

ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์



นาย พุคักดิ์ บุญยกุลศรีรุ่ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-268-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

14 ก.ย. 2548

117665414

WEAR RESISTANCE OF STEEL COATED WITH VANADIUM CARBIDE

Mr. Fusak Boonyagunsriroong

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

Department of Metallurgical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

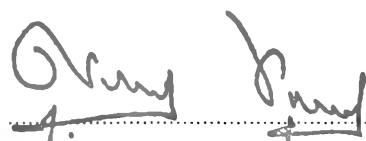
Academic Year 1997

ISBN 974-638-268-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์  
โดย นายพุฒิกดี บุญยกุลศรีรุ่ง  
ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย

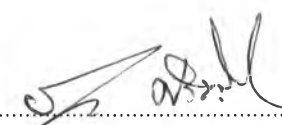
---

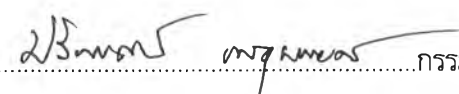
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้ เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ นายแพทย์คู่แก้ว วัฒน ชูติวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ )

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย )

  
.....กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีทรรคน์ พันธบุรุษยงก์ )

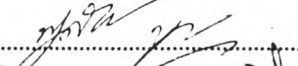
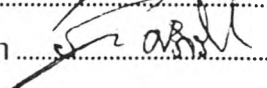
ผู้คัดดี บุญยกุลศรีรุ่ง : ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ (WEAR RESISTANCE OF STEEL COATED WITH VANADIUM CARBIDE)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ; 64 หน้า. ISBN 974-638-268-3.

ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 ที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ถูกศึกษาโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบ block on ring ด้วยการเสียดสีกับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 ที่น้ำหนักกดในช่วง 4 ถึง 12 กิโลกรัม ความเร็วการทดสอบในช่วง 1.3 ถึง 6.8 เมตรต่อวินาทีและระยะทางทดสอบอยู่ในช่วง 0 ถึง 8,250 เมตร การทดสอบทำที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้ภาวะบรรยากาศ ภายหลังจากการทดสอบทำการตรวจสอบรอยเสียดสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด ผลการทดสอบพบว่าที่ระยะทางการทดสอบ 3,180 เมตร ความเร็วงาน 1.3 เมตรต่อวินาที การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม เกิดการสึกหรอแบบรุนแรงและพบการแปรรูปแบบ plastic ที่รอยเสียดสี ขณะที่น้ำหนักกด 4 และ 8 กิโลกรัม เกิดการสึกหรอแบบไม่รุนแรงและไม่พบการแปรรูปแบบ plastic ที่รอยเสียดสี การเสียดสีแบบต่อเนื่องมีน้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอสูงกว่าแบบเป็นช่วงและพบรอยเสียดสีเป็นร่องชัดเจนซึ่งเป็นการสึกหรอแบบ abrasive wear ขณะที่การเสียดสีแบบเป็นช่วงไม่พบการสึกหรอแบบ abrasive wear การสึกหรอของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่น้ำหนักกด 4 ถึง 12 กิโลกรัมไม่เป็นการสึกหรอแบบรุนแรงและน้ำหนักที่หายไปโดยการสึกหรอแบบเสียดสีต่อเนื่องต่ำกว่าแบบเป็นช่วง การเสียดสีแบบต่อเนื่องมีลักษณะการเสียดสีเป็นแบบชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เสียดสีกับเศษคาร์ไบด์ มีผลทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำกว่าและมีการสึกหรอที่น้อยกว่าการเสียดสีแบบเป็นช่วง ซึ่งมีลักษณะการเสียดสีแบบชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เสียดสีกับงานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 ชั้นเคลือบสามารถลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้ทุกค่าน้ำหนักกดที่ใช้ทดสอบ ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัมชั้นเคลือบลดการสึกหรอได้มากกว่าที่น้ำหนักกด 4 และ 8 กิโลกรัม โดยชั้นเคลือบลดความเร็วการสึกหรอเมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความแข็งที่สูงของชั้นเคลือบ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำและการติดแน่นกับโลหะพื้น แม้ชั้นเคลือบแตกออกก็ยังติดแน่น ทำให้ชั้นเคลือบลดการสึกหรอได้มาก

ผลการทดสอบแบบต่อเนื่องที่ระยะทางทดสอบ 8,250 เมตร น้ำหนักกด 4 ถึง 12 กิโลกรัม ความเร็ว 1.3 ถึง 6.8 เมตรต่อวินาที พบว่าน้ำหนักกดมีอิทธิพลต่อการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวมากกว่าความเร็วงาน การทดสอบที่ความเร็วต่ำน้ำหนักกดสูงการสึกหรอเกิดขึ้นมากกว่าการทดสอบที่ความเร็วสูงน้ำหนักกดต่ำ ขณะที่ความเร็วงานมีอิทธิพลต่อการสึกหรอของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์มากกว่าน้ำหนักกด เมื่อเปลี่ยนความเร็วจากต่ำไปสูงชั้นเคลือบเกิดการสึกหรอไปมากกว่าเปลี่ยนจากน้ำหนักกดต่ำไปน้ำหนักกดสูงและชั้นเคลือบลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้ทุกค่าความเร็ว

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโลหการ .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโลหการ .....  
ปีการศึกษา ..... 2540 .....

ลายมือชื่อนิสิต .....  .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C718165 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: SLIDING WEAR / WEAR RESISTANCE / VANADIUM CARBIDE COATING

FUSAK BOONYAGUNSRIROONG : WEAR RESISTANCE OF STEEL COATED WITH VANADIUM CARBIDE. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI, Ph.D. 64 pp. ISBN 974-638-268-3.

The wear resistance of D2 cold work tool steel, which was uncoated and coated with vanadium carbide, was studied with a block on ring tester by sliding with AISI 1020 carbon steel. The normal load was in the range of 4 to 12 kilograms. The disk speed was in the range of 1.3 to 6.8 meters per second and the testing distance was in the range of 0 to 8,250 meters. The test was done at ambient temperature and under atmospheric condition. The wear trace after testing was investigated by optical and scanning electron microscope. The result of experiment showed that, at the testing distance of 3,180 meters and the disk speed of 1.3 meters per second, the wear of D2 steel at the normal load of 12 kilograms was severe wear and plastic deformation founded in wear trace. While at the normal load of 4 and 8 kilograms mild wear was happened and plastic deformation was not founded in wear trace. The continuous sliding had more weight loss than discontinuous sliding and clearly groove that was abrasive wear occurred while the discontinuous sliding did not exhibit abrasive wear. The wear of vanadium carbide coating layer at normal load 4 to 12 kilograms was not severe wear and weight loss by the continuous sliding wear was lower than that by the discontinuous sliding wear. The continuous sliding, which had characteristic of sliding between vanadium carbide layer and carbide debris, resulted in lower friction coefficient and wear than discontinuous sliding which had characteristic of sliding between vanadium carbide layer and carbon steel disk. The coating layer can reduce wear at every normal load. At the normal load of 12 kilograms, the coating layer can reduce wear more than that at normal load of 4 and 8 kilograms. The coating layer can reduce wear rate when normal load increased due to high hardness, low friction coefficient and strong adhesion with substrate of the coating layer. Even though the coating was crack, wear was reduce significantly.

The results of continuous test at the distance of 8,250 meters, the normal load range of 4 to 12 kilograms, the disk speed range of 1.3 to 6.8 meters per second showed that the normal load had more influence on the wear of uncoated D2 tool steel than disk speed. Wear occurred at low speed test with high normal load, more than those at high speed with low normal load. The disk speed had more influence on the wear of vanadium carbide coating layer than the normal load. When the speed was changed from low to high, the coating layer was more worn than when the normal load was changed from low to high. The coating layer can reduce wear of D2 tool steel at every speed.

ภาควิชา..... วิศวกรรมโลหการ  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมโลหการ  
 ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยมาด้วยดีตลอด และกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย และเนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้ได้รับจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติจึงขอบพระคุณมา ณ.ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และเอื้อเฟื้อด้านวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ปฏิบัติการเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย การประสานงาน และเพื่อนที่เป็นกำลังใจ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัทคือจิ้นฮั่วที่เอื้อเฟื้ออะลูมิเนียม และบริษัทโรงงานเหล็กกรุงเทพที่เอื้อเฟื้อสารเฟอร์ไรเวาเนเดียม

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการีและครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุกด้านแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ทั่วไป.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา .....	2
1.4 ความสำคัญหรือประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	3
2.1 ชนิดและรูปแบบการทดสอบการสึกหรอ.....	3
2.1 กลไกการสึกหรอแบบไถลเสียดสี.....	6
2.2.1 ทฤษฎีการสึกหรอแบบยึดติด.....	6
2.2.2 ทฤษฎีการสึกหรอแบบแยกชั้น.....	7
2.3 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ไม่เคลือบผิว.....	10
2.4 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิว.....	14
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	18
3.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง.....	18
3.1.1 ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้า D2 และงาน.....	18
3.2 เครื่องทดสอบการเสียดสี.....	21
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	26
4.1 อิทธิพลของน้ำหนักกดชิ้นงานต่อการสึกหรอ .....	26
4.2 อิทธิพลของความเร็วงานต่อการสึกหรอ.....	38
5. บทสรุป.....	54
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก	
ข้อมูลการทดลอง.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	64



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดน้ำหนักกด(นิวตัน)ที่ทำให้ความเสียหายให้กับผิวเคลือบ.....	14
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า D2 กับ AISI 1020.....	20
4.1 น้ำหนักที่หายไปเมื่อระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	40
ก.1 ผลการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ไม่เคลือบผิวที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วงาน 1.3 เมตรต่อวินาที กรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง.....	58
ก.2 ผลการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ไม่เคลือบผิวที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วงาน 1.3 เมตรต่อวินาที กรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง.....	59
ก.3 ผลการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วงาน 1.3 เมตรต่อวินาที กรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง.....	60
ก.4 ผลการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วงาน 1.3 เมตรต่อวินาที กรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง.....	61
ก.5 ผลการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ และไม่เคลือบผิว ที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วงาน 1.3 เมตรต่อวินาที .....	61
ก.6 ผลการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ และไม่เคลือบผิว ที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก และ 12 กก. ความเร็วงาน 1.3 เมตรต่อวินาที ในกรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง.....	62
ก.7 ผลการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ และไม่เคลือบผิว ที่สภาวะการทดสอบ 1.3, 2.6, 3.4 และ 6.8 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	63

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบที่ใช้ในการทดสอบการเสียดสี.....4
2.2	รูปแบบการสัมผัส.....5
2.3	การสึกหรอแบบ adhesive wear.....6
2.4	ขั้นตอนการหลุดของอนุภาค โดยการ delamination.....7
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับระยะทางการเสียดสี .....8
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับระยะทางการทดสอบ.....9
2.7	การสึกหรอของเหล็กหล่อเทาแบบรุนแรงและไม่รุนแรงที่ความเร็ว 200 ซม./วินาที.....10
2.8	การสึกหรอของเหล็กกล้าผสมโครเมียม 3 % ที่ความเร็ว 100 ซม./วินาที.....11
2.9	ลักษณะการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง.....12
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับความเร็วการเสียดสี.....13
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับน้ำหนักกดสำหรับชั้นเคลือบ.....14
2.12	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เสียดสีกับวัสดุต่างๆ.....15
2.13	ความสัมพันธ์ของการสึกหรอกับระยะทางการไถของ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> กับ D2 ที่ความเร็วการเสียดสี 1 เมตรต่อวินาที น้ำหนักกด 88.5 นิวตัน.....16
2.14	ผลการสึกหรอชั้นเคลือบ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> กับน้ำหนักกด ที่ความเร็ว 1 และ 3 เมตรต่อวินาที .....16
2.15	อิทธิพลของความเร็วกับค่าการสึกหรอของผิวเคลือบ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> กับ D2 ภายใต้สภาวะน้ำหนักกด 61.3 นิวตัน และ 133 นิวตัน.....17
3.1	การอบชุบความร้อน.....19
3.2	ความหนาชั้นเคลือบที่ใช้ในการทดสอบการเสียดสี.....19
3.3	เครื่องทดสอบการเสียดสี.....22
3.4	ลักษณะงานที่เป็นเหล็กกล้า AISI 1020.....22
3.5	การจับยึดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการเสียดสี.....23
3.6	ลักษณะตะขอ คาน และตุ้มถ่วงน้ำหนัก.....23
3.7	ขั้นตอนการทดสอบการเสียดสี.....25

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.1 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ D2 ไม่เคลือบผิว ที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วเชิงเส้นงาน 1.3 เมตรต่อวินาที.....	27
4.2 ลักษณะการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว ระยะทางทดสอบ 3180 เมตร ความเร็ว 1.3 เมตรต่อวินาที .....	28
4.3 การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ระยะทางทดสอบ 3180 เมตร ความเร็วเชิงเส้นงาน 1.3 เมตรต่อวินาที.....	31
4.4 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กก. 8 กก. และ 12 กก. ความเร็ว 1.3 เมตรต่อวินาที.....	32
4.5 ภาพ SEM ลักษณะบริเวณกลางรอยเสียดสี ของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว และเคลือบผิว กรณี การทดสอบแบบเป็นช่วง ที่น้ำหนักกด 4 กก. ความเร็ว 1.3 เมตรต่อวินาที .....	35
4.6 ความเร็วการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ และไม่เคลือบผิว ที่สภาวะน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วเชิงเส้นงาน 1.3 เมตรต่อวินาที.....	36
4.7 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ และไม่เคลือบผิว ที่สภาวะการทดสอบน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ความเร็วเชิงเส้นงาน 1.3 เมตรต่อวินาที กรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง.....	37
4.8 การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว ที่สภาวะการทดสอบน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ระยะทางการทดสอบ 8250 เมตร.....	39
4.9 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ ที่สภาวะการ ทดสอบน้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ระยะทางการทดสอบ 8250 เมตร.....	41
4.10 ภาพ SEM ลักษณะบริเวณกลางรอยเสียดสี ของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว และเหล็กกล้า ที่เคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ กรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง ความเร็วงาน 2.6 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	43
4.11 ภาพ SEM ลักษณะบริเวณกลางรอยเสียดสี ของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ กรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง ความเร็วงาน 3.4 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	44

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ลักษณะการวิเคราะห์ธาตุ ของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0033 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 2.6 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	45
4.13 ลักษณะภาคตัดขวางของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0033 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 2.6 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	46
4.14 ลักษณะการวิเคราะห์ธาตุ ของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 3.4 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	48
4.15 ลักษณะภาคตัดขวางของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 3.4 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	49
4.16 ลักษณะชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่สึกหรอค่อยๆบางลง บริเวณรอยเสียดสีขาออก กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 3.4 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	50
4.17 ลักษณะภาคตัดขวางของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ บริเวณกลางรอยเสียดสี ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ระยะทดสอบ 8250 เมตร ทดสอบแบบต่อเนื่อง กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม และ 0.0063 กรัม.....	51
4.18 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ และไม่เคลือบผิวที่สภาวะ ความเร็วเชิงเส้นงาน 1.3, 2.6, 3.4 และ 6.8 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร.....	53