

การศึกษาการอ่อนตัวแบบไดนามิกระหว่างการแปรรูปร้อน  
ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (St.15)

นาย เกรียงยุทธ ฝิวอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-666-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DYNAMIC SOFTENING DURING HOT DEFORMATION  
OF AN EXTRA LOW CARBON STEEL (St.15)**

**Mr. Kriangyut Phiu-on**

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

**Department of Metallurgical Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1997**

**ISBN 974-637-666-7**

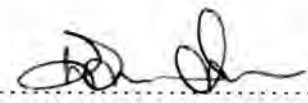
Thesis Title            Dynamic Softening during Hot Deformation of an Extra Low  
                                 Carbon Steel (St.15)  
By                            Mr. Kriangyut Phiu-on  
Department            Metallurgical Engineering  
Thesis Advisor        Assistant Professor Prasonk Sricharoenchai, D. Eng.

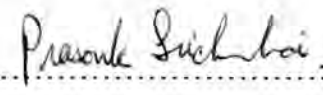
---

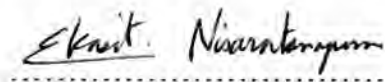
Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment  
of the Requirements for the Master's Degree/

..... Dean of Graduate School  
—(Professor Supawat Chutivongse, M. D.)

Thesis committee

..... Chairman  
(Associate Professor Chatchai Somsiri, Ph. D.)

..... Thesis Advisor  
(Assistant Professor Prasonk Sricharoenchai, D. Eng.)

..... Member  
(Ekasit Nisaratanaporn, Ph. D.)

เกรียงยุทธ ผิวอ่อน : การศึกษาการอ่อนตัวแบบไดนามิกระหว่างการแปรรูปร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (St.15) (DYNAMIC SOFTENING DURING HOT DEFORMATION OF AN EXTRA LOW CARBON STEEL (St.15)) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, 110 หน้า. ISBN 974-637-666-7.

พฤติกรรมการอ่อนตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (St.15) ระหว่างการแปรรูปในช่วงออสเตนไนต์, ช่วงเฟอร์ไรต์และช่วง 2 เฟสได้รับการศึกษาโดยการกดชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิทำให้เป็นออสเตนไนต์ที่ต่างกัน 2 ค่า คือ 1000 °C และ 1250 °C ได้ถูกเลือกใช้เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดเกรนเริ่มต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการแปรรูปอยู่ระหว่าง 700-1250 °C อัตราการแปรรูปที่ใช้ได้แก่ 0.01, 0.1, 1 และ 10/s

ความเค้นวิกฤตได้นิยามโดยเท่ากับความเค้นที่ความเครียด 0.8  $\epsilon_p$  โดยที่  $\epsilon_p$  คือความเครียดที่ค่าความเค้นสูงสุดหรือที่จุดยอดระหว่างแปรรูป ความเค้นวิกฤตในช่วงเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแปรรูปลดลงเร็วกว่าของในช่วงออสเตนไนต์

ในกรณีของการแปรรูปในช่วงออสเตนไนต์ ขนาดเกรนเริ่มต้นที่ใหญ่มีผลต่อการเกิดเกรนใหม่แบบไดนามิก โดยการเลื่อนความเครียดที่ค่าความเค้นสูงสุดไปที่ค่ามากขึ้น การลดอุณหภูมิแปรรูปหรือการเพิ่มอัตราความเครียดชะลอการเริ่มเกิดเกรนใหม่แบบไดนามิกโดยการเลื่อนจุดที่ความเค้นสูงสุดและจุดที่ความเค้นเริ่มคงที่ไปปรากฏที่ค่าสูงขึ้น ในกรณีของการแปรรูปในช่วงเฟอร์ไรต์ ค่าความเครียดที่ค่าความเค้นเริ่มคงที่เหมือนจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิแปรรูปและอัตราความเครียด

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
ปีการศึกษา ..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต ..... ผิวอ่อน  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C818182: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING  
KEY WORD: AUSTENITE / FERRITE / HOT DEFORMATION  
KRIANGYUT PHIU-ON : DYNAMIC SOFTENING DURING HOT DEFORMATION  
OF AN EXTRA LOW CARBON STEEL (St.15). THESIS ADVISOR :  
ASSIST. PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI, D.Eng. 110 pp.  
ISBN 974-637-666-7.

The softening behaviour of an extra low carbon steel (St.15) during deformations in austenitic, ferritic and dual-phase ranges was investigated using hot compression tests. Two different austenitizing conditions were chosen, once at 1000 °C and the other at 1250 °C in order to investigate the effect of initial grain size. The deformation temperatures were between 700 °C and 1250 °C. The strain rates were 0.01, 0.1, 1 and 10/s.

The critical flow stress is defined as the stress equal to the stress at  $0.8\varepsilon_p$ , where  $\varepsilon_p$  is the strain at maximum or peak stress during deformation. The critical flow stress in the ferritic range increases more rapidly with decreasing deformation temperatures than that in the austenitic range.

In the case of deformation in the austenitic range, a large initial grain size affects the dynamic recrystallization by shifting the strain at the peak stress to a higher value. Decreasing deformation temperatures or increasing strain rates delays the onset of dynamic recrystallization by shifting the peak stress and also the steady state stress to higher values. In the case of ferritic deformation, the strain at the onset of steady state seems to be independent of deformation temperatures and strain rates.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต *กฤษณะกร วัฒน*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Prasong*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

## ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express his sincere gratitude to his advisor, Assistant Professor Dr. Prasonk Sricharoenchai. Acknowledgments are also extended to the other members of the committee, Associate Professor Dr. Chatchai Somsiri for his stimulating criticisms and suggestions, Dr. Ekasit Nisaratanaporn and Dr. Ittipon Diewwanit for helpful discussions. Special thanks go to Professor Wolfgang Bleck, Dipl. Heike Langner and Dr. Rolf Degel at the Institute of Ferrous Metallurgy, Aachen University of Technology, Germany for guidance and provision of research facilities. The author acknowledge with gratitude the financial support received from the Nakornthai Strip Mill (Public) Co., Ltd. for this research.

At last, the author is deeply indebted to his parent for their encouragement and support leading to the completion of this study.

## CONTENTS

	Page
Abstract (in Thai).....	IV
Abstract (in English).....	V
Acknowledgments.....	VI
Contents.....	VII
List of Figures.....	VIII
Chapter	
I. Introduction.....	1
II. Literature survey.....	5
III. Experiment.....	41
IV. Results.....	50
V. Discussion.....	80
VI. Conclusion.....	84
References.....	87
Appendixes.....	93
Biography.....	110

## LIST OF FIGURES

Figure	Page
2-1 Schematic illustration of the softening processes and their influence on the development of austenite structure during hot rolling of steels.....	5
2-2 Different types of hot flow curve.....	7
2-3 Stress as a function of dynamic recrystallization.....	9
2-4 Microstructural evolution due to dynamic recrystallization.....	10
2-5 Effect of alloying elements on the changing of flow stress compared to pure iron.....	12
2-6 Hot flow curves of unalloyed and microalloyed steel.....	13
2-7 Effect of deformation temperature and strain rate on the critical flow stress of IF steel after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes.....	14
2-8 Effect of austenite grain size on stress-strain curves.....	17
2-9 (a) Influence of temperature on the flow curves of IF steel.....	19
(b) Influence of strain rates on the flow curves of IF steel.....	19
2-10 Schematic illustration of the progress of dynamic recrystallization when the recrystallized grain size is much smaller than the original grain size.....	21



2-11	Relation between dynamic recrystallization (a) and static softening mechanisms (b) as a function of strain.....	24
2-12	Multi-stroke technique to evaluate static softening processes.....	27
2-13	Static softening of VAC steel after deformation in austenite or ferrite....	30
2-14	Processing schedules for austenite and ferrite.....	32
2-15	Influence of the carbon content on the transverse yield strength and ductility after ferritic rolling.....	33
2-16	(a) Effect of deformation temperature on yield and tensile strength.....	34
	(b) Effect of processing temperature on uniform and total elongation....	34
2-17	Process parameters for cold rolling (final thickness 0.44 mm) from austenitic or ferritic hot strip.....	36
2-18	Comparison of hot deformation simulation methods.....	37
2-19	Compression test.....	38
3-1	Development of the yield strength of cold rolled commercial qualities....	42
3-2	“Schenck” hot deformation simulator at the Institute of Ferrous Metallurgy of Aachen University of Technology.....	44
3-3	Specimen geometry.....	45
3-4	Experiment procedure.....	45
3-5	Illustration of relative position for metallographic examination.....	48
4-1	Effect of deformation temperature and strain rate on the critical flow stress of St.15 after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes.....	50

4-2	Effect of deformation temperature (in $\gamma$ range) and strain rate on the critical flow stress of St.15 (after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes).....	52
4-3	Effect of deformation temperature (in $\alpha$ range) and strain rate on the critical flow stress of St.15 (after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes).....	52
4-4	Effect of deformation temperature (in $\gamma$ and $\alpha$ range) and strain rate on the critical flow stress of St.15 (after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes).....	53
4-5	Effect of deformation temperature (in $\gamma$ range) and strain rate on the critical flow stress of St.15 (after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes).....	54
4-6	Effect of deformation temperature (in $\alpha$ range) and strain rate on the critical flow stress of St.15 (after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes).....	54
4-7	Effect of deformation temperature and strain rate on the critical flow stress of St.15 after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes.....	56
4-8	Effect of deformation temperature and austenitizing condition on the critical flow stress of St.15 at a constant strain rate of 1/s.....	56

4-9	Effect of deformation temperature (in $\gamma$ range) on the stress-strain curves of St.15 at a constant strain rate of 1/s (after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes).....	58
4-10	Effect of deformation temperature (in $\alpha$ range) on the stress-strain curves of St.15 at a constant strain rate of 1/s (after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes).....	58
4-11	Effect of deformation temperature (in $\gamma$ range) on the stress-strain curves of St.15 at a constant strain rate of 1/s (after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes).....	60
4-12	Effect of deformation temperature (in $\alpha$ range) on the stress-strain curves of St.15 at a constant strain rate of 1/s (after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes).....	60
4-13	Effect of strain rate on the stress-strain curves of St.15 at 950 °C (after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes).....	62
4-14	Effect of strain rate on the stress-strain curves of St.15 at 750 °C (after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes).....	63
4-15	Effect of strain rate on the stress-strain curves of St.15 at 1050 °C (after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes).....	63
4-16	Effect of strain rate on the stress-strain curves of St.15 at 950 °C (after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes).....	64

4-17	Effect of strain rate on the stress-strain curves of St.15 at 750 °C (after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes).....	64
4-18	Effect of austenitizing condition on the stress-strain curves of St.15 at 950 °C (a constant strain rate of 1/s).....	66
4-19	Effect of austenitizing condition on the stress-strain curves of St.15 at 750 °C (a constant strain rate of 1/s).....	66
4-20	Effect of deformation temperature (in $\gamma$ range) and strain rate on peak stress of St.15 after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes.....	68
4-21	Effect of deformation temperature (in $\gamma$ range) and strain rate on peak stress of St.15 after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes.....	68
4-22	Effect of deformation temperature (in $\alpha$ range) and strain rate on peak stress of St.15 after austenitizing at 1000 °C for 5 minutes.....	69
4-23	Effect of deformation temperature (in $\alpha$ range) and strain rate on peak stress of St.15 after austenitizing at 1250 °C for 10 minutes.....	69
4-24	Microstructure after deformation at 1250 °C (in $\gamma$ range), strain of 1.6 and strain rate of 0.01/s.....	71
4-25	Microstructure after deformation at 1250 °C (in $\gamma$ range), strain of 1.6 and strain rate of 1/s.....	71
4-26	Microstructure after deformation at 900 °C (in $\gamma$ range) , strain of 1.6 and strain rate of 10/s.....	72

4-27	Microstructure after deformation at 900 °C (in $\gamma$ range), strain of 1.6 and strain rate of 10/s.....	72
4-28	Microstructure after deformation at 1050 °C (in $\gamma$ range), strain of 1.6 and strain rate of 1/s.....	74
4-29	Microstructure after deformation at 950 °C (in $\gamma$ range), strain of 1.6 and strain rate of 1/s.....	74
4-30	Microstructure after deformation at 800 °C (in $\alpha+\gamma$ range), strain of 1.6 and strain rate of 10/s.....	75
4-31	Microstructure after deformation at 800 °C (in $\alpha+\gamma$ range), strain of 1.6 and strain rate of 10/s.....	75
4-32	Microstructure after deformation at 700 °C (in $\alpha$ range), strain of 1.6 and strain rate of 1/s.....	76
4-33	Microstructure after deformation at 700 °C (in $\alpha$ range), strain of 1.6 and strain rate of 1/s.....	76
4-34	Effect of deformation temperature and strain rate on ferrite grain size (in ASTM No.).....	78
4-35	Effect of deformation temperature and strain rate on ferrite grain size (in mm.).....	79
5-1	Effect of initial grain size on the stress-strain curves of St.15 at 950 °C (in $\gamma$ range).....	81