

การหาค่าความเค้นภายในขณะคืบของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล



นายสุคเชตต์ อิ่มเหลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1664-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF INTERNAL STRESS DURING CREEP OF THERMOMECHANICALLY
PROCESSED 304 STAINLESS STEEL



Mr. Soodkhet Imlao

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2001

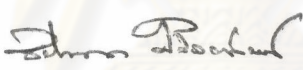
ISBN 974-03-1664-6

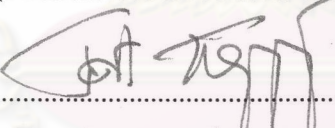
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาค่าความเค้นภายในขณะคืบของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่าน
กระบวนการความร้อนเชิงกล
โดย นายสุคเชตต์ อิมเหลา
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งยีพร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ชاکกริต ศิริกุลนัมภ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งยีพร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

สุดเขตต์ อิมเพลลา: การหาค่าความเค้นภายในขณะคืบของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการ ความร้อนเชิงกล (DETERMINATION OF INTERNAL STRESS DURING CREEP OF THERMOMECHANICALLY PROCESSED 304 STAINLESS STEEL): อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.วิศิษฐ์ ทวีปรั้งยีพร, 63 หน้า. ISBN 974-03-1664-6

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบบของกระบวนการความร้อนเชิงกลที่มีต่อความเค้นภายใน (internal stress, σ_i) ระหว่างการคืบของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ซึ่งกระบวนการความร้อนเชิงกลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เริ่มจากการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปรีดให้ความหนาคลง 3 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 3 นาที และเรียกเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านกระบวนการ ให้ความร้อนเชิงกลว่า 304TT สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า 304AR ในงานวิจัยครั้งนี้พบว่ากระบวนการความร้อนเชิงกลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวทางสถิติของความลาดชันของขอบเกรน (grain boundary inclination distribution) โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของขอบเกรนชนิด CSLB (Coincidence-Site-Lattice Boundary) และจากการศึกษาการเซนซิไทซ์ที่อุณหภูมิ 650°C พบว่า 304TT มีความต้านทานต่อการเซนซิไทซ์บริเวณขอบเกรนมากกว่า 304AR

เพื่อศึกษาผลกระทบบของกระบวนการความร้อนเชิงกลที่มีต่อการคืบ งานวิจัยนี้จึงได้สร้างเครื่องทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักคงที่แก่ชิ้นงาน (constant load creep testing machine) โดยทำการทดลองให้ความเค้น 200 MPa แก่ชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 650°C จากผลการทดลองพบว่า การเซนซิไทซ์มีผลต่อพฤติกรรมการคืบของ 304AR มากกว่า 304TT และเมื่อทำการหาค่าความเค้นภายในโดยวิธี load reduction creep test พบว่า ค่าความเค้นภายในของ 304TT มีค่าน้อยกว่า 304AR และชิ้นงานทั้งสองมีค่าความเค้นภายในลดลงเมื่อนำชิ้นงานผ่านกระบวนการเซนซิไทซ์ก่อนที่จะนำไปทดสอบการคืบ แต่จากการทดลองหาค่า apparent stress exponent (n) พบว่า ค่า n ของ 304TT มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 10-11 ในขณะที่ค่า n ของ 304AR มีค่าเพิ่มขึ้นในจาก 10 เป็น 12 เมื่อถูกเซนซิไทซ์ ดังนั้นจึงทำให้การเซนซิไทซ์มีผลกระทบต่อลักษณะการคืบของ 304AR มากกว่า 304TT

ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2544	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270602621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORD: INTERNAL STRESS/ CREEP/ THERMOMECHANICAL PROCESSING /304 STAINLESS STEEL

SOODKHET IMLAO: DETERMINATION OF INTERNAL STRESS DURING CREEP OF THERMOMECHANICALLY PROCESSED 304 STAINLESS STEEL. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. DR.VISIT THAVEEPRUNGSRIPIORN, 63 PP. ISBN 974-03-1664-6

The objective of this research is to compare the effect of thermomechanical processing on internal stress during creep of 304 stainless steel. To prepare thermomechanically processed samples, the as-received material, 304AR, was first heat treated at 900°C for an hour followed by a 3% reduction in thickness and annealed at 900°C for 3 minutes, henceforth refer to as 304TT. It was found that the thermomechanical process altered boundary inclination distribution while keeping the coincidence site lattice boundary distribution essentially the same. Sensitization studied at 650°C also showed that the 304TT exhibited higher resistance to sensitization than that in 304AR.

To study the effect of themomechanical processing on creep behavior of 304 stainless steel, a constant load creep testing machine was constructed. Results from constant load creep testing at 200 MPa and 650°C revealed that the effect of sensitization on creep behavior of 304AR was more pronounced than that of 304TT. Moreover, result from load reduction creep test indicated that the internal stress of 304TT was less than that of 304AR and decreasing with increasing sensitization time. However, it was found that apparent stress exponent (n) of 304TT was quite constant and was in the range of 10-11 and lower than that in 304AR where it was found to be in the range of 10-12 and increasing with sensitization time. Therefore, sensitization has more effect on creep characteristic of 304AR than 304TT.

Department Nuclear Technology
Field of study Nuclear Technology
Academic year 2001

Student's signature.....
Advisor's signature.....
Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งนิพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์เคโซ ทองอร่าม เป็นอย่างสูงที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องการสร้างเครื่องทดสอบ การตีพิมพ์รวมทั้งให้คำปรึกษาในงานวิจัยทุกเรื่อง และขอขอบคุณ ดร.จิระพงษ์ กสิวิทย์อำนวย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเอกสารอ้างอิง

ขอขอบคุณบริษัทไทยน็อกซ์ สตีล จำกัด ที่อนุเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิม 304 เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ นส.สุภลักษณ์ ลวดลาย นส.นริศรา ลำอังกาย นายกิตติพงษ์ เกษมสุข นายสุเมธ ทิพย์ไกรสร และ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในหลายๆ เรื่อง

ขอขอบคุณ คุณบังอร วัฒนาอำไพ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลที่มีความสำคัญที่สุดในชีวิตของข้าพเจ้าคือ บิดา (พ.ต.อ.สุพจน์ อิ่มเหลา) และ มารดา (นางประไพสร อิ่มเหลา) ของข้าพเจ้าที่ทำให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้านการเงินแก่ข้าพเจ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์อังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2. ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับกลไกการคืบของวัสดุ.....	6
2.1 คำนำ.....	6
2.2 ชนิดของการคืบ.....	7
2.3 การเพิ่มความแข็งแรงของโครงผลึกของวัสดุ.....	10
2.4 ความเค้นภายในของวัสดุขณะคืบ.....	14
2.5 การหาค่าความเค้นภายในของวัสดุ.....	14
3. ผลกระทบของกระบวนการความร้อนเชิงกลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขอบเกรน.....	18
3.1 คำนำ.....	18
3.2 Grain Boundary Geometry.....	18
3.3 กระบวนการความร้อนเชิงกล.....	23
4. การทดลอง.....	25
4.1 คำนำ.....	25
4.2 เครื่องทดสอบการคืบแบบน้ำหนัคงที่.....	25
4.3 การเตรียมชิ้นงาน.....	32
4.4 การทดสอบการคืบ.....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	35
5. ผลการทดลองและอภิปราย.....	36
5.1 คำนำ.....	36
5.2 ลักษณะ โครงข่ายขอบเกรนหลังจากผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล.....	36
5.3 ผลการทดสอบการคืบโดยให้น้ำหนักคงที่แก่ชิ้นงาน.....	41
5.4 ผลการหาความเค้นภายในด้วยวิธี Load Reduction Test.....	45
5.5 อภิปรายผลการทดลอง.....	52
5.6 สรุป.....	56
รายการอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	63



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

บทที่	หน้า
4.1 ส่วนประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	32
4.2 ชนิดชิ้นงานที่นำมาทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักคงที่.....	33
4.3 การจำแนกชิ้นงานตามระยะเวลาเซนซิไทซ์เพื่อหาค่าความเค้นภายในของ 304AR และ 304TT.	34
4.4 แผนการทดลองการหาค่าความเค้นภายในของ 304AR และ 304TT.....	34
5.1 ค่าความเค้นภายในของ 304AR และ 304TT ที่อัตราการคืบ 1×10^{-8} ต่อวินาที, ค่าความเค้นเริ่มต้น ที่ให้แก่ชิ้นงานเท่ากับ 200 MPa, 650°C.....	46



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ความคืบที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ.....	2
2.1 แสดงถึงลักษณะของการคืบที่อุณหภูมิสูง.....	6
2.2 การแพร่ของมวลและช่องว่างขณะคืบ.....	7
2.3 การเลื่อนไถลของขอบเกรนหลังจากการแพร่.....	8
2.4 การก่อตัวของโครงสร้างย่อยภายในเกรนของเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอน 3% ที่อุณหภูมิ 643°C ณ ที่ความเครียดต่างๆ.....	9
2.5 ขนาดของตัวถูกละลายเล็กกว่าตัวทำละลายทำให้เกิดการอัดตัวของโครงผลึก.....	10
2.6 ขนาดของตัวถูกละลายใหญ่กว่าตัวทำละลายทำให้เกิดการขยายตัวของโครงผลึก.....	11
2.7 ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคของตะกอน.....	12
2.8 a) การคืบของ 10Cr-30Mn Austenitic Steel during ที่ความเค้น 245 MPa อุณหภูมิ 873 K b) ตะกอนคาร์ไบด์หลังการ aging 1000 ชั่วโมง มีลักษณะโต การกระจายตัวมีความหนา แน่นน้อย c) ตะกอนคาร์ไบด์ไม่ผ่านการ aging มีลักษณะเล็กและการกระจายตัวมีความหนา แน่นมาก.....	13
2.9 แสดงวิธีการหาค่าความเค้นภายใน.....	15
2.10 การหาค่าความเค้นภายใน โดยวิธี dip test ของเหล็ก.....	15
2.11 แสดงผลการหาค่า incubation time ของตะกั่วที่มีโครงผลึกแบบ Polycrystalline.....	16
2.12 การหาค่าความเค้นภายในของโลหะผสม Ni-16Cr-9Fe ที่มีปริมาณสัดส่วนขอบเกรนชนิด CSLB ต่างกันขณะคืบที่อุณหภูมิ 360°C.....	17
3.1 a) แสดงถึงขอบเกรนที่เกิดจาก 2 เกรน ทำมุมต่อกัน θ บนแกนอ้างอิง UVW b) แสดงถึงเกรน 2 เกรนที่มีระนาบ N_1 และ N_2 ทำมุม β ต่อกัน.....	19
3.2 แสดง CSL ที่มีค่าเท่ากับ $\Sigma 5$	20
3.3 มุมและพลังงานของขอบเกรนที่เกิดขึ้น ณ Triple junction.....	21
3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจาย Cumulative Frequency of Dihedral Angle และการกระจายคุณสมบัติของขอบเกรน.....	22
4.1 ภาพถ่ายของเครื่องทดสอบความคืบ.....	27
4.2 แผนภาพ โครงสร้างของเครื่องทดสอบความคืบ.....	28
4.3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller).....	30
4.4 แสดงผลกระทบบของอุณหภูมิที่มีต่อสัญญาณของ LVDT.....	31

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.5 แสดงสัญญาณของ LVDT หลังจากทำการชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อ LVDT.....	31
4.6 ขนาดของชิ้นงานทดสอบ.....	32
5.1 ภาพถ่ายโครงข่ายขอบเกรน.....	36
5.2 ภาพถ่าย Pole Figure แสดงลักษณะการกระจายตัวของ Microtexture.....	37
5.3 การกระจายตัวของขอบเกรนแบบ CSLB ของชิ้นงาน 304TT และ 304AR.....	38
5.4 การกระจายตัวของ dihedral angle ของ 304TT และ 304AR.....	38
5.5 การกระจายตัวของความลาดเอียงของขอบเกรนของ 304TT และ 304AR.....	39
5.6 ภาพถ่ายระนาบของขอบเกรน.....	40
5.7 สัดส่วนของ โครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบนขอบเกรนของ 304TT และ 304AR.....	40
5.8 a) กราฟการคืบของ 304AR หลังจากผ่านการเซนซิไทซ์ที่เวลาต่างๆ แล้วนำมาทดสอบการคืบที่ความเค้น 200 MPa อุณหภูมิ 650 °C.....	41
b) กราฟการคืบของ 304TT หลังจากผ่านการเซนซิไทซ์ที่เวลาต่างๆ แล้วนำมาทดสอบการคืบที่ความเค้น 200 MPa อุณหภูมิ 650 °C.....	42
5.9 a) กราฟการคืบของ 304AR หลังจากผ่านการเซนซิไทซ์ที่เวลาต่างๆ แล้วนำมาทดสอบการคืบที่ความเค้น 200 MPa อุณหภูมิ 650°C โดยแสดงบนแกน logarithm.....	42
b) กราฟการคืบของ 304TT หลังจากผ่านการเซนซิไทซ์ที่เวลาต่างๆ แล้วนำมาทดสอบการคืบที่ความเค้น 200 MPa อุณหภูมิ 650 °C โดยแสดงบนแกน logarithm.....	43
5.10 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ชิ้นงานขาดกับค่าอัตราการคืบต่ำสุดที่ถูกควบคุมโดยกลไกของการคืบแบบเดียวกัน.....	44
5.11 แผนผังกลไกการคืบของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จุดเครื่องหมายสีแดงแสดงค่าความเค้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองซึ่งตรงกับค่าอัตราการคืบในแผนผังที่ใช้เป็นมาตรฐาน.....	45
5.12 ค่าความเค้นภายในของ 304R โดยพิจารณาให้อัตราการคืบที่ 1×10^{-8} เป็นอัตราการคืบต่ำสุดที่วัดได้ต่ำสุดที่วัดได้.....	46
5.13 ค่าความเค้นภายในของ 304TT โดยพิจารณาให้อัตราการคืบที่ เป็นอัตราการคืบต่ำสุดที่วัดได้.....	47
5.14 ค่าความเค้นภายในของ 304AR และ 304TT มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการเซนซิไทซ์เพิ่มขึ้น.....	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.15 ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์บนขอบเกรน 304TT และ 304AR ระหว่างการทดสอบหาค่าความเค้นภายในหลังจากถูกเซนซิไทซ์ด้วยเวลาต่างๆ	48
5.16 apparent stress exponent (ความชันของกราฟ) ของ 304AR ที่ผ่านการเซนซิไทซ์ตามช่วงเวลาต่างๆ	50
5.17 apparent stress exponent (ความชันของกราฟ) ของ 304TT ที่ผ่านการเซนซิไทซ์ตามช่วงเวลาต่างๆ.....	50
5.18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า n ของ 304TT และ 304AR หลังจากถูกเซนซิไทซ์ด้วยเวลาต่างๆ	51
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบต่ำสุดกับค่า effective stress ของชิ้นงาน 304AR และ 304TT ที่ถูกเซนซิไทซ์ที่เวลาต่างๆ กัน.....	52
5.20 ผลของการเซนซิไทซ์เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ต่อการคืบ.....	53
5.21 ผลของการเซนซิไทซ์เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ต่อการคืบ (304S เป็นชิ้นงานที่ถูกเซนซิไทซ์ 24 ชั่วโมงก่อนนำมาทดสอบการคืบ , 304A เป็นชิ้นงานที่ถูก Annealing , และ 304L เป็นชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ.....	53
5.22 กราฟการคืบช่วง transient creep ของ 304AR	54
5.23 กราฟการคืบช่วง transient creep ของ 304TT	54
5.24 ค่าความชันของกราฟอัตราการคืบกับระยะเวลาการเซนซิไทซ์ของ 304AR และ 304TT.....	55
ก.1 ตัวอย่างกราฟการทดลอง reduction load test เพื่อหาค่าความเค้นภายใน.....	62