

พฤติกรรมไดรโบลีของเหล็กกล้าไร้สนิมและวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการทีอาร์ดี

นายชาญเชาว์ เลิศล้ำมีชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้ทั้งหมดถูกจัดเก็บและให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

TRIBOLOGY BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL AND VANADIUM CARBIDE
COATED BY TRD PROCESS

Mr. Chanchou Lertlummechai

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมไดรโพลีของเหล็กกล้าไร้สนิมและวาเนเดียม
	คาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี
โดย	นายชาญเชาว์ เลิศล้ำมีชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปัญญ์วัชร วังยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชินะ เพ็ญชาติ)

ชาญเชาว์ เลิศล้ำมีชัย : พฤติกรรมไทรโบโลยีของเหล็กกล้าไร้สนิมและวานาเดียมคาร์ไบด์
ที่เคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี. (TRIBOLOGY BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL
AND VANADIUM CARBIDE COATED BY TRD PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก : รศ. ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, 58 หน้า.

งานวิจัยนี้เคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการที่อาร์ดีบนดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือ
และอบคืนตัวในอากาศอย่างตั้งใจเพื่อให้เกิดวานาเดียมออกไซด์หนาขึ้นบนชั้นเคลือบวานาเดียม
คาร์ไบด์ ไกลกับวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทนนิติกโดยทดสอบการสึกหรอแบบ ริง-ออน-ดิสก์
เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมไทรโบโลยี ทดสอบการสึกหรอที่ระยะทางไกล 2000 เมตร ความเร็ว
การไกล 1.432 เมตรต่อวินาที แปรผันแรงกดตั้งแต่ 120 ถึง 320 นิวตัน ซึ่งน้ำหนักวงแหวนก่อน
และหลังทดสอบการสึกหรอ วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของภาคตัดขวางของวงแหวนด้วยเครื่อง
EPMA วิเคราะห์ผิวดิสก์ด้วยเครื่อง XPS

ผลทดสอบการสึกหรอแสดงว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้นตามแรงกด
ที่เพิ่มขึ้นจาก 120 ถึง 320 นิวตัน ผลวิเคราะห์ EPMA ของภาคตัดขวางของวงแหวน แสดงว่าผิว
วงแหวนมีปริมาณโครเมียมมากกว่าปริมาณเหล็กในออกไซด์ที่ผิวชิ้นงานที่แรงกด 120 นิวตัน
ในขณะที่ปริมาณเหล็กมากกว่าปริมาณโครเมียมในออกไซด์ที่ผิวชิ้นงานที่แรงกด 320 นิวตัน
ออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมมากกว่าปริมาณเหล็กส่งผลให้น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนลดลง
ผล XPS ของผิวดิสก์ก่อนและหลังทดสอบการสึกหรอ แสดงวานาเดียมเพนทอกไซด์บนชั้นเคลือบ
วานาเดียมคาร์ไบด์ซึ่งส่งผลให้การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนดิสก์ที่เคลือบวานาเดียม
คาร์ไบด์ลดลง

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา...2554.....

5170285521 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Austenitic stainless steel / Adhesion / Vanadium carbide / TRD process

CHANCHOU LERTLUMMEECHAI : TRIBOLOGY BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL AND VANADIUM CARBIDE COATED BY TRD PROCESS. ADVISOR : ASSOC. PROF. PRASONK SRICHAREONCHAI, D.Eng., 58 pp.

In this research, vanadium carbide coating by TRD process was conducted on tool steel disc and intentionally tempered in air to produce thicker vanadium oxide on vanadium carbide surface. Ring-on-disc wear test was conducted by sliding with austenitic stainless steel ring to investigate tribological behavior. Wear test was conducted with sliding distance of 2000 m. Sliding velocity was 1.432 m/s. Normal load was varied from 120 N till 320 N. Weight of ring was measured before and after wear tests. Chemical composition of ring surface was cross-section analyzed by the EPMA. Surface of the disc was analyzed by the XPS.

Wear test results showed that weight loss of stainless steel increased with increasing normal load from 120 N till 320 N. The EPMA analysis result of cross-section of ring showed that ring surface contained more Cr content than Fe content in surface oxide in specimen with 120 N load while more Fe content than Cr content was shown in that with 320 N load. Cr rich oxide on stainless steel surface contributed to lower weight loss of stainless steel ring. The XPS result of disc surface before and after wear tests showed V_2O_5 on VC coating surface which contributed to less adhesion of stainless steel on VC coated disc.

Department : Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study : Metallurgical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำทั้งลำดับขั้นตอน การทำงาน วิธีการคิดการแก้ไขปัญหา ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งตรวจสอบ วิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ปัญญวัชร วั่งยาว ซึ่งเป็นประธาน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา ซึ่งเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ และดร. ชินะ เพ็ญชาติ ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิทยานิพนธ์ นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งในตำราและการใช้ ชีวิตประจำวัน รวมทั้งคอยให้กำลังใจข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวก สะดวกแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัทไทยปาร์คเกอร์ไรซิ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง ทดสอบการสึกหรอ เครื่อง XPS และเครื่องซังดิจิตอล ขอขอบพระคุณคุณฉนวนภรณ์ คุณณิชนันท์ภักษ์ คุณพาทิศ กงตาล และคุณทิพสุคนธ์ ปิ่นสุข ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบการ สึกหรอและวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่อง XPS ขอขอบพระคุณคุณไศภิต พุ่มพวง เจ้าหน้าที่บริการ วิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยวิเคราะห์ ชิ้นงานด้วยเครื่อง EPMA จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณบริษัท สหวิริยาสตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าเป็นค่าใช้จ่ายระหว่างการศึกษาระดับ ปริญญาโทมหาบัณฑิต

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่คอยให้ความรัก กำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องที่ร่วมศึกษาใน ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ กับข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	4
2.1 การเคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี.....	4
2.2 การสีทหอบแบบเกาะติด (adhesion).....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	17
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	17
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	18
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานดิสก์และวงแหวน.....	19
3.3.2 การเคลือบดิสก์ด้วยกระบวนการที่อาร์ดี การชุบแข็ง และอบคืนตัว.....	20

บทที่	หน้า
3.3.3 ทดสอบการสีกหรอ	21
3.3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	23
4 ผลการทดลองและการอภิปราย	24
4.1 การเคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี	24
4.2 ก่อนทดสอบการสีกหรอ	25
4.3 หลังทดสอบการสีกหรอ	28
5 บทสรุป	45
รายการอ้างอิง	46
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก	49
ภาคผนวก ข	50
ภาคผนวก ค	52
ภาคผนวก ง	53
ภาคผนวก จ	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	58

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขนาดของแรงกดที่ทำให้ชั้นเคลือบเสียหาย (นิวัตน์)	8
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 (modified SKD11) เปรอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	19
จ.1	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของสารประกอบวาเนเดียม	57

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนการเคลือบด้วยกระบวนการ TRD	4
2.2	ลักษณะการสึกหรอแบบเกาะติด	5
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับแรงกดสำหรับ ชั้นเคลือบชนิดต่างๆ โดย (ก) ไม่ขัดผิวชั้นเคลือบและ (ข) ขัดผิวชั้นเคลือบให้ มีความหยาบผิว 0.2 ไมครอน ก่อนทดสอบการสึกหรอ	6
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงวิกฤตกับชั้นเคลือบชนิดต่างๆ	7
2.5	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับแรงกดที่ความ หยาบผิวของวัสดุพื้นต่างกัน และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงวิกฤตกับความ หยาบผิวของวัสดุพื้น	7
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับแรงกดสำหรับ ชั้นเคลือบชนิดต่างๆ	8
2.7	การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนดิสก์ที่ผ่านการชุบแข็งแต่ไม่ได้ทำ การเคลือบ	9
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาในการไถลสำหรับ ดิสก์ที่ไม่ได้เคลือบ, ดิสก์เคลือบด้วย VC และ (V,Nb)C	10
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับแรงกด ในการทดสอบ การสึกหรอของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนตรายด์กับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ถูกและ ถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 200, 500 และ 800°C	11
2.10	(ก) บริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนตรายด์และเหล็กกล้าไร้สนิมที่มา เกาะติดหลังทดสอบการสึกหรอ (ข) แสดงผลของ EDS line scan ตามเส้นสีดำ ของภาพ (ก)	11
2.11	ปริมาณธาตุที่ลึกลงไปจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ (ก) ไม่ถูกออกซิไดซ์ (ข) ถูก ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 200°C (ค) 500°C และ (ง) 800°C โดยวิเคราะห์ด้วย เครื่อง ESCA ก่อนทดสอบการสึกหรอ	12
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับอุณหภูมิในการทดสอบ สำหรับชั้นเคลือบ TiN และ VN	14

ภาพที่	หน้า	
2.13	ผลวิเคราะห์ด้วย XRD สำหรับชั้นเคลือบ (ก) TiN และ (ข) VN ที่คุณสมบัติต่างๆ..	14
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมกับแรงกด	15
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับเวลาในการไถล	16
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	18
3.2	แบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองของ (ก) ดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 และ (ข) วงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	20
3.3	บริเวณที่เสียบเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิขณะทำการทดสอบของวงแหวน	20
3.4	ขั้นตอนการการเคลือบดิสก์ด้วยกระบวนการ TRD ชุบแข็ง และอบคืนตัว	21
3.5	แบบเครื่องทดสอบการสึกหรอ.....	22
3.6	แบบการวางชิ้นงานดิสก์และวงแหวนในการทดสอบการสึกหรอ	23
3.7	แบบจำลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย.....	23
4.1	สีที่เปลี่ยนไปของผิวดิสก์ (ก) ก่อนอบคืนตัว และ (ข) หลังอบคืนตัว	24
4.2	ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของดิสก์ที่เคลือบด้วยกระบวนการ TRD	25
4.3	สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2}$ - $V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยวบนผิวดิสก์ก่อนทดสอบการสึกหรอ	26
4.4	ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนก่อนทดสอบการสึกหรอ.....	27
4.5	EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนก่อนทดสอบการสึกหรอ ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.4	27
4.6	EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนก่อนทดสอบการสึกหรอตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.4	28
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนกับแรงกด กรณีที่วานเนเดียมออกไซด์มีความหนาแน่นและความหนามาก.....	29
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับระยะทางไถลที่แรงกดต่างๆ.....	30
4.9	ภาพถ่าย SEM ของการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวดิสก์ที่แรงกด 320 นิวตัน.....	31
4.10	การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ที่แรงกด (ก) 120 นิวตัน (ข) 170 นิวตัน (ค) 220 นิวตัน และ (ง) 320 นิวตัน.....	32

ภาพที่	หน้า
4.11	ภาพถ่าย OM ของภาคตัดขวางของวงแหวนที่เปลี่ยนแปลงหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน..... 33
4.12	ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 120 นิวตัน..... 34
4.13	EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 120 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.12 34
4.14	EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 120 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.12..... 35
4.15	ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน..... 37
4.16	EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.15 37
4.17	EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.15..... 38
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวงแหวนกับระยะทางไกลที่แรงกด 320 นิวตัน..... 39
4.19	ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของดิสก์หลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน..... 40
4.20	EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr, O และ V ของดิสก์หลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.19 40
4.21	สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2}$ - $V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยวบนผิวดิสก์หลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน..... 41
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับระยะทางไกลที่แรงกด 320 นิวตัน 43

ภาพที่	หน้า
ก.1	สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2}$ - $V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยวบนผิวดีสก์ ก่อนสับแต่ตอริงและหลังสับแต่ตอริงครั้งละ 60 วินาที เป็นจำนวน 10 รอบ ก่อนทดสอบการสึกหรอ 49
ข.1	บริเวณที่ไม่เกิดชั้นสีเทา เมื่อทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน..... 50
ข.2	บริเวณที่เกิดชั้นสีเทา เมื่อทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน..... 50
ข.3	บริเวณที่เกิดการสูญเสียของวงแหวน เมื่อทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน..... 51
ค.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวงแหวนกับระยะทางไกลที่แรงกดต่างๆ..... 52
ง.1	ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 170 นิวตัน..... 53
ง.2	EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 170 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ ง.1..... 53
ง.3	EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 170 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ ง.1..... 54
ง.4	ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 220 นิวตัน..... 54
ง.5	EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 220 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ ง.4..... 55
ง.6	EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 220 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ ง.4..... 55
จ.1	สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2}$ - $V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยว..... 56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้แม่พิมพ์ที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นจำนวนมาก เป็นที่ทราบกันว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกนั้นขึ้นรูปยาก เนื่องจากเกิดการเกาะติด [1] ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและแม่พิมพ์เกิดความเสียหาย แม่พิมพ์ดังกล่าวนั้นมีราคาสูง ทำให้มีนักวิจัยคิดปรับปรุงสมบัติทางกลของแม่พิมพ์ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยการใช้เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็นที่ชุบแข็งและอบคืนตัว ทำให้แม่พิมพ์มีความแข็งแรงสูงขึ้น มีความต้านทานการสึกหรอได้ดี ลดความเสียหายจากการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้

การเคลือบด้วยกระบวนการ TRD (Thermo-Reactive Deposition and Diffusion) เป็นทางเลือกหนึ่งในการเคลือบผิวให้มีสมบัติดีขึ้น ทำได้ง่ายโดยจุ่มชิ้นงานลงในอ่างเกลือหลอมเหลวในสภาวะบรรยากาศทั่วไป ชั้นเคลือบที่ได้หนา 5 - 15 ไมครอน โดยขึ้นกับอุณหภูมิในอ่างเกลือเวลาเคลือบ ชนิดของวัสดุพื้น (substrate) ที่นำมาเคลือบ ชนิดของธาตุที่มารวมตัวกับคาร์บอนให้เกิดชั้นคาร์ไบด์ (carbide-forming) เช่น โครเมียม วาเนเดียม ไทเทเนียม หรือไนโอเบียม โดยธาตุเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่แพร่ออกมาจากวัสดุพื้นเกิดเป็นชั้นคาร์ไบด์ที่ผิว ทำให้ผิวมีความแข็งแรงสูงขึ้น ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการกัดกร่อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีขึ้น โดยขึ้นกับชนิดของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น [2]

ในการปรับปรุงสมบัติของแม่พิมพ์เพื่อนำไปใช้งานนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่างเช่น ความหนาของผิวของวัสดุพื้น ความหนาของชั้นเคลือบ ชนิดของชั้นเคลือบ ความหนาของชั้นเคลือบ รวมถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน ที่ผ่านมามีการศึกษาการเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการ TRD นั้น สามารถลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกลงได้ อย่างไรก็ตามยังมีการเกาะติดเกิดขึ้น และเกิดขึ้นอย่างมากเมื่อให้แรงกดระหว่างการไหลที่สูง [3] ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาและปรับปรุงชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์เพื่อลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกบนแม่พิมพ์ให้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ตรวจสอบพฤติกรรมไตรโบโลยีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการ TRD

1.2.2 ตรวจสอบปัจจัยที่ทำให้ลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เคลือบดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 ด้วยกระบวนการ TRD ในอ่างเกลือบอแรกซ์ โดยใช้วาเนเดียมเพนทอกไซด์และโบรอนคาร์ไบด์ เคลือบที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที และอบคืนตัวสองครั้งที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ควบคุมบรรยากาศที่ผ่านเข้าเตาอบชิ้นงาน

1.3.2 ทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบ ring-on-disc ที่อุณหภูมิห้อง ไม่ใช้สารหล่อลื่น ภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยใช้วงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เป็นคู่สัมผัส การไถลกับชิ้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แปรผันแรงกด 120 ถึง 320 นิวตัน

1.3.3 วิเคราะห์ธาตุของภาคตัดขวางของวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

1.3.4 วิเคราะห์สารประกอบบนผิวดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือด้วยเครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมไตรโบโลยีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการ TRD

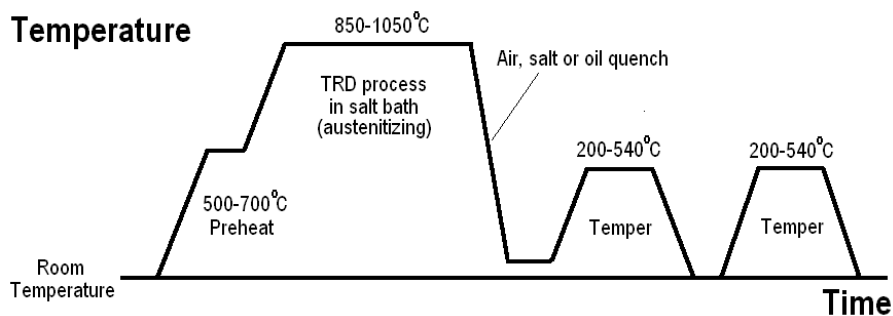
1.4.2 ทราบถึงปัจจัยที่ทำให้ลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

1.4.3 นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อยืดอายุการใช้งานและ
ประหยัดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการสึกหรอของแม่พิมพ์

บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 การเคลือบด้วยกระบวนการทีอาร์ดี

กระบวนการ TRD (Thermo-Reactive Deposition and Diffusion) เป็นกระบวนการเคลือบและแพร่ด้วยปฏิกิริยาทางเคมีบนผิววัสดุ สร้างชั้นของคาร์ไบด์ ไนไตรต์ หรือคาร์ไบด์ ไนไตรต์ ที่มีความแข็งและทนต่อการสึกหรอ โดยมีขั้นตอนการเคลือบดังแสดงในภาพที่ 2.1 ก่อนการเคลือบจะอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 - 700°C เพื่อลดการบิดเบี้ยว (distortion) ของชิ้นงาน ขั้นตอนการเคลือบทำโดยจุ่มชิ้นงานลงในอ่างเกลือที่ใส่บอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 850 - 1050°C หรือเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ (สำหรับเหล็กกล้าผสมต่ำ เหล็กกล้าคาร์บูไรซิง และเหล็กกล้าเครื่องมือ) คงอุณหภูมิในการเคลือบไว้ 0.5 - 10 ชั่วโมง ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนา 5 - 15 ไมครอน ภายหลังจากเคลือบด้วยกระบวนการ TRD สามารถชุบแข็งด้วย อากาศ เกลือ หรือน้ำมัน และอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 200 - 540°C ได้ทันที

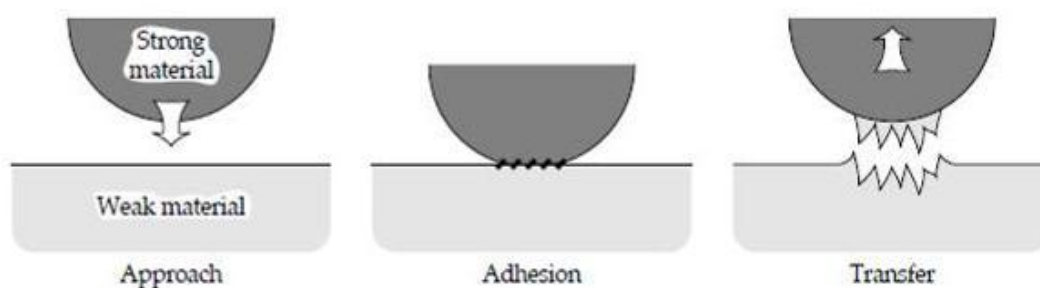


ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลือบด้วยกระบวนการ TRD [2]

กลไกการเกิดชั้นเคลือบอธิบายได้ดังนี้คือ เติมธาตุที่รวมตัวกับคาร์บอนให้เกิดชั้นคาร์ไบด์ เช่น โครเมียม วาเนเดียม ไทเทเนียม หรือไนโอเบียม ลงไปละลายในอ่างเกลือที่มีบอแรกซ์หลอมเหลว ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนที่แพร่มาจากภายในวัสดุพื้นมาয়งผิวชิ้นงาน จนเกิดเป็นชั้นเคลือบคาร์ไบด์ โดยความหนาชั้นเคลือบขึ้นกับอุณหภูมิในอ่างเกลือ เวลาในการเคลือบ ชนิดของวัสดุพื้นนำมาเคลือบ ชนิดของธาตุที่มารวมตัวกับคาร์บอนให้เกิดชั้นคาร์ไบด์ ชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการ TRD ได้แก่ ชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ไนโอเบียมคาร์ไบด์ หรือโครเมียมคาร์ไบด์ โดยชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์และไนโอเบียมคาร์ไบด์ให้ความแข็งที่ผิวสูง มีความต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนสูง ส่วนชั้นเคลือบโครเมียมคาร์ไบด์นั้นให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง

2.2 การสีกหรือแบบเกาะติด (adhesion)

การสีกหรือแบบเกาะติดเป็นการสีกหรือชนิดหนึ่งที่มีอัตราการสีกหรือสูงและให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่คงที่ เกิดขึ้นเมื่อผิวของวัสดุสองผิวเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน ในความจริงแล้วผิววัสดุไม่ได้มีความเรียบตลอดทั้งชิ้นงานจึงมีบางบริเวณเท่านั้นที่สัมผัสกันจริง การที่วัสดุสองผิวหน้าสัมผัสกันภายใต้แรงกดทำให้เกิดความเค้นสูงมาก ณ บริเวณส่วนนูน (asperity) ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงมากจนผิวสัมผัสกลายเป็นเนื้อเดียวกัน และฉีกขาดออกตามทิศทางการไถล โดยวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจะหลุดออกและติดไปยังวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ลักษณะการสีกหรือแบบเกาะติด [4]

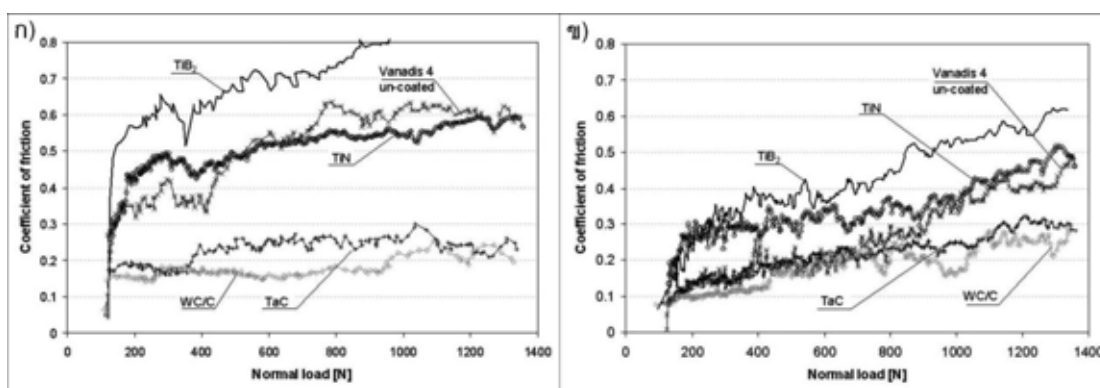
กรณีการสีกหรือแบบเกาะติดของโลหะกับเซรามิกนั้น จากความแข็งแรงของโลหะมีค่าน้อยกว่าความแข็งแรงของเซรามิก เมื่อเกิดการไถลกันจะทำให้โลหะเกิดการฉีกขาดและติดไปยังเซรามิก โดยกลไกการสีกหรือแบบเกาะติดสามารถลดความรุนแรงระหว่างผิวสัมผัสได้จากสิ่งเจือปนเช่น ออกซิเจน น้ำ หรือน้ำมัน ซึ่งช่วยลดการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างผิว รวมทั้งการสร้างชั้นเคลือบหรือการเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวก็จะลดความรุนแรงของการสีกหรือแบบเกาะติดได้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

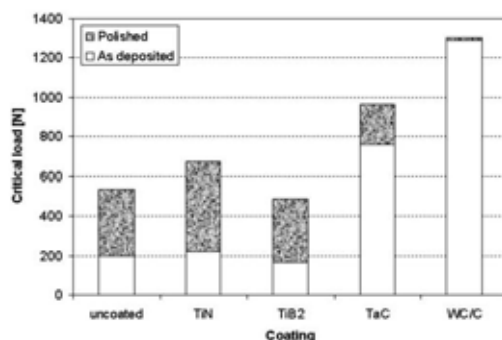
การเคลือบแม่พิมพ์เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ใช้งานได้ดีและคงทน ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่างทั้งก่อนและหลังเคลือบเช่น โครงสร้างของวัสดุพื้น ชนิดของชั้นเคลือบ ความหนาของชั้นเคลือบ ความหยาบผิวของวัสดุพื้น ความหยาบผิวของชั้นเคลือบ ชนิดของสารหล่อลื่น หรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน ปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้มีผลต่อการใช้งานของแม่พิมพ์ทั้งสิ้น

ดังนั้นการเข้าใจปัจจัยต่างๆ ดังที่กล่าวมาย่อมเป็นผลดีต่อการพัฒนาและปรับปรุง รวมทั้งยังทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

B. Podgornik และคณะ [5] ศึกษาผลความหยาบผิวของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าเครื่องมือ VANADIS 4 เคลือบด้วยกระบวนการ PVD ได้ชั้นเคลือบชนิดต่างๆ คือ TiN, TiB₂, TaC และ WC/C ภายหลังการเคลือบจึงแบ่งชิ้นงานเป็น 2 กรณีคือ ชิ้นงานที่ไม่ขัดผิวชั้นเคลือบและขัดผิวชั้นเคลือบให้มีความหยาบผิว (Ra) เท่ากับ 0.2 ไมครอน ก่อนทดสอบการสึกหรอเพื่อเปรียบเทียบกัน ทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบ load scanner เพิ่มแรงกดจาก 100 ถึง 1300 นิวตัน พบว่ากรณีการขัดผิวก่อนทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ไม่ถูกเคลือบ (uncoated), เหล็กกล้าที่เคลือบด้วย TiN และ TiB₂ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดลงประมาณ 50 - 100% ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และให้ค่าแรงวิกฤต (critical load) หรือแรงกดที่ทำให้เริ่มเกิดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมไปยังชั้นเคลือบสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.4 ส่วนกรณีชั้นเคลือบ TaC และ WC/C การขัดผิวก่อนทดสอบการสึกหรอนั้นช่วยต้านทานการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ต่ำและค่าแรงวิกฤตที่สูงอยู่แล้ว

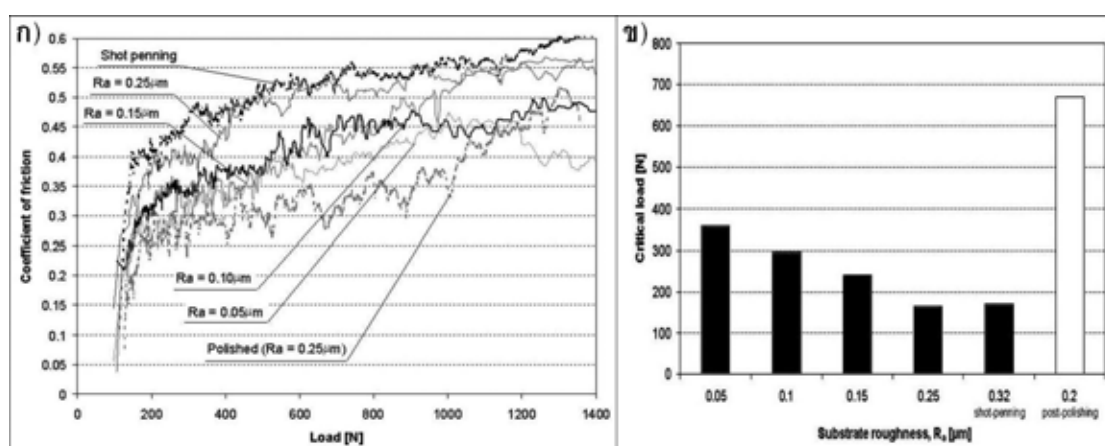


ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับแรงกดสำหรับชั้นเคลือบชนิดต่างๆ โดย (ก) ไม่ขัดผิวชั้นเคลือบและ (ข) ขัดผิวชั้นเคลือบให้มีความหยาบผิว 0.2 ไมครอน ก่อนทดสอบการสึกหรอ [5]



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงวิกฤตกับชั้นเคลือบชนิดต่างๆ [5]

รวมทั้งยังศึกษาอิทธิพลของความหยาบผิววัสดุพื้นก่อนทำการเคลือบ TiN โดยทำการขัดผิววัสดุพื้นของเหล็กกล้าเครื่องมือ VANADIS 4 ให้มีความหยาบผิว 0.25, 0.15, 0.10 และ 0.05 ไมครอน ก่อนเคลือบ TiN แล้วจึงนำไปทดสอบการสึกหรอ พบว่าความหยาบผิวลดลงจาก $R_a = 0.25$ จนถึง $R_a = 0.05$ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายลดต่ำลงและค่าแรงวิกฤตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.5 (ก) โดยความเรียบของวัสดุพื้นนั้นเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบได้เช่นกัน แต่การขัดผิววัสดุพื้นก่อนการเคลือบนั้นยังต้านทานการเกาะติดไม่ดีเท่ากับการขัดผิวภายหลังการเคลือบ สังเกตได้จากภาพที่ 2.5 (ข) เพราะการเคลือบสามารถทำให้ความหยาบผิวเพิ่มขึ้นได้โดยการเกิดของบริเวณส่วนนูนใหม่ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเกาะติดได้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมความหยาบผิวของวัสดุและชั้นเคลือบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

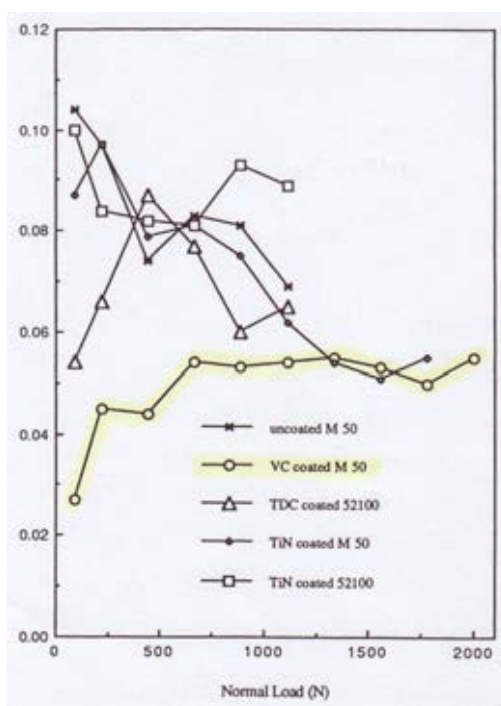


ภาพที่ 2.5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับแรงกดที่ความหยาบผิวของวัสดุพื้นต่างกัน และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงวิกฤตกับความหยาบผิวของวัสดุพื้น [5]

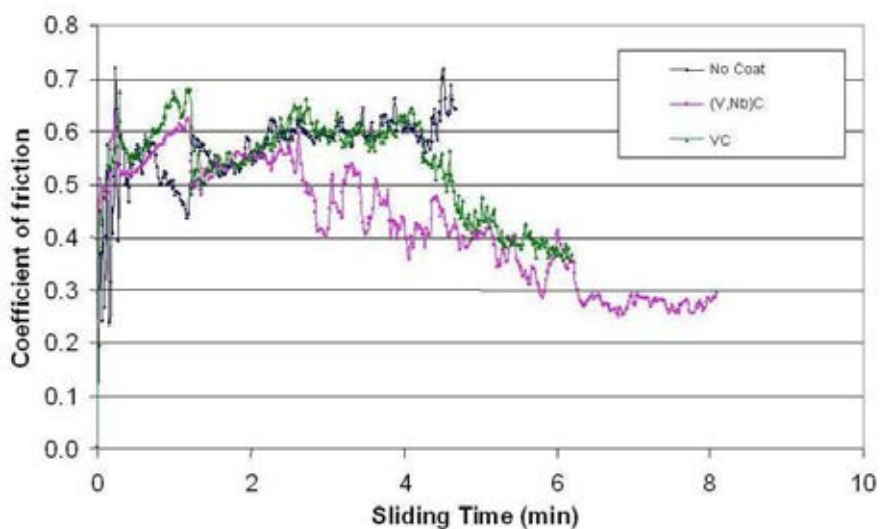
J. F. Braza [6] ทดสอบการสึกหรอของชั้นเคลือบ 3 ชนิด คือ วาเนเดียมคาร์ไบด์ (VC) ทินได้นโครม (TDC) และไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 52100 และ M50 ทดสอบการสึกหรอโดยใช้สารหล่อลื่น ให้ความเร็วการไถลคองที่ เริ่มให้แรงกดและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งชั้นเคลือบเกิดความเสียหาย พบว่าชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์สามารถรับแรงกดได้มากที่สุดคือ 2224.0 นิวตัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.050 - 0.055 ดังแสดงในภาพที่ 2.6

ตารางที่ 2.1 ขนาดของแรงกดที่ทำให้ชั้นเคลือบเสียหาย (นิวตัน) [6]

วัสดุพื้น	ชนิดของชั้นเคลือบ			
	ไม่ได้เคลือบ	VC	TDC	TiN
M50	1334.4	2224.0	-	2001.6
52100	667.2	-	1334.4	1334.4



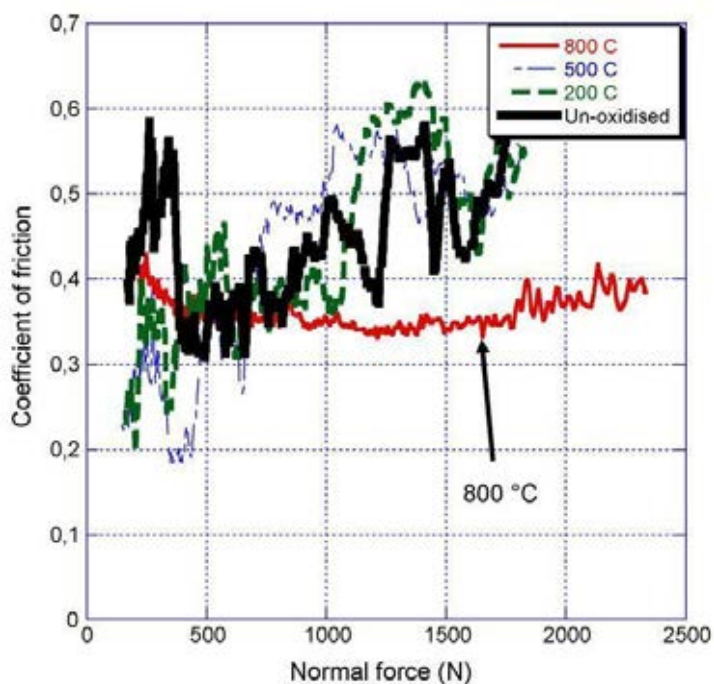
ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับแรงกดสำหรับชั้นเคลือบชนิดต่างๆ [6]



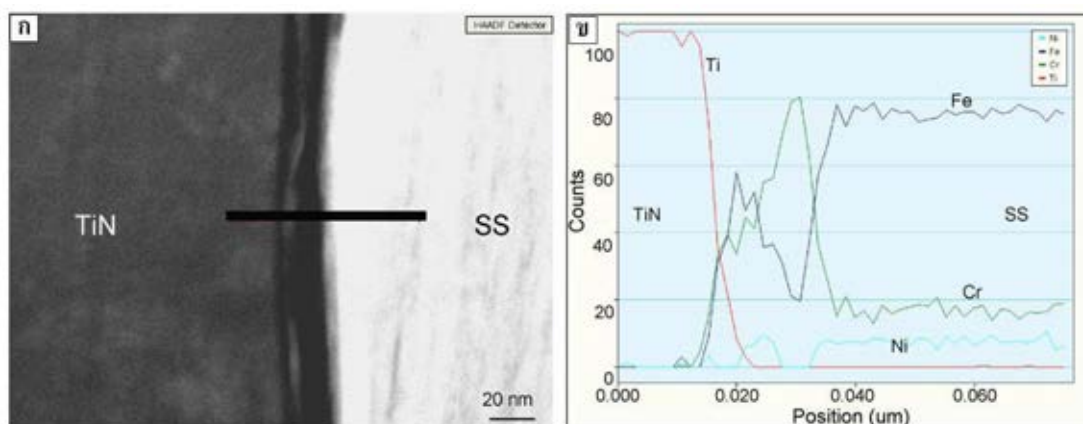
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาในการไถลสำหรับดิสก์ที่ไม่ได้เคลือบ, ดิสก์เคลือบด้วย VC และ (V,Nb)C [7]

Magnus Hanson และคณะ [1] ศึกษาการสึกหรอแบบเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกกับชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ โดยก่อนนำไปทดสอบการสึกหรอจะให้ความร้อนทำให้เกิดการออกซิไดซ์กับเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 200, 500 และ 800°C รวมทั้งนำเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ถูกออกซิไดซ์มาทดสอบด้วย พบว่ากรณีเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800°C ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สม่ำเสมอและต่ำในช่วง 0.3 - 0.4 ส่วนในกรณีอื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ไม่สม่ำเสมอและสูงขึ้นเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.9

เมื่อพิจารณาบริเวณรอยต่อที่เกิดการเกาะติดกรณีเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ถูกออกซิไดซ์พบว่าบริเวณนี้มีออกซิเจนอยู่มาก เมื่อพิจารณาจาก EDS line scan พบว่าบริเวณดังกล่าวเป็นการผสมกันของเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์มีความหนาประมาณ 20 นาโนเมตร โดยจะเป็นบริเวณที่มีเหล็กมากตรงกลางของชั้นออกไซด์ประมาณ 5 นาโนเมตร ระหว่างชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์และเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีเกาะติดบนชั้นเคลือบดังแสดงในภาพที่ 2.10

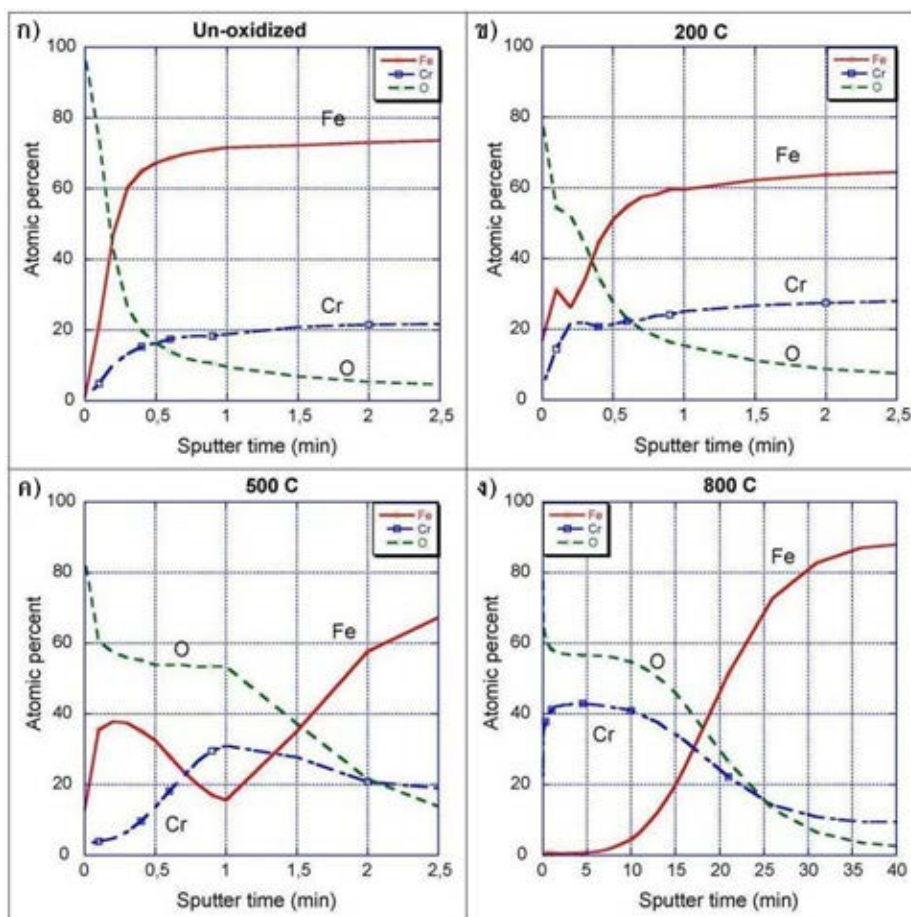


ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับแรงกด ในการทดสอบการสึกหรอของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนตรายด์กับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ถูกและถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 200, 500 และ 800°C [1]



ภาพที่ 2.10 (ก) บริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนตรายด์และเหล็กกล้าไร้สนิมที่มาเกาะติดหลังทดสอบการสึกหรอ (ข) แสดงผลของ EDS line scan ตามเส้นสีดำของภาพ (ก) [1]

เมื่อวิเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมก่อนทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง ESCA พบว่ากรณีเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800°C ที่ผิวจะมีปริมาณโครเมียมมากแต่มีปริมาณเหล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากกรณีอื่นที่มีปริมาณเหล็กมากแต่มีปริมาณโครเมียมน้อย เมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่ความลึกลงไปจากผิวพบว่า ปริมาณโครเมียมจะมากกว่าเหล็กเมื่ออุณหภูมิออกซิไดซ์มากกว่า 500°C ก็คือกรณีเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800°C ดังแสดงในภาพที่ 2.11 และยังมีความหนาของชั้นออกไซด์ที่มากประมาณ 100 - 200 นาโนเมตร ซึ่งมากกว่ากรณีอื่นๆ จึงเป็นข้อสังเกตว่าการที่ชั้นออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมมีความหนาที่มากหรือมีปริมาณโครเมียมสูง หรือเหตุผลทั้งสองอย่างนั้นจะช่วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำและสม่ำเสมอ ช่วยลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมไปสู่ชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ได้

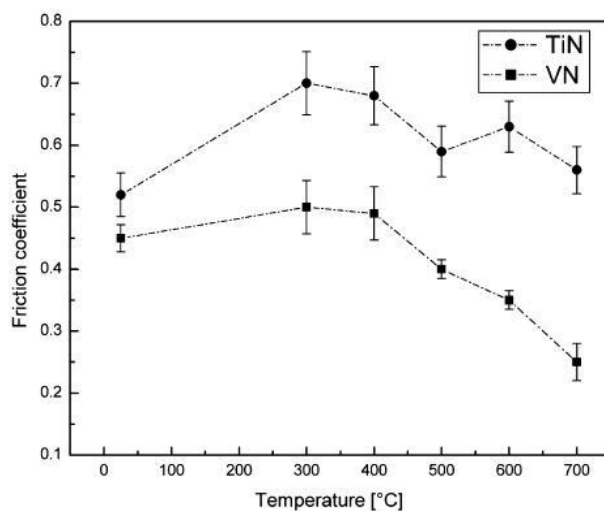


ภาพที่ 2.11 ปริมาณธาตุที่ลึกลงไปจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ (ก) ไม่ถูกออกซิไดซ์ (ข) ถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 200°C (ค) 500°C และ (ง) 800°C โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESCA ก่อนทดสอบการสึกหรอ [1]

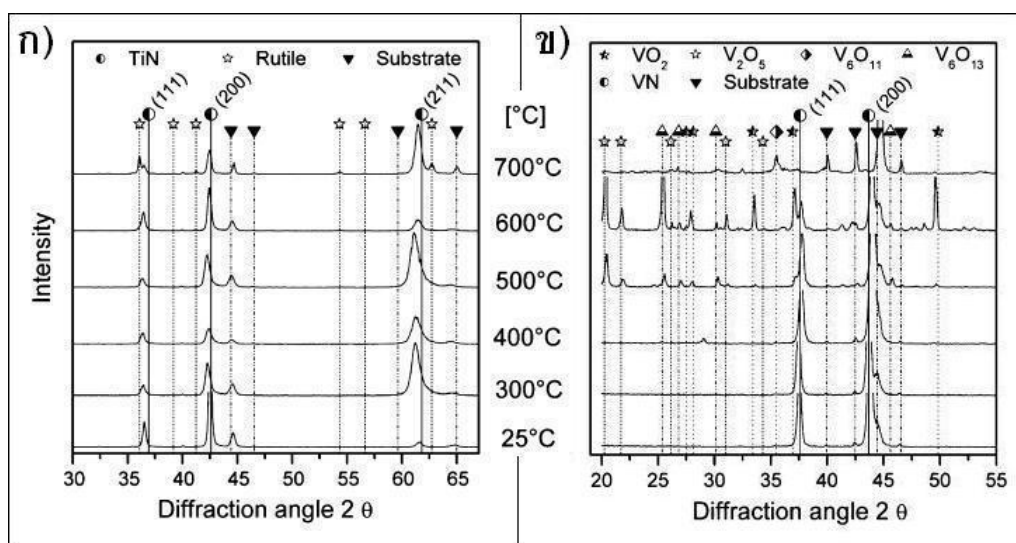
N. Fateh และคณะ [8] ศึกษาอิทธิพลการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงต่อการพฤติกรรมการเกาะติดบนชั้นเคลือบ TiN และ VN ด้วยเครื่อง CSM high-temperature tribometer ใช้บอลอะลูมินาเป็นคู่สัมผัสการไถล แรงกด 5 นิวตัน ความเร็วการไถล 0.1 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 100 เมตร ไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยแปรผันอุณหภูมิในการทดสอบการสึกหรอตั้งแต่ 25 - 700°C กรณีชั้นเคลือบ VN พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่มีค่าลดลงตั้งแต่อุณหภูมิ 400°C เป็นต้นไปจนเหลือ 0.25 ที่อุณหภูมิ 700°C แต่กรณีชั้นเคลือบ TiN ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนั้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 - 0.7 ซึ่งสูงกว่าชั้นเคลือบ VN ตลอดทุกอุณหภูมิในการทดลองดังแสดงในภาพที่ 2.12

เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD กรณีชั้นเคลือบ TiN โครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงอุณหภูมิ 600°C เมื่ออุณหภูมิ 700°C จึงเกิดพีคของ TiO_2 (rutile) ขึ้น แต่โครงสร้างดังกล่าวไม่ได้ช่วยให้ปรับปรุงการสึกหรอมากนัก กรณีชั้นเคลือบ VN เริ่มเกิดพีคของ V_2O_5 , VO_2 และออกไซด์ชนิดอื่นที่อุณหภูมิ 500°C แต่เมื่ออุณหภูมิ 700°C พีคของ VN และ V_2O_5 ก็หายไป ดังแสดงในภาพที่ 2.13

โดย V_2O_5 เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนของชั้นเคลือบ VN ก่อนทดสอบการสึกหรอ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC พบว่าเริ่มเกิด V_2O_5 ที่อุณหภูมิ 500°C ซึ่งการมีอยู่ของ V_2O_5 ที่ลักษณะโครงสร้างของออกไซด์มีแรงเฉือน (shear strength) ต่ำ ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง (solid lubricant) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดต่ำลง ส่วนกรณีที่อุณหภูมิ 700°C ไม่พบพีคของ V_2O_5 นั้น เป็นเพราะ V_2O_5 มีจุดหลอมเหลวที่ 685°C ทำให้เกิดการหลอมเหลวไป ส่งผลให้ V_2O_5 ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นเหลว (liquid lubricant) มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเหลือ 0.25

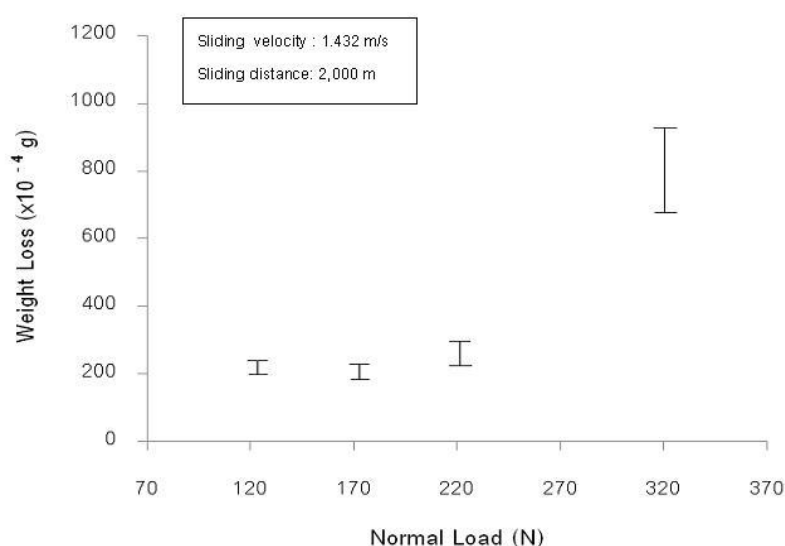


ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับอุณหภูมิในการทดสอบ สำหรับชั้นเคลือบ TiN และ VN [8]

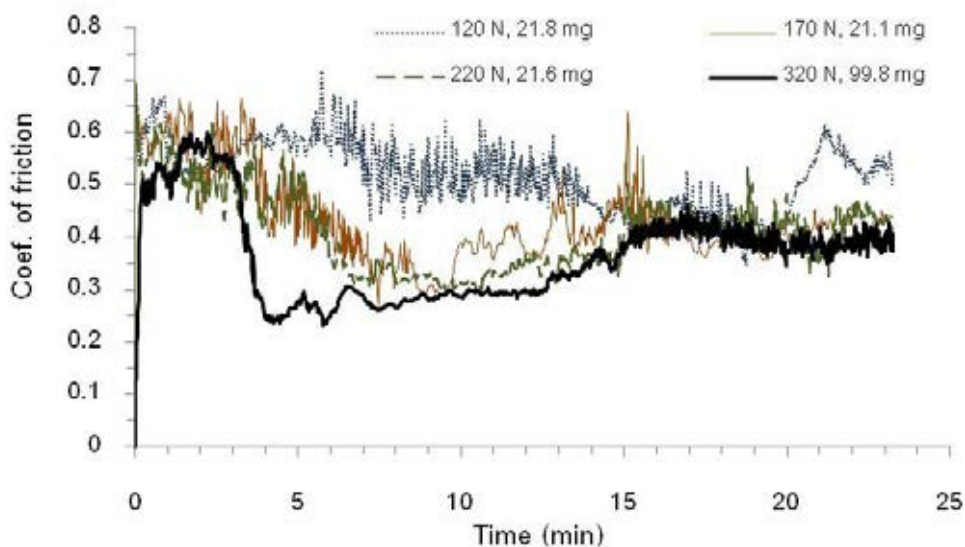


ภาพที่ 2.13 ผลวิเคราะห์ด้วย XRD สำหรับชั้นเคลือบ (ก) TiN และ (ข) VN ที่อุณหภูมิต่างๆ [8]

รัชตพล ผิวนิ่ม [3] ศึกษาพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการ TRD ชุบแข็งด้วยน้ำมันและอบคืนตัวในเตาที่ควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซเฉื่อย ทดสอบการสึกหรอโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องทดสอบแบบ ring-on-disc ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เป็นคู่สัมผัสการไถลกับชั้นเคลือบ VC ที่เคลือบบนเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 แปรผันแรงกด 120 ถึง 320 นิวตัน พบว่าเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นจาก 120 ถึง 220 นิวตัน น้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีค่าประมาณ 22 - 24 มิลลิกรัม แต่เมื่อแรงกดเป็น 320 นิวตัน น้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 85 มิลลิกรัม ดังแสดงในภาพที่ 2.14 แต่เมื่อสังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายพบว่าที่แรงกด 320 นิวตัน ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ต่ำอยู่ในช่วง 0.25 - 0.30 ในช่วงเวลานาทีที่ 4 - 13 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณีแรงกดอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมกับแรงกด [3]



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเวลาในการไถล [3]

กรณีแรงกด 320 นิวตันเมื่อวิเคราะห์ผิววงแหวนด้วยเครื่องวิเคราะห์ XPS พบว่าเกิดออกไซด์ของโครเมียมและออกไซด์ของเหล็กขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ด้านภาคตัดขวางด้วยเครื่องวิเคราะห์ EPMA พบว่าชั้นออกไซด์ของโครเมียมมีความหนา 10 - 25 ไมครอน ที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งออกไซด์ของโครเมียมนั้นอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมลดลงรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดต่ำลงอีกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังพบว่าเกิดการสูญเสียของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างมากที่แรงกดสูง จึงทำให้ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิม และนำมาปรับปรุงชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์เพื่อลดการสูญเสียของเหล็กกล้าไร้สนิมให้น้อยลง รวมทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

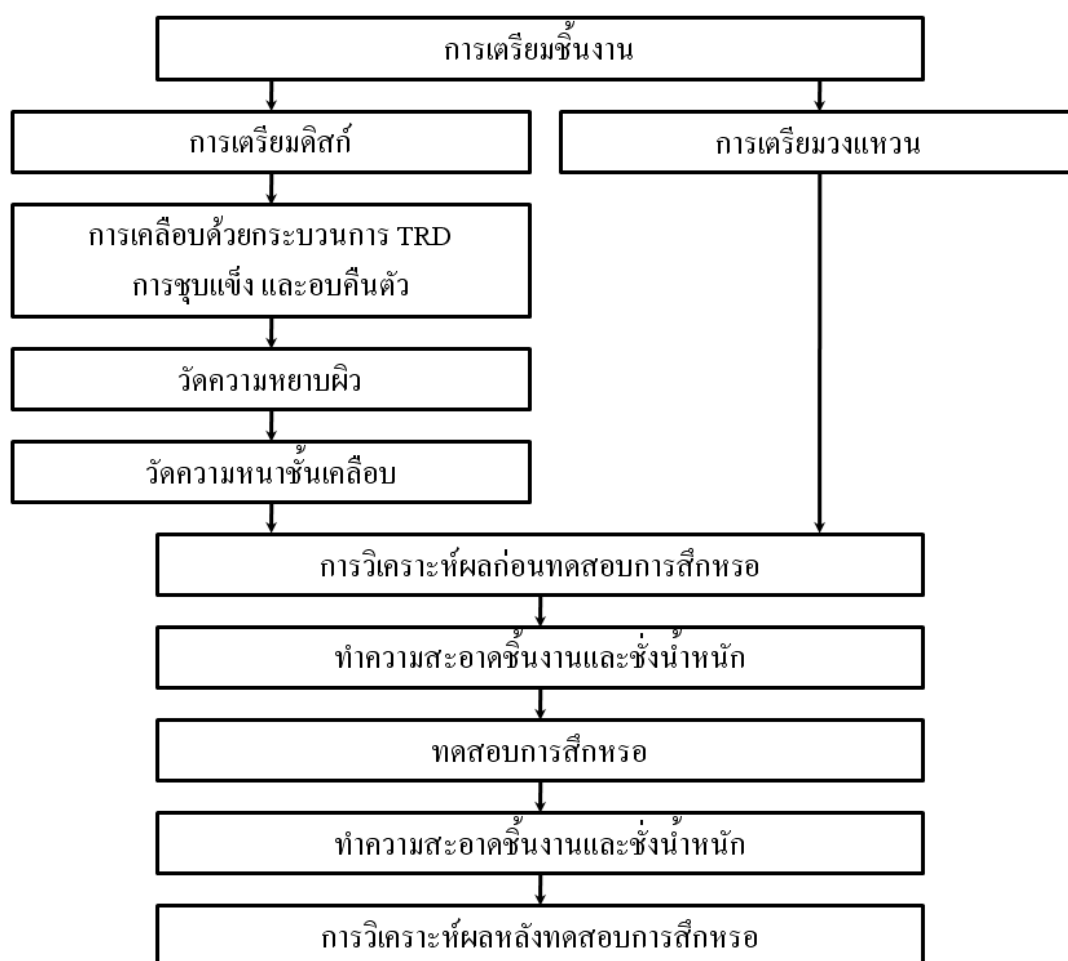
- 3.1.1 เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 เป็นดิสก์
- 3.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 เป็นวงแหวนคู่สัมผัสการไหล
- 3.1.3 เกลือบอบแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารที่ใช้เป็นตัวทำละลาย
- 3.1.4 วาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) เป็นสารฟอรัมคาร์ไบด์
- 3.1.5 โบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) เป็นตัวรีดิวซ์
- 3.1.6 น้ำมันชุบแข็งชนิด Master Quench A

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เตา muffle สำหรับให้ความร้อนในการเคลือบด้วยกระบวนการ TRD
- 3.2.2 ภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (18-10 Stainless steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ใช้เป็นภาชนะในการเคลือบ
- 3.2.3 ลวดทนความร้อน สำหรับผูกชิ้นงานเข้าเตา muffle
- 3.2.4 เทอร์โมคัปเปิล สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา muffle
- 3.2.5 เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Tester)
- 3.2.6 เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.2.7 เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Friction Wear Tester EFM III-1010) แบบ ring-on-disc
- 3.2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)
- 3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- 3.2.10 เครื่อง Electron Probe Micro Analysis (EPMA)
- 3.2.11 เครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในขั้นตอนแรกต้องทำการเตรียมผิวดิสก์ก่อนเพราะความหยาบผิวของวัสดุพื้นนั้นจะส่งผลต่อความหยาบผิวของชั้นเคลือบด้วย หลังจากนั้นจึงเคลือบดิสก์ด้วยกระบวนการที่อาร์ดี ชูบแข็ง และอบคืนตัว แล้วทดสอบการสึกหรอระหว่างดิสก์และวงแหวนตามเงื่อนไขที่กำหนด และวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานดิสก์และวงแหวน

3.3.1.1 เตรียมดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 46 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร และเจาะรู ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (ก)

3.3.1.2 ขัดผิวดิสก์ด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ P1200

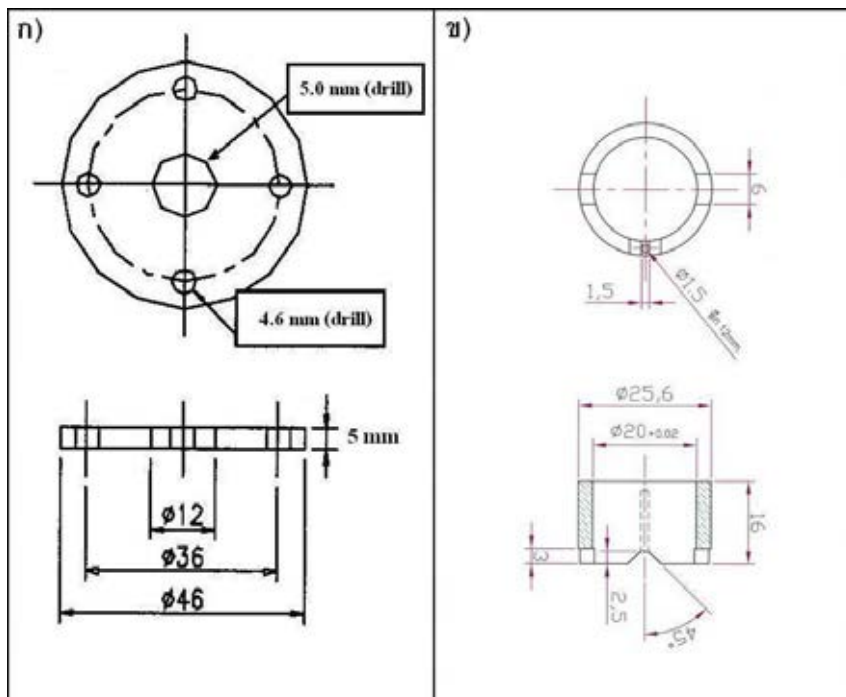
3.3.1.3 เตรียมวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกและด้านในเป็น 25.6 และ 20.00 ± 0.021 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความสูงเป็น 16 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (ข) และเจาะรูเสียบเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างทดสอบการสึกหรอ ดังแสดงในภาพที่ 3.3

3.3.1.4 ขัดผิววงแหวนด้วยกระดาษทรายเบอร์ P1200

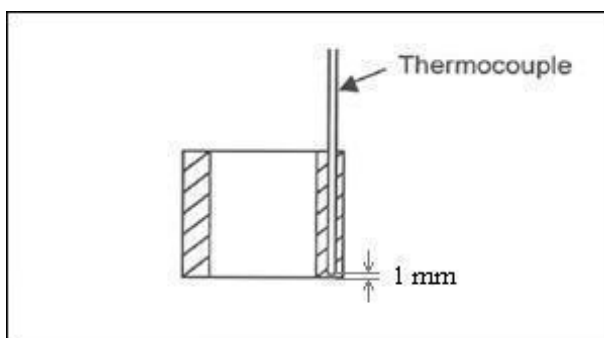
3.3.1.5 ทำความสะอาดดิสก์และวงแหวนในสารอะซิโตน (acetone) ด้วยเครื่อง Supersonic cleaning

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 (modified SKD11) เฟอร์เรนตีโดยน้ำหนัก

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
0.93	1.03	0.41	0.016	< 0.001	6.82	1.99	0.09	0.07	0.25	Bal.



ภาพที่ 3.2 แบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองของ (ก) ดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น DC53 และ (ข) วงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [9]



ภาพที่ 3.3 บริเวณที่เสียบเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิขณะทำการทดสอบของวงแหวน [9]

3.3.2 การเคลือบดิสก์ด้วยกระบวนการทีอาร์ดี การชุบแข็ง และอบคืนตัว

3.3.2.1 เติมน้ำหนัก 780 กรัม ลงในเตาเหล็กกล้าไร้สนิม ให้ความร้อนเตา muffle จนมีอุณหภูมิ 1000°C เติมน้ำหนัก V_2O_5 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ B_4C 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในเตาเหล็กกล้าไร้สนิมพร้อมกันและกวนให้สารเคมีกระจายตัวในบอแรกซ์หลอมเหลว

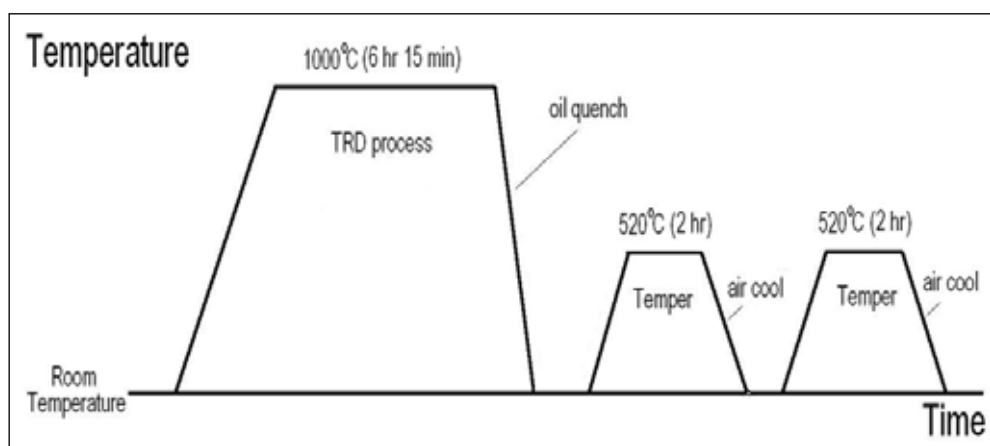
3.3.2.2 ใส่ชิ้นงานลงในเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อถึงอุณหภูมิ 1000°C จึงเริ่มจับเวลาในการเคลือบเป็น 6 ชั่วโมง 15 นาที ดังแสดงในภาพที่ 3.4

3.3.2.3 เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำชิ้นงานออกจากเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิม ชุบแข็งในน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง นำไปต้มในน้ำเดือดเพื่อล้างคราบเกลือบอแรกซ์ที่ติดผิวชิ้นงาน

3.3.2.4 นำชิ้นงานไปอบคืนตัว 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ควบคุมบรรยากาศที่ผ่านเข้าเตาอบชิ้นงาน และเย็นตัวในอากาศ

3.3.2.5 ชัดผิวชิ้นงานด้วยอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน

3.3.2.6 วัดความหนาของชั้นเคลือบ และ วัดความหยาบผิว (Ra)



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการการเคลือบดิสก์ด้วยกระบวนการ TRD ชุบแข็ง และอบคืนตัว

3.3.3 ทดสอบการสึกหรอ

3.3.3.1 ทำความสะอาดดิสก์และวงแหวนในสารอะซิโตนด้วยเครื่อง Supersonic cleaning

3.3.3.2 ชั่งน้ำหนักดิสก์และวงแหวนก่อนทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

3.3.3.3 นำชิ้นงานดิสก์และวงแหวนเข้าเครื่องทดสอบการสึกหรอ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 เสียบเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับวงแหวนที่กำหนดให้อยู่กับที่ตลอดการทดสอบ ในขณะที่ชิ้นงานดิสก์เป็นส่วนหมุนตามระยะทางไกลที่กำหนด ลักษณะการวางชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 3.6 แบบจำลองแสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังแสดงในภาพที่ 3.7 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากสมการ 3.1 และ 3.2

$$f = \frac{FR}{r} \quad (3.1)$$

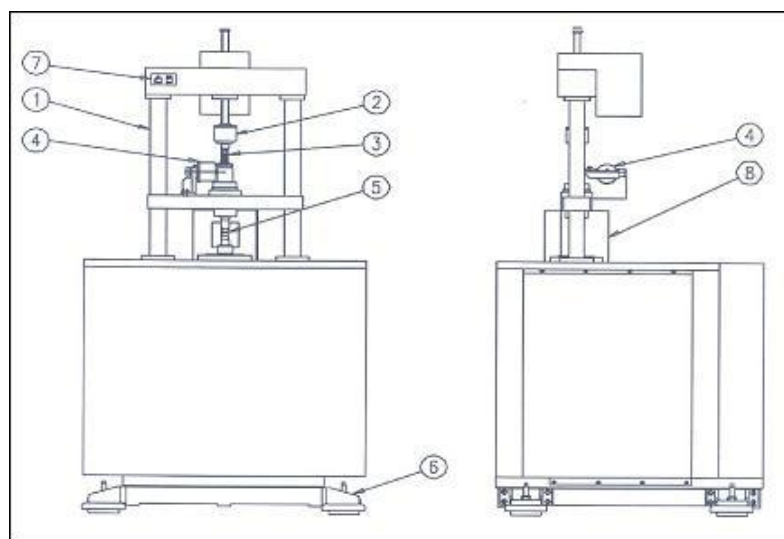
$$\mu = \frac{f}{W} = \frac{FR}{Wr} \quad (3.2)$$

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน f คือ แรงเสียดทาน
 F คือ แรงที่อ่านได้จาก load cell W คือ แรงกดตามแนวตั้ง
 R คือ ระยะ ob r คือ ระยะ oa

3.3.3.4 ทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แปรผันแรงกดที่ 120, 170, 220 และ 320 นิวตัน

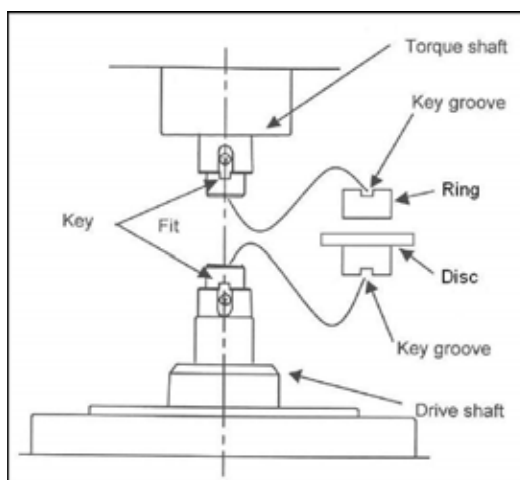
3.3.3.5 ทำความสะอาดดิสก์และวงแหวนในสารอะซิโตนด้วยเครื่อง Supersonic cleaning

3.3.3.6 ชั่งน้ำหนักดิสก์และวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

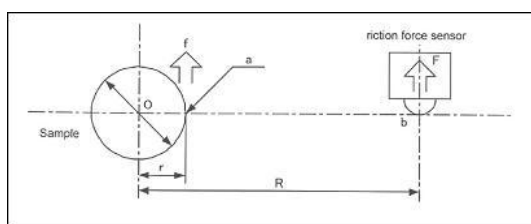


ภาพที่ 3.5 แบบเครื่องทดสอบการสึกหรอ [9]

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| (1) Support | (2) Pressuring load cell |
| (3) Pressurizing spring mechanism | (4) Friction load cell |
| (5) Test piece | (6) Vibration-proof seat |
| (7) Pressurizer UP/DOWN | (8) Safety cover |



ภาพที่ 3.6 แบบการวางชิ้นงานดิสก์และวงแหวนในการทดสอบการสึกหรอ [9]



ภาพที่ 3.7 แบบจำลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [9]

3.3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.4.1 ตัดชิ้นงานดิสก์และวงแหวนขึ้นรูปตัวเรือนแบบร้อนในภาคตัดขวาง ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย ขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา กัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลาย Nital 2% (HNO_3 2 มิลลิลิตร + ethanol 98 มิลลิลิตร) สำหรับชิ้นงานดิสก์ ส่วนชิ้นงานวงแหวนกัดผิวด้วยสารละลาย Marble (CuSO_4 4 กรัม + HCl 20 มิลลิลิตร + H_2O 20 มิลลิลิตร)

3.3.4.2 ดูการสึกหรอในภาคตัดขวางของวงแหวนด้วยกล้อง OM

3.3.4.3 ดูการเกาะติดบนผิวดิสก์ด้วยกล้อง SEM

3.3.4.4 วิเคราะห์ธาตุของภาคตัดขวางของวงแหวนด้วยเครื่อง EPMA

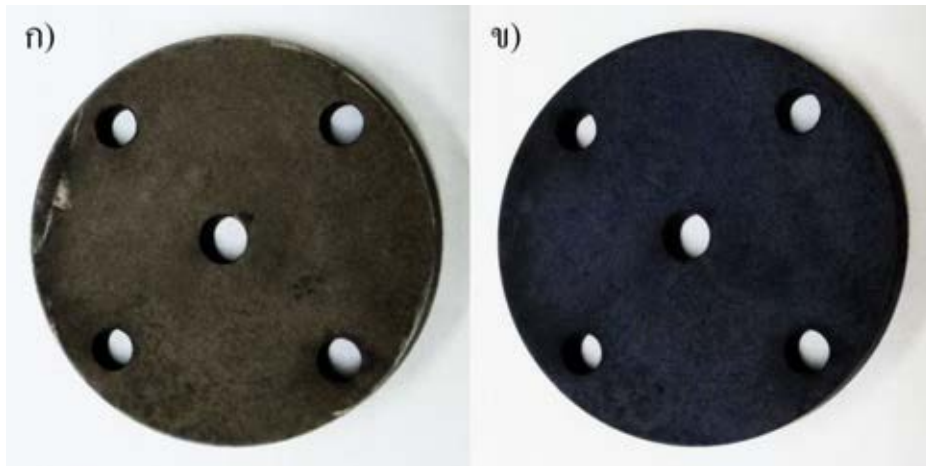
3.3.4.5 วิเคราะห์สารประกอบที่ผิวดิสก์ด้วยเครื่อง XPS

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

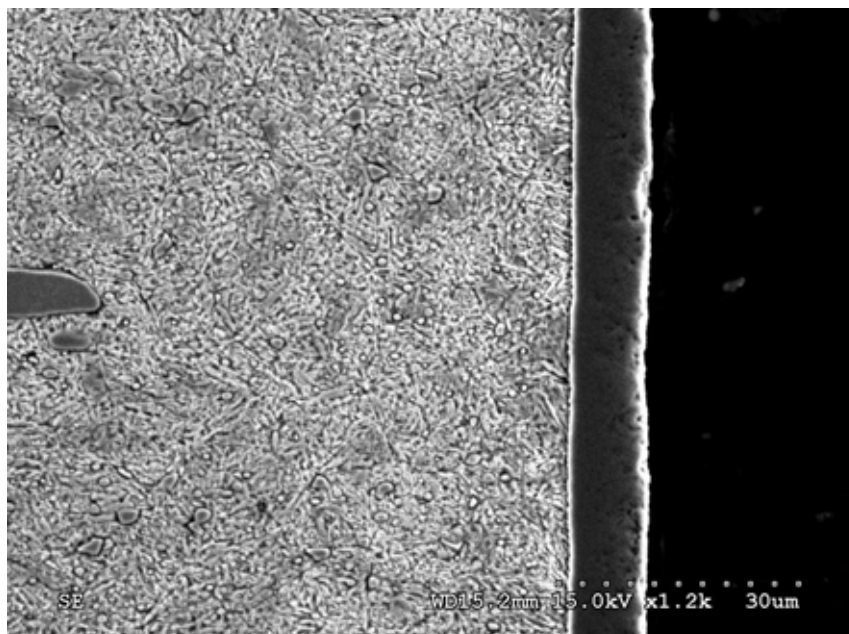
4.1 การเคลือบด้วยกระบวนการทีอาร์ดี

เมื่อสังเกตผิวดิสก์ที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการ TRD ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 15 นาที และชุบแข็งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง ผิวดิสก์เป็นสีเทา หลังอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ควบคุมบรรยากาศภายในเตา ผิวดิสก์เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มดังแสดงในภาพที่ 4.1 คาดว่าการเปลี่ยนสีที่ผิวดิสก์อาจเกิดจากการเกิดออกซิเดชันของผิวชั้นเคลือบระหว่างการอบคืนตัว



ภาพที่ 4.1 สีที่เปลี่ยนไปของผิวดิสก์ (ก) ก่อนอบคืนตัว และ (ข) หลังอบคืนตัว

หลังจากอบคืนตัวนำดิสก์ไปขัดผิวด้วยอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน วัดความหยาบผิวได้ค่าความหยาบผิว (Ra) มีขนาดไม่เกิน 0.15 ไมครอน นำดิสก์มาดูในภาคตัดขวางพบว่าเกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่มีความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอมีค่า 7 - 9 ไมครอน ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ชนิดของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นนั้นอ้างอิงจากงานวิจัยของ มหินทร์ [10] ที่ทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ TRD ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ใช้ V_2O_5 และ B_4C เป็น 20 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ วิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วยเครื่อง XRD ชั้นเคลือบที่ได้เป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

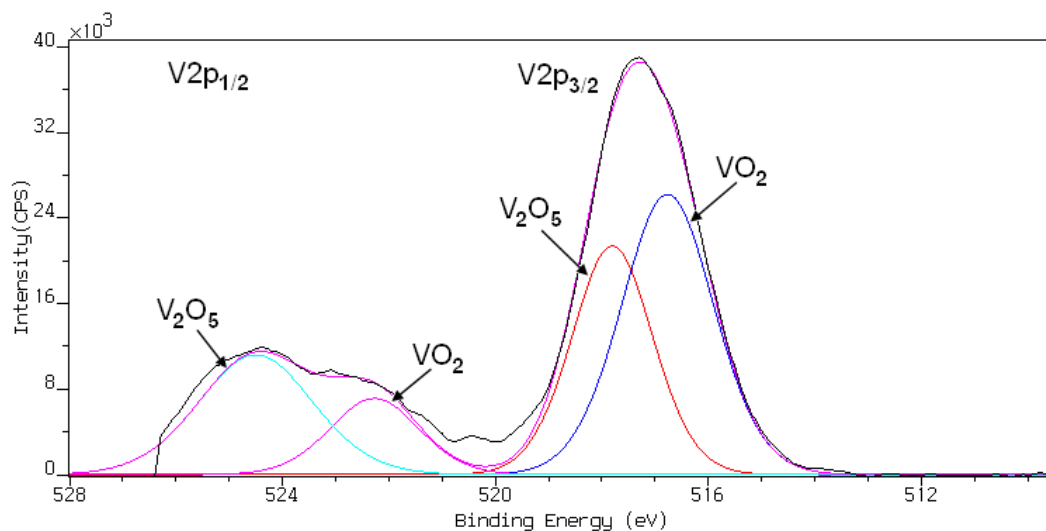


ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของดิสก์ที่เคลือบด้วยกระบวนการ TRD

4.2 ก่อนทดสอบการสึกหรอ

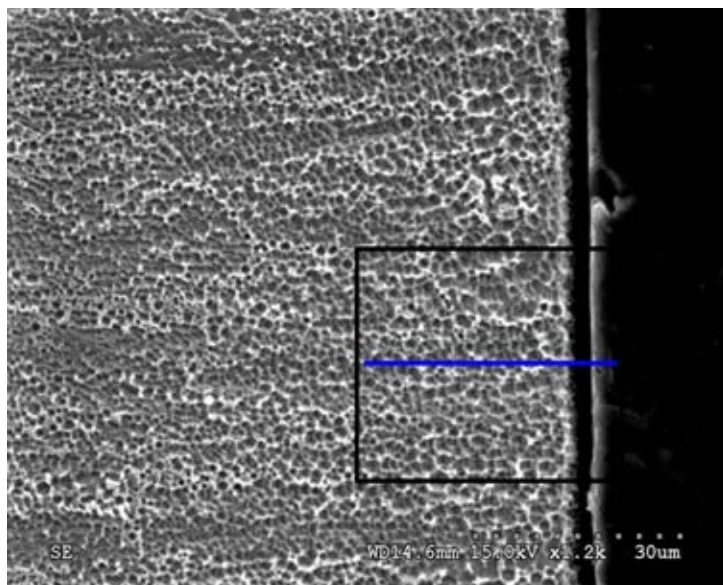
นำดิสก์ที่ผ่านการเคลือบและอบคืนตัวในอากาศมาวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นที่ผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ XPS เนื่องจากได้วิเคราะห์ผิวดิสก์ก่อนสับตัดเตอริงและหลังสับตัดเตอริงครั้งละ 60 วินาที เป็นจำนวน 10 รอบ พบว่าสเปกตรัม XPS ที่ได้ในแต่ละรอบมีค่าไม่แตกต่างกัน (ดังแสดงในภาพที่ ก.1 ในภาคผนวก) จึงแสดงผลวิเคราะห์เฉพาะที่สับตัดเตอริงเป็นเวลา 600 วินาทีเท่านั้น เมื่อสับตัดเตอริงเป็นเวลา 600 วินาที พบพีค $V2p_{3/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy, BE) เป็น 517.8 eV และพีค $V2p_{1/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 524.5 eV มีค่าใกล้เคียงกับวาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) [11] พบพีค $V2p_{3/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 516.7 eV และพีค $V2p_{1/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 522.2 eV มีค่าใกล้เคียงกับวาเนเดียมไดออกไซด์ (VO_2) [11] ดังแสดงในภาพที่ 4.3 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Manisha และคณะ [11] ที่กล่าวว่า V_2O_5 มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 517.27 eV และ 524.84 eV ในขณะที่ VO_2 มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 516.81 eV และ 522.25 eV เพราะฉะนั้นจึงยืนยันได้ว่าระหว่างการอบคืนตัวในอากาศที่อุณหภูมิ $520^\circ C$ ที่ผิวดิสก์เกิดวาเนเดียมออกไซด์ขึ้นบนชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ โดยชนิดของวาเนเดียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็น V_2O_5 และ VO_2 และในงานวิจัยนี้คาดว่าวาเนเดียมออกไซด์ที่ตั้งใจทำให้เกิดขึ้นระหว่างการอบคืนตัวมีความหนาแน่นมากกว่าวาเนเดียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่าง

การอบคืนตัวที่ควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซเฉื่อยภายในเตา muffle [3] ตามงานวิจัยที่มีการศึกษา มาก่อนหน้านี้แล้ว

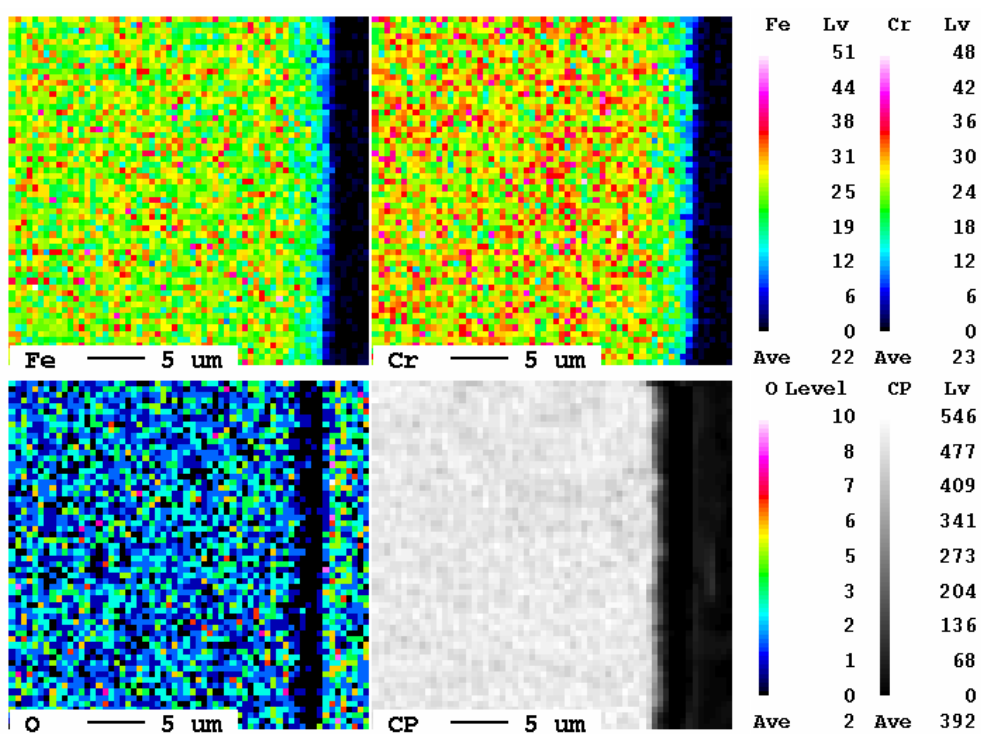


ภาพที่ 4.3 สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2}$ - $V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยวบนผิววัสดุ ก่อนทดสอบการสึกหรอ

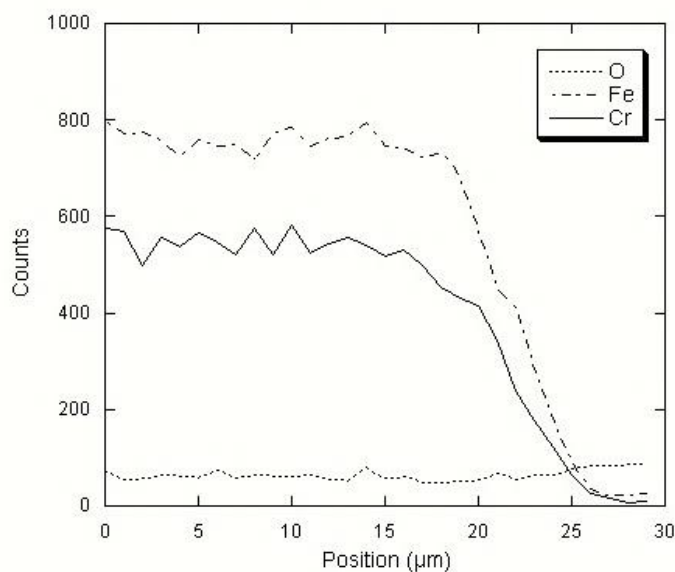
เมื่อนำวงแหวนที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ซึ่งเป็นคู่สัมผัสการไหลกับ วัสดุผิววิเคราะห์ภาคตัดขวางด้วยเครื่องวิเคราะห์ EPMA ก่อนทดสอบการสึกหรอพบว่าที่ผิวและ วัสดุพื้นไม่มีความแตกต่างมากนักดังแสดงในภาพที่ 4.4 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุใน บริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.4 พบว่าธาตุเหล็ก โครเมียม และออกซิเจน มีการกระจาย ตัวของแต่ละธาตุอย่างสม่ำเสมอดังแสดงในภาพที่ 4.5 และทำ line scan ตามเส้นสีน้ำเงินของ ภาพที่ 4.4 พบว่าธาตุเหล็กมีปริมาณมากกว่าโครเมียมโดยตลอดทั้งผิวและวัสดุพื้นดังแสดงใน ภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนก่อนทดสอบการลึกรอ



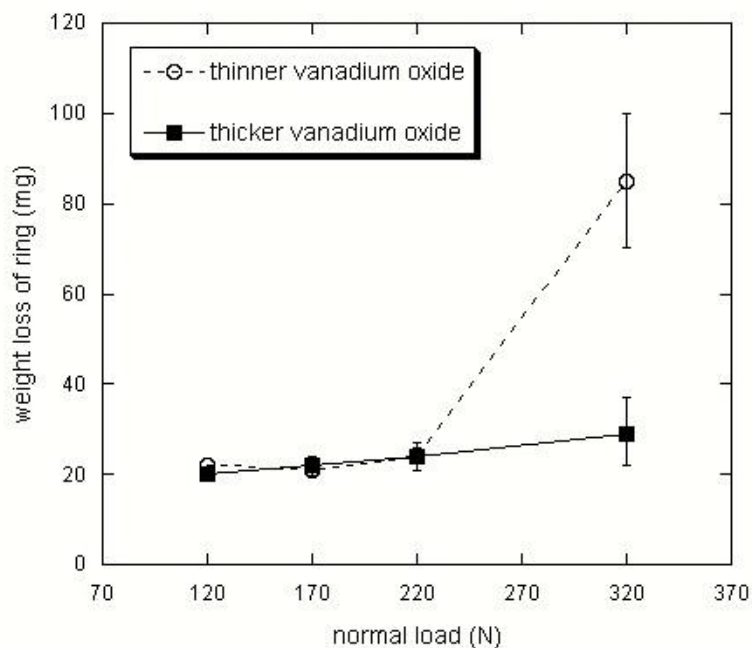
ภาพที่ 4.5 EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนก่อนทดสอบการลึกรอ ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.6 EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนก่อนทดสอบการสึกหรอ ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.4

4.3 หลังทดสอบการสึกหรอ

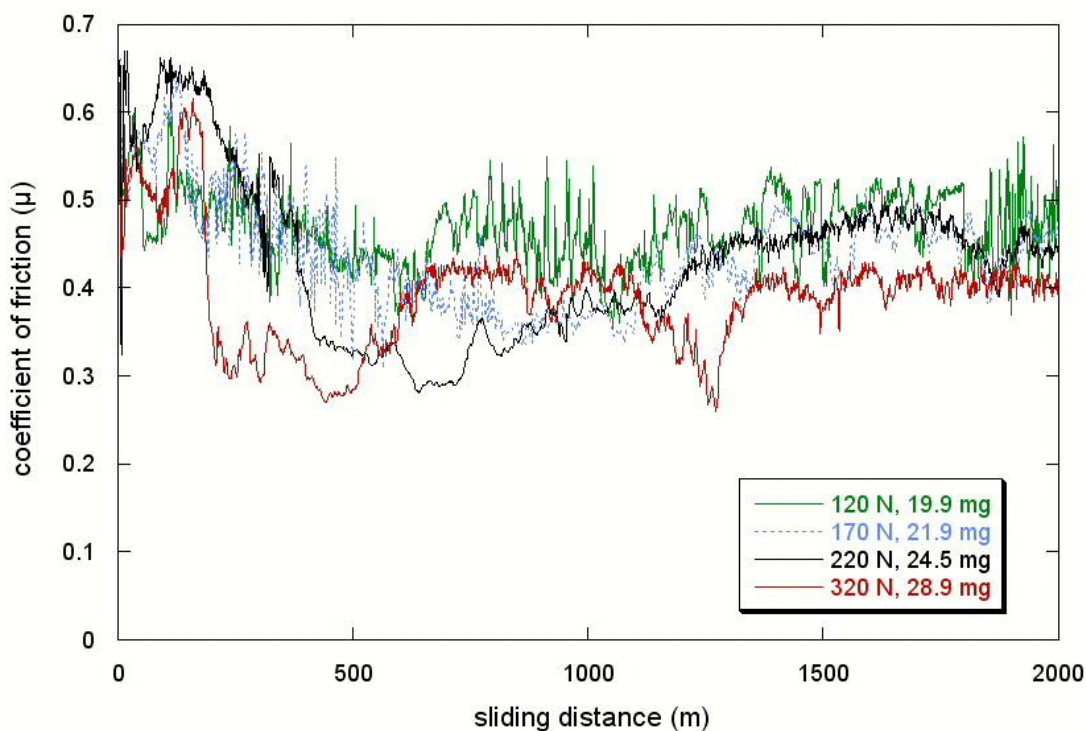
นำดิสก์และวงแหวนไปทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แปรผันแรงกด 120 ถึง 320 นิวตัน พบว่าน้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มมากขึ้นคือ แรงกด 120, 170, 220 และ 300 นิวตัน ให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนเป็น 19.9, 21.9, 24.5 และ 28.9 มิลลิกรัม ตามลำดับดังแสดงตามเส้นทึบในภาพที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบกับดิสก์ที่ถูกควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซเฉื่อยระหว่างการอบคืนตัว [3] น้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน แต่จะเพิ่มขึ้นสูงมากเป็น 85 มิลลิกรัม ที่แรงกด 320 นิวตัน ซึ่งมีค่ามากกว่าน้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนในงานวิจัยนี้เป็นอย่างมากดังแสดงตามเส้นประในภาพที่ 4.7 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความหนาของชั้นวานเนเดียมออกไซด์บนชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบคืนตัวมีค่ามากกว่า จึงทำให้เกิดการสูญเสียวงแหวนลดน้อยลง



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนกับแรงกด กรณีที่วาเนเดียมออกไซด์ มีความหนาน้อย [3] และความหนามาก

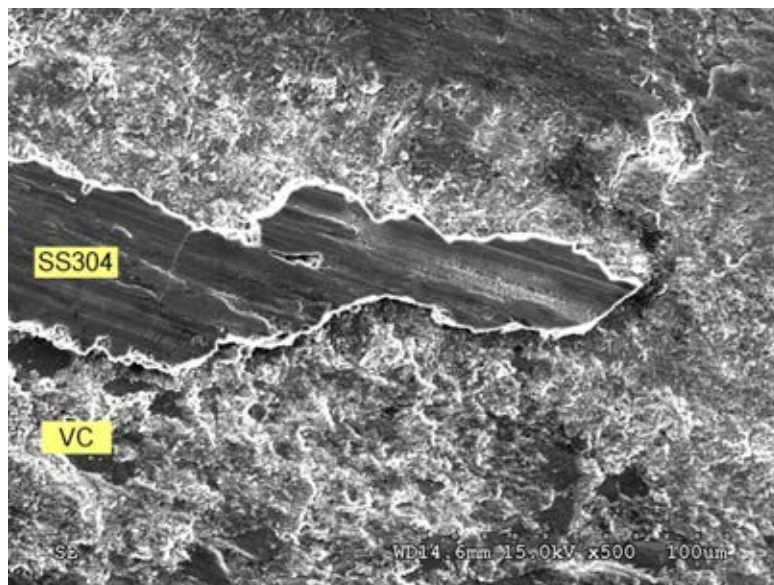
พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่แรงกดต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 โดยแรงกด 120 นิวตัน แสดงเป็นกราฟเส้นสีเขียว ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าสูงเป็น 0.60 ตั้งแต่เริ่มการไถลแล้วลดลงเป็น 0.40 ที่ระยะทางไถล 600 เมตร หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.40 - 0.55 จนถึงระยะทางไถล แรงกด 170 นิวตัน แสดงเป็นกราฟเส้นสีฟ้า ในช่วงระยะทางไถล 120 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.65 และค่อยๆ ลดต่ำลงเป็น 0.34 ที่ระยะทางไถล 800 เมตร และมีค่าประมาณ 0.34 - 0.40 จนถึงระยะทางไถล 1100 เมตร หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.40 - 0.50 จนถึงระยะทางไถล แรงกด 220 นิวตัน แสดงเป็นกราฟเส้นสีดำ ในช่วงระยะทางไถล 200 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าสูงประมาณ 0.65 และค่อยๆ ลดต่ำลงเป็น 0.30 ที่ระยะทางไถล 610 เมตร และค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.40 ที่ระยะทางไถล 1200 เมตร หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.40 - 0.50 จนถึงระยะทางไถล แรงกด 320 นิวตัน แสดงเป็นกราฟเส้นสีแดง ในช่วงระยะทางไถล 150 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าสูงประมาณ 0.60 และลดต่ำลงเป็น 0.30 ที่ระยะทางไถล 225 เมตร และมีค่าประมาณ 0.30 - 0.35 จนถึงระยะทางไถล 500 เมตร หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจึงเพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 0.41 ที่ระยะทางไถล 615 เมตร และมีค่อนข้างคงที่จนถึงระยะทางไถล พบว่าเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีแนวโน้มลดต่ำลง

ที่แรงกดสูง 320 นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงในช่วงแรกและลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว แตกต่างจากที่แรงกดต่ำ 120 นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงในช่วงแรกและค่อยๆ ลดต่ำลง อาจเป็นเพราะผิววงแหวนเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในช่วงที่ลดต่ำลงของแต่ละแรงกด อาจส่งผลให้ลดการสูญเสียเนื้อของวงแหวนลงได้



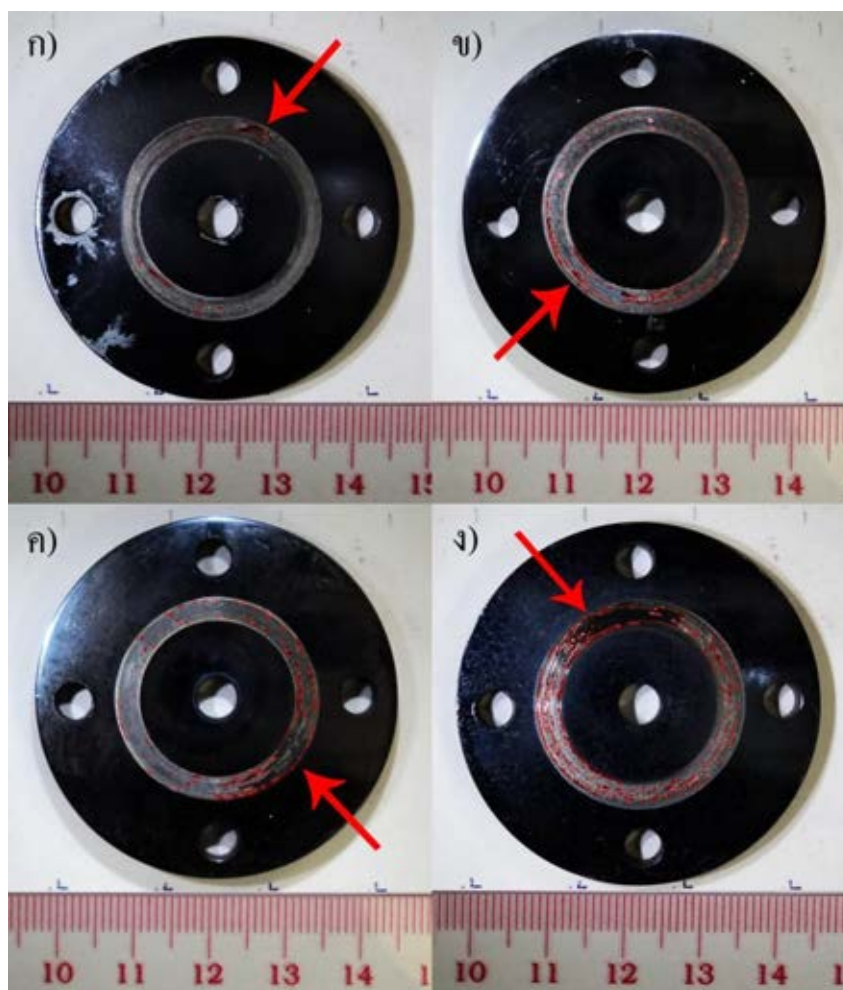
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับระยะทางไถลที่แรงกดต่างๆ

พิจารณาบริเวณร่องสึกหรอ (wear track) ของดิสก์ด้วยกล้อง SEM พบการเกาะติดบนผิวดิสก์ เมื่ออ้างอิงจากงานวิจัยของ รัชตพล [3] กล่าวว่าส่วนที่มาเกาะบนผิวดิสก์เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA คือส่วนของวงแหวนหรือเหล็กกล้าไร้สนิมที่หลุดออกมาระหว่างการไถลและมาเกาะติดบนผิวดิสก์ แสดงให้เห็นว่าดิสก์ที่ไถลคู่กับวงแหวนที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แรงกด 320 นิวตัน เกิดการสึกหรอแบบเกาะติด ดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวดิสก์ที่แรงกด 320 นิวตัน

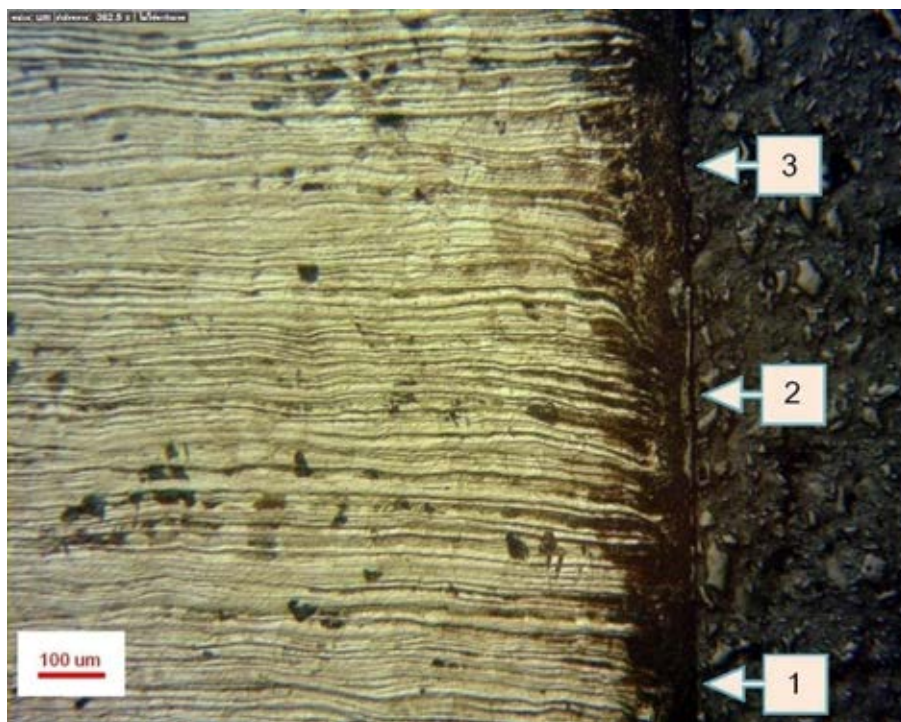
การเกาะติดลักษณะนี้เกิดขึ้นกับแรงกดทุกค่าที่ได้ทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.10 พบว่าที่แรงกดต่ำพื้นที่การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นพื้นที่การเกาะติดก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน พื้นที่การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวดิสก์ที่แรงกด 120, 170, 220 และ 300 นิวตัน มีค่าประมาณ 6, 17, 49 และ 74 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่บริเวณ wear track ตามลำดับ ในระหว่างการไถลดิสก์และวงแหวนได้รับแรงกดทำให้เกิดความเค้นสูงตลอดเวลา ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นเฉพาะจุดจนเกิด micro welding ทำให้เกิดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวดิสก์และบางส่วนเกิดฉีกขาดออกมาเป็นเศษวัสดุ (debris) ตามทิศทางการไถล บริเวณที่เกิดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมดังกล่าวมีโอกาสไปขูดทั้งผิวดิสก์และวงแหวน ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของวงแหวนเพิ่มขึ้นได้ ในกรณีแรงกด 320 นิวตัน พื้นที่การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนผิวดิสก์นั้นมีค่ามากที่สุด โอกาสที่บริเวณที่เกิดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมจะขูดเอาเนื้อของวงแหวนออกไปก็เกิดขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงสอดคล้องกับภาพที่ 4.7 ที่ว่าแรงกดสูงจะทำให้น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่ามากที่สุด



ภาพที่ 4.10 การเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่แรงกด (ก) 120 นิวตัน (ข) 170 นิวตัน (ค) 220 นิวตัน และ (ง) 320 นิวตัน

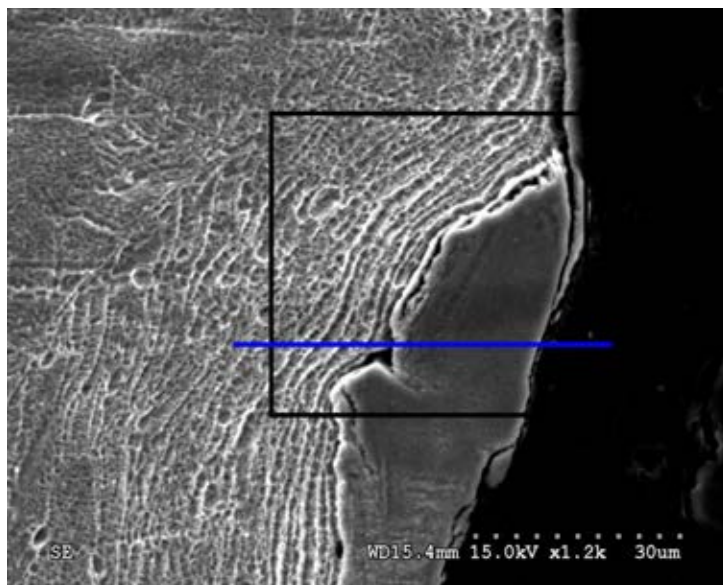
นำวงแหวนที่ถูกทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แรงกด 320 นิวตัน มาตัดในแนวตั้งฉากกับระนาบการไถล ดูภาคตัดขวางของวงแหวนด้วยกล้อง OM เปรียบเทียบกับวงแหวนก่อนทดสอบการสึกหรอ ที่ผิววงแหวนพบการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยมีลักษณะเป็นชั้นสีเทาที่ไม่ต่อเนื่องตลอดเส้นรอบวงของวงแหวน มีความหนาประมาณ 10 - 40 ไมครอน คาดว่าชั้นสีเทาที่เกิดขึ้นเหล่านี้เป็นชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการไถล ดังแสดงในภาพที่ 4.11 บริเวณหมายเลข 1 เป็นบริเวณที่ไม่เกิดขึ้นสีเทา (ดังแสดงในภาพที่ ข.1 ในภาคผนวก) บริเวณหมายเลข 2 เป็นบริเวณที่เกิดขึ้นสีเทา (ดังแสดงในภาพที่ ข.2 ในภาคผนวก) บริเวณหมายเลข 3 เป็นบริเวณที่เกิดการสูญไปของวงแหวน (ดังแสดงในภาพที่ ข.3 ในภาคผนวก)

เมื่อดูที่กำลังขยายสูงขึ้นไปพบว่ามี การแปรรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) เกิดขึ้นใต้ผิวของวงแหวน โดยเกิดจากผิววงแหวนได้รับแรงกระทำเป็นระยะเวลานานทำให้มีความเค้นสูงระหว่างการไหล บริเวณผิวเกิดการแปรรูปแบบพลาสติกเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับภายในชิ้นงาน หรือสังเกตได้จาก flow line ที่มีทิศทางเปลี่ยนไปตามทิศทางการไหล

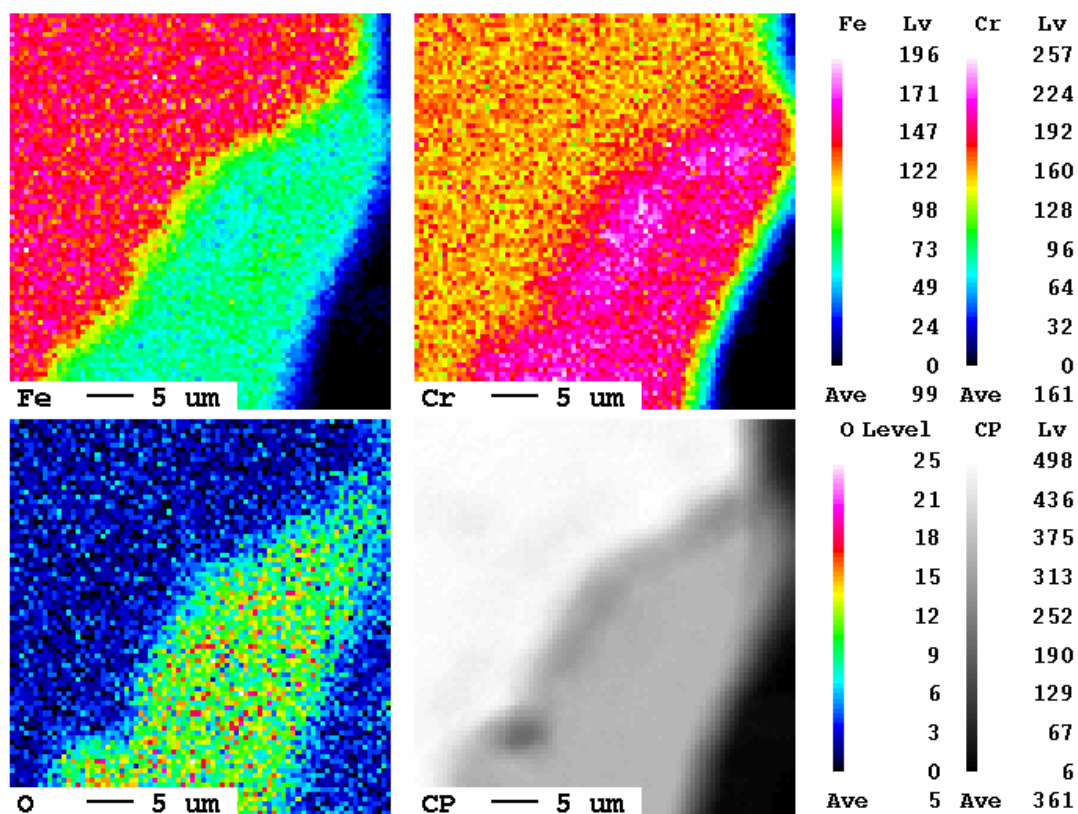


ภาพที่ 4.11 ภาพถ่าย OM ของภาคตัดขวางของวงแหวนที่เปลี่ยนแปลงหลังทดสอบการดึงหรือที่แรงกด 320 นิวตัน

นำวงแหวนที่ทดสอบการดึงหรือที่ความเร็วการไหล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไหล 2000 เมตร แรงกด 120 นิวตัน มาตัดในแนวตั้งฉากกับระนาบการไหล ดูภาคตัดขวางของวงแหวนด้วยกล้อง SEM ที่ผิวพบชั้นสีเทาที่ไม่ต่อเนื่องตลอดภาคตัดขวางของวงแหวน ดังแสดงในภาพที่ 4.12 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ EPMA ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.12 พบว่าเหล็ก โครเมียม และออกซิเจน มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอแสดงในภาพที่ 4.13 เมื่อพิจารณาที่ธาตุออกซิเจนพบว่ามีออกซิเจนเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่ผิววงแหวนเท่านั้น ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับชั้นสีเทาที่สังเกตได้จากการดูด้วยกล้อง OM ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และบริเวณดังกล่าวยังพบธาตุเหล็กและโครเมียมอยู่ด้วย จึงอาจสรุปได้ว่าลักษณะชั้นสีเทาคือชั้นออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่เกิดขึ้นที่ผิววงแหวนระหว่างการไหล

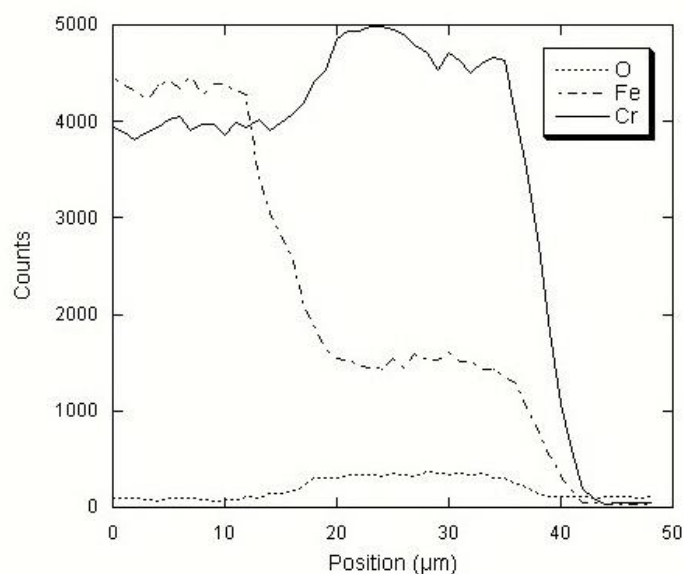


ภาพที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 120 นิวตัน



ภาพที่ 4.13 EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 120 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.12

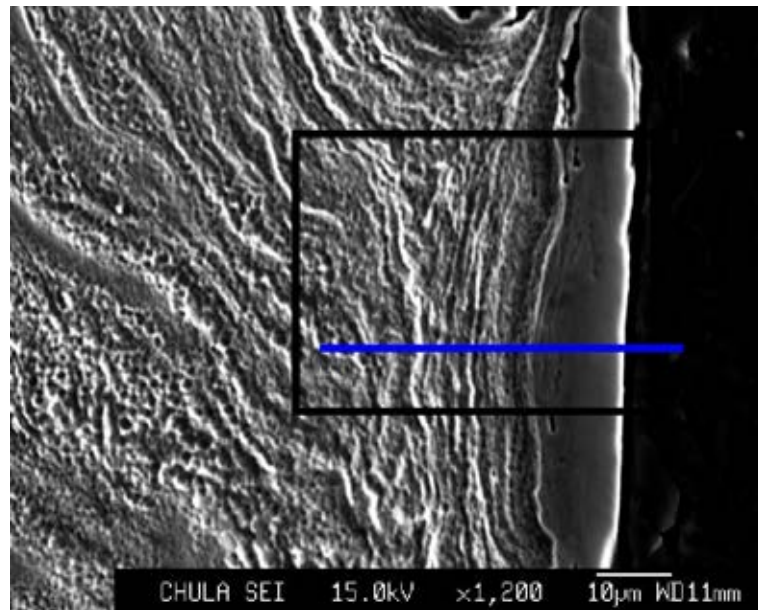
เมื่อทำ line scan ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.12 พบว่าบริเวณภายในวัสดุพื้นไม่มีธาตุออกซิเจนแต่มีธาตุเหล็กและโครเมียม ส่วนผิววงแหวนธาตุออกซิเจนมีปริมาณมากซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดชั้นออกไซด์ พิจารณาที่ธาตุเหล็กที่บริเวณชั้นออกไซด์ปริมาณเหล็กลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับภายในวัสดุพื้น ซึ่งแตกต่างจากธาตุโครเมียมที่บริเวณชั้นออกไซด์ ปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นมากกว่าภายในวัสดุพื้นดังแสดงในภาพที่ 4.14 กล่าวคือเกิดชั้นออกไซด์ที่ผสมกันของเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ โดยในชั้นออกไซด์มีปริมาณโครเมียมมาก



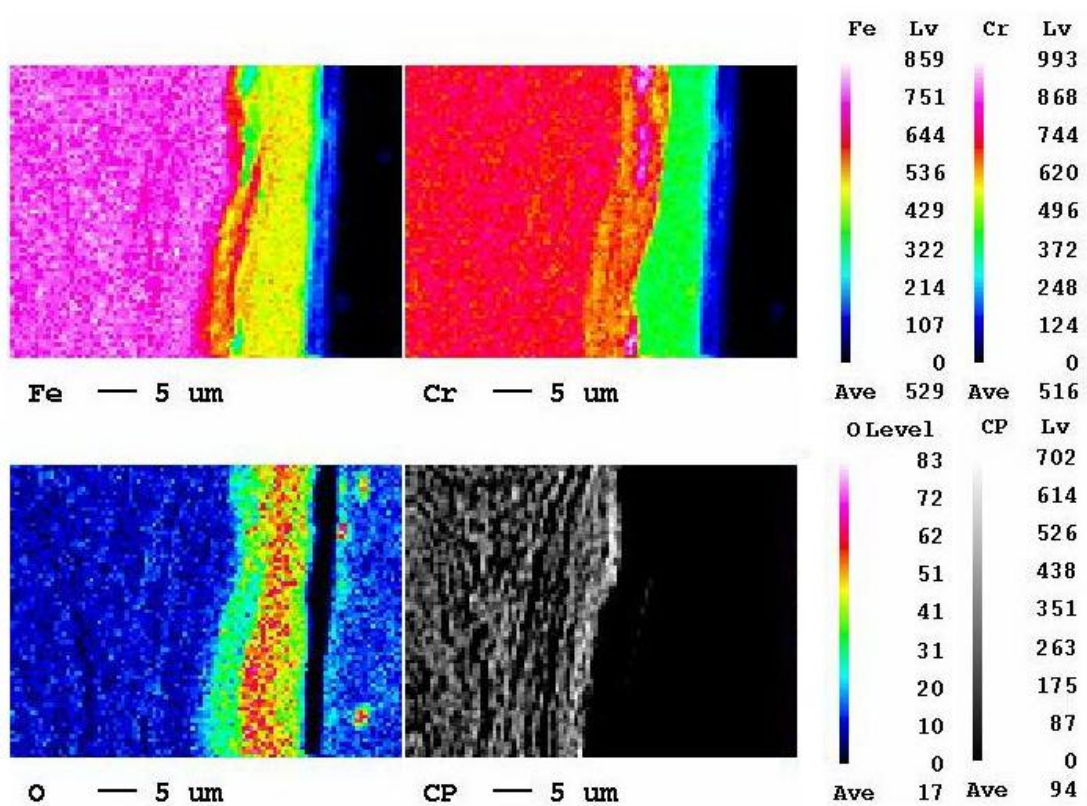
ภาพที่ 4.14 EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 120 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.12

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการไถลของวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมที่ระยะทางไถล 400 เมตร มีค่าเป็น 200°C และมีค่าอยู่ในช่วง $180 - 200^{\circ}\text{C}$ ที่ระยะทางไถล 400 - 1800 เมตร และเพิ่มขึ้นเป็น 220°C เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ดังแสดงในภาพที่ ค.1 ในภาคผนวก) ชั้นออกไซด์ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นชั้นออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่เกิดขึ้นระหว่างการไถล ซึ่งแตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 200°C ก่อนทดสอบการสึกหรอ ที่ผิวเกิดชั้นออกไซด์ที่มีปริมาณเหล็กมากกว่าโครเมียม ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800°C ก่อนทดสอบการสึกหรอ ที่ผิวเกิดชั้นออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมมากกว่าเหล็ก ซึ่งชั้นออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมมากกว่าเหล็กมีแนวโน้มลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ [1] ดังนั้นปริมาณโครเมียมที่มีมากในชั้นออกไซด์นั้นช่วยลดน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนลงได้ โดยค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนกรณีแรงกด 120 นิวตัน เป็น 19.9 มิลลิกรัม

นำวงแหวนที่ทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แรงกด 320 นิวตัน มาตัดในแนวตั้งฉากกับระนาบการไถล ดูภาคตัดขวางของวงแหวน ด้วยกล้อง SEM ที่ผิวพบชั้นสีเทาที่เกือบต่อเนื่องตลอดภาคตัดขวางของวงแหวน ดังแสดงในภาพที่ 4.15 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ EPMA ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.15 พบว่าเหล็ก โครเมียม และออกซิเจน มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 4.16 เมื่อพิจารณาธาตุออกซิเจนพบว่าออกซิเจนเฉพาะบริเวณผิววงแหวนเท่านั้น และบริเวณดังกล่าวยังพบธาตุเหล็กและโครเมียมอยู่ด้วย จึงอาจสรุปได้ว่าลักษณะชั้นสีเทาคือชั้นออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่เกิดขึ้นที่ผิววงแหวนระหว่างการไถล

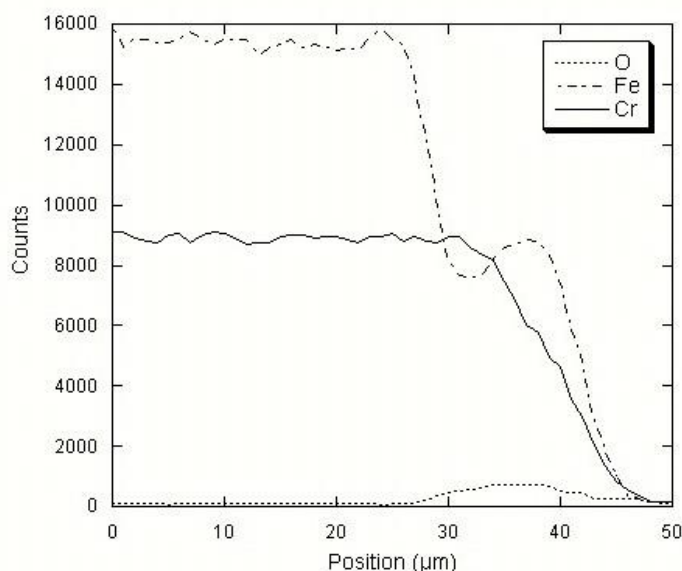


ภาพที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการลึกรอที่แรงกด 320 นิวตัน



ภาพที่ 4.16 EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการลึกรอที่แรงกด 320 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.15

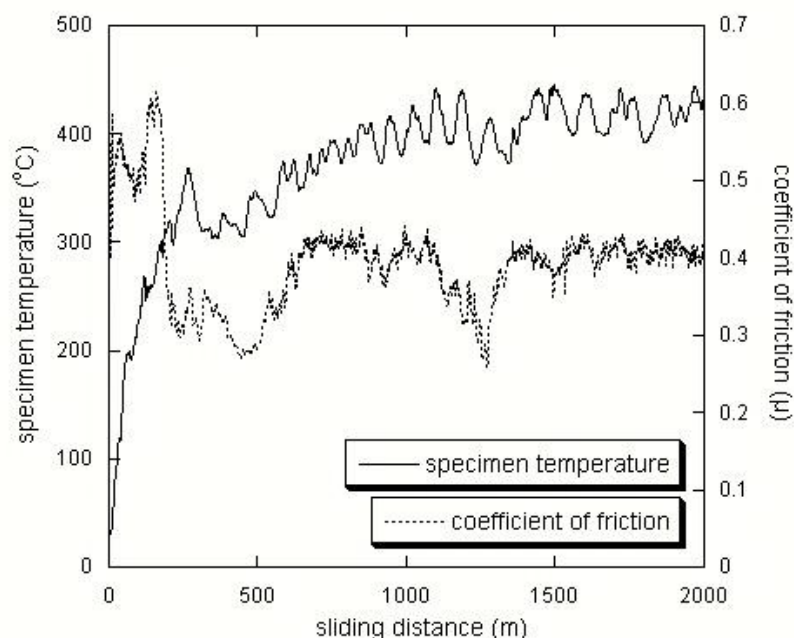
เมื่อทำ line scan ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.15 พบว่าบริเวณภายในวัสดุพื้นไม่มีธาตุออกซิเจนแต่มีธาตุเหล็กและโครเมียมอยู่ปริมาณมาก ส่วนผิววงแหวนธาตุออกซิเจนมีปริมาณมาก ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดชั้นออกไซด์ โดยแบ่งเป็นสองบริเวณคือด้านในและด้านนอกของชั้นออกไซด์ ด้านในของชั้นออกไซด์มีปริมาณธาตุเหล็กอยู่น้อยกว่าด้านนอกของชั้นออกไซด์ ซึ่งแตกต่างจากกรณีของธาตุโครเมียม โดยด้านในของชั้นออกไซด์มีปริมาณธาตุโครเมียมอยู่มากกว่าด้านนอกของชั้นออกไซด์ดังแสดงในภาพที่ 4.17 กล่าวคือเกิดชั้นออกไซด์ที่ผสมกันของเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ โดยด้านในของชั้นออกไซด์มีปริมาณโครเมียมมาก ส่วนด้านนอกของชั้นออกไซด์มีปริมาณเหล็กมาก



ภาพที่ 4.17 EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ 4.15

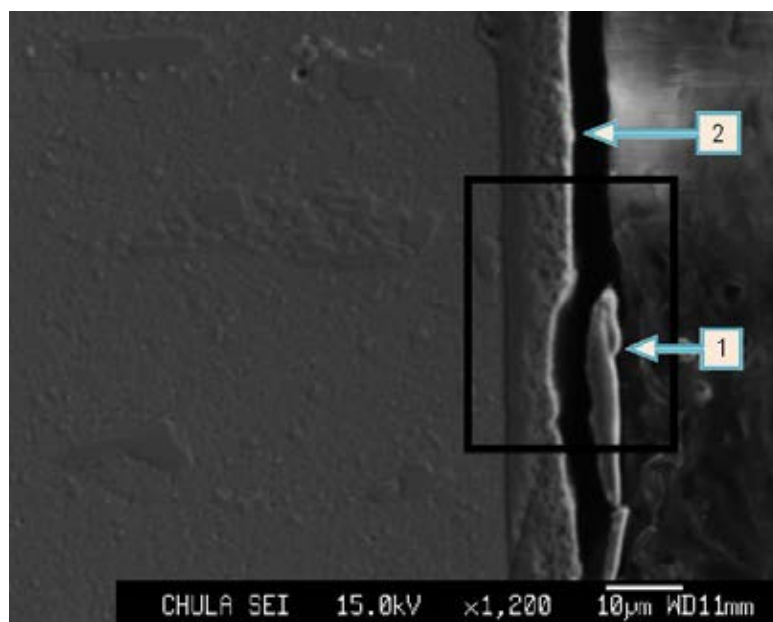
อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการไถลของวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมที่ระยะทางไถล 265 เมตร มีค่าสูงถึง 370°C และมีค่าต่ำลงเล็กน้อยเป็น 310°C ที่ระยะทางไถล 310 เมตร หลังจากนั้น อุณหภูมิค่อยๆ สูงขึ้น จนมีค่าประมาณ $370 - 445^{\circ}\text{C}$ ตั้งแต่ระยะทางไถล 700 เมตร จนถึงสิ้นสุดการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.18 ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นชั้นออกไซด์ของเหล็กและโครเมียม โดยด้านในของชั้นออกไซด์มีปริมาณโครเมียมมาก ส่วนด้านนอกของชั้นออกไซด์มีปริมาณเหล็กมาก ทำให้มีแนวโน้มเกิดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมมากกว่าชั้นออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมมาก จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนกรณีแรงกด 320 นิวตัน

มีค่าสูงขึ้นไปเป็น 28.9 มิลลิกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับแรงกด 120 นิวตัน ที่มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนเป็น 19.9 มิลลิกรัม

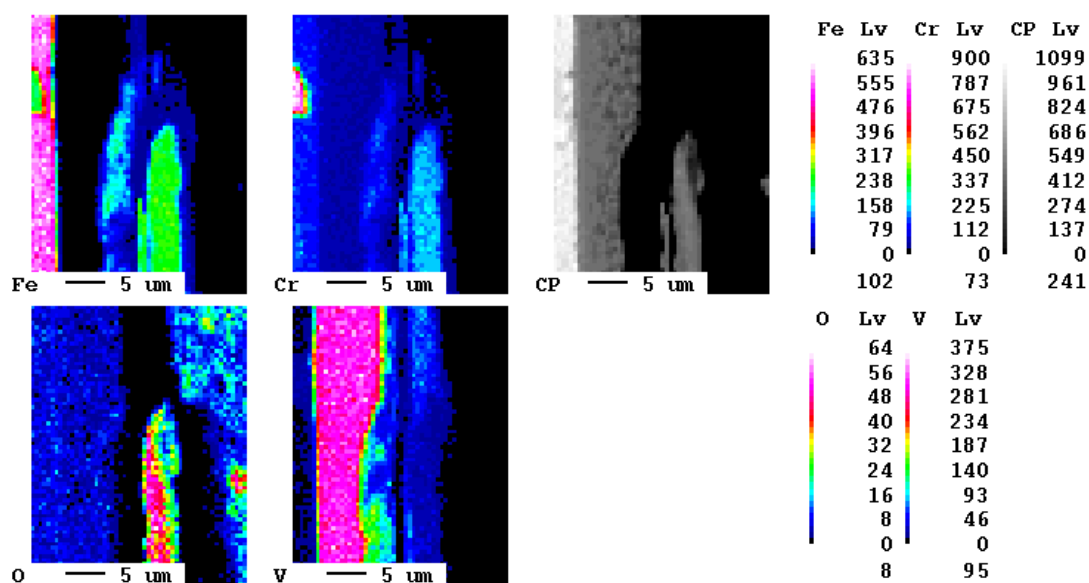


ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวงแหวนกับระยะทางไถลที่แรงกด 320 นิวตัน

นำดิสก์ที่ทดสอบการสึกหรอมาตัดในแนวตั้งฉากกับระนาบการไถล ดูปภาพตัดขวางของดิสก์ด้วยกล้อง SEM พบชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์บางส่วนเกิดการสึกหรอและมีบริเวณที่เกิดการเกาะติดดังแสดงในภาพที่ 4.19 ในบริเวณหมายเลข 1 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเหล็ก โคโรเมียม ออกซิเจน และวาเนเดียมด้วยเครื่องวิเคราะห์ EPMA ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.19 ดังแสดงในภาพที่ 4.20 พบว่าบริเวณที่เกิดการเกาะติดมีออกซิเจนปริมาณมากเมื่อเทียบกับภายในวัสดุพื้นและชั้นเคลือบ และพบธาตุเหล็กกับโคโรเมียมในบริเวณดังกล่าว ซึ่งก็คือชั้นออกไซด์ของเหล็กและโคโรเมียมของวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดการสึกหรอระหว่างการไถลและเกาะบนชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตามการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นไม่ได้เกิดขึ้นโดยตลอดรอบบริเวณ wear track มีบริเวณที่ไม่เกิดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น บริเวณหมายเลข 2 ของภาพที่ 4.19 อาจเป็นเพราะวาเนเดียมออกไซด์บนผิวชั้นเคลือบมีส่วนช่วยลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ในบางบริเวณ



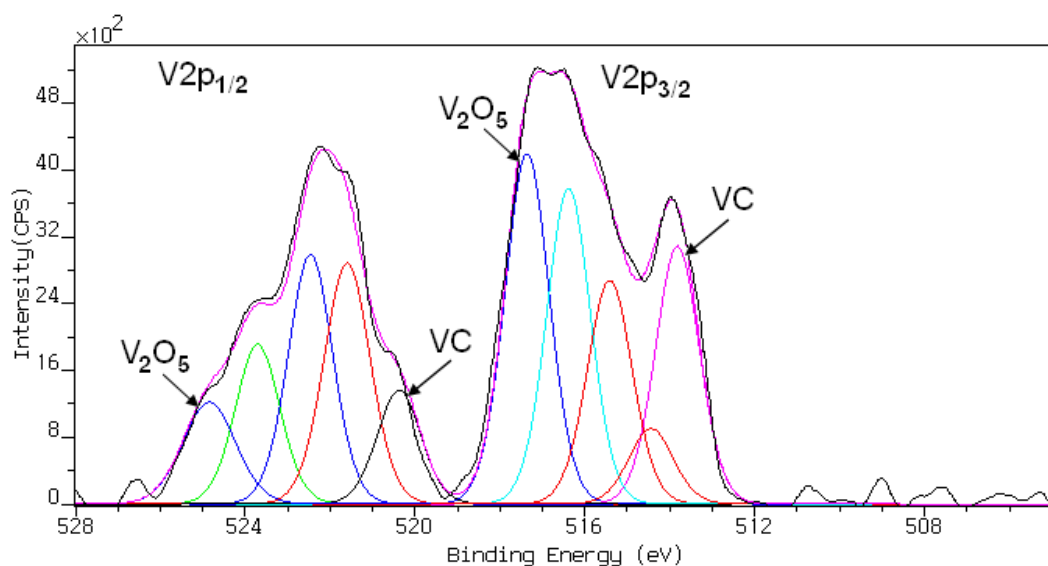
ภาพที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของดิสก์หลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน



ภาพที่ 4.20 EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr, O และ V ของดิสก์หลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ 4.19

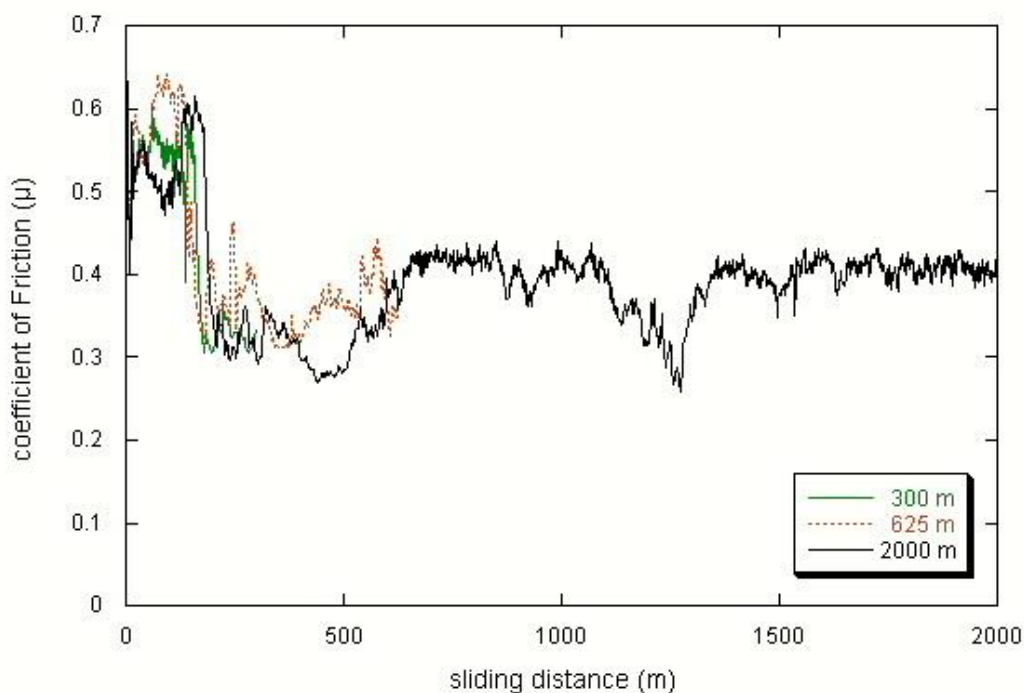
วิเคราะห์สารประกอบของวานาเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณ wear track ของดิสก์ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แรงกด 320 นิวตัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ XPS โดยสเปกตรัมเป็นเวลาก่อนเวลา 600 วินาที พบพีค $V2p_{3/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 517.3 eV และพีค $V2p_{1/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 524.8 eV มีค่าใกล้เคียงกับ V_2O_5 [11] พบพีค $V2p_{3/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 513.8 eV และพีค $V2p_{1/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 520.4 eV มีค่าใกล้เคียงกับวานาเดียมคาร์ไบด์ [12] ซึ่งก็คือชั้นเคลือบของดิสก์ ดังแสดงในภาพที่ 4.21 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jeong-Gil Choi [12] ที่กล่าวว่าวานาเดียมคาร์ไบด์มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 513.2 eV และ 520.9 eV รวมทั้งยังพบพีคที่ไม่สามารถระบุได้ที่ตำแหน่ง 516.4, 515.4 และ 514.4 eV โดยคาดว่าเป็นพีคของวานาเดียมออกไซด์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวานาเดียมออกไซด์สามารถเกิดรีดักชันเป็นออกไซด์ชนิดต่างๆ ได้คือ $V_2O_5 > V_3O_7 > V_4O_9 > V_6O_{13} > VO_2$ [8]

พบว่าที่ผิวดิสก์กรณีแรงกด 320 นิวตัน ยังคงพบวานาเดียมออกไซด์ในรูปของ V_2O_5 ซึ่งอาจเป็น V_2O_5 ที่ยังเหลือจากการตั้งใจทำให้เกิดขึ้นระหว่างอบคั้นตัวก่อนทดสอบการสึกหรอ หรืออาจเป็น V_2O_5 ที่เกิดขึ้นเองระหว่างการไถล เนื่องจากระหว่างการไถลนั้นที่ผิวดิสก์มีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.18 ทำให้ชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ในบางบริเวณได้รับความร้อนสูงมากจนอาจเกิดการออกซิเดชันกลายเป็น V_2O_5 ได้



ภาพที่ 4.21 สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2}$ - $V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยวบนผิวดิสก์หลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน

พิจารณาน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ระยะทางไกลต่างๆ กรณีแรงกด 320 นิวตัน ที่ระยะทางไกล 300 เมตร แสดงเป็นเส้นสีเขียวในภาพที่ 4.22 ระยะทางไกล 625 เมตร แสดงเป็นเส้นสีส้ม และระยะทางไกล 2000 เมตร แสดงเป็นเส้นสีดำ น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดระยะทางไกล 2000 เมตร มีค่า 28.9 มิลลิกรัม ดังแสดงในภาพที่ 4.7 เมื่อทดสอบการสึกหรอที่ระยะทางไกลเพียง 300 เมตร น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่ามากถึง 16.9 มิลลิกรัม ซึ่งคิดเป็น 58 เปอร์เซ็นต์ ของระยะทางไกลทั้งหมด อาจเกิดจากในระยะทางไกลช่วง 0 - 200 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าสูงประมาณ 0.6 เพราะเป็นช่วงที่เกิดการปรับระนาบพื้นผิวของดิสก์และวงแหวนให้เข้ากันหรือที่เรียกว่าช่วง running-in ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในช่วงดังกล่าวมีค่าสูง จึงส่งผลให้น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่ามาก และหลังจากระยะทางไกล 200 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจึงลดต่ำลงเหลือประมาณ 0.3 ที่ระยะทางไกล 625 เมตร เป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 0.4 น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่า 19.4 มิลลิกรัม ซึ่งเพิ่มขึ้นจากระยะทางไกล 300 เมตร เพียงเล็กน้อย อาจกล่าวได้ว่าในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าต่ำจะทำให้ น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่าน้อยกว่าในช่วงแรกที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าสูง ภายหลังจากระยะทาง 625 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าประมาณ 0.41 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีการแปรผันไม่คงที่ อาจเกิดจากบริเวณที่เกิดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเศษวัสดุที่หลุดออกมาจากวงแหวนระหว่างการไกลไปชุดทั้งวงแหวนและผิวดิสก์ที่เป็นชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีการแปรผันขึ้นๆ ลงๆ



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับระยะทางไถลที่แรงกด 320 นิวตัน

อย่างไรก็ตามการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แรงกด 320 นิวตัน น้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนมีค่า 28.9 มิลลิกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับดิสก์ที่ควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซเฉื่อยระหว่างการอบคืนตัว ซึ่งน้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนมีค่า 85 มิลลิกรัม [3] แล้ว ในงานวิจัยนี้ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะไม่ได้มีค่าลดลง แต่น้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนมีค่าลดลงคิดเป็น 56.1 มิลลิกรัม หรือมีค่าลดลงคิดเป็น 66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอย่างชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 4.7 อาจเป็นเพราะ V_2O_5 มีลักษณะโครงสร้างของออกไซด์ที่มีแรงเฉือนต่ำ ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง [8] V_2O_5 บนชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ยังเหลือจากการอบคืนตัวก่อนทดสอบการสึกหรอและ V_2O_5 ที่เกิดขึ้นเองในระหว่างการไถล จึงมีส่วนช่วยทำให้ลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ รวมทั้งจุดหลอมเหลวของ V_2O_5 มีค่าประมาณ $685^{\circ}C$ [8] ดังนั้น V_2O_5 บางบริเวณอาจมีอุณหภูมิสูงมากกว่าจุดหลอมเหลวจนทำให้เกิดการหลอมเหลวขึ้น ซึ่ง V_2O_5 เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นเหลว [8] ระหว่างการไถล ทำให้ลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมลง ส่งผลให้น้ำหนักที่สูญไปของวงแหวนมีค่าต่ำกว่ากรณีดิสก์ที่ควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซเฉื่อยระหว่างการอบคืนตัว [3]

กรณีแรงกด 120 นิวตัน น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่าเพียง 19.9 มิลลิกรัม สาเหตุอาจเกิดจากการมี V_2O_5 ที่มีบทบาทเป็นสารหล่อลื่นนั้นมีความหนาเพียงพอที่จะป้องกันการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ได้ ประกอบกับงานวิจัยของ Magnus Hanson และคณะ [1] กล่าวว่าออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมสูงสามารถลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมไปสู่ชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้กรณีแรงกด 120 นิวตัน เกิดชั้นออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมระหว่างการไถล โดยเป็นออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมมาก เช่นกันดังแสดงในภาพที่ 4.17 จึงมีส่วนช่วยทำให้ลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมลงได้ ส่งผลทำให้น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่าต่ำ

สำหรับการทดสอบการสึกหรอที่ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที ระยะทางไถล 2000 เมตร แรงกด 170 และ 220 นิวตัน น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่า 21.9 และ 24.5 มิลลิกรัม ตามลำดับ ผิววงแหวนเกิดชั้นออกไซด์สองบริเวณ ด้านในของชั้นออกไซด์มีปริมาณธาตุเหล็กอยู่น้อยกว่าด้านนอกของชั้นออกไซด์ ส่วนกรณีธาตุโครเมียม ด้านในของชั้นออกไซด์มีปริมาณธาตุโครเมียมอยู่มากกว่าด้านนอกของชั้นออกไซด์ (ผลวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ง) ซึ่งแตกต่างจากกรณีแรงกด 120 นิวตัน ที่ชั้นออกไซด์มีปริมาณโครเมียมมาก จึงทำให้น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนในกรณีแรงกด 170 และ 220 นิวตัน มีค่ามากกว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนในกรณีแรงกด 120 นิวตัน

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้เคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการที่อาร์ตีบนดิสก์เหล็กกล้าเครื่องมือและอบคืนตัวในอากาศอย่างตั้งใจ ไกลกับวงแหวนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกโดยทดสอบการสึกหรอแบบ ริง-ออน-ดิสก์ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมไมโครโบลีย์ ทดสอบการสึกหรอที่ระยะทางไกล 2000 เมตร ความเร็วการไถล 1.432 เมตรต่อวินาที แปรผันแรงกดตั้งแต่ 120 ถึง 320 นิวตัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ชนิดของวานเดียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ผ่านการอบคืนตัวในอากาศก่อนทดสอบการสึกหรอคือวานเดียมเพนทอกไซด์และวานเดียมไดออกไซด์
2. น้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่เพิ่มขึ้นจาก 120 ถึง 320 นิวตัน
3. กรณีแรงกด 320 นิวตัน น้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับดิสก์ที่อบคืนตัวในอากาศมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับดิสก์ที่อบคืนตัวในก๊าซเฉื่อย
4. ชั้นออกไซด์บนผิววงแหวนที่มีปริมาณโครเมียมมากกว่าเหล็กทำให้น้ำหนักที่สูญเสียไปของวงแหวนมีค่าน้อยกว่าชั้นออกไซด์บนผิววงแหวนที่มีปริมาณเหล็กมากกว่าโครเมียม
5. วานเดียมเพนทอกไซด์ที่มีความหนาเพียงพอที่อยู่บนชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ลดการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมไปสู่ชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ได้

รายการอ้างอิง

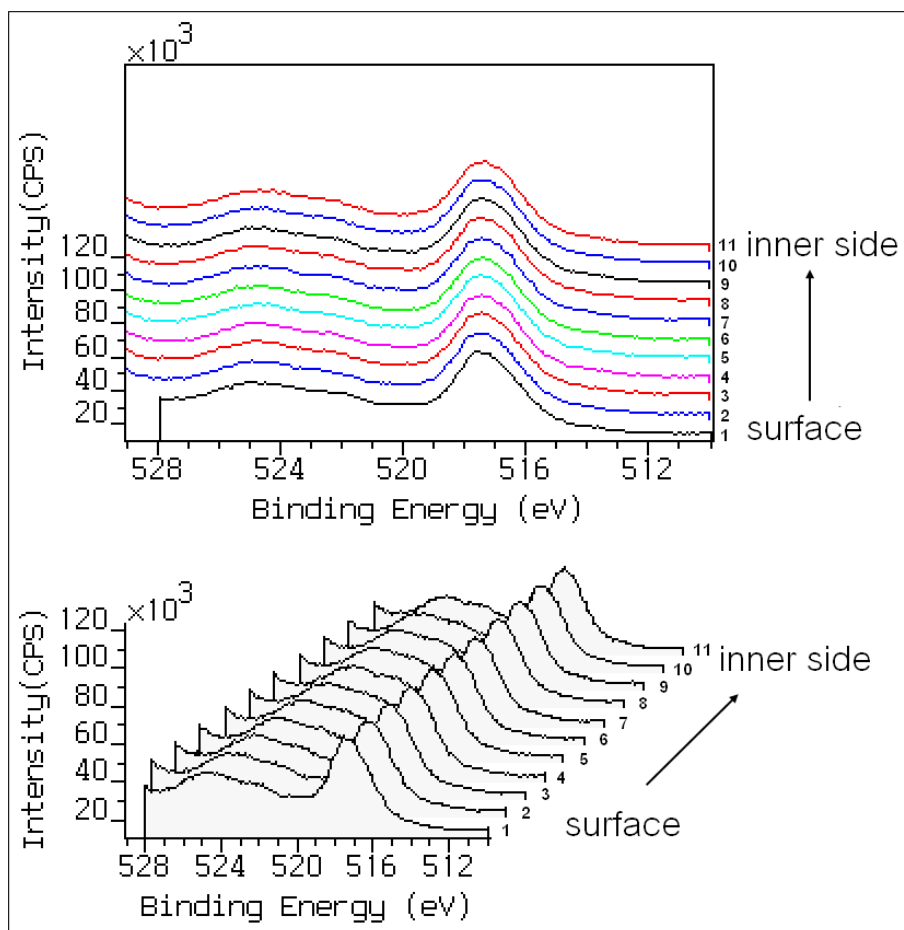
- [1] Hanson, M., Stavlid, N., Coronel, E., and Hogmark, S. On adhesion and metal transfer in sliding contact between TiN and austenitic stainless steel. *Wear* 264 (April 2008): 781-787.
- [2] Arai, T., and Harper, S. *ASM Handbook* 4. USA: ASM International, 1994.
- [3] รัชตพล ผิวนิม. พฤติกรรมการเกาะติดของเหล็กกล้าไร้สนิมบนชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เคลือบด้วยกระบวนการที่อาร์ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [4] Stachowiak, G.W., and Batchelor, A.W. *Engineering Tribology*. USA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [5] Podgornik, B., Hogmark, S., and Sandberg, O. Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel. *Surface and Coatings Technology* 184 (June 2004): 338-348.
- [6] Braza, J.F. Sliding wear evaluation of various coating processes on AISI 52100 and M 50 steels. *Materials Science and Technology* 8 (July 1992): 582-588.
- [7] ดนุพล เอื้ออภิสิทธิ์วงศ์. การเคลือบชั้นวานาเดียมไนโอเบียมคาร์ไบด์โดยกระบวนการที่อาร์ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [8] Fateh, N., Fontalvo, G.A., Gassner, G., and Mitterer, C. Influence of high-temperature oxide formation on the tribological behaviour of TiN and VN coatings. *Wear* 262 (April 2007): 1152-1158.
- [9] Instruction manual, Friction wear tester EFM III-1010-ADX, (n.p.): Orientec, n.d.
- [10] มหินทร์ ชัยฤทธิ. ผลของพารามิเตอร์บางประการต่อความหนาชั้นเคลือบที่เคลือบโดยกระบวนการที่อาร์ดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

- [11] Pal, M., Hirota, K., and Sakata, H. Electrical and optical properties of as-deposited V_2O_5 - TeO_2 amorphous films and their annealing effect. Physica Status Solidi (A) 196 (April 2003): 396-404.
- [12] Choi, J.-G. The surface properties of vanadium compounds by x-ray photoelectron spectroscopy. Applied Surface Science 148 (June 1999): 64-72.
- [13] Matolin, V., Masek, K., Matolinova, I., Skala, T., and Veltruska, K. XPS and SIMS study of the ageing mechanism of Zr-V non-evaporable getter films. Applied Surface Science 235 (July 2004): 202-206.
- [14] Zhao, Z., Liu, Y., Cao, H., Gao, S., and Tu, M. Synthesis of vanadium carbide nanopowders by thermal processing and their characterization. Powder Technology 181 (January 2008): 31-35.
- [15] Zhao, Z., and others. A novel method to synthesize vanadium carbide (V_8C_7) nanopowders by thermal processing NH_4VO_3 , $C_6H_{12}O_6$ and urea. Journal of Alloys and Compounds 468 (January 2009): 58-63.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิเคราะห์สารประกอบบนผิวดีสก์ก่อนทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องวิเคราะห์ XPS โดยวิเคราะห์ทั้งหมด 11 ครั้ง การวิเคราะห์ครั้งที่ 1 (หมายเลข 1) วิเคราะห์ที่ผิวดีสก์โดยไม่สับเตอริง ดังแสดงในภาพที่ ก.1 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ครั้งที่ 2 (หมายเลข 2) วิเคราะห์โดยสับเตอริงเป็นเวลา 60 วินาที สเปกตรัมที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน จึงสับเตอริงอีกครั้งละ 60 วินาที และดูสเปกตรัมที่ได้ ทำเช่นนี้จนถึงการวิเคราะห์ครั้งที่ 11 (หมายเลข 11) คือวิเคราะห์โดยสับเตอริงเป็นเวลาทั้งหมด 600 วินาที สเปกตรัมที่ได้ในแต่ละครั้งมีค่าไม่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงแสดงผลวิเคราะห์สารประกอบของดีสก์ก่อนและหลังทดสอบการสึกหรอเฉพาะที่สับเตอริงเป็นเวลา 600 วินาทีเท่านั้น



ภาพที่ ก.1 สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2}$ - $V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยวบนผิวดีสก์ก่อนสับเตอริงและหลังสับเตอริงครั้งละ 60 วินาที เป็นจำนวน 10 รอบ ก่อนทดสอบการสึกหรอ

ภาคผนวก ข



ภาพที่ ข.1 บริเวณที่ไม่เกิดชั้นสีเทา เมื่อทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน

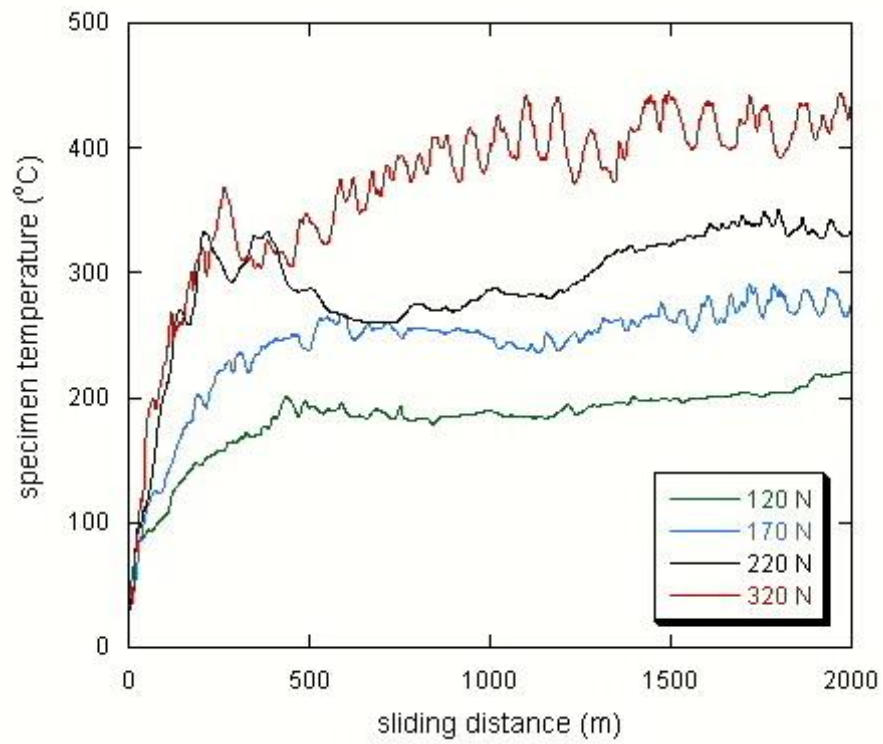


ภาพที่ ข.2 บริเวณที่เกิดชั้นสีเทา เมื่อทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน



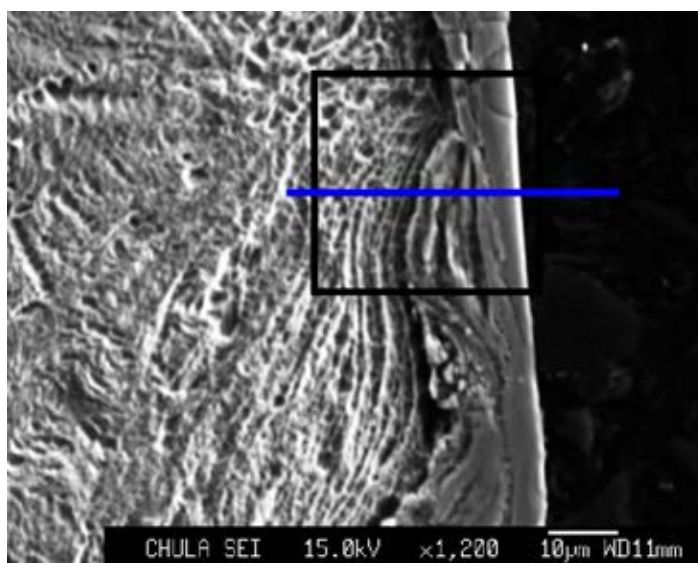
ภาพที่ ข.3 บริเวณที่เกิดการสูญเสียของวงแหวน เมื่อทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 320 นิวตัน

ภาคผนวก ค

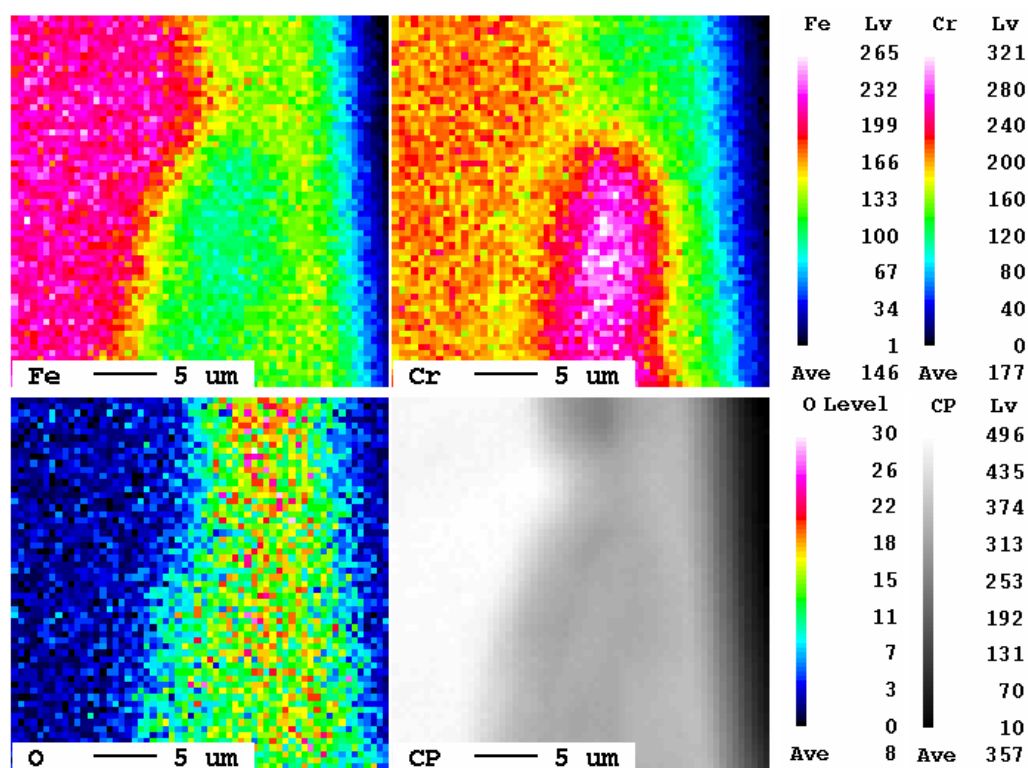


ภาพที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวงแหวนกับระยะทางไถลที่แรงกดต่างๆ

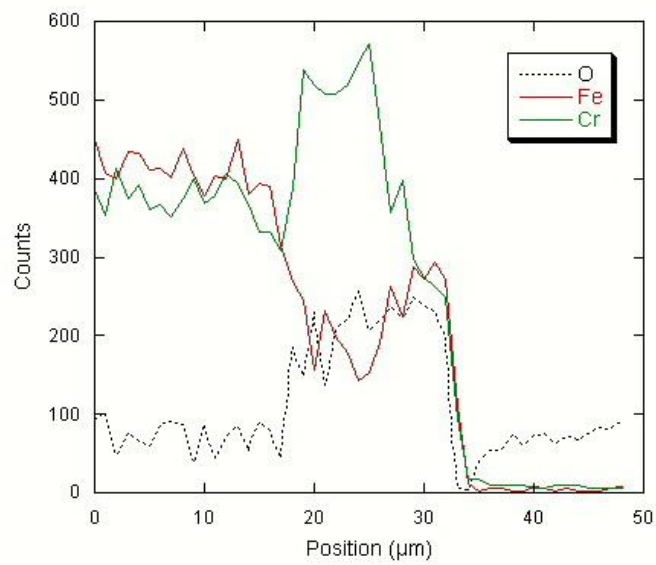
ภาคผนวก ง



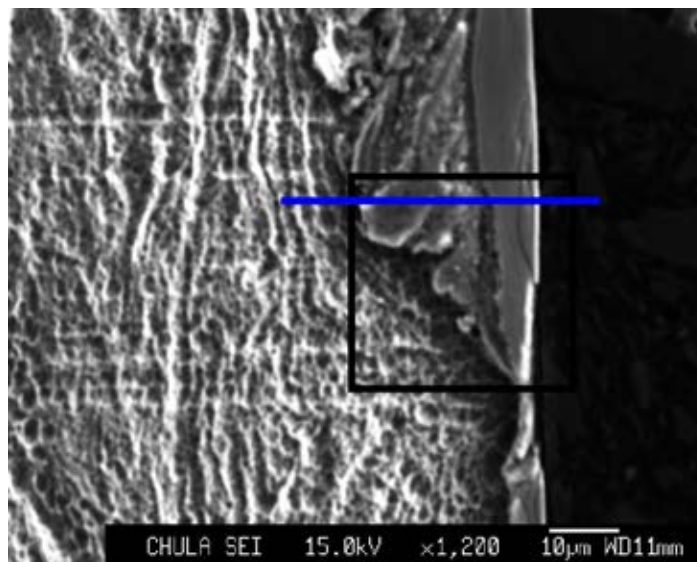
ภาพที่ ง.1 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการลึกรอที่แรงกด 170 นิวตัน



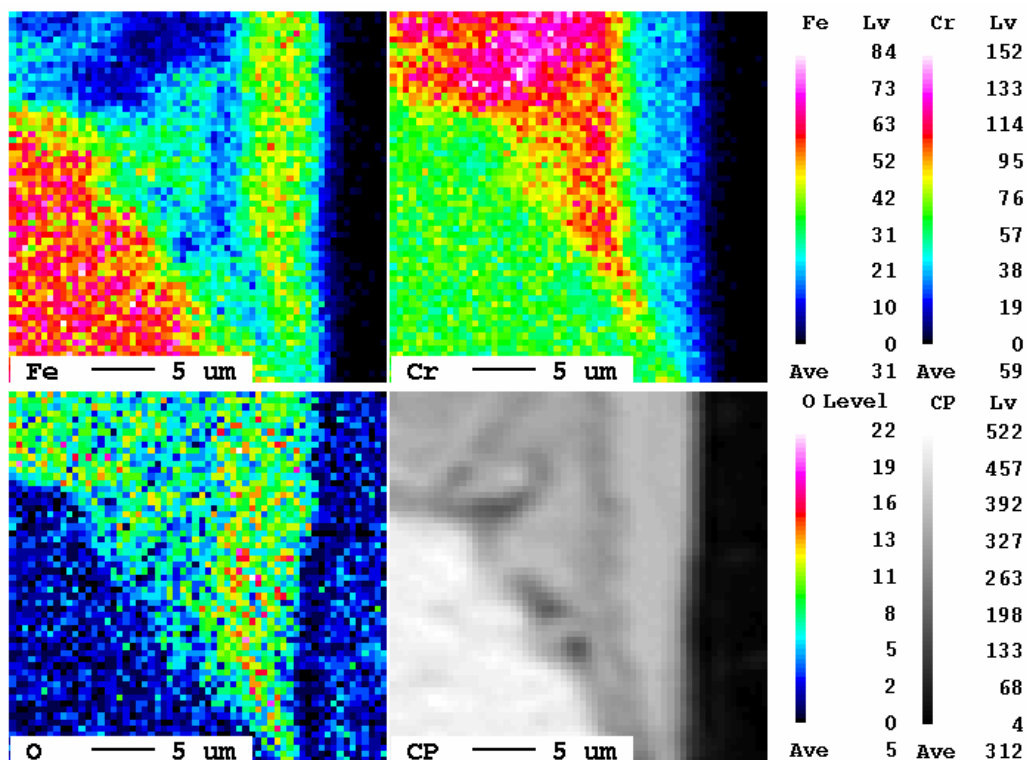
ภาพที่ ง.2 EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการลึกรอที่แรงกด 170 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ ง.1



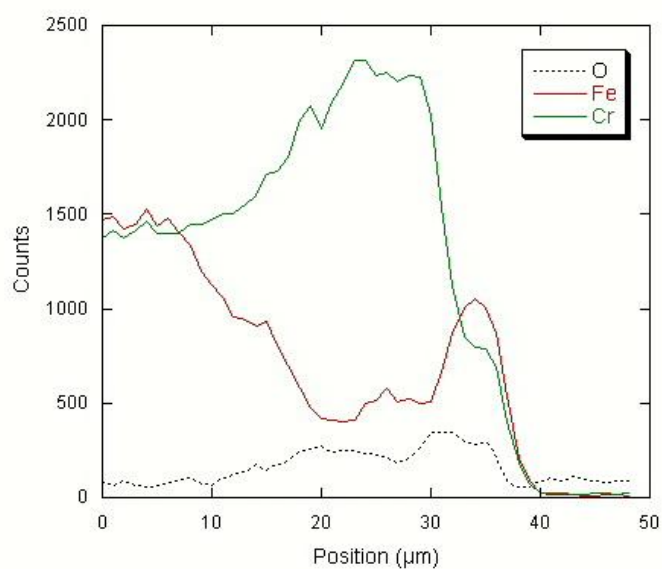
ภาพที่ ง.3 EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 170 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ ง.1



ภาพที่ ง.4 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 220 นิวตัน



ภาพที่ ๕.5 EPMA mapping ของการกระจายตัวของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 220 นิวตัน ในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมสีดำของภาพที่ ๕.4

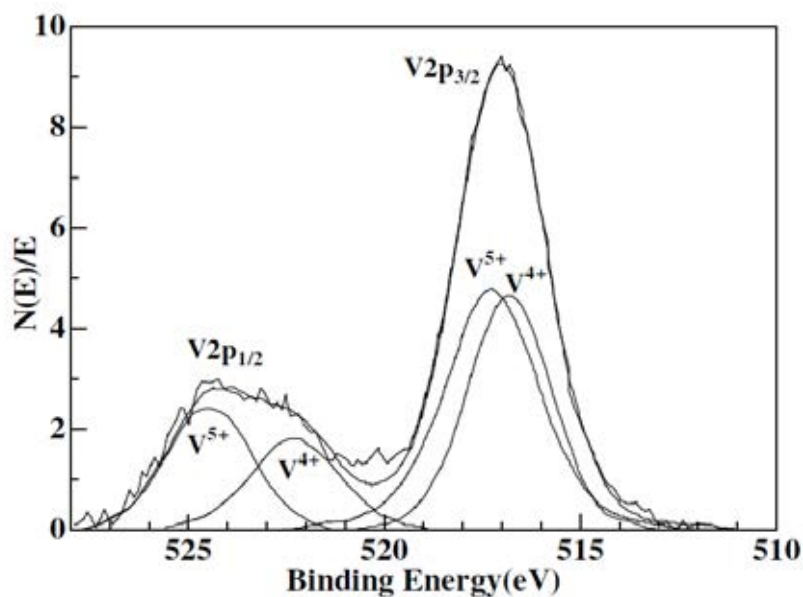


ภาพที่ ๕.6 EPMA line scan ของธาตุ Fe, Cr และ O ของวงแหวนหลังทดสอบการสึกหรอที่แรงกด 220 นิวตัน ตามเส้นสีน้ำเงินของภาพที่ ๕.4

ภาคผนวก จ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Manisha Pal และคณะ [11] ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของชั้น $V_2O_5 - TeO_2$ ที่ถูกเคลือบในสุญญากาศ แล้วให้ความร้อนที่ $500^\circ C$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยแปรผันปริมาณ V_2O_5 ตั้งแต่ 20 - 100 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ชั้นเคลือบที่ได้มีโครงสร้างเป็นออสซิลอนมีความหนา 250 - 350 นาโนเมตร การนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากพบผลึกระดับนาโนเมตรของ TeO_2 และการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณ V_2O_5 ที่เพิ่มขึ้นด้วย วิเคราะห์ผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ XPS ในกรณีสัดส่วน V_2O_5 ต่อ TeO_2 เป็น 80 ต่อ 20 โดยโมล ยืนยันว่าเกิด V_2O_5 บนชั้นเคลือบ โดยพบพีค $V2p_{3/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 517.27 eV และพีค $V2p_{1/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 524.84 eV ซึ่งระบุเป็น V_2O_5 พบพีค $V2p_{3/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 516.81 eV และพีค $V2p_{1/2}$ ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็น 522.25 eV ซึ่งระบุเป็น VO_2 ดังแสดงในภาพที่ จ.1



ภาพที่ จ.1 สเปกตรัม XPS ของ $V2p_{3/2} - V2p_{1/2}$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานยึดเหนี่ยว [11]

ตารางที่ ๑.1 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของสารประกอบวาเนเดียม

ชนิดของสารประกอบ	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (eV)		อ้างอิง
	V2p _{3/2}	V2p _{1/2}	
V ₂ O ₅	517.27	524.84	[11]
	517.3	-	[12]
	517.2	-	[13]
	517.4	-	[15]
	517.8	524.5	ในงานวิจัยนี้
	517.3	524.8	ในงานวิจัยนี้
VO ₂	516.81	522.25	[11]
	516.1	-	[12]
	516	-	[13]
	516.6	-	[14]
	516.2	-	[15]
	516.7	522.2	ในงานวิจัยนี้
Vanadium carbide	513.2	520.9	[12]
	513		[13]
	513.4	-	[14]
	513.6	-	[15]
	513.8	520.4	ในงานวิจัยนี้
V	512.2	-	[13]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ - นามสกุล** : นายชาญเชาว์ เลิศล้ำมีชัย
- วัน - เดือน - ปีเกิด** : วันพุธที่ 9 ตุลาคม 2528
- ที่อยู่** : บ้านเลขที่ 4 (528/1) หมู่ 2 ซอยสุขสวัสดิ์ 36 ถนนสุขสวัสดิ์
แขวงบางปะกอก เขตราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ 10140
- วุฒิการศึกษา** : เข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนวัดสุทธิวราราม ปีการศึกษา 2541
: เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2547
: เข้าศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551
- อีเมล** : Chanchou.L@hotmail.com