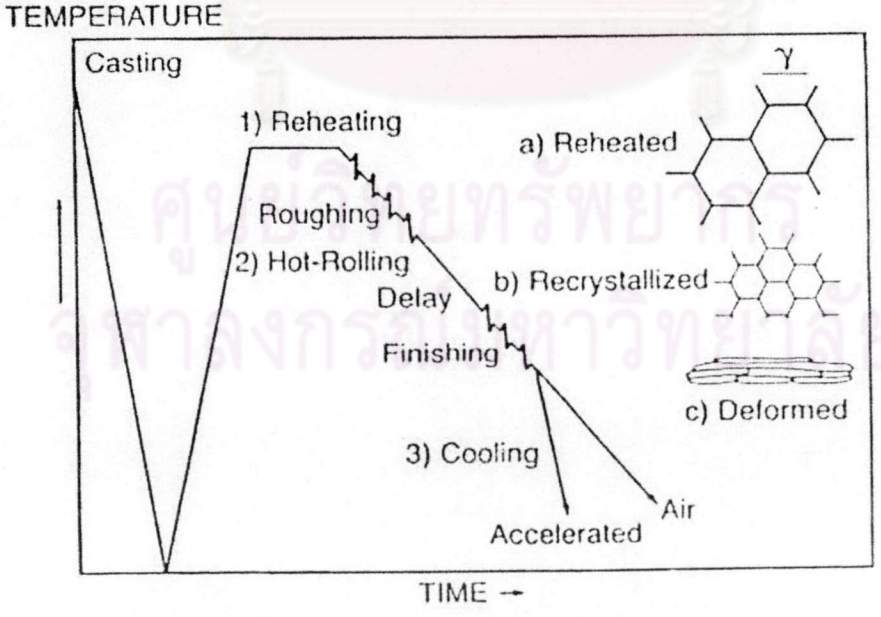
บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม

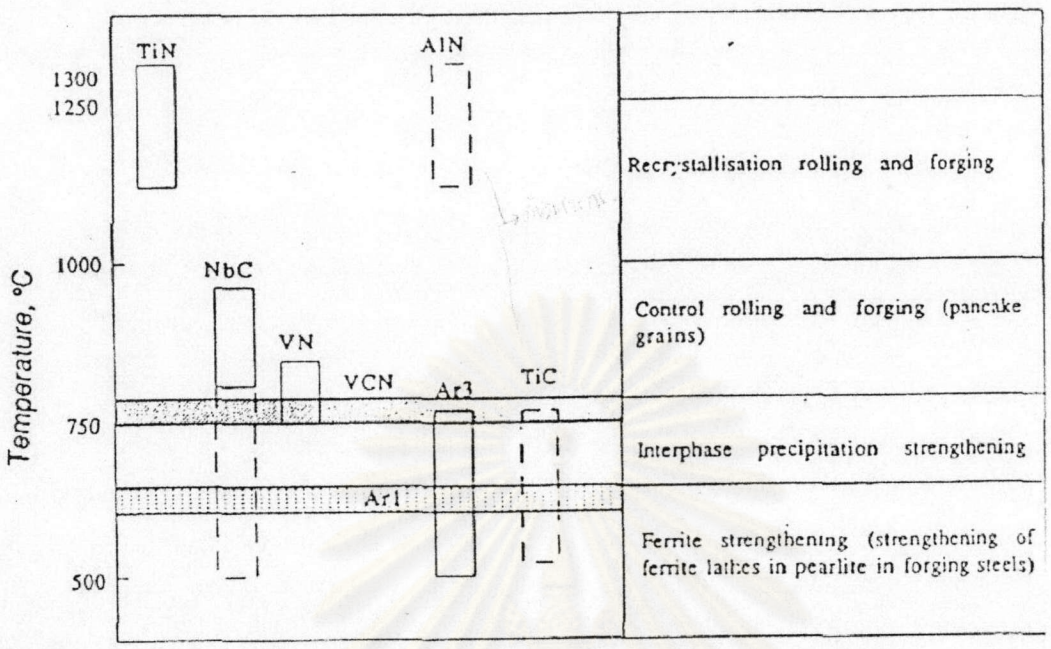
เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ พัฒนามาจากการเติมธาตุผสม เช่น ไทเทเนียม วาเนเดียม หรือ ไนโอเบียม ปริมาณเล็กน้อยลงไปในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องมาจากขนาดเกรนที่เล็กอันเป็นผลมาจากอนุภาคตะกอนพวกคาร์ไบด์ ไนตรายด์ หรือคาร์โบไนตรายด์ เช่น ไทเทเนียมไนตรายด์ ,วาเนเดียมคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนออกมา และนอกจากนี้ยังทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากการตกตะกอนอีกด้วย[1]

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำในรูปเหล็กแผ่นมีการนำไปใช้งานมากในโครงสร้างต่าง ๆ,ท่อต่าง ๆ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง,ความสามารถในการขึ้นรูปดี,ทำการเชื่อมได้ง่าย และมีราคาค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น เช่น อลูมิเนียม[2,3]

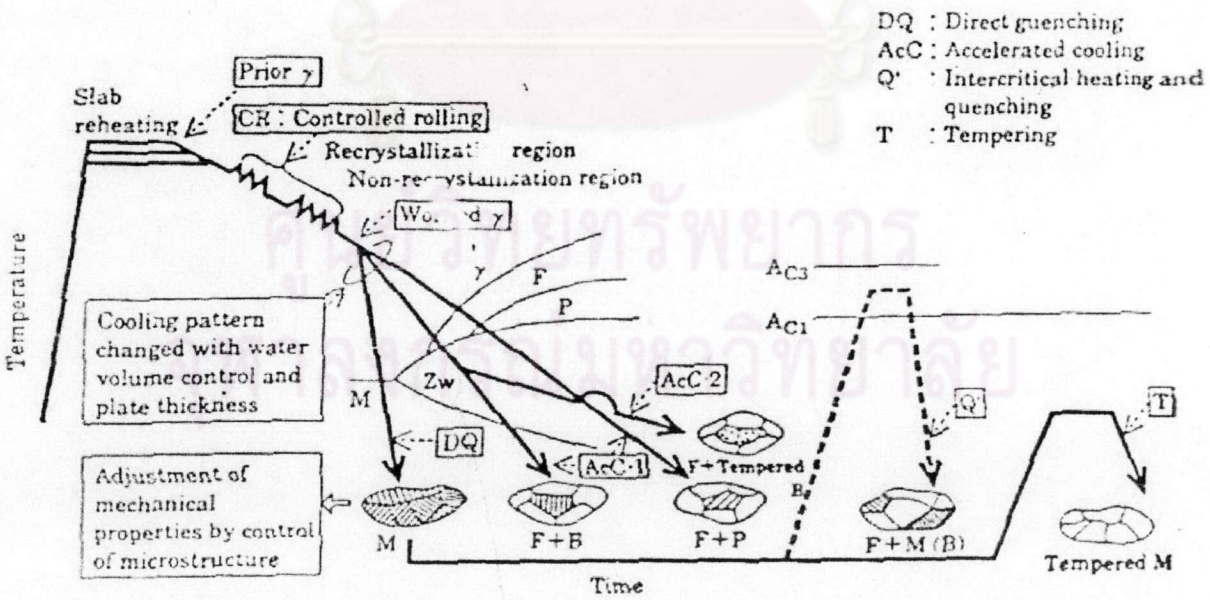
กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนด้วยกรรมวิธีเทอร์โมแมคแคนิเคิล เป็นกระบวนการรีดร้อนที่ควบคุมปัจจัยในการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ(การอบให้ร้อนขึ้นอีก,การแปรรูปร้อนและการม้วนเก็บ)เพื่อให้ได้เหล็กแผ่นรีดร้อนที่มีความแข็งแรงสูง,ความสามารถในการขึ้นรูปดีและทำการเชื่อมได้ง่าย โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กแผ่นรีดร้อน คือ ส่วนผสมทางเคมี,ชนิดและปริมาณของธาตุผสม,ตัวแปรที่ใช้ในการผลิต เช่น อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก,อุณหภูมิรีดสุดท้าย, อัตราการเย็นตัว และอุณหภูมิม้วนเก็บ



รูปที่ 2.1 การรีดแบบควบคุม



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่สารประกอบคาร์ไบด์ และไนตรายด์สามารถเกิดขึ้นกับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัว[4]



รูปที่ 2.3 การควบคุมโครงสร้างจุลภาคโดยกระบวนการรีดเทอร์โมแมคแคนิเคิล

ตัวแปรในการผลิตซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดร้อนได้แก่

1.อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก
2.อุณหภูมิที่ทำการแปรรูปร้อน
3.ปริมาณการแปรรูปร้อน
4.อุณหภูมิสุดท้ายที่ทำการแปรรูปร้อน
5.อัตราการเย็นตัว
6.อุณหภูมิม้วนเก็บ

2.1 บทบาทของธาตุผสมในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ

ปกติคาร์บอนจะเป็นธาตุหลักที่ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงในเหล็กกล้า แต่จะมีผลเสียต่อสมบัติเชิงกล เช่น ความสามารถในการเชื่อมและความสามารถในการขึ้นรูป ดังนั้นจึงต้องจำกัดปริมาณการใช้คาร์บอน ดังนั้นเพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความแกร่งสูง จึงจำเป็นต้องใช้ธาตุอื่นแทนคาร์บอน และใช้กลไกอื่นในการเพิ่มความแข็งแรง เช่น การทำให้เกรนละเอียด ซึ่งจะปรับปรุงทั้งความแข็งแรงและความแกร่ง[5,6,7] ส่วนส่วนผสมโดยทั่วไปก็จะเหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไปที่มีการควบคุมปริมาณธาตุซัลเฟอร์ให้อยู่ในระดับที่ต่ำ เพราะว่าธาตุซัลเฟอร์ทำให้เหล็กเกิดการแตกร้าวในระหว่างการรีดร้อนได้ในขณะรีดร้อน แม้ว่าจะมีธาตุซัลเฟอร์ละลายอยู่เพียงเล็กน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมักมีการเติมธาตุแมงกานีสประมาณ 0.3% เพื่อช่วยจับตัวกับธาตุซัลเฟอร์ตกตะกอนเป็นอนุภาคแมงกานีสซัลไฟด์ นอกจากนี้ควรมีการควบคุมปริมาณธาตุฟอสฟอรัสให้อยู่ในระดับต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

นอกจากนี้การพัฒนาสมบัติของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำให้ได้ผลดี จำเป็นต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของธาตุผสมปริมาณน้อยมากในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพื่อสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ประสิทธิภาพของการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนในเหล็กกล้าธาตุผสมปริมาณน้อยมาก ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายและพฤติกรรมการตกตะกอนของอนุภาคจากธาตุผสมปริมาณน้อยมาก ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากธาตุผสมปริมาณน้อยมากจึงจำเป็นต้องทราบความสามารถในการละลายของสารประกอบคาร์ไบด์และไนตรายด์ของธาตุผสมปริมาณน้อยมากเหล่านั้นซึ่งก็มีข้อมูลจากงานวิจัยจำนวนมากแสดงความสามารถในการละลายของสารประกอบคาร์ไบด์และไนตรายด์แต่ละตัว[8,9] โดยส่วนใหญ่มีความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน แต่ยกเว้นวาเนเดียมคาร์ไบด์ (VC) ที่สามารถละลายได้มาก และไทเทเนียมไนตรายด์ (TiN) ที่สามารถละลายได้น้อยที่อุณหภูมิเดียวกัน[10] ลักษณะอีกอย่างหนึ่งของการเติมธาตุผสมปริมาณน้อยมาก (ยกเว้นธาตุอะลูมิเนียม) คือสารประกอบเหล่านี้

อาจไม่เกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ และไนตรายด์แยกกัน เนื่องจากมีรูปแบบของโครงสร้างและขนาดของผลึกใกล้เคียงกัน ดังนั้นสารประกอบคาร์ไบด์ และไนตรายด์เหล่านี้จึงสามารถละลายซึ่งกันและกันเกิดเป็นสารประกอบคาร์โบไนตรายด์ที่มีเสถียรภาพมากกว่าเดิม

ในปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายคนเสนอสูตรที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการละลายของอนุภาคตกตะกอนในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เช่น

$$\log [V][C] = -(9500/T) + 6.72 \quad [8]$$

$$\log [V][N] = -(7840/T) + 3.02 \quad [9]$$

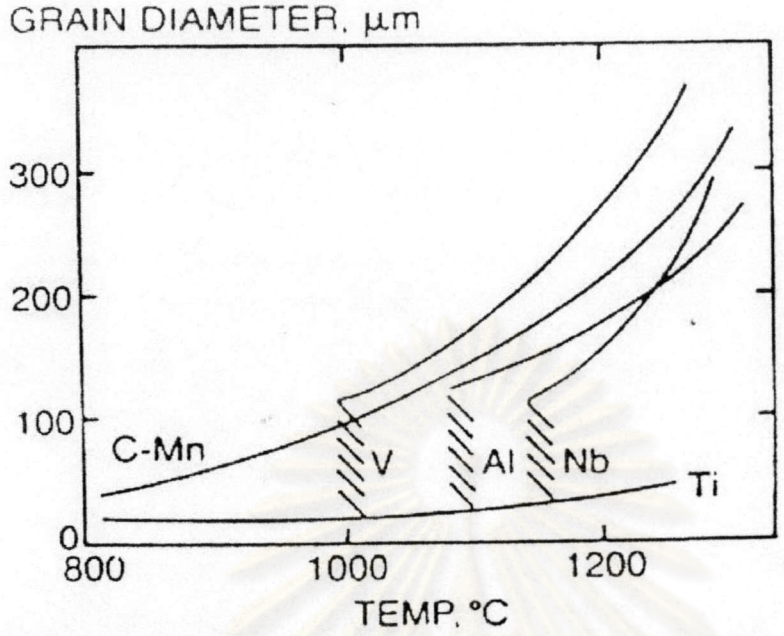
โดยที่ [V] , [C] และ [N] คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุผสมที่ละลายอยู่

ถ้ามีปริมาณไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.015 – 0.02 % อนุภาค VN อาจจะตกตะกอนได้ในช่วงอุณหภูมิ 850 – 1050 องศาเซลเซียส และถ้าควบคุมปริมาณ $[V][N] = 1.2 * 10^{-3}$ จะทำให้มีค่าความเหนียวที่อุณหภูมิสูงดี[11]

2.2 อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก

การพิจารณาเลือกใช้อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำจะพิจารณาจากหลายปัจจัย เช่น การทำให้โครงสร้างเป็นออสเทนไนท์อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด, ขนาดเกรนออสเทนไนท์เริ่มต้น ,การละลายของธาตุผสมให้อยู่ในรูปแบบสารละลายของแข็ง , อุณหภูมิการรีดสุดท้ายที่ต้องรักษาไว้เหนือเส้นที่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Ar_3) ,ความต้านทานการแปรรูปที่ลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น และค่าเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการอบให้ร้อนขึ้นด้วย

อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกนี้จะต้องสูงพอที่จะละลายอนุภาคตะกอนต่าง ๆเพื่อที่จะได้ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากการตกตะกอนให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งโดยทั่วไปความสามารถในการละลายของอนุภาคตะกอนจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ แต่ถ้าหากเลือกใช้อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกที่สูงจนเกินไปก็จะทำให้เกิดการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากอนุภาคตะกอนที่ไม่ละลายที่อุณหภูมิการอบให้ร้อนขึ้นอีก เช่น ไทเทเนียมไนตรายด์จะสามารถยับยั้งการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์ได้ จึงได้ขนาดเกรนหลังการเปลี่ยนเฟสหลังการรีดที่มีขนาดเล็ก[4]



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของธาตุผสมต่อการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์

โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของอนุภาคไนตรายด์จะต่ำกว่าความสามารถในการละลายของอนุภาคคาร์ไบด์ ความสามารถในการละลายของอนุภาค TiC,NbC,NbN,AlN และVNในออสเทนไนท์อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ในขณะที่อนุภาคVC สามารถละลายได้ดีกว่า ส่วนอนุภาคTiN จะมีความสามารถในการละลายที่ต่ำกว่า

ธาตุผสมอะลูมิเนียม,ไนโอเบียม,วาเนเดียม หรือ ไทเทเนียม สามารถยับยั้งการโตขึ้นของเกรนได้ในขณะทำการอบให้ร้อนขึ้นอีก เนื่องจากผลของอนุภาคเช่น TiN หรือ NbCN ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะทำหน้าที่ป้องกันการโตขึ้นของเกรนได้ดีเมื่อมีขนาดเล็ก และมีอยู่ในสัดส่วนเชิงปริมาตรที่สูงพอ โดยปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคเหล่านี้ก็คืออุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกซึ่งมีผลต่อความสามารถในการละลายของอนุภาคตะกอนเหล่านี้ ดังนั้นหากทำการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิสูงก็จะสามารถละลายอนุภาคตะกอนเหล่านี้ได้มากทำให้เหลืออนุภาคที่จะยับยั้งการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์ในระหว่างการอบให้ร้อนขึ้นอีกน้อย ทำให้เกรนบางส่วนเกิดการโตขึ้นได้[12]

เมื่อทำการเติมไทเทเนียมลงในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.01-0.02% พบว่าจะสามารถยับยั้งการโตขึ้นในระหว่างการอบให้ร้อนขึ้นอีกได้ แม้ว่าจะใช้อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกสูงถึง1300 องศาเซลเซียสก็ตาม

2.3 ปริมาณการแปรรูปร้อนในช่วงที่เกิดการตกผลึกใหม่

จุดมุ่งหมายของการแปรรูปในช่วงที่มีการตกผลึกใหม่ของเฟสออสเทนไนท์ก็เพื่อลดขนาดของเกรนออสเทนไนท์ลงโดยการเกิด multiple recrystallization ซึ่งโดยมากจะเป็นผลมาจาก static recrystalization ส่วนสาเหตุที่ไม่ค่อยเกิด dynamic recrystalization ก็เนื่องมาจากจะเกิด dynamic recrystalization ได้ก็ต่อเมื่อต้องให้ความเร็วการแปรรูปสูงมาก เมื่อเกรนออสเทนไนท์ดั้งเดิมมีขนาดเล็กก็จะช่วยส่งเสริมให้ขนาดเกรนที่ได้หลังการตกผลึกใหม่มีขนาดเล็กไปด้วย และนอกจากนี้ถ้าทำการแปรรูปที่อุณหภูมิการแปรรูปที่ต่ำกว่าก็จะให้ขนาดเกรนที่ได้เล็กกว่าด้วยแต่ส่งผลไม่มากนัก

การที่จะเกิด static recrystalization ในระหว่างทำการแปรรูปร้อนนั้นจะต้องให้ปริมาณการแปรรูปสูงถึงค่าๆหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าปริมาณการแปรรูปวิกฤติ กล่าวคือจะต้องทำการแปรรูปให้มากกว่าค่าปริมาณการแปรรูปวิกฤติจึงจะสามารถเกิด static recrystalization ขึ้นได้ โดยค่าปริมาณการแปรรูปวิกฤตินั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำการแปรรูปร้อนด้วย โดยปริมาณการแปรรูปวิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากถ้าทำการแปรรูปที่อุณหภูมิต่ำ[13]

ปริมาณการแปรรูปต่อ 1 pass ที่สูงพอจะช่วยป้องกันการโตขึ้นของเกรนได้ ถ้าให้ปริมาณการแปรรูปสูงถึง 35%จะสามารถได้ขนาดเกรนที่เล็กถึง 20 ไมครอน และมีขนาดสม่ำเสมอได้

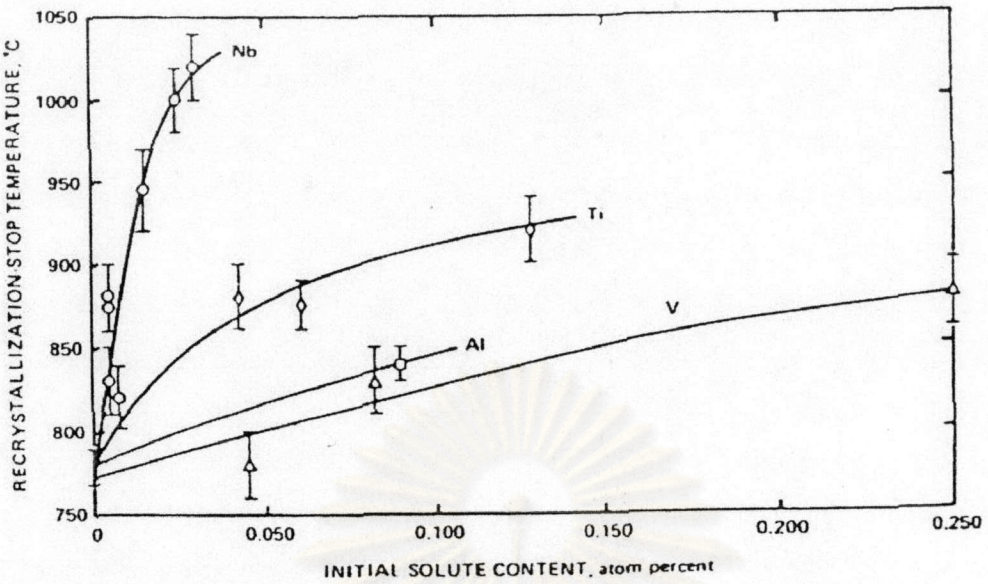
การเกิดการตกผลึกใหม่ในระหว่างการรีดจะทำให้ใช้โหลดในการรีดที่ต่ำลงและสามารถควบคุมความหนาได้ง่ายขึ้น

เมื่ออุณหภูมิในการแปรรูปลดลงจนถึงอุณหภูมิหนึ่งจะไม่เกิดการตกผลึกใหม่อีกต่อไป

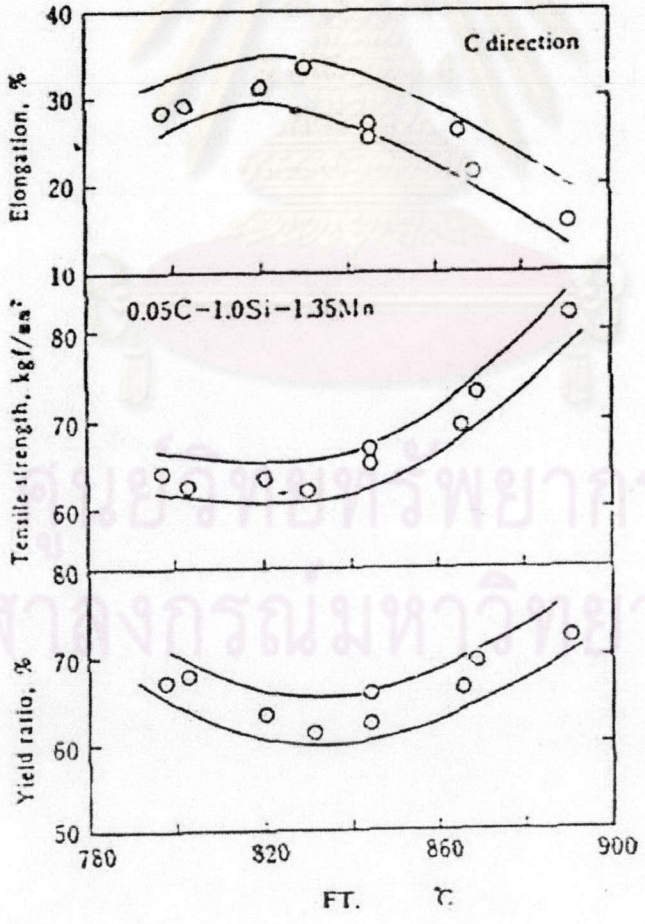
2.4 อุณหภูมิการรีดสุดท้าย

อุณหภูมิการรีดสุดท้ายจะต้องรักษาให้อยู่เหนือเส้นที่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Ar_3) เพื่อให้ธาตุอะลูมิเนียมกับธาตุไนโตรเจนยังละลายอยู่ในเนื้อเหล็ก อุณหภูมิการรีดสุดท้ายที่สูงกว่าเส้น Ar_3 เพียงเล็กน้อยจะช่วยให้สามารถได้เกรนเฟอร์ไรท์หลังการเปลี่ยนเฟสที่ละเอียดขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป แต่ถ้าอุณหภูมิการรีดสุดท้ายต่ำกว่าเส้น Ar_3 จะทำให้เกิดเกรนผสมระหว่างเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ซึ่งสมควรหลีกเลี่ยงเนื่องจากจะได้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ที่ไม่สม่ำเสมอไปจนถึงหลังการรีดเย็นและอบอ่อน[14]

สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่มีธาตุผสมวาเนเดียมปริมาณเล็กน้อย อุณหภูมิรีดสุดท้ายจะไม่ค่อยมีผล โดยปกติจะเลือกใช้อุณหภูมิรีดสุดท้ายในช่วง 800 – 1000 องศาเซลเซียส[11]



รูปที่ 2.5 ผลของการเติมธาตุผสมปริมาณน้อยมากต่ออุณหภูมิที่ไม่มีการตกผลึกใหม่[12]



รูปที่2.6 ผลของอุณหภูมิรีดสุดท้ายต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดร้อน[15]

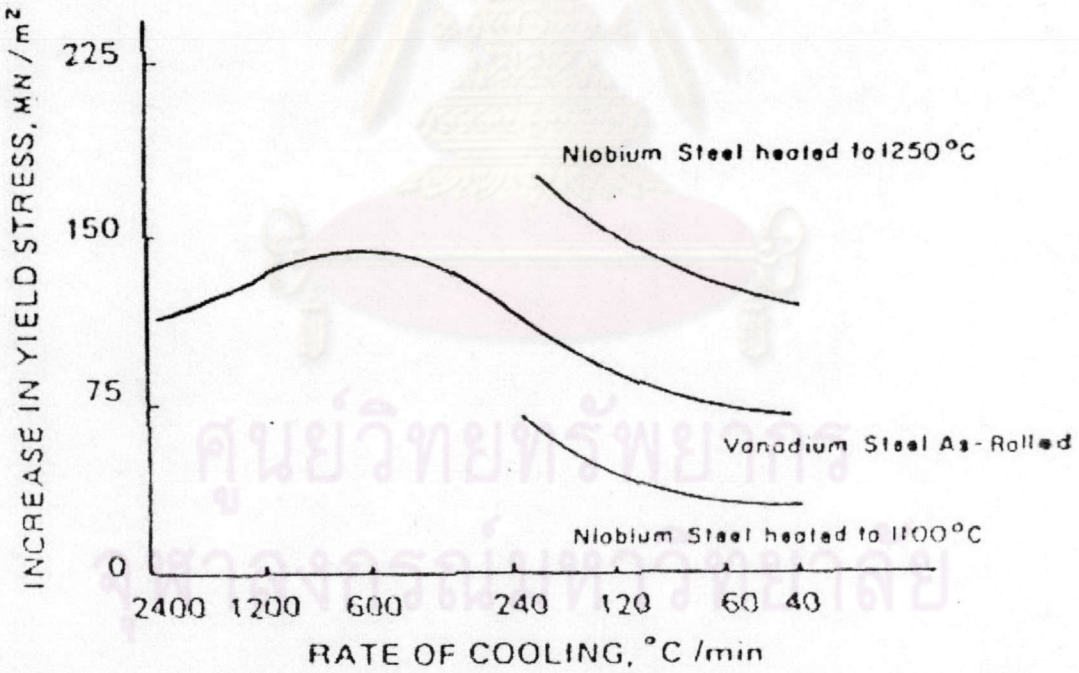
2.5อัตราการเย็นตัว

อัตราการเย็นตัวมีผลต่อสมบัติเชิงกล เช่นความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูป เนื่องจากอัตราการเย็นตัวส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนที่จะได้ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนอีกด้วย

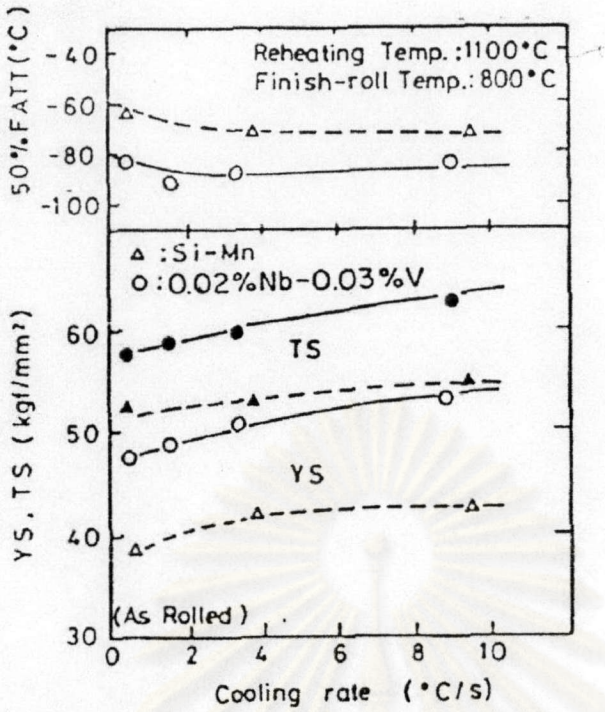
ถ้าใช้อัตราการเย็นตัวที่สูง ก็จะได้ขนาดเกรนที่ละเอียด เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสที่ต่ำจึงทำให้เกิดนิวคลีไอจำนวนมากใน undercooled austenite ดังนั้นกลไกการเพิ่มความแข็งแรงก็จะมาจากการมีขนาดเกรนที่เล็กละเอียดแทนกลไกการตกตะกอน[16]

โดยปกติ หากทำการเย็นตัวในอากาศ ก็จะได้โครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไลท์ แต่ถ้าหากใช้อัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้นก็จะขัดขวางการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลท์และจะได้โครงสร้างสุดท้ายเป็นเฟอร์ไรท์กับเบนไนท์

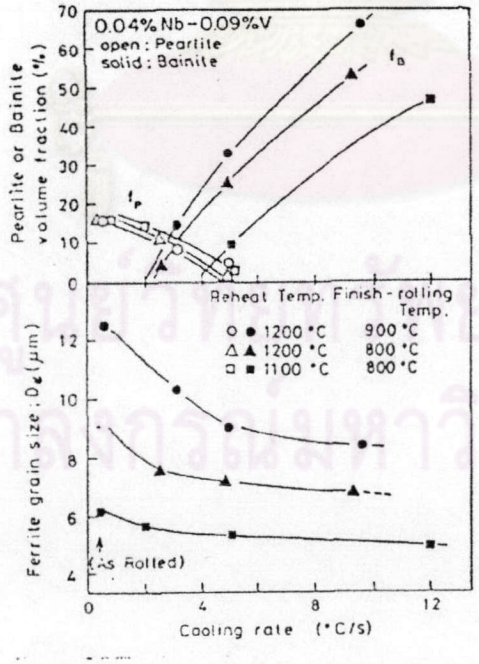
ปัจจุบันการควบคุมการเย็นตัวใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงรีดเหล็กแผ่นเพื่อผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่มีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการขึ้นรูปดี[16]



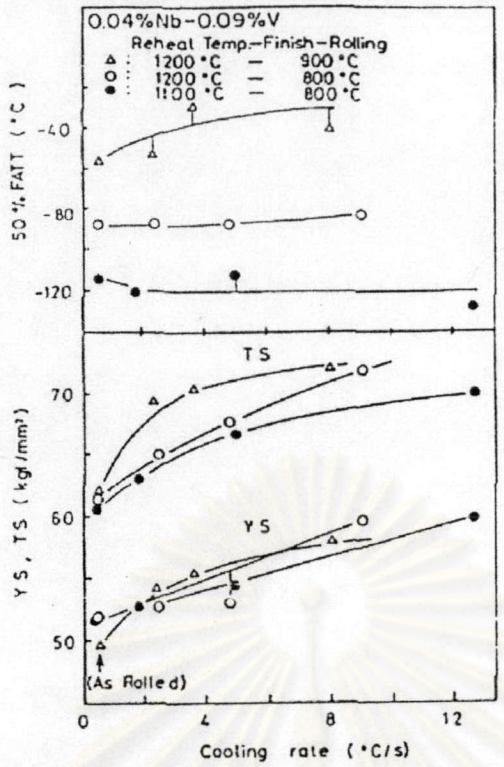
รูปที่ 2.7 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนในเหล็กกล้าไนโอเบียมและในเหล็กกล้าวาเนเดียม[16]



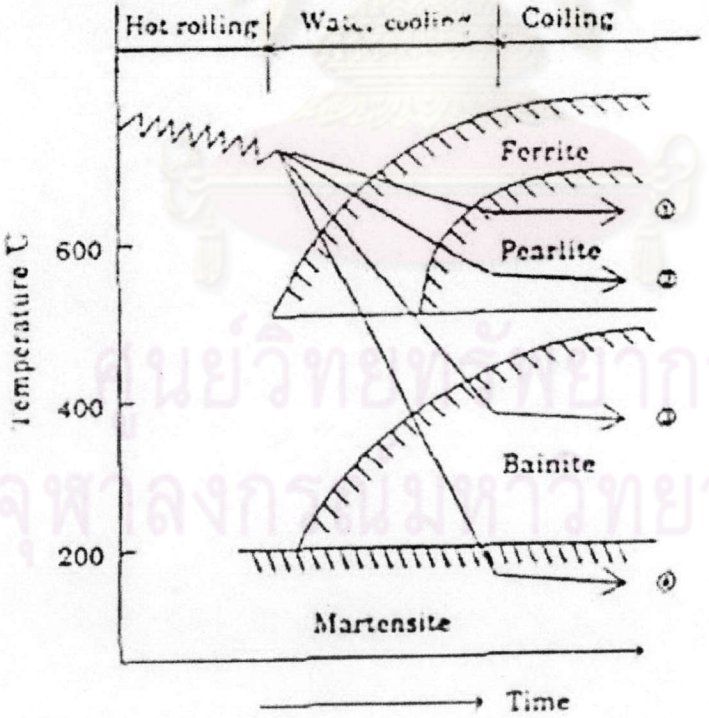
รูปที่ 2.8 ผลของอัตราเย็นตัวต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (0.12%C – 0.33%Si – 1.38%Mn – 0.092%V กับ 0.14%C – 1.3%Mn – 0.023%Nb-0.033%V)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์และสัดส่วนเชิงปริมาตรของเบนไนท์กับอัตราเย็นตัว ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่มี 0.04%Nb – 0.09%V



รูปที่ 2.10 ผลของอัตราเย็นตัวต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (0.10%C – 0.31%Si – 1.50%Mn – 0.092%V)



รูปที่ 2.11 การควบคุมโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการทำการรีดเหล็กแผ่นรีดร้อน

2.6อุณหภูมิม้วนเก็บ

เมื่อเสร็จสิ้นการม้วนเก็บเหล็กแผ่นรีดร้อนจะได้รับผลดีจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรง 2 อย่างพร้อมกันคือผลจากการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน และผลจากการมีเกรนเฟอร์ไรท์สุดท้ายหลังการเปลี่ยนเฟสที่ละเอียด

จุดประสงค์ในการเลือกอุณหภูมิม้วนเก็บที่เหมาะสมก็คือเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ที่เล็กละเอียดสม่ำเสมอ และเพื่อได้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากผลของอนุภาคตะกอน ซึ่งประสิทธิภาพของกลไกการแข็งแรงจากการตกตะกอนขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายขณะอบให้ร้อนขึ้นอีก และการตกตะกอนออกมา

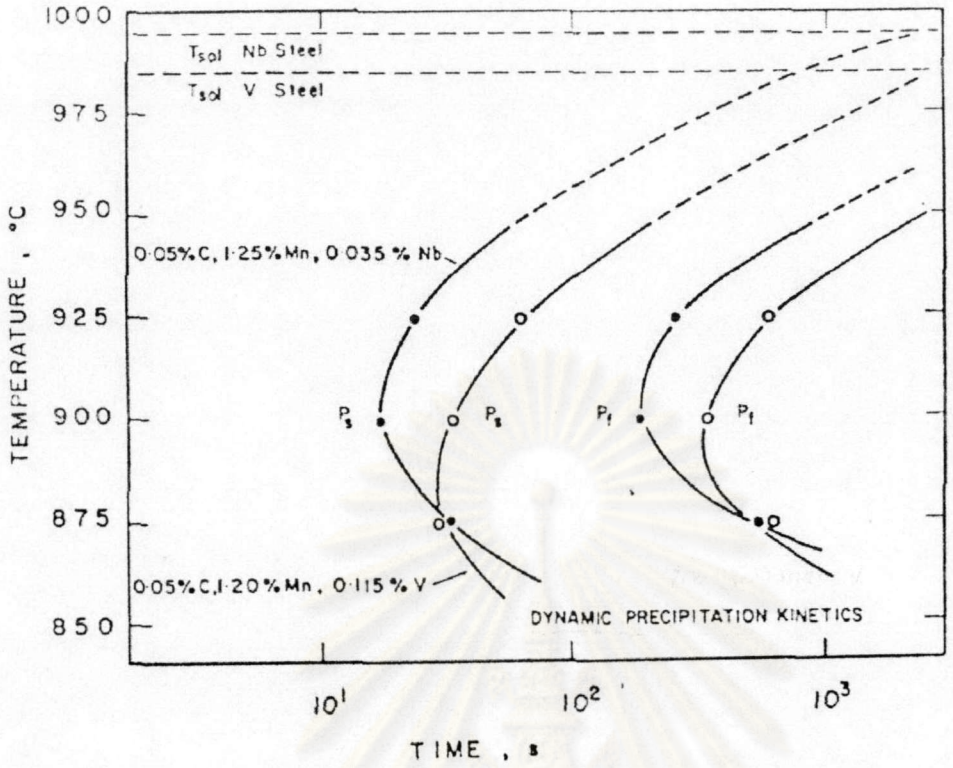
การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน มีผลมาจากการเกิดอนุภาคตะกอนขนาดเล็กขึ้นในช่วงระหว่างการเปลี่ยนเฟสและหลังการเปลี่ยนเฟสที่บริเวณผิวหน้าระหว่างออสเทนไนท์กับเฟอร์ไรท์ จึงจำเป็นจะต้องมีคาร์บอน,ไนโตรเจนและธาตุผสมปริมาณน้อยมากละลายอยู่ในเนื้อเหล็ก คือยังไม่เกิดการตกตะกอนไปจนหมดก่อนการเปลี่ยนเฟส[17]

เนื่องจากอนุภาค VC มีความสามารถในการละลายสูงกว่าอนุภาคอื่นๆเช่น TiC,VN,NbN และ TiN ดังนั้นแม้จะอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิต่ำ วาเนเดียมก็สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยกลไกการตกตะกอนได้เป็นอย่างดี

ถ้าอุณหภูมิม้วนเก็บต่ำเกินไป จะไม่เกิดการตกตะกอน ทำให้ความแข็งแรงที่ได้ต่ำ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิม้วนเก็บที่สูงเกินไปก็จะทำให้ได้อนุภาคตะกอนจำนวนน้อยและมีขนาดใหญ่นอกจากนี้ยังทำให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้นซึ่งก็จะทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะทำการเลือกอุณหภูมิม้วนเก็บให้เหมาะสม

การขัดขวางการโตขึ้นของเกรนเฟอร์ไรท์ในขณะการม้วนเก็บใช้วิธีเดียวกันกับการขัดขวางการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์โดยการมีอนุภาคตกตะกอนขนาดเล็กขัดขวางการโตขึ้นของเกรนเฟอร์ไรท์ ทำให้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์มีขนาดเล็กทั้งในระหว่างการเปลี่ยนเฟสและหลังการเปลี่ยนเฟส ส่วนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนในเกรนเฟอร์ไรท์ซึ่งเป็นการตกตะกอนของอนุภาคคาร์ไบด์นั้นผลของการเพิ่มความแข็งแรงขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุผสมปริมาณน้อยมาก ที่เหลืออยู่หลังจากการรีดสุดท้ายก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟส[4]

จากการทดลองใช้อุณหภูมิม้วนเก็บที่ 710,600 และ 550 องศาเซลเซียส พบว่าจะมีอนุภาคตกตะกอนออกมาเป็นจำนวนมากกว่าที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 710 และ 600 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 600 องศาเซลเซียส อนุภาคตะกอนจะมีขนาดเล็กกว่าและสม่ำเสมอกว่า สำหรับการใช้อุณหภูมิม้วนเก็บที่ 550 องศาเซลเซียส จะได้อนุภาคตะกอนจำนวนน้อยกว่า และหยาบกว่า[18]



รูปที่ 2.12 การเกิดอนุภาคตะกอนในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย