

รายงานฉบับสมบูรณ์

งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีความแข็งแรงสูง

ด้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนสูง

ประจำปีงบประมาณ 2555

เสนอต่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

โดย

นางกรุณา ตูจันทา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

แบบรายงานฉบับสมบูรณ์

1. รายละเอียดเกี่ยวกับแผนงานวิจัย/โครงการวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีความแข็งแรงสูงด้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนสูง

(ภาษาอังกฤษ) Development of high strength, wear and corrosion resistant stainless steel

ชื่อผู้วิจัย นางกรุณา คู่อินดา

หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หมายเลขโทรศัพท์ 0-2470-9216 โทรสาร 0-2470-9216 e-mail ikarisut@kmutt.ac.th

ได้รับอนุมัติงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556

งบประมาณที่ได้รับ ปี 2555 : 637,500 บาท ปี 2556 : 602,300 บาท ระยะเวลาทำการวิจัย 3 ปี

เริ่มทำการวิจัยเมื่อ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2557

2. รายละเอียดเกี่ยวกับผลงานของการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย/โครงการวิจัย (โดยสรุป)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของวัสดุ (Surface Treatment) ได้ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ที่ผิวของชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยกระบวนการที่เลือกใช้จะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ดังนั้นในการเลือกใช้และออกแบบกระบวนการเพื่อให้กระบวนการกับการใช้งานนั้นขึ้นกับกลไกการเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นตรงกับสถานะการใช้งาน ความเข้าใจต่อความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของวัสดุและสมบัติของวัสดุคือรูปแบบการเสียหายของผิวเคลือบจะช่วยให้สามารถเลือกและออกแบบกระบวนการปรับปรุงวัสดุได้

ดังนั้นในโครงการนี้จึงจะทำการศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างภายในวัสดุที่ผลิตด้วยกระบวนการปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์และฮาร์ดดิสก์แบบต่างๆที่มีต่อสมบัติทางกล และเชื่อมโยงไปสู่การเสียหายภายใต้ภาวะการใช้งานต่างๆ เพื่อหาแนวทางในการออกแบบและพัฒนากระบวนการปรับปรุงสมบัติวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมให้ตอบสนองการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม โดยจะมุ่งเน้นการพัฒนาสมบัติความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานทานการสึกหรอและการกัดกร่อน

2.2 แสดงตารางเปรียบเทียบผลการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานวิจัยที่ได้เสนอไว้กับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการจริง ในรูปของแผนการดำเนินงานตลอดแผนงานวิจัย/โครงการวิจัย ว่ามีกิจกรรม/ขั้นตอนปฏิบัติตามลำดับอย่างไร

โครงการวิจัยมีระยะเวลาการทำงานรวมทั้งสิ้น 36 เดือน โดยมีรายละเอียดระยะเวลาการทำงานดังแสดงในตารางที่ 1 โดยได้เริ่มได้รับงบประมาณเพื่อดำเนินการในเดือนกุมภาพันธ์ 2555

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ

ตารางแสดงเวลาการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปีที่ 1 เดือนที่				ปีที่ 2 เดือนที่				ปีที่ 3 เดือนที่			
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับภาระงานในอุตสาหกรรมเป้าหมาย	■											
2. ศึกษากระบวนการปรับสมบัติที่ผิวรูปแบบต่างๆ	■	■										
3. เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเบื้องต้นและวิเคราะห์เชิงลึกต่างๆและเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลองการปรับสมบัติที่ผิว		■	■									
4. ทดสอบสมบัติต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการปรับปรุงรูปแบบต่างๆภายใต้สภาวะต่างๆ		■	■	■								
5. ออกแบบการทดสอบการเสียหายโดยมีการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ช่วยวิเคราะห์ระดับการเกิดความเสียหายและความเกี่ยวข้องภายใต้สภาวะต่างๆ					■	■						
6. ทดสอบการสึกหรบและการกัดกร่อนของชิ้นงานและวิเคราะห์การเสียหายต่างๆ					■	■	■	■				
7. วิเคราะห์และออกแบบและผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสมบัติตรงตามภาระงานที่สั่งการ									■			
8. ประยุกต์ใช้ผลงานวิจัยกับชิ้นส่วนจริงและวิเคราะห์ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนจริง (รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วน)										■	■	■

1.1. การทดสอบสำหรับอุตสาหกรรมอาร์คิลิก

จากการศึกษาพบว่าปริมาณวิจัยที่ทำการศึกษารวบรวมการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นวัสดุหลักชนิดหนึ่งของอุปกรณ์และชิ้นส่วนทางวิศวกรรม โดยเฉพาะงานด้านป้องกันการกัดกร่อน (corrosion) อย่างต่อเนื่องและมีความนำผิวเคลือบเข้ามาช่วยลดปัญหา ด้านการสึกหรอเช่นเดียวกัน ในปี ค.ศ. 2001 C. Bric และคณะ [1] พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด ในสภาวะการไถส (sliding) แบบแห้ง ภายใต้สภาวะหล่อลื่น โดยเกิดการสึกหรอแบบการยึดติด (adhesive) และการขูดขีด (abrasive) อย่างรุนแรง ต่อมาในปี ค.ศ. 2007 Moneza Zandabimi และคณะ [2] ก็ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เนื่องจาก sliding contact ที่แรงกดต่างๆกัน พบว่าแรงกด (applied load) มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอคือ เมื่อแรงกดมากขึ้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ก็มีการสึกหรอเพิ่มมากขึ้น โดยกลไกการสึกหรอเกิดการสึกหรอแบบขูดขีด (abrasive) และ การสึกหรอแบบหลุดเป็นชั้น (delamination) เป็นหลัก โดยจากการศึกษาของ Moneza Zandabimi และคณะ พบว่าปัจจัยที่ทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการสึกหรอไปนั้น ได้แก่ wear condition , applied load, different features of wear และ wear austenite transformed to martensite และการเคลือบผิวชั้นเดียว (single coating) เช่น TiC, TiN และ WC ด้วยเทคนิค PVD และ CVD เป็นต้น และความพยายามที่จะพัฒนาผิวเคลือบที่มีสมบัติต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น ยังมีการค้นคว้าเทคนิคในการเคลือบต่างๆเช่น มีการทำผิวเคลือบแบบเป็นชั้นๆ (multilayered coating) ด้วยสารเคลือบด้วยสารเคลือบที่แข็งมาก (hard coating) สลับกับสารเคลือบที่แข็งน้อยกว่าแต่เหนียวกว่า (soft/ductile coating) ซึ่งพบว่าช่วยเพิ่มความแข็ง (hardness) การต้านทานการแตกหัก (fracture resistance) และ มีการเกาะติดที่ดีขึ้นด้วย (adhesion) อย่างไรก็ตามวัสดุเคลือบตลอดจนจำนวนชั้น และความหนาของแต่ละชั้นของ multilayered coating ก็ส่งผลให้ได้สมบัติของผิวเคลือบที่แตกต่างกับผิว

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัสดุที่นิยมใช้เป็นอุปกรณ์และเครื่องมือซึ่งสามารถพัฒนาและปรับปรุงได้โดยไม่กระทบกับผลิตภัณฑ์ได้แก่วัสดุเกรด SUS 440C โดยพบว่าควรรักษากระบวนการที่ใช้คุณภาพที่ดีได้แก่ กระบวนการ PVD โดยได้พิจารณาผิวที่สภาวะการเคลือบปัจจุบันในประเทศไทย ซึ่งผิวเคลือบประกอบไปด้วย TiN, TiCN, CrN และ TiAlN

1.1.1. การทดสอบความหนาของผิวเคลือบ

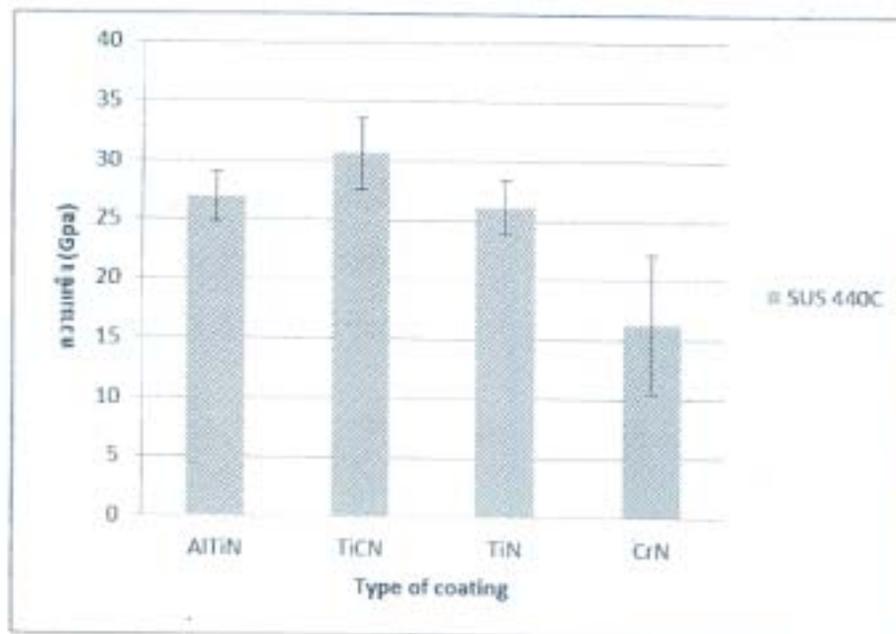
การทดสอบความหนาของผิวเคลือบจะใช้เครื่อง Calotest ในการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหนาของผิวเคลือบ

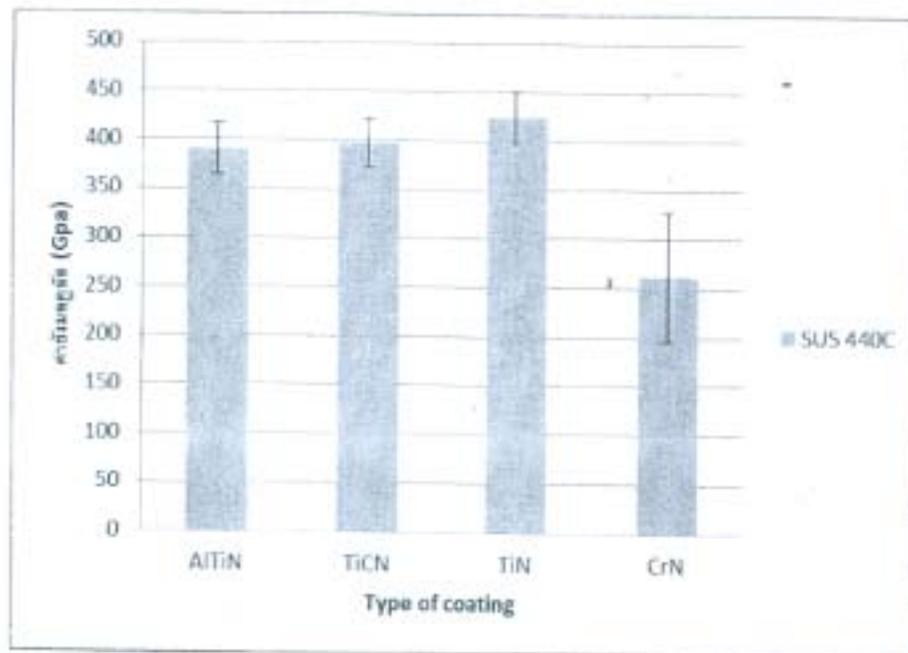
Type of Coating	Thickness layer(µm)
CrN	3.8
TiCN	3.5
AlTiN	3.8
TiN	3.2

1.1.2 การทดสอบความแข็งและก้านักนูนดูลัส (Indentation hardness test)

ตัวแปรที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งจำเป็นต้องทดสอบคือการทดสอบความแข็งและความยืดหยุ่นที่ผิวโดยทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Nanoindentation โดยผลการทดสอบแสดงในรูปแบบที่ 1.1.2 และ 1.1.3 ตามลำดับ



รูปที่ 1.1.2 ค่าความแข็งของผิวเคลือบต่าง ๆ บนวัสดุ SUS 440C



รูปที่ 1.1.3 ค่ามอดูลัสของผิวเคลือบต่าง ๆ บนวัสดุ SUS 440C

1.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านการเกาะยึด

การทดสอบด้านการเกาะยึดของชั้นผิวเคลือบโดยใช้เครื่อง Scratch testing machine ซึ่งกำหนดให้เพิ่มแรงกดแบบสม่ำเสมอ

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำความสะอาดวัสดุแผ่นคัสท์ที่ผ่านการเคลือบ
2. ประกอบเข้ากับฐานยึด
3. นำชิ้นงานไปวางบนแท่นรองรับ

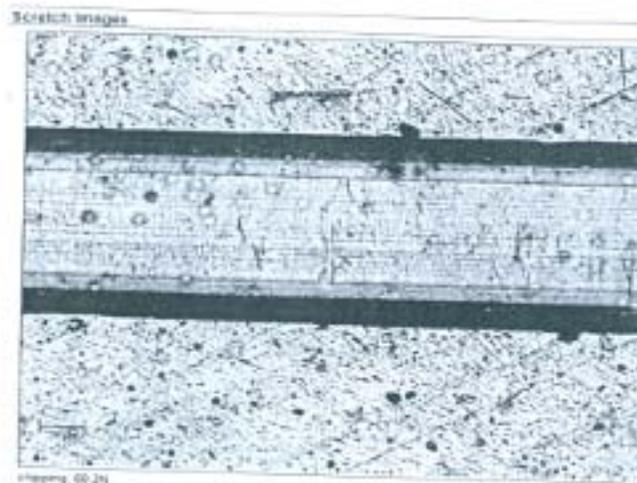
4. กำหนดค่าตัวแปรดังนี้ แรงเริ่มต้น (Begin load) เท่ากับ 0.9N, แรงระยะสุดท้าย (End load) เท่ากับ 100N, ความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตร/นาที และระยะทางที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

โดยแรงที่ก่อให้เกิดการเสียหายครั้งแรกและแรงสูงสุดที่ทำให้ผิวเคลือบเสียหายสูงสุดแสดงในตารางที่ 2 โดยภาพแสดงลักษณะการเสียหายที่แรงที่เกิดการเสียหายครั้งแรกและครั้งสุดท้ายแสดงในรูปที่ 1.1.4-1.1.11 โดยในอุตสาหกรรมสาร์ดิสก์สิ่งที่สำคัญคือการเกิดอนุภาคปนเปื้อนซึ่งทำให้ไม่สามารถยอมรับการเสียหายตั้งแต่ครั้งแรกที่ก่อให้เกิดอนุภาคปนเปื้อนดังนั้นแรงที่ก่อให้เกิดการเสียหายครั้งแรกและรูปแบบการเสียหายจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

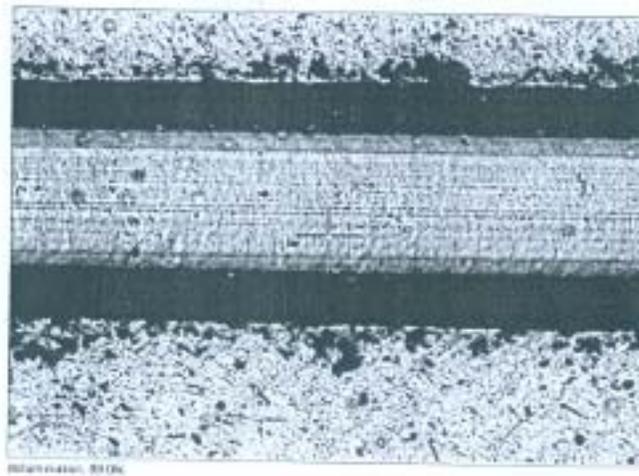
จากผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผิวเคลือบที่สามารถทนต่อการขูดขีดและไม่ก่อให้เกิดอนุภาคปนเปื้อน(การเสียหายไม่เป็นลักษณะการกระเพาะ) คือผิวเคลือบ CrN และ TiCN และ AlTiN อย่างไรก็ตามได้มีการทดสอบการสึกหรอ โดยผลการทดสอบแสดงในลำดับต่อไป

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบการเกาะยึดของผิวเคลือบต่างๆบนวัสดุฐาน SUS440C

ผิวเคลือบ	แรงที่เกิดความเสียหาย (N)	
	ครั้งแรก	ครั้งสุดท้าย
AlTiN	38.795	82.767
CrN	56.123	88.025
TiCN	37.440	83.335
TiN	29.835	78.770

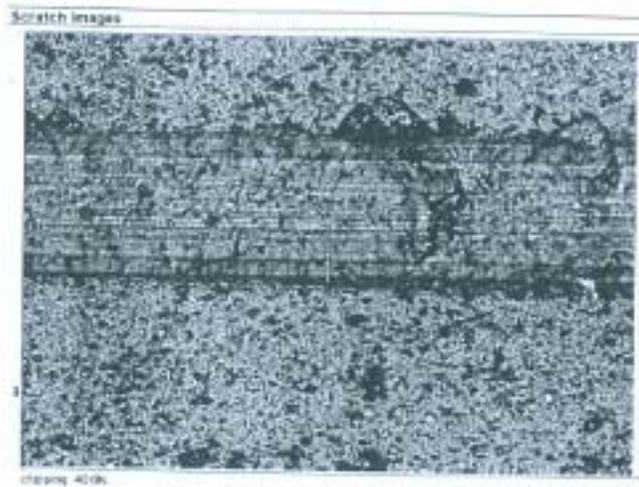


รูปที่ 1.1.4 แสดงบริเวณผิวเคลือบ CrN เริ่มมีการแตกบริเวณขอบของรอยขีด



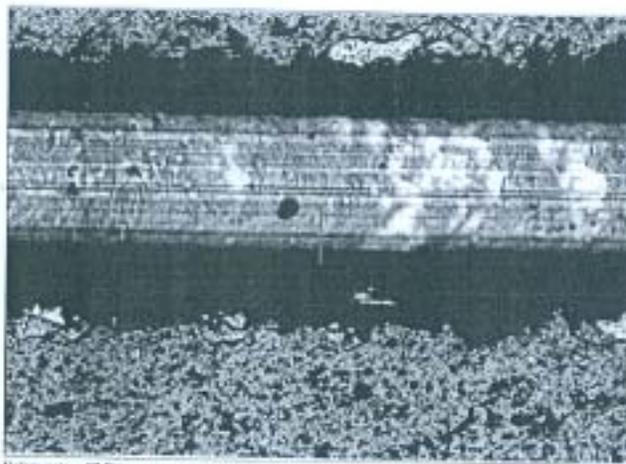
Detachable: 00.0%

รูปที่ 1.5 แสดงบริเวณผิวเคลือบCrNที่แรงกระทำสูงสุด



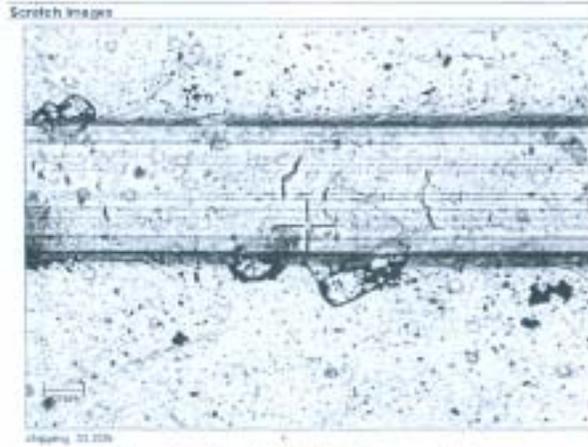
Scratch Images
Image: 40.0%

รูปที่ 1.6 แสดงบริเวณผิวเคลือบTiCNเริ่มมีการแตกบริเวณขอบของรอยขีด

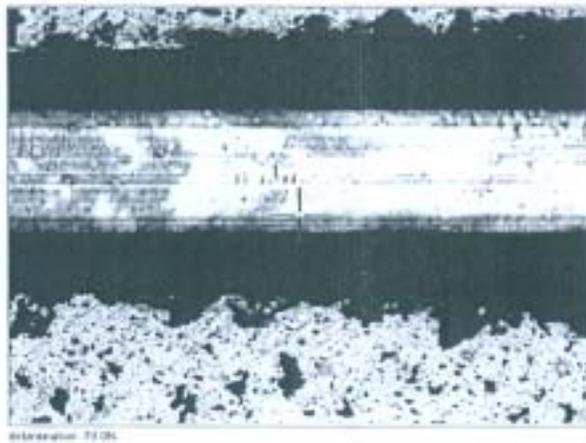


Detachable: 00.0%

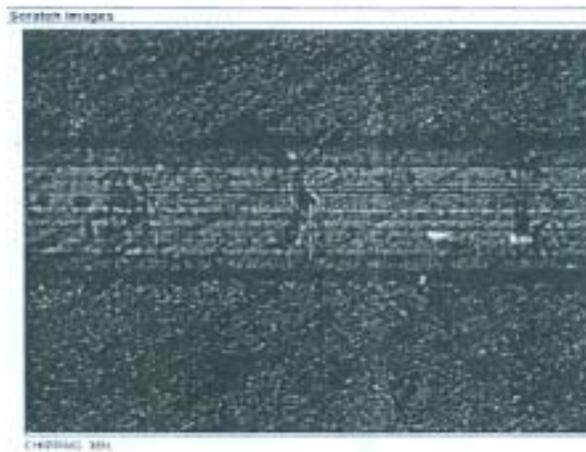
รูปที่ 1.7 แสดงบริเวณผิวเคลือบTiCNที่แรงกระทำสูงสุด



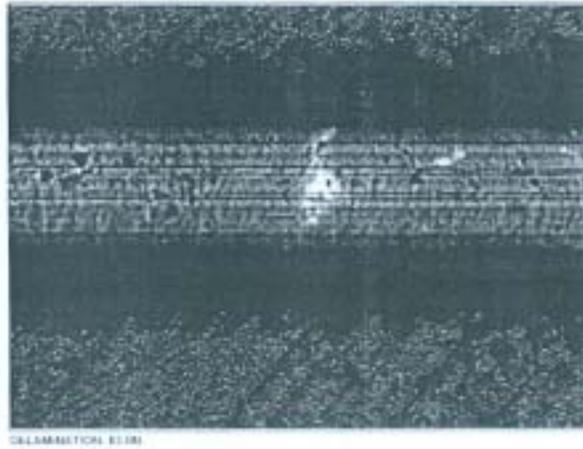
รูปที่ 1.1.8 แสดงบริเวณผิวเคลือบ TiN เริ่มมีการแตกบริเวณขอบของรอยขีด



รูปที่ 1.1.9 แสดงบริเวณผิวเคลือบ TiN เริ่มมีการหลุดออก ซึ่งแรงกระทำสูงสุด



รูปที่ 1.1.10 แสดงบริเวณผิวเคลือบ AlTiN เริ่มมีการแตกบริเวณขอบของรอยขีด



รูปที่ 1.1.11 แสดงบริเวณผิวเคลือบAlTiNที่แรงกระทำสูงสุด

1.1.4 การวิเคราะห์สมบัติการสึกหรอ

ผลการทดสอบการสึกหรอแสดงในรูปที่ 1.1.12-1.1.15 โดยพบว่าผิวเคลือบ TiN, TiAlN มีร่องรอยการสึกหรอที่สูง(สังเกตเห็นเมื่อเหล็กหลังการทดสอบ) ส่วนผิวเคลือบ CrN และTiCNมีร่องรอยการสึกหรอต่ำ (ทดสอบที่แรงกระทำ 4 N ที่ระยะการเคลื่อนที่ 2000ม)

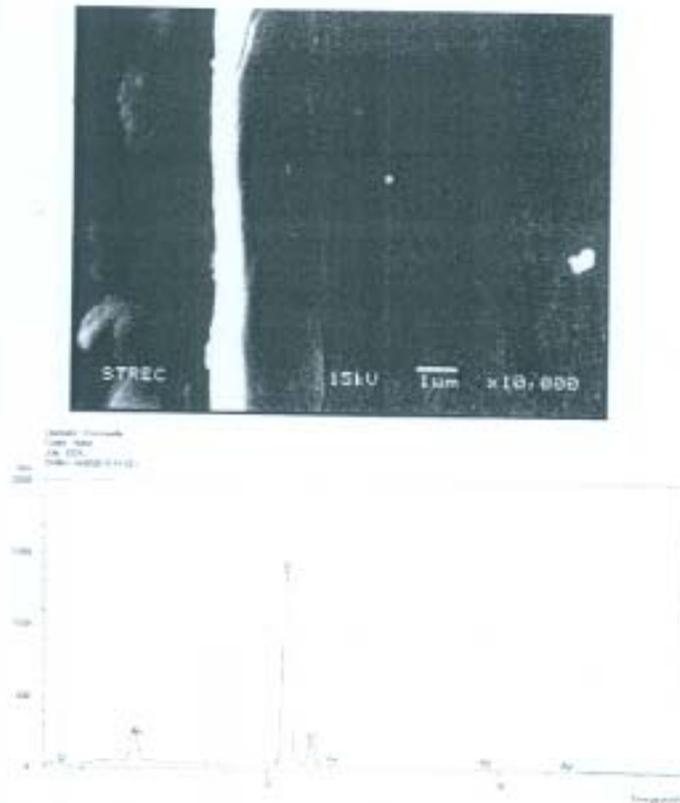


รูปที่ 1.1.12 แสดงร่องรอยการสึกหรอของผิวเคลือบTiN(2X)

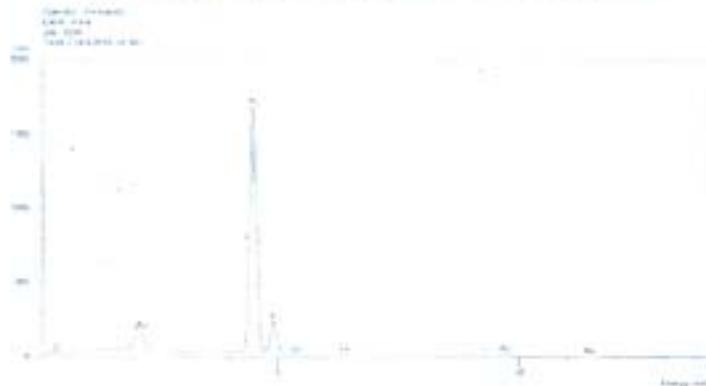
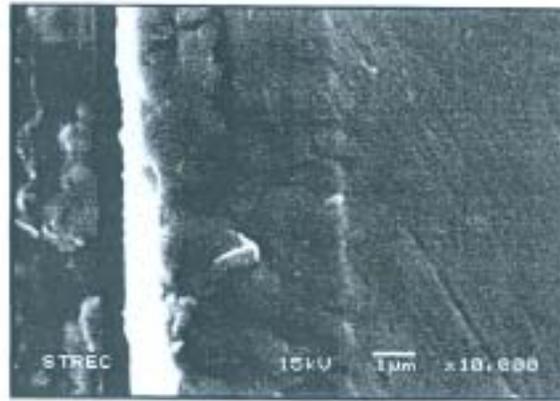
ลักษณะสีผิว ซึ่งข้อจำกัดนี้เป็นข้อจำกัดที่โรงงานมีความต้องการด้วย ดังนั้นในการทดสอบสมบัติวัสดุด้าน โครงสร้างและลักษณะของผิวเคลือบ/องค์ประกอบของธาตุและความเรียบผิว ผู้วิจัยจะขอทดสอบเฉพาะสมบัติผิวเคลือบดังกล่าว

1.1.5 โครงสร้างและลักษณะของผิวเคลือบ/องค์ประกอบของธาตุ

การวิเคราะห์โดยเครื่องSEM เพื่อวิเคราะห์ธาตุและโครงสร้างของผิวเคลือบ โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) โดยผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 1.1.16-1.1.17 และตารางที่ 2 โดยพบว่าผิวเคลือบทั้งสองมีลักษณะพื้นนุ่มและสม่ำเสมอ โดยมีรอยตำหนิกระจายอยู่ในผิวเคลือบ ซึ่งหากมีการพัฒนากระบวนการเคลือบเพื่อลดรอยตำหนิเหล่านี้จะส่งผลให้ผิวเคลือบมีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของธาตุประกอบต่างๆยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับสัดส่วนธาตุประกอบซึ่งย่อมส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลอีกด้วย



รูปที่ 1.1.16 แสดง โครงสร้าง และลักษณะของผิวเคลือบ/องค์ประกอบของธาตุ Cr-N



รูปที่ 1.17 แสดง โครงสร้างและลักษณะ ของผิวเคลือบ/องค์ประกอบของธาตุ-TiCN

ตารางที่ 3 แสดงธาตุผสมของแต่ละผิวเคลือบที่ได้จากการ ใช้เทคนิค XRD ในการวิเคราะห์

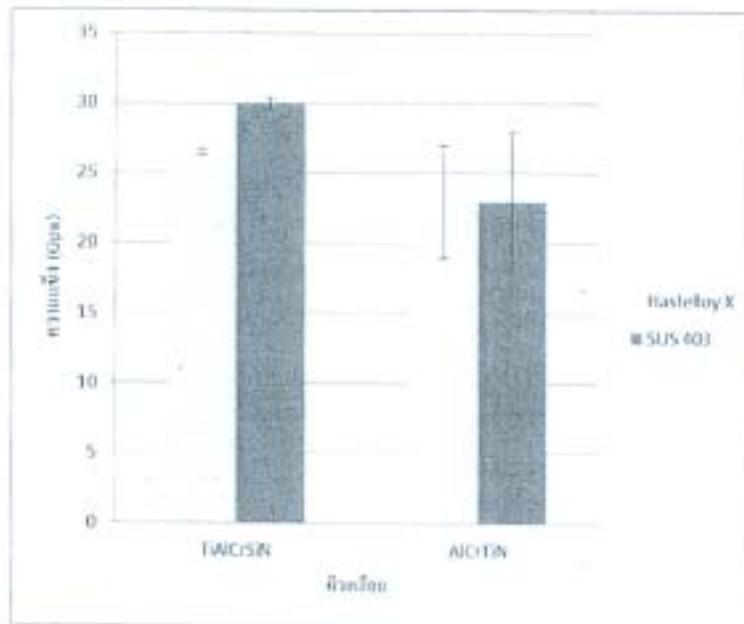
Element (%)	Coating	
	CrN	TiCN
Fe	6.84	1.65
Cr	93.16	0.4
Ti	-	97.95
Total	100	100

1.2 การทดสอบสำหรับกลุ่มอุตสาหกรรมที่ใช้ในอุณหภูมิสูง

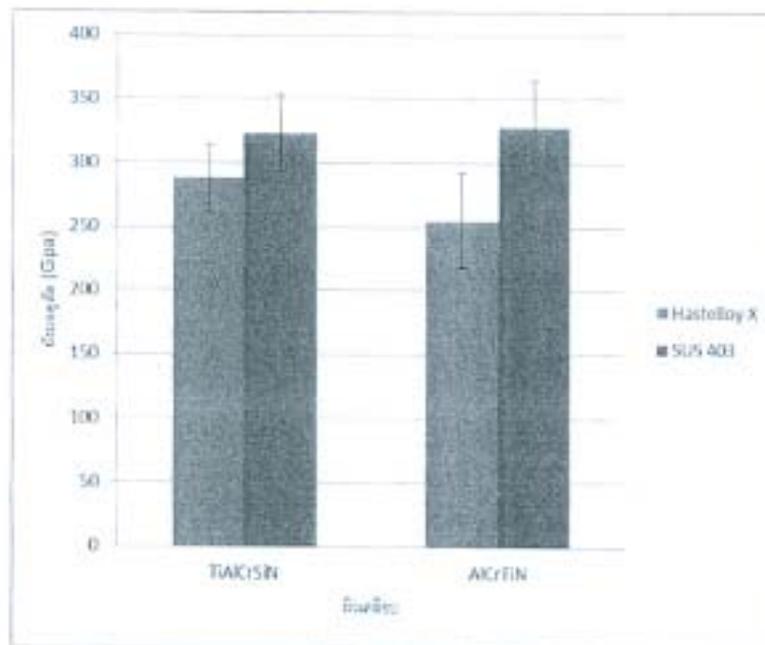
กระบวนการ PVD และ CVD ได้รับความยอมรับว่าเป็นกระบวนการที่สามารถใช้ผลิตผิวเคลือบที่มีคุณภาพสูง ได้แก่ มีสมบัติการเกาะติดดี มีความหนาแน่นของผิวเคลือบสูง และสามารถทำการเคลือบสารเคลือบได้ทั้งบนชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง โดยผิวเคลือบที่นิยมใช้ในงานด้านทอการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงได้แก่ สารประกอบของไทเทเนียมและโครเมียม (เช่น CrN, TiN, TiC, TiAlN, CrAlN และอื่นๆ) เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและด้านทนการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามพบว่าอุปกรณ์ประเภทเดียวกับผลิตจากวัสดุเดียวกัน เคลือบปรับปรุงสมบัติโดยกระบวนการเดียวกัน อาจแสดงสมบัติการด้านทอการสึกหรอที่ไม่เท่าเทียมกัน ได้จึงมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานภายใต้สภาวะเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของผิวเคลือบที่ผลิตด้วยกระบวนการเดียวกันก็แตกต่างกันไปตามสภาวะการปรับปรุงอีกด้วย [4-22]เช่น ในกระบวนการเคลือบผิวแข็ง ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (bias Voltage) กำลังในการเคลือบ (deposition power) Energy and Flux of bombarding particles และอุณหภูมิในขณะเคลือบก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อโครงสร้างของสารเคลือบที่ผลิตได้ [16-17] จาก

1.2.2 ทดสอบความแข็งและค่า Young's Modulus ของผิวเคลือบ

ผิวเคลือบ AlCrTiN และ TiAlCrSiN ที่ถูกเคลือบลงบนชิ้นงานทดสอบ Hastelloy X และ SUS 403 นำมาทดสอบความแข็งและค่า Young's Modulus ด้วยเครื่องมือทดสอบ Nano Indentation โดยผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 1.2.2 และ 1.2.3



รูปที่ 1.2.2 ค่าความแข็งของผิวเคลือบของวัสดุตั้งต้น Hastelloy X และ SUS 403



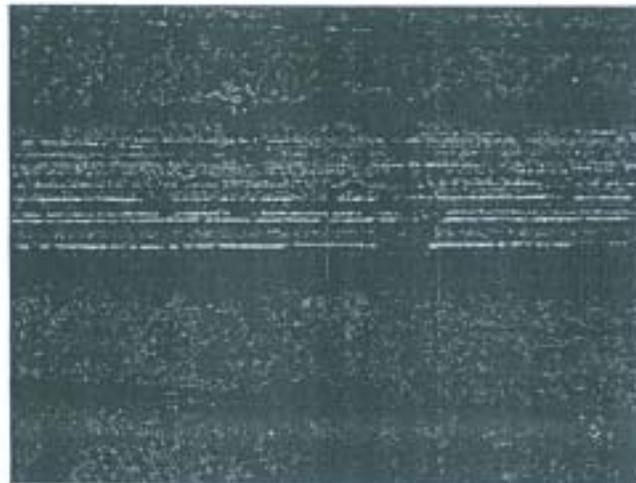
รูปที่ 1.2.3 ค่า Young's Modulus ของผิวเคลือบของวัสดุตั้งต้น Hastelloy X และ SUS 403

1.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านการเกาะยึดและสมบัติวัสดุด้านโครงสร้าง

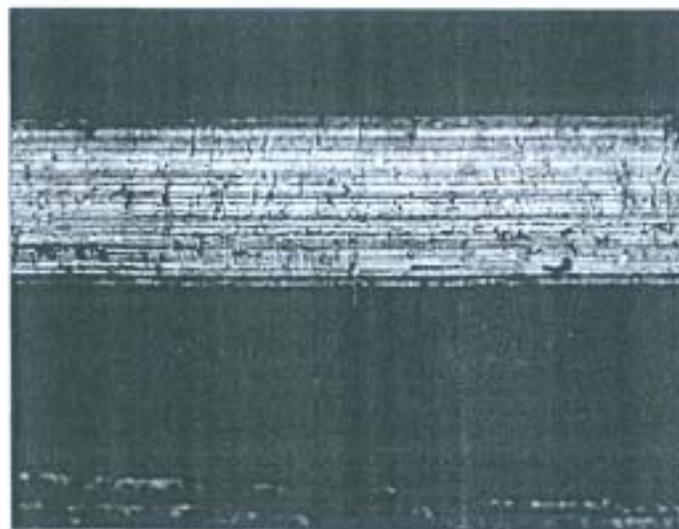
การทดสอบด้านการเกาะยึดของชั้นผิวเคลือบ โดยใช้เครื่อง Scratch testing machine ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบ เช่นเดียวกับกรณีของกลุ่มอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 1.2.4-1.2.11

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบการเกาะยึดของผิวเคลือบต่าง ๆ บนวัสดุฐาน SUS403 และ Hastelloy X

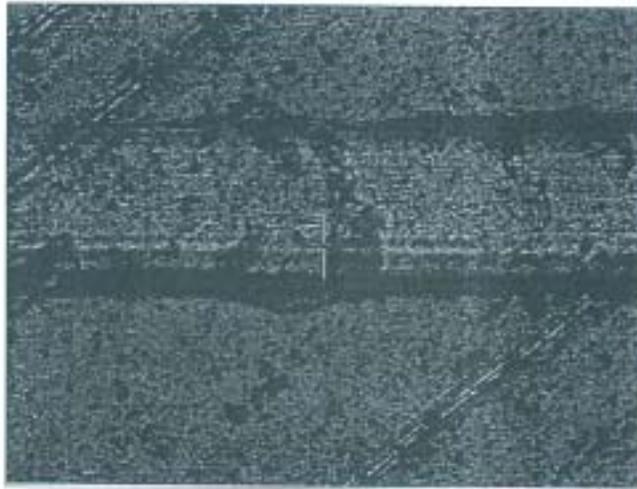
วัสดุ	แรงที่เกิดความเสียหาย (N)	
	ครั้งแรก	ครั้งสุดท้าย
ผิวเคลือบ AlCrTiN บน Hastelloy X	14.07	59.73
ผิวเคลือบ TaAlCrSiN บน Hastelloy X	20.87	71.25
ผิวเคลือบ AlCrTiN บน SUS 403	22.55	70.19
ผิวเคลือบ TaAlCrSiN บน SUS 403	16.21	34.16



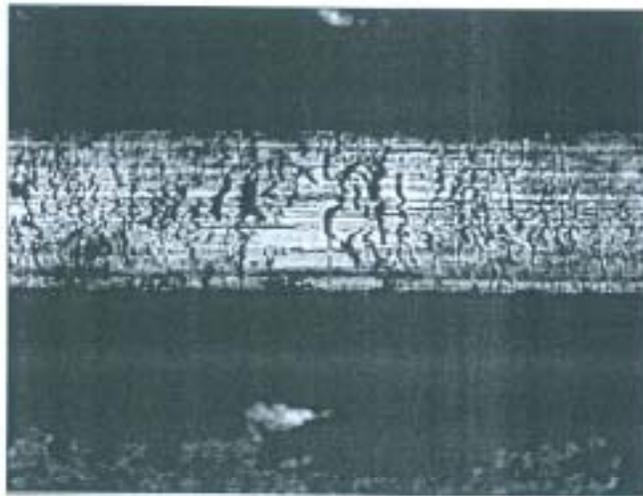
รูปที่.2.4 แสดงบริเวณผิวเคลือบ AlCrTiN บน Hastelloy X เมื่อเริ่มมีการแตกบริเวณขอบของรอยขีด



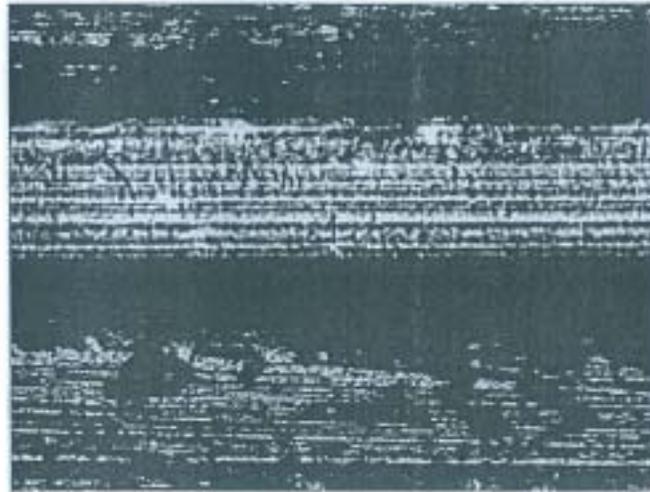
รูปที่.2.5 แสดงบริเวณผิวเคลือบ AlCrTiN บน Hastelloy X ที่แรงกระทำสูงสุด



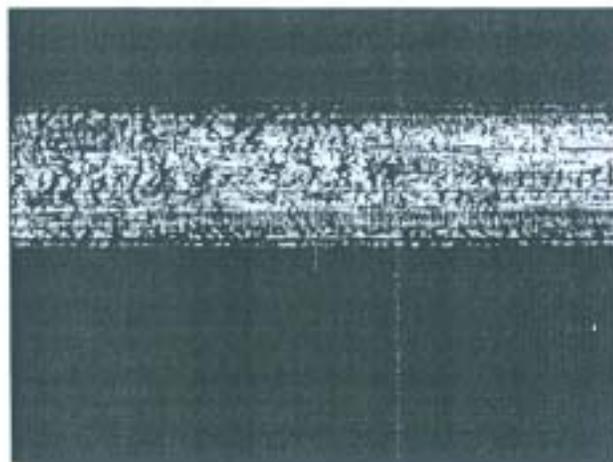
รูปที่ 2.6 แสดงบริเวณผิวทึบสีเงิน AICrTiSiN บน Hastelloy X เวิร์นมีลักษณะที่ผิวขอบของรอยขีด



รูปที่ 2.7 แสดงบริเวณผิวทึบสีเงิน AICrTiSiN บน Hastelloy X เวิร์นมีลักษณะหลุดออก ที่แรงกระทำสูงสุด



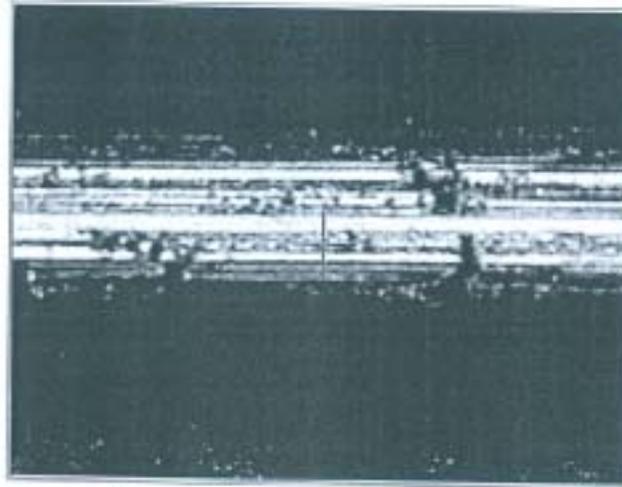
รูปที่ 1.2.8 แสดงบริเวณผิวเคลือบ AICrTiN บน SUS403 ที่เริ่มมีการหลุดออก



รูปที่ 1.2.9 . แสดงบริเวณผิวเคลือบ AICrTiN บน SUS403 ที่เริ่มกรรทำสูงสุด



รูปที่ 1.2.10 แสดงบริเวณผิวเคลือบ TiAlCrSiN บน SUS 403 ที่เริ่มมีการหลุดออก



รูปที่ 1.2.11 แสดงบริเวณผิวเคลือบผิวเคลือบ TiAlCrSiN บน SUS 403 เริ่มมีการหลุดออก ที่แรงกระทำสูงสุด

1.2.4 การทดสอบการสึกกร่อน

ผลการทดสอบการสึกกร่อนที่อุณหภูมิห้องแสดงในตารางที่ 5 (load ที่ใช้ คือ 1 และ 3 นิวตัน)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการสึกกร่อนของผิวเคลือบต่างจากบนวัสดุฐาน SUS403 และ Hastelloy X ที่อุณหภูมิห้อง

Type	Wear volumex10 ⁻³ (mm ³)		Wear rate x10 ⁻³ (mm ³ /m)		Wear coefficient x10 ⁻³ ,k (mm ³ /N m)
	1	3	1	3	
Hastelloy X	11.65	18.88	0.7167	1.2587	0.2710
Hastelloy X AlCrTiN	6.25	8.88	0.0014	0.0044	0.0015
Hastelloy X TiAlCrSiN	1.86	6.25	0.0005	0.0031	0.0013
SUS 403	4.72	9.88	0.0944	0.3293	0.1175
SUS 403 AlCrTiN	9.30	9.33	0.0041	0.0079	0.0019
SUS 403 TiAlCrSiN	2.53	2.43	0.0023	0.0049	0.0013

1.2.5 ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีและความหนาของผิวเคลือบ

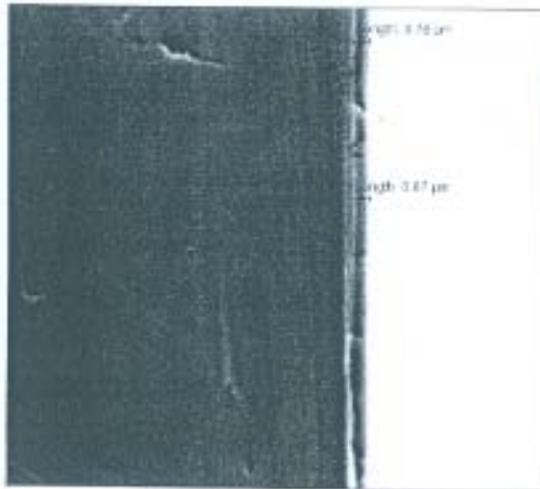
ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน Hastelloy X และ SUS403 ที่เคลือบด้วยผิวเคลือบ AlCrTiN และ TiAlCrSiN โดย
ใช้เทคนิค EDS แสดงในตารางที่ 6 และ 7 และภาพโครงสร้างแสดงในรูปที่ 1.2.12-1.2.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 แสดงส่วนประกอบของผิวเคลือบต่างจากบนวัสดุฐาน Hastelloy X

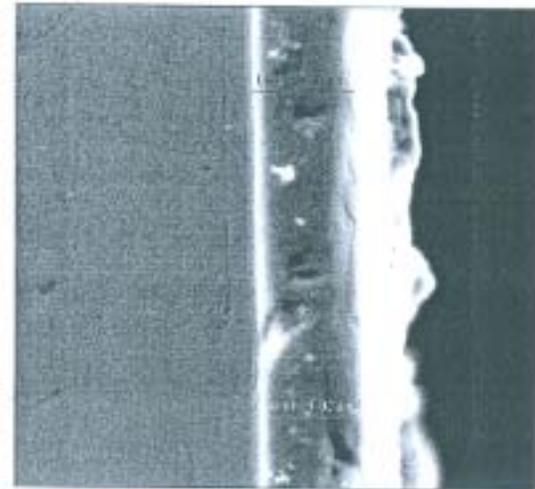
Element	ส่วนผสมทางเคมี (% wt)						
	Cr	Si	Fe	Ni	Al	Ti	N
AlCrTiN	26.8	1.9	8.3	11.1	10.8	16.6	24.3
TiAlCrSiN	26.6	1.64	8.5	10.3	10.7	16.5	25.7

ตารางที่ 7 แสดงส่วนประกอบของผิวเคลือบต่างจากบนวัสดุฐาน SUS403

Element	ส่วนผสมทางเคมี (% wt)						
	Cr	Si	Fe	C	Al	Ti	N
AlCrTiN	41.6	-	18.9	-	21.9	17.5	-
TiAlCrSiN	27.8	0.2	1.7	5.1	6.5	24.4	34.2

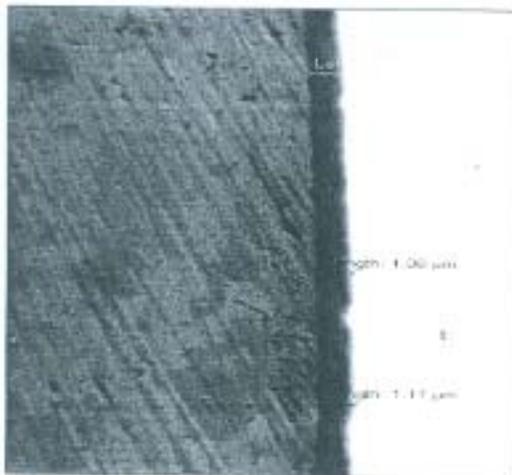


ผิวเคลือบ TiAlCrSiN

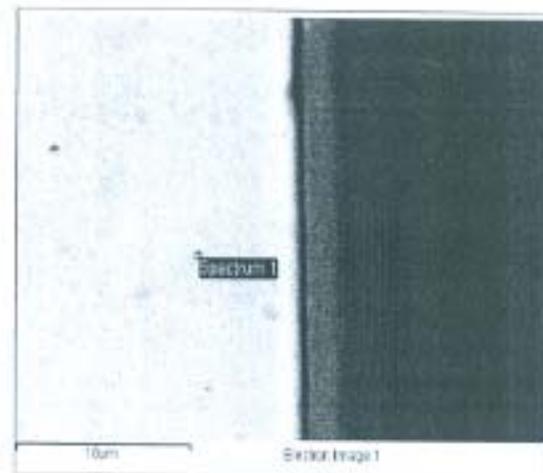


ผิวเคลือบ AlCrTiN

รูปที่ 1.2.12 ภาพแสดงหน้าตัดของผิวเคลือบบนชิ้นงานทดสอบ Hastelloy X



ผิวเคลือบ TiAlCrSiN



ผิวเคลือบ AlCrTiN

รูปที่ 1.2.13 ภาพแสดงหน้าตัดของผิวเคลือบบนชิ้นงานทดสอบ SUS403

1.2.6 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวได้ถูกนำไปอบในบรรยากาศของ เตาที่อุณหภูมิ 700-950 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงาน Hastelloy X และ SUS403 ที่ผ่านการทดสอบการทดสอบเป็นเวลา 30 และ 60 นาที ถูกนำไปตรวจสอบสภาพผิวและแสดงในตารางที่ 8 และ 9 และ 10 และ 11 ตามลำดับ พบว่าเมื่อผ่านการอบ 30 นาที ชิ้นงาน Hastelloy X ที่ไม่ได้เคลือบผิว จะเริ่มเกิดความเสียหายที่อุณหภูมิ 900 °C และที่อุณหภูมิ 950 °C ชิ้นงานจะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้น จากการตรวจสอบ ส่วนผสมทางเคมีบริเวณที่เกิดความเสียหายด้วยเทคนิค EDS พบว่าบริเวณชิ้นงานที่เกิดความเสียหายนั้น มีออกซิเจน ประกอบอยู่ 1.8 % และในกรณีที่ผ่านการอบ 60 นาที พบว่าชิ้นงาน Hastelloy X ที่ไม่ได้เคลือบผิวจะเริ่มเกิด ความเสียหายที่อุณหภูมิ 850 °C และที่อุณหภูมิ 900 - 950 °C ชิ้นงานจะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นเมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบ ส่วนผสมทางเคมีบริเวณที่เกิดความเสียหายด้วยเทคนิค EDS พบว่าบริเวณชิ้นงานที่เกิดความเสียหายนั้น มีออกซิเจน ประกอบอยู่ 7.7 % แต่ชิ้นงาน Hastelloy X ซึ่งเคลือบผิวด้วย AlCrTiN และ TiAlCrSiN ไม่เกิดความเสียหาย

การเสื่อมสภาพของ SUS 403 ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบนั้นจะคล้ายกับการเสื่อมสภาพของ Hastelloy X ที่เริ่มเกิดที่ 900 °C เมื่อผ่านการอบ 30 นาที แต่จะเริ่มเสียหายตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 700 °C เมื่อผ่านการอบ 60 นาที และเมื่อนำชิ้นงานไป ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีพบว่า มีออกซิเจนประกอบอยู่ 12.9-18.8% แต่ชิ้นงาน SS 403 ซึ่งเคลือบผิวด้วย

AlCrTiN และ TiAlCrSiN ไม่เกิดความเสียหาย โดยผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของผิวเคลือบภายหลังการอบที่ อุณหภูมิ 950 เป็นเวลา30นาที60นาทีของผิวเคลือบทั้งสองบนวัสดุฐานที่ทั้งสองแสดงผลในส่วนตัวัดไป

ตารางที่8 แสดงลักษณะผิวของวัสดุHastelloyXที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวต่างๆเมื่อผ่านการอบเป็นเวลา30นาที

ลักษณะผิว	700 °C	850 °C	900 °C	950 °C
ไม่ได้เคลือบผิว				
เคลือบ AlCrTiN				
เคลือบ TiAlCrSiN				

ตารางที่9 แสดงลักษณะผิวของวัสดุHastelloyXที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวต่างๆเมื่อผ่านการอบเป็นเวลา60นาที

ลักษณะผิว	700 °C	850 °C	900 °C	950 °C
ไม่ได้เคลือบผิว				
เคลือบ AlCrTiN				
เคลือบ TiAlCrSiN				

ตารางที่ 10 แสดงลักษณะผิวของวัสดุ SUS403 ที่ไม่ผ่านการและผ่านการเคลือบผิวต่างๆ เมื่อผ่านการอบเป็นเวลา 30 นาที

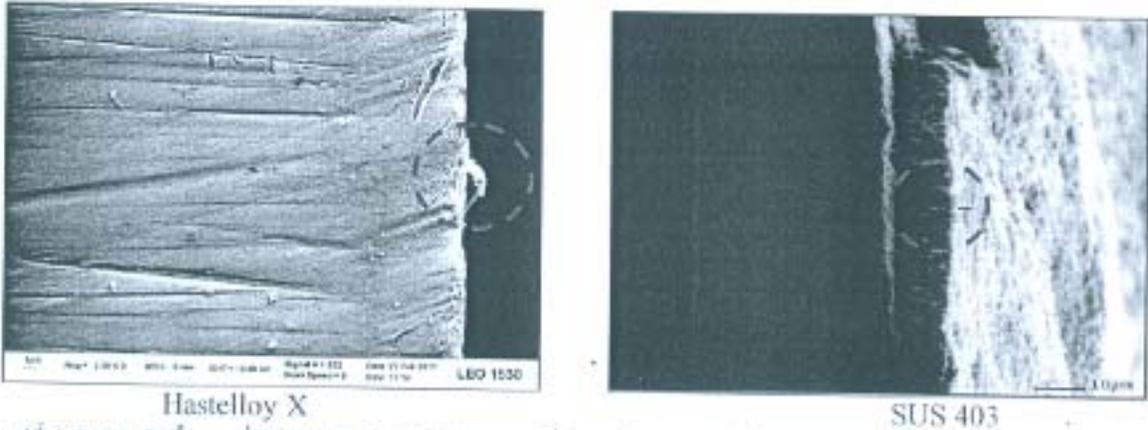
ลักษณะผิว	700 °C	850 °C	900 °C	950 °C
ไม่ได้เคลือบผิว				
เคลือบ AlCrTiN				
เคลือบ TiAlCrSiN				

ตารางที่ 11 แสดงลักษณะผิวของวัสดุ SUS403 ที่ไม่ผ่านการและผ่านการเคลือบผิวต่างๆ เมื่อผ่านการอบเป็นเวลา 60 นาที

ลักษณะผิว	700 °C	850 °C	900 °C	950 °C
ไม่ได้เคลือบผิว				
เคลือบ AlCrTiN				
เคลือบ TiAlCrSiN				

1.2.7 การทดสอบส่วนประกอบของผิวเคลือบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูง

ในรูปที่ 1.2.14 และตารางที่ 12 แสดงผลการทดสอบส่วนประกอบของวัสดุ SUS403 และ Hastelloy X ที่ผ่านการทดสอบการอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้เทคนิค EDS ซึ่งจะอิง EDS บริเวณวงกลมสีแดง



รูปที่ 1.2.14 ผิวชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิวหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 12 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน Hastelloy X และ SUS 403 ที่ไม่ได้เคลือบ หลังอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 30 นาที

Element	ส่วนผสมทางเคมี (% wt)							
	O	Cr	Fe	Ni	C	Al	Si	Mo
Hastelloy X	1.8	18.7	17.2	42.4	2.2	1	1.3	7.3
SUS 403	18.8	7.6	73.6	-	-	-	-	-

จากที่ชิ้นงาน Hastelloy X และ SUS 403 ที่ไม่ได้เคลือบผิวหลังอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 30 นาที หลังการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าเกิดความเสี่ยงหายบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน และจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS พบว่า Hastelloy X ซึ่งไม่ได้เคลือบผิว มีออกซิเจนประกอบอยู่ 1.8 % และ SUS 403 ซึ่งไม่ได้เคลือบผิว มีออกซิเจนประกอบอยู่ 18.8 % จึงสรุปได้ว่า SUS 403 ซึ่งไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว จะเกิดความเสี่ยงหายหลังการอบที่อุณหภูมิสูงมากกว่า Hastelloy X ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวเหมือนกัน



(a.) ไม่ผ่านการเคลือบผิว

(b.) เคลือบด้วย AlCrTiN

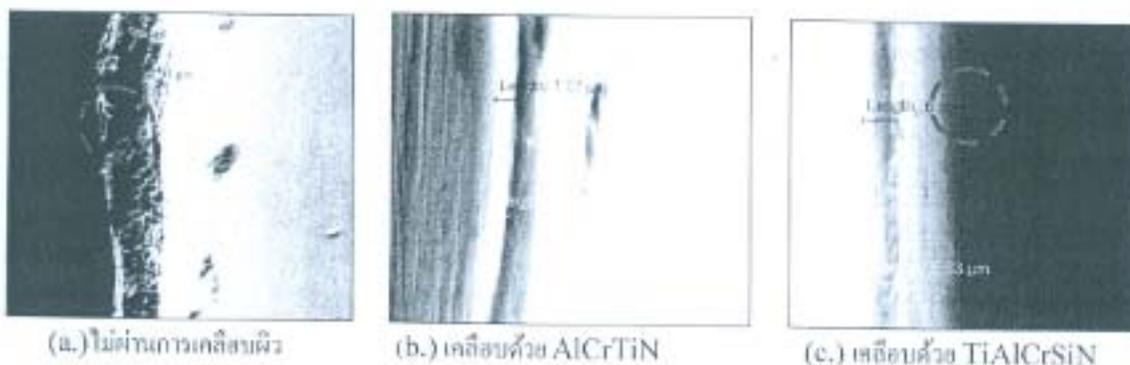
(c.) เคลือบด้วย TiAlCrSiN

รูปที่ 1.2.15 การตรวจสอบผิวชิ้นงานของ Hastelloy X หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 60 นาที

ตารางที่ 13 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน Hastelloy X และ ที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบด้วย AlCrTiN และ TiAlCrSiN หลังอบที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 60 นาที

Hastelloy X	ส่วนผสมทางเคมี (% wt)							
	O	Cr	Fe	Ni	C	Mo	Si	Ti
Non coat	7.7	12.8	12.5	34.1	26.7	5.3	-	-
AlCrTiN	4.2	38.7	13.1	38.2	-	-	0.5	5.3
TiAlCrSiN	6.6	18.8	17	48.6	-	7.8	1.2	-

รูปที่ 1.2.15 และ ตารางที่ 13 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของ Hastelloy X ที่ไม่ได้เคลือบผิว หลังอบที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายซึ่งบริเวณที่เกิดความเสียหายมีออกซิเจนประกอบอยู่ 7.7 % สำหรับผิวที่เคลือบด้วย AlCrTiN พบว่าชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย แต่พบออกซิเจนประกอบอยู่ 4.2 % และผิวที่เคลือบด้วย TiAlCrSiN พบว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายแต่ความเสียหายรุนแรงน้อยกว่า Hastelloy X ที่ไม่ได้เคลือบผิว และ บริเวณที่เกิดความเสียหายมีออกซิเจนประกอบอยู่ 6.6 % จึงสามารถสรุปได้ว่า Hastelloy X ที่ผ่านการเคลือบผิวมีความสามารถในการทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่า Hastelloy X ที่ไม่ได้เคลือบผิว และ Hastelloy X ที่เคลือบผิวด้วย AlCrTiN มีความสามารถในการทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่า ผิวที่เคลือบด้วย TiAlCrSiN



รูปที่ 1.2.16 การตรวจสอบผิวชิ้นงานของ SUS 403 หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 60 นาที

ตารางที่ 14 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน SUS 403 และ ที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบด้วย AlCrTiN และ TiAlCrSiN หลังอบที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 60 นาที

SUS 403	ส่วนผสมทางเคมี (% wt)								
	O	Cr	Fe	Ni	C	Mo	Al	N	Ti
Non coat	12.9	17.4	62	0.7	6.1	0.8	-	-	-
AlCrTiN	-	43.7	28.2	-	-	-	8.2	1.4	18.4
TiAlCrSiN	3.9	10.1	77.9	1.6	6.4	-	-	-	-

รูปที่ 1.2.16 และ ตารางที่ 14 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของ SUS 403 ที่ไม่ได้เคลือบผิว หลังอบที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายซึ่งบริเวณที่เกิดความเสียหายมีออกซิเจนประกอบอยู่ 12.9 % สำหรับผิวเคลือบ AlCrTiN พบว่าชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย และไม่พบออกซิเจนเป็นธาตุ และสำหรับผิวเคลือบด้วย TiAlCrSiN พบว่าชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายแต่พบออกซิเจนที่ประกอบอยู่เพียง 3.9 % จึงสามารถสรุปได้ว่า SUS 403 ที่ผ่านการเคลือบผิวมีความสามารถในการทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่า SUS

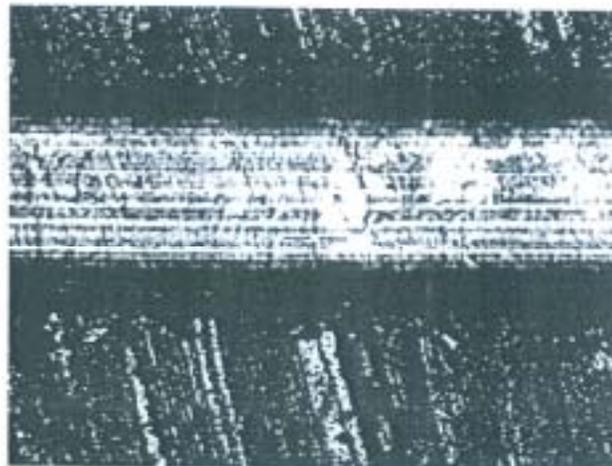
403 ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว และผิวที่เคลือบด้วย AlCrTiN มีความสามารถในการทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าผิวที่เคลือบด้วย TiAlCrSiN ซึ่งผิวที่เคลือบด้วย AlCrTiN ไม่ปรากฏออกซิเจนเลย

1.2.8 ผลการทดสอบความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบหลังการอบ

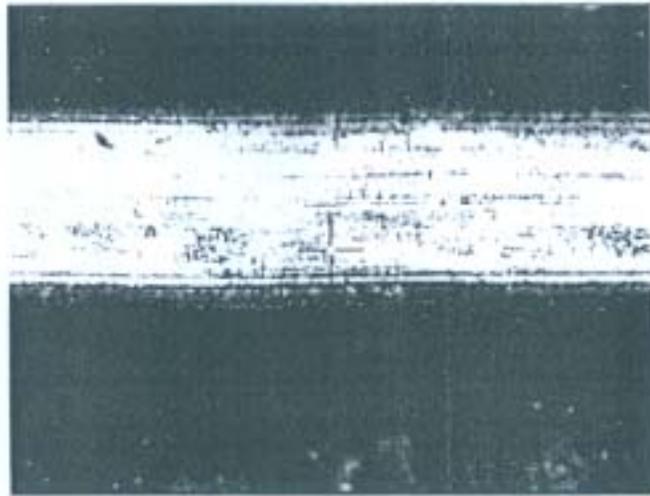
ผลการทดสอบความสามารถในการเกาะยึดของผิวเคลือบ AlCrTiN และ TiAlCrSiN หลังการอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 60 นาที แสดงในตารางที่ 15 และรูปที่ 1.2.17-1.2.24

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบความสามารถ ในการเกาะยึดของผิวเคลือบเคลือบ AlCrTiN และ TiAlCrSiN บนชิ้นงาน Hastelloy X และ SUS 403 ด้วยเครื่องมือ 4 Scratch Test

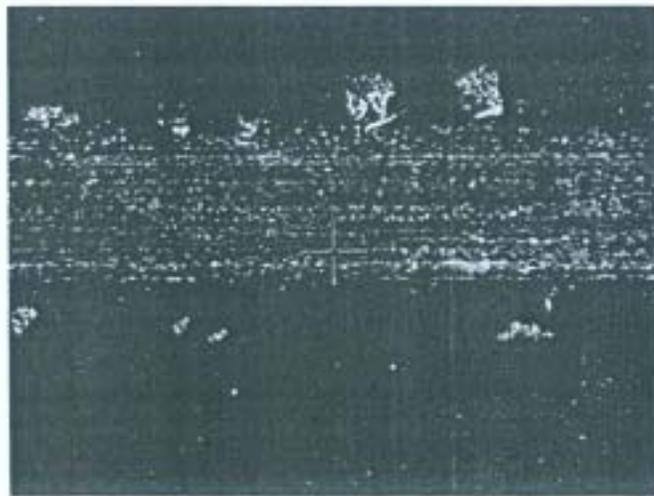
วัสดุ	แรงที่เกิดความเสียหาย (N)	
	Chipping	Delamination
ผิวเคลือบ AlCrTiN บน Hastelloy X	20.57	34.64
ผิวเคลือบ TiAlCrSiN บน Hastelloy X	15.98	36
ผิวเคลือบ AlCrTiN บน SUS 403	15.03	36.86
ผิวเคลือบ TiAlCrSiN บน SUS 403	13.09	32.99



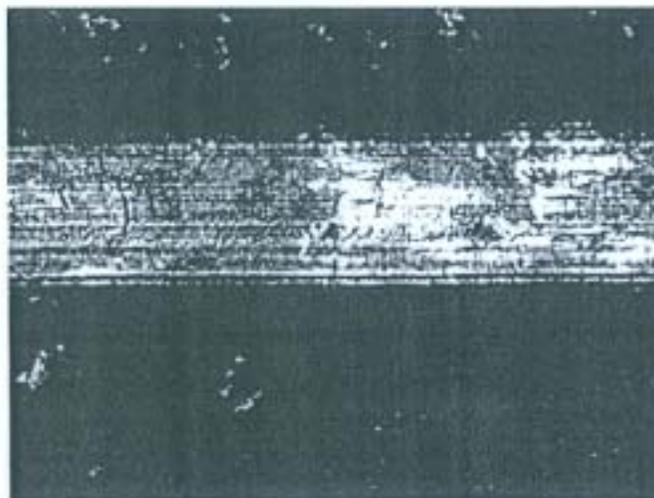
รูปที่ 1.2.17 แสดงบริเวณผิวเคลือบ AlCrTiN บน Hastelloy X ที่เริ่มมีการแตกบริเวณขอบของออกซิด



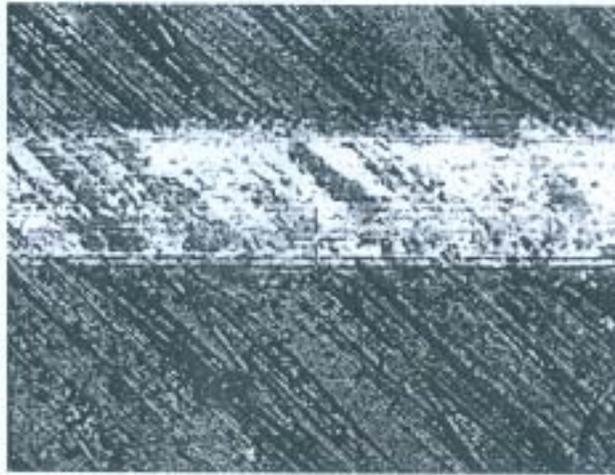
รูปที่ 1.2.18 แสดงบริเวณผิวรอยเชื่อม Ti-6Al-4V กับ Hastelloy X ซึ่งมีปรากฏผลที่แรงกระทำสูงๆ



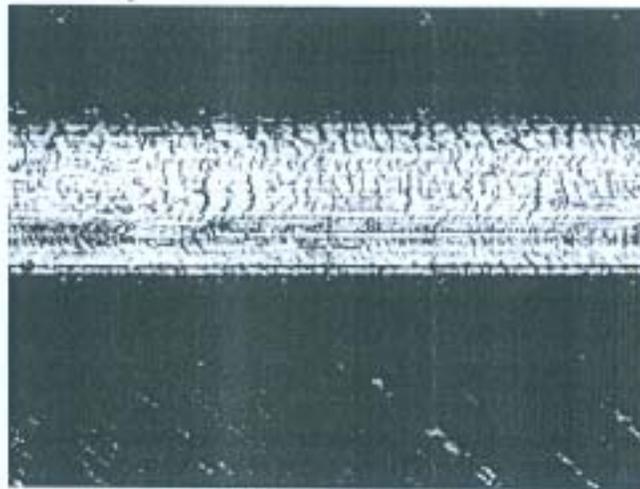
รูปที่ 1.2.19 แสดงบริเวณผิวรอยเชื่อม Ti-6Al-4V กับ Hastelloy X ซึ่งมีปรากฏผลบริเวณขอบของรอยเชื่อม



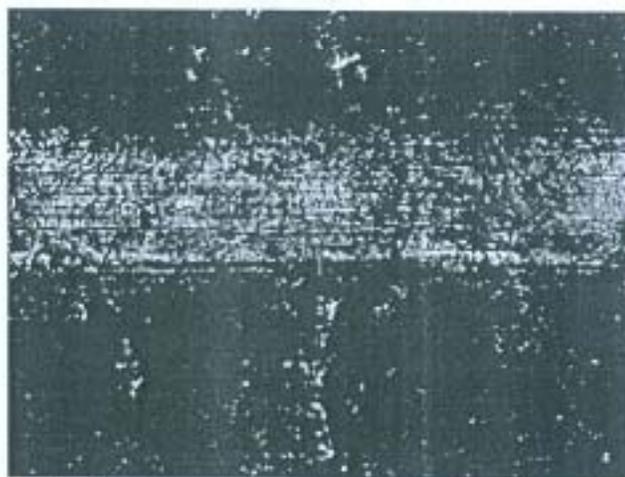
รูปที่ 1.2.20 แสดงบริเวณผิวรอยเชื่อม Ti-6Al-4V กับ Hastelloy X ซึ่งมีปรากฏผลที่แรงกระทำสูงๆ



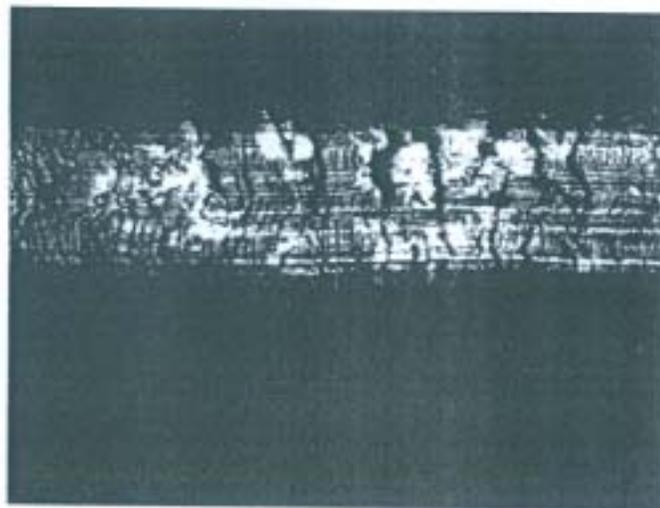
รูปที่ 1.2.21 แสดงบริเวณผิวเคลือบ ALICYN บน SUS 403 เริ่มมีการแตกบริเวณขอบของรอยขีด



รูปที่ 1.2.22 แสดงบริเวณผิวเคลือบ ALICYN บน SUS 403 เริ่มมีการหลุดออก ที่แรงกระทำสูงสุด



รูปที่ 1.2.23 แสดงบริเวณผิวเคลือบ TiAl3N บน SUS 403 เริ่มมีการแตกบริเวณขอบของรอยขีด



รูปที่ 1.2.24 แสดงบริเวณผิวเคลือบ TiAlCrSiN บน SUS 403 เริ่มมีการหลุดออก ที่แรงกระทำสูงสุด

จากตารางที่ 15 พบว่า ผิวเคลือบ AlCrTiN ที่เคลือบลงบน Hastelloy X หลังการอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 60 นาที จะมีความสามารถในการเกาะยึดได้ดีกว่า ผิวเคลือบ TiAlCrSiN ที่เคลือบลงบน Hastelloy X และ ผิวเคลือบ TiAlCrSiN ที่เคลือบลงบน SUS 403 หลังการอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 60 นาที จะมีความสามารถในการเกาะยึดได้ดีกว่า ผิวเคลือบ AlCrTiN แต่ไม่มากนักหรืออาจใกล้เคียงกันมาก สันเกตได้จากวงที่ทา ให้เกิด Delamination แต่ก็ไม่ต่างกันมากเท่าไรนัก

ซึ่งสอดคล้องกับร่องรอยการสึกหรอที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอซึ่งพบว่า ผิวเคลือบของ Hastelloy X ที่ดีที่สุดคือ TiAlCrSiN มีปริมาณการสึกหรอที่ต่ำกว่า AlCrTiN ทั้งการทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C และ 1000 °C

สำหรับผิวเคลือบของ SUS 403 ที่ดีที่สุดคือ TiAlCrSiN มีปริมาณการสึกหรอที่ต่ำกว่า AlCrTiN อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา Oxidation ทำให้การเสื่อมสภาพของผิวจะมีผลทำให้ความสามารถในการเกาะยึดลดลงและอัตราการสึกหรอของผิวโดยเฉลี่ยในส่วนนี้ไป

1.2.9 การทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิสูง

ผลการทดสอบการสึกหรอแสดงในตารางที่ 16 และ 17 ภายใต้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 600°C และ 1000°C ตามลำดับ จากตารางพบว่า การสึกหรอสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงผิวเคลือบของวัสดุฐาน Hastelloy X และ SUS403 ที่ดีที่สุดคือ TiAlCrSiN มีปริมาณการสึกหรอที่ต่ำกว่า AlCrTiN

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบการสึกหรอของผิวเคลือบต่างๆบนวัสดุฐาน Hastelloy X และ SUS403 ที่อุณหภูมิ 600°C

Type	Wear volumex10 ⁻³ (mm ³)		Wear rate x10 ⁻³ (mm ³ /m)		Wear coefficient x10 ⁻³ k (mm ³ /N m)
	1	3	1	3	
Hastelloy X	19.49	19.18	0.3898	0.6392	0.1247
Hastelloy X AlCrTiN	30.92	32.46	0.0091	0.0148	0.0029
Hastelloy X TiAlCrSiN	25.53	20.26	0.0051	0.0113	0.0031
SUS 403	19.60	14.03	0.3920	0.4676	0.0378
SUS 403 AlCrTiN	26.32	39.52	0.0121	0.0494	0.0187
SUS 403 TiAlCrSiN	8.84	13.90	0.0084	0.0309	0.0113

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบการสึกหรอของผิวเคลือบต่างจากวัสดุฐานHastelloyXและSUS403ที่อุณหภูมิ 1000°C

Type	Wear volumex10 ⁻³ (mm ³)		Wear rate x10 ⁻³ (mm ³ /m)		Wear coefficient x10 ⁻³ ,k (mm ³ /N m)
	1	3	1	3	
Hastelloy X	4.37	16.2	0.0219	0.162	0.0701
Hastelloy X AlCrTiN	8.67	5.68	0.0434	0.0568	0.0067
Hastelloy X TiAlCrSiN	1.47	3.44	0.0294	0.0688	0.0197
SUS 403	59.4	57.85	0.1697	0.3857	0.108
SUS 403 AlCrTiN	19.5	17.08	0.195	0.3415	0.0733
SUS 403 TiAlCrSiN	8.06	25.71	0.1612	0.5142	0.1765

โดยสามารถสรุปผลการทดสอบสำหรับวัสดุที่เคลือบผิวที่นำไปใช้กับอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงได้ดังนี้

1. ผิวเคลือบ AlCrTiN และ TiAlCrSiN ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนอุณหภูมิสูงให้กับ Hastelloy X ที่อุณหภูมิสูงคือ 1000 °C และ
2. วัสดุ SUS 403ที่เคลือบด้วย AlCrTiN และ TiAlCrSiN จะสามารถใช้งานได้ดีในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1000 °C สังเกตจากการอัตรา การสึกหรอในการทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C จะเห็นว่าอัตราการสึกหรอจะใกล้เคียงกัน
3. หลังการทดสอบความสามารถที่อุณหภูมิสูง พบว่า Hastelloy X และ SUS 403 ซึ่งเคลือบด้วยผิวเคลือบ AlCrTiN มีความสามารถในการทนอุณหภูมิสูงได้มากกว่าผิวเคลือบ TiAlCrSiN ดังนั้น Hastelloy X ซึ่งเคลือบผิวด้วย AlCrTiN เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ใช้อุณหภูมิสูง เพื่อช่วยลดความเสียหายจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยสามารถทนอุณหภูมิได้สูงเกิน 1,000 °C

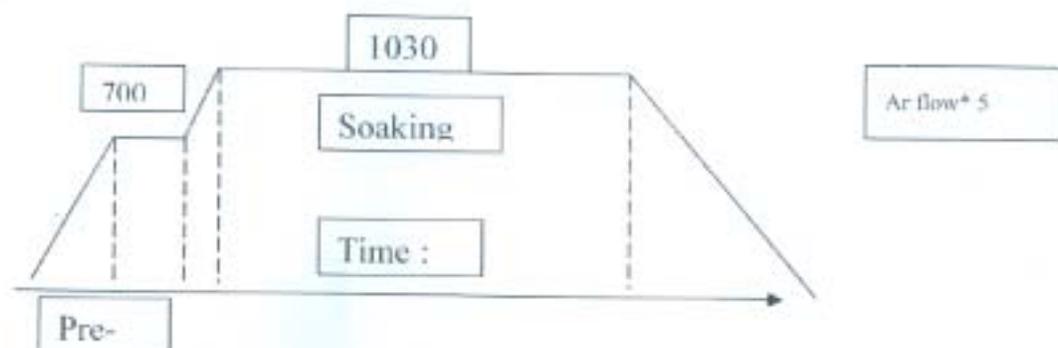
1.3 การทดสอบทางด้านคุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้แก่ วัสดุ SUS 304 และ SUS 403 โดยมีการศึกษางานวิจัยเบื้องต้นพบว่า การที่เหล็กกล้าไร้สนิมออกสเตนดิก เป็นโลหะผสมที่มีความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ นั้นทำให้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตนดิก โดยที่ไม่ให้สูญเสียคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเทคนิคที่ใช้ได้แก่ การปรับปรุงผิว (surface treatments) [26]

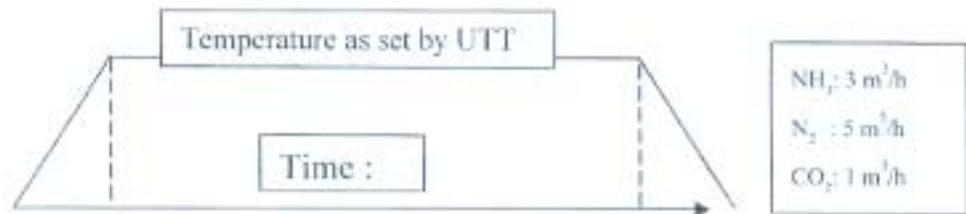
การเคลือบผิวโดยการแพร่ของโครเมียมได้รับการศึกษาโดย Castle และ Gabe [27] ซึ่งกำหนดลักษณะของชั้นวัสดุที่เกิดจากกระบวนการ Chromizing ที่มีกรรมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ แบบ self chromizing และแบบ hard chromizing โดยที่แบบ self chromizing นำไปใช้ในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่น้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก เพื่อเป็นการเตรียมชั้นผิวของโครเมียมสำหรับการต้านทานและต่อต้านการกัดกร่อน การใช้ hard chromizing เป็นการประยุกต์ใช้กับเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 0.3 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก โดยจะรวมตัวเกิดเป็นชั้นของโครเมียมคาร์ไบด์ ซึ่งจะทำให้มีความต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนที่สูง [28] การทดลองนี้ทดลองในเหล็ก AISI D2 โดยมีเหล็ก 1.68 % คาร์บอน 12.92 % โครเมียม 0.64 % โมลิบดีนัม 0.85 % โดยสารที่ใช้ทำการทดลองได้แก่ Alumina, Chromium, และสารตัวเร่ง NH_4Cl โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ $1030^{\circ}C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้สารตัวเร่ง ใส่ลงไปทุกๆ 20 นาที ผลลัพธ์ที่ออกมาก็คือ การขาดสารตัวเร่งจะทำให้ผิวเคลือบเข้าไม่ถึงผิว และเมื่อใส่สารตัวเร่งมากเกินไปจะทำให้ผิวเคลือบมีความหนาจนถึงจะได้รับความหนาตามที่ นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่พบว่า การเติมผงโครเมียมที่มากขึ้นนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราค่าการเพิ่มของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น แต่จำนวนของสารกระตุ้นที่ใส่เข้าไปมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและลักษณะผิวชั้นงาน โดยความแข็งของชั้นคาร์ไบด์ทั่วไปอยู่ในช่วง 1820-2158 $HK_{0.05}$ ความแข็งของ Cr_7C_3 อยู่ประมาณ 1200-1400 HV และ Cr_2C ประมาณ 200-2500 HV [29-30] ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางด้านต้านทานการสึกหรอ การต้านทานการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้นด้วย

โดยในขณะนี้อยู่ในขั้นตอนการวางแผนการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้วัสดุสเตนเลสสตีล SUS 304 และ SUS 403 ที่นำมาทำเป็นชิ้นงานทดสอบเป็น disk ขนาด 27x7 mm และ 30x7 mm ตามลำดับ ซึ่งผ่านกระบวนการเคลือบผิวที่สภาวะการเคลือบปัจจุบัน ซึ่งประกอบไปด้วย 2 กระบวนการคือ กระบวนการ Chromizing และ Nitriding โดยมี Process ดังนี้

Chromizing



Nitriding (Pre-heat before get nitriding process)



โดยมีรายละเอียดการดำเนินการทดสอบของกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์แสดงดังตารางที่ 18 ดังนี้

ตารางที่ 18 รายละเอียดการดำเนินการทดสอบของกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์

รายละเอียดของกิจกรรม	การดำเนินการ	ทวนท้าวหน้าของโครงการ
1. การชุบแข็ง โดยใช้เตาอบที่สร้างขึ้นใหม่	อยู่ในระหว่างการทดลอง	รถเหล็ก SUS 403 ที่สังคิดปัญหาต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ
2. ทดสอบความแข็ง ความเค้น/ความเครียดของผิวเคลือบ	อยู่ในระหว่างการทดลอง	ทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการ SUS 304
3. ความเค้นผิวและลักษณะพื้นผิวของผิวเคลือบ	อยู่ในระหว่างการทดลอง	
4. การจัดการภาวะฮีด	อยู่ในระหว่างการทดลอง	
5. งานทดสอบด้านโครมอโลยี	อยู่ระหว่างการดำเนินการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอของผิวเคลือบ	
6. การทดสอบ Corrosion	อยู่ในระหว่างการทดลอง	
7. โครงสร้างและลักษณะของผิวเคลือบ/องค์ประกอบของธาตุ	อยู่ในระหว่างการทดลอง	
8. จำลองสภาวะการใช้งานของผิวเคลือบเพื่อจำลองความสามารถของผิวเคลือบภายใต้การใช้งานจริงด้วยคอมพิวเตอร์โดยการจำลองถึงระดับโครงสร้างของผิวเคลือบ (Micro Scale FEM)	อยู่ระหว่างการสร้างแบบจำลอง	

စာအုပ်အကျဉ်းချုပ်

1. C. Brito, J.-P. Riviere, J.-P. Eymery, J.-P. Villain, Structural characterization of wear debris produced during friction between two austenitic stainless steel antagonists, *Tribol. Lett.* 11 (2) (2001) 127-132.
2. Mortezā Zandrahimi, M. Reza bateni, A. Poštali, Jerry A. Sepanar , The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel, *Wear*, Volume 263, Issues 1-6, 10 September 2007, Pages 674-678
3. Williams, J.A., 1999, "Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach" *Wear*, Vol. 225-229, pp146.
4. Satou, D., and Tracton, A.A. (2001), *Coatings Technology Handbook*, New York, Basel, Marcel Dekker Inc., 783-794.
5. Williams, J.A. (1998), *Engineering Tribology*, Oxford.
6. Scott, D., and Kingwell, R. (1991), Thermal spraying, In: *Advanced surface coatings: A handbook in surface engineering*, eds. Rickerby, D.S. and Matthews, A., Blackie, Glasgow, UK, 217
7. Rudiger, H., Bergmann, E. and Vogel, J. (1988), *Surf. Coat. Tech.*, 36, 675-682
8. Kobayashi, M. and Doi, Y. (1978), *Thin Solid Films*, 54, 67
9. Zhao, J.P., Wang, X., Chen, Z.Y., Yang, A.Q., Shi, T.S. and Liu, X.H. (1997), *J Phys*, 30, 5-12.
10. Spool, W.D., Rudnik, P.J. and Graham, M.E. (1989), *Surf Coat Tech.*, 39(4), 355-363
11. Lunk, A. (1991), *Mater Sci Eng. A140*, 666-669.
12. Alberts, L., Leuteneker, R. and Wolf, G.K. (1996), *Surf Coat Tech*, 443-447.
13. Ensinger, W., Kuchit, M. and Satou, M. (1994), *Surf Coat Tech*, 66, 313-317
14. Petrov, I., Adibi, F. and Greene (1993), *J.E. Appl Phys Lett*, 63, 1, 5.
15. Kiuchi, M. (1990), *Jpn J Appl Phys*, 29, 10, 2059-2065.
16. Combadiere, L. and Machet, J., *Surf Coat Tech* (1996), 88, 17-27
17. Meng, W.J. and Eesley, G.L. (1995), *Thin Solid Films*, 271, 108-116
18. Yang, H.H., Jr, J.H. and Lee, K.B. (1995), *J Mater Sci Lett.*, 14, 1635-1637
19. Pelleg, J., Zevin, L.Z. and Lungu, S. (1991), *Thin Solid Films*, 197, 117-128
20. Marinov, M. and Dobrev, D. (1977), *Thin Solid Films*, 42, 265-268
21. Ensinger, W. (1997), *Nucl Instrum Methods B*, 127/128, 769-808
22. Musil, J., and Kadlec, S. (1990), *Vacuum*, 40, 5, 435.
23. Musil, J., Poulek, V., Valvoda, V., Kuzel, R., Jelin, H.A. and Baumgartner, M.E. (1993), *Surf Coat Tech.*, 60, 484-488
24. Cerny, R., Kuzel, R., Valvoda, V., Kadlec, S. and Musil, J. (1994), *Surf Coat Tech*, 64, 111-117.
25. Chen, Y.M., Yu, G.P. and Huang, J.H. (2002), *Vacuum*, 66, 1, 19-25
26. S. Ganesh Sundara Raman, M. Jayaprakash ,Influence of plasma nitriding on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of AISI 304 austenitic stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issue 12, 5 March 2007, Pages 5906-5911
27. A.H. Castle, D.R. Gabe, Structure Characteristics of M_2C_3 formed in chromised coatings on 11% Cr steels, *Mater. Sci. Technol.* 16 (2000) 1057-1066
28. R.C. Jongbloed, Chromizing, *Master. Sci. Forum* 163-165 (1994) 611-618
29. Y.-Y. Chen, A study on the deposition of vanadium carbide by vacuum TRD treatment, Master Thesis, Department of Material Engineering, Tatung University, ROC, 2000, pp. 38-45
30. J.-W. Liu, A study on the deposition of chromium carbide by modified TRD, Master Thesis, Department

2.4 ระบุรายละเอียดที่ได้แก้ไขปรับปรุงตามข้อเสนอแนะของผู้ประเมิน (ถ้ามี)

เนื่องจากยังได้รับเอกสารแจ้งข้อเสนอแนะของผู้ประเมินจึงยังมิได้ดำเนินการแก้ไขปรับปรุง

2.5 งบประมาณที่ได้ใช้จ่ายไปแล้วนับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยเป็นเงินทั้งสิ้น ๑๖๒,4๐๑ บาท

2.6 งานตามแผนงานวิจัย / โครงการวิจัยที่จะทำต่อไป

ปัจจุบันอยู่ได้ดำเนินการถึงขั้นตอนที่ 4 ซึ่งจะดำเนินการต่อไปตามแผนการดำเนินงานในตารางที่ 1

2.7 คำชี้แจงเกี่ยวกับปัญหาอุปสรรค และวิธีการแก้ไข (ถ้ามี)

1. ปัญหาที่ประสบได้แก่การรับทราบผลการพิจารณาถ้าขึ้นและการเบิกจ่ายงบประมาณที่ล่าช้าจึงทำให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินการและการวางแผนการดำเนินงาน โดยได้ทำการแก้ไขโดยการดำเนินการในส่วนที่ไม่มีค่าใช้จ่ายสูงและขอความร่วมมือจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

(ลงชื่อ)

(ดร. กฤษณา สุจินดา)

หัวหน้าโครงการวิจัย

วันที่ 14 เดือน กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๕

ผลการประเมินรายงานความก้าวหน้าของแผนงานวิจัย / โครงการวิจัย

สรุปความเห็นของถาวรประเมิน

สนับสนุนให้ดำเนินการต่อไป

ไม่สนับสนุนให้ดำเนินการต่อไป ระบุเหตุผล

.....
.....
.....

(ลายเซ็น)

(.....)

หัวหน้าส่วนราชการระดับกรมหรือเทียบเท่ากระทรวง

วันที่ เดือน พ.ศ.

หมายเหตุ : แบบฟอร์มนี้ใช้สำหรับข้อเสนอการวิจัยทั้งแผนงานวิจัยและโครงการวิจัย