

ผลของเฟอร์โรวานาเดียมและวานาเดียมเพนทอกไซด์ต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์
ที่เคลือบ โดยกระบวนการที่อาร์คิ



นาย ธนศักดิ์ นิลสนธิ

สถาบันวิทยบริการ

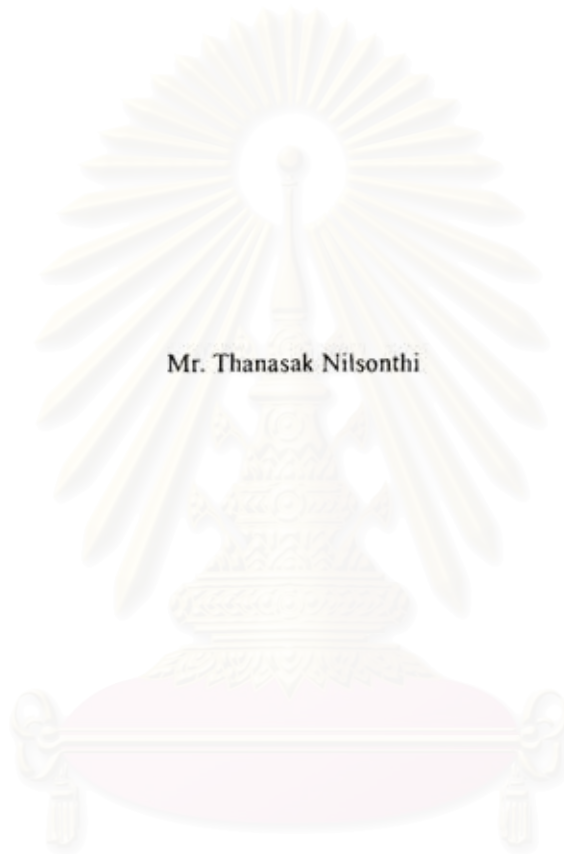
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2990-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF THE FERROVANADIUM AND VANADIUM PENTOXIDE ON COATING LAYER OF
VANADIUM CARBIDE COATED BY TRD PROCESS



Mr. Thanasak Nilsonthi

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-2990-8

Copyright of Chulalongkorn University


491946

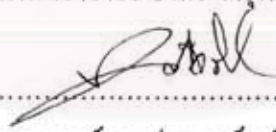
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของเฟอร์โรวานเนเดียมและวานเนเดียมเพนทอกไซด์ต่อชั้นเคลือบ
วานเนเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบ โดยกระบวนการที่อาร์ดี
โดย นาย ธนศักดิ์ นิลสนธิ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก สาววนษ์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ค่านชัยวิจิตร)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้นฉบับไม่มีหน้าบทคัดย่อ

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชากร จารุพิสิฐธร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ในการวิเคราะห์ผล XRD

ขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ และคุณศรี ใจล ขุนทด ที่ให้คำแนะนำในขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วย XRD ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือทดสอบในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา - มารดา น้องสาวและครอบครัว ที่สนับสนุนในด้านต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา ผู้เขียนขอขอบพระคุณคุณครู อาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนผู้เขียนมาตลอดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และผู้เขียนขอขอบคุณ ท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน เพื่อน ๆ ทุกคน โดยเฉพาะกลุ่มวิจัยทางด้านวิศวกรรมพื้นผิว ที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจแก่ผู้เขียนด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม	4
2.1 การเคลื่อนด้วยกระบวนการ TRD	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	20
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	20
3.3 เงื่อนไขในการทดลอง.....	21
3.4 ขั้นตอนการเคลื่อนผิว.....	21
3.4.1 ทดลองในอ่างเกลือ.....	21
3.4.2 ทดลองในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิม.....	22
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์เกลือบอแรกซ์.....	22
3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบและวัดความหนา, วัดความแข็ง และวิเคราะห์ธาตุของชิ้นเคลื่อน.....	22

4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	25
4.1 ผลของการใช้เฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
กับ อะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	25
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงาน.....	26
4.1.2 กราฟความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์.....	27
4.1.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ผิวชิ้นงานด้วย X-ray Diffractometer.....	29
4.2 ผลของการใช้วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
กับ อะลูมิเนียมที่แปรผันปริมาณ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	30
4.2.1 ผลของการใช้อะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	31
4.2.1.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงาน.....	32
4.2.1.2 กราฟความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์.....	33
4.2.2 ผลของการใช้อะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	33
4.2.2.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงาน.....	34
4.2.2.2 กราฟความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์.....	35
4.2.3 ผลของการใช้อะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	35
4.2.3.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงาน.....	37
4.2.3.2 กราฟความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์.....	38
4.2.3.3 กราฟความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียม	
5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	41
4.2.4 ผลการตรวจวิเคราะห์สารประกอบในบอแรกซ์หลอมเหลว	
ด้วย X-ray Diffractometer.....	43
4.3 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ.....	44
4.3.1 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จากเฟอร์โรวานเดียม.....	44
4.3.2 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จากวานเดียมเพนทอกไซด์.....	45
4.3.3 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์.....	45
4.3.4 เปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นเคลือบ.....	46
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการทดลอง.....	46

5 สรุปผลการทดลอง.....	48
รายการอ้างอิง	50
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	60
ภาคผนวก ค	64
ภาคผนวก ง	75
ภาคผนวก จ	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	86



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสามารถในการละลายของธาตุที่ใช้ฟอร์มคาร์ไบด์ในบอแรกซ์หลอมเหลว	6
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11).....	21
4.1 ค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ของ (V_2O_5) และ (B_2O_3).....	39
4.2 ค่าพลังงานอิสระในการรีดิวซ์วานเดียมเพนทอกไซด์ของอะลูมิเนียม.....	40
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการทดลอง.....	47
ก.1 ความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก เฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	52
ก.2 ความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	54
ก.3 ความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	56
ก.4 ความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	58
ข.1 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก เฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที.....	61
ข.2 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที.....	62
ข.3 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที.....	63
ค.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ผิวชั้นงานที่ได้จากการใช้ เฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer (ชั้นงานที่เกิดชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์).....	64
ค.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ผิวชั้นงานที่ได้จากการใช้ เฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer (ชั้นงานที่ไม่เกิดชั้นเคลือบ).....	65
ค.3 ผลการตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในเคลือบบอแรกซ์หลอมเหลวที่ได้จากการใช้ วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer.....	66

ตารางที่	หน้า
ก.4 ผลการตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่ได้จากการใช้ วาเนเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer.....	67
ก.5 Reference pattern: 09-0387 Vanadium Oxide (V_2O_3).....	68
ก.6 Reference pattern: 26-0278 Vanadium Oxide (V_2O_3).....	69
ก.7 Reference pattern: 04-0787 Aluminum (Al).....	70
ก.8 Reference pattern: 06-0696 Iron (Fe).....	71
ก.9 Reference pattern: 23-0528 Sodium Oxide (Na_2O).....	72
ก.10 Reference pattern: 06-0634 Boron Oxide (B_2O_3).....	73
ก.11 Reference pattern: 34-0615 Vanadium Oxide (V_3O_4).....	74
ง.1 ส่วนผสมน้ำยาคัดสี.....	75
ง.2 คุณสมบัติของธาตุ.....	75
ง.3 คุณสมบัติของสารประกอบ.....	76
ง.4 Thermodynamics Properties.....	77
ง.5 The constant-pressure molar heat capacities of various substances.....	78
ง.6 ค่าความหยาบผิวก่อนและหลังเคลือบ.....	79

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนทั่วไปของการอบชุบความร้อนในกระบวนการที่อาร์ดี.....	4
2.2 แสดงหลักการของการเกิดชั้นเคลือบคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าด้วยกระบวนการที่อาร์ดี.....	5
2.3 ผลของการเปรียบเทียบชนิดของสารฟอรัมคาร์ไบด์ระหว่าง Fe-V และ V_2O_5 ที่อุณหภูมิ 1000°C.....	7
2.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในอ่างเกลือ โดยใช้เวลาทั้งหมด 25 และ 50 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาในการเคลือบครั้งละ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 950°C.....	8
2.5 ผลของปริมาณ V_2O_5 ต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 950°C โดยใช้เวลาเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง.....	8
2.6 ผลของปริมาณอะลูมิเนียม ต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 950°C โดยใช้เวลาเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง.....	9
2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาภายในอ่างเกลือต่อความหนาชั้นเคลือบ ที่อุณหภูมิ 950°C (V_2O_5 : Al = 2 : 1).....	10
2.8 ผลของขนาดผงต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 1000°C โดยใช้เวลาเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง.....	11
2.9 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาชั้นเคลือบ โดยใช้ 10% V_2O_5 และ 5% Al.....	11
2.10 แสดงการเปรียบเทียบความหนาชั้นเคลือบบนเหล็กกล้า 0.2%คาร์บอน และ 0.5%คาร์บอนที่อุณหภูมิ 950°C โดยใช้เวลาเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง.....	12
2.11 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ บนเหล็กกล้าเครื่องมือ W1 ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่มีผงเฟอร์โรวานาเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	14
2.12 ผลของปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้นของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ต่อความหนา ของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่มีผงเฟอร์โรวานาเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เวลาในการเคลือบ 4 ชั่วโมง.....	15
2.13 ผลของอุณหภูมิของอ่างเกลือและเวลาการเคลือบผิวที่ใช้ เพื่อให้ได้ความหนา ของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์มีค่าเป็น 4 และ 7 ไมครอน ของเหล็กชนิดต่างๆ.....	16
3.1 แสดงขั้นตอนการทดลองการเคลือบผิว (ทดลองในอ่างเกลือ).....	23
3.2 แสดงขั้นตอนการทดลองการเคลือบผิว (ทดลองในบ้ำเหล็กกล้าไร้สนิม).....	24

รูปที่	หน้า
4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	26
4.2 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C.....	27
4.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดชั้นเหล็กบอไรด์ และ ไม่เกิดชั้นเคลือบ.....	28
4.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ผิวชิ้นงานที่ได้จากการใช้ Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer.....	29
4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V ₂ O ₅ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	32
4.6 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V ₂ O ₅ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C.....	33
4.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V ₂ O ₅ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	34
4.8 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V ₂ O ₅ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C.....	35
4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V ₂ O ₅ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	37

รูปที่	หน้า
4.10 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$	38
4.11 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) โดยใช้อุณหภูมิในการใส่สารที่ $900^{\circ}C$	38
4.12 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ใส่สารที่อุณหภูมิ $850^{\circ}C$	39
4.13 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$	41
4.14 ผลการตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในเคลือบออกไซด์ที่ลอกหลุดที่ได้จากการใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer.....	43
4.15 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที.....	44
4.16 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที.....	45
4.17 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จากชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที.....	45
4.18 เปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการใช้ Fe-V, V_2O_5 และชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที.....	46
ง.1 ค่าความหยาบผิว(Ramax) ก่อนและหลังเคลือบ VC.....	80
จ.1 Equilibrium phase diagrams.....	81
จ.2 Ellingham diagrams.....	82

รูปที่	หน้า
จ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานอิสระของธาตุที่เกิดเป็นสารประกอบ และชนิดของชั้นเคลือบ.....	83
จ.4 รูปร่างและปริมาณของสารที่เติมลงในบอแรกซ์หลอมเหลว.....	84
จ.5 รูปแบบสารของการเกิดชั้นเคลือบและค่าพลังงานอิสระ.....	84
จ.6 ค่าพลังงานอิสระในการรีดิวซ์ออกไซด์ โดยการเติมธาตุลงในบอแรกซ์หลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 1000°C.....	85



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

แม่พิมพ์ซึ่งมีราคาแพงมาก และมีอายุการใช้งานที่สั้นมักมีสาเหตุมาจากการขาดความทนทานต่อการสึกหรอ หรือเกิดการแตกหักในระหว่างการใช้งาน จึงจำเป็นที่จะต้องยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ การอบชุบและการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นจะทำให้แม่พิมพ์ทนทานต่อการกระแทกและทนทานต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น แต่ก็ยืดอายุได้เพียงขีดจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น จึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของแม่พิมพ์เพื่อให้ทนทานต่อการสึกหรอวิธีหนึ่งคือ การเคลือบและแพร่ซึมด้วยปฏิกิริยาทางความร้อน (Thermo-Reactive Deposition and Diffusion, TRD) ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบและแพร่ซึมด้วยปฏิกิริยาทางความร้อนกล่าวคือทำให้เกิดปฏิกิริยาของธาตุที่มี affinity สูงกับธาตุคาร์บอนหรือไนโตรเจนที่แพร่ซึมจากเนื้อชิ้นงาน โดยการสร้างชั้นคาร์ไบด์หรือนิไตรต์ที่ผิวชิ้นงาน วิธีนี้ใช้ได้กับวัสดุที่มีคาร์บอนหรือไนโตรเจนอยู่ในเนื้อวัสดุอย่างเหล็กกล้าหรือพวกละหอนเหล็ก เช่น SiC วิธีการทำ TRD ยังแบ่งออกเป็นวิธีใช้เกลือหลอมเหลวกับวิธีใช้ผง ในวิธีที่ใช้เกลือหลอมเหลวนั้นมีกระบวนการ TRD ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการเคลือบชั้นคาร์ไบด์โดยการจุ่มชิ้นงานลงในเกลือหลอมเหลว

กระบวนการ TD ย่อมาจาก Toyota Diffusion Coating Process ดังเดิมได้รับการพัฒนาเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1971 โดยศูนย์วิจัยกลางของโตโยต้า ประเทศญี่ปุ่น วิธีนี้เป็นการสร้างชั้นคาร์ไบด์โดยการจุ่มชิ้นงานอย่างเช่น เหล็กกล้าลงในอ่างเกลือหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงในสภาวะบรรยากาศ ซึ่งขณะเดียวกันก็สามารถทำการชุบแข็งชิ้นงานภายในกระบวนการได้ด้วย การปรับปรุงพื้นผิวโดยกระบวนการ TRD นั้นเมื่อเทียบกับ CVD และ PVD แล้ว จะใช้เครื่องมือราคาถูกกว่าและการทำงานง่ายกว่า สามารถที่จะใส่หรือนำชิ้นงานออกมาได้ง่าย การชุบแข็งหรือการอบชุบความร้อนอื่นๆสามารถทำได้พร้อมกันไป นอกจากนี้ยังสามารถเคลือบซ้ำลงไปบนชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบโดยกระบวนการ TRD มาแล้วได้ สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้ง่าย และชั้นเคลือบมีความหนาสม่ำเสมออีกด้วย โดยกระบวนการ TRD เป็นวิธีเคลือบผิวชิ้นงานโดยใช้เตาเกลือด้วยการเติมโลหะหรือฟลูออไรด์ลงไปบนบ่อแร่เกลือหลอมเหลวในอ่างเกลือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบอยู่ในช่วง 800-1050°C โดยแช่ไว้เป็นเวลา 0.5-10 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบหนา 3-15 ไมครอน โดยผงที่เติมลงไป (added powder) จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งจะรีดิวซ์โลหะหรือเฟอร์ไรต์ลอสทำให้ได้อะตอมหรือไอออนของธาตุที่จะฟอร์มคาร์ไบด์กระจายอยู่ในอ่างเกลือและจะรวมตัวกับอะตอมของธาตุคาร์บอนซึ่งแพร่ซึมจากเนื้อ โลหะมาที่ผิวของโลหะ ทำให้เกิดเป็นชั้น

คาร์ไบด์ขึ้น การเคลือบโดยกระบวนการ TRD นั้นสามารถนำไปเคลือบบนเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.2 % หรือบนเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยเกินไปได้โดยการนำไปเพิ่มคาร์บอนที่ผิว (Carburizing) ก่อนนำมาเคลือบ ชั้นเคลือบที่ทำได้ในกระบวนการนี้มีชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ VC, ไนโอเบียมคาร์ไบด์ NbC, โทเทเนียมคาร์ไบด์ TiC และโครเมียมคาร์ไบด์ Cr_3C_2 เป็นต้น โดยมีความนิยมแพร่หลายที่สุด และชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์และไนโอเบียมคาร์ไบด์จะให้ค่าความแข็งที่ผิวสูง ด้านทานต่อการเสียดสีได้ดีและด้านทานการกัดกร่อน ส่วนชั้นเคลือบโครเมียมคาร์ไบด์จะให้ค่าความต้านทานต่อการเสียดสีที่ต่ำกว่าแต่ด้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี

เนื่องจากข้อมูลการศึกษาการเคลือบผิวให้เป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบโดยกระบวนการ ที่อาร์ดีที่ผ่านมานั้นพบว่ามีการศึกษาโดยใช้สารเฟอร์โรวานาเดียมเป็นสารที่ให้ธาตุวานาเดียม ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ด้วยวานาเดียมคาร์ไบด์ โดยทำการทดลองเคลือบผิวชิ้นงานในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมสารเฟอร์โรวานาเดียม Fe-V หรือสารวานาเดียมเพนทอกไซด์ V_2O_5 ในฐานะสารที่ให้ธาตุวานาเดียม และใช้อะลูมิเนียมเป็นรีดิวซ์ ที่อุณหภูมิเคลือบผิว $1000^{\circ}C$ ด้วยการแปรผันชนิดและปริมาณของสารที่ให้ธาตุวานาเดียม และปริมาณของอะลูมิเนียมที่เติมลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว รวมทั้งแปรผันเวลาที่ใช้ในการเคลือบ เพื่อหาเงื่อนไขการเคลือบที่ให้ชั้นเคลือบหนาตามที่ต้องการ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการแปรผันชนิดและปริมาณของสารที่ให้ธาตุวานาเดียมต่อความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการแปรผันปริมาณของอะลูมิเนียมในฐานะตัวรีดิวซ์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการแปรผันเวลาในการเคลือบผิว ที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติและชนิดชั้นเคลือบภายหลังการเคลือบผิว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ด้วยวานเนียมคาร์ไบด์ที่เคลือบโดยกระบวนการทีอาร์ดี โดยแปรผันชนิดและปริมาณของสาร โดยใช้สารเฟอร์โรวานเนียม Fe-V 15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และสารวานเนียมเพนทอกไซด์ V_2O_5 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ในฐานะสารที่ให้ธาตุวานเนียม

1.3.2 แปรผันปริมาณของอะลูมิเนียม Al 1 ถึง 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ในฐานะตัวรีดิวซ์

1.3.3 แปรผันเวลาในการเคลือบผิวตั้งแต่ 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที ที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$

1.3.4 ทำการตรวจสอบและวัดความหนาของชั้นเคลือบ, วัดความแข็งของชั้นเคลือบและวิเคราะห์เฟสของชั้นเคลือบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลและปัญหาที่เกิดขึ้นในการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ด้วยวานเนียมคาร์ไบด์ที่เคลือบโดยกระบวนการทีอาร์ดี

1.4.2 ทราบถึงผลของสารที่ให้ธาตุวานเนียม โดยใช้เฟอร์โรวานเนียม Fe-V และวานเนียมเพนทอกไซด์ V_2O_5 เป็นสารฟอร์มคาร์ไบด์ และใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวรีดิวซ์ และผลของเวลาในการเคลือบผิว

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการเคลือบผิวโดยกระบวนการ ทีอาร์ดี และยัง
สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการเคลือบผิววัสดุหรือชิ้นส่วนเครื่องมือที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอ เพื่อยืดอายุการใช้งาน

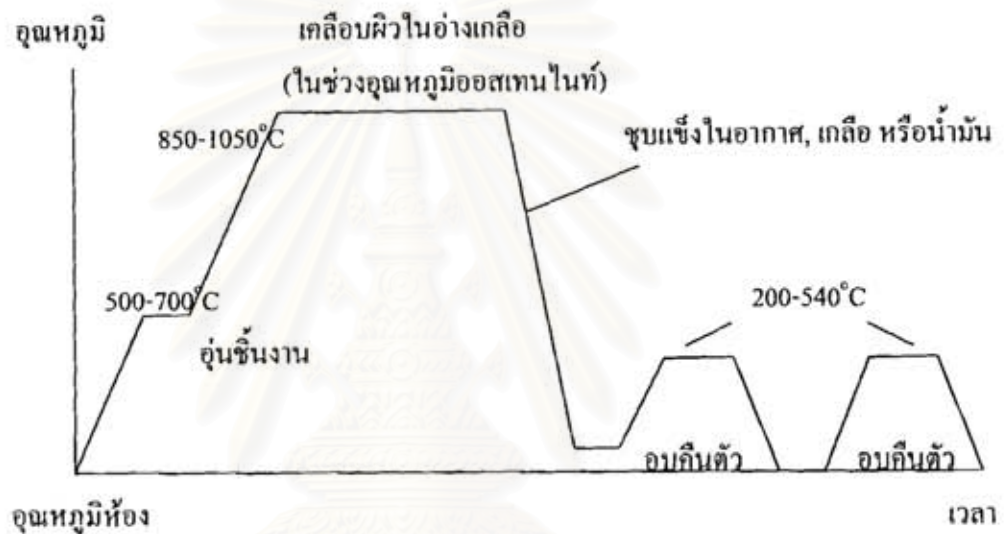
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 การเคลือบด้วยกระบวนการ TRD

การเคลือบด้วยกระบวนการทีอาร์ดี เป็นวิธีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบและการแพร์ซิมด้วยปฏิกิริยาทางความร้อน ขั้นตอนทั่วไปของการอบชุบความร้อนในกระบวนการทีอาร์ดี แสดงในรูปที่ 2.1

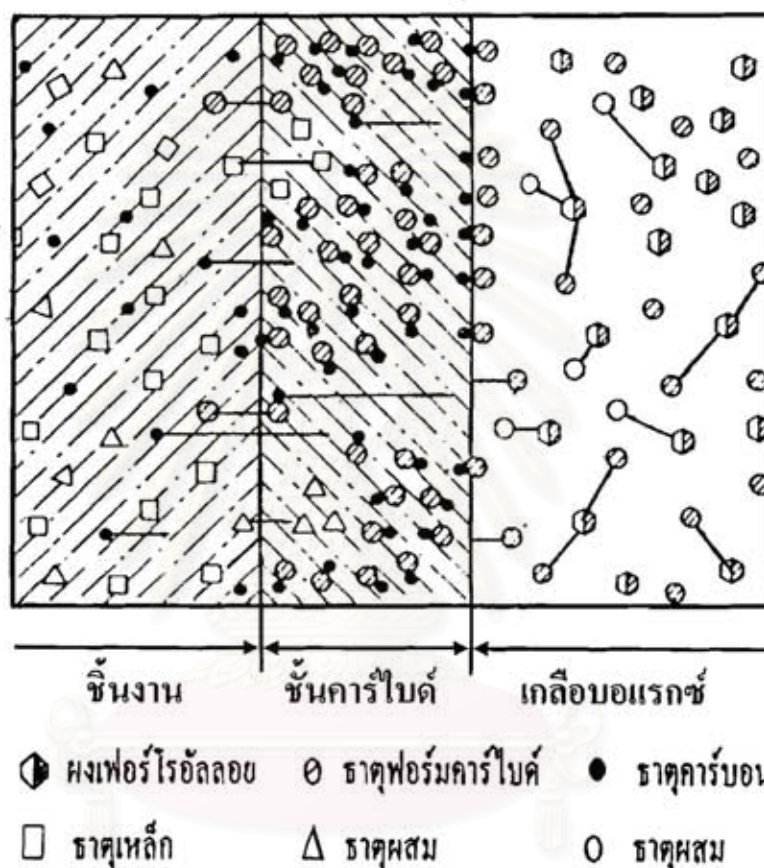


รูปที่ 2.1 ขั้นตอนทั่วไปของการอบชุบความร้อนในกระบวนการทีอาร์ดี [1]

วิธีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการทีอาร์ดี นั้นจะมีการอุ่นชิ้นงานก่อนทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิประมาณ 500-700°C เพื่อที่จะลดการบิดเบี้ยว (distortion) ของชิ้นงาน โดยที่กระบวนการเคลือบผิว ทีอาร์ดี จะทำการเคลือบที่อุณหภูมิประมาณ 850-1050°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ (austenitizing temperature) ของเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำ, เหล็กกล้าคาร์บูไรซิง และเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยภายหลังจากเคลือบผิวแล้วสามารถที่จะทำการชุบแข็ง (quenching) และอบคืนตัว (tempering) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลภายในเนื้อชิ้นงานได้ทันที

หลักการของการเกิดชั้นเคลือบแสดงไว้ใน รูปที่ 2.2 โดยผงเฟอร์โรอัลลอยที่เติมลงในอ่างเกลือจะละลายอยู่ในเกลือบอแร็กซ์หลอมเหลว ทำให้อะตอมของธาตุที่จะฟอร์มคาร์ไบด์

กระจายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว และจะรวมตัวกันกับอะตอมของธาตุคาร์บอนที่แพร่ซึมออกมาจากภายในเนื้อ โลหะมาที่ผิวเกิดเป็นชั้นคาร์ไบด์ขึ้น และชั้นคาร์ไบด์จะค่อยๆหนาขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนที่แพร่ซึมออกมาอย่างต่อเนื่องจากเนื้อ โลหะมาที่ผิวชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นก่อนซึ่งในชั้นเคลือบคาร์ไบด์อาจมีธาตุผสมของเนื้อ โลหะและธาตุเหล็กบางส่วนแพร่ซึมออกมา โดยที่ความหนาของชั้นเคลือบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอ่างเกลือ, เวลาในการเคลือบผิว, ชนิดของวัสดุที่นำมาเคลือบ (โดยเฉพาะปริมาณคาร์บอน) และชนิดของชั้นคาร์ไบด์



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการของการเกิดชั้นเคลือบคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าด้วยกระบวนการทีอาร์ดี [1]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

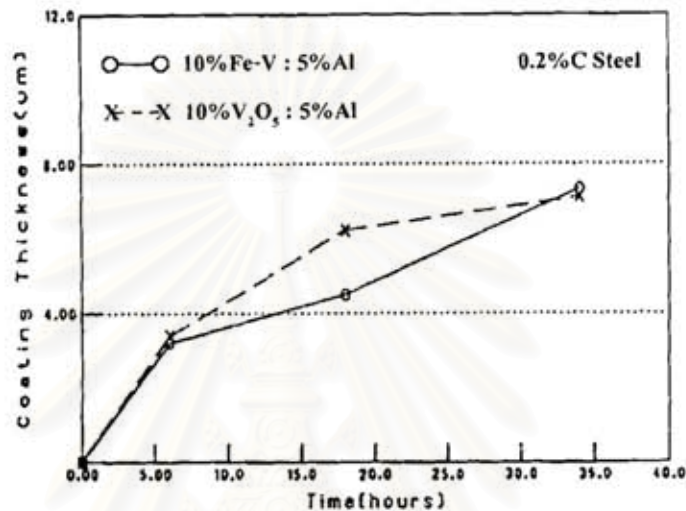
H.C. Child, S.A. Plumb และ J.J. McDermott [2] ได้ทำการศึกษาการเคลือบผิวโดยใช้ผงเฟอร์ไรต์วานาเดียม ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว พบว่าเฟอร์ไรต์วานาเดียมมิได้ถูกละลายในรูปของโลหะในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว แต่จะถูกออกซิไดซ์ก่อน และละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวในรูปของออกไซด์ ในกรณีที่วานาเดียมละลายอยู่ในรูปของ V_2O_5 , ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพน้อย (ค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ -109 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล ของวานาเดียม)

สามารถเกิดเป็นชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวชิ้นงาน ส่วนกรณีที่วานาเดียมละลายอยู่ในรูปของ V_2O_5 (vanadium pentoxide) เกิดขึ้นในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนสูงและเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูง (ค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ -124 กิโลแคลอรีต่อกรัม โมล ของวานาเดียม) จะไม่สามารถรวมตัวกับอะตอมของธาตุคาร์บอนเกิดเป็นชั้นคาร์ไบด์ได้ ซึ่ง H.C. Child, S.A. Plumb และ J.J. McDermott [2] ได้ทดลองทำการเคลือบผิวโดยใช้บอแรกซ์ 1 กิโลกรัม กับผงเฟอร์โรวานาเดียม จำนวน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการให้ความร้อนภายใต้สภาวะที่เป็นออกไซด์ซึ่งรุนแรงจะไม่เกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ แสดงว่าวานาเดียมละลายอยู่ในรูปของ V_2O_5 ซึ่งเกิดในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนสูง และได้ทำการทดลองต่อโดยใช้ก๊าซอาร์กอนปกคลุมในขณะที่ทำการเคลือบผิว เพื่อป้องกันสภาวะที่เป็นออกไซด์ซึ่งรุนแรงพบว่าเกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์แสดงว่าวานาเดียมละลายอยู่ในรูปของ V_2O_5 โดยการออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง เคลือบบอแรกซ์หลอมเหลว และอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอ่างเกลือถูกกวนจะทำให้เกิดการออกซิเดชันมากยิ่งขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการละลายของธาตุวานาเดียม ในโอเบียมและโครเมียม ในรูปของออกไซด์ในเคลือบบอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆกัน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งอัตราการละลายจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆดังนี้คือ ปริมาณของผงเฟอร์โรวัลลอยที่เติมลงไป ลักษณะทางกายภาพของผง (ขนาดของผง) อุณหภูมิของอ่างเกลือ สภาวะการเกิดออกไซด์ และการกวน

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการละลายของธาตุที่ใช้ฟอร์มคาร์ไบด์ในบอแรกซ์หลอมเหลว [2]

อุณหภูมิ (°C)	วานาเดียม (wt %)	ไนโอเบียม (wt %)	โครเมียม (wt %)
900	1.4	-	1.4
950	1.8	3.5	3.6
1000	2.4	-	-
1050	2.8	3.9	4.5

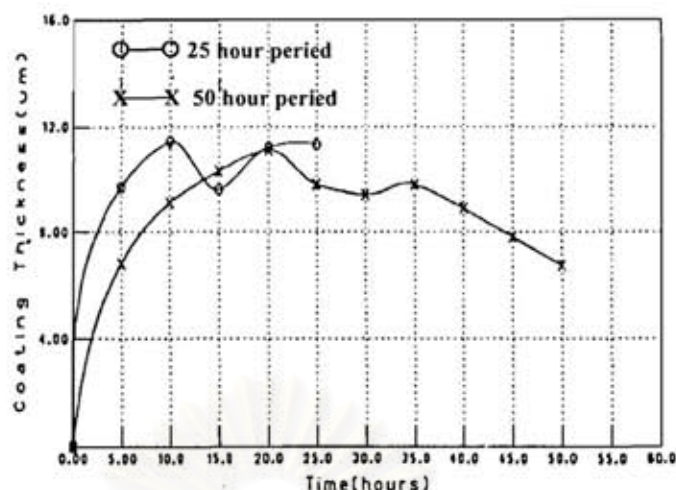
S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ ชนิดของสารที่ใช้ฟอร์มคาร์ไบด์ โดยเปรียบเทียบระหว่าง Fe-V และ V_2O_5 , ใช้เวลาในการเคลือบ 6, 12 และ 16 ชั่วโมงต่อเนื่องกันตามลำดับซึ่งใช้ปริมาณของ 10%Fe-V ต่อ 5%Al และ 10% V_2O_5 ต่อ 5%Al พบว่า ช่วงแรกทั้ง Fe-V และ V_2O_5 มีความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เท่ากัน ช่วงที่สองชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ใช้ V_2O_5 มีความหนามากกว่า และช่วงสุดท้ายความหนาชั้นเคลือบมีแนวโน้มลดลงจนมีความหนาใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลของการเปรียบเทียบชนิดของสารฟอร์มคาร์ไบด์ระหว่าง Fe-V และ V_2O_5 ที่อุณหภูมิ 1000°C

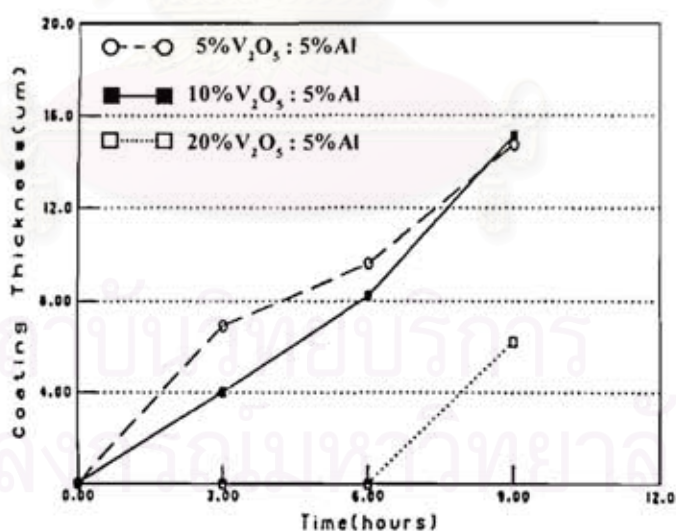
S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยาของอ่างเคลือบออกไซด์ต่อความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ โดยคงสภาพอ่างเคลือบออกไซด์ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 25 หรือ 50 ชั่วโมง และทำการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอน 0.5% C เป็นเวลาสั้นละ 5 ชั่วโมง ต่อกันไปเรื่อยๆ จนครบ 25 หรือ 50 ชั่วโมง โดย 10 ชั่วโมงแรกความหนาชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะเริ่มคงที่ ที่เวลาผ่านไป 25 ชั่วโมง ต่อจากนั้นหลังจากชั่วโมงที่ 35 ความหนาชั้นเคลือบจะเริ่มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



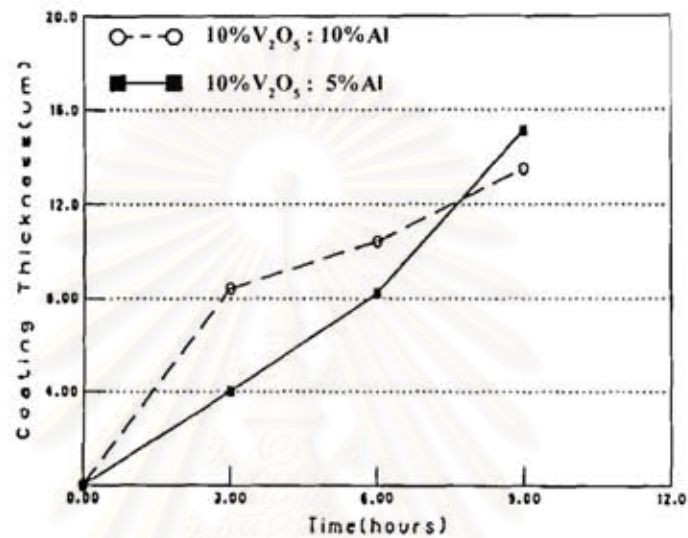
รูปที่ 2.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในอ่างเกลือ โดยใช้เวลาดังทั้งหมด 25 และ 50 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาในการเคลือบครั้งละ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 950°C

S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ วานเดียมเพนทอกไซด์ V_2O_5 โดยทำการแปรผันปริมาณของ V_2O_5 (5%, 10% และ 20% ตามลำดับ) พร้อมทั้งใช้ปริมาณของอะลูมิเนียมผงที่ 5% พบว่าผลของ 5% และ 10% V_2O_5 จะได้ผลที่คล้ายๆ กัน โดยที่ 5% V_2O_5 จะมีความหนาของชั้นเคลือบมากกว่าในช่วงแรก และที่ 20% V_2O_5 จะไม่เกิดชั้นเคลือบเลยใน 6 ชั่วโมงแรกของการเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลของปริมาณ V_2O_5 ต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 950°C โดยใช้เวลาเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง

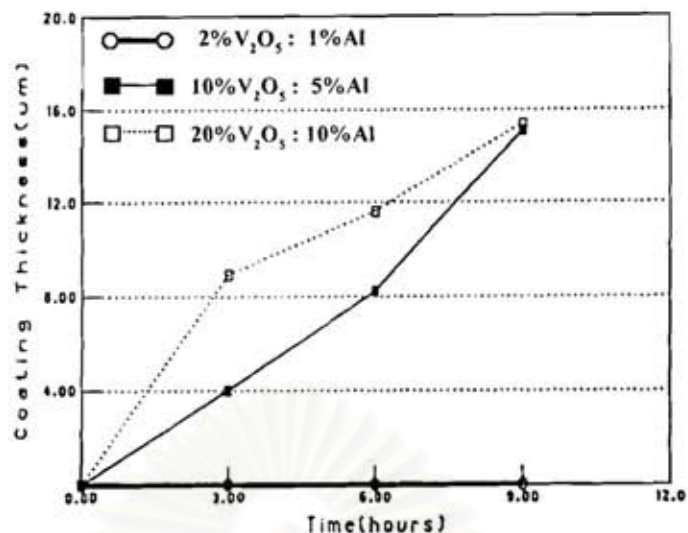
S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียม โดยทำการแปรผันปริมาณของอะลูมิเนียม (5%และ10% ตามลำดับ) พร้อมทั้งใช้ปริมาณของ V_2O_5 คงที่ 10% พบว่าอะลูมิเนียมเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี และจะให้ผลที่คล้ายๆกัน โดยความหนาจะเพิ่มมากขึ้นหลังจากเคลือบไปแล้วเป็นเวลา 7 ชั่วโมง และความหนาชั้นเคลือบที่เวลา 9 ชั่วโมงจะพบว่าความแตกต่างระหว่างความหนาชั้นเคลือบที่ 5%และ10% อะลูมิเนียม จะได้ค่าที่แตกต่างกันประมาณ 10% ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลของปริมาณอะลูมิเนียม ต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ $950^{\circ}C$ โดยใช้เวลาเคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง

S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของ 10% V_2O_5 ต่อ 5% อะลูมิเนียม , 20% V_2O_5 ต่อ 10% อะลูมิเนียม และ 2% V_2O_5 ต่อ 1% อะลูมิเนียม ตามลำดับ พบว่าที่ 20% V_2O_5 ต่อ 10% อะลูมิเนียม จะได้ความหนาชั้นเคลือบมากที่สุด โดยที่ 2% V_2O_5 ต่อ 1% อะลูมิเนียม จะไม่เกิดชั้นเคลือบเลย ดังแสดงในรูปที่ 2.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

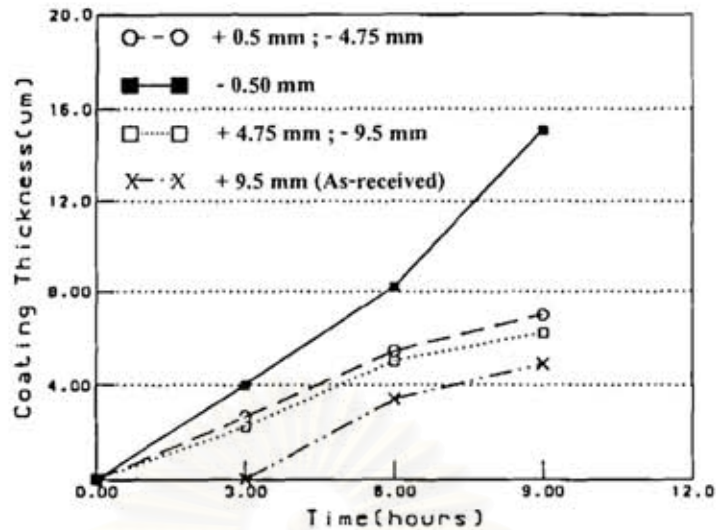


รูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาภายในอย่างเกลือต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 950°C ($V_2O_5 : Al = 2 : 1$)

S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาขนาดผงต่อความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ โดยทำการแปรผันขนาดของผง V_2O_5 ที่ใช้เป็นสารฟอร์มคาร์ไบด์ พบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์จะขึ้นอยู่กับขนาดของผง V_2O_5 ที่ใช้ โดยผงที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดชั้นเคลือบที่หนากว่าผงที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีขนาดผงดังต่อไปนี้

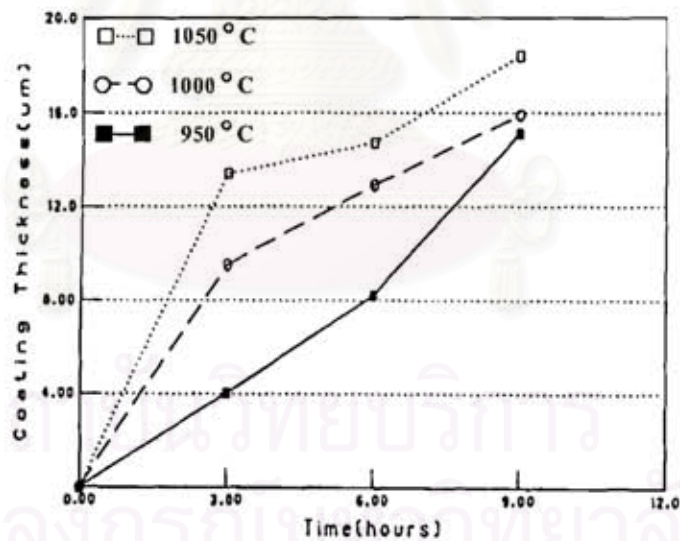
- ขนาดผง น้อยกว่า 0.5 มม.
- ขนาดผงอยู่ระหว่าง 0.5 มม. ถึง 4.75 มม.
- ขนาดผงอยู่ระหว่าง 4.75 มม. ถึง 9.5 มม.
- ขนาดผง มากกว่า 9.5 มม. (เกิด V_2O_5)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



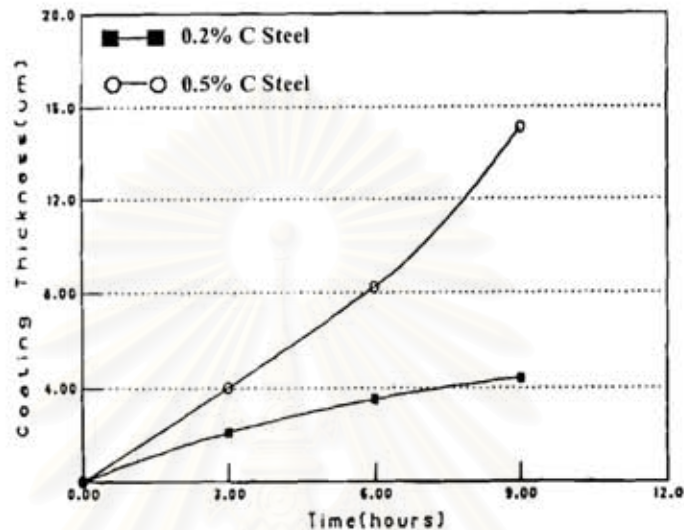
รูปที่ 2.8 ผลของขนาดผงต่อความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 1000°C โดยใช้เวลา เคลือบ 3, 6 และ 9 ชั่วโมง

S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ $950, 1000$ และ 1050°C ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการเกิดชั้นเคลือบมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาชั้นเคลือบ โดยใช้ $10\% \text{V}_2\text{O}_5$ และ $5\% \text{Al}$

S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กกล้า โดยทำการทดลองเหล็กกล้า 2 ชนิดที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกันคือ 0.2%คาร์บอน และ 0.5%คาร์บอนตามลำดับ พบว่าเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะมีความหนาชั้นเคลือบมากกว่าเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ โดยจะเห็นความแตกต่างของความหนาชั้นเคลือบตั้งแต่ช่วงแรกจนถึงช่วงสุดท้ายของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบความหนาชั้นเคลือบบนเหล็กกล้า 0.2%คาร์บอนและ 0.5%คาร์บอน ที่อุณหภูมิ 950°C โดยใช้เวลาเคลือบ 3,6 และ 9 ชั่วโมง

นอกจากนี้ S. Bhagga Fazluddin และ A. Koursaris [3] ยังได้ศึกษาเกลือบอแรกซ์ที่ประกอบด้วย 10% V_2O_5 และ 5% Al พบ V_2O_5 เกิดขึ้นในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ H.C. Child, S.A. Plumb และ J.J. McDermott [2] เป็นการยืนยันว่าออกไซด์ของวานาเดียมที่ทำให้เกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ได้นั้นต้องอยู่ในรูปของ V_2O_5

T. Arai และ S. Harper [1] ได้กล่าวถึงกรณีใช้ออกไซด์ของธาตุที่ต้องการเกิดเป็นชั้นคาร์ไบด์เติมลงในอ่างเกลือบอแรกซ์ในกระบวนการเคลือบผิว ที่ตี จำเป็นต้องเติมสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งสารที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ที่ยกตัวอย่างไว้ คือ โบรอนคาร์ไบด์และอะลูมิเนียม เช่น กรณีที่ใช้สาร V_2O_5 เป็นสารที่ให้ธาตุวานาเดียมเพื่อทำให้เกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวชิ้นงาน จำเป็นต้องเติม B_4C ลงไปจำนวนหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่ไปรีดิวซ์ V_2O_5 ให้อยู่ในรูปที่พร้อมทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อชิ้นงานเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

การเคลือบผิวให้เป็นชั้นคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการ ทิตี นั้น ปริมาณเฟอร์ไรต์ของธาตุที่จะฟอร์มคาร์ไบด์ที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากกว่าปริมาณที่ใช้รวมตัวกับคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อชิ้นงาน สำหรับการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ T. Arai และ S. Harper [1] แนะนำให้ใช้ปริมาณเฟอร์ไรต์วานาเดียม Fe-V มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวานาเดียมเพนทอกไซด์ V_2O_5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโบรอนคาร์ไบด์ B_4C ถ้าปริมาณเฟอร์ไรต์ของธาตุที่ใช้ไม่เพียงพอหรือภายในอ่างเกลือที่ใช้ไม่อึดด้วยสารที่จะฟอร์มคาร์ไบด์ จะทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีความหนาลดลง

T. Arai และ S. Harper [4] ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการเคลือบผิว ทิตี ว่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเคลือบ เวลาในการเคลือบ ชนิดของชิ้นงานที่นำมาทำการเคลือบผิว และชนิดของชั้นคาร์ไบด์ โดยแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่าง อิทธิพลของอุณหภูมิ และเวลาในการเคลือบผิวต่อความหนาชั้นเคลือบคาร์ไบด์ ดังสมการที่ [1]

$$d^2/t = K = K_0 \exp(-Q/RT) \quad [1]$$

โดยที่ d คือ ความหนาชั้นเคลือบ (ซ.ม.)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (วินาที)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ซ.ม.²/วินาที)

K_0 คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (ซ.ม.²/วินาที)

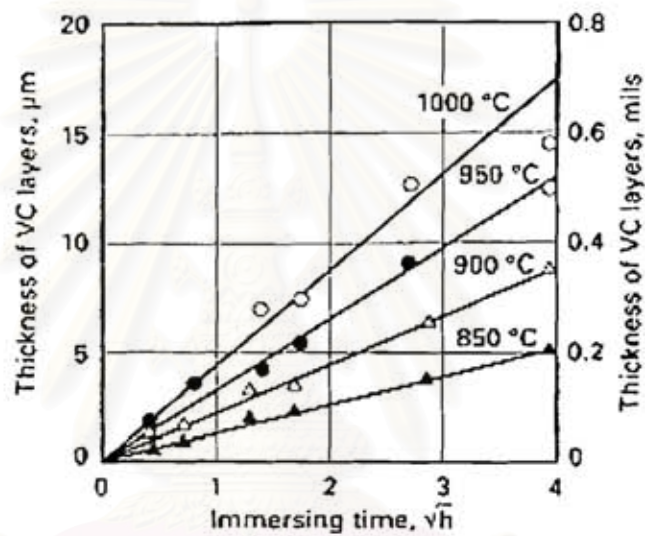
Q คือ พลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล-เคลวิน

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ใช้ในการเคลือบผิว (เคลวิน)

โดยค่า Q ที่ได้จากการทดลอง สำหรับวานาเดียมคาร์ไบด์ ไนโอเบียมคาร์ไบด์ และโครเมียมคาร์ไบด์ มีค่าประมาณ 192, 209 และ 167 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ ค่า R คือค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล-เคลวิน และค่า K_0 มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนในเนื้อชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

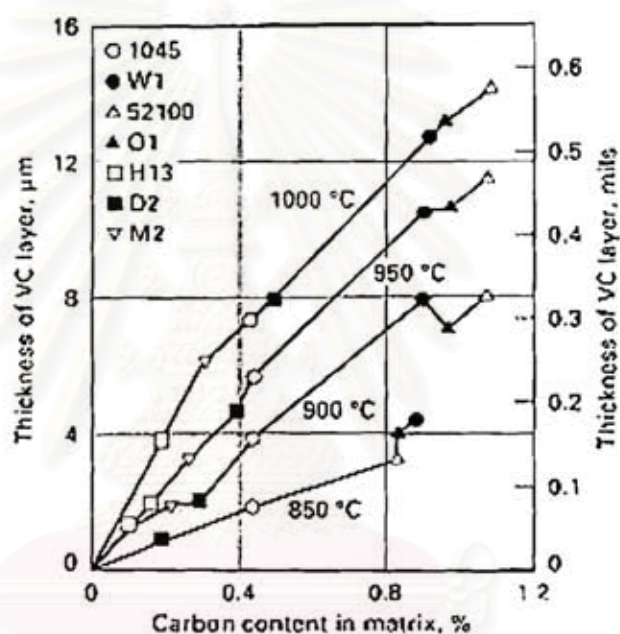
T. Arai และ S. Harper [1] ได้แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ในการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ W1 โดยใช้อ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมผงเฟอร์โรวานาเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่ 2 ของเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวและเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ ประสงค์ และคณะฯ [5] ได้ทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 ด้วยวานาเดียมคาร์ไบด์ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1000°C โดยแปรผันเวลาที่ใช้ในการเคลือบ 1 ถึง 9 ชั่วโมง แสดงว่าอัตราการเกิดชั้นเคลือบถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอน



รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิและเวลา ต่อความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ บนเหล็กกล้าเครื่องมือ W1 ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่มีผงเฟอร์โรวานาเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

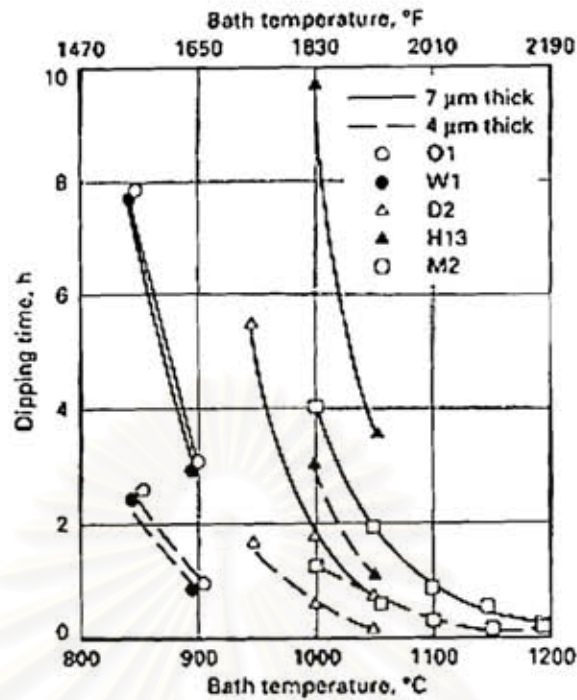
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T. Arai และ S. Harper [1] ได้แสดงผลของปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้น ออสเทนไนต์ (austenite matrix) ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่อความหนาชั้นเคลือบคาร์ไบด์ ดัง แสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ คาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้นของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ และตามอุณหภูมิการเคลือบที่สูงขึ้น ในกรณีของ เหล็กกล้าผสม อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ มีผลทำให้ไป เพิ่มอัตราการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนในเนื้อเหล็กและในชั้นคาร์ไบด์ทำให้ได้ชั้นเคลือบคาร์ไบด์หนามากขึ้น นอกจากนี้ T. Arai และ S. Harper [1] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ อ่างเกลือและเวลาการเคลือบผิวที่ใช้เพื่อให้ได้ชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์สำหรับเหล็กกล้าชนิด ต่างๆ ให้ได้ความหนาเป็น 4 และ 7 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ผลของปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อพื้นของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ต่อความหนา ของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่มีผงเฟอร์โรวานาเดียม 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยใช้เวลาในการเคลือบ 4 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 ผลของอุณหภูมิของอ่างเกลือและเวลาการเคลือบผิวที่ใช้ เพื่อให้ได้ความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์มีค่าเป็น 4 และ 7 ไมครอน ของเหล็กชนิดต่างๆ

กระบวนการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ ทีดี เป็นกระบวนการเคลือบผิววัสดุที่อุณหภูมิสูงในช่วง 850-1050°C เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 1-10 ชั่วโมง เป็นไปได้ว่าชิ้นงานที่นำมาทำการเคลือบผิวอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด (dimension change or size distortion) และเกิดการบิดเบี้ยวของรูปร่าง (shape distortion) ภายหลังจากการเคลือบผิว

การเปลี่ยนแปลงขนาดเกิดจากความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นงานในระหว่างการอบชุบความร้อนของเนื้อพื้นวัสดุ เนื่องจากออสเทนไนต์มีปริมาตรจำเพาะน้อยกว่ามาร์เทนไซต์ทำให้มีความแตกต่างของปริมาตรจากการเปลี่ยนโครงสร้างหรือเกิดจากความแตกต่างของปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างทั้งก่อนและหลังทำกระบวนการ ทีดี ในกรณีนี้ T. Arai และ S. Harper [1] แนะนำให้ควบคุมปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างทั้งก่อนและหลังทำการกระบวนการ ทีดี ให้เท่ากัน หรือทำให้ปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างเป็น 0 เปอร์เซ็นต์ทั้งก่อนและหลังการเคลือบผิว ซึ่งสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น D2 สามารถทำได้โดยการอบคืนตัวที่อุณหภูมิในช่วง 520 ถึง 535°C เพื่อสลายออสเทนไนต์เหลือค้าง

การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เกิดจากความเค้นเนื่องจากความร้อนในกระบวนการและจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โครงสร้างของชิ้นงานที่ขึ้นกับทิศทาง (anisotropy) และความเค้นที่ตกค้าง ในเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้น้อยลงได้โดย ให้อุ่นชิ้นงานเป็นขั้นๆ เพื่อให้มีการรับอุณหภูมิทั้งภายนอกและภายในชิ้นงานให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดก่อนให้ความร้อนถึง อุณหภูมิการชุบแข็ง ลดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานให้น้อย ใช้เหล็กกล้าเครื่องมือที่สามารถชุบแข็งด้วยอากาศ และคลายความเค้นเนื่องจากการกลึงและการขัดผิว

ประสงค์ และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอะลูมิเนียมต่อการเกิดชั้นเคลือบ วานเดียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ D2, H13 และ M2 ด้วยกระบวนการ ทีดี โดยใช้ปริมาณ เฟอร์โรวานาเดียม 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว โดยแปรผันเวลาในการเคลือบ 1 ถึง 9 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบในอ่างเกลือที่เติมอะลูมิเนียมเป็นรีดิวเซอร์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ขึ้น ส่วนชิ้นงานที่ทำการเคลือบโดยไม่ใช้อะลูมิเนียมเป็นรีดิวเซอร์จะไม่เกิดชั้นเคลือบ ซึ่งคาดว่าอะลูมิเนียมที่เติมลงในอ่างเกลืออาจทำหน้าที่เป็นสารรีดิวเซอร์ แสดงว่าวานเดียมละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวในรูปของ V_2O_5 และจำเป็นที่จะต้องใส่สารรีดิวเซอร์เพื่อให้ได้ชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ และพบว่าความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ T. Arai และ S. Harper [1] ที่ทำการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ W1 โดยใช้ผงเฟอร์โรวานาเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ซึ่งแสดงว่าอัตราการเกิดชั้นเคลือบถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอน

สุรพล พรนิมิตรธรรม [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเคลือบผิวด้วยไนโอเบียมคาร์ไบด์บนเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 โดยกระบวนการ ทีดี พบว่าเติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในอ่างเกลือ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ และถ้าไม่เติมอะลูมิเนียมลงในอ่างเกลือเลขจะไม่เกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์แต่ในทางกลับกันถ้าเติมอะลูมิเนียมลงในอ่างเกลือมากเกินไป มีผลทำให้ชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์มีความหนาลดลงหรืออาจจะไม่เกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์เลยก็ได้ เนื่องมาจากปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นตัวรีดิวซ์มีมากเกินไปความต้องการในการรีดิวซ์ Nb_2O_5 ทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมส่วนที่เหลืออยู่ไปรีดิวซ์ B_2O_3 ซึ่งโบรอนเป็นธาตุที่มีอะตอมขนาดเล็กจึงสามารถแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อชิ้นงานและรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นชั้นเหล็กบอไรด์ ซึ่งเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนจากในเนื้อชิ้นงานไปที่ผิว ส่งผลให้ไนโอเบียมไม่สามารถจับตัวกับคาร์บอนให้เป็นชั้นเคลือบคาร์ไบด์ได้ และทำให้ชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้บนผิวชิ้นงานมีความหนาลดลงและไม่สม่ำเสมอหรืออาจจะไม่เกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์เลย นอกจากนี้สุรพล พรนิมิตรธรรม ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณ

เฟอร์โรไนโอเบียมซึ่งเป็นสารเฟอร์โรอัลลอยของธาตุที่จะฟอร์มคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมที่เติมลงในอ่างเกลือมีผลต่อปริมาณไนโอเบียมที่ละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ถ้าไนโอเบียมที่ละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวมีปริมาณน้อยกว่าจำนวนไนโอเบียมที่คาร์บอนที่ผิวชิ้นงานต้องการในการรวมตัวให้เกิดเป็นชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ หรือปริมาณไนโอเบียมในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวไม่อึดตัว จะทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีความหนา ลดลง ในการทดลองพบว่าปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นค่าที่เพียงพอทำให้เกลือบอแรกซ์หลอมเหลวอึดตัวไปด้วยไนโอเบียม กล่าวคือถ้าเติมเฟอร์โรไนโอเบียมลงในอ่างเกลือในปริมาณที่มากกว่า 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความหนาของชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้จะไม่มากกว่าความหนาของชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการเติมเฟอร์โรไนโอเบียม ปริมาณ 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ชัยวัฒน์ จงประสิทธิผล [7] ได้ศึกษาผลของปริมาณวานาเดียมที่ละลายในบอแรกซ์หลอมเหลวต่อการเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการ ทีดี พบว่า การกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นการเร่งกระบวนการออกซิเดชัน และถ้าทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวมากเกินไป จะเกิดวานาเดียมออกไซด์ ในรูปของ V_2O_5 มากกว่าในรูปของ V_2O_3 ซึ่งออกไซด์ในรูปของ V_2O_3 จะต้องถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของ V_2O_5 หรือ วานาเดียมอิสระก่อน จึงจะสามารถรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนกลายเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ได้ ซึ่งการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 5 นาที และแช่ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นการกวนให้เฟอร์โรวานาเดียมฟุ้งในบอแรกซ์หลอมเหลว แล้วแช่ไว้ให้ค่อยๆ เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้นวานาเดียมออกไซด์ที่ได้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ V_2O_3 ซึ่งสามารถรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ได้เลย จึงได้ความหนาชั้นเคลือบใกล้เคียงกันกับการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวถึง 3 ชั่วโมง

ปรัชญา ทิตอร่าม [8] ได้ศึกษาผลของรีดิวเซอร์และวิธีการเติมเฟอร์โรวานาเดียม ต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ โดยกระบวนการ ทีดี โดยทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเช่น D2 ด้วยวานาเดียมคาร์ไบด์ และใช้เฟอร์โรวานาเดียมเป็นสารฟอร์มคาร์ไบด์ อะลูมิเนียมและซิลิกอนเป็นตัวรีดิวซ์ และทำการกวนในบอแรกซ์หลอมเหลว พบว่ากรณีเติมเฟอร์โรวานาเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวแล้วทำการกวนเป็นเวลา 5 นาที เปรียบเทียบระหว่างปริมาณของซิลิกอน 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณซิลิกอน 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นรีดิวเซอร์ที่ทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์มากที่สุด และในกรณีที่เติมเฟอร์โรวานาเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวแล้วทำการกวนเป็นเวลา 5 นาที พร้อมทั้งใช้ปริมาณซิลิกอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวซ์ จะไม่พบชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์แต่พบชั้นเคลือบของเหล็กบอไรด์แทน และการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวให้เป็นน้ำวนแล้วเติม

เฟอร์โรวานเนียม จะทำให้เกิดชั้นเคลือบวานเนียมคาร์ไบด์ได้โดยไม่ต้องเติมรีดิวเซอร์ และจะได้ความหนาของชั้นเคลือบมากกว่าการเติมเฟอร์โรวานเนียมในบอแรกซ์หลอมเหลวแล้วทำการกวน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เตาเกลือ (Salt Bath) มีอ่างเกลือที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 230 มิลลิเมตร ความลึกของอ่าง 450 มิลลิเมตร มีเทอร์โมคัพเปิดสำหรับวัดอุณหภูมิรอบอ่างเกลือและอุณหภูมิภายในอ่างเกลือ อุณหภูมิภายในอ่างเกลือสามารถปรับระดับตามที่ต้องการด้วยแผงควบคุม เตาเกลือที่ใช้มีอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน 1000°C

3.1.2 เตา Muffle ใช้สำหรับให้ความร้อนกับเบ้า Stainless Steel เพื่อทำการเคลือบผิวชิ้นงาน

3.1.3 เบ้าที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (18-10 Stainless Steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 72 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 50 มิลลิเมตร ความสูง 90 มิลลิเมตร

3.1.4 เกลือบอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารที่ใช้เป็นตัวทำละลาย

3.1.5 เฟอร์โรวานาเดียม (Fe-V) เป็นสารฟอร์มคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลอง โดยขนาดที่นำมาทดลองมีขนาด -60 mesh มีธาตุวานาเดียม 52%

3.1.6 วานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) เป็นสารฟอร์มคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลอง โดยขนาดที่นำมาทดลองมีขนาด < -35 mesh มีธาตุวานาเดียม 56.02%

3.1.7 อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Al) เป็นตัวรีดิวซ์เพื่อช่วยในการเกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

3.1.8 ลวดทนความร้อนสำหรับใช้แขวนชิ้นงาน

3.1.9 เทอร์โมคัพเปิดสำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา Muffle

3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.2.1 ตัดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเป็น DC 53 (Modified SKD 11) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 ให้มีขนาด 25 มิลลิเมตร x 25 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร และขนาด 10 มิลลิเมตร x 10 มิลลิเมตรหนา 5 มิลลิเมตร และเจาะรูไว้ด้านบนสำหรับร้อยลวดทนความร้อนเพื่อแขวนชิ้นงาน

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11)
(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ส่วนผสม ชิ้นงาน	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
DC 53 (Modified SKD 11)	0.931	1.03	0.408	0.016	<0.001	6.82	1.99	0.089	0.068	0.25	bal.

3.2.2 ชัดขอบชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 และขัดผิวชิ้นงานตามหน้ากว้างของชิ้นงาน 2 ด้าน ด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 600 และ 1200 ตามลำดับ เพื่อขัดสนิมและสิ่งสกปรกที่ผิวชิ้นงาน

3.2.3 ล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดเพื่อขัดคราบสกปรกและเศษผงจากการขัด

3.2.4 ล้างชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์เพื่อขจัดน้ำออก

3.2.5 เป่าชิ้นงานให้แห้งแล้วนำไปเก็บในภาชนะที่มีสารดูดความชื้นและปิดมิดชิด (Desiccator)

3.3 เงื่อนไขในการทดลอง

3.3.1 ศึกษาผลของเฟอร์โรวานเดียม Fe-V และวานเดียมเพนทอกไซด์ V_2O_5 โดยมีอะลูมิเนียมเป็นตัวรีดิวซ์ ต่อชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที

3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิว

3.4.1 ทดลองในอ่างเกลือ

3.4.1.1 เติมหงบอบแรกซ์น้ำหนัก 10 กิโลกรัม ลงในอ่างเกลือ ให้ความร้อนจนอุณหภูมิในอ่างเกลือเท่ากับ 850°C เติมเฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในอ่างเกลือ และทำการกวนให้เข้ากัน

3.4.1.2 เติมาะลูมิเนียมซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกวนให้กระจายตัวในเกลืออบแรกซ์หลอมเหลว แล้วใส่ชิ้นงานลงในอ่างเกลือ แช่ชิ้นงานไว้ 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของอ่างเกลือไปที่ 1000°C เมื่ออุณหภูมิในอ่างเกลือถึง 1000°C จึงเริ่มจับเวลาในการเคลือบตั้งแต่ 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที

3.4.1.3 เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นงานออกจากอ่างเกลือแล้วทำให้เย็นตัวในน้ำมัน จากนั้นนำไปต้มน้ำร้อนเพื่อล้างคราบเกลือออกแร็กซ์ที่ติดผิวชิ้นงานออก แล้วนำไปตรวจสอบและวัดความหนาของชั้นเคลือบ, วัดความแข็งของชั้นเคลือบ และวิเคราะห์เฟสของชั้นเคลือบ โดยมีแผนภูมิขั้นตอนการทดลองการเคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.4.2 ทดลองในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิม

3.4.2.1 เติมผงบอแร็กซ์น้ำหนัก 400 กรัม ลงในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิม จากนั้นให้ความร้อนเตา Muffle จนอุณหภูมิในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิมเท่ากับ 850°C เติมน้ำเค็มเค็มเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิมและทำการกวนให้เข้ากัน

3.4.2.2 เติมอะลูมิเนียมซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ 5,7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกวนให้กระจายตัวในเกลือบอแร็กซ์หลอมเหลว แล้วใส่ชิ้นงานลงในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิมแช่ชิ้นงานไว้ 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเตา Muffle ไปที่ 1000°C เมื่ออุณหภูมิในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิม ถึง 1000°C จึงเริ่มจับเวลาในการเคลือบตั้งแต่ 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที

3.4.2.3 เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นงานออกจากเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วทำให้เย็นตัวในน้ำมัน จากนั้นนำไปต้มน้ำร้อนเพื่อล้างคราบเกลือออกแร็กซ์ที่ติดผิวชิ้นงานออก แล้วนำไปตรวจสอบและวัดความหนาของชั้นเคลือบ, วัดความแข็งของชั้นเคลือบ และวิเคราะห์เฟสของชั้นเคลือบ โดยมีแผนภูมิขั้นตอนการทดลองการเคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์เกลือบอแร็กซ์

3.5.1 ตักตัวอย่างเกลือบอแร็กซ์หลอมเหลวมาแล้วทำให้เย็นตัวในอากาศ

3.5.2 วิเคราะห์ธาตุในเกลือบอแร็กซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบและวัดความหนา, วัดความแข็ง และวิเคราะห์ธาตุของชั้นเคลือบ

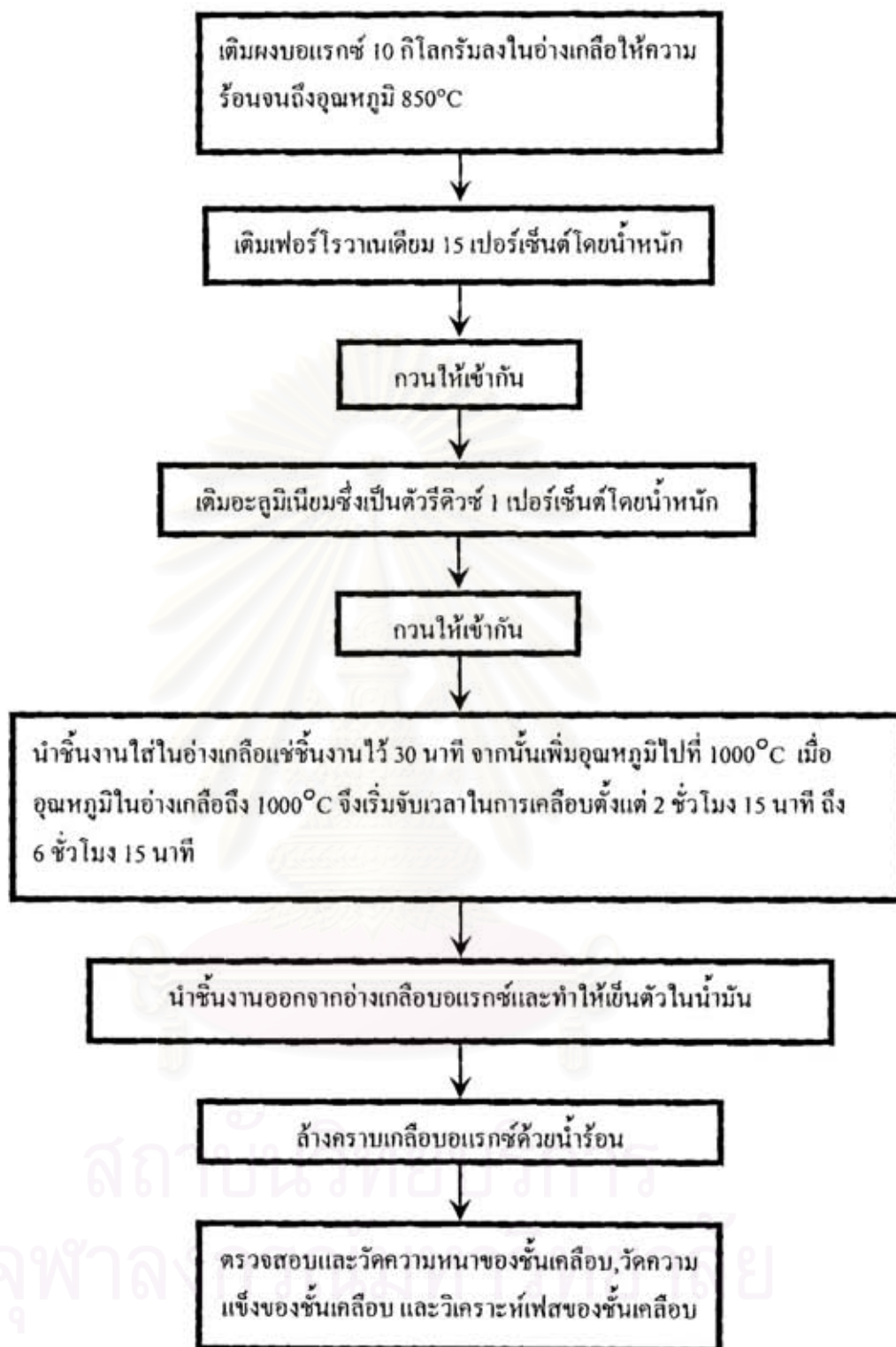
3.6.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมาตัดตามภาคตัดขวาง 1/4 ของชิ้นงาน โดยประมาณ และอัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ขัดชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระดาษทราย และขัดเงาด้วยผงอะลูมินาแล้วจึงกัดผิวด้วยน้ำยา Hydrochloric Ferric Chloride

3.6.2 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการกัดผิวแล้วมาตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

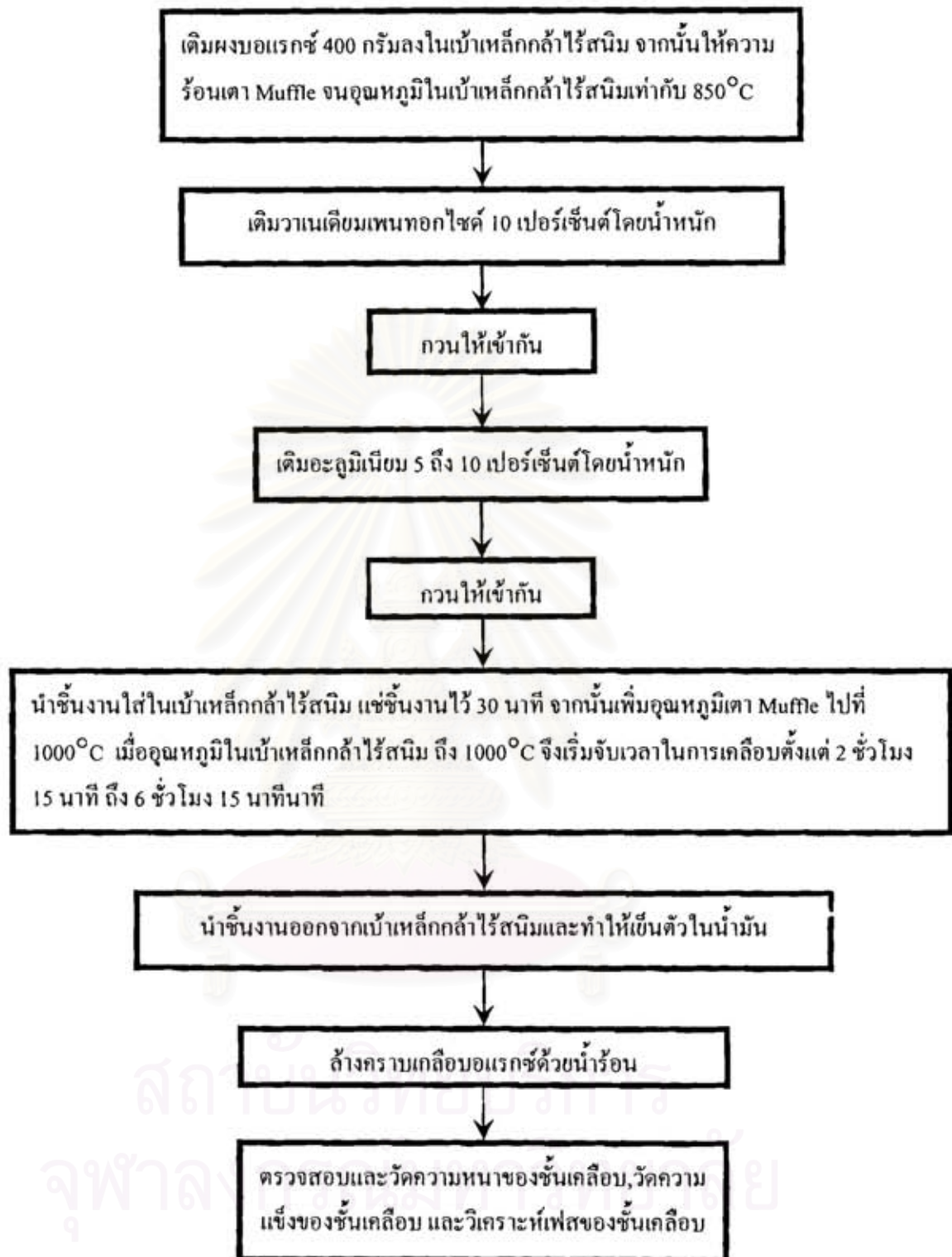
3.6.3 ถ่ายรูปและวัดความหนาชั้นเคลือบด้วยโปรแกรม AxioVision 3.0

3.6.4 วัดความแข็งของชั้นเคลือบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro-Vickers Hardness Testing Machine)

3.6.5 วิเคราะห์ผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทดสอบการเคลือบผิว (ทดลองในอ่างเกลือ)



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการทดลองการเคลือบผิว (ทดลองในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิม)

บทที่ 4

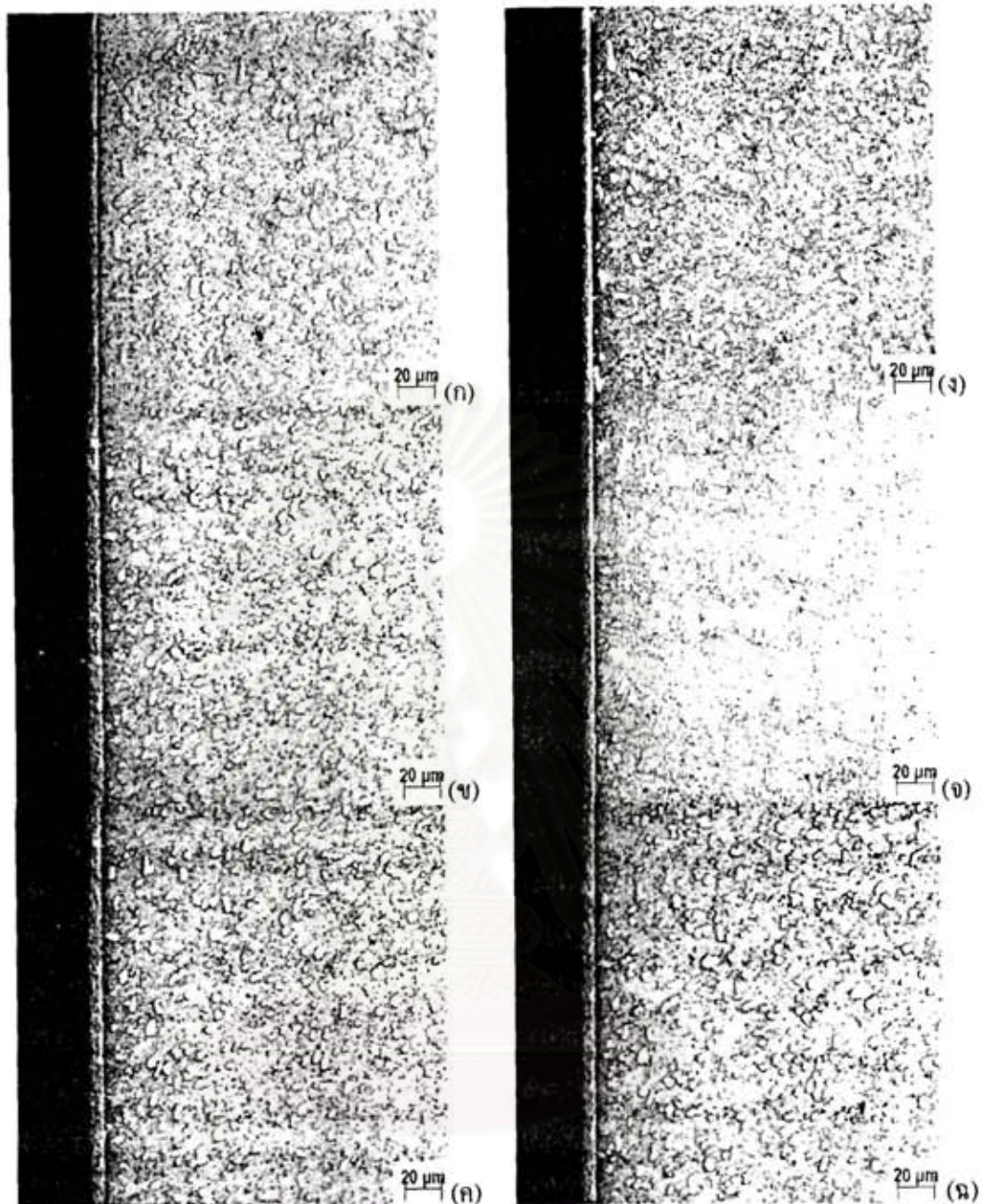
ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลของการใช้เฟอร์โรวานเนเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ อะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

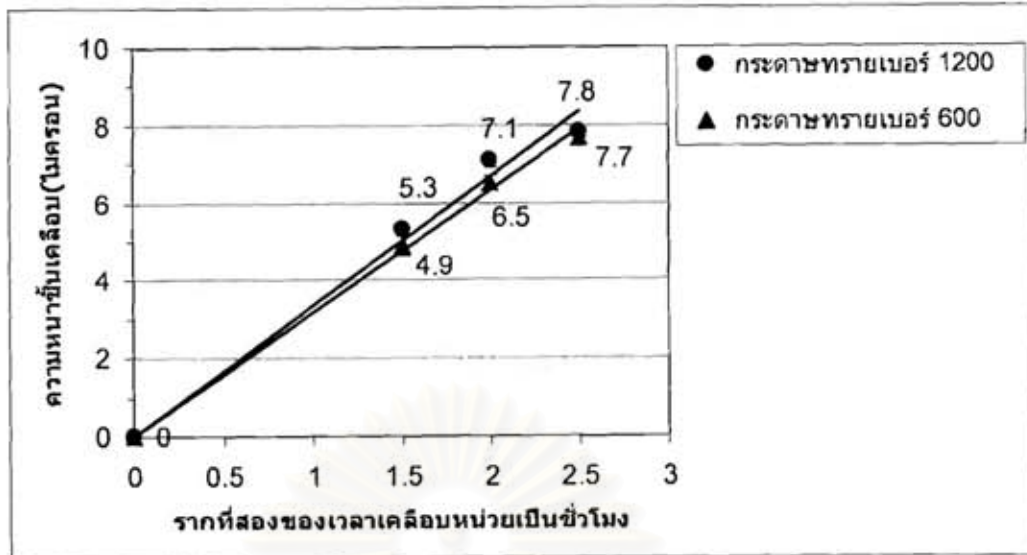
การเคลือบผิวโดยใช้เฟอร์โรวานเนเดียมในฐานะสารที่ให้ธาตุวานเนเดียมกับอะลูมิเนียมในฐานะตัวรีดิวซ์ บนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที มีผลการทดลองการเคลือบผิวดังนี้

ความหนาของชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์จะหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาเคลือบจาก 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที โดยชั้นงานด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จะมีความหนาของชั้นเคลือบใกล้เคียงหรือน้อยกว่าด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เพียงเล็กน้อย โดยด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จะได้ความหนาของชั้นเคลือบ 4.9, 6.5 และ 7.7 ไมครอนตามลำดับ และด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 จะได้ความหนาของชั้นเคลือบ 5.3, 7.1 และ 7.8 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบจะมีความแตกต่างจากเนื้อชิ้นงานอย่างชัดเจนจนสามารถเห็นรอยต่อของชั้นเคลือบที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และชั้นเคลือบจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาในการเคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยความหนาของชั้นเคลือบจะหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนในเนื้อชิ้นงานมารวมตัวกับธาตุวานเนเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวเกิดเป็นชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน

กล่าวได้ว่าการใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวรีดิวซ์ มีส่วนสำคัญในกระบวนการเกิดชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ ทั้งนี้เป็นเพราะธาตุวานเนเดียมจากเฟอร์โรวานเนเดียมที่เติมลงในเคลือบบอแรกซ์หลอมเหลวไม่ได้ละลายอยู่ในรูปของอะตอมวานเนเดียมอิสระ โดยตรงแต่ละลายอยู่ในรูปของวานเนเดียมออกไซด์ ซึ่งมีอยู่ 2 รูป คือ วานเนเดียมเพนทอกไซด์ (Vanadium Pentoxide, V_2O_5) ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ -124 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของวานเนเดียม และ วานเนเดียมไตรออกไซด์ (vanadium trioxide, V_2O_3) ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ -109 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของวานเนเดียม แต่การที่จะเกิดชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ได้นั้นธาตุวานเนเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวจะต้องอยู่ในรูปของวานเนเดียมไตรออกไซด์ (V_2O_3) หรือวานเนเดียมอิสระ (nascent V) ก่อนจึงจะสามารถรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อชิ้นงานได้ [2]



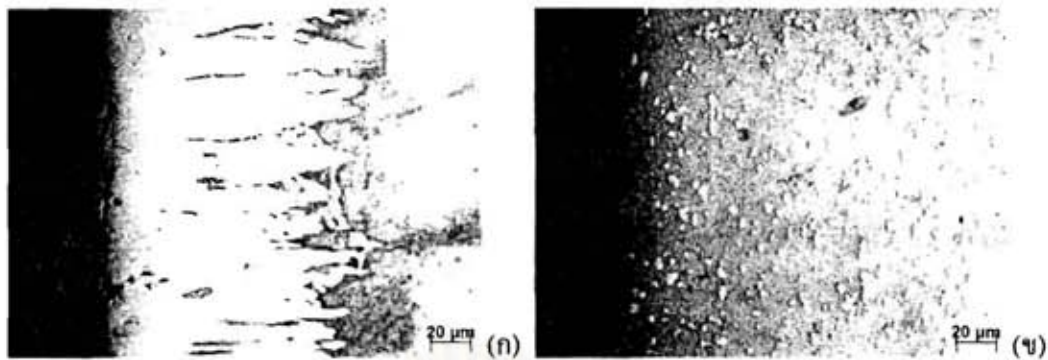
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า แสดงด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง 15 นาที (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง 15 นาที และด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เคลือบผิวเป็นเวลา (ง) 2 ชั่วโมง 15 นาที (จ) 4 ชั่วโมง และ (ฉ) 6 ชั่วโมง 15 นาที



รูปที่ 4.2 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C

กรณีเกิดชั้นเหล็กโบไรด์ (FeB หรือ Fe_2B) แทนชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ เนื่องจากการเก็บผงเฟอร์โรวานาเดียมไว้นานเกินไป อาจเกิดออกไซด์กับเหล็ก ทำให้อาจจะขัดขวางไม่ให้วานาเดียมละลายในบอแรกซ์หลอมเหลว อะลูมิเนียมที่ใส่ลงในบอแรกซ์หลอมเหลวจึงไปรีดิวซ์โบรอนออกไซด์เกิดเป็นอะตอมโบรอนจำนวนมาก ซึ่งอะตอมโบรอนจะละลายอยู่ในบอแรกซ์หลอมเหลว ทำให้อะตอมโบรอนที่มีขนาดเล็กแพร่เข้าไปในชิ้นงานและรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นชั้นเหล็กโบไรด์ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน[2] ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก)

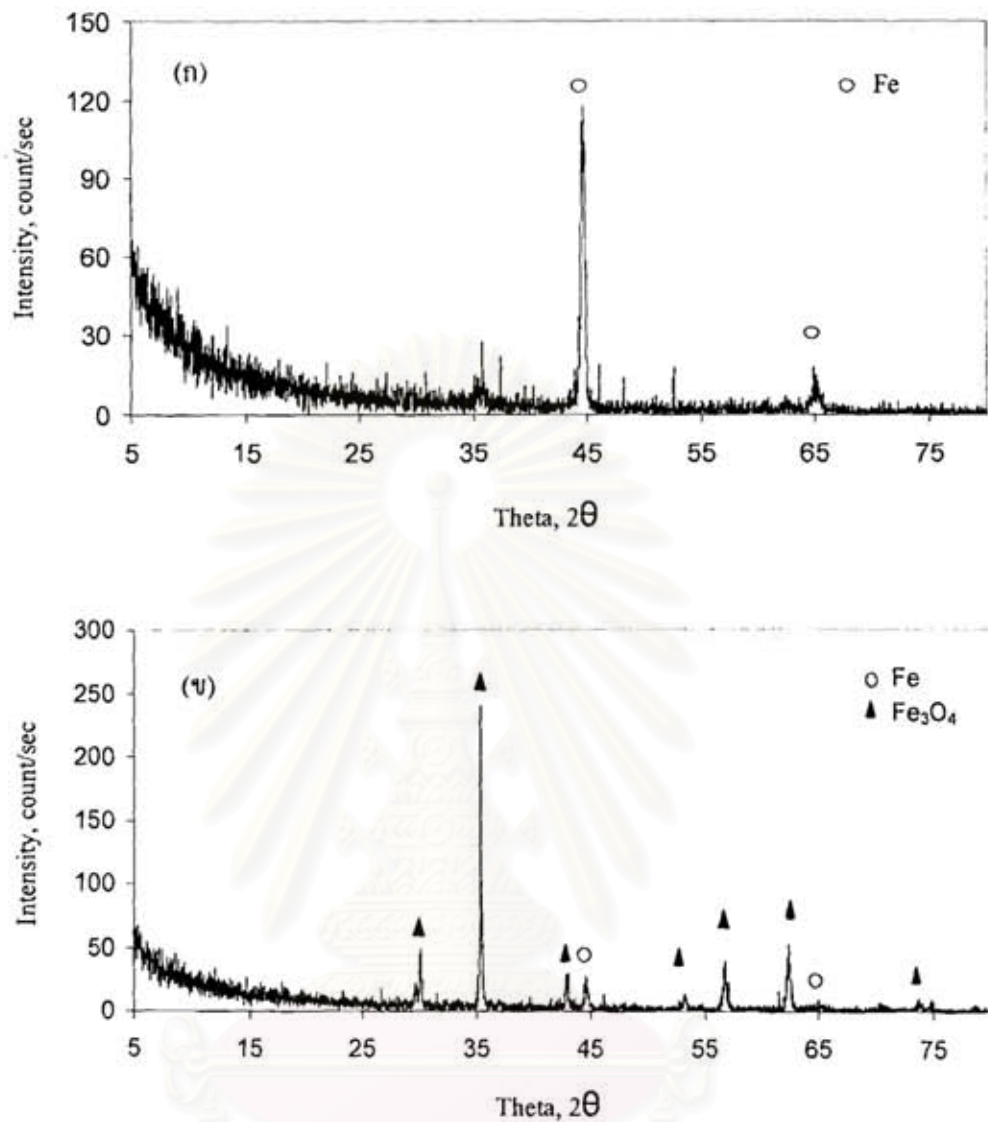
อย่างไรก็ตามการกวนที่มากจนเกินไปก็มีโอกาสที่จะทำให้เกิดสภาวะที่เป็นออกซิไดซิงรุนแรง ทำให้การละลายของธาตุวานาเดียมที่อยู่ในรูป V_2O_5 กลายเป็น V_2O_3 ทำให้ชั้นเคลือบที่ได้บางลงหรืออาจจะไม่เกิดชั้นเคลือบ ในกรณีที่มีการเตรียมผิวชิ้นงานไม่ดีพอ อาจเกิดชั้นออกไซด์ของเหล็กที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ซึ่งออกไซด์ของเหล็กจะเป็นตัวขัดขวางการเกิดชั้นเคลือบ เมื่อนำไปเคลือบในบอแรกซ์หลอมเหลว ก็จะทำให้ชั้นเคลือบที่ได้บางลงหรืออาจจะไม่เกิดชั้นเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) เพราะฉะนั้นควรจะทำจัดชั้นฟิล์มออกไซด์ของเหล็กออกไปให้หมดก่อนนำมาเคลือบผิว หรือไม่เกิดชั้นเคลือบ สาเหตุอาจมาจากไม่เกิด V_2O_3 ในบอแรกซ์ และสูญเสียอะลูมิเนียมระหว่างการเติมลงในบอแรกซ์



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เดิม Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ก) เกิดชั้นเหล็กบอไรด์ (ข) ไม่เกิดชั้นเคลือบ

โดยเมื่อทำการตรวจวิเคราะห์ผิวของชิ้นงานที่เกิดและไม่เกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ด้วย X-ray Diffractometer ดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่า รูปที่ 4.4 (ก) แสดงให้เห็นพีคของเหล็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้มีความหนาประมาณ 3 ถึง 4 ไมครอนเท่านั้น ทำให้พีคของสารประกอบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้มีค่าความเข้มสัมพัทธ์ต่ำเกินไป จึงไม่สามารถตรวจพบได้ และสำหรับชิ้นงานที่ไม่เกิดชั้นเคลือบ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) แสดงถึงพีคของเหล็ก และยังปรากฏพีคของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่ผิวของชิ้นงานด้วย ทำให้ชิ้นงานเกิดชั้นเคลือบได้ยากขึ้น เนื่องจากออกไซด์ของเหล็กจะเป็นตัวขัดขวางการเกิดชั้นเคลือบ หรือสาเหตุอาจมาจากไม่เกิด V_2O_5 ในบอแรกซ์ และสูญเสียอะลูมิเนียมระหว่างการเติมลงในบอแรกซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ผิวชิ้นงานที่ได้จากการใช้ Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer (ก) ชิ้นงานที่เกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ และ(ข) ชิ้นงานที่ไม่เกิดชั้นเคลือบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

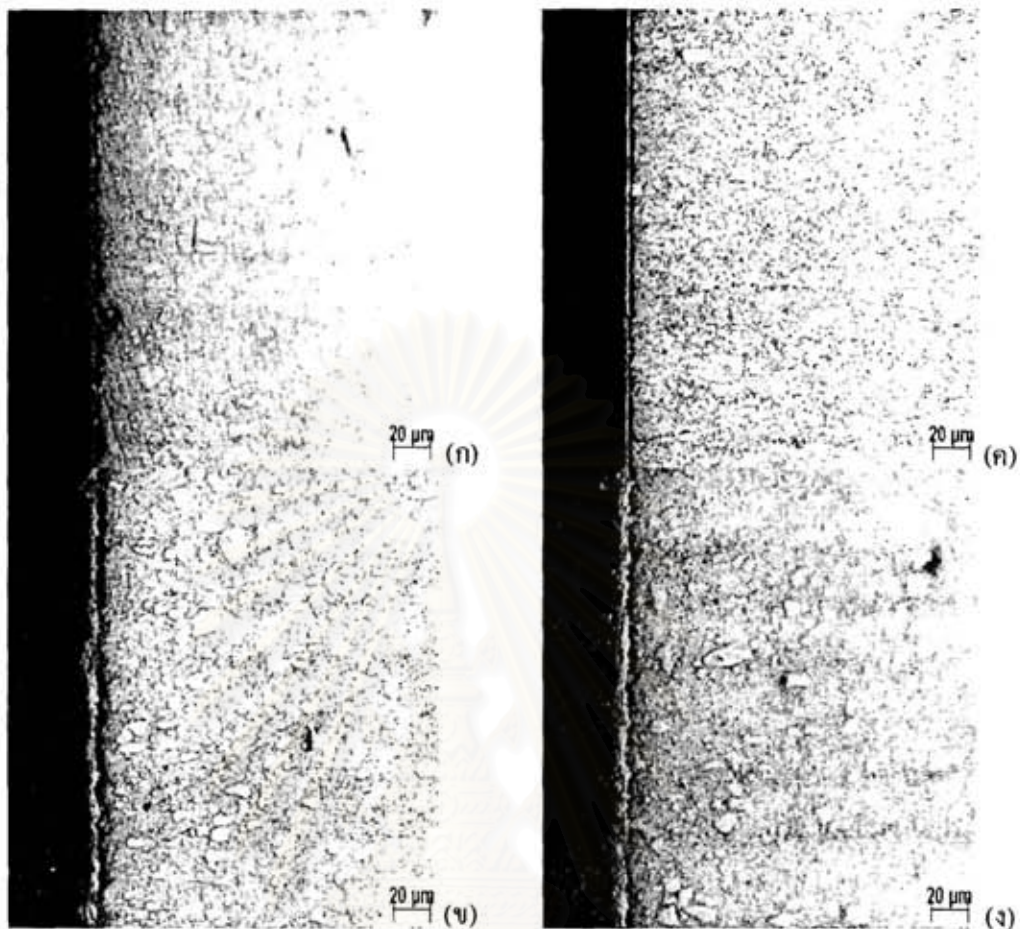
4.2 ผลของการใช้วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ อะลูมิเนียมที่แปรผัน ปริมาณ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การเคลือบผิวโดยใช้วานเดียมเพนทอกไซด์ในฐานะสารที่ให้ธาตุวานเดียมกับอะลูมิเนียม ในฐานะตัวรีดิวซ์ บนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที มีผลการทดลองการเคลือบผิวดังนี้

ความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จะหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาเคลือบจาก 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที ความหนาชั้นเคลือบยังเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นตัวรีดิวซ์ เนื่องจากว่าปริมาณของอะลูมิเนียมจะละลายในบอแรกซ์หลอมเหลวได้มากตาม ปริมาณของอะลูมิเนียม ทำให้อะลูมิเนียมไปรีดิวซ์วานเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ให้เกิดเป็น วานเดียมไตรออกไซด์ (V_2O_3) ได้มากกว่าทำให้ได้ชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่หนาเพิ่มขึ้นที่ผิว ของชิ้นงาน ซึ่งปริมาณของ V_2O_5 และ Al ที่ได้จากการคำนวณสมการ $3V_2O_5 + 10Al = 5Al_2O_3 + 6V$ จะมีค่าเป็น 2 ต่อ 1 เท่า จึงเริ่มทำการทดลองที่ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมเป็น 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก็เนื่องจากว่าในระหว่างการทดลองจะมีอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกลายเป็น อะลูมิเนียมออกไซด์อย่างรวดเร็วในขณะที่ใส่ลงในบอแรกซ์หลอมเหลว ทำให้สูญเสียอะลูมิเนียม ในระหว่างการเติม จึงควรเติมอะลูมิเนียมในปริมาณที่มากกว่าที่คำนวณได้ โดยความหนาของชั้น เคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนามากกว่า การใช้อะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณอะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้ชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่หนากว่าการใช้อะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการ เคลือบผิวเท่ากัน

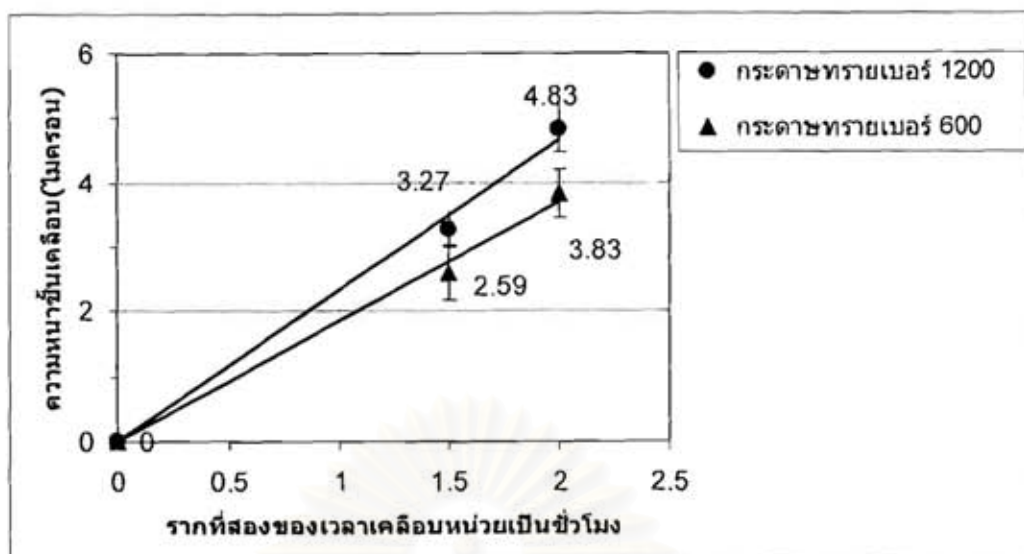
4.2.1 ผลของการใช้वानเดียมแทนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ อะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์จะหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาเคลือบจาก 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 4 ชั่วโมง แต่ที่เวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที จะได้รับความหนาของชั้นเคลือบน้อยกว่า เนื่องจากว่า ในระหว่างการทดลองจะมีอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์อย่างรวดเร็วในขณะที่ใส่ลงในบอแรกซ์หลอมเหลว ทำให้สูญเสียอะลูมิเนียมในระหว่างการเติม ความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่เวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที จึงได้รับความหนาของชั้นเคลือบน้อยกว่าเวลาอื่น เพราะฉะนั้นจึงหวั่นใจในการใส่อะลูมิเนียมและการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว จึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการทำให้อะลูมิเนียมละลายในบอแรกซ์หลอมเหลว เพื่อให้เกิดชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ โดยชิ้นงานด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จะมีความหนาของชั้นเคลือบใกล้เคียงหรือน้อยกว่าด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เพียงเล็กน้อย โดยด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จะได้รับความหนาของชั้นเคลือบ 2.59, 3.83 และ 1.53 ไมครอนตามลำดับ และด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 จะได้รับความหนาของชั้นเคลือบ 3.27, 4.83 และ 1.57 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบ ซึ่งชั้นเคลือบจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาในการเคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยความหนาของชั้นเคลือบจะหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนในเนื้อชิ้นงานมา รวมตัวกับธาตุวานเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวเกิดเป็นชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า แสดงด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง 15 นาที (ข) 4 ชั่วโมง และด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เคลือบผิวเป็นเวลา (ค) 2 ชั่วโมง 15 นาที (ง) 4 ชั่วโมง

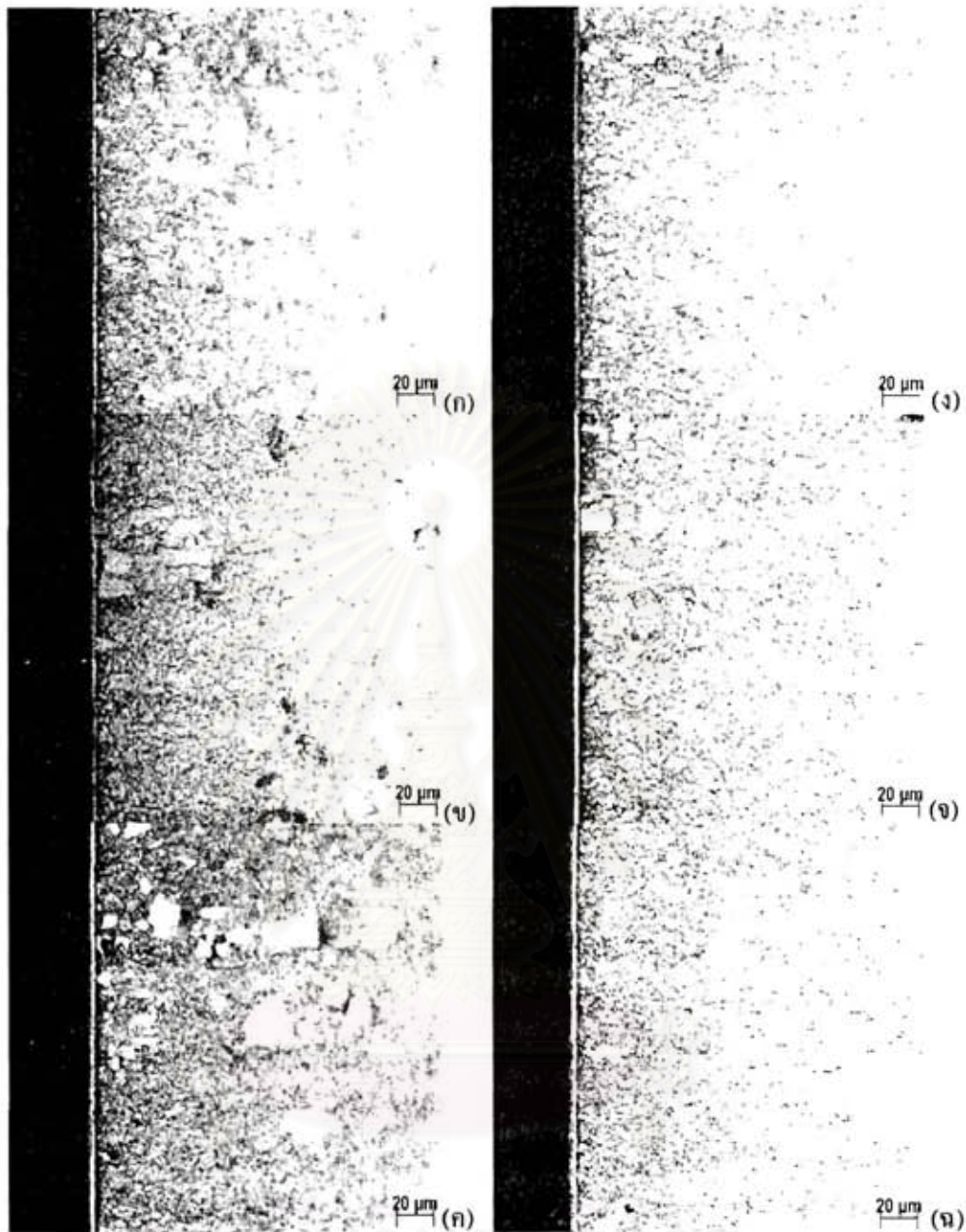
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



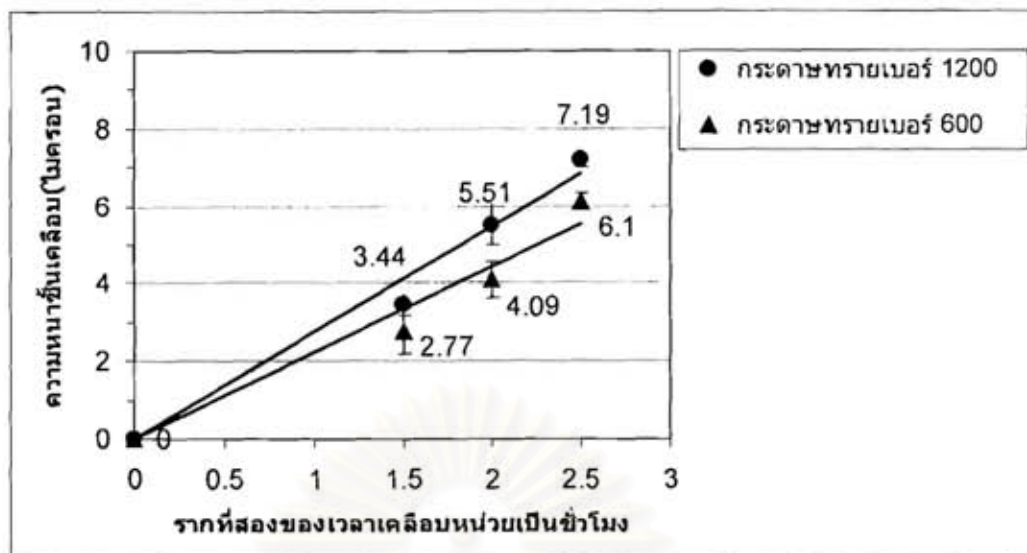
รูปที่ 4.6 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V_2O_5 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C

4.2.2 ผลของการใช้วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ อะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์จะหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาเคลือบจาก 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 6 ชั่วโมง 15 นาที โดยชิ้นงานด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จะมีความหนาของชั้นเคลือบใกล้เคียงหรือน้อยกว่าด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เพียงเล็กน้อย โดยด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จะได้ความหนาของชั้นเคลือบ 2.77, 4.09 และ 6.10 ไมครอนตามลำดับ และด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 จะได้ความหนาของชั้นเคลือบ 3.44, 5.51 และ 7.19 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบ และชั้นเคลือบจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาในการเคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยความหนาของชั้นเคลือบจะหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนในเนื้อชิ้นงานมา รวมถึงกับธาตุวานเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวเกิดเป็นชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า แสดงด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง 15 นาที (ข) 4 ชั่วโมง และ (ค) 6 ชั่วโมง 15 นาที และด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เคลือบผิวเป็นเวลา (ง) 2 ชั่วโมง 15 นาที (จ) 4 ชั่วโมง และ (ฉ) 6 ชั่วโมง 15 นาที



รูปที่ 4.8 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C

4.2.3 ผลของการใช้วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ อะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

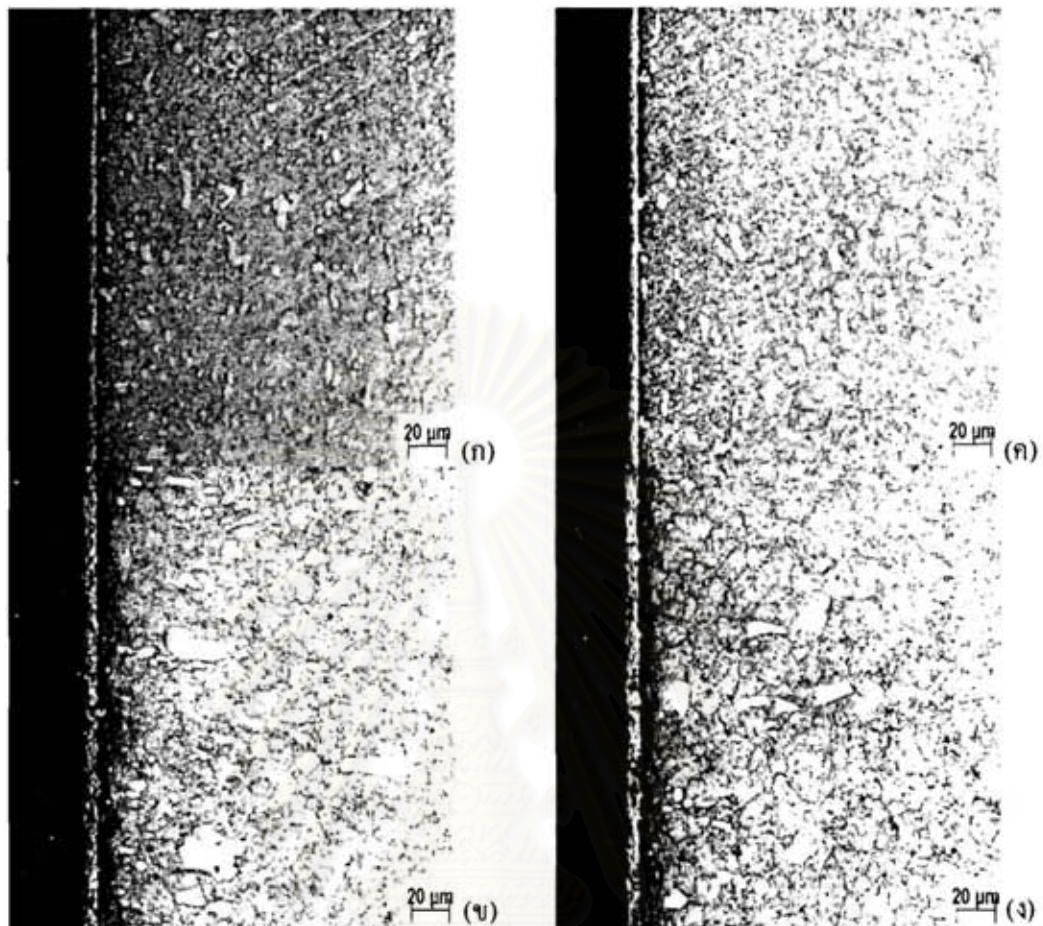
ความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์จะหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาเคลือบจาก 2 ชั่วโมง 15 นาที ถึง 4 ชั่วโมง แต่ที่เวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที จะได้ความหนาของชั้นเคลือบน้อยกว่า เนื่องจากว่า ในระหว่างการทดลองจะมีอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์อย่างรวดเร็วในขณะที่ใส่ลงในบอแรกซ์หลอมเหลว ทำให้สูญเสียอะลูมิเนียมในระหว่างการเติม ความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่เวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที จึงได้ความหนาของชั้นเคลือบน้อยกว่าเวลาอื่น เพราะฉะนั้นจึงหะในการใส่อะลูมิเนียมและการบอแรกซ์หลอมเหลว จึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำให้อะลูมิเนียมละลายในบอแรกซ์หลอมเหลว เพื่อให้เกิดชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ โดยชิ้นงานด้านที่ขัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 600 จะมีความหนาของชั้นเคลือบใกล้เคียงหรือน้อยกว่าด้านที่ขัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 1200 เพียงเล็กน้อย โดยด้านที่ขัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 600 จะได้ความหนาของชั้นเคลือบ 5.00, 8.82 และ 5.56 ไมครอนตามลำดับ และด้านที่ขัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 1200 จะได้ความหนาของชั้นเคลือบ 5.82, 10.02 และ 6.4 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบ ซึ่งชั้นเคลือบจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่สองของเวลาในการเคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยความหนาของชั้นเคลือบจะหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนในเนื้อชิ้นงานมา

รวมตัวกับธาตุวาเนเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวเกิดเป็นชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน

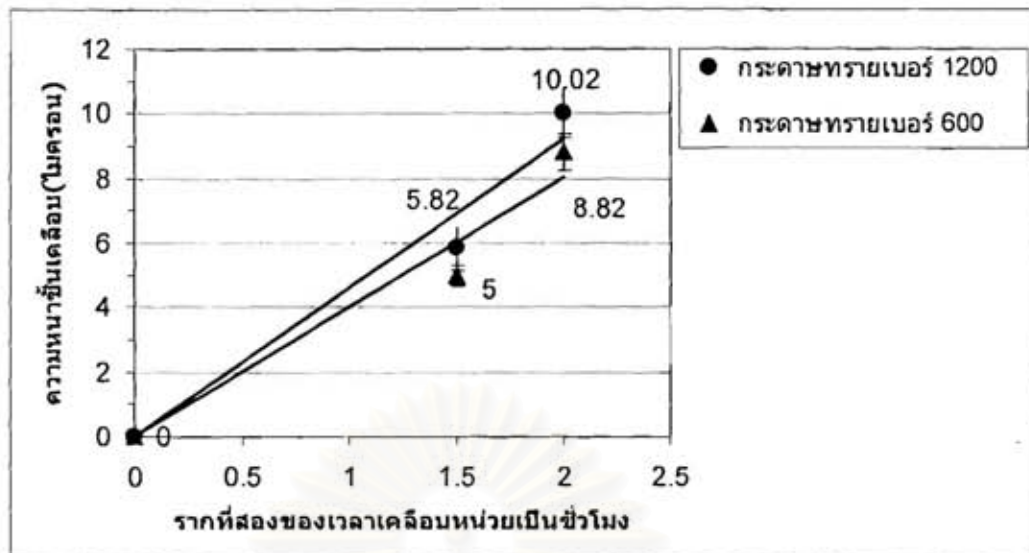
อย่างไรก็ตามกรณีที่ใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาในการทดลอง 6 ชั่วโมง 15 นาที โดยทำการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใส่สารจาก $850^{\circ}C$ เป็น $900^{\circ}C$ ปรากฏว่าชั้นเคลือบที่ได้กลายเป็นชั้นของเหล็กบอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ได้รับความหนาประมาณ 40 ถึง 70 ไมครอน ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่วาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ละลายได้น้อยในบอแรกซ์หลอมเหลวทำให้อะลูมิเนียมปรีดิคซ์โบรอนออกไซด์แทน หรือจังหวะในการใส่อะลูมิเนียมที่ทำให้อะลูมิเนียมปรีดิคซ์โบรอนออกไซด์ หรืออุณหภูมิที่ใส่สาร ที่ทำให้อะลูมิเนียมปรีดิคซ์โบรอนออกไซด์ได้มากกว่าวาเนเดียมเพนทอกไซด์ ทำให้เกิดเป็นอะตอมโบรอนจำนวนมาก ซึ่งอะตอมโบรอนจะละลายอยู่ในบอแรกซ์หลอมเหลว ทำให้อะตอมโบรอนที่มีขนาดเล็กแพร่ซึมเข้าไปในชิ้นงานและรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นชั้นเหล็กบอไรด์ชั้นที่ผิวของชิ้นงาน [2]

ในกรณีของการใช้อะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาในการทดลอง 6 ชั่วโมง 15 นาที ใส่สารที่อุณหภูมิ $850^{\circ}C$ โดยใช้ปริมาณรวมของบอแรกซ์, วาเนเดียมเพนทอกไซด์และอะลูมิเนียม ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ปรากฏว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นทั้งชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์และชั้นเหล็กบอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่วาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ละลายได้น้อยในบอแรกซ์หลอมเหลวทำให้อะลูมิเนียมปรีดิคซ์โบรอนออกไซด์ หรือจังหวะในการใส่อะลูมิเนียมที่ทำให้อะลูมิเนียมปรีดิคซ์โบรอนออกไซด์ หรือปริมาณของสารที่เพิ่มขึ้น ทำให้อะลูมิเนียมปรีดิคซ์ทั้ง V_2O_5 และ B_2O_3 ทำให้พบชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์และชั้นเหล็กบอไรด์ ด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จะพบชั้นบอไรด์เพียงอย่างเดียว แต่ด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 จะพบชั้นบอไรด์และชั้นคาร์ไบด์บ้าง ในบริเวณด้านล่างของชิ้นงานที่ติดอยู่กับด้านล่างของเบ้าที่ใช้ทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



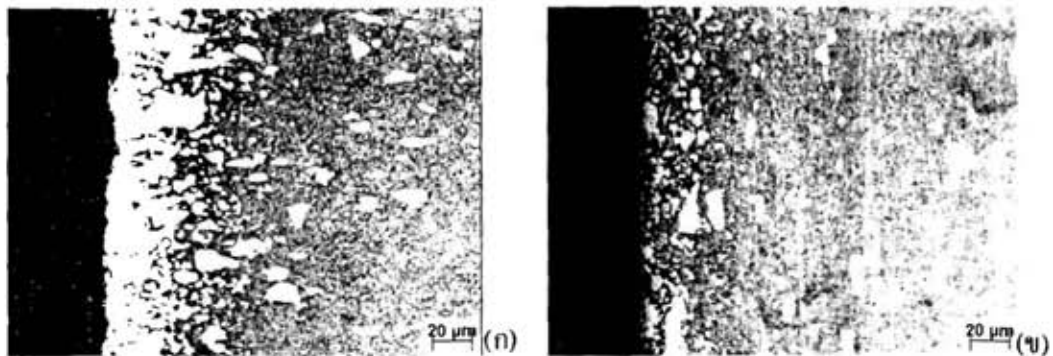
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V_2O_5 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า แสดงด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง 15 นาที (ข) 4 ชั่วโมง และด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เคลือบผิวเป็นเวลา (ค) 2 ชั่วโมง 15 นาที (ง) 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V_2O_5 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ 1000°C



รูปที่ 4.11 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการใช้ V_2O_5 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) โดยใช้อุณหภูมิในการใส่สารที่ 900°C ที่กำลังขา 200 เท่า



รูปที่ 4.12 ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่ได้จากการใช้ V_2O_5 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเช่น DC 53 (Modified SKD 11) ใ้สารที่อุณหภูมิ 850°C (ก) ด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 (ข) ด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200

ตารางที่ 4.1 ได้แสดงค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ของวานาเดียมไดออกไซด์ (V_2O_5) และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) จะพบว่า V_2O_5 จะมีเสถียรภาพต่ำกว่า B_2O_3 และในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการใ้สารเพื่อที่จะทำให้อะลูมิเนียมไปทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์วานาเดียมเพนทอกไซด์ ที่ 850°C , 900°C และ 1000°C จะพบว่าที่อุณหภูมิ 850°C จะมีค่าพลังงานอิสระต่ำที่สุด

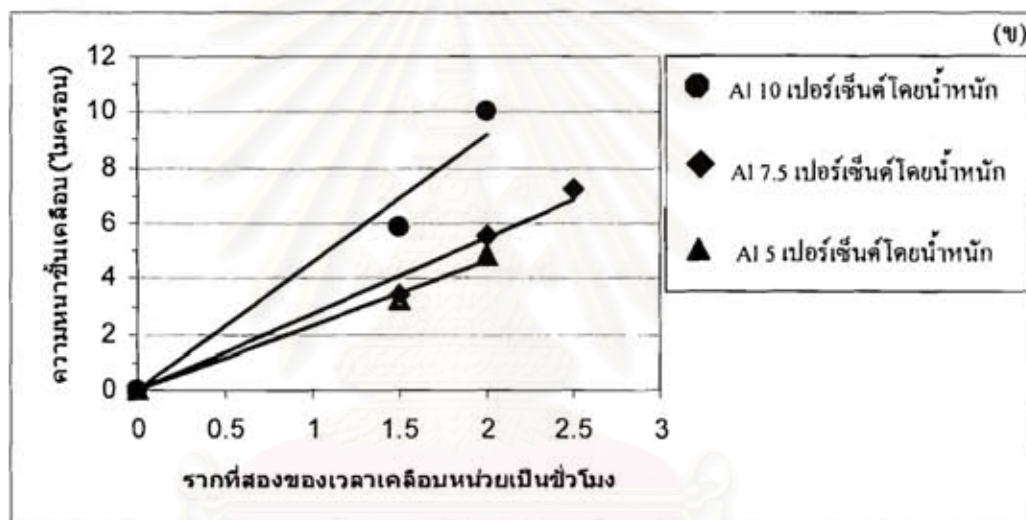
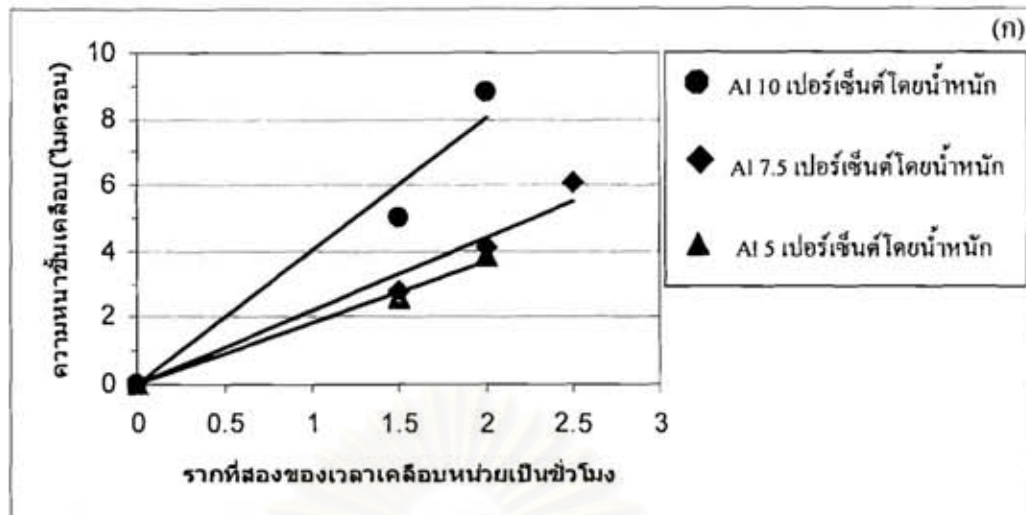
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ของวานาเดียมไดออกไซด์ (V_2O_5), โบรอนออกไซด์ (B_2O_3)

Reaction	Gibbs free energy change of reaction, ΔG° (kcal)	
	$4/3V_{(s)} + O_{2(g)} = 2/3V_2O_{5(s)}$	$4/3B_{(s)} + O_{2(g)} = 2/3B_2O_{3(s)}$
Temperature		
1173K(900°C)	-146.76	-156.02
1273K(1000°C)	-143.02	-152.56

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพลังงานอิสระในการรีดิวซ์วานาเดียมเพนทอกไซด์ของอะลูมิเนียม

Temperature	Reaction	Gibbs free energy change of reaction, ΔG° (kcal)
	$3V_2O_5 + 10Al = 5Al_2O_3 + 6V$	
1123K(850°C)		-800.23
1173K(900°C)		-791.76
1273K(1000°C)		-775.6

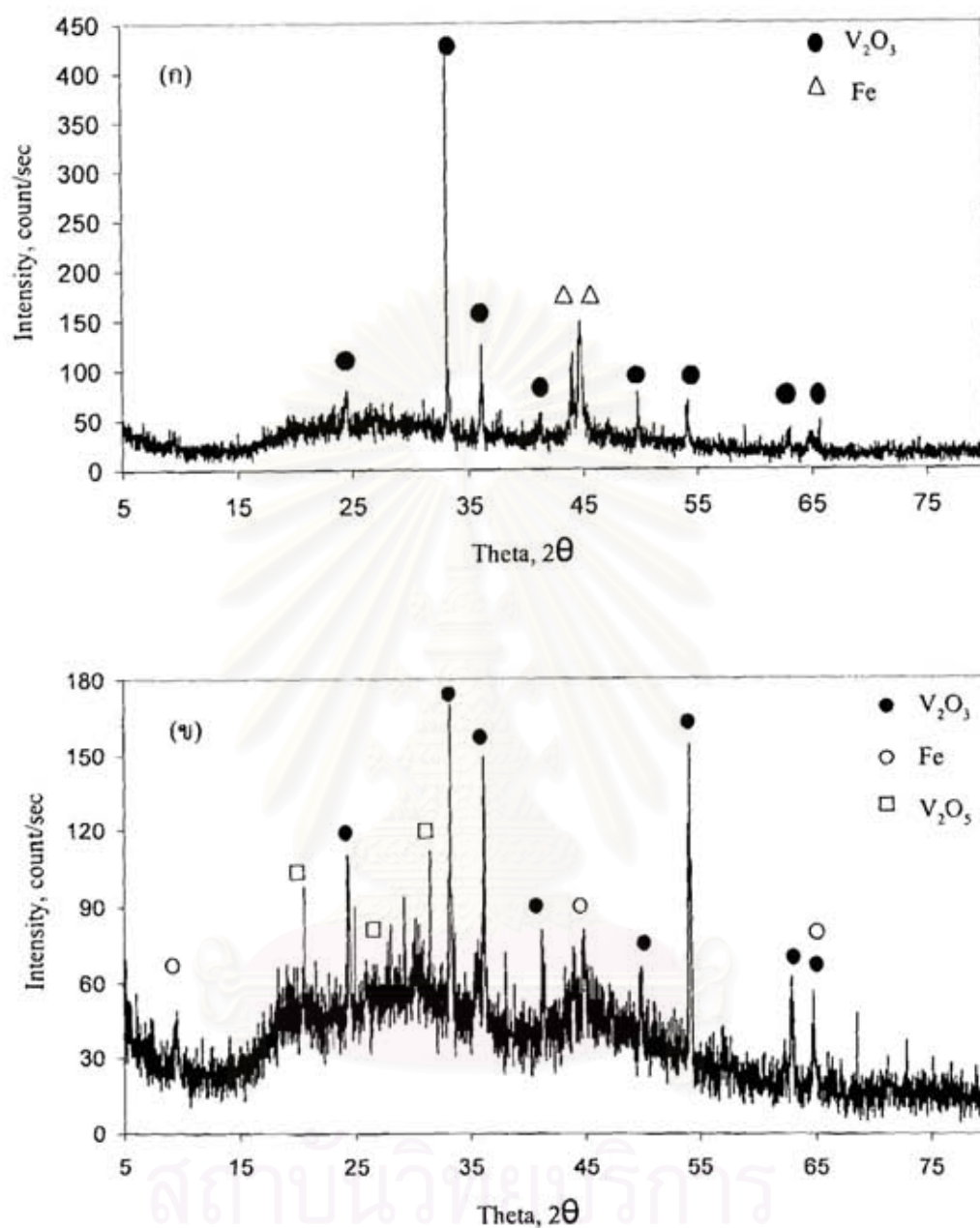
ความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จะหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นตัวรีดิวซ์ เนื่องจากว่าปริมาณของอะลูมิเนียมจะละลายในบอแรกซ์หลอมเหลวได้มากตามปริมาณของอะลูมิเนียม ทำให้อะลูมิเนียมไปรีดิวซ์วานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ให้เกิดเป็นวานาเดียมไดรอกไซด์ (V_2O_3) ได้มากกว่าทำให้ได้ชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่หนาเพิ่มขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้ความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนามากกว่าการใช้อะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณอะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่หนากว่าการใช้อะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการเคลือบผิวเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.13 (ก) แสดงด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และรูปที่ 4.13 (ข) แสดงด้านที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200



รูปที่ 4.13 ความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการใช้ V_2O_5 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 (Modified SKD 11) ที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$ (ก) ชิ้นงานที่ซัดด้วยกระแสทรายเบอร์ 600 (ข) ชิ้นงานที่ซัดด้วยกระแสทรายเบอร์ 1200

โดยเมื่อทำการตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวด้วย X-ray Diffractometer ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่า รูปที่ 4.14 (ก) กรณีใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงผลการตรวจสอบพบว่ามีพีคของสารประกอบ V_2O_5 ปริมาณมากโดยเห็นได้จากค่าความเข้มสัมพัทธ์ของ V_2O_5 จะมีค่าสูงที่สุด และจากการตรวจสอบยังพบพีคของเหล็กละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์เล็กน้อย อีกทั้งยังไม่พบพีคของสารประกอบ V_2O_5 ในสารละลายบอแรกซ์ แสดงให้เห็นว่าในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวจะมีสารประกอบ V_2O_5 ละลายอยู่อย่างอึดตัว ทำให้สามารถเกิดขึ้นเกลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ที่ผิวของชิ้นงาน หากพิจารณารูปที่ 4.14 (ข) กรณีใช้ V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบพีคของสารประกอบ V_2O_5 และพีคของสารประกอบ V_2O_5 นอกจากนั้นยังพบพีคของเหล็กละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์เล็กน้อย ซึ่งถ้าหากพิจารณาจะพบว่าในบอแรกซ์หลอมเหลวจะมีสารประกอบของ V_2O_5 เกิดขึ้นมาก โดยจะเห็นได้จากค่าความเข้มสัมพัทธ์ของพีค V_2O_5 ที่มีค่าอยู่สูง ทำให้มีสารประกอบ V_2O_5 ละลายอยู่อย่างไม่อึดตัว ซึ่งสารประกอบที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดชั้นเกลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์คือสารประกอบ V_2O_5 [2] หากมีสารประกอบ V_2O_5 มากเกินไปอาจทำให้ความหนาของชั้นเคลือบที่ได้บางลง ซึ่งสาเหตุที่มีสารประกอบ V_2O_5 เหลืออยู่มาก อาจเกิดจากปริมาณของอะลูมิเนียมซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ ขณะที่ใส่อะลูมิเนียมอาจจะมีอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ทำให้สูญเสียอะลูมิเนียมในระหว่างการเติม ส่งผลให้อะลูมิเนียมละลายในบอแรกซ์หลอมเหลวได้น้อยลง ทำให้อะลูมิเนียมไปรีดิวซ์สารประกอบ V_2O_5 ให้เปลี่ยนเป็น V_2O ได้น้อยลง

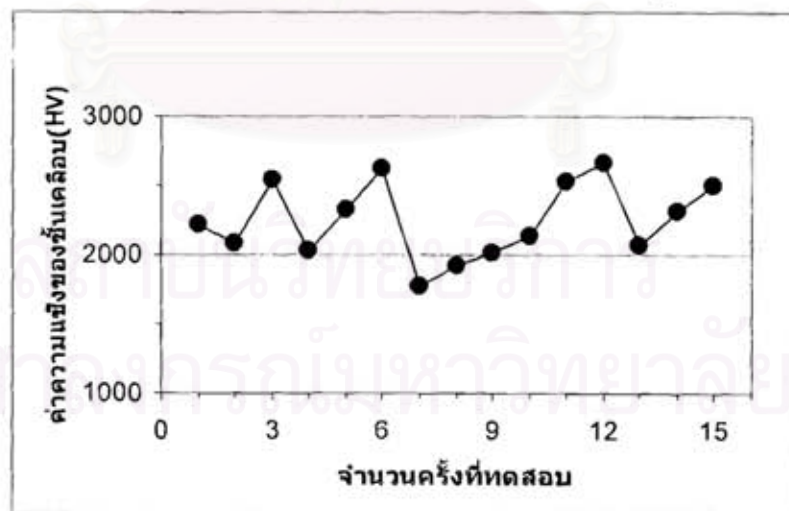
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



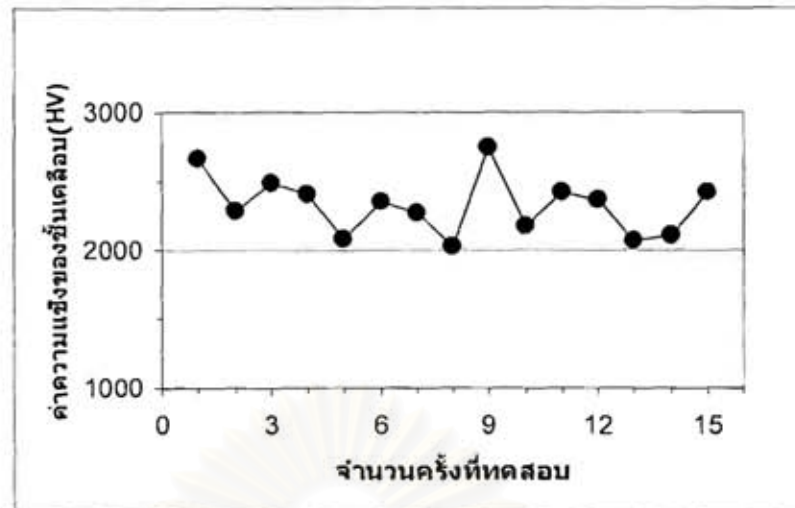
รูปที่ 4.14 ผลการตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวด้วย X-ray Diffractometer (ก) V_2O_3 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ข) V_2O_3 , 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบ

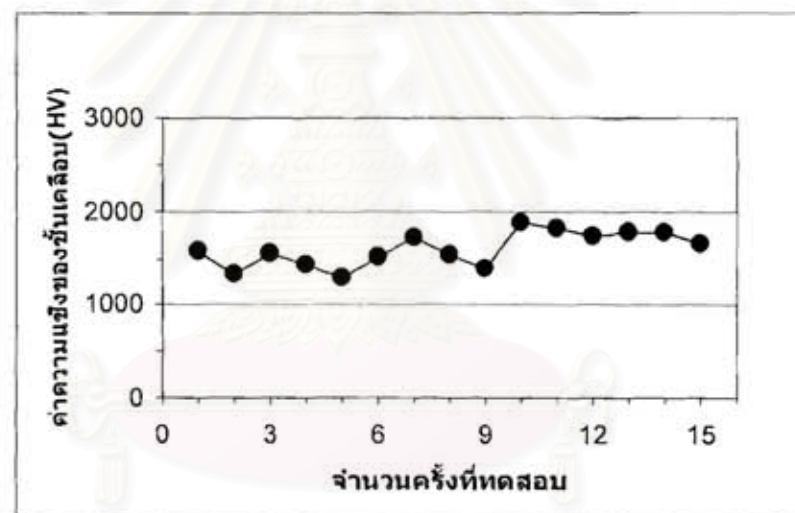
ค่าความแข็งของชั้นเคลือบหามาได้โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว มาตัดตามภาคตัดขวาง 1/4 ของชิ้นงานโดยประมาณและอัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทำการวิเคราะห์ วัดชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระดาษทราย และขัดเงาด้วยผงอะลูมินาแล้วจึงกัดผิวด้วยน้ำยา Hydrochloric Ferric Chloride จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดความแข็งของชั้นเคลือบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro-Vickers Hardness Testing Machine) โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งได้ทำการวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบจำนวนทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง คือ (1.) ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 2252HV0.025 (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน=236.14) ดังแสดงในรูปที่ 4.15, (2.) ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V₂O₅ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 2302HV0.025 (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน=201.48) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ(3.) ชิ้นงานที่เกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม V₂O₅ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 1660HV0.025 (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน=158.7) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อนำค่าความแข็งของชั้นเคลือบทั้งหมดที่ได้มาเปรียบเทียบกับกันก็จะพบว่าค่าความแข็งของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการใช้ Fe-V และ V₂O₅ มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันและมีค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่มากกว่าชั้นเคลือบของเหล็กบอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก Fe-V 15เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

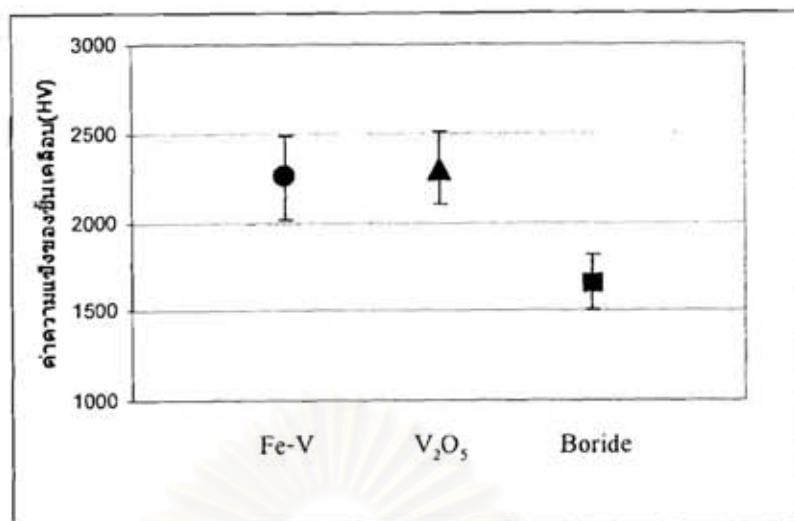


รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งของขั้วเคลือบที่ได้จาก V_2O_5 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งของขั้วเคลือบที่ได้จากชั้นเหล็กบอไรด์ โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการใช้ Fe-V, V₂O₅ และชั้นเหล็กบอไรด์ โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการทดลอง

ความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเคลือบผิวที่เพิ่มมากขึ้น และยังเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่ 2 ของเวลาในการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.6, 4.8 และ 4.10 โดยความหนาของชั้นเคลือบจะหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนในเนื้อชิ้นงานรวมทั้งธาตุวานเดียมในขอบแรกซ์หลอมเหลวเกิดเป็นชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน แสดงว่าการเพิ่มความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์เป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ซึม (diffusion control) โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) จากการทดลองได้จากการคำนวณค่าความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง ความหนาชั้นเคลือบกับรากที่ 2 ของเวลาในการเคลือบผิว โดยค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่ผ่านจุด (0,0) สมการความชันของกราฟ (m) คือ $y = mx$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad K &= d^2/t \\ K^{1/2} &= d/t^{1/2} = \text{ความชันของกราฟ} \\ K &= (\text{ความชันของกราฟ})^2 \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการทดลองการเคลือบผิวด้วยวานเดียมคาร์ไบด์ แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการทดลอง

การทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม(K) ($\text{cm}^2/\text{sec} \times 10^{-7}$)
กรณี Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 600 ($y = 3.168 x$)	2.79
กรณี Fe-V 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 1200 ($y = 3.332 x$)	3.08
กรณี V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 600 ($y = 1.8472 x$)	0.95
กรณี V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 1200 ($y = 2.3304 x$)	1.51
กรณี V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 600 ($y = 2.2068 x$)	1.35
กรณี V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 1200 ($y = 2.7324 x$)	2.07
กรณี V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 600 ($y = 4.0224 x$)	4.49
กรณี V_2O_5 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ Al 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้านที่ซัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 1200 ($y = 4.6032 x$)	5.89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 ด้วยวานเนเดียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการทีอาร์ดี โดยใช้เฟอร์โรวานเนเดียมและวานเนเดียมเพนทอกไซด์เป็นสารที่ให้ธาตุวานเนเดียม และใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวรีดิวซ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สามารถเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC 53 เป็นชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ได้ด้วยกระบวนการทีอาร์ดี ที่อุณหภูมิ 1000°C โดยใช้เฟอร์โรวานเนเดียมหรือวานเนเดียมเพนทอกไซด์กับอะลูมิเนียม โดยความหนาชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นตามเวลาเคลือบโดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับรากที่ 2 ของเวลาเคลือบที่มีหน่วยเป็นชั่วโมง

5.2 กรณีใช้เฟอร์โรวานเนเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงผลเป็น 3 กรณี คือ 1. เกิดชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ 2. เกิดชั้นเหล็กบอไรด์ 3. ไม่เกิดชั้นเคลือบใดๆ

กรณีเกิดชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ เนื่องจากเฟอร์โรวานเนเดียมอาจจะละลายอยู่ในรูปของวานเนเดียมไดรอกไซด์ (V_2O_5) จึงฟอร์มชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์บนผิวชิ้นงาน

กรณีเกิดชั้นเหล็กบอไรด์ มีสาเหตุจากการเก็บผงเฟอร์โรวานเนเดียมไว้นานเกินไป จนอาจเกิดออกไซด์กับเหล็ก ทำให้ขัดขวางไม่ให้วานเนเดียมละลายในบอแรกซ์หลอมเหลว อะลูมิเนียมที่ใส่ลงในบอแรกซ์หลอมเหลวจึงปรีดิวิซ์โบรอนออกไซด์จนเกิดชั้นเหล็กบอไรด์

กรณีไม่เกิดชั้นเคลือบ สาเหตุอาจมาจากไม่เกิด V_2O_5 ในบอแรกซ์ และสูญเสียอะลูมิเนียมระหว่างการเติมลงในบอแรกซ์

5.3 กรณีใช้วานเนเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับแปรผันปริมาณอะลูมิเนียม 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณของอะลูมิเนียมมีอิทธิพลต่อความหนาชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ การเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ชั้นเคลือบหนากว่าการเติมอะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการเติมอะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ชั้นเคลือบหนากว่าการเติมอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาในการเคลือบผิวเท่ากัน อย่างไรก็ตามการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีโอกาสก่อให้เกิดชั้นเหล็กบอไรด์

5.4 ความแข็งของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการใช้เฟอร์โรวานเดียมและวานเดียมเพนทอกไซด์ มีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน มีค่าความแข็ง 2252HV และ 2302HV ตามลำดับ และแข็งกว่าชั้นเคลือบอโรไซด์ ซึ่งมีค่าความแข็ง 1660HV



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1.] T. Arai and S. Harper. Thermoreactive Deposition/Diffusion Process. ASM Handbook, Vol. 4 1994 : 448-453.
- [2.] H.C. Child, S.A. Plumb and J.J. McDermott. Carbide layer formation on steel in fused borax baths. Proceeding of Heat Treatment' 84, Part 5.1. London England : 1984
- [3.] S.B. Fazluddin and A. Koursaris. Formation of VC Coating on Steel Substrates in Molten Borax. Surface Modification Technologies VI, 1993 : 45-60.
- [4.] T. Arai. Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan. Heat Treating, Vol. 1 No. 2. 1981 : 15-22.
- [5.] ประสงค์ ศรีเจริญชัย, ศิริรัตน์ สมพันธ์ และปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์. การปรับปรุงพื้นผิวแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการที่ดี. วารสาร MTEC ฉบับ เมษายน-มิถุนายน 2540 : หน้า 12-16.
- [6.] สุรพล พรนิมิตรธรรม. การเคลือบผิวเหล็กกล้าด้วยไนโอเบียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการที่ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [7.] ชัยวัฒน์ จงประสิทธิผล. ผลของปริมาณวานาเดียมที่ละลายในบอแรกซ์หลอมเหลวต่อการเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการที่ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [8.] ประชญา ทิตอร่าม. ผลของรีดิวเซอร์และวิธีการเติมเฟอร์โรวานาเดียม ต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ โดยกระบวนการที่ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก เฟอร์โรวาเนเดียม 15 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 600	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 1200	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 600	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 1200	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 600	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 1200
1	5.26	5.07	6.53	7.11	7.93	7.89
2	5.23	5.12	6.8	7.02	7.61	8
3	5.38	5.25	6.34	6.9	7.77	7.54
4	5.21	5.36	6.06	7.17	7.52	7.63
5	5.02	5.12	6.45	7.32	7.77	7.62
6	5.08	5.6	6.52	7.37	7.42	7.46
7	4.56	5.27	6.61	6.83	7.77	7.63
8	4.7	5.59	6.27	6.86	7.73	7.95
9	5.39	5.12	6.02	7.13	7.76	7.78
10	5.34	5.32	6.8	7.08	7.53	7.89
11	5.12	5.21	6.83	7.12	7.78	7.92
12	4.62	5.33	6.34	7.17	7.91	7.87
13	4.36	5.07	6.41	7.29	7.77	7.92
14	4.45	5.06	6.32	7.22	7.89	7.77
15	4.61	5.21	6.23	7.14	7.5	7.62
16	4.65	5.67	6.54	7.23	7.54	7.77
17	4.79	5.73	6.8	7.22	7.63	7.73
18	4.78	5.59	6.22	7.46	7.62	7.76
19	4.78	5.32	6.8	7.33	7.46	7.93
20	4.65	5.7	6.97	7.14	7.63	7.78
21	4.68	5.38	6.5	7.14	7.95	7.83
22	4.99	5.3	6.32	7.01	7.78	7.74

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก เฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200
23	4.98	5.34	6.5	6.72	7.89	7.94
24	4.91	5.32	6.51	6.88	7.52	7.91
25	4.96	5.2	6.77	7.01	7.68	7.86
26	4.86	5.11	6.7	7.19	7.65	7.88
27	4.86	5.11	6.34	6.74	7.49	7.86
28	4.93	5.21	6.33	6.98	7.65	7.79
29	5.2	5.32	6.41	7.21	7.52	7.9
30	4.75	5.22	6.45	6.9	7.89	7.73
31	4.75	5.23	6.53	7.2	7.89	7.68
32	4.98	5.39	6.82	7.12	8.03	7.93
ค่ามากที่สุด	5.39	5.73	6.97	7.46	8.03	8
ค่าน้อยสุด	4.36	5.06	6.02	6.72	7.42	7.46
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุด	4.9	5.3	6.5	7.1	7.7	7.8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.25	0.18	0.21	0.16	0.15	0.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วาเนเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200
1	2.36	3.42	4.04	4.35	1.72	1.24
2	2.23	3.45	3.85	5.28	1.55	1.51
3	2.65	3.65	4.04	5.63	1.01	1.39
4	2.67	3.65	4.04	5.23	2.3	1.24
5	3.11	3.58	4.51	4.9	1.86	2.02
6	2.86	3.33	3.42	4.83	2.17	2.05
7	2.49	3.38	3.89	4.65	1.69	1.32
8	2.29	3.63	3.48	4.56	1.86	1.37
9	2.36	3.26	4.22	4.66	1.55	1.24
10	2.65	3.44	3.89	4.65	1.55	1.55
11	1.95	3.58	4.31	4.55	1.5	1.64
12	1.37	3.51	4.18	4.65	2	2.03
13	1.92	3.31	4.36	4.36	1.63	1.74
14	2.8	3.24	3.27	4.23	1.07	1.55
15	2.8	3.51	3.21	5.36	1.86	1.35
16	2.01	3.69	3.73	4.23	1.55	1.86
17	3.26	3.51	3.56	4.62	1.37	1.55
18	3.11	3.38	4.35	4.51	1.36	1.75
19	2.94	3.01	4.63	5.21	1.38	1.76
20	3.42	3.46	4.16	5.03	1.24	1.97
21	2.32	3.13	3.57	4.48	1.55	1.55
22	2.32	2.84	3.9	4.22	1.11	1.55
23	2.31	3.01	3.28	4.86	1.55	1.38

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ความหนาแน่นเกลือวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วานาเดียมเพนทอกไซด์ 10

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 600	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 1200	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 600	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 1200	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 600	ด้านซัดกระดาด ทรายเบอร์ 1200
24	2.05	2.86	3.73	5.23	1.35	1.73
25	2.32	2.95	3.89	5.16	1.24	1.24
26	2.31	2.86	3.66	5.37	1.36	1.55
27	2.96	2.96	3.91	5.13	1.44	1.2
28	2.36	2.86	3.91	5.12	1.55	1.55
29	2.42	3.06	2.65	5.03	1.55	1.55
30	3.24	3.07	3.11	4.86	1.56	1.64
31	3.21	3.07	3.65	4.53	1.53	1.72
32	3.43	2.98	3.82	5.34	1.25	1.63
ค่ามากที่สุด	3.43	3.69	4.63	5.63	2.3	2.05
ค่าน้อยสุด	1.37	2.84	2.65	4.22	1.01	1.2
ค่าเฉลี่ยที่ตัด ค่ามากที่สุดและ ค่าน้อยสุด	2.59	3.27	3.83	4.83	1.53	1.57
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.42	0.26	0.56	0.36	0.25	0.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200
1	2.43	2.95	3.95	5.11	5.97	7.21
2	2.97	3.41	4.12	5.02	5.65	7.32
3	3.73	3.42	4.23	5.23	5.9	6.98
4	3.56	3.42	4.68	5.32	5.92	7.47
5	3.11	3.55	4.55	5.13	5.55	7.32
6	3.11	3.83	4.45	5	5.62	7.37
7	3.31	3.75	4.62	4.35	6.12	6.83
8	3.42	3.81	4.21	4.98	5.91	6.86
9	3.44	3.94	3.94	4.66	5.89	7.13
10	3.6	3.11	3.56	5.14	6.05	7.28
11	3.42	3.74	3.64	4.97	6.1	7.22
12	3.57	3.73	4.03	5.32	6.14	7.37
13	3.41	3.84	4.83	5.59	5.93	7.29
14	3.71	3.58	4.88	6.04	6	7.22
15	2.95	3.2	3.2	5.98	6.11	7.34
16	2.14	3.53	3.73	5.9	6.14	7.23
17	1.86	3.11	3.11	6.64	6.32	7.22
18	2.8	3.42	3.42	6.83	6.22	7.62
19	2.57	3.31	3.49	6.21	6.51	7.33
20	2.27	2.94	3.94	6.33	6.86	7.14
21	2.21	2.34	4.44	6.11	6.5	7.14
22	2.21	2.97	4.32	6.2	6.32	7.01
23	2.29	3.49	4.26	6.08	6.5	6.72

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ความหนาแน่นเกลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วานเดียมเพนทอกไซด์ 10
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็น ไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200
24	2.19	3.65	4.19	5.26	6.11	6.88
25	2.09	3.73	3.73	5.28	6.07	7.01
26	1.97	3.61	4.11	5.12	6.18	7.19
27	2.45	3.52	5.07	4.97	6.14	7.42
28	2.36	3.41	5.1	5.72	6.13	7.42
29	2.55	3.3	4.46	5.71	6.08	7.21
30	2.66	3.23	3.73	5.12	6.15	6.9
31	2.23	3.45	3.59	5.52	6.03	7.3
32	2.01	3.32	3.4	5.56	6.1	7.22
ค่ามากที่สุด	3.73	3.94	5.1	6.83	6.86	7.62
ค่าน้อยสุด	1.86	2.34	3.11	4.35	5.89	6.72
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุด	2.77	3.44	4.09	5.51	6.08	7.19
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.57	0.26	0.48	0.51	0.23	0.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 ความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วาเนเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200
1	5.28	4.79	8.83	7.83	5.28	4.82
2	5.14	6.28	9.94	8.89	6.64	4.78
3	4.97	6.52	10.25	8.22	4.97	6.36
4	5.23	6.73	9.73	8.88	5.5	6.21
5	5.22	6.13	9.32	8.39	6.52	5.59
6	5.14	6.32	9.78	10.87	5.44	7
7	5.08	5.35	8.39	10.25	5.38	6.31
8	4.66	6.05	9.16	11.62	4.66	6.83
9	4.9	4.66	7.66	11.01	5.9	7.01
10	5.42	5.14	8.39	9.99	5.42	7.63
11	5.21	4.97	8.86	9.94	5.41	7.31
12	5.23	4.65	8.52	10.87	5.85	5.9
13	5.24	5.59	8.21	9.94	6.67	5.9
14	4.97	6.04	8.08	10.25	4.97	6.83
15	4.39	5.46	8.08	10.25	5.59	6.21
16	5.07	5.9	7.62	9.94	6.67	6.06
17	5.08	6.64	7.96	10.25	5.08	6.83
18	5.18	6.83	7.77	9.32	6.98	6.36
19	4.75	6.21	8.7	10.25	4.75	6.83
20	4.9	6.33	9.01	10.7	5.9	6.36
21	5.36	6.65	8.7	9.94	5.71	6.52
22	5.14	6.83	8.7	9.63	5.14	6.21
23	5.1	6.08	9.32	11.82	5.1	6.39

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก วานาเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หน่วยเป็น ไมครอน)

ครั้งที่	2 ชั่วโมง 15 นาที		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง 15 นาที	
	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 600	ด้านขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200
24	4.48	6.21	9.01	11.01	4.48	6.7
25	4.51	5.28	9.01	10.08	4.51	6.96
26	4.41	7.03	9.12	10.1	5.41	5.9
27	4.21	4.97	9.01	9.44	6.21	6.21
28	4.28	5.3	9.32	9.63	5.28	7.26
29	5.59	5.71	9.55	10.45	5.59	6.31
30	5.36	5.12	8.91	10.07	6.36	6.31
31	5.25	5.21	8.86	10.21	5.61	6.36
32	5.1	5.32	8.81	10.32	5.33	6.21
ค่ามากที่สุด	5.59	7.03	10.25	11.82	6.98	7.63
ค่าน้อยสุด	4.21	4.65	7.62	7.83	4.48	4.78
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุด	5.0	5.82	8.82	10.02	5.56	6.4
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.32	0.65	0.58	0.76	0.59	0.51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro vickers hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์เหมาะสำหรับทดสอบความแข็งชิ้นงานขนาดเล็กและบาง ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบผิว ฯลฯ

วิธีการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์กระทำได้โดยใช้แรงกดอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 kgf กดผ่านหัวกดที่ทำด้วยเพชรรูปปิรามิด มีฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุมรวมที่ปลายแหลมเท่ากับ 136° ไปที่ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 10 ถึง 15 วินาที จากนั้นปลดแรงกดออกแล้ววัดขนาดของรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าความแข็งจากสูตรคือ

$$\begin{aligned} HV &= 2F \sin(\phi/2) d^2 \\ &= 1.854F / d^2 \end{aligned}$$

- เมื่อ
- HV = vickers hardness
 - ϕ = มุมของหัวกด 136°
 - F = น้ำหนักหรือแรงที่ใช้ทดสอบ (kgf)
 - d = ค่าเฉลี่ยด้านทแยงมุมของรอยกด (ม.ม.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จากเฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
กับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

ครั้งที่ทดลอง	diagonals d1(μm)	diagonals d2(μm)	ค่าความแข็งของ ชั้นเคลือบ(HV)
1	4.38	4.78	2212
2	4.67	4.77	2079
3	4.34	4.21	2537
4	4.74	4.82	2025
5	4.36	4.59	2318
6	4.1	4.3	2628
7	4.84	5.37	1776
8	4.51	5.33	1916
9	4.32	5.27	2012
10	4.74	4.57	2135
11	4.23	4.33	2529
12	4.24	4.1	2664
13	4.68	4.78	2071
14	4.44	4.51	2315
15	4.28	4.33	2500
ค่ามากที่สุด	4.84	5.37	2664
ค่าน้อยสุด	4.1	4.1	1776
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุด และค่าน้อยสุด	4.46	4.66	2252
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.19	0.35	236.14

ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
กับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

ครั้งที่ทดลอง	diagonals d1(μm)	diagonals d2(μm)	ค่าความแข็งของ ชั้นเคลือบ(HV)
1	4.14	4.21	2660
2	4.43	4.57	2289
3	4.28	4.36	2486
4	4.34	4.43	2408
5	4.71	4.74	2077
6	4.26	4.63	2348
7	4.32	4.72	2270
8	4.73	4.82	2031
9	4.05	4.18	2737
10	4.72	4.52	2170
11	4.32	4.44	2419
12	4.45	4.4	2368
13	4.66	4.82	2066
14	4.56	4.82	2107
15	4.35	4.41	2419
ค่ามากที่สุด	4.73	4.82	2737
ค่าน้อยสุด	4.05	4.18	2031
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุด และค่าน้อยสุด	4.45	4.52	2302
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.2	0.19	201.48

ตารางที่ ข.3 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

ครั้งที่ทดลอง	diagonals d1(μm)	diagonals d2(μm)	ค่าความแข็งของ ชั้นเคลือบ(HV)
1	5.71	5.17	1566
2	6.59	5.21	1332
3	5.47	5.49	1543
4	5.54	5.83	1433
5	6.08	5.89	1293
6	5.5	5.61	1503
7	5.31	5.12	1706
8	5.42	5.56	1540
9	5.89	5.67	1389
10	5.14	4.81	1873
11	5.21	4.9	1816
12	5.37	4.96	1739
13	5.44	4.81	1765
14	5.24	4.99	1769
15	5.27	5.34	1646
ค่ามากที่สุด	6.59	5.89	1873
ค่าน้อยสุด	5.14	4.81	1293
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุด และค่าน้อยสุด	5.4	5.2	1660
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.24	0.33	158.7

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ผิวชั้นงานที่ได้จากการใช้เฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์
โดยนำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer
(ชั้นงานที่เกิดชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์)

File: E-624.DI 17-Aug-2005 19:54

Philips Analytical PC-APD, Diffraction Software

Sample identification: No.9
Data measured at: 16-Aug-2005 12:42:00

Diffractometer type: PW3710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 40
Generator current [mA]: 30
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54060
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: 1%
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: YES

Start angle [2θ]: 5.010
End angle [2θ]: 79.990
Step size [2θ]: 0.020
Maximum intensity: 372.4900
Time per step [s]: 1.000
Type of scan: CONTINUOUS

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 15

Angle [2θ]	d-value Å1 []	d-value Å2 []	Peak width [2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
11.215	7.8833	7.9027	0.060	123	20	33.1	3.1
28.640	3.1144	3.1220	0.120	9	4	2.4	1.0
33.000	2.7122	2.7188	0.060	20	4	5.4	3.7
35.170	2.5496	2.5559	0.080	372	4	100.0	3.6
35.860	2.5022	2.5083	0.060	18	4	5.0	0.7
41.695	2.1645	2.1698	0.060	6	2	1.7	1.6
44.625	2.0289	2.0339	0.400	108	2	29.0	11.0
50.465	1.8070	1.8114	0.060	8	1	2.3	3.6
52.575	1.7393	1.7436	0.120	3	1	0.7	0.8
65.000	1.4337	1.4372	0.640	9	1	2.4	1.9
67.880	1.3797	1.3831	0.060	10	1	2.6	3.4
70.050	1.3421	1.3454	0.060	44	0	11.7	1.6
74.400	1.2741	1.2772	0.060	31	1	8.4	2.0
76.590	1.2430	1.2461	0.060	259	0	69.6	1.4
78.775	1.2139	1.2169	0.060	26	0	7.0	2.0

ตารางที่ ๓.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ผลึกซึ่งงานที่ได้จากการใช้เฟอโรโรวานเนเดียม 15 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer
(ชิ้นงานที่ไม่เกิดชั้นเคลือบ)

File: E-623.DI 17-Aug-2005 19:54

Philips Analytical PC-APD, Diffraction Software

Sample identification: No.10
Data measured at: 16-Aug-2005 11:35:00

Diffractometer type: PW3710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 40
Generator current [mA]: 30
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54060
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: 1%
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: YES

Start angle [2θ]: 5.010
End angle [2θ]: 79.990
Step size [2θ]: 0.020
Maximum intensity: 234.0900
Time per step [s]: 1.000
Type of scan: CONTINUOUS

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 24

Angle [2θ]	d-value Å1 [Å]	d-value Å2 [Å]	Peak width [2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif
22.235	3.9949	4.0047	0.060	7	7	3.1	1.4
29.635	3.0120	3.0194	0.160	12	4	5.2	1.0
30.035	2.9728	2.9801	0.120	46	4	19.8	1.3
35.335	2.5381	2.5444	0.080	234	3	100.0	1.7
36.955	2.4305	2.4365	0.240	5	3	2.3	1.1
41.875	2.1556	2.1609	0.060	22	1	9.4	1.4
42.925	2.1053	2.1104	0.280	25	2	10.7	3.6
44.515	2.0337	2.0387	0.200	17	2	7.2	0.7
47.680	1.9058	1.9105	0.480	3	1	1.1	0.7
48.415	1.8786	1.8832	0.080	25	1	10.7	1.0
50.570	1.8035	1.8079	0.060	0	1	0.2	1.4
53.315	1.7169	1.7211	0.240	9	1	3.8	3.5
54.945	1.6698	1.6739	0.060	31	1	13.4	1.5
56.770	1.6203	1.6243	0.240	31	1	13.4	2.7
60.220	1.5355	1.5393	0.120	0	1	0.2	0.9
62.320	1.4887	1.4924	0.320	46	1	19.8	4.7
65.195	1.4298	1.4334	0.640	3	1	1.1	0.6
68.070	1.3763	1.3797	0.080	56	0	24.0	1.4
70.630	1.3325	1.3358	0.640	3	0	1.1	1.4
72.485	1.3029	1.3061	0.120	1	0	0.3	0.1
73.740	1.2838	1.2870	0.320	5	0	2.3	0.1
74.630	1.2707	1.2738	0.060	110	0	47.1	0.1
76.810	1.2400	1.2430	0.060	35	0	14.9	2.75
78.500	1.2175	1.2205	0.200	3	0	1.1	1.00

ตารางที่ ค.3 ผลการตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่ได้จากการใช้
 วานเนเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดย
 น้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer

File: E-649.DI 10-Jan-2006 21:0
 Philips Analytical PC-APD, Diffraction Software

Sample identification: No.A
 Data measured at: 10-Jan-2006 3:19:00

Diffractometer type: PW3710 BASED
 Tube anode: Cu
 Generator tension [kV]: 40
 Generator current [mA]: 30
 Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54060
 Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
 Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
 Divergence slit: 1%
 Receiving slit: 0.1
 Monochromator used: YES

Start angle [2θ]: 5.010
 End angle [2θ]: 79.990
 Step size [2θ]: 0.020
 Maximum intensity: 660.4900
 Time per step [s]: 1.000
 Type of scan: CONTINUOUS

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
 Minimum peak tip width: 0.00
 Maximum peak tip width: 1.00
 Peak base width: 2.00
 Minimum significance: 0.75
 Number of peaks: 28

Angle [2θ]	d-value Å1 [Å]	d-value Å2 [Å]	Peak width [2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif
5.110	17.2797	17.3222	0.040	357	18	54.1	12.2
7.915	11.1611	11.1886	0.120	28	18	4.3	0.8
9.435	9.3662	9.3892	0.080	166	18	25.2	1.9
15.905	5.5677	5.5814	0.060	154	22	23.3	0.9
20.230	4.3861	4.3969	0.060	660	38	100.0	1.7
24.540	3.6246	3.6335	0.060	202	44	30.5	1.1
28.890	3.0880	3.0956	0.120	34	45	5.1	1.9
33.190	2.6971	2.7037	0.060	388	37	58.8	1.2
36.130	2.4841	2.4902	0.060	94	32	14.2	0.8
37.535	2.3943	2.4001	0.080	250	31	37.8	1.8
41.195	2.1896	2.1950	0.240	15	28	2.3	1.6
43.965	2.0578	2.0629	0.200	44	27	6.6	0.9
44.760	2.0231	2.0281	0.280	117	27	17.7	4.9
46.155	1.9652	1.9700	0.060	25	26	3.8	2.5
47.160	1.9256	1.9303	0.160	18	26	2.8	1.5
49.785	1.8301	1.8346	0.040	50	24	7.6	0.7
52.655	1.7369	1.7411	0.060	104	23	15.8	0.8
54.110	1.6935	1.6977	0.160	38	22	5.8	1.0
59.110	1.5617	1.5655	0.060	15	18	2.3	1.1
62.955	1.4752	1.4788	0.320	16	16	2.4	1.2
63.425	1.4654	1.4690	0.060	213	15	32.3	1.0
64.805	1.4375	1.4410	0.320	15	15	2.3	0.8
67.770	1.3816	1.3850	0.040	396	14	60.0	18.31
69.895	1.3447	1.3480	0.060	5	13	0.7	1.16
71.385	1.3203	1.3235	0.480	6	12	0.9	1.19
73.850	1.2822	1.2853	0.960	5	12	0.7	0.84
76.380	1.2459	1.2490	0.320	11	12	1.6	0.92
78.550	1.2168	1.2198	0.060	408	12	61.8	1.33

ตารางที่ ค.4 ผลการตรวจวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่ได้จากการใช้
วานเดียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดย
น้ำหนัก ด้วย X-ray Diffractometer

File: E-621.DI 17-Aug-

Philips Analytical PC-APD, Diffraction Software

Sample identification: powder (V205)
Data measured at: 16-Aug-2005 9:11:00

Diffractometer type: PW3710 BASED
Tube anode: Cu
Generator tension [kV]: 40
Generator current [mA]: 30
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54060
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
Divergence slit: 1%
Receiving slit: 0.1
Monochromator used: YES

Start angle [2θ]: 5.010
End angle [2θ]: 79.990
Step size [2θ]: 0.020
Maximum intensity: 324.0000
Time per step [s]: 1.000
Type of scan: CONTINUOUS

Peak positions defined by: Top of smoothed peak
Minimum peak tip width: 0.00
Maximum peak tip width: 1.00
Peak base width: 2.00
Minimum significance: 0.75
Number of peaks: 25

Angle [2θ]	d-value Å1 [Å]	d-value Å2 [Å]	Peak width [2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif
5.375	16.4283	16.4687	0.320	10	31	3.2	1.9
9.430	9.3711	9.3942	0.240	13	24	4.0	1.1
18.655	4.7527	4.7644	0.960	11	37	3.4	0.9
20.400	4.3499	4.3606	0.240	18	40	5.7	0.9
24.365	3.6503	3.6592	0.160	52	48	16.0	1.6
25.930	3.4334	3.4418	0.240	12	50	3.6	0.8
27.030	3.2961	3.3042	0.060	324	53	100.0	1.0
30.220	2.9550	2.9623	0.640	13	53	4.0	1.2
33.190	2.6971	2.7037	0.120	121	48	37.3	2.2
35.500	2.5267	2.5329	0.400	21	44	6.5	1.2
36.115	2.4851	2.4912	0.060	94	42	29.0	2.1
41.190	2.1898	2.1952	0.120	37	38	11.5	1.9
43.895	2.0610	2.0660	0.240	25	40	7.7	1.3
44.820	2.0206	2.0255	0.240	30	40	9.3	2.1
46.695	1.9437	1.9485	0.060	59	41	18.3	1.1
49.770	1.8306	1.8351	0.200	22	37	6.8	1.0
53.265	1.7184	1.7226	0.240	7	30	2.1	0.7
54.050	1.6953	1.6995	0.120	125	28	38.7	2.6
54.205	1.6908	1.6950	0.060	83	28	25.6	0.9
57.065	1.6127	1.6166	0.320	9	22	2.8	0.9
62.870	1.4770	1.4806	0.160	37	18	11.5	1.6
64.165	1.4503	1.4538	0.060	112	18	34.7	0.8
64.740	1.4388	1.4423	0.160	30	17	9.3	1.03
67.185	1.3922	1.3957	0.240	6	14	1.9	0.76
70.725	1.3310	1.3343	0.060	306	16	94.5	1.65

ตารางที่ ๓.5 Reference pattern: 09-0387 Vanadium Oxide (V_2O_5)

Reference pattern: 09-0387

18-Aug-2005 01:10

 Name : Vanadium Oxide
 Name : Shcherbinaite, syn-
 Formula : V2O5
 Elements : O, V
 Groups : V2O5
 Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases, NBS patterns,
 Forensics, Educational patterns
 Pattern deleted: YES
 Radiation : Cu K α 1
 Wavelength : 1.54060

d value	Angle	Rel. Int.
5.7600	15.371	40
4.3800	20.258	100
4.0900	21.712	35
3.4800	25.577	8
3.4000	26.189	90
2.8800	31.027	65
2.7600	32.412	35
2.6870	33.318	16
2.6100	34.331	40
2.4920	36.011	8
2.4050	37.361	8
2.1850	41.286	18
2.1470	42.051	12
2.0420	44.324	4
1.9920	45.498	18
1.9190	47.332	25
1.9000	47.835	18
1.8640	48.818	14
1.8400	49.498	6
1.7780	51.347	4
1.7570	52.006	30
1.7400	52.553	14
1.6480	55.733	12
1.6320	56.328	8
1.5764	58.503	10
1.5640	59.013	12
1.5326	60.043	4
1.5149	61.126	18
1.5124	61.237	12
1.4925	62.144	18
1.4447	64.443	8
1.4421	64.573	6
1.4123	66.107	8
1.3801	67.856	6
1.3625	68.854	6

ตารางที่ ๓.6 Reference pattern: 26-0278 Vanadium Oxide (V_2O_5)

Reference pattern: 26-0278

17-Aug-20

 Name : Vanadium Oxide
 Name : Karelianite, syn
 Formula : V_2O_5
 Elements : O, V
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases
 Pattern deleted: YES

Radiation : Cu $K\alpha_1$
 Wavelength : 1.54060

d value	Angle	Rel. Int.
3.6500	24.367	60
2.7000	33.153	80
2.4700	36.343	60
2.3200	38.784	2
2.1800	41.385	20
2.0300	44.600	2
1.8300	49.787	25
1.6900	54.233	100
1.6100	57.168	2
1.5700	58.765	3
1.4700	63.204	25
1.4300	65.186	30
1.3300	70.735	10
1.2400	76.809	4
1.2200	78.306	2
1.1900	80.678	2
1.1700	82.352	6
1.1300	85.950	3
1.0900	89.934	6
1.0600	93.221	6

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 Reference pattern: 04-0787 Aluminum (Al)

Reference pattern: 04-0787

18-Aug-2005 01:12

 Name : Aluminum
 Name : Aluminum, syn [NR]
 Formula : Al
 Elements : Al
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases, NBS patterns,
 Forensics, Educational patterns
 Pattern deleted: NO

Radiation : Cu K α 1
 Wavelength : 1.54060

d value	Angle	Rel. Int.
2.3380	38.473	100
2.0240	44.740	47
1.4310	65.135	22
1.2210	78.230	24
1.1690	82.438	7
1.0124	99.081	2
0.9289	112.046	8
0.9055	116.574	8
0.8266	137.463	8

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 Reference pattern: 06-0696 Iron (Fe)

Reference pattern: 06-0696

12-Jan-2006 06:24

 Name : Iron
 Name : Iron, syn
 Formula : Fe
 Elements : Fe
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases, NBS patterns,
 Forensics, Educational patterns
 Pattern deleted: NO
 Radiation : Cu K α 1
 Wavelength : 1.54060

d value	Angle	Rel. Int.
2.0268	44.674	100
1.4332	65.023	20
1.1702	82.335	30
1.0134	98.949	10
0.9064	116.390	12
0.8275	137.144	6

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.9 Reference pattern: 23-0528 Sodium Oxide (Na_2O)

Reference pattern: 23-0528

24-May-2006 11:30

 Name : Sodium Oxide
 Formula : Na_2O
 Elements : O, Na
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Alloys, Common phases, NBS patterns, Forensics
 Pattern deleted: NO

Radiation : Cu K α 1
 Wavelength : 1.54060

d value	Angle	Rel. Int.
3.2100	27.769	33
2.7800	32.173	41
1.9660	46.134	100
1.6770	54.688	5
1.6050	57.363	7
1.3900	67.307	8
1.2750	74.336	1
1.2430	76.590	5
1.1350	85.481	9
0.9830	103.187	2
0.9267	112.450	1
0.8790	122.407	2

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 Reference pattern: 06-0634 Boron Oxide (B₂O₃)

Reference pattern: 06-0634

24-May-2006 11:30

 Name : Boron Oxide
 Formula : B₂O₃
 Elements : B, O
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Alloys, Common phases, Corrosion products
 Pattern deleted: NO

Radiation : Cu K α 1
 Wavelength : 1.54060

d value	Angle	Rel.Int.
3.7500	23.707	5
3.4200	26.033	50
2.7800	32.173	90
2.2300	40.416	70
2.1650	41.685	10
2.0960	43.124	100
1.9200	47.306	20
1.8720	48.596	5
1.8220	50.020	20
1.7100	53.547	50
1.5590	59.221	10
1.5220	60.810	20
1.4180	65.808	10
1.4030	66.602	50
1.3420	70.058	10
1.3200	71.403	10
1.3020	72.545	10
1.2620	75.234	10
1.2480	76.228	10
1.2350	77.177	5
1.1970	80.110	50
1.1710	82.267	50
1.1390	85.110	50
1.1330	85.668	10
1.1160	87.297	5
1.0800	90.998	50

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 Reference pattern: 34-0615 Vanadium Oxide (V_2O_5)

Reference pattern: 34-0615

12-Jan-20

Name : Vanadium Oxide
 Formula : V_2O_5
 Elements : O, V
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Alloys
 Pattern deleted: NO

Radiation : Cu K α 1
 Wavelength : 1.54060

d value	Angle	Rel. Int.
4.9000	18.089	20
2.9920	29.838	65
2.5480	35.193	100
2.4450	36.728	20
2.1140	42.739	35
1.7260	53.012	45
1.6260	56.555	80
1.4950	62.028	90
1.4490	64.228	35
1.3370	70.359	10
1.2900	73.330	45
1.2750	74.336	65
1.1300	85.950	20
1.1010	88.796	45
1.0570	93.565	20
0.9965	101.249	45
0.9763	104.184	45

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ส่วนผสมน้ำยากัดผิว

Hydrochloric Ferric Chloride	
HCl	5 drop
H ₂ O	100 ml.
FeCl ₃	5 ml.

ตารางที่ ง.2 คุณสมบัติของธาตุ

Element	Physical Properties	Molecular Weight (g/mol)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Gravity, S	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)
V		50.9415	6110	6.11	1910	3407
C		12.0107	2267	2.27	3527	4027
Fe		55.845	7874	7.87	1538	2861
Al		26.981538	2700	2.70	660.32	2519
Na		22.989770	968	0.97	97.72	883
B		10.811	2460	2.46	2076	3927
O		15.9994	-	-	-218.3	-182.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของสารประกอบ

Compounds	Physical Properties	Molecular Weight (g/mol)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Gravity, S	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Composition (%)	
V ₂ O ₅		181.88	3350	3.35	670	1800	V=56.02	O=43.98
V ₂ O ₃		149.88	4870	4.87	1970	-	V=67.98	O=32.02
Na ₂ O		61.98	2270	2.27	1132	Decomposes at 1950	Na=74.19	O=25.81
B ₂ O ₃		69.62	2550	2.55	450	2065	B=31.06	O=68.94
Fe-V		106.8	3695.31	3.70	-	-	V=52	-
Al ₂ O ₃		101.96	4000	4.00	2054	3000	Al=52.93	O=47.07

ที่มา <http://www.webelements.com>

<http://www.stratcor.com>

<http://www.cdc.gov>

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 Thermodynamics Properties

Physical Properties Element, Compounds	ΔH_{298}° (kcal/mole)	S_{298}° (cal/deg·mole)	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Transformation Point (°C)	ΔH_{trans} (kcal/mole)	T_{trans} (°C)
$V_2O_5(s)$	-370.6 ± 1.5	31.2 ± 0.4	670	1690	-	15.6 ± 0.4	670
$V_2O_3(s)$	-291.3 ± 1.5	23.44 ± 0.3	2070	-	-	-	-
$B_2O_3(s)$	-304.0 ± 0.5	12.9 ± 0.1	450	2065	-	5.3 ± 0.3	450
$Al_2O_3(s)$	-400.9 ± 1.5	12.2 ± 0.1	2050	3000	1000	25.7	2051
Al (s)	0	6.77 ± 0.05	660	2520	-	2.5 ± 0.03	659
V (s)	0	6.92 ± 0.1	1902	3350	-	4.0 ± 0.6	1902
B (s)	0	1.4 ± 0.05	2180	3800	-	5.4	2180
$O_2(g)$	0	49.0 ± 0.01	-219	-183	-250	0.106	-219

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 The constant-pressure molar heat capacities of various substances { $C_p = a + bT + cT^{-2} + dT^2$ (cal/deg·mole)}

Substance	a	$b \times 10^{-3}$	$c \times 10^5$	$d \times 10^6$	Range (K)
V_2O_5 (s)	46.54	-3.90	-13.22	-	298-943(Tm)
V_2O_5 (l)	45.6	-	-	-	943(Tm)-1500
V_2O_3 (s)	29.35	4.76	-5.42	-	298-1800
B_2O_3 (s)	13.63	17.45	-3.36	-	298-723(Tm)
B_2O_3 (l)	30.5	-	-	-	723(Tm)-1800
Al_2O_3 (s)	25.48	4.25	-6.82	-	298-1800
Al (s)	4.94	2.96	-	-	298-933(Tm)
Al (l)	7.6	-	-	-	933(Tm)-2400
V (s)	4.90	2.58	+0.2	-	298-2175(Tm)
B (s)	4.735	1.38	-2.20	-	298-1700
O_2 (g)	7.16	1.0	-0.4	-	298-3000

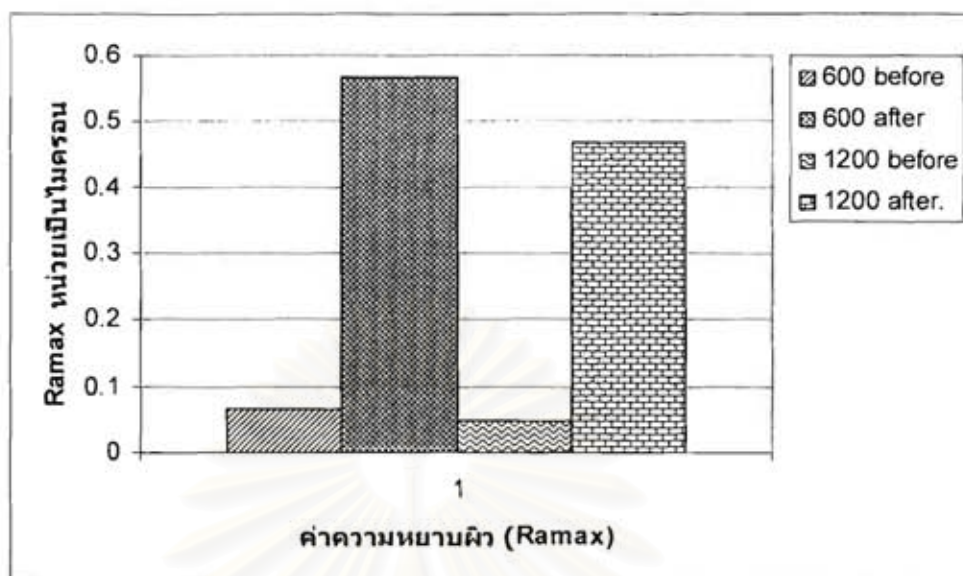
ที่มา Metallurgical Thermochemistry By O. KUBASCHEWSKI and C.B. ALCOCK, Fifth Edition

ตารางที่ ง.6 ค่าความหยาบผิวที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 (ก่อนและหลังเคลือบ VC)

จำนวน ที่ทดสอบ	ตัวแปร	Ra (μm)	Ramax (μm)	Ry (μm)	Ra (μm)	Ramax (μm)	Ry (μm)
		ก่อนเคลือบ VC	ก่อนเคลือบ VC	ก่อนเคลือบ VC	หลังเคลือบ VC	หลังเคลือบ VC	หลังเคลือบ VC
1		0.061	0.066	0.722	0.456	0.629	8.219
2		0.06	0.064	0.681	0.407	0.518	8.185
3		0.059	0.061	0.582	0.386	0.464	6.867
4		0.06	0.065	0.609	0.482	0.567	7.778
5		0.066	0.075	0.879	0.461	0.657	8.302
	ค่าเฉลี่ย	0.0612	0.0662	0.6946	0.4384	0.567	7.8702
	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.002775	0.005263	0.117202	0.040166	0.078984	0.596264

ตารางที่ ง.6 (ต่อ) ค่าความหยาบผิวที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 (ก่อนและหลังเคลือบ VC)

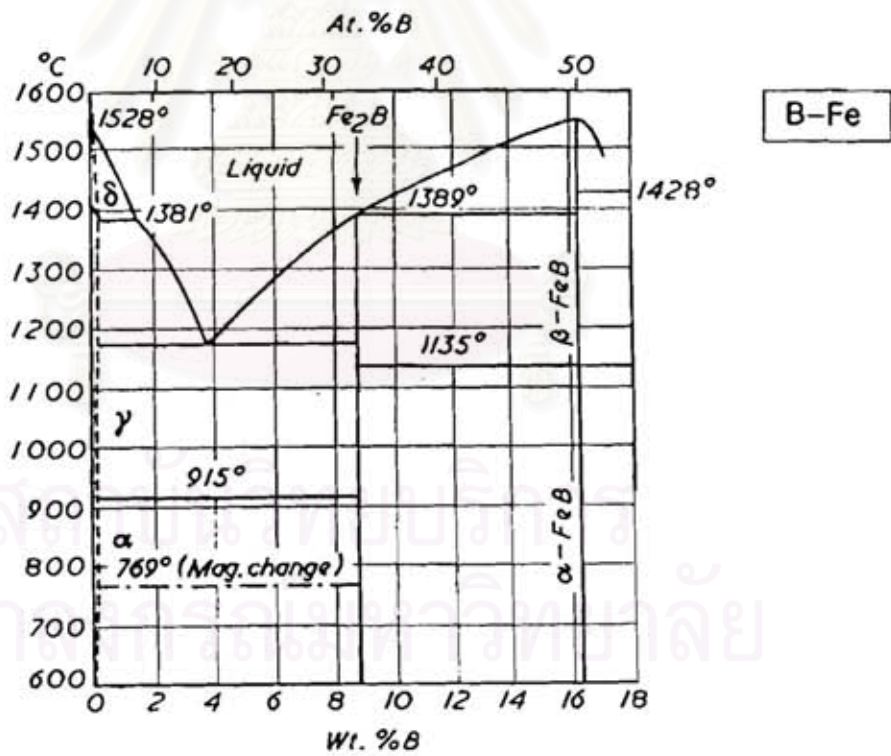
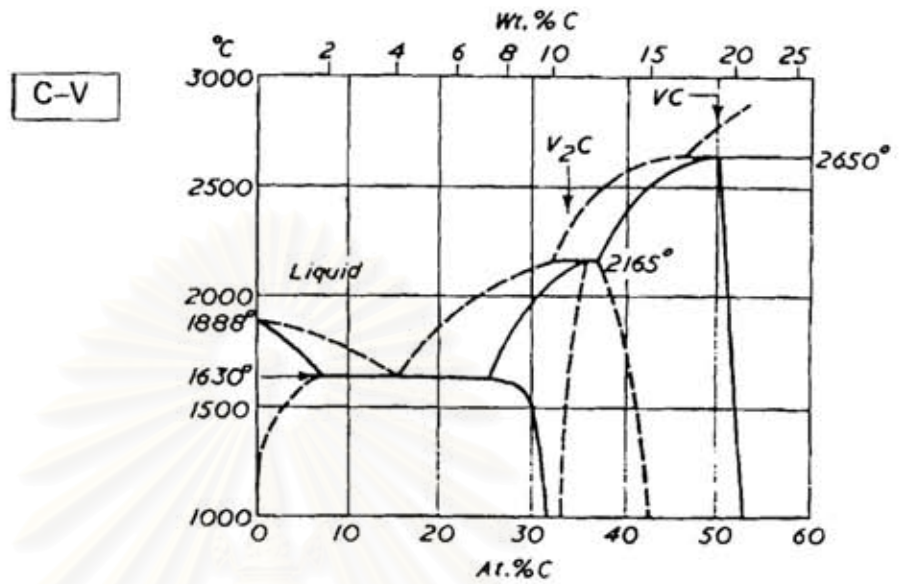
จำนวน ที่ทดสอบ	ตัวแปร	Ra (μm)	Ramax (μm)	Ry (μm)	Ra (μm)	Ramax (μm)	Ry (μm)
		ก่อนเคลือบ VC	ก่อนเคลือบ VC	ก่อนเคลือบ VC	หลังเคลือบ VC	หลังเคลือบ VC	หลังเคลือบ VC
1		0.043	0.048	0.413	0.388	0.565	6.889
2		0.044	0.047	0.456	0.307	0.427	6.293
3		0.043	0.047	0.457	0.263	0.334	6.565
4		0.042	0.044	0.436	0.403	0.603	7.645
5		0.044	0.047	0.453	0.318	0.404	6.355
	ค่าเฉลี่ย	0.0432	0.0466	0.443	0.3358	0.4666	6.7494
	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.000837	0.001517	0.018802	0.058495	0.113311	0.552142



รูปที่ ง.1 ค่าความหนาผิว(Ramax) ที่วัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1200 (ก่อนและหลังเคลือบ VC)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

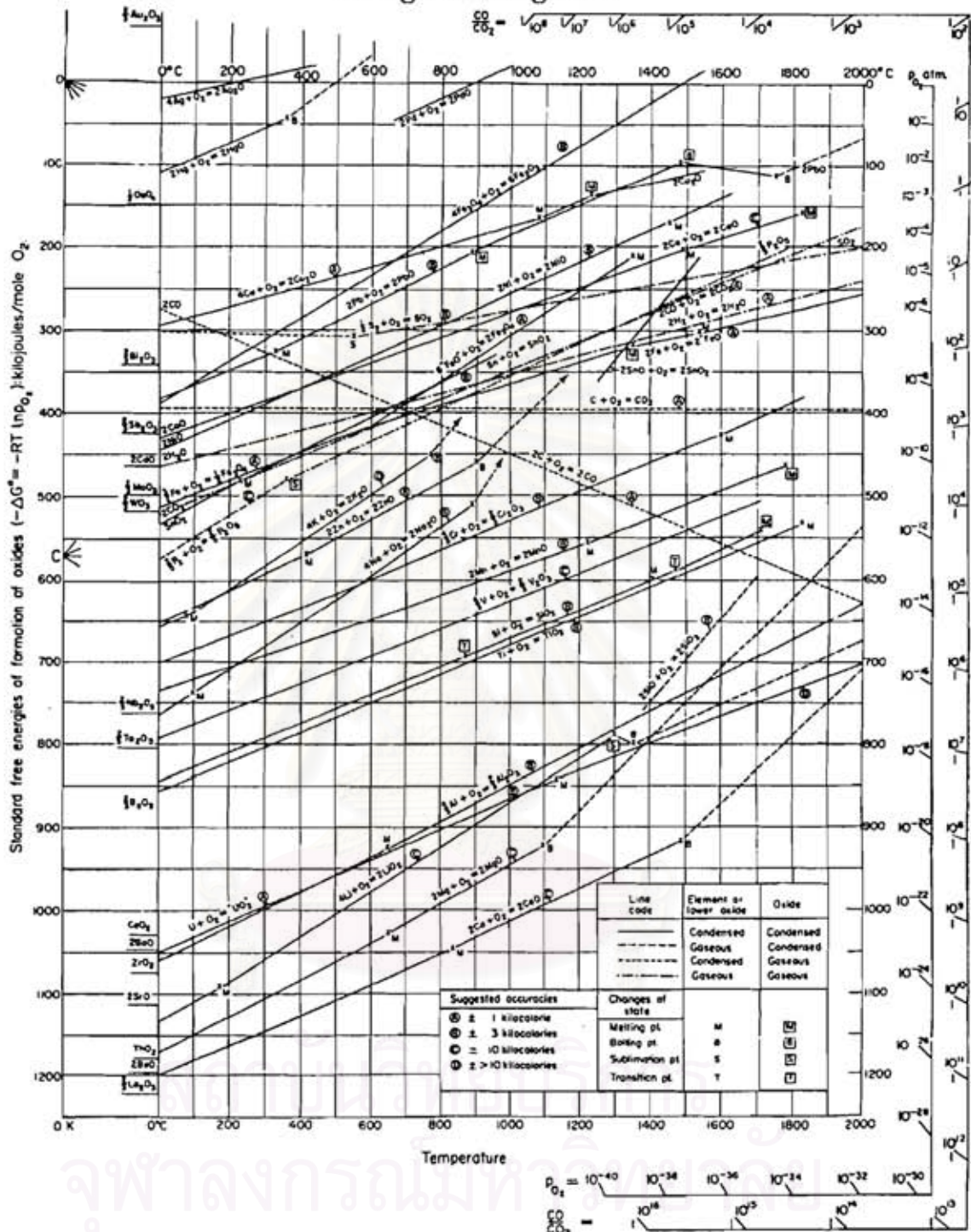
ภาคผนวก จ



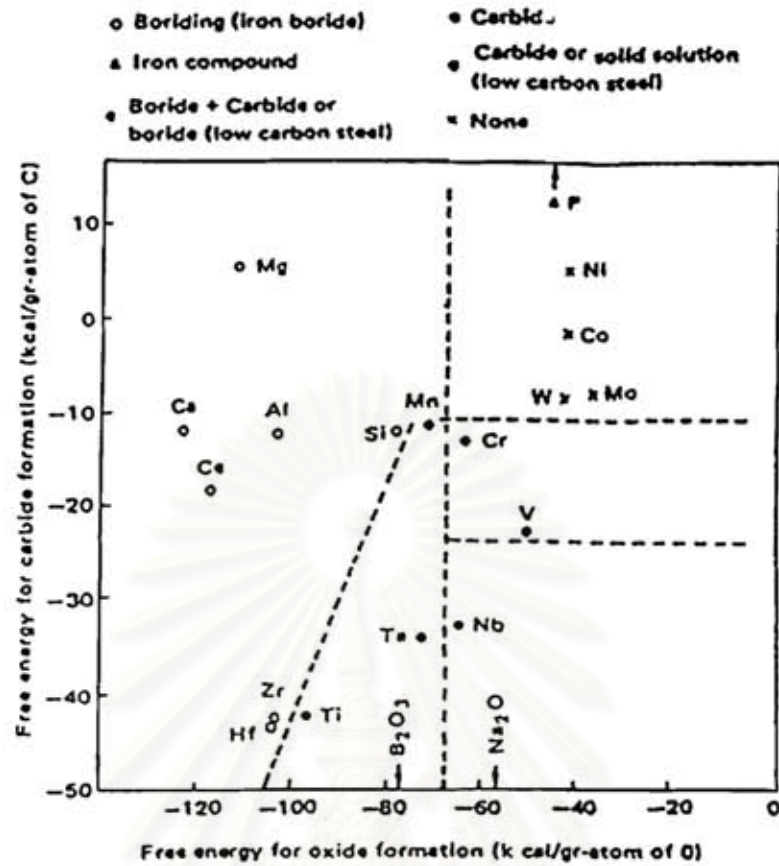
รูปที่ จ.1 Equilibrium phase diagrams

ที่มา Smithells Metals Reference Book By Eric A Brandes

Ellingham Diagrams



รูปที่ ๖.2 Ellingham diagrams



รูปที่ จ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานอิสระของธาตุที่เกิดเป็นสารประกอบและชนิดของชั้นเคลือบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Table 1 Shape and content of additives.

Additives	Shape of additives	Chemical composition	Additives content (wt%)
B ₄ C	powder	—	40
Ca-Si	powder	56.8% Si, 35.5% Ca	18.4
Ca-Al-Mn	powder	26.6% Ca, 41.7% Al, 29.4% Mn	30
Ca-Al-Mn-Si	powder	13.3% Ca, 40.2% Al, 30.7% Mn, 14.8% Si	30
La-Ce	granule	56.1% Ce, 35.1% La, 95.0% total RE	30
Mg	flake	>99.9%	17.6
Fe-Zr	powder	75~80% Zr + Hf	30
Al	granule	99.8% Al	27.8
Fe-Ti	powder	40~45% Ti	30
Fe-Si	powder	43.8% Si	30
Fe-V	powder	52% V	30
Fe-Nb	powder	59% Nb, 3.6% Ta	30
Fe-Mn	powder	75~80% Mn	30
Fe-Cr	powder	67% Cr	30
Zn	granule	99.99% Zn	29.9
Co	powder	>99%	30
Ni	powder	>99%	30
Cu	powder	>99%	30
SiC	powder	—	30
TiC	powder	—	30
TiN	powder	—	30
Si ₃ N ₄	powder	—	16.8
ZrO ₂	powder	—	30
Al ₂ O ₃	powder	—	30
SiO ₂	powder	—	30

รูปที่ จ.4 รูปร่างและปริมาณของสารที่เติมลงในบอแรกซ์หลอมเหลว

Table 2 Chemical species of the surface layer formed on S10C specimen and free energy change (ΔG) of borax-reducing reactions at 1000°C.

Additives	Layer thickness (μ)*	Layer structure*	Formula of B ₂ O ₃ reducing reaction	ΔG
B ₄ C	400	FeB + Fe ₂ B	—	—
Ca-Si	300	FeB + Fe ₂ B	—	—
Ca-Al-Mn	270	FeB + Fe ₂ B	} $2/3 B_2O_3 + 2 Ca = 4/3 B + 2 CaO$	-88
Ca-Al-Mn-Si	300	FeB + Fe ₂ B		
La-Ce	230	FeB + Fe ₂ B	$2/3 B_2O_3 + 4/3 La = 4/3 B + 2/3 La_2O_3$	-80
Mg	140	Fe ₂ B	$2/3 B_2O_3 + 2 Mg = 4/3 B + 2 MgO$	-66
Fe-Zr	170	FeB + Fe ₂ B	$2/3 B_2O_3 + Zr = 4/3 B + ZrO_2$	-50
Al	300	FeB + Fe ₂ B	$2/3 B_2O_3 + 4/3 Al = 4/3 B + 2/3 Al_2O_3$	-49
Fe-Ti	100	Fe ₂ B	$2/3 B_2O_3 + 2 Ti = 4/3 B + 2 TiO$	-36
Fe-Si	270	FeB + Fe ₂ B	$2/3 B_2O_3 + Si = 4/3 B + SiO_2$	0
Fe-V	5	VC	$2/3 B_2O_3 + 4/3 V = 4/3 B + 2/3 V_2O_3$	+8
Fe-Nb	5	NbC	$2/3 B_2O_3 + 2 Nb = 4/3 B + 2 NbO$	+10
Fe-Mn	160	Fe ₂ B	$2/3 B_2O_3 + 2 Mn = 4/3 B + 2 MnO$	+14
Fe-Cr	20	Fe-Cr (s.s)	$2/3 B_2O_3 + 4/3 Cr = 4/3 B + 2/3 Cr_2O_3$	+28
Zn	—	—	$2/3 B_2O_3 + 2 Zn = 4/3 B + 2 ZnO$	+54
Co	—	—	$2/3 B_2O_3 + 2 CO = 4/3 B + 2 CoO$	+90
Ni	—	—	$2/3 B_2O_3 + 2 Ni = 4/3 B + 3 NiO$	+90
Cu	—	—	$2/3 B_2O_3 + 4 Cu = 4/3 B + 2 Cu_2O$	+118
SiC	—	—	$2/3 B_2O_3 + 2/3 SiC = 4/3 B + 2/3 SiO_2 + 2/3 CO$	+323
TiC	—	—	$2/3 B_2O_3 + TiC = 4/3 B + TiO + CO$	+585
TiN	—	—	$2/3 B_2O_3 + 2 TiN = 4/3 B + 2 TiO + N_2$	+73
Si ₃ N ₄	—	—	$2/3 B_2O_3 + 1/3 Si_3N_4 = 4/3 B + SiO_2 + 2/3 N_2$	+267
ZrO ₂	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	—	—	—	—
SiO ₂	—	—	—	—

* 1000°C, 4 hr

รูปที่ จ.5 รูปแบบของการเกิดชั้นเคลือบและค่าพลังงานอิสระ

Table 5 Free energy change (ΔG) in reducing reactions of oxides by additive elements, at 1000°C.

Additives	Oxidized form	ΔG (kcal/g-atm of oxygen)				
		V ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O
Ca	CaO	-68	-56	-59	-44	-69
La	La ₂ O ₃	-64	-52	-55	-40	-65
Mg	MgO	-57	-45	-48	-33	-58
Zr	ZrO ₂	-49	-37	-40	-25	-50
Al	Al ₂ O ₃	-48	-36	-39	-24	-49
Ti	TiO	-42	-30	-33	-18	-43
Si	SiO ₂	-24	-12	-15	0	-25
Mn	MnO	-17	-5	-8	+7	-18
Ni	NiO	+20	+32	+29	+45	+19
Cu	Cu ₂ O	+35	+47	+44	+59	+34
V	V ₂ O ₃	—	—	—	+3	-23
Nb	NbO	—	—	—	+4	-22
Cr	Cr ₂ O ₃	—	—	—	+14	-12

รูปที่ ๖.๖ ค่าพลังงานอิสระในการรีดิวซ์ออกไซด์โดยการเติมธาตุลงในบอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1000°C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ธนศักดิ์ นิลสนธิ เกิดวันอังคารที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดแพร่ สำเร็จปริญญา
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ ภาควิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ในปีการศึกษา 2545 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย