การเคลือบผิวเหล็กกล้าด้วยไนโอเบียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการ TD

นาย สุรพล พรนิมิตรธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-398-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17800039

COATING OF STEEL SURFACE WITH NIOBIUM CARBIDE BY THE TD PROCESS

Mr. Surapol Pomnimitthum

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 974-638-398-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเคลือบผิวเหล็กกล้าด้วยไนโอเบียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการ TD

โดย นายสุรพล พรนิมิตรธรรม

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุรพล พรนิมิตรธรรม : การเคลือบผิวเหล็กกล้าด้วยไนโอเบียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการ TD
(COATING OF STEEL SURFACE WITH NIOBIUM CARBIDE BY THE TD)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ; 59 หน้า. ISBN 974-638-398-1

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือศึกษาการเคลือบผิวไนโอเบียมคาร์ไบด์บนเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่สภาวะบรรยากาศด้วยกระบวนการ TD ปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมแปรผันในช่วง 2 ถึง 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณอะลูมิเนียมแปรผันอยู่ในช่วง 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบผิวมีค่าอยู่ในช่วง 900 ถึง 1000°C และ 1 ถึง 9 ชั่วโมง ตามลำดับ ความหนาของชั้นเคลือบถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาและแบบส่องกวาด การวิเคราะห์ชั้นเคลือบทำด้วยวิธี EDS, วิธี X-ray mapping และวิธี XRD ขนาดที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิเคลือบผิวที่สูงถูกวัดด้วยเครื่องโพรไฟล์โปรเจกเตอร์ พบว่าการเคลือบผิวให้ได้ชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์จำเป็นต้องเติมอะลูมิเนียมและปริมาณอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการทำให้เกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่หนาที่สุดในการทดลองนี้ ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมในช่วง 2 ถึง 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและหนาที่สุดที่ปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความหนาของชั้นเคลือบไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมเฟอร์โรไนโอเบียมมากกว่า 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความหนาชั้นเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบผิว โดยความหนาชั้นเคลือบมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับรากที่ 2 ของเวลาในการเคลือบผิว แสดงได้ว่าความหนาชั้นเคลือบถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่ซึม เหล็กกล้า D2 ซึ่งมีคาร์บอนมากกว่าเหล็กกล้า H13 ถูกเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ได้หนากว่าเหล็กกล้า H13 ที่สภาวะการเคลือบผิวเดียวกัน ชิ้นงานพันช์เหล็กกล้า D2 รูปทรงขั้นบันไดมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนามีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการเคลือบผิว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ในระยะเวลาการเคลือบผิวเดียวกัน เวลาในการเคลือบผิวที่นานขึ้นทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต สุรพล พรนิมิตรธรรม
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C718233 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING
KEY WORD: TD PROCESS / NIOBIUM CARBIDE / BORAX SALT BATH

SURAPOL PORNNIMITTHUM : COATING OF STEEL SURFACE WITH NIOBIUM CARBIDE BY THE TD PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI, Ph.D.

59pp. ISBN 974-638-398-1

The objective of this thesis was to study niobium carbide coating on D2 and H13 tool steel in molten borax salt bath under ambient atmosphere by the TD process. The ferroniobium content was varied in the range of 2 - 32 weight percent and aluminium content was varied in the range of 0 - 10 weight percent. The coating temperature and coating time were also varied in the range of 900 - 1000°C and 1 - 9 hours, respectively. Thickness of the coating layer was investigated by optical and scanning electron microscope. The coating layer was analyzed by EDS, X-ray mapping and XRD. The dimension change due to effect of high coating temperature was measured by a profile projector. It is found that niobium carbide coating needed aluminium addition, and aluminium content of 3 weight percent was suitable for maximum layer thickness in this experiment. The layer thickness of niobium carbide increased with increasing ferroniobium in the range of 2 - 16 weight percent and is thickest at 16 weight percent of ferroniobium. There is no significant increase of layer thickness when ferroniobium was added more than 16 weight percent. The thickness of coating layer increased with increasing coating temperature and coating time. The layer thickness grew up linearly in a function of square root of coating time. It can be shown that the thickness of coating layer was controlled by the diffusion process. The D2 steel, which has more carbon content than H13 steel, can be coated with niobium carbide with thicker layer than H13 steel at the same coating condition. The diameter and thickness of step punch D2 steel after coating increased and the size of smallest diameter increased more than that of a larger diameter with the same coating time. The longer the coating time, the more increase in diameter and thickness of samples was observed.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณบริษัทโรงงานเหล็กกรุงเทพจำกัดที่ได้เอื้อเฟื้อสารเฟอร์โรไนโอเบียมและบริษัทอะลูมิเนียมฉื่อจิ้นฮั่วจำกัดที่ได้เอื้อเฟื้ออะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องโพรไฟล์โปรเจกเตอร์ และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของกองทุนโลหการ สวทช. จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญ		ช
สารบัญตาราง		ฌ
สารบัญรูป		ฒ
บทที่		
1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์	2
	1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2	ปริทัศน์วรรณกรรม	4
3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง	11
	3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	11
	3.2 ขั้นตอนการทดลองเคลือบผิว	11
	3.3 เงื่อนไขในการทดลอง	13
	3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิว	13
	3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชั้นเคลือบ	14
	3.6 การทดสอบหาขนาดที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานทดสอบภายหลังการเคลือบผิว	14

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่

4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 18

4.1 อิทธิพลของอะลูมิเนียมต่อชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์..... 18

4.2 อิทธิพลของปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมต่อชั้นเคลือบ..... 32

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนาชั้นเคลือบ..... 35

4.4 อิทธิพลของชนิดเหล็กต่อความหนาชั้นเคลือบ..... 37

4.5 ขนาดที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์..... 40

5 สรุปผลการทดลอง..... 44

รายการอ้างอิง..... 46

ภาคผนวก..... 47

ประวัติผู้เขียน..... 59

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความสามารถในการละลายของสารที่ใช้ฟอร์มคาร์ไบด์ในบอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1050°C	6
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ใช้ในการทดสอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	13
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการเคลือบผิว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	16
4.1	ค่าองศาของมุม 2θ ที่เกิดพีคสูงสุด 3 พีคของสารประกอบ	24
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมโดยประมาณของคาร์บอนในเหล็กออสเทนไนท์	37
4.3	ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	42
4.4	ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	42
4.5	ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	43
ก.1	ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า D2 ที่อุณหภูมิ 1000°C โดยแปรผันปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมและอะลูมิเนียมที่เติมลงในเกลือบอแรกซ์	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.2 ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้ในการการเคลือบผิวเหล็กกล้า D2 ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 950 และ 900°C ในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 49

ก.3 ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้ในการการเคลือบผิวเหล็กกล้า H13 ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C ในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 49

ข.1 ข้อมูลขนาดชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ก่อนการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1000°C เคลือบผิวเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติม เฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 51

ข.2 ข้อมูลขนาดชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1000°C เคลือบผิวเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติม เฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 51

ข.3 ข้อมูลขนาดชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ก่อนการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1000°C เคลือบผิวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติม เฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 52

ข.4 ข้อมูลขนาดชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1000°C เคลือบผิวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติม เฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 52

ข.5 ข้อมูลขนาดชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ก่อนการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1000°C เคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติม เฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.6 ข้อมูลขนาดชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1000°C เคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 53

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนทั่วไปของการเคลือบอบชุบความร้อนในกระบวนการ TD	4
2.2	หลักการของการเคลือบชั้นเคลือบคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าด้วยกระบวนการ TD	5
2.3	อิทธิพลของปริมาณเฟอร์โรโครเมียมที่ใช้ต่อความหนาชั้นเคลือบโครเมียมคาร์ไบด์ ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า En8 ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	7
2.4	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบผิวเหล็กกล้า W1 ต่อความหนาของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ โดยเติมเฟอร์โรวาเนเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	8
2.5	ผลของปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้นของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ต่อความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ โดยเติมเฟอร์โรวาเนเดียมลงในอ่างเกลือบอแรกซ์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการเคลือบ 4 ชั่วโมง	9
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอ่างเกลือและเวลาการเคลือบผิวที่ใช้เพื่อให้ความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์มีค่าเป็น 4 และ 7 ไมครอนของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ	9
3.1	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลองเคลือบผิว.....	12
3.2	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลองการเปลี่ยนแปลงขนาดภายหลังการเคลือบผิว.....	15
3.3	รูปทรงและขนาดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดภายหลังการเคลือบผิว	16

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	ภาพโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบริเวณขอบผิวชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 0, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	19
4.2	ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา 1, 4 และ 9 ชั่วโมง.....	20
4.3	ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา 1, 4 และ 9 ชั่วโมง.....	21
4.4	ผลการวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วย EDS ชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	22
4.5	การวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วย X-ray mapping ของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	รูปแบบพีค XRD ของพื้นผิวชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	25
4.7	ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา 1, 4 และ 9 ชั่วโมง.....	27
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิวและปริมาณเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมที่เติมลงในอ่างเกลือต่อความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C	28
4.9	รูปแบบพีค XRD ของพื้นผิวชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	29
4.10	ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา 1, 4 และ 9 ชั่วโมง.....	30
4.11	รูปแบบพีค XRD ของพื้นผิวชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	31
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิวและเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของเฟอร์โรไนโอเบียมต่อความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 ผลของปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์โรไนโอเบียมที่ใช้ต่อความหนาชั้นเคลือบ ที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4 และ 9 ชั่วโมง 34

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิวและอุณหภูมิต่อความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 36

4.15 ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา 1, 4 และ 9 ชั่วโมง..... 38

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นเคลือบของเหล็กกล้า H13 และ D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C 39

4.17 ชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย