ผลของอัตราการเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ

นายณัฐพล รัตนมาลี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546
ISBN 974-17-3858-7
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21236197

EFFECT OF COOLING RATE AND COILING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE HIGH STRENGTH LOW-ALLOY STEEL

Mr. Nattapon Ratanamalee

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-17-3858-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอัตราการเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ
โดย	นาย ณัฐพล รัตนมาลี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐพล รัตนมาลี : ผลของอัตราการเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ. (Effect of Cooling Rate and Coiling Temperature on Mechanical Properties of the High Strength Low-Alloy Steel) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, 71หน้า. ISBN 974-17-3858-7.

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาผลของอัตราเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่มีปริมาณธาตุผสมน้อยมากของวาเนเดียม โดยอบชิ้นงานให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที ทำการรีดเพื่อลดขนาด 42% ที่อุณหภูมิ 1100°C ทำการรีดละเอียด 53% ที่อุณหภูมิ 1000°C จากนั้นแปรผันอัตราการเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บ โดยใช้อัตราเย็นตัว 1,3,5,9,20°C/sec และอุณหภูมิม้วนเก็บ 400°C,500°C และ600°C จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ผลการทดลองพบว่าสำหรับอัตราการเย็น 1°C /sec การใช้อุณหภูมิม้วนเก็บ 500°C จะได้ความเค้นจุดครากสูงที่สุด เนื่องจากผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาควาเนเดียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิม้วนเก็บ แต่ผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคตะกอนวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิม้วนเก็บไม่เด่นชัด เนื่องจากการตกตะกอนอนุภาควาเนเดียมคาร์โบไนตรายด์ในช่วงอุณหภูมิก่อนการม้วนเก็บ ทำให้ธาตุวาเนเดียมที่คงเหลืออยู่ในรูปแบบสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิม้วนเก็บมีปริมาณน้อยลง ในช่วงอัตราการเย็นตัว 3-9 °C /sec ได้โครงสร้างเบนไนท์ที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกันและไม่เกิดการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคตะกอนที่อุณหภูมิม้วนเก็บ ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต...ณัฐพล รัตนมาลี.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470301921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL / RECRYSTALLIZATION / COOLING RATE / PRECIPITATE / MICROSTRUCTURE

NATTAPON RATANAMALEE : EFFECT OF COOLING RATE AND COILING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE HIGH STRENGTH LOW- ALLOY STEEL. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. PRASONK SRICHAREONCHAI, D.Eng., 71 pp. ISBN 974-17-3858 -7.

This thesis investigates effects of cooling rate and coiling temperature on the final microstructure and mechanical properties of vanadium HSLA. Specimens were reheated at 1150°C for 30 min then were deformed at 1100 °C with reduction of 42 %, subsequently were deformed at 1000 °C with reduction of 53%, then cooled down to coiling temperature of 400,500 and 600°C with cooling rate 1,3,5,9 and 20°C s^{-1}. The mechanical properties of specimens with various cooling conditions were determined by tensile test. Microstructures were investigated by optical microscope.

It was found that with the cooling rate of 1 °C s^{-1} , specimens coiled at 500 °C show the maximum yield strength.This effect might be due to precipitation of VC at coiling temperature.The effect of precipitation strengthening is insignificant because vanadium is consumed to form VCN before coiling.Therefore, the amount of vanadium in solid solution is decreased. For the cooling rate between 3 - 9 °C s^{-1} , the bainitic structure is rather identical and no effect of VC precipitation was observed. As a result, the mechanical properties did not change so much.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...Metallurgical Engineering..... Student's signature Nattapon Ratanamalee
Field of study...Metallurgical Engineering... Advisor's signature Prasonk Sricharoenchai
Academic year ...2003.... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ท่านได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการทำงานในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร กรรมการ Professor Josef Zrnik ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล เดี่ยววณิชย์ และ อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณเสนีย์ มณีเพชร คุณทินกร ผดุงวงศ์ และคุณ สวรินทร์ รัตนมหาสกุล ที่ได้แนะนำและช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ขอขอบพระคุณ คุณนฤดม ทาดี ที่ได้เสนอข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนเพื่อนๆและรุ่นพี่ปริญญาโททุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญุตาบูชาแด่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนสถาบันการศึกษาอันเป็นที่รักยิ่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฌ
สารบัญรูป..... ญ
บทที่
1 บทนำ..... 1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2
2 ปริทัศน์วรรณกรรม..... 4
2.1 บทบาทของธาตุผสมในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ..... 6
2.2 อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก..... 7
2.3 ปริมาณการแปรรูปร้อนในช่วงที่เกิดการตกผลึกใหม่..... 9
2.4 อุณหภูมิการรีดสุดท้าย..... 9
2.5 อัตราการเย็นตัว..... 11
2.6 อุณหภูมิม้วนเก็บ..... 14
3 ระเบียบวิธีการวิจัย..... 16
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... 16
3.2 กระบวนการรีดร้อน..... 16
3.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์ในระหว่างกระบวนการรีดร้อน..... 17
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล..... 17
3.5 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค..... 18
3.5.1 การตัด และเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค..... 18
3.5.2 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค..... 18
3.5.2.1 การตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์ ในระหว่างกระบวนการรีดร้อน..... 18

หน้า

3.5.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังการม้วนเก็บ.....19
3.6 วิธีการวัดขนาดเกรน.....20
3.6.1 การใช้เส้นตรง (Heyn lineal intercept procedure).....20
3.6.2 การใช้วงกลม 3 วง (Abrams three-circle procedure).....20
4 ผลการทดลอง..... 22
4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในระหว่าง และหลังการรีดร้อน..... 22
4.2 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมาก ของธาตุวาเนเดียม..... 23
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นตัวและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุ ผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุวาเนเดียม..... 44
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุวาเนเดียม.....44
5 การอภิปราย..... 46
5.1 ผลของการเพิ่มความแข็งแรงโดยอนุภาคก่อนการม้วนเก็บ.....46
5.2 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อสมบัติเชิงกล.....47
5.3 ผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่อสมบัติเชิงกล.....48
6. สรุปผลการทดลอง.....51
รายการอ้างอิง.....52
ภาคผนวก.....55
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....71

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุวาเนเดียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)..... 16
ตารางที่ 3.2 สารละลาย ส่วนผสม และการใช้งาน สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....19
ตารางที่ 4.1 ขนาดโครงสร้างจุลภาคระหว่าง และหลังการรีดร้อน.....23
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลที่อัตราเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บต่างๆ..... 24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การรีดแบบควบคุม..... 4

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่สารประกอบคาร์ไบด์ และไนตรายด์สามารถเกิดขึ้นกับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัว..... 5

รูปที่ 2.3 การควบคุมโครงสร้างจุลภาคโดยกระบวนการรีดเทอร์โมแมคแคนิเคิล..... 5

รูปที่ 2.4 อิทธิพลของธาตุผสมต่อการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์..... 8

รูปที่ 2.5 ผลของการเติมธาตุผสมปริมาณน้อยมากต่ออุณหภูมิที่ไม่มีการตกผลึกใหม่..... 10

รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิรีดสุดท้ายต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดร้อน..... 10

รูปที่ 2.7 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนในเหล็กกล้าไนโอเบียมและในเหล็กกล้าวาเนเดียม..... 11

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)..... 12

รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรท์และสัดส่วนเชิงปริมาตรของเบนไนท์กับอัตราเย็นตัว ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่มี 0.04%Nb – 0.09%V..... 12

รูปที่ 2.10 ผลของอัตราเย็นตัวต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ(0.10%C – 0.31%Si – 1.50%Mn – 0.092%V)..... 13

รูปที่ 2.11 การควบคุมโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการทำการรีดเหล็กแผ่นรีดร้อน..... 13

รูปที่ 2.12 การเกิดอนุภาคตะกอนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ..... 15

รูปที่ 3.1 วงกลม 3 วงที่ใช้ในการหาขนาดเกรน..... 21

รูปที่ 3.2 แผ่นภาพที่ใช้ในการหาสัดส่วนเชิงปริมาตร..... 21

รูปที่ 4.1 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C เป็นเวลา 30 นาที..... 25

รูปที่ 4.2 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% ที่อุณหภูมิ 1,100°C..... 25

รูปที่ 4.3 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% และรีดสุดท้าย ปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C..... 26

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 1 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 400 °C..... 26

รูปที่ 4.5 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์-เบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 3 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 400 °C..... 27

รูปที่ 4.6 โครงสร้างเบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 5 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 400 °C..... 27

รูปที่ 4.7 โครงสร้างเบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 9 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 400 °C..... 28

รูปที่ 4.8 โครงสร้างมาร์เทนไซท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 20 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 400 °C..... 28

รูปที่ 4.9 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 1 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 500 °C..... 29

รูปที่ 4.10 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์-เบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 3 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 500 °C..... 29

รูปที่ 4.11 โครงสร้างเบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 5 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 500 °C..... 30

รูปที่ 4.12 โครงสร้างเบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 9 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 500 °C..... 30

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 1 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 600 °C..... 31

รูปที่ 4.14 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์-เบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 3 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 600 °C..... 31

รูปที่ 4.15 โครงสร้างเบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 5 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 600 °C..... 32

รูปที่ 4.16 โครงสร้างเบนไนท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150 °C รีดหยาบครั้งแรก 42% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 53.3% ที่อุณหภูมิ 1,000 °C แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว 9 °C /sec . ไปม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 600 °C..... 32

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการใช้อัตราเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บต่างๆ.....33

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นตัวกับความเค้นแรงดึงที่อุณหภูมิม้วนเก็บต่างๆ.....34

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นตัวกับความเค้นจุดครากที่อุณหภูมิม้วนเก็บต่างๆ....35

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นตัวกับเปอร์เซ็นต์ยืดตัวที่อุณหภูมิม้วนเก็บต่างๆ.....36

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นตัวกับเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่ ที่อุณหภูมิม้วนเก็บต่างๆ.....37

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเย็นตัวกับสัดส่วนความเค้น ที่อุณหภูมิม้วนเก็บต่างๆ...38

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บกับความเค้นแรงดึงที่อัตราเย็นตัวต่างๆ.....39

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บกับความเค้นจุดครากที่อัตราเย็นตัวต่างๆ....40

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บกับเปอร์เซ็นต์ยืดตัวที่อัตราเย็นตัวต่างๆ.....41

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บกับเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่ ที่อัตราเย็นตัวต่างๆ.....42

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บกับสัดส่วนความเค้น ที่อัตราเย็นตัวต่างๆ....43