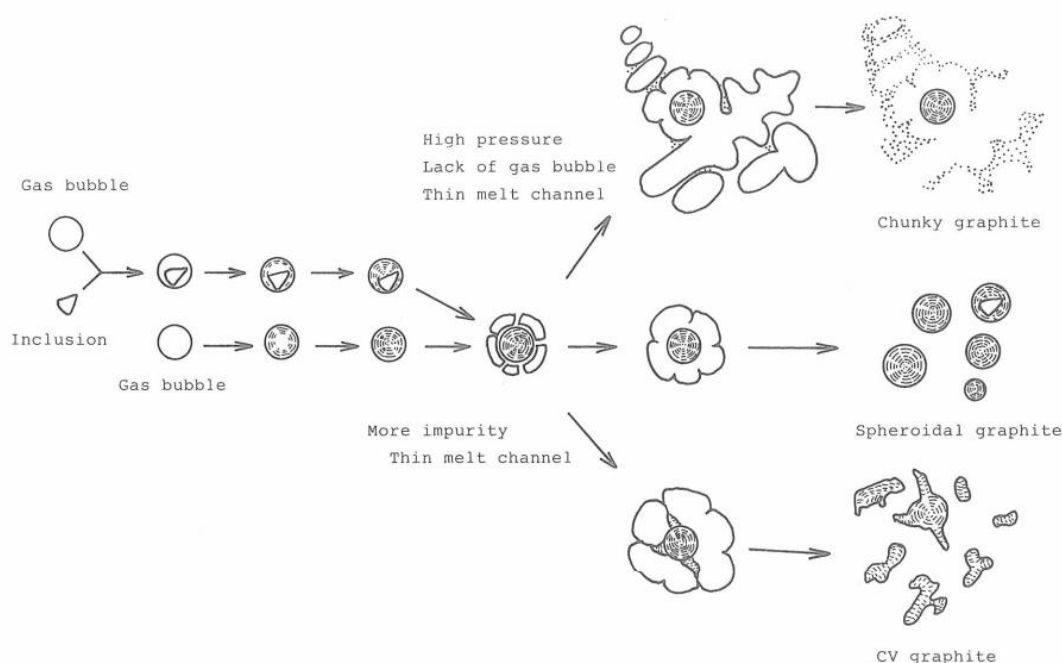


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมีทและอัตราการเย็นตัวของอุณหภูมิของจุดยูเทคติกเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดการแข็งตัวของยูเทคติก [3]

ในชิ้นงานที่มีความหนามากขึ้น จะมีแนวโน้มที่จะเกิดชังแกรไฟต์ (Chunky graphite) ได้มากขึ้น ซึ่งจากการทำการทดลองของ W.Baer [4] ได้สรุปเกี่ยวกับการก่อตัวของชังแกรไฟต์ โดยปัจจัยที่มีผลได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี, การปรับสภาพของโลหะหลอมเหลว (melt treatment) และความหนาของชิ้นงาน เป็นต้น ชังกัแกรไฟต์พบได้บ่อยที่จุดศูนย์กลางทางความร้อนของชิ้นงานหล่อ แม้ว่าจะไม่มีทฤษฎีที่ได้รับการยืนยันเกี่ยวกับการก่อตัวของชังกัแกรไฟต์ แต่ก็มีส่งเสริมด้วย 1) การมีองค์ประกอบแร่เอิร์ธมากเกินไป 2) โมดูลัสการหล่อที่สูงขึ้น และ 3) การทำอินโนคูลชันที่ไม่เพียงพอ นอกจากนี้ H.Itoufuj และคณะ [5-6] ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดชังกัแกรไฟต์ผ่านกระบวนการการเฟดของแมกนีเซียมและการขยายตัวของยูเทคติก



รูปที่ 2.8 การเจริญเติบโตของแกรไฟต์รูปทรงกลม อินทอเมเดียทแกรไฟต์ และชังกัแกรไฟต์ [4]

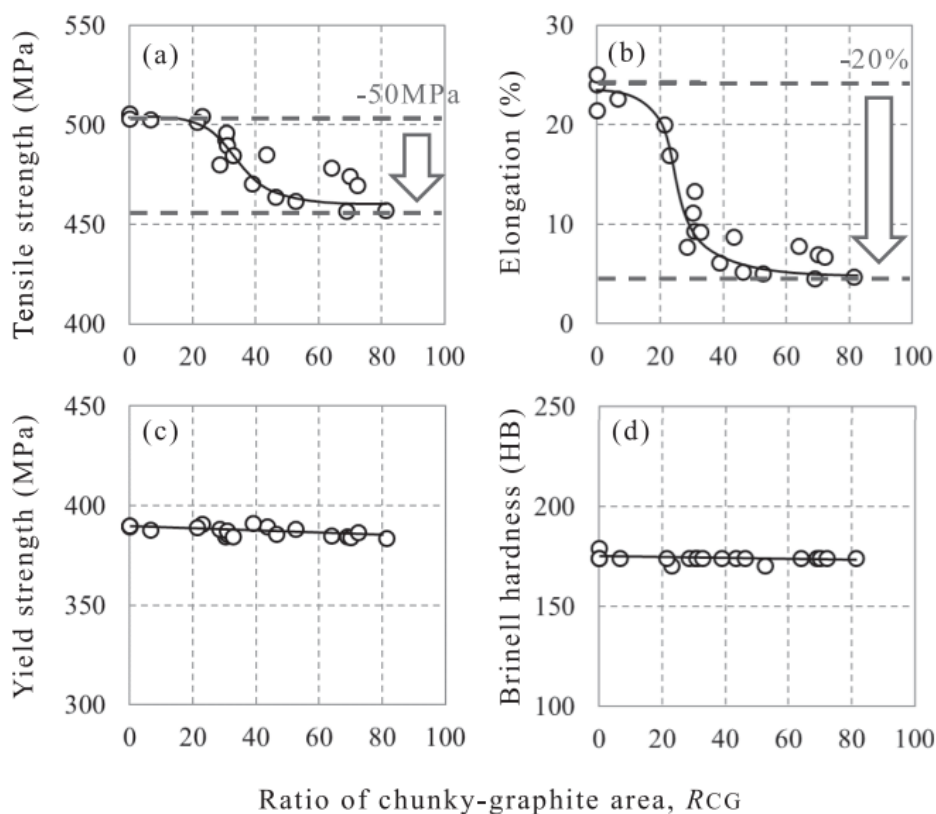


รูปที่ 2.9 การก่อตัวของแกรไฟต์ในเหล็กหลอมเหลวที่ผ่านการทรีตด้วยแมกนีเซียม [5]

ต่อมาการทดลองของ Sertucha และคณะ [7] ได้ใช้ระบบวิเคราะห์เชิงความร้อนเพื่อสำรวจลำดับการเติบโตของซังก็แกรไฟต์ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนประกอบด้วย

- 1) การเกิดนิวเคลียสของแกรไฟต์ปฐมภูมิในของเหลว
- 2) ปฏิกริยาอุทกติกเริ่มต้นกับการเติบโตของออสเทนไนต์เดนไดรต์รอบ ๆ ก้อนแกรไฟต์ปฐมภูมิ
- 3) ปฏิกริยาอุทกติกจำนวนมากที่นำไปสู่การเติบโตของเซลล์ซังก็แกรไฟต์ และก้อนแกรไฟต์ทุติยภูมิ ทำให้เกิดเซลล์อุทกติกแกรไฟต์ทรงกลม

โดยรวมแล้ว Stefanescu [8] ชี้ให้เห็นว่าการรวมกันของระดับของสารละลายและอัตราการแข็งตัวเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของแกรไฟต์ ส่งผลให้แกรไฟต์มีฐานวิทยาที่แตกต่างกัน

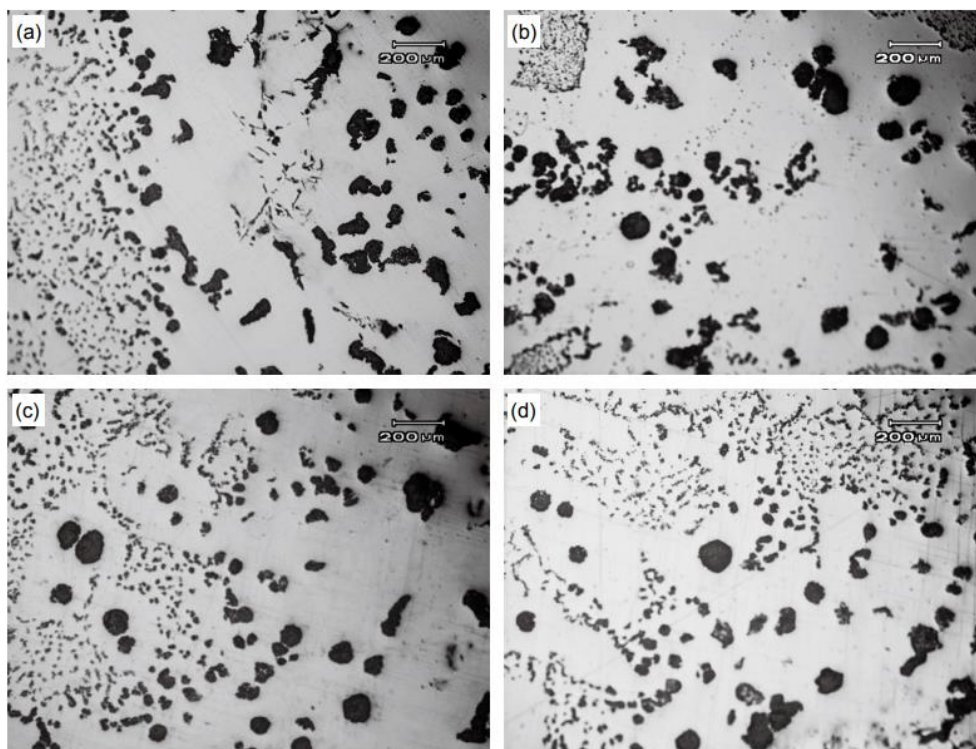


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง RCG กับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กหล่อแกรไฟต์ทรงกลม

