บทที่ 5
การอภิปราย

5.1 ผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาค ก่อนการม้วนเก็บ

การอบชิ้นงานให้ร้อนขึ้นอีกเลือกใช้อุณหภูมิ 1,150 °C เพราะว่าอุณหภูมินี้ไม่สูงมากจนทำให้ขนาดเกรนดั้งเดิมของออสเทนไนท์ก่อนการรีดใหญ่มากนัก แต่ก็เป็นอุณหภูมิที่สูงพอจนสามารถละลายอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์และวาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ได้หมดทำให้ธาตุวาเนเดียมทั้งหมดละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็ง ดังนั้นชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C จึงมีธาตุวาเนเดียมละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็ง ในขณะที่เย็นตัวลงเพื่อรีดหยาบ และรีดละเอียดหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีก เพื่อที่จะได้ความแข็งแรงเนื่องจากการเกิดอนุภาคตะกอนในภายหลัง

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่มีธาตุผสมปริมาณน้อยมากของวาเนเดียม มีอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการโตของเกรนออสเทนไนท์ประมาณ 1,000 °C ดังนั้นการอบชิ้นงานให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C ทำให้ได้ขนาดเกรนออสเทนไนท์ก่อนการรีดหยาบ 248 ไมครอน แต่หลังจากรีดละเอียดเสร็จแล้วสามารถได้ขนาดเกรนออสเทนไนท์ 33 ไมครอน อันเป็นผลมาจากการตกผลึกใหม่ในระหว่างการรีดร้อน เนื่องจากธาตุวาเนเดียมในรูปสารละลายของแข็งจะไม่ขัดขวางการเกิดการตกผลึกใหม่ ดังนั้นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่มีธาตุผสมปริมาณน้อยมากของวาเนเดียมจึงเหมาะสมที่จะทำการรีดโดยการควบคุมการรีดที่มีการตกผลึกใหม่ซึ่งสามารถลดขนาดเกรนให้ละเอียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในช่วงการรีดหยาบ,รีดละเอียด และในระหว่างเย็นตัวจากอุณหภูมิที่ทำการรีดละเอียดมาที่อุณหภูมิม้วนเก็บ ธาตุวาเนเดียมที่อยู่ในรูปสารละลายของแข็งในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่มีปริมาณไนโตรเจนในช่วง 150-200 ppm. จะสามารถในการรวมตัวกับธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 900 - 700 °C ดังนั้นธาตุวาเนเดียมที่ละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบ

สารละลายของแข็งจึงมีโอกาสรวมตัวกับธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนที่ละลายอยู่เกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ในช่วงอุณหภูมิ 900 - 700 °C ขึ้นได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอัตราการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมินี้ช้าๆ อนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ในเฟสออสเทนไนท์ที่ช่วยป้องกันการโตของเกรนออสเทนไนท์ในระหว่างการรีดร้อน ซึ่งการมีขนาดเกรนออสเทนไนท์ที่ละเอียดจะทำให้ได้โครงสร้างสุดท้ายที่ละเอียด

ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสระหว่างออสเทนไนท์กับเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิประมาณ 700 °C เป็นช่วงที่อัตราการเกิดตะกอนอนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์สูง เพราะความสามารถในการละลายของอนุภาคในเฟสเฟอร์ไรท์น้อยกว่าในเฟสออสเทนไนท์ จึงทำให้เกิดการตกตะกอนอนุภาคคาร์โบไนตรายด์ได้มากในเฟสเฟอร์ไรท์ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทั้งโดยกลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคตะกอน และมีส่วนช่วยให้ได้ขนาดเกรนสุดท้ายที่เล็กละเอียด ซึ่งจะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดี ดังแสดงในตารางที่ 4.2

5.2 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.18-4.22 พบว่าอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในกระบวนการรีดเทอร์โมแมคแคนิคัล ส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มความแข็งแรงในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ โดยส่งผลต่อขนาดเกรน,โครงสร้างจุลภาค และการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคตะกอนที่อุณหภูมิม้วนเก็บ

เมื่อใช้อัตราเย็นตัวจากอุณหภูมิที่เสร็จสิ้นการรีดละเอียดมายังอุณหภูมิม้วนเก็บ 1 °C /sec จะได้โครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลท์ที่ละเอียด เนื่องจากเมื่อใช้อัตราเย็นตัวที่ช้าจึงมีเวลาสำหรับการตกตะกอนอนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ในช่วงอุณหภูมิ 900 - 700 °C มาก ดังนั้นกลไกหลักในการเพิ่มความแข็งแรงจึงมาจากผลของการตกตะกอนอนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ซึ่งจะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากผลของขนาดเกรนที่ละเอียดและผลของอนุภาคตะกอนวาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ แต่ก็จะทำให้คงเหลือธาตุวาเนเดียมในรูปสารละลายของแข็งน้อยลง ทำให้ผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิม้วนเก็บไม่เด่นชัดนัก

เมื่อเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัวที่สูงขึ้นจะทำให้วาเนเดียมที่ละลายอยู่ในรูปแบบสารละลายของแข็งมีโอกาสตกตะกอนออกมาเป็นอนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ได้น้อยลง แต่ก็จะได้ความแข็งแรงจากผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิม้วนเก็บที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่มีธาตุวาเนเดียมคงเหลือในรูปสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิม้วนเก็บมากขึ้น นอกจากนี้การใช้อัตราเย็นตัวสูงจะทำให้ได้โครงสร้างที่ละเอียด และมีโอกาสที่จะได้สัดส่วนเชิงปริมาตรของเพิร์ลไลท์,เบนไนท์หรือมาร์เทนไซท์สูงขึ้น แต่จากรูปที่ 4.17พบว่าในช่วงอัตราเย็นตัว 3-9 °C /sec โครงสร้างจุลภาคที่ได้คือเฟสเบนไนท์ ซึ่งไม่พบผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิม้วนเก็บ และจากการที่โครงสร้างที่ได้มีขนาดเกรนใกล้เคียงกัน จึงทำให้ความเค้นแรงดึง, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน โดยความเค้นแรงดึงและความเค้นจุดครากมีค่าต่ำกว่าการใช้อัตราเย็นตัว 1 °C /sec แต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าสูงกว่าที่อัตราเย็นตัว 1 °C /sec ดังแสดงในรูปที่ 4.18-4.20 สำหรับอัตราเย็นตัว 20 °C /sec พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้เป็นมาร์เทนไซท์ ซึ่งมีความเค้นจุดครากและความเค้นแรงดึงสูง เนื่องจากเฟสมาร์เทนไซท์มีปริมาณคาร์บอนสูงและยังมีผลจากการตกตะกอนของเหล็กคาร์ไบด์ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำลง คาร์บอนจะละลายในเหล็กได้น้อยลง แต่เมื่ออัตราเย็นตัวค่อนข้างสูงคือ 20 °C /sec คาร์บอนในเหล็กจะเกิดการแพร่ออกมาไม่ทัน จึงทำให้เกิดเหล็กคาร์ไบด์ขึ้น

5.3 ผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกล

ในช่วงอุณหภูมิ 500-550 °C ธาตุวาเนเดียมที่ยังอยู่ในรูปแบบสารละลายของแข็ง มีความสามารถในการรวมตัวกับธาตุคาร์บอนได้ดี ดังนั้นธาตุวาเนเดียมที่ยังคงละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิม้วนเก็บจึงมีโอกาสรวมตัวกับธาตุคาร์บอนที่ละลายอยู่เกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงอัตราการตกตะกอนอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์จะลดลงอย่างมากจนไม่สามารถเกิดการตกตะกอนได้ที่อุณหภูมิ 400 °C

จากตารางที่ 4.2 พบว่าสำหรับอัตราการเย็นตัว 1 °C /sec จะได้ค่าความเค้นจุดครากสูงที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิม้วนเก็บ 500 °C ซึ่งก็น่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิม้วนเก็บ ในขณะที่การม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นอุณหภูมิที่สูงเกินไป อนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนน้อยและหยาบ จึงทำให้ผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยผลของอนุภาคตะกอนลดลง ดังนั้นความเค้นจุดครากที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 600 °C มีค่าต่ำกว่าการม้วนเก็บที่ 500 °C อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าความเค้นจุดครากจากการใช้อุณหภูมิม้วนเก็บ 500 °C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 400 และ600 °C เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งก็น่าจะมาจากอัตราการเย็นตัวที่ช้า 1 °C /sec ทำให้มีโอกาสเกิดการตกตะกอนอนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ในช่วง 900-700 °C ก่อนการม้วนเก็บ ทำให้คงเหลือธาตุวาเนเดียมที่ยังละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิม้วนเก็บในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ทำให้ผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ค่อนข้างต่ำ

นอกจากอุณหภูมิม้วนเก็บจะมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคตะกอนดังที่กล่าวมาแล้ว อุณหภูมิม้วนเก็บยังมีผลต่อความละเอียดและสัดส่วนเชิงปริมาตรของโครงสร้างเพิร์ลไลท์ โดยจะส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสมีค่าต่ำลง ซึ่งอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งต่อการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลท์ เพราะค่าสัมประสิทธิการแพร่ของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างออสเทนไนท์ขณะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลท์ซึ่งเป็นเฟอร์ไรท์สลับกับซีเมนไตท์มีค่าลดลงอย่างมากตามการลดลงของอุณหภูมิทำให้ระยะทางที่ธาตุคาร์บอนจะสามารถแพร่ในเนื้อเหล็กในการรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นชั้นของเฟอร์ไรท์และซีเมนไตท์สั้นลง กล่าวคือทำให้ช่วงห่างระหว่างชั้นซีเมนไตท์ (interlamellar spacing) แคบลง เป็นผลให้โครงสร้างเพิร์ลไลท์ละเอียดมากขึ้น และเกิดได้เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสต่ำลง ดังนั้นจึงพบว่าการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 400 °C ซึ่งไม่ได้รับผลจากการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาควานาเดียมคาร์ไบด์ มีค่าความเค้นแรงดึงที่สูงในระดับที่ใกล้เคียงกับการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 500 และ 600 °C เนื่องมาจากได้สัดส่วนเชิงปริมาตรของเพิร์ลไลท์ที่สูงกว่าตลอดจนเพิร์ลไลท์ที่ได้มีการกระจายตัวดีและมีขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ที่เล็กกว่า

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่มีธาตุผสมปริมาณน้อยมากของวาเนเดียม จะมีโอกาสเกิดโครงสร้างเบนไนท์ได้ง่ายเนื่องจากการมีวาเนเดียมละลายอยู่ในรูปสารละลายของแข็งจะช่วยส่งเสริมการเกิดเบนไนท์ โดยการขยับเส้นโค้งของการเกิดเบนไนท์ในแผนภูมิการเย็นตัวแบบต่อเนื่องมาทางด้านซ้ายมากขึ้น ดังนั้นในช่วงอัตราการเย็นตัว 2-15 °C /sec จะได้โครงสร้างจุลภาคเบนไนท์ ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อความแข็งแรง คือขนาดและสัดส่วนเชิงปริมาตรของเบนไนท์ ไม่ใช่การเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคตะกอน ดังนั้นในช่วงอัตราเย็นตัว 3-9 °C /sec ซึ่งได้โครงสร้างเบนไนท์ที่มีขนาดเกรนใกล้เคียงกัน จึงพบว่าอุณหภูมิม้วนเก็บไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย