

รายการอ้างอิง

- [1] ประสงค์ ศรีเจริญชัย, ศิริรัตน์ สมพันธ์ และปรีทรรศน์ พันธุบรรยงก์. การปรับปรุงพื้นผิวแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการที่ดี. วารสาร MTEC (เมษายน-มิถุนายน 2540) : 12-16.T.
- [2] T. Arai. Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan. Heat Treating, 1, 2 (1981) : 15-22.
- [3] Arai and S. Harper. Thermoreactive Deposition/Diffusion Process. ASM Handbook. 4 (1994) : 448-453.S.B. Fazluddin and A. Koursaris. Formation of VC Coating on Steel Substrates in Molten Borax. Surface Modification Technologies VI. (1993) : 45-60.
- [4] สุรพล พรนิมิตรธรรม. การเคลือบผิวเหล็กกล้าด้วยไนโอเบียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการที่ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [5] ธนศักดิ์ นิลสนธิ. ผลของเฟอร์โรวานาเดียมและวานาเดียมเพนทอกไซด์ต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบโดยกระบวนการที่อาร์ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [6] มหินทร์ ชัยฤทธิ์, ผลของพารามิเตอร์บางประการต่อความหนาชั้นเคลือบที่เคลือบโดยกระบวนการที่อาร์ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [7] พุศัคดี บุญกุลศรีรุ่ง, ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก ไนโอเบียมเพนทอกไซด์
5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง 15 นาที	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง 15 นาที
1	4.4	4.1	6.1	7.4
2	3.7	4.4	6.4	7.8
3	3.4	4.1	6.1	7.8
4	3.7	4.1	6.4	7.1
5	3.4	4.4	6.4	7.8
6	3.7	4.1	6.1	7.4
7	3.0	4.4	6.1	7.4
8	4.1	4.4	6.4	7.1
9	2.7	4.4	6.4	7.1
10	4.1	4.4	6.8	6.8
11	3.0	4.1	6.8	8.1
12	3.4	4.1	6.8	6.8
13	3.4	4.4	6.1	7.4
14	3.0	4.4	6.8	7.8
15	3.7	4.4	6.4	7.4
ค่ามากที่สุด	4.4	4.4	6.8	8.1
ค่าน้อยสุด	3.0	4.1	6.1	6.8
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่า มากที่สุดและน้อยสุด	3.4	4.3	6.4	7.4
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.4	0.2	0.3	0.3

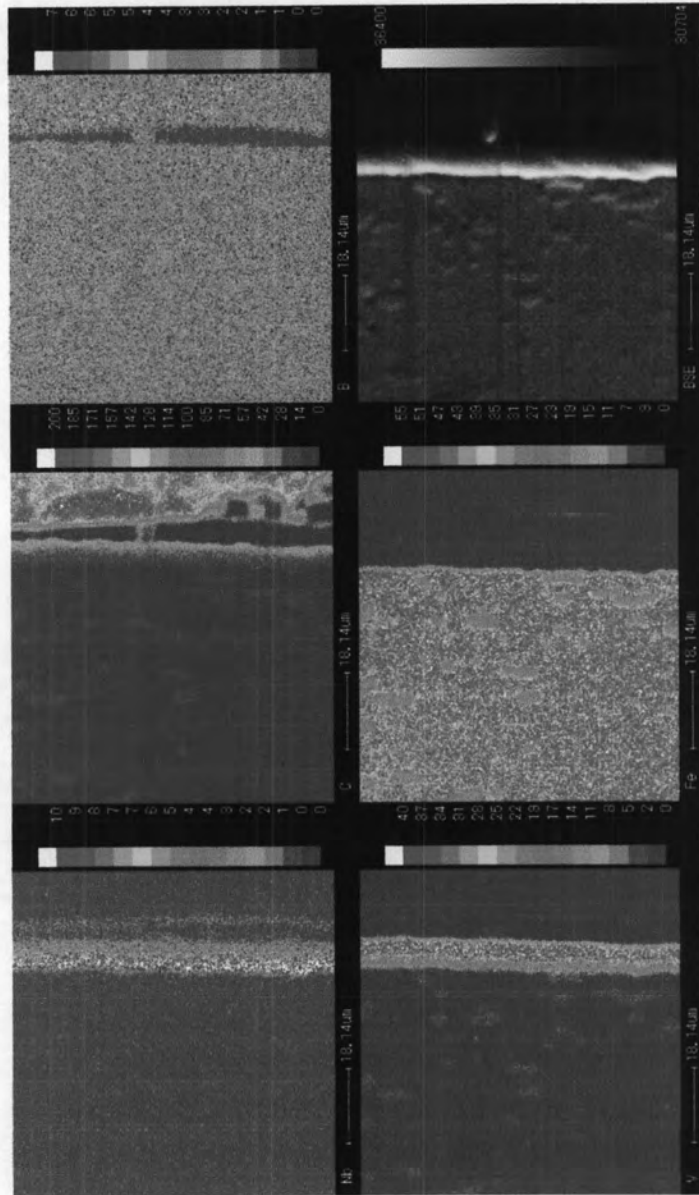
ตารางที่ ก.2 ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก ไนโอเบียมเพนทอกไซด์
10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง 15 นาที	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง 15 นาที	8 ชั่วโมง
1	2.4	4.4	5.4	6.8	8.8
2	2.4	4.1	4.7	7.1	9.5
3	2.7	4.1	4.7	6.8	8.4
4	2.7	3.7	5.7	6.4	8.8
5	2.7	3.4	5.1	6.4	9.5
6	2.4	3.7	5.4	7.4	8.8
7	2.0	4.7	5.4	6.4	9.5
8	2.4	4.4	5.4	6.4	8.8
9	2.7	3.4	5.1	6.8	9.5
10	2.7	3.7	4.7	6.8	8.4
11	2.7	3.4	5.1	6.4	8.4
12	2.4	4.1	5.1	7.4	8.8
13	2.7	4.7	5.4	6.8	9.5
14	2.0	4.4	5.4	7.1	8.4
15	2.4	4.4	5.7	6.8	8.8
ค่ามากที่สุด	2.7	3.4	5.7	7.4	9.5
ค่าน้อยสุด	2.0	4.7	4.7	6.4	8.4
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุดและน้อยสุด	2.5	4.0	5.2	6.8	8.9
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4

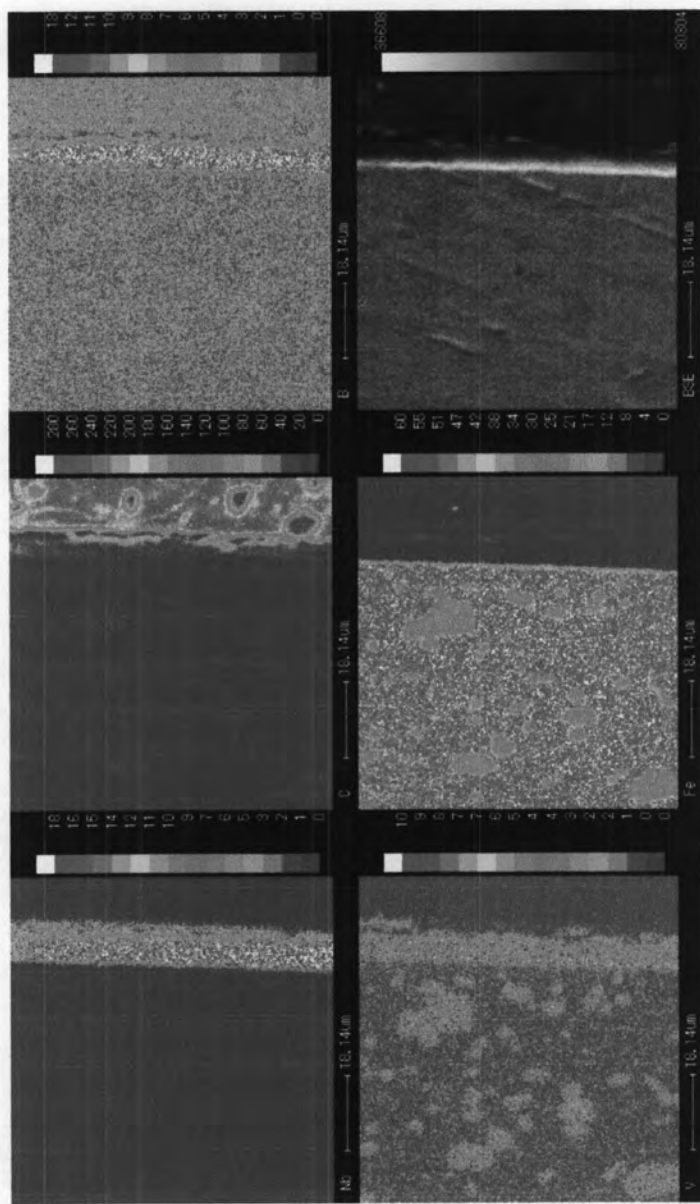
ตารางที่ ก.3 ความหนาชั้นเคลือบวานเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้จาก ไนโอเบียมเพนทอกไซด์
15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง 15 นาที	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง 15 นาที
1	2.0	3.4	5.7	7.1
2	2.4	3.7	5.7	7.1
3	1.7	4.1	5.4	7.4
4	2.0	3.7	6.1	7.8
5	2.4	3.4	5.7	7.8
6	2.4	3.7	5.4	7.4
7	2.7	4.4	5.7	7.1
8	2.4	3.7	5.7	7.4
9	2.4	3.4	5.7	7.4
10	2.0	3.7	5.4	7.1
11	2.4	3.7	5.7	7.1
12	2.4	3.7	5.4	7.4
13	2.7	4.1	5.7	7.4
14	2.4	3.4	6.1	7.1
15	2.4	3.7	5.7	7.4
ค่ามากที่สุด	2.7	4.4	6.1	7.8
ค่าน้อยสุด	1.7	3.4	5.4	7.1
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่า มากที่สุดและน้อยสุด	2.3	3.7	5.7	7.4
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.3	0.3	0.2	0.3

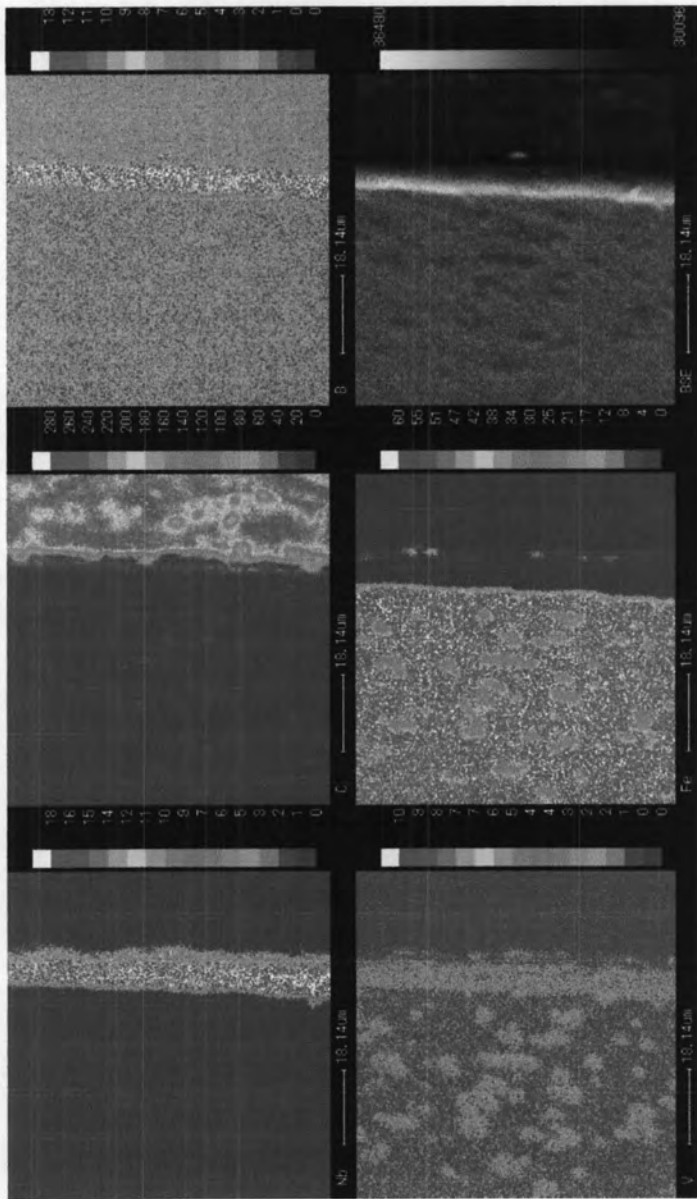
ภาคผนวก ข



รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ของชั้นเคลือบที่ได้จาก ไนโอเบียมเพนทอกไซด์ 5 เบอร์เซ็นต์โดยเครื่อง Electron Probe Micro Analyzer



รูปที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ของชั้นเคลือบที่ได้จาก ไนโอเบียมพ่นทอที่อัตรา 10 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่อง Electron Probe Micro Analyzer



รูปที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ของชั้นเคลือบที่ได้จาก โนโอเบียมพ่นทอไกซ์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analyzer

ภาคผนวก ค

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.)

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก ไนโอเบียมเพนทอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

ครั้งที่ทดลอง	diagonals d1(μm)	diagonals d2(μm)	ค่าความแข็งของ ชั้นเคลือบ(HV)
1	3.3	4.2	3297
2	3.9	4.2	2826
3	3.7	4.0	3128
4	4.0	4.0	2898
ค่าเฉลี่ย	3.7	4.1	3037
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.3	0.1	216

ตารางที่ ค.2 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก ไนโอเบียมเพนทอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

ครั้งที่ทดลอง	diagonals d1(μm)	diagonals d2(μm)	ค่าความแข็งของ ชั้นเคลือบ(HV)
1	3.5	3.4	3895
2	3.3	3.6	3895
3	3.5	3.6	3679
4	3.3	3.6	3895
ค่าเฉลี่ย	3.4	3.6	3841
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.1	0.1	108

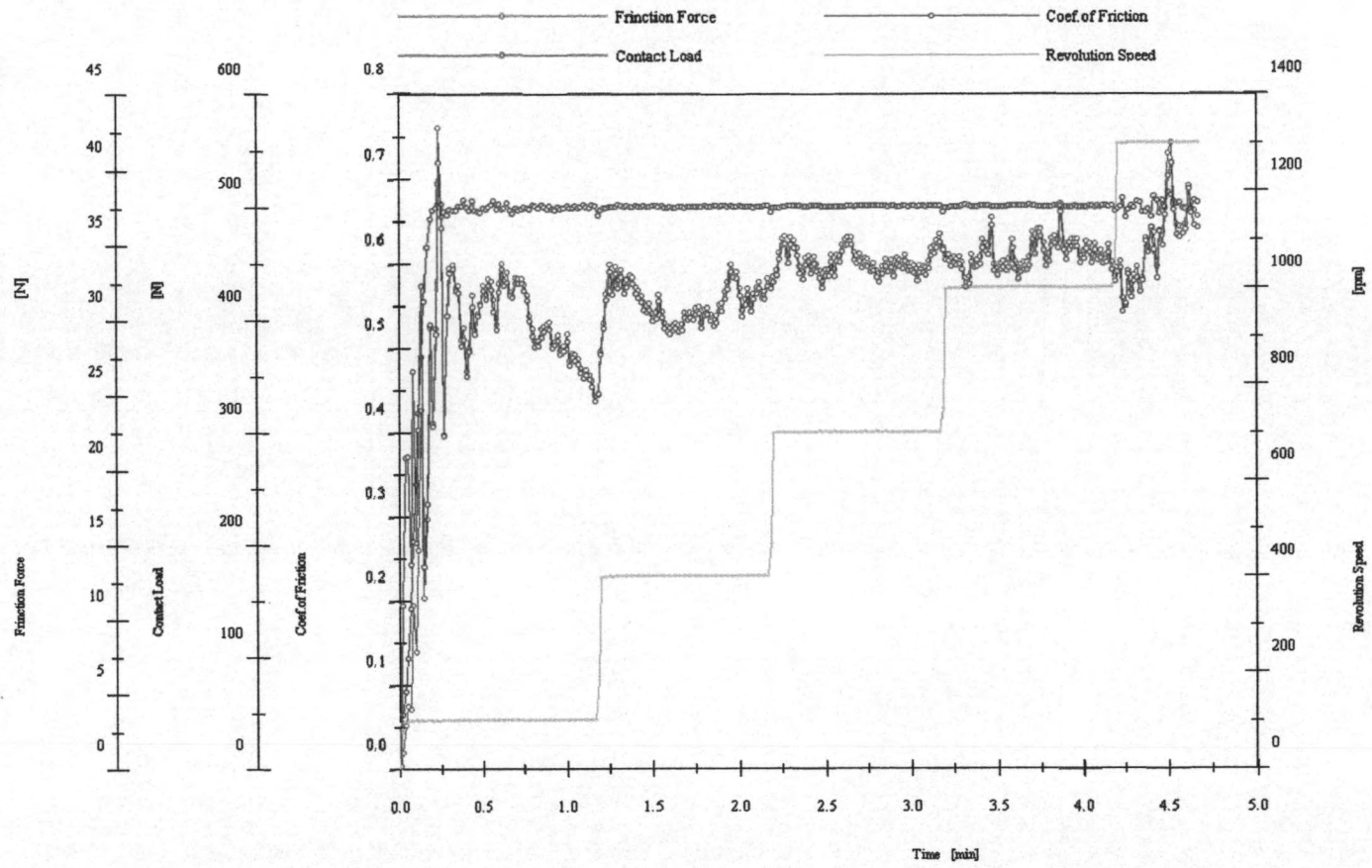
ตารางที่ ค.3 ค่าความแข็งของชั้นเคลือบที่ได้จาก ไนโอเบียมเพนทอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดย
มวล โดยใช้แรงกด 25 gf เป็นเวลา 10 วินาที

ครั้งที่ทดลอง	diagonals d1(μm)	diagonals d2(μm)	ค่าความแข็งของ ชั้นเคลือบ(HV)
1	3.5	3.4	3895
2	3.3	3.2	4389
3	3.5	4.0	3297
4	3.2	3.6	4010
ค่าเฉลี่ย	3.4	3.6	3898
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.2	0.3	453

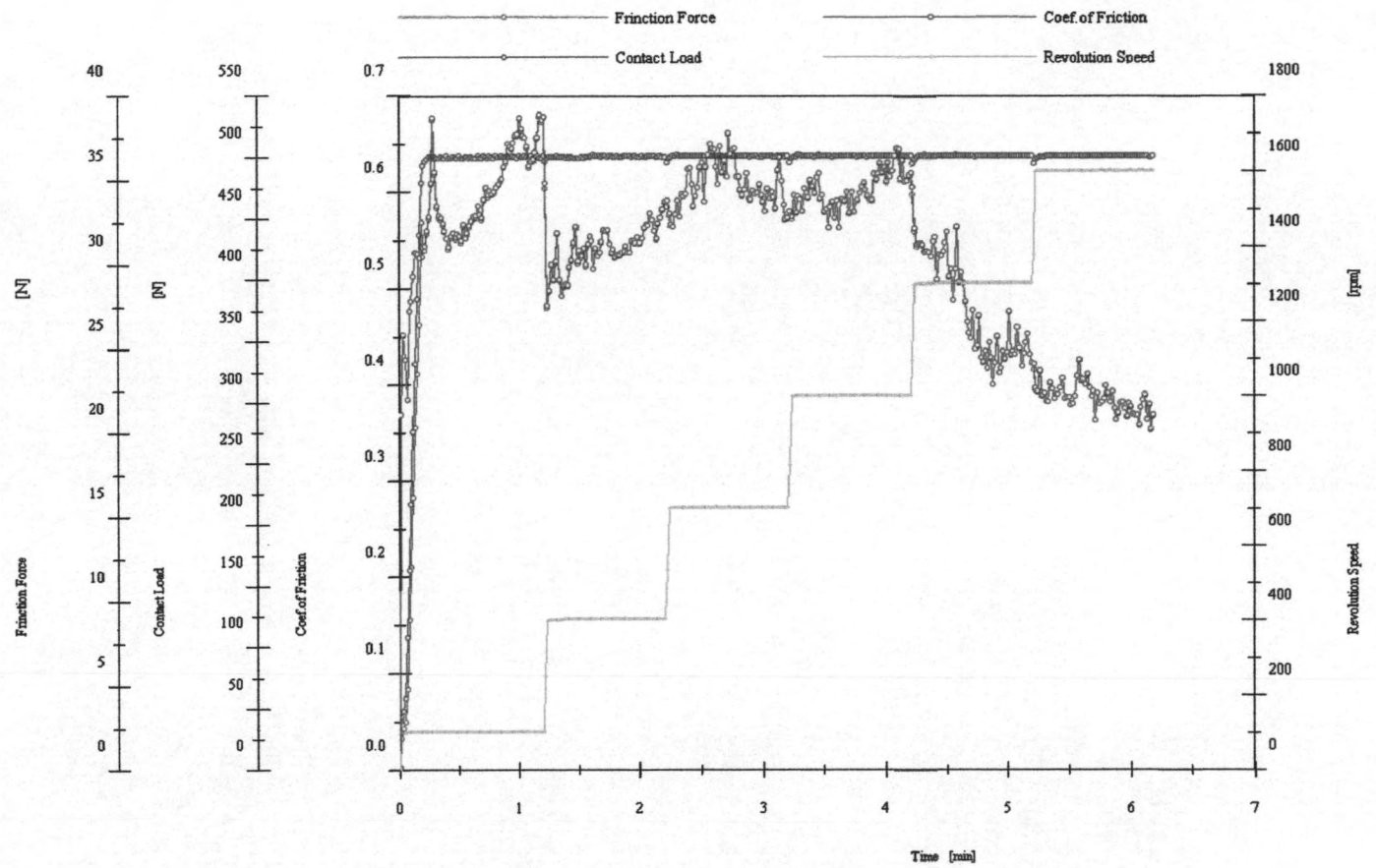
ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการสึกหรอ

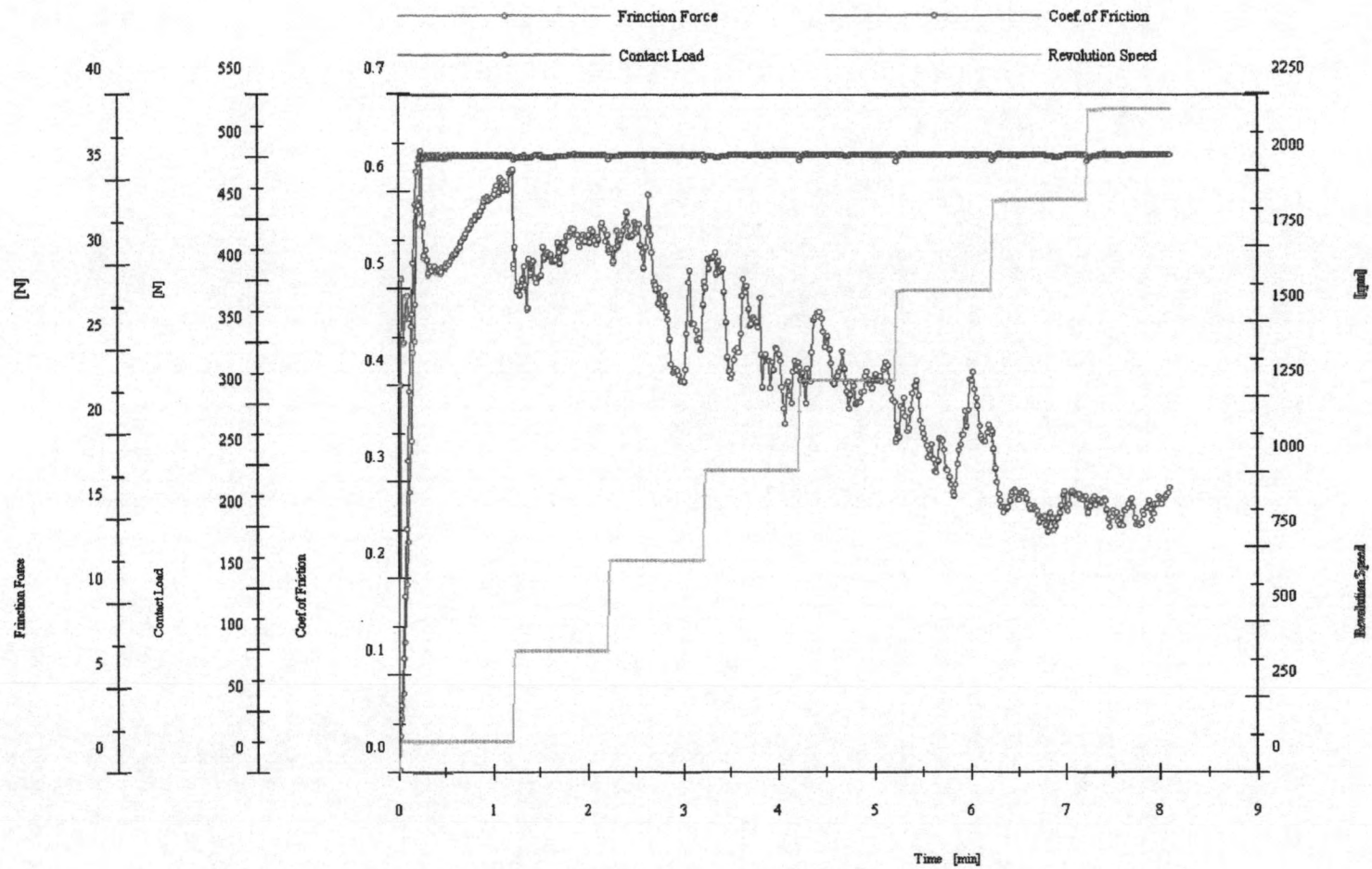
ผลการทดสอบการสึกหรอ (Wear test) ที่ความเร็วรอบการหมุน Ring เริ่มต้น 100 รอบต่อนาที แล้วเพิ่มขึ้นอีกนาทีละ 300 รอบต่อนาที โดยมีแรงกด 500 นิวตัน ระหว่าง Disc ชิ้นงานเหล็กเหล็กกล้า เครื่องมือทำงานเย็น DC53 ที่ชุบแข็งแล้วอบคืนตัว, เคลือบผิวด้วย วานเดียมคาร์ไบด์ และ เคลือบผิว ด้วย วานเดียม-ไนโอเบียมคาร์ไบด์ กับ Ring เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304



รูปที่ ง.1 ผลการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงานที่รับแรงและอบคืนตัวแล้วไม่ผ่านการเคลือบผิว



รูปที่ 2 ผลการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวานาเดียมคาร์ไบด์



รูปที่ ๓.3 ผลการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย ไนโอเบียม-วานาเดียมคาร์ไบด์

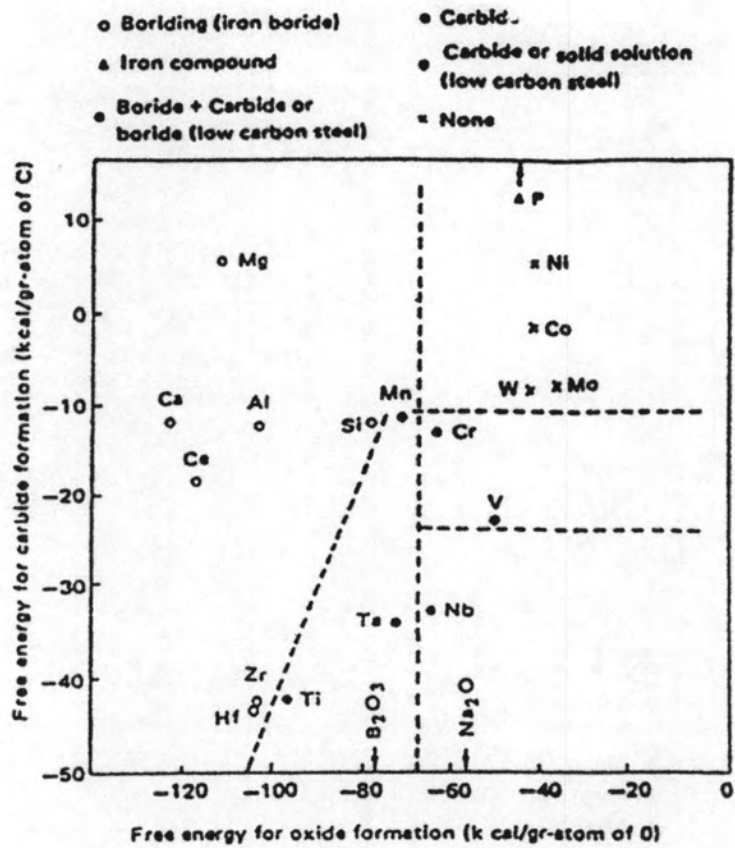
ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ.1 ส่วนผสมน้ำยากัดผิว

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

ตารางที่ จ.2 คุณสมบัติของธาตุ

Element	Physical Properties	Molecular Weight (g/mol)	Density, ρ (kg/m ³)	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)
V		50.9415	6110	1910	3407
C		12.0107	2267	3527	4027
Fe		55.845	7874	1538	2861
Nb		92.90638	8570	2477	4744
Na		22.989770	968	97.72	883
B		10.811	2460	2076	3927
O		15.9994	-	-218.3	-182.9



รูปที่ ๑.๒ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานอิสระของธาตุที่เกิดเป็นสารประกอบและชนิดของชั้นเคลือบ

Table 1 Shape and content of additives.

Additives	Shape of additives	Chemical composition	Additives content (wt%)
B ₂ 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 ๓.3 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 ₂ 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 ๓.4 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 ₂	-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 ๕.5 ค่าพลังงานอิสระในการรีดิวซ์ออกไซด์โดยการเติมธาตุลงในบอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1000°C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อนุพล เอื้ออภิสิทธิ์วงศ์ เกิดวันพุธที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในระดับอุดมศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2544 และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ เมื่อปี พ.ศ. 2548 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2548