

การยึดตัวที่อุณหภูมิสูงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นชนิด AISI L3 และ AISI O1

นาย สงบ คำค้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-662-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T 17873447

HOT DUCTILITY OF COLD WORK TOOL STEEL GRADES AISI L3 AND O1

Mr. SAKHOB KHUMKOA

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

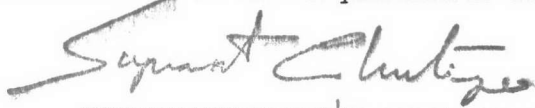
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-637-662-4

Thesis Title Hot Ductility of Cold Work Tool Steel Grades AISI
L3 and O1
By Mr. Sakhob Khumkoa
Department Metallurgical Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Chatchai Somsiri, Ph.D.
Thesis Co-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

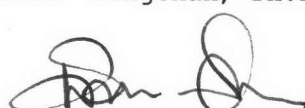
(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

THESIS COMMITTEE



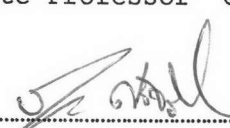
..... Chairman

(Sumalee Vongchan, Ph.D.)



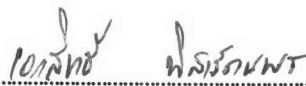
..... Thesis Advisor

(Associate Professor Chatchai Somsiri, Ph.D.)



..... Thesis Co-advisor

(Assistant Professor Prasonk Sricharoenchai, D.Eng.)



..... Member

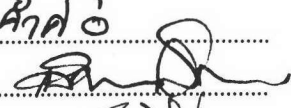
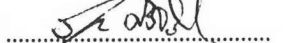
(Ekasit Nisaratanaporn, Ph.D.)

สงบ คำคือ : การยึดตัวที่อุณหภูมิสูงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นชนิด AISI L3 และ AISI O1 (HOT DUCTILITY OF COLD WORK TOOL STEEL GRADES AISI L3 AND O1) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ฉัตรชัย สมศิริ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย ; 100 หน้า. ISBN 974-637-662-4.

การศึกษาพฤติกรรมการยึดตัวที่อุณหภูมิสูงของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นชนิด AISI L3 และ AISI O1 โดยทำการดึงชิ้นงานด้วยอุปกรณ์ทำการดึงที่อุณหภูมิสูง มีจุดประสงค์เพื่อวัดช่วงอุณหภูมิวิกฤติ ซึ่งเป็นช่วงระหว่างอุณหภูมิที่แสดงค่าความแข็งแรงเป็นศูนย์กับอุณหภูมิที่แสดงค่าการยึดตัวเป็นศูนย์ และประเมินช่วงอุณหภูมิที่แสดงค่าการยึดตัวต่ำของเหล็กทั้งสองชนิด ชิ้นงานถูกทำให้แข็งตัวจากสภาวะหลอมเหลวด้วยอัตรา 0.5 และ 3 องศาเซลเซียสต่อวินาที และทำการดึงในช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวและ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเร็ว 2×10^{-3} และ 2×10^{-2} ต่อวินาที โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ดึงที่อุณหภูมิสูงได้รับการศึกษาโดยอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างที่ปรากฏได้รับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดและอีดีเอกซ์

จากการศึกษาพบว่า ช่วงอุณหภูมิวิกฤติของเหล็กทั้งสองชนิดที่มีอัตราการแข็งตัวทั้งเร็วและช้ามีค่ากว้างขึ้น เมื่ออัตราความเร็วเพิ่มขึ้น อัตราการแข็งตัวช้าทำให้ช่วงอุณหภูมิวิกฤติกว้างกว่าอัตราการแข็งตัวเร็ว ไม่ว่าจะดึงด้วยอัตราความเร็วต่ำหรือสูง สำหรับการทดสอบเหล็กชนิด AISI L3 เมื่อดึงชิ้นงานที่มีอัตราการแข็งตัวเร็วด้วยอัตราความเร็วสูงและต่ำมีค่าการยึดตัวอยู่ระหว่าง 35-65% ในช่วงอุณหภูมิ 900 ถึง 1250 องศาเซลเซียส ในขณะที่การดึงชิ้นงานที่มีอัตราการแข็งตัวช้าด้วยอัตราความเร็วต่ำ ยังผลให้การยึดตัวสูงกว่าการดึงด้วยอัตราความเร็วสูงอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส การตกตะกอนของแมงกานีสซัลไฟด์ในพื้นที่ระหว่างแกนของเดนไดรต์ของออสเทนไนท์ยังผลให้เกิดการลดลงของการยึดตัวที่อุณหภูมิสูงของเหล็กชนิด AISI L3 สำหรับการทดสอบเหล็กชนิด AISI O1 ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส เมื่อดึงชิ้นงานที่มีอัตราการแข็งตัวช้าด้วยอัตราความเร็วต่ำ ปรากฏว่าการยึดตัวของชิ้นงานมีค่าสูงกว่าการดึงด้วยอัตราความเร็วสูงอย่างชัดเจน การดึงชิ้นงานที่มีอัตราการแข็งตัวเร็วด้วยอัตราความเร็วต่ำ ปรากฏว่าค่าการยึดตัวไม่แตกต่างไปจากการดึงด้วยอัตราความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่มีอัตราการแข็งตัวช้ายังผลให้การยึดตัวสูงกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการแข็งตัวเร็ว ไม่ว่าจะดึงด้วยอัตราความเร็วต่ำหรือสูงในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว การตกตะกอนของคาร์ไบด์ของวานาเดียม ทั้งสเดนและโครเมียมตามขอบเกรนของออสเทนไนท์มีผลต่อการลดลงของการยึดตัวที่อุณหภูมิสูงของเหล็กชนิด AISI O1

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิติ นว. ศิริชัย
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

C818226 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING
KEY WORD HOT DUCTILITY / HOT CRACK SUSCEPTIBILITY / TOOL STEEL / CRITICAL TEMPERATURE RANGE / ZERO STRENGTH TEMPERATURE (ZST) / ZERO DUCTILITY TEMPERATURE (ZDT)

SAKHOB KHUMKOA : HOT DUCTILITY OF COLD WORK TOOL STEEL GRADES AISI L3 AND O1.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHATCHAI SOMSIRI, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI, D.Eng. 100 pp. ISBN 974-637-662-4.

Hot tensile tests were carried out to investigate hot ductility behavior and critical temperature range (ΔT) between zero strength temperature (ZST) and zero ductility temperature (ZDT) of tool steel grades AISI L3 and O1. The test specimens solidified from melting at cooling rate of 0.5°C/s and 3°C/s to the test temperature in the range between liquidus and 900°C . The specimens were then strained to failure at strain rate of $2 \times 10^{-3}/\text{s}$ and $2 \times 10^{-2}/\text{s}$. Quenching test was carried out in order to investigate the microstructure occurred during hot tensile test. The microstructure that appeared in quenched specimen was then identified with SEM-EDX.

It was found that the critical temperature range of the steels solidified at the slow or the fast cooling rate, widened with increasing strain rate. The specimens which solidified at slow cooling rate when tensile strained to failure at low or high strain rate, had wider critical temperature range than the specimens that solidified at fast cooling rate. For steel grade AISI L3, tensile test at high and low strain rate (after solidified at the fast cooling rate) revealed the hot ductility of 35-65%RA between $900-1250^{\circ}\text{C}$. Whereas, the hot ductility of the samples which solidified at slow cooling rate and pulled at slow strain rate were markedly higher than those pulled at higher strain rate between $900-1200^{\circ}\text{C}$. Precipitation of manganese sulfide in the interdendritic region resulted in deterioration of hot ductility of steel grade AISI L3. For steel grade AISI O1, tensile tests of specimens solidified between $900-1100^{\circ}\text{C}$ at slow cooling rate and low strain rate yielded higher hot ductility than those specimens pulled at high strain rate. The hot ductility of samples at fast cooling rate and low strain rate showed no difference to those samples of hot tested at high strain rate. Nevertheless, slow cooling rate affected hot ductility more than fast cooling rate for tensile tests at both high and low strains rate. Carbide precipitates of vanadium, tungsten and chromium along austenite grain boundaries influenced the ductility loss of steel grade AISI O1.

ภาควิชา.....METALLURGICAL ENGINEERING
สาขาวิชา.....METALLURGICAL ENGINEERING
ปีการศึกษา.....1997.....

ลายมือชื่อนิสิต.....SAKHOB KHUMKOA
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express his gratitude to Assoc.Prof.Dr.Chatchai Somsiri, his advisor, for his initiative and invaluable guidance, suggestions, and supervision during his study. He wishes to give his sincere gratitude to Assist.Prof.Dr.Prasonk Sricharoenchai, his thesis co-advisor, for his encouragement. Furthermore, he is also grateful to Dr.Sumalee Vongchan and Dr.Ekasit Nisaratanaporn for serving as chairman and member of the thesis evaluating committee, respectively, whose comments have been especially helpful. He also would like to thank Prof.Dr.Ing.Wolfgang Bleck, Dr.Ing.Rolf Degel and Dipl.Ing.Roman Flesch for their valuable help and the wonderful team of the Institute of Ferrous Metallurgy and Material Science, Technical University of Aachen, Germany, who had provided encouragement and cooperation throughout this study. This study has been supported by Nakornthai Strip Mill Public Co., Ltd. The author would like to express his deep appreciation herein.

Finally, the author would like to give his sincere affection gratitude to his parents, everyone in his family and his friends for their encouragement throughout this study.

LIST OF CONTENTS

	Page
Abstract (in Thai).....	iv
Abstract (in English).....	x
Acknowledgments.....	vi
List of Contents.....	vii
List of Tables.....	ix
List of Figures.....	xi
Chapter I Introduction.....	1
1.1 Generality.....	1
1.2 Objectives.....	3
1.3 Scope.....	4
1.4 Expected benefits.....	4
Chapter II Literature Review.....	6
2.1 Hot ductility of steel.....	6
2.2 Implication of hot ductility for hot cracking.....	11
2.3 Influence of composition on hot ductility.....	15
2.4 Effect of test variables on hot ductility.....	21
2.5 Investigation of hot crack susceptibility	

of tool steel.....	24
Chapter III Experimental procedure.....	29
3.1 Method and procedure.....	29
3.2 The tested steels.....	29
3.3 Hot tensile test.....	31
3.4 Quenching test.....	39
3.5 Metallographical investigation.....	42
Chapter IV Experimental Results and Discussion.....	44
4.1 Hot ductility of steel grade AISI L3.....	44
4.2 Metallographical investigation of steel grade AISI L3.....	48
4.3 Effect of cooling rate and strain rate on hot ductility of steel grade AISI L3.....	58
4.4 Hot ductility of steel grade AISI 01.....	66
4.5 Metallographical investigation of steel grade AISI 01.....	69
4.6 Effect of cooling rate and strain rate on hot ductility of steel grade AISI 01.....	79
Chapter V Conclusion.....	82
References.....	84
Appendixes.....	90
Vita.....	100

LIST OF TABLES

Table	Page
2-1 Classification of tool steels.....	25
3-1 Chemical compositions of the tested steels.....	32
3-2 Liquidus and Solidus temperature of the tested steels.....	32
4-1 Characteristic temperatures of the steel grade AISI L3 at various test conditions.....	46
4-2 Characteristic temperatures of the steel grade AISI O1 at various test conditions.....	68
A2-1 Data of hot tensile test of steel grade AISI L3, group L3-1 (Strain rate: $2 \times 10^{-3}/s$, Cooling rate: $0.5^{\circ}C/s$).....	95
A2-2 Data of hot tensile test of steel grade AISI L3, group L3-2 (Strain rate: $2 \times 10^{-3}/s$, Cooling rate: $3^{\circ}C/s$).....	96
A2-3 Data of hot tensile test of steel grade AISI L3, group L3-3 (Strain rate: $2 \times 10^{-2}/s$, Cooling rate: $0.5^{\circ}C/s$).....	96
A2-4 Data of hot tensile test of steel grade AISI L3,	

group L3-4 (Strain rate: $2 \times 10^{-2}/s$, Cooling rate: $3^{\circ}C/s$).....	97
A2-5 Data of hot tensile test of steel grade AISI 01, group 01-1 (Strain rate: $2 \times 10^{-3}/s$, Cooling rate: $0.5^{\circ}C/s$).....	97
A2-6 Data of hot tensile test of steel grade AISI 01, group 01-2 (Strain rate: $2 \times 10^{-3}/s$, Cooling rate: $3^{\circ}C/s$).....	98
A2-7 Data of hot tensile test of steel grade AISI 01, group 01-3 (Strain rate: $2 \times 10^{-2}/s$, Cooling rate: $0.5^{\circ}C/s$).....	98
A2-8 Data of hot tensile test of steel grade AISI 01, group 01-4 (Strain rate: $2 \times 10^{-2}/s$, Cooling rate: $3^{\circ}C/s$).....	99

LIST OF FIGURES

Fig.	Page
2-1 Schematic precipitation of ductility troughs appearing in the hot tensile test in steels.....	7
2-2 Schematic representation of temperature zones of reduced hot ductility of steel related to embrittlement mechanism.....	9
2-3 Schematic trend of reduction of area after fracture and maximum load versus test temperature curve.....	12
2-4 Mechanical properties in the temperature zone of reduced ductility and corresponding presentation of solid-liquid interface.....	14
2-5 Hot ductility in Fe-C binary alloys with melted specimen (strain rate: 5/s). Numerical values in each curve show C content.....	16
2-6 The ZST, LIT and ZDT of 0.3%C steel as a function of sulfur content.....	18
2-7 Effect of Mn and S on the embrittlement in the temperature between 1200 and 900°C in low carbon steels.....	20
2-8 Influence of solidification rate on the ductility of cold work steels under continuous casting condition.....	28

3-1	Flow sheet for the test procedure.....	30
3-2	DTA-curve of steel grade AISI L3.....	33
3-3	DTA-curve of steel grade AISI 01.....	34
3-4	Experimental set-up of the hot tensile test equipment and the main data.....	35
3-5	Dimension of the hot tensile specimen.....	36
3-6	Temperature cycle of the hot tensile test.....	37
3-7	Schematic diagram of the quenching equipment.....	41
4-1	Reduction of area and the maximum tensile load versus temperature of the steel grade AISI L3.....	45
4-2	Characteristic temperature range of steel grade AISI L3 between ZDT and ZST.....	48
4-3	Sulfides precipitates along interdendritic region of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 1296°C and then quenched.....	51
4-4	Sulfides precipitates along austenite grain boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 1266°C and then quenched.....	51
4-5	Sulfides precipitates along austenite grain boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1263°C and then quenched.....	52
4-6	Sulfides precipitates along austenite grain	

boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1158°C and then quenched.....	52
4-7 SEM-micrograph of sulfides precipitates of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1263°C and then quenched	53
4-8 SEM-EDS analysis of sulfides precipitates of Mn and Fe of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1263°C and then quenched.....	54
4-9 SEM-EDS analysis of iron-chromium matrix of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1263°C and then quenched	55
4-10 Sulfides precipitates of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 896°C and then quenched.....	56
4-11 SEM-micrograph of sulfides precipitates of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 896°C and then quenched.....	56
4-12 SEM-EDS analysis of sulfides precipitates of Mn, Cr and Fe of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to from 896°C and then quenched	57
4-13 Reduction of area and the maximum tensile load versus temperature of the steel grade AISI 01.....	67

4-14	Characteristic temperature range of steel grade AISI O1 between ZDT and ZST.....	70
4-15	Carbides precipitates along austenite grain boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 1316°C and then quenched.....	72
4-16	Carbides precipitates along austenite grain boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 1275°C and then quenched.....	72
4-17	Carbides precipitates along austenite grain boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1290°C and then quenched.....	73
4-18	Carbides precipitates along austenite grain boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1230°C and then quenched.....	73
4-19	SEM-micrograph of carbide precipitates of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to from 1292°C and then quenched	74
4-20	SEM-EDS analysis of carbide precipitates of W, V and Cr of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1292°C and then quenched.....	75

4-21	SEM-EDS analysis of the matrix of specimen that solidified from melting with cooling rate of 0.5°C/s to 1292°C and then quenched.....	76
4-22	Carbides precipitates along austenite grain boundaries of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 900°C and then quenched.....	77
4-23	SEM-micrograph of carbide precipitate of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 900°C and then quenched.....	77
4-24	SEM-EDS analysis of carbide precipitates of W, V and Cr of specimen that solidified from melting with cooling rate of 3°C/s to 900°C and then quenched	78
A1-1	Differential-Thermal Analysis (DTA) equipment.....	92
A1-2	Schematic diagram of a simple heating and cooling curve of DTA.....	94