(a) ความแข็งแรงแรงดึง (b) การยืดตัว (c) ความแข็งแรงการยืดหยุ่น (d) ความแข็งบริเนล [9]

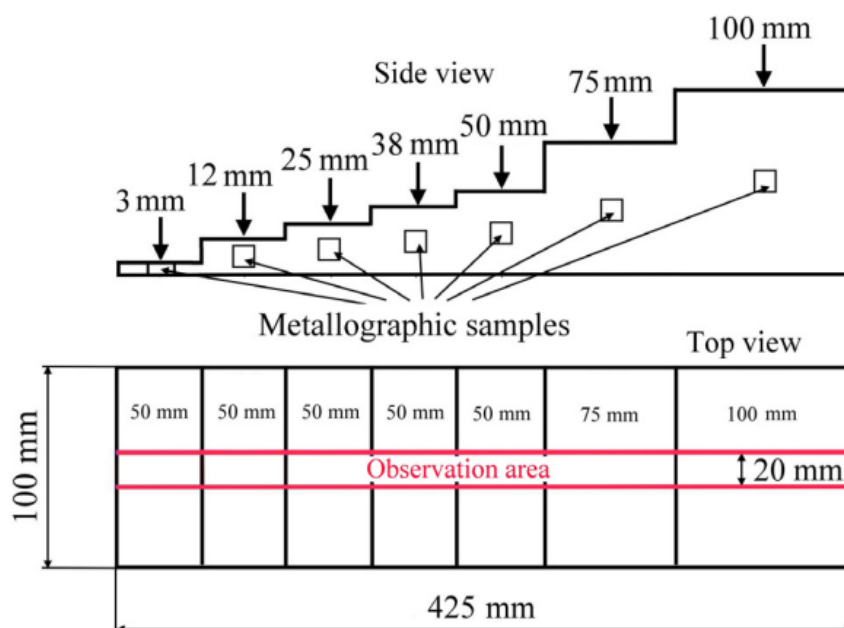
การก่อตัวของซังก็แกรไฟต์จะเป็นอันตรายต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งในความเป็นจริง ซังก็แกรไฟต์ถือว่าเป็นข้อบกพร่องในการหล่อที่มีผลกระทบอย่างมากต่อความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของเหล็กหล่อเหนียว จากการทดลอง H.Nakayama และคณะ [9] ทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณซังก็แกรไฟต์ต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียว จากกราฟพบว่าปริมาณของซังก็แกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้น จะลดความแข็งแรงในการดึงลงประมาณ ~ 50 MPa และลดการยืดตัวลงประมาณ 20% แต่ความแข็งแรงการยืดหยุ่น และความแข็งมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ การยืดตัวลดลงเหลือเพียง 1/5 ของตัวอย่างที่ไม่มีซังก็แกรไฟต์

หลายๆ งานวิจัย [10-16] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณในการป้องกันการก่อตัวของซังก็แกรไฟต์และการปรับปรุงความละเอียดของอนุภาคแกรไฟต์ จากการทดลอง Song Liang และคณะ [10] แสดงให้เห็นว่าปริมาณช่วยลดการก่อตัวของซังก็แกรไฟต์และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าการเติมปริมาณที่มากกว่า 0.011% ขึ้นไป ไม่ได้ทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้นแต่อย่างใด เนื่องจากการเติมปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดการรวมตัวของซังก็แกรไฟต์

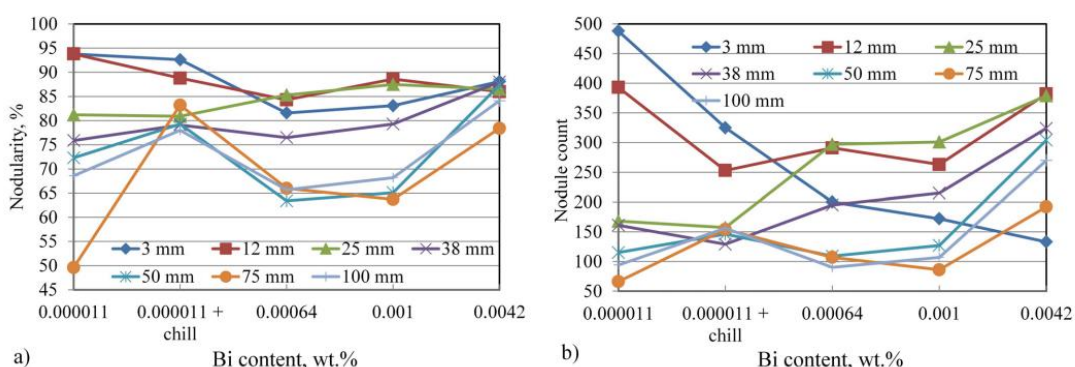


รูปที่ 2.11 สันฐานวิทยาของแกรไฟต์ของตัวอย่างที่มีปริมาณปริมาณต่างกันที่ตำแหน่ง 4; (a) 0.05wt.%; (b) 0.008wt.%; (c) 0.011wt.%; (d) 0.014wt.% [10]

จากการทดลอง Ferro และคณะ [11] ได้ทำการวิจัยผลกระทบของอินทรีย์วัตถุแลนที่มีแร่เอิร์ทและบิสมัทในชิ้นงานหล่อขนาดใหญ่ของเหล็กหล่อเหนียว พบว่าการก่อตัวของซังก็แกรไฟต์สามารถป้องกันได้ด้วยแร่เอิร์ทและบิสมัท ในความเป็นจริง เมื่อมีการเติมบิสมัท จะทำให้จำนวนแกรไฟต์มากขึ้น อีกทั้งสารประกอบเชิงโลหะของแร่เอิร์ทยังช่วยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมในการเกิดแกรไฟต์ ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสที่แตกต่างกันสำหรับนิวเคลียสของแกรไฟต์



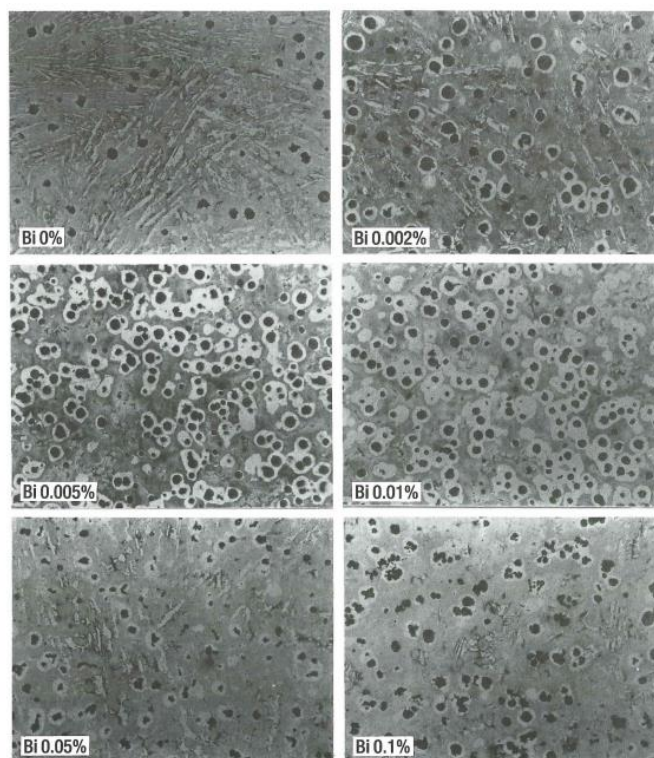
รูปที่ 2.12 การออกแบบชิ้นงานของ Glavas Z และคณะ [12]



รูปที่ 2.13 ผลของการเพิ่มบิสมัทต่อความทรงกลม (a) และ จำนวนของแกรไฟต์ (b) ในความหนาของหน้าตัด 3 -100 มิลลิเมตร [12]

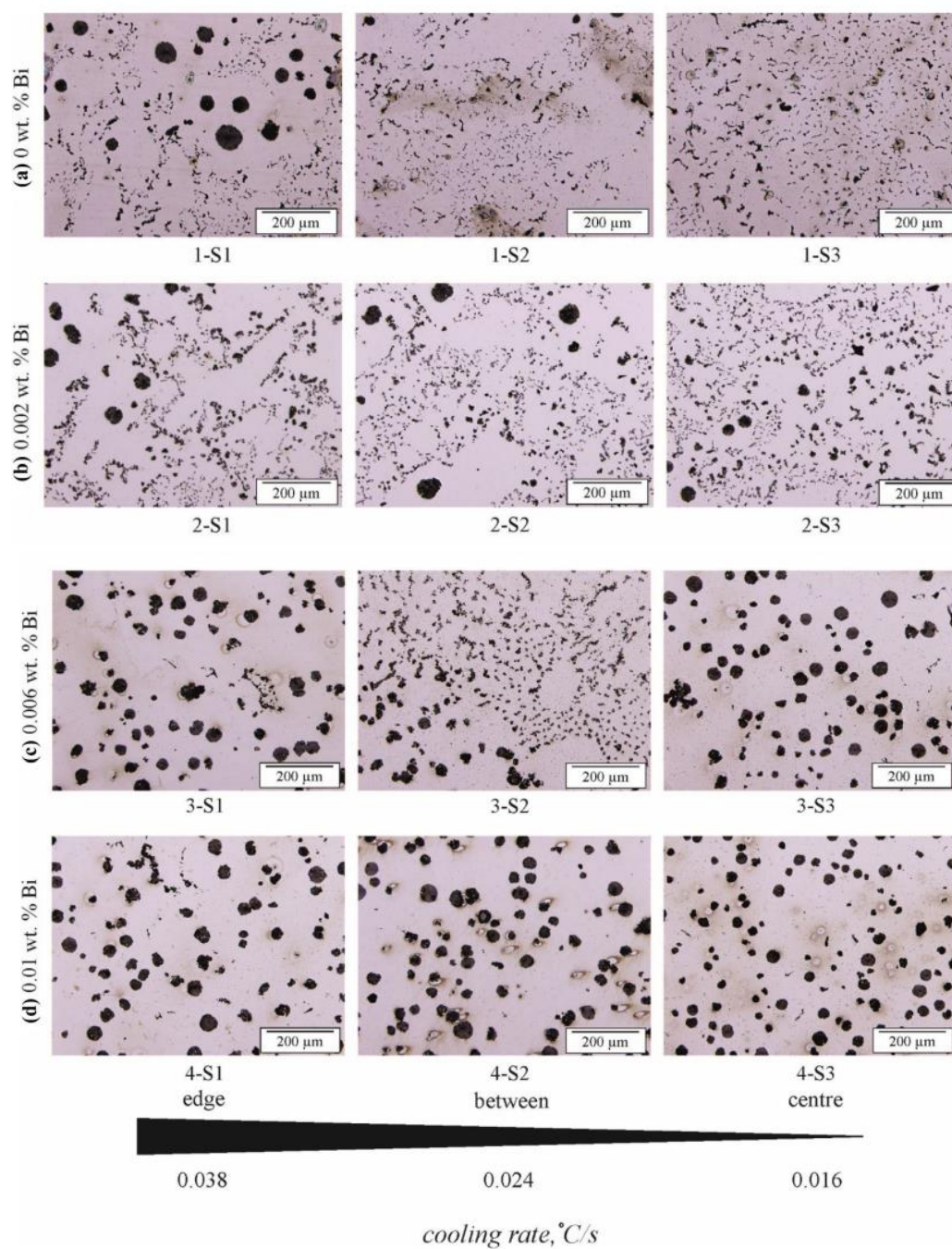
จากการทดลอง Glavas และคณะ [12] ชี้ให้เห็นว่าผลกระทบของบิสมีตต่อเหล็กหล่อเหนียว นั้น สามารถเป็นได้ทั้งเชิงบวกและเชิงลบ ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน ในกรณีที่มีความหนาของ ชิ้นงานขนาดใหญ่ บิสมีตได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามิประโยชน์ในการป้องกันการเกิดซังก็แกรไฟต์และ เพิ่มค่าความเป็นทรงกลม (nodularity) ในการศึกษาที่มีการเพิ่มปริมาณบิสมีตไปถึง 0.0042% พบว่า แนวโน้มของจำนวนแกรไฟต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในชิ้นงานที่มีความหนาขนาดกลางและขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม บิสมีตยังเพิ่มแนวโน้มการเกิดซิลล์ (Chilling) ในชิ้นงานที่มีความหนาขนาดเล็ก ซึ่ง ผลลัพธ์นี้ขัดแย้งกับการค้นพบของการศึกษาก่อนหน้านี้โดย Takeda และคณะ [2]

จากผลการทดลองของ Horie และคณะ [13] พบว่าโลหะบิสมีตโลหะ (Bi) บิสมีตออกไซด์ (Bi_2O_3) และบิสมีตซัลไฟด์ (Bi_2S_3) ให้ผลคล้ายกันในการเพิ่มจำนวนของแกรไฟต์และช่วยลดแนวโน้ม การเกิดซิลล์ นอกจากนี้พวกเขายังแสดงให้เห็นว่าจำนวนแกรไฟต์เพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อมีปริมาณบิสมีตสูง ถึง 0.005% โดยน้ำหนัก แล้วลดลงเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.14 ในทำนองเดียวกัน Yicheng และคณะ [14] ได้สรุปว่าช่วงที่เหมาะสมของบิสมีตในเหล็กหล่อเหนียวคือช่วงระหว่าง 0.004% ถึง 0.016% สำหรับ ความหนา 10 มิลลิเมตร และ 30 ถึง 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ

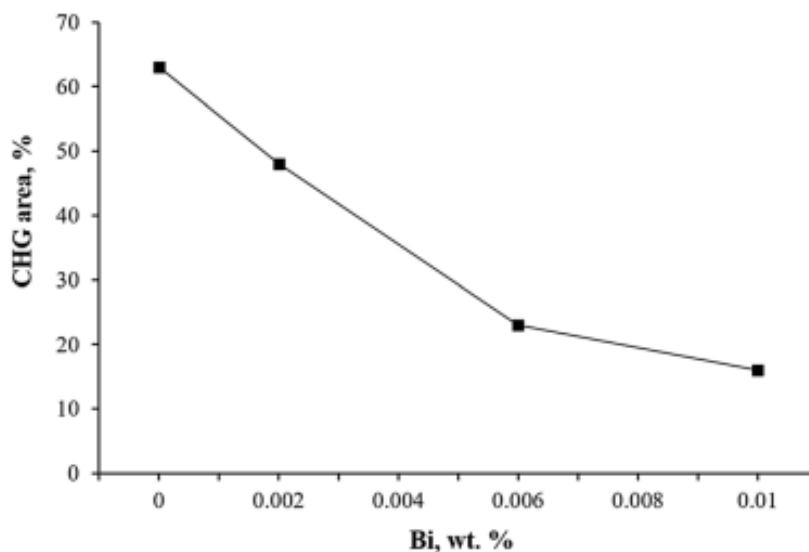


รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร เมื่อมีการเติม บิสมีตที่แตกต่างกัน [13]

จากผลการทดลองของ Song และคณะ [15] พบว่าการเพิ่มปริมาณบิสมัทไปถึง 0.011% ส่งผลให้บิสมัทปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้ ในทำนองเดียวกัน Gao และคณะ [16] ได้ทำการทดสอบทางกลที่อุณหภูมิ -40°C และพบว่าปริมาณบิสมัทที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 0.010% ถึง 0.012% สำหรับชิ้นงานที่มีขนาด $180 \times 180 \times 200$ มิลลิเมตร



รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของกรวย: (a) กรวย 1 (b) กรวย 2, (c) กรวย 3, (d) กรวย 4 [17]



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมัทและพื้นที่ของซังกี้แกรไฟต์ [17]

จากการทดลองของ Bauer และคณะ [17-18] พบว่าบิสมัทป้องกันการเกิดซังกี้แกรไฟต์ได้ (รูปที่ 2.15-2.16) โครงสร้างจุลภาคเผยให้เห็นว่าการเติมบิสมัทไม่เพียงแต่ส่งผลต่อการลดปริมาณของซังกี้แกรไฟต์เท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อการกระจายตัวตลอดหน้าตัดของชิ้นงานหล่อด้วย ผลกระทบที่รวมกันของอัตราการเย็นตัวและปริมาณของซีเรียมเป็นตัวกำหนดปริมาณบิสมัทที่เหมาะสมที่สุด ในการทดลองนี้ การเติมบิสมัทในปริมาณที่สูงขึ้นยังมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการปรับปรุงสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ที่เป็นทรงกลมอีกด้วย การเติมบิสมัทที่ 0.01% ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ในขณะที่อัตราส่วน Ce/Bi อยู่ที่ประมาณ 0.6 ดังนั้น อัตราส่วนของ Ce/Bi มีความสำคัญ เนื่องจากถ้ามีปริมาณที่สูงกว่านี้อาจมีผลกระทบที่เป็นผลเสียต่อคุณสมบัติทางกลได้

จากการทดลองของ Pan และ Chen [19] พบว่าอัตราส่วน Ce/Bi ในช่วง 0.8 ถึง 1.1 สามารถป้องกันการเกิดซังกี้แกรไฟต์ในส่วนที่มีขนาดใหญ่ได้ พวกเขายังรายงานเพิ่มเติมว่าต้องใช้อัตราส่วน Ce/Bi เกิน 1.1 สำหรับส่วนที่มีขนาดเล็ก

Stieler และคณะ [20] ได้ทำการทดลองสำรวจเพิ่มเติมถึงผลกระทบรวมของบิสมัทและซีเรียมที่เกี่ยวข้องกับสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ โดยทั่วไป ปริมาณบิสมัทที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณซีเรียมหรือธาตุแร่เอิร์ท และความหนาของหน้าตัด โดยส่วนที่มีขนาดใหญ่จะต้องมีความเข้มข้นของบิสมัทสูงกว่าส่วนที่มีขนาดเล็ก

มีการศึกษา [11, 21-22] ที่ทดลองแนวคิดในการนำบิสมัทเข้าไปในสารอินทรีย์คูลแลนท์ เช่น อินทรีย์คูลแลนต์ที่มีบิสมัท ซึ่ง Margaria และคณะ [22] ได้ยื่นจดสิทธิบัตรสำหรับผลิตภัณฑ์สารอินทรีย์

คูแลนท์ ที่ประกอบด้วยบิสมัทและแรร์เอิร์ท สารอินทรีย์คูแลนท์ประกอบด้วยแรร์เอิร์ท บิสมัท พลวง และตะกั่ว โดยมีอัตราส่วน (Bi+Pb+Sb/RE ทั้งหมด) ระหว่าง 0.9 ถึง 2.2 แม้ว่าจะมีข้อจำกัดในการเปรียบเทียบระหว่างการศึกษิต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าความหนาของส่วนที่ใหญ่กว่านั้นต้องการบิสมัทมากกว่า (หรือค่า Ce/Bi ต่ำกว่า) ตารางที่ 2.1 สรุปช่วงที่เหมาะสมที่สุดของ Ce/Bi จากการศึกษาวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้น

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบศักยภาพในการใช้บิสมัทเป็นสารเติมแต่งในเหล็กหล่อเหนียวแบบดั้งเดิม และกำหนดปริมาณที่เหมาะสมของบิสมัทและอัตราส่วน Ce/Si ที่ให้จำนวนแกรไฟต์สูงขึ้นและคุณสมบัติที่ต้องการ

ตารางที่ 2.1 สรุปช่วงที่เหมาะสมของ Ce/Bi จากการศึกษิตกกล่าวถึงข้างต้น

อ้างอิง	Ce/Bi	หมายเหตุ
Glavas และคณะ [12]	0.67	ความหนา 50 – 100 มิลลิเมตร
Bauer และคณะ [18]	0.60	ความหนาสูงสุดถึง 300 มิลลิเมตร
Pan และ Chen [19]	0.80 – 1.10	ระยะเวลาการแข็งตัวสูงสุดถึง 3200 วินาที
Stieler และคณะ [20]	1.56 – 5.30	ความหนา 75 มิลลิเมตร
Margaria และคณะ [22]	0.45 – 1.11*	*แปลงมาจาก (Bi+Pb+Sb)/RE

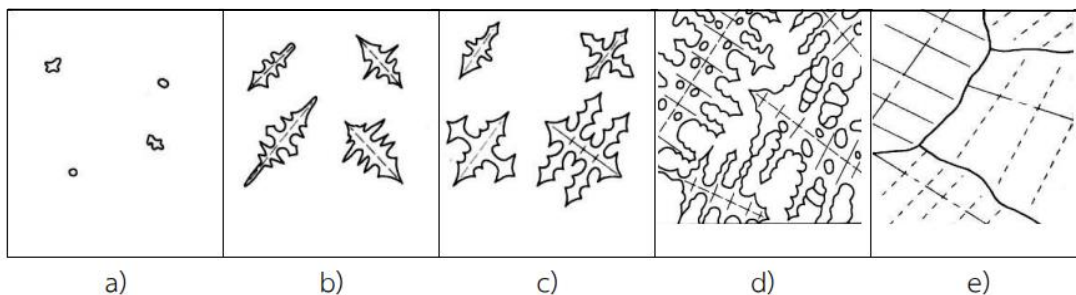
2.5 การแข็งตัวของโลหะ (Solidification of Metals)

เมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว กระบวนการที่เกิดขึ้นคือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง กระบวนการนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมโลหะและการหล่อโลหะ เนื่องจากมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะที่ผลิตขึ้น

2.5.1 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ

กระบวนการแข็งตัวของโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ การกำเนิดนิวเคลียส (Nucleation) และการเติบโตหรือขยายตัวของนิวเคลียส (Growth or Expansion of Nuclei) จะเป็นขั้นตอนถัดมา จากรูปที่ 2.17a แสดงการกำเนิดนิวเคลียสเริ่มต้นของของแข็ง ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะหลอมเหลวมารวมตัวกัน เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะเย็นลงมาถึงจุดแข็งตัว อนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่เรียกว่า “นิวคลีไอ (Nuclei)” จะขยายตัวโตขึ้น เนื่องจากอะตอมของโลหะในโลหะเหลววิ่งมาเกาะตัวเพิ่มขึ้นและขยายตัวเป็นกิ่งก้านสาขาลายกิ่งไม้ (รูปที่ 2.17b และ 2.17c) และมีชื่อเรียกตามลักษณะที่มองเห็นว่า “ผลึกกิ่งไม้ (Dendrite)” เมื่อมีการขยายตัวโตขึ้นเรื่อยๆ

ปลายของผลึกกิ่งไม้จะชนกัน (รูปที่ 2.17d) ทำให้ไม่สามารถขยายตัวไปในทิศทางนั้นได้อีก แต่จะเปลี่ยนไปขยายตัวไปยังบริเวณที่เป็นของเหลวจนกระทั่งของเหลวกลายเป็นของแข็งทั้งหมด ผลึกกิ่งไม้เมื่อเติบโตเต็มที่จะเรียกว่า เม็ดเกรน (Grain) และขอบของเม็ดเกรนที่เป็นรอยเชื่อมต่อกันจะเรียกว่า ขอบเกรน (Grain Boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.17e การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)



รูปที่ 2.17 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ a) การเกิดนิวเคลียส b, c, d) โครงสร้างกิ่งไม้ขยายตัว e) สิ้นสุดการแข็งตัวเกิดเม็ดเกรนของโลหะและรอยต่อเรียกว่าขอบเกรน [23]

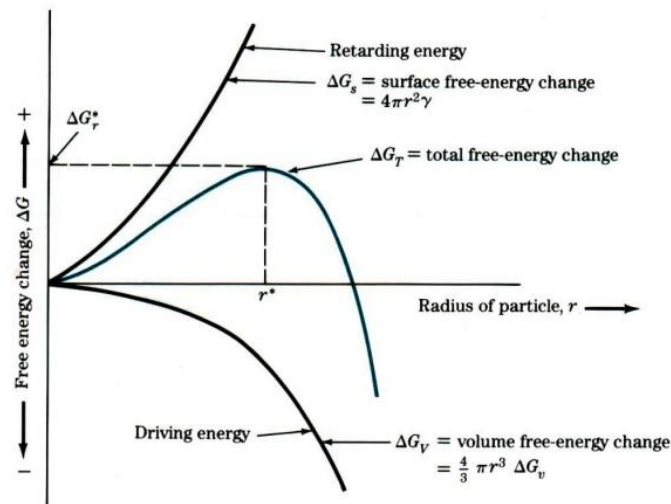
2.5.2 กลไกการเกิดนิวเคลียส

การแข็งตัวของโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวมาถึงอุณหภูมิแข็งตัว ซึ่งกระบวนการนี้จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น โดยพลังงานความร้อนของโครงผลึกจะถูกถ่ายเทออกมาทำให้พลังงานความร้อนของโครงผลึกน้อยกว่าพลังงานความร้อนในโลหะหลอมเหลว จึงเกิดความแตกต่างของพลังงานความร้อนเกิดขึ้นระหว่างของแข็งกับของเหลว เราเรียกว่าพลังงานนี้ว่า พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (Volume Free Energy (ΔG_v)) โดยเมื่อขนาดของของแข็งโตขึ้นจะทำให้พลังงาน ΔG_v เพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อโลหะหลอมเหลวเริ่มมีการแข็งตัวเป็นของแข็งจะเกิดรอยเชื่อมต่อระหว่างผิวของอนุภาคของแข็งกับโลหะหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.18 พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว (γ) จะสัมพันธ์กับการเชื่อมต่อระหว่างผิวของโลหะหลอมเหลว โดยถ้าขนาดของอนุภาคของแข็งมีขนาดโตขึ้นจะทำให้พลังงานเชิงพื้นผิวเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของพลังงานรวม (ΔG_v) จึงเป็นไปตามสมการ

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

- เมื่อ $\frac{4}{3}\pi r^3$ คือ ปริมาตรของอนุภาคของแข็งรูปทรงกลม (Embryo)
 $4\pi r^2$ คือ พื้นที่ผิวของอนุภาคของแข็งรูปทรงกลม (Embryo)
 γ คือ พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว
 ΔG_v คือ พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (มีค่าเป็นลบ)



รูปที่ 2.18 พลังงานอิสระรวมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับรัศมีวิกฤติของเอมบริโอ [23]

ขนาดความโตของอนุภาคของแข็ง จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของพลังงานเชิงพื้นผิวและเชิงปริมาตร ถ้ารัศมีของอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กกว่ารัศมีวิกฤติ (r^*) พลังงานรวมจะลดต่ำลง ทำให้อนุภาคของแข็งมีโอกาสละลายกลับไปเป็นของเหลวอีกครั้ง แต่ถ้าขนาดของอนุภาคของแข็งมีขนาดโตกว่ารัศมีวิกฤติ (r^*) พลังงานรวมก็จะลดลงอีกเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคของแข็งก็จะขยายตัวโตขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นนิวเคลียส อันเนื่องมาจากได้รับพลังงานอิสระเชิงปริมาตรที่ถูกปล่อยออกมาขณะที่โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวเพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวของแข็งขึ้นมาใหม่ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวม (ΔG_v) รัศมีของอนุภาคของแข็งที่มีรัศมีวิกฤติ (r^*) แสดงดังรูปที่ 2.18 อนุภาคของแข็งที่มีรัศมีวิกฤติ (r^*) นี้เราเรียกว่าเอมบริโอ (Embryo)

การเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) เป็นกระบวนการที่นิวเคลียสเกิดขึ้นภายในเนื้อของเหลวโดยไม่ต้องมีสิ่งแปลกปลอมมาเป็นศูนย์กลาง ต้องใช้พลังงานมากในการสร้างนิวเคลียส เนื่องจากต้องเอาชนะพลังงานผิวน้ำที่สูง การเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์นี้มักเกิดจากการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิแข็งตัวสมดุล (Equilibrium Freezing Temperature) ของโลหะนั้นๆ โดยการเกิดนิวเคลียสอะตอมจะเคลื่อนตัวมารวมกันและเกิดพันธะโลหะซึ่งกันและกัน

อย่างช้าๆ จนได้ขนาดที่เป็นเอมบริโอและขยายตัวโตขึ้นไปเป็นนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ รัศมีวิกฤติ (r^*) จะมีความเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะ ซึ่งเราเรียกว่า “Undercooling (ΔT)” โดยหาก ΔT มีค่ามากจะทำให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระเชิงปริมาตร (ΔG_v) มีค่ามากด้วย แต่พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว (ΔG_s) จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ขนาดของรัศมีวิกฤติ (r^*) มีความสัมพันธ์กับ ΔT ดังสมการ

$$r^* = \frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f \Delta T} \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เมื่อ ΔH_f คือ ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย

T_m คือ อุณหภูมิจุดแข็งตัว

ΔT คือ $T_m - T$ (ปริมาณ undercooling)

การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation) เป็นกระบวนการเกิดนิวคลีโอจากสิ่งเจือปนในโลหะหลอมเหลว หรือพื้นผิวของแบบหล่อเป็นตัวช่วย ซึ่งการเกิดนิวคลีโอแบบนี้ มักเกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อที่เป็นโลหะ ที่เป็นเช่นนี้เพราะในทางปฏิบัติเรามักใช้แบบหล่อในการหล่อโลหะให้เป็นรูปร่างต่างๆ ตามที่เราต้องการ ดังนั้นน้ำโลหะจึงต้องสัมผัสกับแบบหล่อหรืออาจมีสิ่งเจือปนอยู่ในน้ำโลหะหลอมเหลว ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์

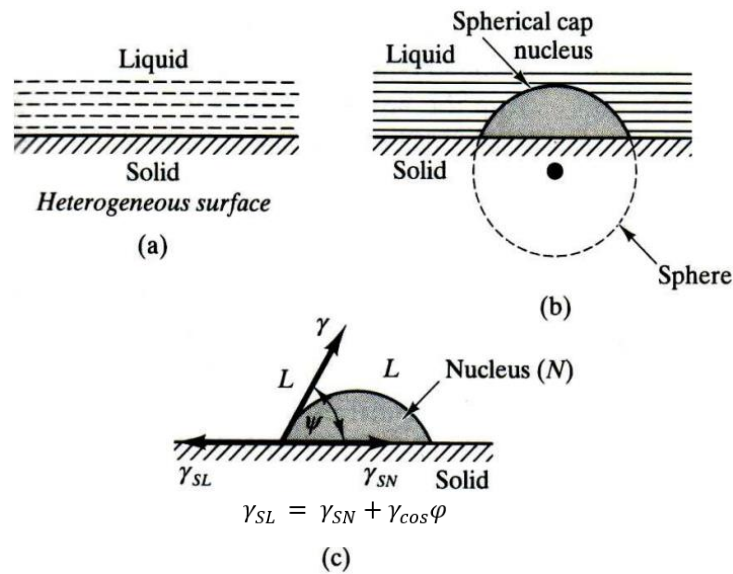
ขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์นี้จะเริ่มจากโลหะหลอมเหลวสัมผัสกับผิวของแข็งและเริ่มกำเนิดอนุภาคของแข็งขึ้นจากผิวของของแข็ง โดยอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมและมีพื้นผิวสัมผัสกับโลหะเหลว อนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นมาจะติดอยู่กับพื้นผิวของแข็งและมีมุมสัมผัส ϕ เกิดขึ้น การที่จะคงสภาพของอนุภาคของแข็งให้อยู่ได้จะต้องมีความสมดุลของความตึงผิว 3 ส่วน ดังสมการ

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SN} + \gamma_{cos\phi} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

เมื่อ γ_{SL} คือ พลังงานผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลว

γ_{SN} คือ พลังงานผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับนิวเคลียส

γ คือ พลังงานผิวสัมผัสของเหลวกับนิวเคลียส



รูปที่ 2.19 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ โดยการเกิดนิวคลีไอบนพื้นผิวของแข็ง [23]

การหาขนาดรัศมีวิกฤติของนิวเคลียส เราจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานว่านิวเคลียสมีรูปร่างทรงกลมและมีรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 2.19 b) โดยค่าของจะอยู่ระหว่าง $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ จะได้

$$r^* = \frac{-2\gamma}{\Delta G_v} \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อเปรียบเทียบค่าของรัศมีวิกฤติของนิวเคลียสแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์จะพบว่าปริมาตรของนิวเคลียสแบบเอกพันธ์จะมีขนาดที่โตกว่าปริมาตรนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ ดังสมการ

$$(V_c)_{\text{hom}} = \frac{4}{3} \pi r_c^3$$

$$(V_c)_{\text{het}} = \frac{2\pi r_c^3}{3} \left(1 - \frac{2}{3} \cos \varphi + \frac{1}{2} \cos^3 \varphi\right) \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

ดังนั้น พลังงานอิสระที่ใช้ในการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์จึงต้องการมากกว่าการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์และต้องการอุณหภูมิ Under Cooling น้อยกว่า จึงส่งผลให้การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์เกิดขึ้นง่ายกว่าแบบเอกพันธ์และในทางปฏิบัติชิ้นงานหล่อมักเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์มากกว่าแบบเอกพันธ์

2.5.3 การแข็งตัวของโลหะในแบบหล่อ

ในการผลิตชิ้นงานหล่อ เมื่อทำการเทโลหะหลอมเหลวลงไปในแบบหล่อ น้ำโลหะจะเกิดการแข็งตัว โดยเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็ง แล้วได้ชิ้นงานหล่อสำเร็จออกมาในที่สุด ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะในแบบหล่อ จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.20

1) เกรนละเอียด (Chilled Zone)

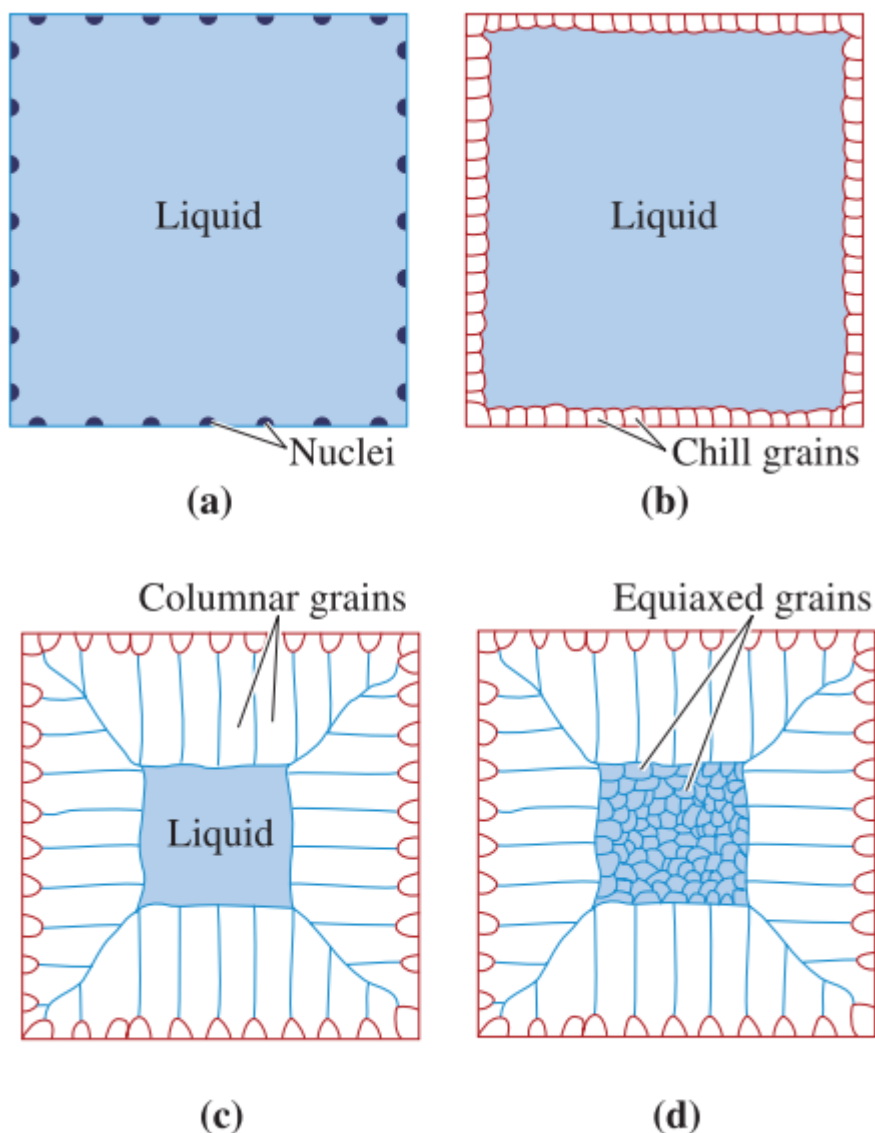
บริเวณที่เกิดเกรนละเอียดนี้จะอยู่บริเวณที่น้ำโลหะสัมผัสผิวของแบบหล่อและเป็นแถบเพียงบางๆ เท่านั้น ลักษณะของเกรนจะมีลักษณะเล็กและละเอียด ดังแสดงใน รูปที่ 2.20 (b) อันเนื่องมาจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงจึงทำให้มีอุณหภูมิ Under Cooling สูง ส่งผลให้รัศมีวิกฤติของนิวเคลียสมีขนาดเล็กและเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวของแบบหล่อเป็นบริเวณกว้าง ซึ่ง จะเป็นตัวช่วยสนับสนุนการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ขึ้นบริเวณดังกล่าว

2) เกรนแบบแท่ง (Columnar Zone)

ลักษณะของเกรนแบบแท่งจะมีลักษณะยาวคล้ายเสาเข็ม โดยปลายของผลึกจะยื่นไปในทิศทางเข้าหาศูนย์กลางของความร้อนและตั้งฉากกับผนังแบบหล่อ สาเหตุที่ทำให้ เกรนมีลักษณะเป็นแท่งยาว เพราะการขยายตัวของเกรนจะเป็นไปทุกทิศทาง แต่ว่าการขยายตัวออกทางด้านข้างจะไปชนเข้ากับขอบของเม็ดเกรนอื่นๆ ทำให้ไม่สามารถขยายออกด้านข้างได้ แต่สามารถขยายตัวออกไป บริเวณศูนย์กลางของแบบหล่อได้ ดังนั้น เกรนบริเวณนี้จึงมีลักษณะเป็นแท่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (c) อีกทั้ง ยังมีขนาดที่โตกว่าผลึกละเอียดบริเวณผนังแบบหล่อ อันเนื่องมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้จะต่ำกว่า นั่นเอง

3) เกรนแบบสม่ำเสมอ (Equiaxed Grain)

เม็ดเกรนแบบสม่ำเสมอนี้จะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของแบบหล่อ ที่เป็นเช่นนี้ เพราะน้ำโลหะบริเวณกึ่งกลางแบบหล่อจะถ่ายเทความร้อนอย่างช้าๆ และถ่ายเทได้ทุกทิศทาง ทำให้ผลึกขยายตัวได้ทุกทิศทาง จึงส่งผลให้มีลักษณะที่เป็นทรงสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (d)



รูปที่ 2.20 ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะในแบบหล่อ [24]

2.6 เกรนรีไฟน์เมนต์ (Grain refinement)

เกรนรีไฟน์เมนต์เป็นกระบวนการที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมโลหะและการผลิตวัสดุ โดยมีจุดประสงค์หลักในการควบคุมและปรับปรุงขนาดเกรนหรือผลึกของโลหะขณะเย็นตัวและแข็งตัว กระบวนการนี้ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของโลหะดีขึ้นในหลายด้าน ได้แก่

1) การกระจายตัวของธาตุผสมดีขึ้น เกรนที่มีขนาดเล็กช่วยให้ธาตุผสมหรือสารเติมแต่งในโลหะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งช่วยให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของโลหะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นทั้งชิ้น

2) สมบัติเชิงกลเท่ากันทุกทิศทางมากขึ้น เกรนที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ช่วยให้โลหะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีความสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทานในทุกมิติ

3) โอกาสเกิดการฉีกขณะร้อนน้อยลง การลดขนาดเกรนทำให้โลหะมีความเหนียวและทนทานมากขึ้น ซึ่งช่วยลดโอกาสเกิดการฉีกขาดหรือแตกร้าวขณะโลหะอยู่ในอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญในกระบวนการหล่อและการขึ้นรูปโลหะ

4.) เหมาะสมสำหรับการอบชุบทางความร้อน เกรนที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอทำให้โลหะสามารถตอบสนองต่อกระบวนการอบชุบทางความร้อนได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกระบวนการที่ต้องการควบคุมความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งาน

โดยรวมแล้ว เกรนรีไฟน์เมนต์เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์อย่างมากในทุกด้านของโลหะวิทยา และไม่ก่อให้เกิดผลเสียทางโลหะวิทยา ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงขนาดและโครงสร้างของเกรนช่วยเพิ่มคุณภาพของโลหะในทุกด้านตั้งแต่ความแข็งแรงไปจนถึงความทนทานและความสามารถในการทำงานในสภาวะต่าง ๆ

โลหะผสมแต่ละชนิดใช้สารเติมเกรนรีไฟน์เนอร์ (Grain refiner) ต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น

1) โลหะผสมอะลูมิเนียม ได้แก่ โลหะผสม Ti-B (ส่วนผสม 3 – 10%Ti และ 0.2 – 1.0%B) (รูปที่ 2.21)

2) โลหะผสมแมกนีเซียม ได้แก่ Zr

3) เหล็กกล้า ได้แก่ Al หรือ Ti

4) เหล็กหล่อ ได้แก่ Al, Ca, Ba, Sr โดยมี Ferro silicon (FeSi) เป็นพาหะ เรียกว่า “อินนอคูลแลนต์” ตัวอย่างส่วนผสมของอินนอคูลแลนต์แสดงดังตารางที่ 2.2

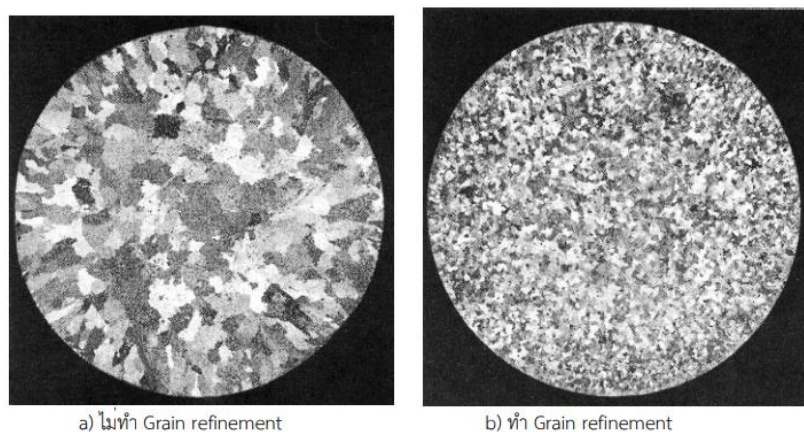
เกรนรีไฟน์เมนต์ที่เหมาะสมควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

1) มีโครงสร้างผลึกที่เข้ากันได้กับโลหะผสมของงานหล่อ

2) มีจุดหลอมตัวสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับจุดหลอมตัวของงานหล่อ

3) มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับโลหะหลอมเหลว

4) มีความสามารถในการเปียกผิว (Wettability) ที่ดีกับโลหะหลอมเหลว



รูปที่ 2.21 โครงสร้างมหภาคของงานหล่อ Al-7Si ที่ผ่านการทำเกรนรีไฟน์เมนต์ด้วยการเติมโลหะผสม Ti-B [25]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างส่วนผสมของอินนอคูแลนต์สำหรับการผลิตเหล็กหล่อ

Si	Al	Ca	Ba	Ce	TRE	Ti	Mn	Sr
46 – 50	0.5 – 1.2	0.6 – 0.9						
74 – 79	1.25 max	0.5 – 1.0						
74 – 79	0.7 – 1.5	1.0 – 1.5						
46 – 50	1.25 max	0.7 – 1.2	0.7 – 1.2				1.25 max	
60 – 65	0.8 – 1.5	1.5 – 3.0	4.0 – 6.0				7 – 12	
70 – 74	0.8 – 1.5	0.8 – 1.5	0.7 – 1.3					
42 – 44		0.7 – 1.2				9 – 11		
50 – 55		5.0 – 7.0				9 – 11		
50 – 55		0.5 – 1.5				9 – 11		
36 – 40				9 – 11	10 – 15			
46 – 50	0.5 max	0.1 max						0.6 – 1.0
73 – 78	0.5 max	0.1 max						0.6 – 1.0

สำหรับเกรนรีไฟน์เมนต์ในเหล็กหล่อนั้น รู้จักกันในชื่อ “อินนอคูเลชัน (Inoculation)” โดยอินนอคูแลนต์ส่วนใหญ่มี FeSi เป็นพาหะและมีธาตุอื่น ๆ ได้แก่ Al, Ca, Ba, Bi, Sr, Rare earth (RE) ซึ่งช่วยลดโอกาสเกิดชิลล์ (Chill) ในส่วนบางของชิ้นงานและช่วยลดอัตราการจางลงของอินนอคูเลชันโดยเฉพาะเกรดที่มี Ba, Bi และแรเอิร์ทเป็นองค์ประกอบ อัตราการเติมอินนอคูแลนต์ของเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวอยู่ในช่วง 0.1 – 0.3% และ 0.3 – 1.0% โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยหากเติมมากกว่าในช่วงนี้อาจเกิดปัญหา อินนอคูแลนต์ไม่ละลาย การสะสมตัวในเลตเติล การอุดตันฟิลเตอร์ เป็นต้น

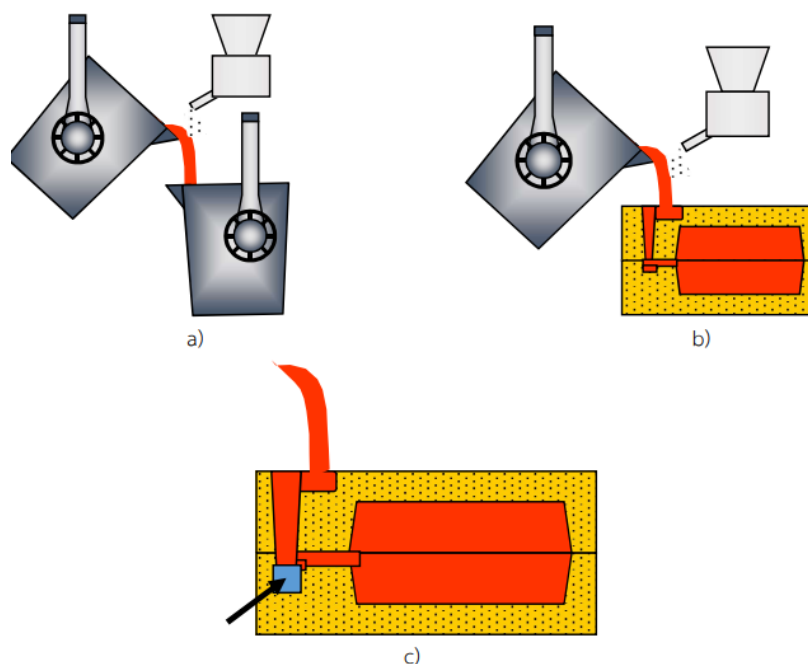
2.6.1. วิธีการทำอินนอคูเลชัน

มีทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่

1. ทรานสเฟอร์เลเดิล (Transfer ladle) เป็นวิธีที่นิยมที่สุดคือการเติมสารอินนอคูแลนต์ในเหล็กหลอมเหลวที่กำลังถูกถ่ายเทไปสู่เลเดิลโดยมีเทคนิคคือควรให้เลเดิลมีเหล็กหลอมเหลวประมาณหนึ่งก่อนเติม โดยไม่ควรวางอินนอคูแลนต์ไว้ที่ก้นเลเดิลเพราะอาจเกิดการเผาฟุ้งกับผนังวัสดุทนไฟได้ ทั้งนี้หากเติมอินนอคูแลนต์จากผิวหน้าเหล็กหลอมเหลวที่เต็ม เลเดิลแล้วจะไม่ได้ผลดี เนื่องจากการผสมไม่สม่ำเสมอ และอินนอคูแลนต์อาจติดค้างที่สแลกได้ หลังจากทำอินนอคูเลชันแล้ว ควรเทหล่อทันที เนื่องจากผลจะจางหายไป (โดยทั่วไปผลจะจางลงครึ่งหนึ่งภายใน 5 นาที และหมดประสิทธิภาพโดยสิ้นเชิงภายใน 9 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอินนอคูแลนต์ที่ใช้) การป้อนอินนอคูแลนต์อาจใช้อุปกรณ์ป้อนผงอินนอคูแลนต์ด้วยแรงโน้มถ่วง หรืออาจใช้แรงดันอากาศช่วยพ่น หรือใช้วิธีป้อนลวดอินนอคูแลนต์ (เกรด Fe-75Si) ลงจากทางผิวหน้าของเลเดิล

2. อินสตรีม (In-stream) เป็นการเติมในเหล็กหลอมเหลวขณะถูกเทสู่แบบหล่อ ซึ่งอาจทำเพื่อเสริมการทำ Transfer ladle ได้ ข้อได้เปรียบที่ชัดเจนคือได้ผลจากอินนอคูเลชันเต็มที่ เนื่องจากไม่ต้องรอเทลงแบบหล่อ ข้อจำกัดสำคัญคือต้องระวังกรณีที่อินนอคูแลนต์หลอมละลายไม่สมบูรณ์ ทำให้เป็นอนุภาคฝังภายในงานหล่อ หรือทำให้โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อไม่สม่ำเสมอ ปัจจัยที่ต้องควบคุมได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณซิลิกอนใน เหล็กหลอมเหลว ปริมาณอินนอคูแลนต์ที่ใช้ การทำอินนอคูเลชันแบบ In-stream มีความเสี่ยงประการหนึ่ง คือมีโอกาสที่อินนอคูแลนต์จะไม่โดนลำโลหะหลอมเหลวและไปปะปนอยู่กับทรายแบบ ทำให้ไม่ได้ผลตาม ต้องการ

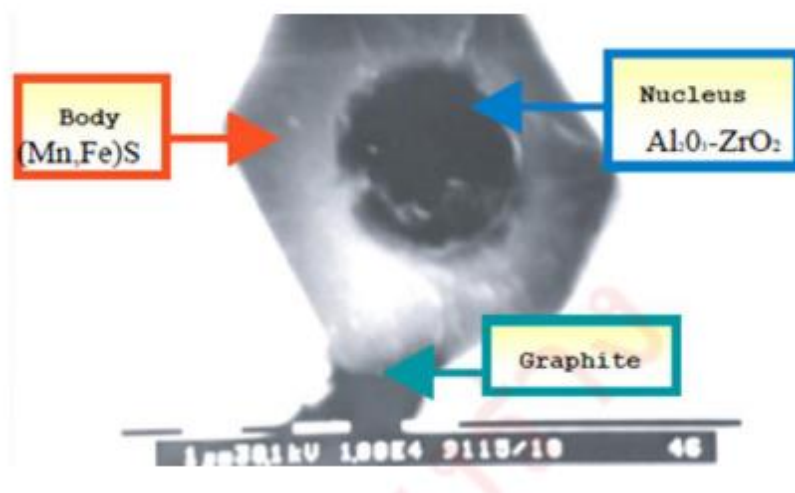
3. อินมอลด์ (In-mold) ใช้วิธีวางอินนอคูแลนต์ไว้ในระบบทางเดินโลหะหลอมเหลว เช่น บนฟิลเตอร์ เมื่อเหล็กหลอมเหลวไหลผ่านจะเกิดปฏิกิริยาและไหลเข้าสู่แบบหล่อ ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือได้ผลของอินนอคูเลชัน เต็มที่ นอกจากนี้ยังสามารถได้ระดับของอินนอคูเลชันในแต่ละแบบต่างกันได้ด้วยเหล็กหลอมเหลวเท่าเดียวกัน



รูปที่ 2.22 วิธีการทำอินนอคูลูชัน; a) ทรานสเฟอร์เลเติล; b) อินสตรัม; c) อินโมลต[25]

กลไกของอินนอคูลูชัน คือการทำให้เกิดเกรไฟต์ที่เล็กละเอียดจากการเกิดนิวเคลียสเทียม (Heterogeneous nucleus) ในขณะที่ยเหล็กหลอมเหลวลดอุณหภูมิมาอยู่ในช่วงอุณหภูมิยูเทคติก ทำให้เกรไฟต์ยูเทคติกเกิดขึ้นได้ง่ายโดยไม่ต้องทำให้อัตราการเย็นตัวเร็ว หรือมีค่าอันเดอคูลิงสูงในระดับหนึ่งและการเกิดเกรไฟต์ยูเทคติกจะเป็นหน่วยยูเทคติกเซลล์ที่มีขนาดเล็ก

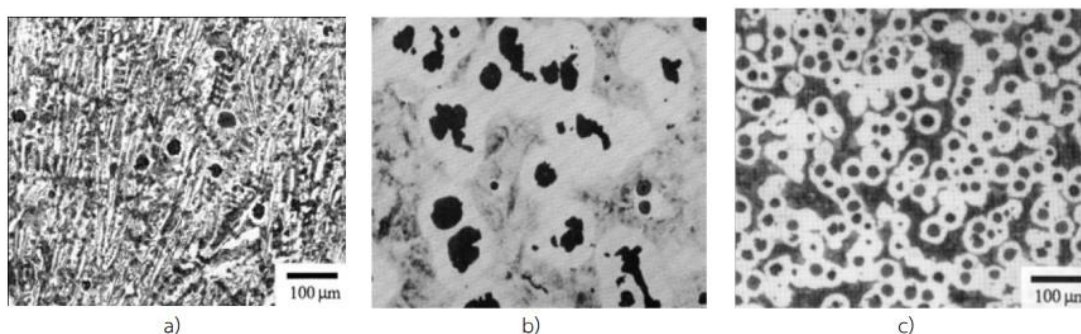
ในขั้นแรกจะเกิดการก่อตัวของสิ่งแปลกปลอมที่เป็นอนุภาคของธาตุขนาดเล็กที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ดังรูปที่ 2.23 (โดยออกไซด์ที่มักพบจะเป็นของธาตุ พวก Al + (Mn, Si, Ti, Sr, Zr เป็นต้น) จากนั้นจะเกิดการก่อตัวของสารประกอบ (Mn,X)S บนผิวของสิ่งแปลกปลอมขนาดเล็กที่ก่อตัวไปแล้วก่อนหน้านี้ สุดท้ายเกรไฟต์ก็จะไปจับตัวบน (Mn,X)S ซึ่งบางครั้งมีการทำการปรับสภาพเบื้องต้น (Preconditioning) หลังจากการกำจัดสแลกก่อนเทเพื่อเตรียมน้ำเหล็กให้มีนิวเคลียสเทียมก่อนและทำอินนอคูลูชันเพิ่มจำนวนเกรไฟต์ให้มากขึ้น



รูปที่ 2.23 ลักษณะของนิวเคลียสเทียมในน้ำโลหะหลอมเหลว [26]

เทคนิคการเติมอินออกซูลেন্টมีผลอย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพ การทำอินออกซูลชันในเบ้า (Ladle inoculation) คือการเติมสารอินออกซูลেন্টอย่างต่อเนื่องลงในน้ำโลหะที่ไหลอยู่เพื่ออาศัยการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำโลหะช่วยให้สารอินออกซูลেন্টกระจายทั่วถึงและสม่ำเสมอ การทำอินออกซูลชันอาจทำร่วมกับระบบเตาชนิดเทอัตโนมัติ (Automatic pouring furnace) ซึ่งเรียกว่าการทำอินออกซูลชันแบบโปรยในน้ำโลหะหลอมเหลวที่กำลังเทลงเบ้า (Zn-stream inoculation) โดยใช้สารอินออกซูลেন্টที่ละเอียดขนาดเล็กกว่าและใช้อัตราเติมที่ต่ำกว่าแบบการทำในเบ้า ช่วงเวลาตั้งแต่เติมสารอินออกซูลেন্টจนถึงการเทน้ำโลหะลงในแบบควรจะสั้นที่สุดเพราะหากทิ้งไว้นานจะทำให้สารอินออกซูลেন্টนั้นจางหายไปซึ่งสารอินออกซูลেন্টแต่ละชนิดก็มีอัตราการเสื่อมที่แตกต่างกันออกไป นอกจากเทคนิคการเติมทั้งสองแบบได้กล่าวไปแล้ว อาจใช้สารอินออกซูลেন্টที่เป็นเม็ดขนาดเล็กวางไว้ในรูเทหรือทางวิ่งของน้ำโลหะในแบบ สารอินออกซูลেন্টจะทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะภายในแบบหล่อซึ่งเราเรียกเทคนิคนี้ว่าการทำอินออกซูลชันในแบบหล่อ (In-mould inoculation) โดยสารอินออกซูลেন্টที่ใช้ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักได้แก่ กลุ่ม Graphite (C) กลุ่ม Ferrosilicon (FeSi) และกลุ่ม Calcium silicide (CaSi)

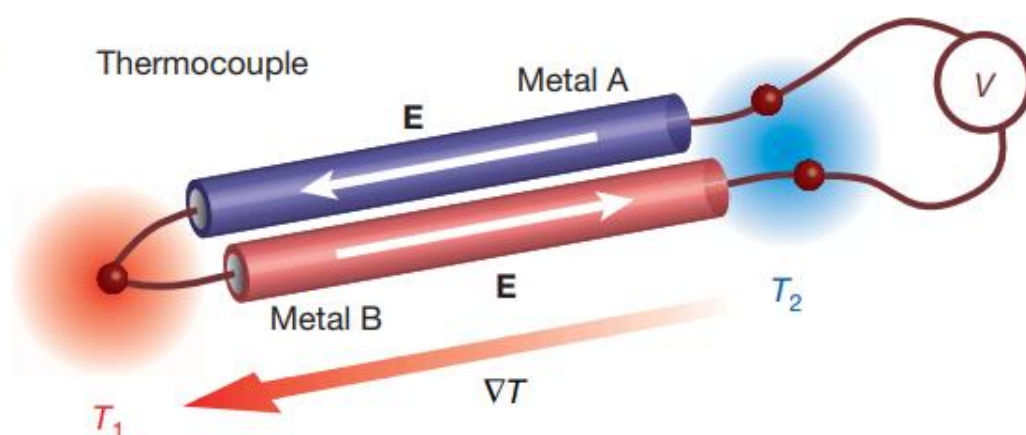
นอกจากการทำอินออกซูลชันในเหล็กหล่อช่วยให้ได้โครงสร้างที่ละเอียดขึ้นแล้ว ยังช่วยลดปัญหาโอกาสเกิดชิลล์ด้วย รูปที่ 2.24 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่ผ่านและผ่านการทำอินออกซูลชันจะเห็นได้ว่าการทำอินออกซูลชันช่วยแก้ไขการเกิดชิลล์และทำให้ได้โครงสร้างที่ละเอียดขึ้นในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว a) ไม่อินนอคคูเลชัน;
b) ทำอินนอคคูเลชันได้ไม่ดี; c) ทำอินนอคคูเลชันได้ดี [25]

2.7 หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิในหลายอุตสาหกรรม โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เซเบก (Seebeck Effect) ซึ่งถูกค้นพบโดย Thomas Johann Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF) ในวงจร เมื่อมีการเชื่อมต่อโลหะสองชนิดที่ต่างกันและปลายทั้งสองของโลหะนั้นมีอุณหภูมิต่างกัน ถ้าจุดทั้งสองจุดมีอุณหภูมิต่างกันจะทำให้มีการไหลของกระแสในวงจรโลหะตัวนำทั้งสอง (รูปที่ 2.25)



รูปที่ 2.25 หลักการของเทอร์โมคัปเปิล [27]

เทอร์โมคัปเปิลมีหลากหลายชนิดทำมาจากโลหะต่างชนิด จึงมีช่วงวัดอุณหภูมิที่ต่างกัันด้วย แสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของช่วงอุณหภูมิและวัสดุตัวนำการวัดของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด

ชนิด	ส่วนประกอบของวัสดุตัวนำ		อุณหภูมิ (°C)
	ขั้วบวก (+)	ขั้วลบ (-)	
B	70%Platinum,30%Rhodium	94%Platinum,6% Rhodium	600 - + 1,700°C
E	90%Ni,10%Cr	Constantan 55%Cu,45%Ni	-200 - + 800°C
K	90%Ni,10%Cr	95%Ni,2%Mn,2%Al	-200 - + 1,200°C
J	99.5%Iron	100%Platinum	-200 - + 800°C
T	100%Copper	Constantan 55%Cu,45%Ni	-200 - + 350°C
R	87%Platinum,13%Rhodium	100%Platinum	0 - + 1,600°C
S	90%Platinum,10%Rhodium	100%Platinum	0 - + 1,600°C

ในส่วนองงานวิจัยนี้มีการศึกษาผลของบิสมัทที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งถูกหลอมเหลวในเตาแบบเหนียวนำด้วยกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,500°C ก่อนเทลงเบ้ารับน้ำโลหะและลงแบบหล่อทรายที่อุณหภูมิ 1380°C ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ S เพราะเหมาะสำหรับงานวัดอุณหภูมิสูงและวัดอุณหภูมิได้ต่อเนื่อง โดยสามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,600°C