

ผลของอุณหภูมิมีว่นเก็บต่อสมบัติเชิงกลของ
เหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่ผสมธาตุไนโอเบียม

นายนฤดม ทาดิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3857-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF COILING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES
OF NIOBIUM-CONTAINING HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL

Mr. Naruedom Thadee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3857-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอุณหภูมิที่สัมพันธ์ต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความ
แข็งแรงสูงที่ผสมธาตุไนโอเบียม
โดย นายนฤดม ทาดิ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย

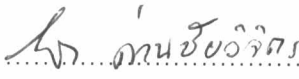
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ด้านชัยวิจิตร)

นฤตม ทาดี : ผลของอุณหภูมิມ้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความ
แข็งแรงสูงที่ผสมธาตุไนโอเบียม. (EFFECTS OF COILING TEMPERATURE ON
MECHANICAL PROPERTIES OF Nb-CONTAINING HIGH-STRENGTH LOW-
ALLOY STEEL) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย , 78
หน้า. ISBN 974-17-3857-9.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลของอุณหภูมิມ้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคใน
เหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่ผสมธาตุไนโอเบียม ชิ้นงานถูกทำให้ร้อนขึ้นอีกถึงอุณหภูมิ
1,250 °C แซ่ทิ้งไว้ 30 นาที แล้ววัดหยาบในช่วงการตกผลึกใหม่ของเกรนออกสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ
1,150 °C หลังจากนั้นรีดสุดท้ายในช่วงที่ไม่ตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 860 °C แล้วจึงทำขั้นตอน
สุดท้ายด้วยการจำลองการມ้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 - 670 °C ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน
ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ผลการทดลองพบว่า ช่วงอุณหภูมิจำลองการມ้วนเก็บ 510 - 670 °C ให้ค่าความเค้นแรง
ดึง, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่าความเค้นแรงดึงที่กำหนดไว้ที่ 450 MPa
ความเค้นจุดครากกำหนดไว้ที่ 345 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกำหนดไว้ที่ 21% โครงสร้าง
จุลภาคของชิ้นงานหลังจำลองการມ้วนเก็บในช่วงอุณหภูมิทดลองเป็นเฟอร์ไรท์และเฟิร์ลไลท์ เมื่อ
อุณหภูมิจำลองการມ้วนเก็บสูงขึ้น ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ใหญ่ขึ้นเล็กน้อยมีผลให้ความเค้นแรงดึง
ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ความเค้นจุดครากสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจำลองการມ้วนเก็บจนถึง 580
°C แล้วจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจำลองการມ้วนเก็บสูงขึ้น ค่าความเค้นจุดครากสูงสุดที่
อุณหภูมิ 580 °C อาจเป็นผลจากความแข็งแรงจากอนุภาคตกตะกอน ผลการทดลองไม่พบว่า
อุณหภูมิจำลองการມ้วนเก็บมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและปริมาณการลดขนาดพื้นที่

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....นฤตม ทาดี.....
ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....

##4470366721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : NIOBIUM-CONTAINING HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL / COILING TEMPERATURE / RECRYSTALLIZATION REGION / NON-RECRYSTALLIZATION REGION / PRECIPITATION STRENGTHENING

NARUEDOM THADEE : EFFECTS OF COILING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF NIOBIUM-CONTAINING HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI, Ph.D. ; 78 pp. ISBN 974-17-3857-9

This thesis investigated effects of coiling temperature on mechanical properties and microstructure of Niobium-containing high-strength low-alloy steel. Specimens were reheated at 1,250 °C for 30 minute and then rolled in austenite recrystallization region at 1,150 °C. Subsequently, rolled in non-recrystallization region at 860 °C and finally, coiling simulated from 510 to 670 °C. Mechanical properties were tested by tensile testing and microstructure was observed by optical microscope.

Results show that tensile stress, yield stress and elongation of specimens which coiling simulated from 510 to 670 °C are higher than designed properties, 450 MPa for tensile stress, 345 MPa for yield stress, and 21% for elongation. Microstructure of specimens after coiled at all coiling simulated temperature were ferrite and pearlite. The ferrite grain size slightly increase with an increase in coiling simulated temperature and the tensile stress decrease. The yield stress increase when coiling simulated temperature increase till 580 °C, then decrease with an increase in coiling simulated temperature. The maximum yield stress is obtained at 580 °C may be due to precipitation strengthening. As a result, coiling simulated temperature has no effects on percent elongation and reduction in area.

Department... Metallurgical Engineering..
Field of study... Metallurgical Engineering..
Academic year... 2003.....

Student's signature... Naruedom Thadee.
Advisor's signature... Prasonk Sricharoenchai.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ท่าน ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัยในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยประดับประดาชี้แนะให้ความรู้และข้อมูล จนมีงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ Prof. Jozef Zrnk ท่านอาจารย์ทุก ๆ ท่านตลอดจนพี่ ๆ อธิการภาควิชาวิศวกรรมโลหการ เพื่อนร่วมงานสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วชอ. ที่ช่วยเป็นธุระในการเตรียมชิ้นงานและคอยให้กำลังใจอย่างยิ่ง อีกทั้งเพื่อนร่วมรุ่นที่ช่วยเหลือจนเชื่อไม่ว่าทุกข์หรือสุข ขอขอบคุณหลุยส์กับข้อมูลสำคัญ ๆ บ็อบบี้-นักศึกษาปริญญาเอกกับคำแนะนำ และโดยเฉพาะเพื่อนรุ่นน้องร่วมกลุ่มวิจัย ณัฐพล รัตนมาลี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้องและผู้ที่อยู่เบื้องหลังสำคัญแห่งความสำเร็จนี้

นฤตม ทาดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรัชศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก.....	3
2.2 การควบคุมการรีดในกระบวนการรีดร้อน.....	4
2.2.1 การอบให้ร้อนขึ้นอีก.....	5
2.2.2 การรีดหยาบในช่วงตกผลึกใหม่.....	7
2.2.3 การรีดสุดท้ายในช่วงไม่ตกเกิดผลึกใหม่.....	8
2.2.4 การม้วนเก็บ.....	11
2.3 กระบวนการรีดร้อนในอุตสาหกรรม.....	13
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	14
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.2 การเตรียมชิ้นงาน.....	14
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	16
3.4 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	16
3.4.1 การตัดและเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	16
3.4.2 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	17

3.4.2.1 การตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์ ในระหว่างการจำลองการรีดร้อน.....	17
3.4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างเฟอร์ไรท์และเฟิร์ลไลต์หลังการ จำลองการม้วนเก็บ.....	18
3.5 วิธีการวัดขนาดเกรน.....	18
3.5.1 วิธีวัดขนาดเกรนแบบรียาว.....	18
3.5.2 วิธีวัดขนาดเกรนสมมาตร.....	18
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	20
4.1 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลที่ผ่านกระบวนการรีดร้อน.....	20
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดร้อน.....	20
4.1.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บ.....	25
4.1.3 ผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกล.....	26
4.2 ผลของส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการรีดร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล.....	35
4.2.1 ผลของส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการรีดร้อนต่อขนาด เกรนออสเทนไนท์และเฟอร์ไรท์.....	35
4.2.2 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อสมบัติเชิงกล.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	40
รายการอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก.....	44
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าที่ได้จากการตรวจสอบและจากการคำนวณอุณหภูมิ T_{nr} และ $A_3(^{\circ}C)$	9
ตารางที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิรีดสุดท้ายและอุณหภูมิม้วนเก็บต่อขนาดเกรนเฟอร์ไรท์(ไมครอน).....	12
ตารางที่ 2.3 กระบวนการรีดร้อนเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่ผสมธาตุ ไนโอเบียมในอุตสาหกรรม.....	13
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่ผสมธาตุ ไนโอเบียม(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	14
ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนอสเทนไนท์ระหว่างการรีดร้อนและขนาดเกรนเฟอร์ไรท์หลัง การม้วนเก็บ.....	21
ตารางที่ 4.2 ค่าความเค้นจุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 510 – 670 $^{\circ}C$	28
ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 510 – 670 $^{\circ}C$	28
ตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 510 – 670 $^{\circ}C$	28
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 $^{\circ}C$	33
ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานของโดมเดซและงานปัจจุบัน.....	37
ตารางที่ 4.7 กระบวนการรีดร้อนของชิ้นงานของโดมเดซและงานปัจจุบัน.....	37
ตารางที่ 4.8 ขนาดเกรนอสเทนไนท์และขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของงานของโดมเดซและงานปัจจุบัน.....	38

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 อุณหภูมิที่เกิดสารประกอบคาร์ไบด์และไนไตรต์สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัว.....	4
รูปที่ 2.2 การควบคุมการรีด (Controlled rolling) ในกระบวนการรีดร้อน โดยสังเขป.....	5
รูปที่ 2.3 ความสามารถในการละลายของไนโอเบียมคาร์ไบด์และไนโอเบียมคาร์ไบด์ในไตรายต์ในเหล็กคาร์บอนต่ำ.....	6
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนออสเทนไนท์กับอุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก.....	6
รูปที่ 2.5 ขนาดเกรนออสเทนไนท์ตกผลึกใหม่กับปริมาณการแปรรูปของเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำ.....	7
รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบแปรรูปภายใน (deformation band) และบริเวณการเกิดนิวเคลียสของเกรนเฟอร์ไรท์ในการรีดร้อน.....	8
รูปที่ 2.7 ผลของการเพิ่มปริมาณธาตุผสมปริมาณน้อยมากต่ออุณหภูมิหยุดการเกิดผลึกใหม่.....	9
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์กับปริมาณการรีดครั้งสุดท้ายที่ขนาดเกรนออสเทนไนท์ต่าง ๆ.....	10
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์กับค่า Effective austenite interface area.....	10
รูปที่ 2.10 ผลความแข็งแรงจากการทดสอบในโรงงาน (mill-trial) สำหรับเหล็กแผ่นรีดร้อน.....	12
รูปที่ 3.1 ลักษณะการเย็นตัวของกรม้วนเก็บในทางปฏิบัติ.....	15
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการจำลองสภาวะการรีดร้อนที่มีอุณหภูมิ้วนเก็บต่างกัน.....	15
รูปที่ 3.3 วงกลม 3 วงที่มีเส้นรอบวงของวงทั้ง 3 ยาว 500 มิลลิเมตรสำหรับวัดขนาดเกรนสมมาตร.....	19
รูปที่ 3.4 grid มาตรฐานจำนวน 24 จุดสำหรับหาสัดส่วนปริมาตรของแต่ละเกรนในการวัดขนาดเกรนสมมาตร.....	19
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,250 °C 30 นาที.....	22
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดหยาบที่อุณหภูมิ 1,150 °C ปริมาณการรีด 42%.....	22
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการรีดละเอียด.....	23
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดละเอียดที่อุณหภูมิ 860 °C ปริมาณการรีด 53.3%.....	23

รูป	หน้า
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C (ภาพดังกล่าวเป็นโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 510 °C).....	24
รูปที่ 4.6 ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C.....	24
รูปที่ 4.7 ผิวของชิ้นงานที่ทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงของ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาฯ.....	30
รูปที่ 4.8 เปรอเซ็นต์ความแตกต่างของความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ทดสอบ แรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาฯ เมื่อเทียบกับที่ได้จากการทดสอบแรงดึงจากประเทศสโลวาเกีย.....	31
รูปที่ 4.9 Stress-Strain curve จากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่อง ทดสอบแรงดึงของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาฯ.....	32
รูปที่ 4.10 ความเค้นจุดครากและความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C...33	
รูปที่ 4.11 เปรอเซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C.....	34
รูปที่ 4.12 เปรอเซ็นต์การลดขนาดพื้นที่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C	34
รูปที่ 4.13 ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานที่ผ่านการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C ของงานเดิมและงานปัจจุบัน.....	38
รูปที่ 4.14 ความเค้นจุดครากของชิ้นงานของชิ้นงานที่ผ่านการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 510 – 670 °C ของงานเดิมและงานปัจจุบัน.....	39