

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม

กระบวนการรีดเหล็กแผ่นร้อนมีปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็ก ได้แก่

1. ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก
2. การควบคุมการรีดในกระบวนการรีดร้อน

2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก

การพัฒนาสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงให้ได้ผลดี จำเป็นต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของธาตุผสมปริมาณน้อยมากในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพื่อนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเบื้องต้นประสิทธิภาพของการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนในเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงขึ้นกับความสามารถในการละลาย และพฤติกรรมการตกตะกอนของอนุภาคจากธาตุผสมปริมาณน้อยมาก¹

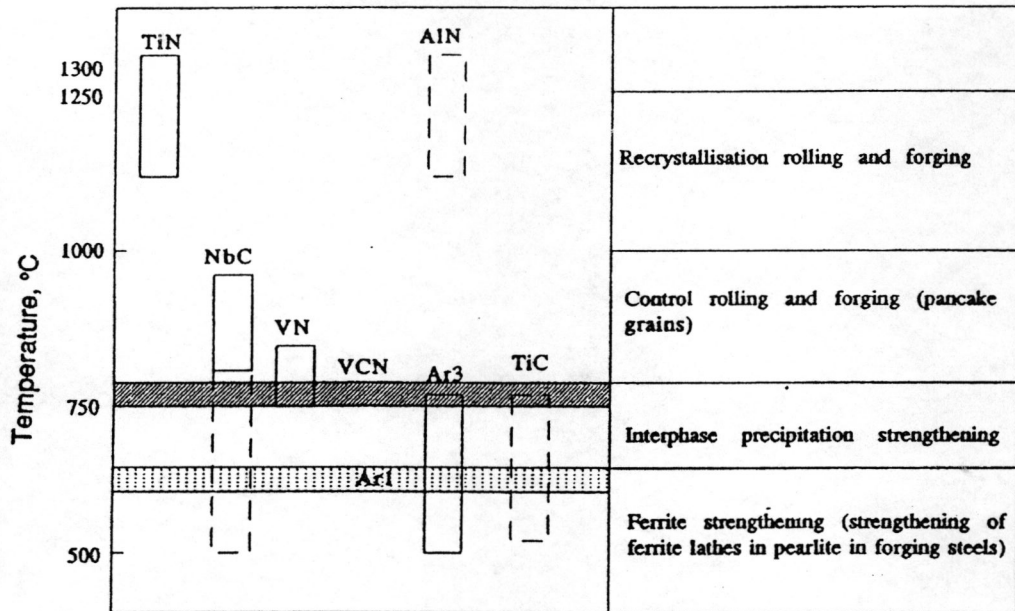
สำหรับเหล็กกล้าไนโอเบียมในสภาพรีดจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากการตกตะกอน ในเหล็กกล้าที่มีไนโอเบียม 0.03% แรงครากเพิ่มสูงสุดเนื่องมาจากการตกตะกอนของไนโอเบียมคาร์ไบด์ประมาณ 120 MPa และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณไนโอเบียม และอนุภาคตกตะกอนที่มีขนาดเล็ก²

บทบาทของอนุภาคที่ตกตะกอนของธาตุผสมปริมาณน้อยมาก ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดการตกตะกอน โดยสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเหล็ก และอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของออสเทนไนท์ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดสารประกอบคาร์ไบด์ และไนตรายด์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัวของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ แสดงในรูปที่ 2.1

บทบาทไนโอเบียมต่อการขัดขวางการโตขึ้นของเกรนเฟอร์ไรท์ในขณะการม้วนเก็บ เป็นกลไกเดียวกันกับการขัดขวางการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์ โดยการมีอนุภาคขนาดเล็กขัดขวางการโตขึ้นของเกรนเฟอร์ไรท์ ส่วนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนในเกรนเฟอร์ไรท์เกิดจากการตกตะกอนของอนุภาคคาร์ไบด์และไนตรายด์ขนาดเล็กในระหว่างการเปลี่ยนเฟสและหลังการเปลี่ยนเฟส เนื่องจากการละลายของธาตุผสมในเฟอร์ไรท์น้อยกว่าการละลายได้ในออสเทนไนท์³

รูปที่ 2.1 เป็นข้อมูลจากสภาวะสมดุล แต่การนำไปใช้งานจริงพบว่า ถ้าใช้อัตราการเย็นตัวสูงจะลดอุณหภูมิที่เกิดอนุภาคตกตะกอนเหล่านั้น ในทางปฏิบัติสำหรับไนโอเบียมคาร์ไบด์ในไนตรายด์จะตกตะกอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 °C และจะส่งผลต่อการป้องกันการตกผลึกใหม่ ทำให้

เกิดเกรนรียาว³ เหตุผลที่เป็นไปได้ของประสิทธิภาพของไนโอเบียมในการหน่วงการตกผลึกใหม่ที่ สำคัญคือ ไนโอเบียมคาร์ไบด์ในตราชายด์ตกตะกอนบนขอบเกรนย่อย (sub-boundary)⁴ ไนโอเบียม จึงถูกใช้อย่างมากในการผลิตท่อ (pipe line) ที่มีเกรนละเอียด และเหล็กกล้าโครงสร้าง³



รูปที่ 2.1 อุณหภูมิที่เกิดสารประกอบคาร์ไบด์และไนตรายด์สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเย็นตัว³

2.2 การควบคุมการรีดในกระบวนการรีดร้อน

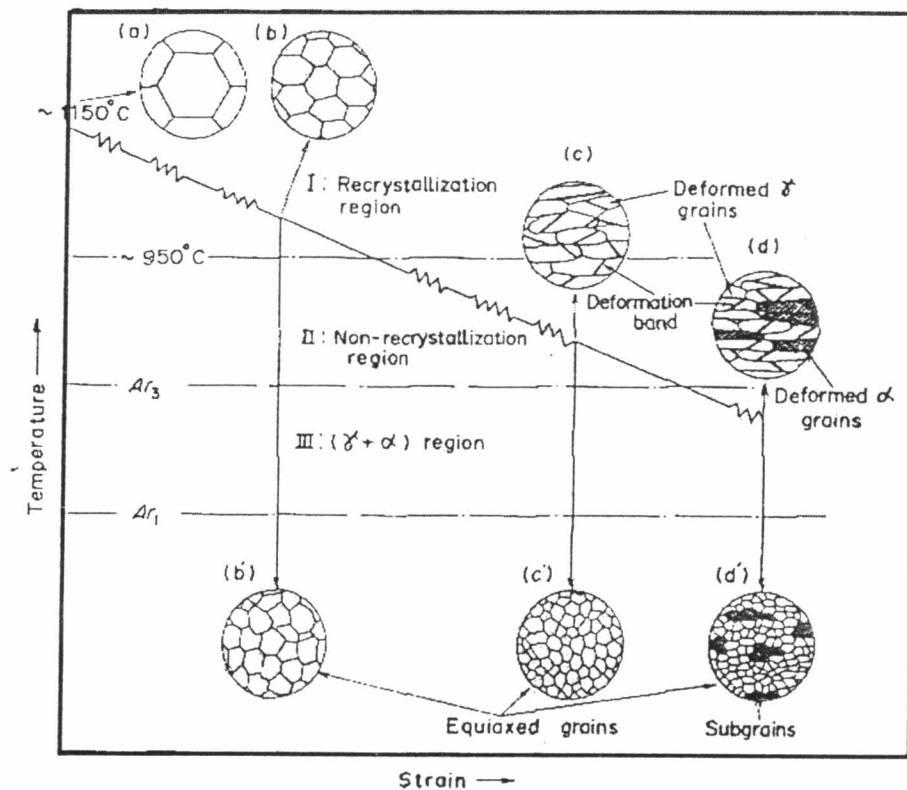
กระบวนการรีดร้อนในงานวิจัยนี้ มีดังนี้

1. การอบให้ร้อนขึ้นอีก (reheating)
2. การรีดหยาบในช่วงตกผลึกใหม่ (roughing rolling in recrystallized region)
3. การรีดสุดท้ายในช่วงที่ไม่ตกผลึกใหม่ (finishing rolling in non-recrystallized region)
4. การม้วนเก็บ (coiling)

รูปที่ 2.2⁵ แสดงการควบคุมการรีด 3 ขั้นตอนในกระบวนการรีดร้อน และแสดงโครงสร้างจุลภาคในแต่ละขั้นตอน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เพียง 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ; ปริมาณการรีดและการตกผลึกใหม่ทำให้เกรนอสเทนไนท์ (a) ขนาดเล็กลง (b) แต่ก็ยังถือว่าเป็นขนาดเกรนที่ใหญ่อยู่

ขั้นตอนที่ 2 ; การรีดในช่วงไม่ตกผลึกใหม่ (unrecrystallization) ทำให้ได้เกรนรียาว (elongated grain)(c) นิวเคลียสเฟอร์ไรท์จะเกิดตามขอบเกรนอสเทนไนท์ทำให้ได้เกรนเฟอร์ไรท์ละเอียด(c')



รูปที่ 2.2 การควบคุมการรีด (Controlled rolling) ในกระบวนการรีดร้อน โดยสังเขป⁵

2.2.1. การอบให้ร้อนขึ้นอีก

อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายของไนโอเบียม แสดงในรูปที่ 2.3⁶ เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของ S.S.Hansen⁸ ที่ทดสอบกับเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีไนโอเบียม 0.03% โดยใช้อุณหภูมิอบ (solutionizing temperature) ที่ 1250 °C และ 1100 °C ผลปรากฏว่าที่ 1250 °C ไม่พบอนุภาคตกตะกอนละเอียด (น้อยกว่า 10 นาโนเมตร) ในขณะที่ 1100 °C ยังคงมีคาร์ไบด์ที่ยังละลายไม่หมด

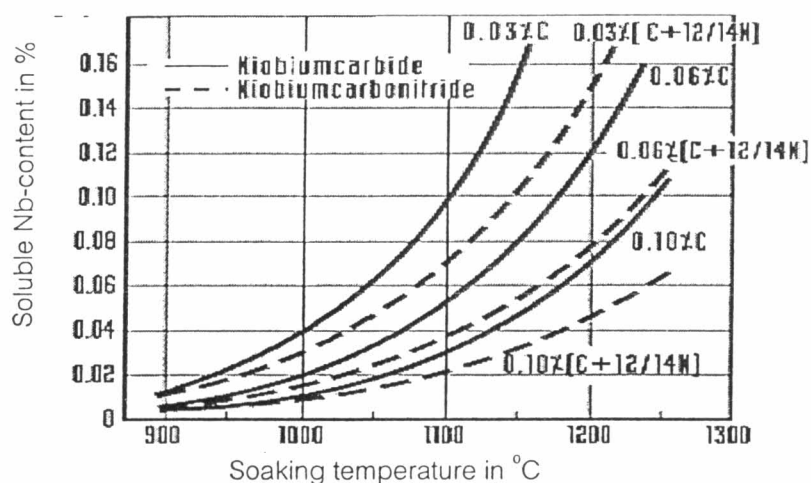
K.J.Irvine และคณะ⁸ เสนอความสัมพันธ์ของความสามารถในการละลายของสารประกอบคาร์ไบด์และไนตรายด์ ดังนี้

$$\text{Log}[\text{Nb}][\text{C}+12/14\text{N}] = 2.26 - 6770/T \quad (2-1)$$

โดยที่ $[\text{Nb}]$ $[\text{C}]$ $[\text{N}]$ คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุผสมที่ละลายอยู่
 T คืออุณหภูมิที่ใช้ในการละลายมีหน่วยเป็นเคลวิน

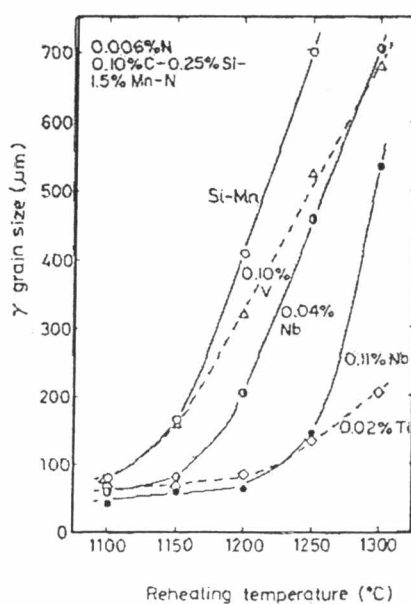
$$\log [\text{Nb}][\text{C}] = 2.96 - 7510/T \quad \dots \text{Nordberg and Aronsson}$$

$$\log [\text{Nb}][\text{C}+12/14\text{N}] = 2.26-6770/T \quad \dots \text{Irvin}$$



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการละลายของไนโอเบียมคาร์ไบด์และไนโอเบียมคาร์บอนไทรไนด์ในเหล็กคาร์บอนต่ำ⁶

นอกจากการพิจารณาความสามารถการละลายของธาตุผสมแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งคือขนาดเกรนอสเทนไนท์ที่อุณหภูมิสูง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนอสเทนไนท์กับอุณหภูมิร้อนขึ้นอีก ดังแสดงในรูปที่ 2.4⁹



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนอสเทนไนท์กับอุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก⁹

ในรายงานฉบับเดียวกันของ S.S.Hansen⁷ ยังได้เปรียบเทียบขนาดเกรน และพบว่าที่ 1250 °C ได้ขนาดเกรน 405 ไมครอน แต่ที่ 1100 °C ขนาดเกรนเพียง 40 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ Gladman¹⁰ ที่ว่าผลดังกล่าวมาจากการขัดขวางของอนุภาคตกตะกอน (precipitate-pinning)

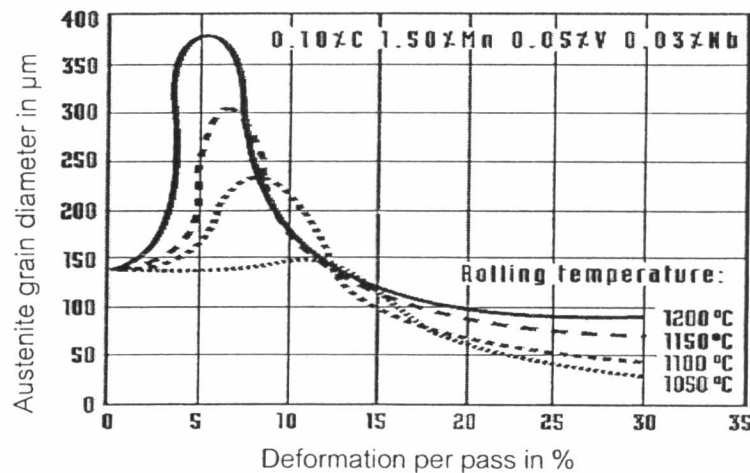
2.2.2. การรีดหยาบในช่วงตกผลึกใหม่

จุดประสงค์การรีดในช่วงการตกผลึกใหม่คือ เพื่อให้เกรนอสเทนไนต์มีขนาดเล็กมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยขณะรีดจะมีการตกผลึกใหม่ (recrystallization)^{11,12} ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้รีดจึงต้องสูงกว่า อุณหภูมิหยุดการตกผลึกใหม่ (recrystallization stop temperature) ความสัมพันธ์ของขนาดเกรนอสเทนไนต์กับปริมาณการแปรรูปที่อุณหภูมิแปรรูปต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.5¹³

สูตรความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนอสเทนไนต์หลังการตกผลึกใหม่กับอัตราการขึ้นรูปเป็นไปดังสมการ¹⁴

$$N_R = -8.3E^{-1/2} + 1/3(N_{i0}) + 1/100(1200 - T) + 8.8 \quad (2-2)$$

โดย N_R และ N_{i0} เป็นขนาดเกรนหลังการตกผลึกใหม่และเกรนเริ่มต้น(ก่อนตกผลึกใหม่) ตามมาตรฐาน ASTM E112 ตามลำดับ

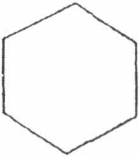
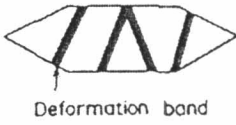

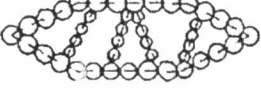




รูปที่ 2.5 ขนาดเกรนอสเทนไนต์ตกผลึกใหม่กับปริมาณการแปรรูปของเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำ¹³

จากรูป 2.5 พบว่าถ้าปริมาณการแปรรูปน้อย (น้อยกว่า 10% โดยประมาณ) จะทำให้ไม่มีการตกผลึกใหม่ ส่งผลให้เกรนโต (grain growth) โดยทั่วไปแล้วจะใช้ปริมาณการรีดเพื่อให้ได้ขนาดเกรนอสเทนไนต์หลังการรีดอยู่ที่ 50 ไมครอน¹³

2.2.3. การรีดสุดท้ายในช่วงไม่ตกผลึกใหม่

จุดประสงค์การรีดสุดท้ายในช่วงไม่ตกผลึกใหม่เพื่อเพิ่มบริเวณที่จะเกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6¹⁵

	Conventional hot-rolling	Controlled rolling
γ grain structure		 Deformation band
Nucleation of α grain		
α grain structure		

รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบแปรรูปภายใน (deformation band) และบริเวณการเกิดนิวเคลียสของเกรนเฟอร์ไรท์ในการรีดร้อน¹⁵

จากรูปที่ 2.6 การเติมไนโอเบียมเพื่อเกิดอนุภาคไนโอเบียมคาร์ไบโบในตรายด์ที่มีขนาดเล็กตกตะกอนออกมาซึ่งสามารถยับยั้งการตกผลึกใหม่ของเกรนออสเทนไนท์ ทำให้ได้เกรนออสเทนไนท์แบบรียาว และมีแถบการแปรรูปอยู่ภายใน (deformation band) ซึ่งเป็นการเพิ่มบริเวณและความหนาแน่นของการเกิดเกรนเฟอร์ไรท์ ทำให้ได้เกรนเฟอร์ไรท์ขนาดเล็ก³

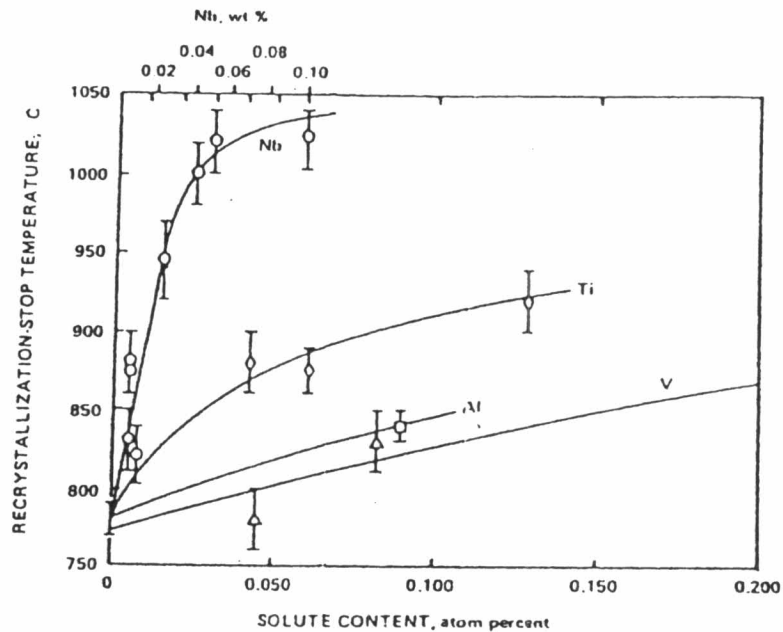
การรีดสุดท้ายจะรีดในช่วงอุณหภูมิหยุดการตกผลึกใหม่ (recrystallization stop temperature : T_{nr}) กับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส (A_{r3}) เพราะถ้ารีดต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนเฟส จะทำให้ได้เกรนที่ไม่ต้องการซึ่งเป็นเกรนผสมระหว่างเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ และส่งผลให้ได้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ที่ไม่สม่ำเสมอ¹⁶ การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ T_{nr} และ A_{r3} ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการตรวจสอบ แสดงในตาราง 2.1^{17,18} และผลของปริมาณธาตุผสมต่ออุณหภูมิหยุดการตกผลึกใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.7¹⁹

ตารางที่ 2.1 ค่าที่ได้จากการตรวจสอบและจากการคำนวณอุณหภูมิ T_{nr} และ A_{r3} ($^{\circ}C$) ของเหล็กเกรดต่าง ๆ^{17,18}

Grade	T_{nr} measure	T_{nr} calc.*	A_{r3} measure	A_{r3} calc.**
Nb	945	980	755	766
Nb-Ti	925	956	760	759
Low Nb-Ti	860	841	740	772

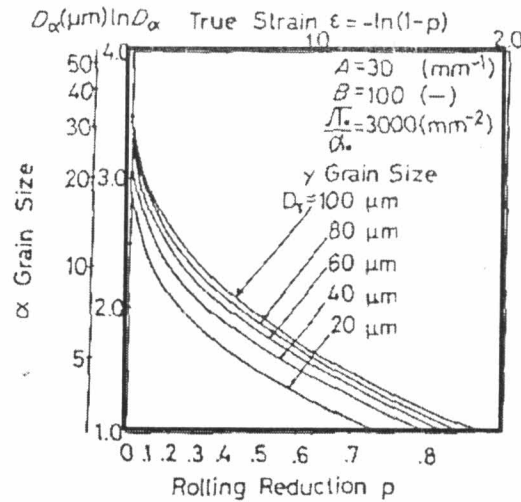
$$*T_{nr} = 887 + 464C + (6445Nb - 644Nb^{1/2}) + (732V - 230V^{1/2}) + 890Ti + 363Al - 357Si \quad (2-3)$$

$$**A_{r3} = 910 - 310C - 80Mn - 20Cu - 15Cr - 55Ni - 80Mo \quad (2-4)$$



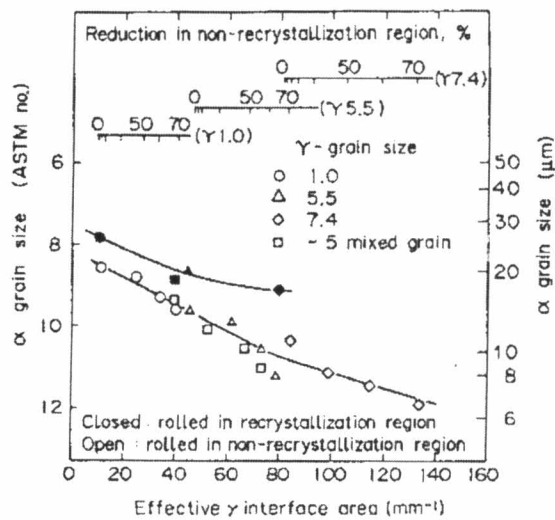
รูปที่ 2.7 ผลของการเพิ่มปริมาณธาตุผสมปริมาณน้อยมากต่ออุณหภูมิหยุดการตกผลึกใหม่¹⁹

จากรูปที่ 2.7 ปริมาณไนโอเบียมที่ละลายในสภาพสารละลายของแข็ง 0.04% สามารถทำให้อุณหภูมิหยุดการตกผลึกใหม่สูงถึงประมาณ $1030^{\circ}C$ ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนอสเทนไนท์, ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ และปริมาณการรีด แสดงในรูปที่ 2.8²⁰ ซึ่งทำให้สามารถประมาณเกรนเฟอร์ไรท์ที่เกิดมาจากเกรนอสเทนไนท์ที่ถูกแปรรูป สัมพันธ์กับปริมาณการรีดและเกรนอสเทนไนท์ก่อนรีดสุดท้ายขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์กับปริมาณการรีดครั้งสุดท้ายที่ขนาดเกรนออสเทนไนต์ต่าง ๆ²⁰

ความสัมพันธ์ของขนาดเกรนเฟอร์ไรท์กับค่าบ่งบอกพื้นที่ที่เกิดนิวเคลียสของเฟอร์ไรท์ (S_v) แสดงในรูปที่ 2.9²¹ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการรีดในช่วงไม่ตกผลึกใหม่จะส่งผลต่อความละเอียดของเกรนเฟอร์ไรท์มากกว่าการรีดในช่วงตกผลึกใหม่ Ouchi²² อธิบายโดยแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงซึ่งหาได้จาก $N_s \times S_v$ โดย N_s คืออัตราการเกิดนิวเคลียสต่อพื้นที่ สำหรับเกรนออสเทนไนต์ที่เล็กลงโดยกลไกการตกผลึกใหม่จะส่งผลต่อเฉพาะค่า S_v ในขณะที่เกรนออสเทนไนต์ที่ถูกรีดในช่วงไม่ตกผลึกใหม่จะทำให้ภายในเกรนรียาวนั้นมีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง เกิดโครงสร้างย่อย (substructure) รวมทั้งแถบแปรรูปภายใน ซึ่งส่งผลให้ค่า N_s สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์กับค่า Effective austenite interface area (S_v)²¹

สำหรับเกรนอสเทนไนท์ที่ถูกรีด Ouchi¹⁸ แสดงค่า S_v ของขอบเกรน (gb) และแถบแปรรูปภายใน (db) ดังนี้²³

$$S_v(\text{gb} + \text{db}) = 0.429(N_L)_{//} + 1.571(N_L)_{\perp} \text{ มม.}^{-1} \quad (2-5)$$

โดย $(N_L)_{//}$, $(N_L)_{\perp}$ คือจำนวนจุดตัดบนเส้นที่ลากตามแนวขนานและเส้นตามแนวตั้งฉากกับแนวการรีดตามลำดับ

ถ้าลากเส้นยาว 100 มม. บนภาพกำลังขยายเท่ากับ z สมการที่ (2-5) ปรับเป็น

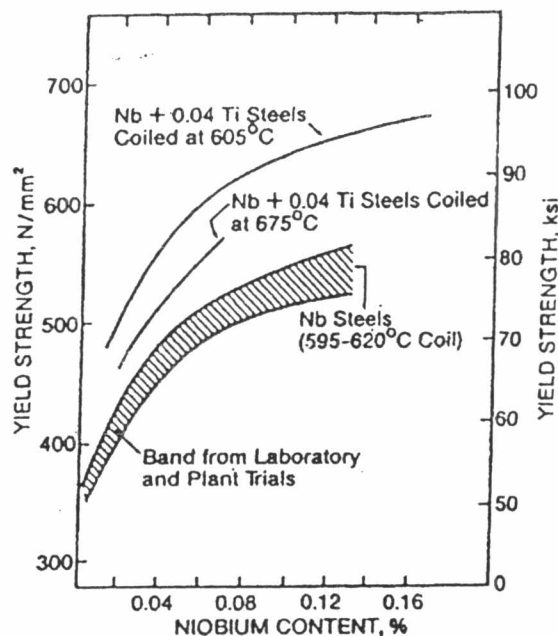
$$S_v(\text{gb} + \text{db}) = (0.429(N_L)_{//} \cdot z + 1.571(N_L)_{\perp} \cdot z)10^{-2} \text{ มม.}^{-1} \quad (2-6)$$

2.2.4. การม้วนเก็บ

จุดประสงค์ของการควบคุมอุณหภูมิม้วนเก็บของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ เพื่อปรับปรุงความละเอียดของเกรนเฟอร์ไรท์และการเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากการตกตะกอน²⁴

เนื่องจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำมักจะเป็นเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ ดังนั้นโครงสร้างที่ได้มักเป็นเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ และเนื่องจากโครงสร้างเพิร์ลไลท์ที่มีผลต่อความแข็งแรง จึงจำเป็นต้องพิจารณาลักษณะโครงสร้างเพิร์ลไลท์ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ การจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอมธาตุคาร์บอนในการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างอสเทนไนท์ไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีธาตุคาร์บอนละลายอยู่น้อยกับซีเมนไนท์ที่มีธาตุคาร์บอนละลายอยู่มาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างอสเทนไนท์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างอสเทนไนท์ลดลงอย่างมากตามการลดลงของอุณหภูมิ โครงสร้างเพิร์ลไลท์จะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง และโครงสร้างเพิร์ลไลท์จะละเอียดมากขึ้นเมื่อเกิดที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากระยะทางที่ธาตุคาร์บอนจะต้องแพร่ในการรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นชั้นของเฟอร์ไรท์สลับกับซีเมนไตต์สั้นลง เพราะการแพร่เกิดได้ช้าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง²⁵ ผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่อความแข็งแรงแรงครากในการทดสอบของโรงงาน (mill-trial) แสดงในรูปที่ 2.10²⁶ ในโอเบียมที่เป็นธาตุผสมสำคัญในเหล็กแผ่นรีดร้อน (hot-rolled strip)²⁷ จากรูป 2.10 พบว่า โอเบียมทำให้เหล็กมีแรงครากได้ถึง 550 N/mm^2 ในทางการค้า อุณหภูมิม้วนเก็บในช่วง $620 - 675 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะส่งผลให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีธาตุไนโอเบียมผสม (low C-Nb steels) มีแรงคราก

ประมาณ 350 N/mm^2 ในขณะที่ ช่วงอุณหภูมิมี้วนเก็บ $535 - 620 \text{ }^\circ\text{C}$ จะส่งผลให้เหล็กดังกล่าวมีค่าแรงครากถึง 550 N/mm^2



รูปที่ 2.10 ผลความแข็งแรงจากการทดสอบในโรงงาน (mill-trial) สำหรับเหล็กแผ่น รีดร้อน²⁶

ผลของอุณหภูมิรีดสุดท้ายและอุณหภูมิมี้วนเก็บต่อขนาดเกรนเฟอร์ไรต์แสดงในตารางที่ 2.2²⁸ พบว่าขนาดเกรนเฟอร์ไรต์จะแปรผันตามอุณหภูมิรีดสุดท้ายแต่จะแปรผกผันกับอุณหภูมิมี้วนเก็บ ดังนั้นถ้ารีดสุดท้ายที่ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ อุณหภูมิมี้วนเก็บควรอยู่ระหว่าง $600-650 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งจะได้เกรนเฟอร์ไรต์ขนาด 4-5 ไมครอน

ตารางที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิรีดสุดท้ายและอุณหภูมิมี้วนเก็บต่อขนาดเกรนเฟอร์ไรต์(ไมครอน)²⁸

CT ($^\circ\text{C}$) \ FT ($^\circ\text{C}$)	680	650	600	550	500
880	19.168	6.977	6.329	6.309	5.291
840	6.228	5.591	5.039	4.024	4.442
800	4.077	4.485	4.643	4.350	4.290

2.3 กระบวนการรีดร้อนในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.3 กระบวนการรีดร้อนเหล็กกล้าอุตสาหกรรมต่ำความแข็งแรงสูงที่ผสมธาตุไนโอเบียมในอุตสาหกรรม (ข้อมูลจาก Rouge industries, Inc. *)

กระบวนการ	รายละเอียด
อบให้ร้อนขึ้นอีก	อุณหภูมิอบ 1,250 °C เวลาที่ใช้อบ 3.5 - 4 ชั่วโมง สำหรับขนาด slab กว้างประมาณ 1000 - 1200 มม. หน้า 200 - 250 มม. X 800 - 1200 มม.
รีดหยาบ	อุณหภูมิรีด 1,050 - 1200 °C ปริมาณรีด 80-86% (ความหนา slab 200 -250 มม. และ ความหนาเหล็กแผ่นหลังรีดหยาบ 35-40 มม.)
รีดละเอียด	อุณหภูมิรีด 850 – 980 °C ปริมาณการรีดประมาณ 71 - 95% (ความหนาเหล็กแผ่นก่อนรีด 35 – 40 มม. และความหนาผลิตภัณฑ์ 2-10 มม.)
ม้วนเก็บ	อุณหภูมิม้วนเก็บ 600 °C

*www.rougesteel.com or pholmes@rougesteel.com