

การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนแบบหลายชั้น
ที่สลับส่วนประกอบทางเคมีบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430



นายณัฐตล อุดมปณิธิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

ELECTRODEPOSITION OF COMPOSITION-MODULATED MULTILAYER Ni-W ALLOY
COATINGS ON 430 STAINLESS STEEL

Mr. Nattadon Udompanit



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน
แบบหลายชั้นที่สลับส่วนประกอบทางเคมีบนเหล็กกล้าไร้
สนิมเกรด 430

โดย

นายณัฐตล อุดมปณิธ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร. ปัญญาวัชร ว่างยาว

คณะกรรมการศาสตราจารย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร. ปัญญาวัชร ว่างยาว)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร)

ณัฐดล อุดมปณิธ : การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนแบบหลายชั้นที่สลับส่วนประกอบทางเคมีบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430. (ELECTRODEPOSITION OF COMPOSITION-MODULATED MULTILAYER Ni-W ALLOY COATINGS ON 430 STAINLESS STEEL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. ปัญญวัชร ว่างยาว, 96 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนผลึกนาโน (nanocrystalline Ni-W) ที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีโดยวิธีการชุบไฟฟ้า โดยการควบคุมกระแส reverse pulse ในรูปแบบสัญญาณที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้า ทำการชุบเคลือบในระบบอ่างชุบเดี่ยวที่มี nickel sulfate hexahydrate และ sodium tungstate dihydrate เป็นแหล่งของโลหะ ส่วนประกอบทางเคมี ขนาดเกรน ตลอดจนความหนาของชั้นเคลือบย่อยในการชุบไฟฟ้าแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนสามารถที่จะออกแบบได้ โครงสร้างที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแบบหลายชั้นตามที่ได้มีการออกแบบไว้ ผลของค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่มีความหนาของชั้นเคลือบย่อยในระดับนาโนแสดงให้เห็นถึงความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้น 31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งผิวที่ได้จากผลการผสมของชั้นเคลือบเดี่ยวที่นำมาสลับ นอกจากนี้การศึกษากการสึกหรอโดยเทคนิค ball-on-disc และโครงสร้างภายหลังการสึกหรอแสดงให้เห็นถึงความต้านทานการสึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้รับอิทธิพลมาจากส่วนประกอบทางเคมีและความหนาของชั้นเคลือบย่อย การลดลงของความหนาชั้นเคลือบย่อยส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ นิกเกิลทั้งสแตนที่มีความหนาชั้นเคลือบย่อยในระดับนาโนเมตรสามารถช่วยลดปริมาณการใช้ธาตุทั้งสแตนได้ 37 เปอร์เซ็นต์ และยังสามารถคงสมบัติด้านความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ ให้อยู่ในระดับเดียวกับชั้นเคลือบโลหะผสมที่มีปริมาณทั้งสแตนสูง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370234721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTRODEPOSITON / NICKEL TUNGSTEN / MULTILAYER / HARDNESS / WEAR RESISTANCE

NATTADON UDOMPANIT: ELECTRODEPOSITION OF COMPOSITION-MODULATED MULTILAYER NI-W ALLOY COATINGS ON 430 STAINLESS STEEL. ADVISOR: ASST. PROF. YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D., CO-ADVISOR: PANYAWAT WANGYAO, Ph.D., 96 pp.

The present studies investigate the mechanical properties of composition-modulated multilayer coating (CMMC) of Ni-W as fabricated by electrodeposition. By regulating the pulse waveforms of the applied pre-define current profiles , using a single electrolytic bath containing nickel sulfate hexahydrate and sodium tungstate dihydrate as metal sources, the chemical composition, grain size, and the individual layer thickness of the electrodeposited Ni-W CMMC can be tailored. The scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy analysis reveal that multilayer coatings are obtained as designed. The micro-hardness assessment shows important evidence in that the Ni-W CMMC with nanometer-thick layer exhibits improvement of hardness by 31% over those of the rule of mixture of homogenous Ni-W alloy counterparts. Furthermore, the ball-on-disc test and the subsequent microstructural analysis indicates that the wear resistance and friction coefficient of Ni-W CMMC are influenced by the composition and the thickness of the individual alternating layer. The decrement of interlayer's size monotoically increase wear resistance and friction coefficient.

From this work, it has been found that the Ni-W CMMC with nanometer-thick layer can reduce the amount of elemental tungsten as much as 37% and maintain hardness and wear resistance as comparable with high tungsten alloys.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จากบุคคลสำคัญหลายท่าน โดยข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ ให้ความรู้และทักษะที่มีประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ตลอดจนให้ประสบการณ์ที่มีคุณค่า และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร ที่ให้ข้อคิดที่ดีและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณ กลุ่มวิจัยเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิวโลหะ (PORETEGE research group) สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์ ที่เป็นสถานที่ในการทำการวิจัยและให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และคุณศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้ ที่ช่วยอนุเคราะห์ในการทำการวิจัย ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนในการทำการวิจัย โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนา สำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA, University Industry Research Collaboration; NUI-RC) สัญญารับทุนเลขที่ NUI-RC-01-55-009 สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่สอนให้ข้าพเจ้าได้เรียนรู้และเติบโตอย่างอดทนและแข็งแกร่ง ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่ดีในการต่อสู้กับอุปสรรคที่ผ่านเข้ามา และที่สำคัญที่สุดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่มีให้ตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 นิกเกิล.....	4
2.1.2 ทังสเดน.....	5
2.1.3. การเคลือบผิววัสดุ (surface coating).....	5
2.1.4 การชุบเคลือบผิวโลหะโดยวิธีการแบบใช้ไฟฟ้า.....	7
2.1.4.1 โลหะที่นิยมนำมาชุบไฟฟ้า.....	10
2.1.4.1.1 โครเมียม.....	10
2.1.4.1.2 นิกเกิล.....	10
2.1.4.2 กฎฟาราเดย์.....	10
2.1.4.3 ั่ว.....	11
2.1.4.4 พีเอช (pH).....	11
2.1.4.5 ความหนาแน่นของกระแส (current density).....	12
2.1.4.6 กระแสแบบ pulse.....	12
2.1.5 การชุบนิกเกิลสไตรค์ (Nickel strike).....	14
2.1.5.1 นิกเกิลสไตรค์ ชนิดคลอไรด์.....	14

2.1.5.2	นิกเกิลสไตรค์ ชนิดซัลเฟต.....	14
2.1.6	สมบัติเชิงกลที่สำคัญของการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้า	15
2.1.6.1	ความแข็งผิว	15
2.1.6.2	การสึกหรอ.....	16
2.1.6.2.1	การสึกหรอแบบขัดสี (abrasion)	17
2.1.6.2.2	การสึกหรอแบบกัดเซาะ (erosion).....	18
2.1.6.2.3	การสึกหรอแบบเกาะติด (adhesion).....	19
2.1.6.2.4	การสึกหรอโดยกลไกการล้า (surface fatigue).....	19
2.1.7	ชั้นเคลือบแบบหลายชั้น (multilayer).....	20
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย	39
3.1	เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย	39
3.1.1	วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน	39
3.1.2	อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้สำหรับการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ได้แก่.....	39
3.1.3	เครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบและทดสอบวัสดุ	39
3.2	ระเบียบวิธีการวิจัย	40
3.2.1	การเตรียมผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430	40
3.2.2	การชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลสไตรค์.....	41
3.2.3	การชุบเคลือบผิวโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนแบบใช้ไฟฟ้ากระแส reverse pulse	41
3.2.3.1	กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวเพื่อหาผลกระทบของจำนวนชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน โดยมีความหนารวมคงที่.....	43
3.2.3.2	กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวเพื่อหาผลกระทบของความหนารวมของชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน.....	43
3.2.3.3	กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวเพื่อหาผลกระทบของการสลับชั้นที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน.....	44
3.3	การตรวจสอบชั้นเคลือบ	45
3.3.1	การตรวจสอบและพิสูจน์โครงสร้างจุลภาค	45
3.3.3	การตรวจสอบความแข็งผิว	45

3.3.3 การตรวจสอบความต้านทานการสึกหรอ	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....	46
4.1 การเตรียมผิวชิ้นงานและการชุบนิกเกิลสไตรค์.....	46
4.2 การชุบไฟฟ้าโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน.....	46
4.2.1 การใช้กระแส reverse pulse ในการชุบไฟฟ้า.....	46
4.2.2 ขนาดเกรน XRD.....	50
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน.....	52
4.2.4 ค่าความแข็งผิว	53
4.2.5 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient).....	53
4.2.6 ค่าความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ	55
4.3 การชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมี.....	61
4.3.1 โครงสร้างที่ได้จากการชุบเคลือบแบบหลายชั้น	63
4.3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น	66
4.4 ความแข็งผิวของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น.....	67
4.5 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น.....	70
4.6 ความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น.....	73
4.6.1 ผลของความหนาชั้นเคลือบย่อย	73
4.6.2 ผลของส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบย่อย.....	76
4.7 ผลของระยะเวลาในการชุบเคลือบและความหนารวมของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้น	80
4.8 การเปรียบเทียบปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบเฉลี่ยและค่าความแข็งผิว	86
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	96

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2. 1 ลักษณะการชุบเคลือบผิวแบบต่าง ๆ [21]	6
ตารางที่ 2. 2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ในการชุบโลหะแบบใช้ไฟฟ้าและคุณสมบัติของชั้นเคลือบ [1]	8
ตารางที่ 2. 3 ปริมาณธาตุทั้งสแตน ขนาดเกรน และสมบัติเชิงกลของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนที่ได้จากการชุบไฟฟ้า [4]	24
ตารางที่ 2. 4 สารเคมีและปริมาณที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์สำหรับการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [10]	26
ตารางที่ 2. 5 การจ่ายค่ากระแส reverse pulse ปริมาณธาตุทั้งสแตน และขนาดเกรน ของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [10]	27
ตารางที่ 2. 6 ค่าช่วง reverse pulse ปริมาณส่วนประกอบทางเคมี และขนาดเกรน ของชั้นเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [3]	28
ตารางที่ 2. 7 ค่าขนาดเกรน และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน Ni-22%W ที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที [3]	28
ตารางที่ 3. 1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์นิกเกิลทั้งสแตน	41
ตารางที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายค่ากระแสช่วงสลับ, ปริมาณของธาตุทั้งสแตนในชั้นเคลือบ และขนาดผลึกสัมพัทธ์	47
ตารางที่ 4. 2 ปฏิกริยารีดักชันและค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะนิกเกิลและทั้งสแตน[10]	49
ตารางที่ 4. 3 ผลการทดลองความแข็งผิวของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนประเภทชั้นเคลือบเดี่ยว	53
ตารางที่ 4. 4 ผลปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน	58
ตารางที่ 4. 5 ชิ้นงานการชุบเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีและตัวแปรต่าง ๆ	62
ตารางที่ 4. 6 ผลการทดลองค่าความแข็งผิวของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของนิกเกิลทั้งสแตน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งผิว	69
ตารางที่ 4. 7 ค่าความแข็งผิวที่ได้จากกฎการผสม เปรียบเทียบกับค่าความแข็งผิวของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีความหนาชั้นเคลือบย่อย 50 นาโนเมตร	70

ตารางที่ 4. 8 ผลของปริมาตรการศึกษาหรือของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น AC-xx ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ 75

ตารางที่ 4. 9 ผลของปริมาตรการศึกษาหรือของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50..... 78

ตารางที่ 4. 10 ผลของการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของชิ้นงาน AC-50 โดยใช้ระยะเวลาต่างกัน..... 86

ตารางที่ 4. 11 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณทั้งสแตนของชั้นเคลือบและค่าสมบัติกล 87



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2. 1 ช่วงการเคลือบโดยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อการเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน	6
ภาพที่ 2. 2 ตัวอย่างการเคลือบด้วยวิธีการชุบไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ [1].....	7
ภาพที่ 2. 3 ค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบที่ได้จากการชุบไฟฟ้าของโลหะและโลหะผสม [1].....	8
ภาพที่ 2. 4 ภาพจำลองอ่างชุบเคลือบโลหะแบบใช้ไฟฟ้า	9
ภาพที่ 2. 5 รูปแบบการชุบเคลือบแบบ pulse [23].....	13
ภาพที่ 2. 6 รูปแบบการชุบเคลือบแบบ reverse pulse [23]	13
ภาพที่ 2. 7 ความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ของชั้นเคลือบโลหะชนิดต่าง ๆ [25]	15
ภาพที่ 2. 8 ค่าความแข็งผิวที่สัมพันธ์กับขนาดเกรนของชั้นเคลือบนิกเกิล [25]	16
ภาพที่ 2. 9 แผนภาพแสดงการสึกหรอในลักษณะต่าง ๆ [25].....	17
ภาพที่ 2. 10 กลไกการสึกหรอแบบขัดสี [26].....	18
ภาพที่ 2. 11 ลักษณะการสึกหรอแบบกัดเซาะ [26].....	18
ภาพที่ 2. 12 กลไกการสึกหรอแบบเกาะติด [26]	19
ภาพที่ 2. 13 กลไกการสึกหรอที่เกิดจากการล้า [26].....	20
ภาพที่ 2. 14 ปริมาตรการสึกหรอต่อหน่วยเวลาของผิวเคลือบวัสดุชนิดต่าง ๆ [25]	20
ภาพที่ 2. 15 ค่าความแข็งพื้นผิวของชั้นเคลือบวัสดุชนิดนิกเกิลและโคบอลต์แบบหลายชั้นที่ความหนาชั้นเคลือบต่างกัน [27].....	21
ภาพที่ 2. 16 ปริมาตรการสึกหรอต่อหน่วยระยะไกลของชั้นเคลือบวัสดุคอมโพสิตนิกเกิลทองแดงโลหะนิกเกิล และโลหะทองแดง [25].....	22
ภาพที่ 2. 17 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากเทคนิค SEM ของชั้นเคลือบโลหะเนื้อพ่นนิกเกิลและอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ผลิตโดยวิธีชุบไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแส ก) $2 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$, ข) $3 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$, ค) $4 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ [28]	23
ภาพที่ 2. 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวและความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในวัสดุ นิกเกิล และนิกเกิลที่มีการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ [28]	24
ภาพที่ 2. 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรการสึกหรอและค่าความแข็งผิวของวัสดุ โลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [4].....	25
ภาพที่ 2. 20 กราฟแสดงผลของค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นภายหลังการทดสอบการสึกหรอ [4].....	26
ภาพที่ 2. 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสย้อนกลับ, ปริมาณทั้งสแตน และขนาดเกรน ของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [10].....	27

ภาพที่ 2. 22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน Ni-22W ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในบริเวณที่ไม่มีการสึกหรอ และบริเวณรอยการสึกหรอ [3].....	29
ภาพที่ 2. 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงกดของชั้นเคลือบหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน [18]	30
ภาพที่ 2. 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรการสึกหรอและแรงกดของชั้นเคลือบหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน [18]	30
ภาพที่ 2. 25 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากเทคนิค TEM มีลักษณะเป็นชั้น ๆ ของชั้นเคลือบอสัณฐาน Ni-P-W [17]	31
ภาพที่ 2. 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งพื้นผิวกับอุณหภูมิการอบอ่อนของวัสดุที่ผ่านการชุบเคลือบแบบหลายชั้น [17]	32
ภาพที่ 2. 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและความหนาของชั้นเคลือบย่อยที่อยู่ติดกันของวัสดุ Ni-P-W [15].....	33
ภาพที่ 2. 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งพื้นผิวและค่าความหนาของชั้นเคลือบย่อยที่อยู่ติดกันของวัสดุ Ni-P-W [15].....	34
ภาพที่ 2. 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวชั้นเคลือบคอมโพสิตและความถี่รอยกด ที่สัดส่วนความหนาของชั้นเคลือบนิกเกิลมากกว่าทองแดง [19].....	35
ภาพที่ 2. 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวชั้นเคลือบคอมโพสิตและความถี่รอยกด ที่สัดส่วนความหนาของชั้นเคลือบทองแดงมากกว่านิกเกิล [19].....	35
ภาพที่ 2. 31 ความสัมพันธ์ของความแข็งผิวชั้นเคลือบคอมโพสิตและความถี่รอยกด ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ [19].....	36
ภาพที่ 2. 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งผิวและความหนาของชั้นเคลือบย่อยในชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุในระบบต่าง ๆ [29].....	37
ภาพที่ 2. 33 แบบจำลองแสดงกระบวนการย่อยในการทากลไกที่ได้รับในวัสดุโลหะโครงสร้างหลายชั้น.....	38
ภาพที่ 3. 1 รูปแบบการชุบเคลือบแบบช่วงสลับ โดยมีการปรับค่ากระแสช่วงกลับเพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีต่าง ๆ.....	42
ภาพที่ 3. 2 แบบจำลองลักษณะการสลับรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า A สลับ C.....	42
ภาพที่ 3. 3 การจำลองชั้นเคลือบที่มีความหนารวมเท่ากันแต่มีจำนวนชั้นเคลือบแตกต่างกัน	43
ภาพที่ 3. 4 ภาพจำลองชั้นเคลือบที่มีความหนารวมแตกต่างกัน แต่มีความหนาแต่ละชั้นเคลือบเท่ากัน.....	44

ภาพที่ 3. 5 การจำลองชั้นเคลือบที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีในระบบที่แตกต่าง	44
ภาพที่ 4. 1 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานภายหลังการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนผลึกนาโนลงบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม	47
ภาพที่ 4. 2 โครงสร้างภาคตัดขวางของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแส reverse pulse ก) ชิ้นงาน A (Ni-6.3W) ข) ชิ้นงาน C (Ni-13.8W).....	48
ภาพที่ 4. 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส reverse pulse และปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบของวัสดุผสมนิกเกิลทั้งสแตนผลึกนาโน.....	50
ภาพที่ 4. 4 X-ray diffraction ของวัสดุนิกเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน A, B, C และ D	51
ภาพที่ 4. 5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนผลึกนาโน ก) ชิ้นงาน A ข) ชิ้นงาน B ค) ชิ้นงาน C ง) ชิ้นงาน D.....	52
ภาพที่ 4. 6 กราฟแสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการทดสอบการ สึกหรือของชิ้นงานชั้นเคลือบเต็วนิกเกิลทั้งสแตน.....	54
ภาพที่ 4. 7 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยของชิ้นงานกลุ่มชั้นเคลือบเต็วนิกเกิลทั้งสแตน	55
ภาพที่ 4. 8 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ A (Ni-6.3W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	56
ภาพที่ 4. 9 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ B (Ni-8.7W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	56
ภาพที่ 4. 10 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ C (Ni-13.8W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	57
ภาพที่ 4. 11 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ D (Ni-29.4W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	57
ภาพที่ 4. 12 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่กำลังขยาย 500 เท่า ก) ชิ้นงาน A ข) ชิ้นงาน B ค) ชิ้นงาน C ง) ชิ้นงาน D.....	59
ภาพที่ 4. 13 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่กำลังขยาย 3000 เท่า ก) ชิ้นงาน A ข) ชิ้นงาน B ค) ชิ้นงาน C ง) ชิ้นงาน D.....	59
ภาพที่ 4. 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของค่าความแข็งผิวและปริมาตรการสึกหรอของชิ้นงานชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน	60
ภาพที่ 4. 15 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางที่ได้จากการชุบชิ้นงานแบบหลายชั้น ก) ชิ้นงาน AC-5000, ข) ชิ้นงาน AC-500, ค) ชิ้นงาน AC-50	63
ภาพที่ 4. 16 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000.....	64
ภาพที่ 4. 17 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดที่ได้จากเทคนิค EPMA แบบรวมของชิ้นงาน AC-5000.....	64

ภาพที่ 4. 18 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ निकเกิล ที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000	65
ภาพที่ 4. 19 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุทั้งสแตน ที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000.....	65
ภาพที่ 4. 20 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ निकเกิล ทั้งสแตน และ निकเกิลทั้งสแตน ที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000.....	65
ภาพที่ 4. 21 ภาพลักษณะการหาส่วนประกอบทางเคมีในโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้น AC-5000 โดยเครื่องหมายสีเหลี่ยมแสดงตำแหน่งชั้นเคลือบย่อย C และเครื่องหมายบวกแสดงตำแหน่งชั้นเคลือบย่อย A	66
ภาพที่ 4. 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบย่อย และค่าความแข็งผิว ของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้น	67
ภาพที่ 4. 23 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากระหว่างการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบการชุบเคลือบแบบสลับต่าง ๆ	71
ภาพที่ 4. 24 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย ของชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบการชุบเคลือบแบบสลับต่าง ๆ	71
ภาพที่ 4. 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยและค่าความหนาของชั้นเคลือบย่อย ในชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นระบบ AC-xx	72
ภาพที่ 4. 26 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-5000 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ...73	73
ภาพที่ 4. 27 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-500 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ.....	74
ภาพที่ 4. 28 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	74
ภาพที่ 4. 29 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-25 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ.....	75
ภาพที่ 4. 30 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AB-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ.....	76
ภาพที่ 4. 31 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ.....	77
ภาพที่ 4. 32 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AD-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ.....	77
ภาพที่ 4. 33 ลักษณะภาคตัดขวางของร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50	78
ภาพที่ 4. 34 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่กำลังขยาย ก) และ ข) ชิ้นงาน AB-50, ค) และ ง) ชิ้นงาน AC-50, จ) และ ฉ) ชิ้นงาน AD-50 ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า ตามลำดับ	79
ภาพที่ 4. 35 ภาพแสดงโครงสร้างของภาคตัดขวางและความหนารวมของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบชิ้นงาน AC-xx โดยในการชุบเคลือบรวมทั้งระยะเวลา ก) 15 นาที, ข) 30 นาที, ค) 60 นาที และ ง) 90 นาที.....	81

ภาพที่ 4. 36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบ และความหนารวมของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น ในชิ้นงาน AC-50	82
ภาพที่ 4. 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิว และระยะเวลาในการชุบเคลือบ ของชิ้นงาน AC-50.....	83
ภาพที่ 4. 38 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 15 นาที ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	84
ภาพที่ 4. 39 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 30 นาที ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	84
ภาพที่ 4. 40 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 60 นาที ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	85
ภาพที่ 4. 41 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 90 นาที ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ	85
ภาพที่ ผ. 1 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน A	94
ภาพที่ ผ. 2 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน B	94
ภาพที่ ผ. 3 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน C	95
ภาพที่ ผ. 4 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน D	95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปรับปรุงผิววัสดุโดยการชุบเคลือบผิว (coating) เป็นวิธีที่มีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มความสวยงาม เพิ่มความแข็งพื้นผิว ความต้านทานการกัดกร่อน ความต้านทานการสึกหรอ ตลอดจนสมบัติในการนำไฟฟ้า การชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า (electrodeposit) เป็นวิธีการในการเคลือบผิวที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมายาวนาน เนื่องจากข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถควบคุมกระบวนการได้ง่าย วัสดุที่ใช้เคลือบมีหลากหลาย มีอัตราการเคลือบที่สูง ในปัจจุบันมีการชุบเคลือบโดยใช้วัสดุโลหะนิกเกิล (Nickel) ในอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นทางเลือกในการที่จะทดแทนการใช้โครเมียม (Chromium) เนื่องจาก ในกระบวนการชุบโครเมียมเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม แต่เมื่อพิจารณาจากค่าความแข็งของชั้นเคลือบพบว่าชั้นเคลือบนิกเกิลมีค่าความแข็งอยู่ในช่วงประมาณ 2-6 GPa [1, 2] อย่างไรก็ตามก็สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของนิกเกิลได้จากการเติมธาตุผสม โดยพบว่าชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทังสเตน (Ni-W) จะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วงประมาณ 5.2-7.1 GPa และมีค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะประมาณ $1.8-3.8 \times 10^{-15} \text{ m}^3(\text{Nm})^{-1}$ [3-5] ชั้นเคลือบนิกเกิลฟอสฟอรัส (Ni-P) มีค่าความแข็งประมาณ 6-7.5 GPa และมีค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะประมาณ $1 \times 10^{-15} \text{ m}^3(\text{Nm})^{-1}$ [2, 6] ซึ่งไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-12Co) ที่มีความแข็งพื้นผิวสูงประมาณ 10.3-10.5 GPa และมีค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะประมาณ $9 \times 10^{-17} \text{ m}^3(\text{Nm})^{-1}$ [7, 8] ดังนั้นจึงได้มีการหาแนวทางในการศึกษาและพัฒนาชั้นผิวเคลือบของโลหะในกลุ่มนิกเกิลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการใช้งานในด้านที่มีความต้องการสมบัติด้านความแข็งพื้นผิวและความต้านทานการสึกหรอ เช่น การผลิตแม่พิมพ์สำหรับใช้ในงานตีขึ้นรูป อุตสาหกรรมการผลิตหินเจีย เป็นต้น

แนวทางการพัฒนาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งพื้นผิวและความต้านทานการสึกหรอ ของชั้นเคลือบโลหะนิกเกิล ได้มีการศึกษามาก่อนแล้ว โดยมีได้หลายแนวทาง ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาผลของขนาดเกรนของโลหะนิกเกิลต่อสมบัติทางด้านการสึกหรอ [9] พบว่าการลดขนาดเกรนให้อยู่ในระดับนาโน ทำให้ชั้นเคลือบมีค่าความแข็งผิวเพิ่มสูงขึ้นตามหลักการของการเพิ่มความแข็งแรงโดยการทำให้เกรนละเอียด (grain refinement) และผลจากการทดลองพบว่าค่าความแข็งพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นจากการลดขนาดเกรน ส่งผลทำให้ชั้นเคลือบนิกเกิลมีค่าความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี (abrasive wear) สูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปตามสมการของ Archard กล่าวคือ ค่าความแข็งพื้นผิวจะส่งผลโดยตรงต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงผลของปริมาณธาตุทังสเตนในชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทังสเตนที่มีต่อสมบัติเชิงกล โดยใช้วิธีการชุบแบบใช้ไฟฟ้าที่สามารถควบคุมปริมาณทังสเตนในชั้นเคลือบได้จากค่าความหนาแน่นกระแส พบว่าการเติมธาตุผสมทังสเตนทำให้ได้โครงสร้างผลึกในระดับนาโน โดยที่ปริมาณ

ธาตุทั้งสแตนในชั้นเคลือบที่สูงขึ้น จะส่งผลทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง [4, 10-12] ทำให้ชั้นเคลือบมีค่าความแข็งพื้นผิวสูงขึ้นตามหลักการทฤษฎี Hall-Petch และผลของปริมาณทั้งสแตนที่เพิ่มขึ้นในชั้นเคลือบที่นำไปทดสอบการสึกหรอแบบไถล (sliding wear) พบว่าปริมาณทั้งสแตนมีส่วนช่วยให้อัตราการสึกหรอมีค่าลดลง [4, 10-13] และจากงานวิจัยที่คล้ายคลึงกันยังพบว่าปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบทำให้การโตของเกรนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบอ่อนลดลง เนื่องจากธาตุทั้งสแตนช่วยให้โครงสร้างจุลภาคมีเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) เพิ่มขึ้น [3, 5] นอกจากนี้ยังมีวิธีการในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบ โดยการทำให้ชั้นเคลือบเป็นวัสดุคอมโพสิตจากการเติมอนุภาคเซรามิกส์เช่น อลูมินา [14] และซิลิกอนคาร์ไบด์ [6] ในวิธีการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และพบว่าผลของการเติมอนุภาคเซรามิกส์ในชั้นเคลือบทำให้มีค่าความแข็งพื้นผิวและความต้านทานการสึกหรอที่สูงขึ้น

แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีแนวทางที่เริ่มมีการศึกษาคือ การชุบเคลือบหลายชั้นแบบสลับชั้น เช่นการชุบเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลฟอสฟอรัสทั้งสแตน (Ni-P-W) แบบหลายชั้นที่ชั้นเคลือบประกอบไปด้วยชั้นที่มีปริมาณทั้งสแตนสูงสลับกับชั้นที่มีปริมาณทั้งสแตนต่ำ [15-18] พบว่าที่ความหนาผิวเคลือบรวมเท่ากันการชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่มีชั้นเคลือบบางและมีจำนวนของชั้นเคลือบมาก ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากกลไกการสึกหรอของวัสดุแบบเปราะ พบว่าการมีจำนวนชั้นเคลือบมากจะเป็นการเพิ่มจำนวนของรอยต่อระหว่างชั้น (interface) ทำหน้าที่เป็นเสมือนอุปสรรคในการขัดขวางทิศทางการโตของรอยแตก (crack) จึงทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการที่จะทำให้รอยแตกเกิดการโตที่จะนำไปสู่การเสียหายของวัสดุ ส่งผลทำให้ชั้นเคลือบมีความแกร่ง (toughness) มากขึ้น และงานวิจัยศึกษาการชุบเคลือบแบบหลายชั้นแบบสลับชั้นของวัสดุเคลือบสองชนิดที่มีค่าความแข็งพื้นผิวต่างกันคือนิกเกิลและทองแดง พบว่าที่ความหนาผิวเคลือบรวมเท่ากันการที่มีระดับชั้นเคลือบบางและมีจำนวนชั้นเคลือบมาก จะส่งผลทำให้มีค่าความแข็งพื้นผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีจำนวนรอยต่อระหว่างชั้นมากจะเป็นการต้านการแปรรูปแบบถาวรของชั้นเคลือบ [19]

เนื่องจากยังมีการศึกษาวิจัยการชุบเคลือบแบบหลายชั้นไม่มากนัก จึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาถึงตัวแปรของการชุบเคลือบแบบหลายชั้นแบบสลับชั้น โดยใช้กระแส reverse pulse และเลือกใช้วัสดุเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน (Ni-W) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งพื้นผิวที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุเคลือบอื่นในกลุ่มโลหะนิกเกิล และได้เริ่มมีการวิจัยตลอดจนการนำมาใช้งานจริงในอุตสาหกรรมเมื่อไม่นานมานี้ ทั้งนี้ในงานวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการชุบเคลือบ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลคือ ความแข็งพื้นผิวและค่าความต้านทานการสึกหรอ ทั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การหาผลกระทบของความหนาชั้นเคลือบย่อยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล 2) การหาผลกระทบของค่าความหนารวมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และ 3) การหาผลกระทบของการสลับส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล จากการทดลองดังกล่าวจะนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยตรวจสอบคุณลักษณะของชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เทคนิค EPMA (Electron Probe Micro

Analyzer) ตรวจสอบขนาดเกรนจาก เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) ศึกษาสมบัติเชิงกลโดยตรวจสอบค่าความแข็งพื้นผิวด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์ (Microvicker hardness) และศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอด้วยเทคนิค ball-on-disc

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการชุบเคลือบหลายชั้นแบบสลับส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสม นิกเกิลทั้งสแตน ที่ได้จากการบวนการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้ากระแสช่วงสลับ
2. เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นของชั้นผิวเคลือบ ที่มีผลต่อความแข็งพื้นผิว และอัตราการสึกหรอ
3. เพื่อศึกษาผลของจำนวนชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน ที่มีผลต่อความแข็งพื้นผิว และอัตราการสึกหรอ
4. เพื่อศึกษาผลของปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบและความแตกต่างของปริมาณทั้งสแตนในแต่ละชั้นเคลือบ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 เป็นวัสดุตั้งต้น และมีการชุบเคลือบนิกเกิลสไตรค์ เพื่อกระตุ้นผิว ตามด้วยการชุบเคลือบนิกเกิลฟอสฟอรัส ชนิดฟอสฟอรัสต่ำ โดยการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เป็นชั้นรองพื้น
2. ทำการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้าวัสดุ นิกเกิลทั้งสแตนแบบหลายชั้น โดยวิธีการชุบแบบใช้ไฟฟ้ากระแส reverse pulse ที่มีส่วนผสมในอ่างเคลือบคังที่ อุณหภูมิคังที่ และพีเอชคังที่
3. ศึกษาสมบัติด้านความแข็งพื้นผิว และความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจและอธิบายถึงหลักการของกระบวนการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้ากระแส reverse pulse และแบบไม่ใช้ไฟฟ้า
2. สามารถอธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรการชุบเคลือบแบบหลายชั้น ที่มีผลต่อค่าความแข็งพื้นผิว และความต้านทานการสึกหรอ
3. สามารถที่จะทำนายและควบคุมโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบได้ จากการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้กระแส reverse pulse
4. นำแนวทางที่ได้จากการศึกษาการชุบเคลือบแบบหลายชั้น ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์กับอุตสาหกรรมการผลิตหินเจียรได้

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะแสดงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการชุบโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนโดยวิธีชุบไฟฟ้า ได้แก่ ทฤษฎีในเรื่องการชุบไฟฟ้า การใช้กระแสช่วงสลับ การชุบเคลือบแบบหลายชั้น และสมบัติที่สำคัญของชั้นเคลือบ เช่น ความแข็งผิวและการสึกหรอ

2.1.1 นิกเกิล

นิกเกิล [20] (Nickel) สัญลักษณ์ธาตุคือ Ni เป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูง เป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม มีความเหนียวและอ่อนตัวสูงสามารถขึ้นรูปเย็นได้โดยง่าย นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว นิกเกิลนิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมนิกเกิลที่ใช้งานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูง ๆ และใช้เคลือบลงบนผิวเหล็ก โดยอาศัยสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย โดยส่วนใหญ่ไม่ใช้นิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เพราะนิกเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น ๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสม และเฉพาะกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัยคุณสมบัติพิเศษของนิกเกิลเท่านั้น

สมบัติโลหะนิกเกิล

ระบบโครงสร้างผลึก	FCC (Face center cubic)
น้ำหนักอะตอม	58.69 g/mol
ความหนาแน่น (density)	8.89 g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	1435-1455 °C
จุดเดือด	2730 °C
ความร้อนจำเพาะ (27-100°C)	0.13 cal/g °C
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	73.8 cal/g
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20 °C)	9.5 microhm·cm
สัมประสิทธิ์ตัวนำความร้อน (27-100 °C)	0.145 cal·cm/cm ² ·s·°C
ความต้านทานแรงดึง (tensile strength)	47 kg/mm ²

พิกัดความยืดหยุ่น (elastic limit)	15	kg/mm ²
อัตราการยืดตัว (percent elongation)	40%	
ความแข็ง (hardness)	110	HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (modulus of elasticity)	21000	kg/mm ²

2.1.2 ทังสเตน

ทังสเตน [20] (Tungsten) สัญลักษณ์ธาตุคือ W เป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง โลหะผสมทังสเตนมีคุณสมบัติที่ดีในการคงความแข็งที่อุณหภูมิสูง ใช้เป็นธาตุผสมในเหล็กกล้าความเร็วสูง (high speed steel) นอกจากนี้ ยังใช้ในรูปสารประกอบคาร์บอนในรูปทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่มีค่าความแข็งผิวที่สูงมากใช้ทำเครื่องมือตัดโลหะ โลหะทังสเตนมีราคาแพง ถูกจัดไว้ในประเภทโลหะทนความร้อน (refractory metal)

คุณสมบัติโลหะทังสเตน

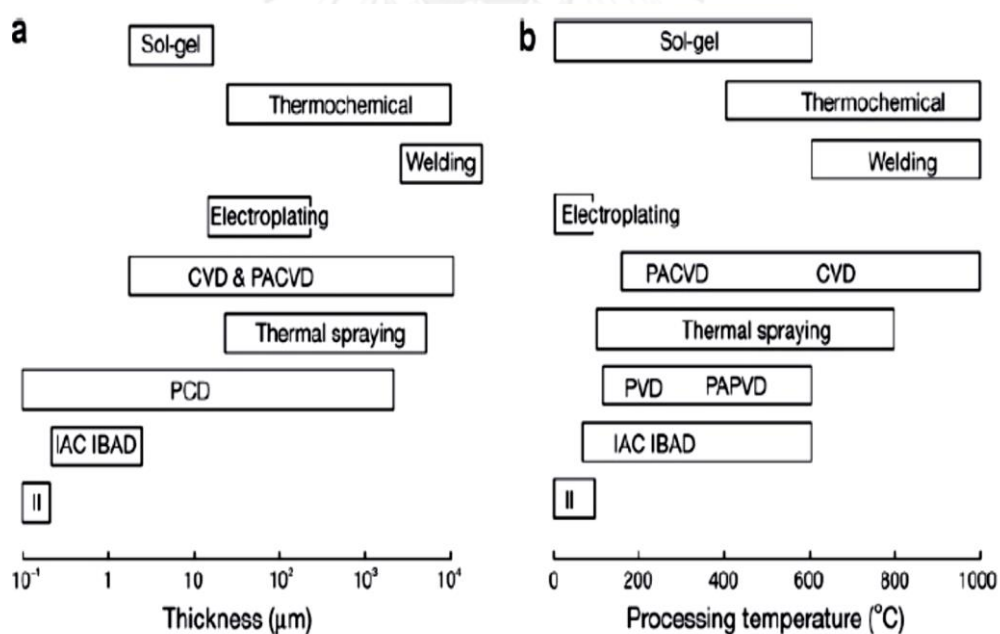
ระบบโครงสร้างผลึก	BCC (body center cubic)
น้ำหนักอะตอม	184 g/mol
ความหนาแน่น	19.32 g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	3400 °C
จุดเดือด	5900 °C
ความร้อนจำเพาะ (25°C)	0.034 cal/g °C
ความแข็ง	400 HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น	35200 kg/mm ²
ความต้านทานแรงดึง	70 kg/mm ²

2.1.3. การเคลือบผิววัสดุ (surface coating)

การเคลือบผิววัสดุ [21] เป็นกระบวนการปรับปรุงผิววัสดุเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความสวยงาม ความแข็งผิว ความต้านทานการกัดกร่อน โดยมีวิธีการที่หลากหลายดังแสดงในตารางที่ 2.1 ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และสภาวะที่เหมาะสมเช่น อุณหภูมิการชุบเคลือบ และค่าความหนาของชั้นเคลือบที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 อีกทั้งยังมีลักษณะการชุบที่หลากหลายดังแสดงในภาพที่ 2.2

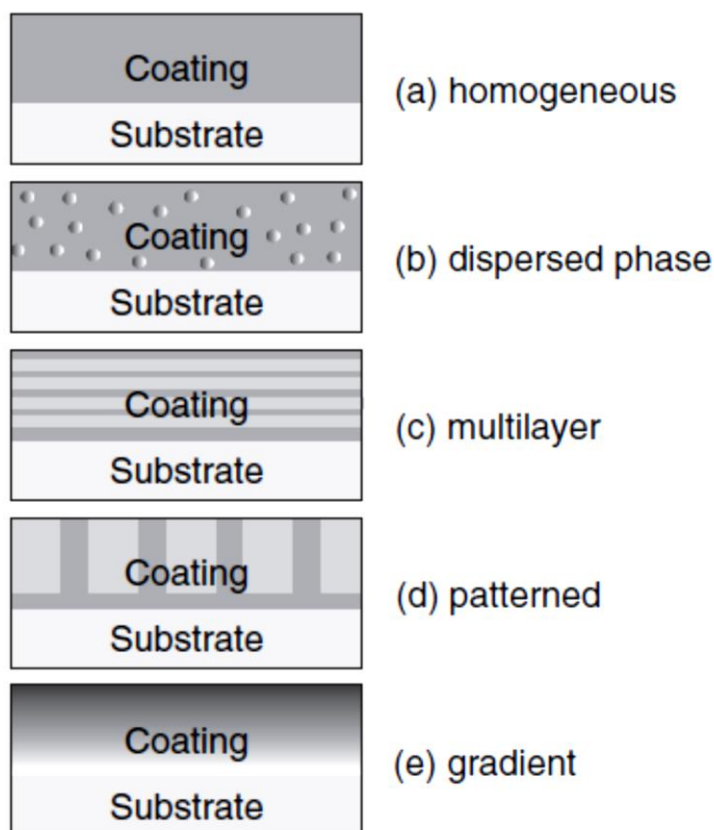
ตารางที่ 2. 1 ลักษณะการชุบเคลือบผิวแบบต่าง ๆ [21]

Physical and chemical vapour deposition	Thin discrete coating; no limitations on materials
Ion implantation	Thin diffuse coating; mixing with substrate inevitable
Surface welding	Suitable for very thick coatings only; limited to materials stable at high temperatures; coated surfaces may need further preparation
Thermal spraying	Very thick coatings possible but control of coating purity is difficult
Laser glazing and alloying	Thick coatings; coating material must be able to melt
Friction surfacing	Simple technology but limited to planar surfaces; produces thick metal coating
Explosive cladding	Rapid coating of large areas possible and bonding to substrate is good. Can give a tougher and thicker coating than many other methods
Electroplating	Wide range of coating thicknesses, but adhesion to substrate is poor and only certain materials can be coated by this technique



ภาพที่ 2. 1 ช่วงการเคลือบโดยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อการเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ก) ความหนาผิวเคลือบ ข) อุณหภูมิในการเคลือบผิว [21]

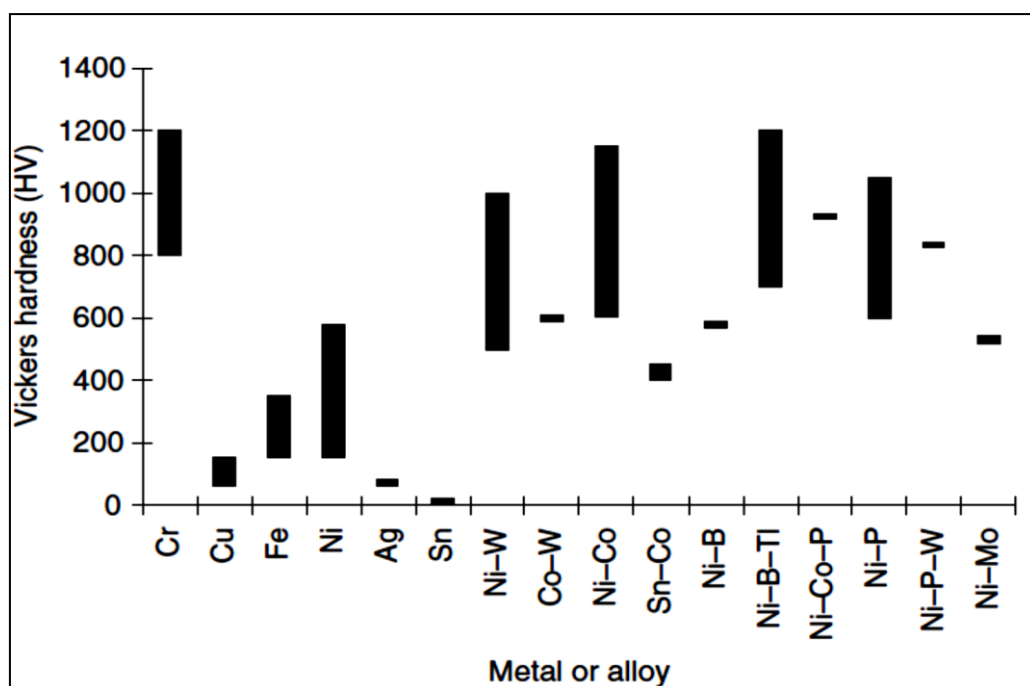


ภาพที่ 2. 2 ตัวอย่างการเคลือบด้วยวิธีการชุบไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ [1]

2.1.4 การชุบเคลือบผิวโลหะโดยวิธีการแบบใช้ไฟฟ้า

อีกรูปและคุณสมบัติของชั้นเคลือบที่ได้จากวิธีการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้า มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น ส่วนประกอบเคมีในอ่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ที่ประกอบไปด้วยผลจากสารที่เติมลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ วิธีการของลักษณะการให้กระแสไฟฟ้าที่ใช้ชุบเคลือบ ความหนาชั้นเคลือบ อุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าพีเอช เป็นต้น

การชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้า เป็นวิธีการชุบเคลือบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากข้อดีของการชุบเคลือบผิวโดยวิธีการแบบใช้ไฟฟ้า คือ สามารถควบคุมกระบวนการได้ง่ายโดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า มีอัตราการชุบเคลือบที่รวดเร็ว มีความหลากหลายในการใช้วัสดุที่จะนำมาเคลือบ ทำให้สมบัติเชิงกลของผิวเคลือบที่ได้จะมีความหลากหลายที่จะเหมาะกับการใช้งานในแต่ละประเภท ตัวอย่างตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ของการเคลือบโลหะบริสุทธิ์เพื่อใช้ในงานด้านต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และคุณสมบัติทางด้านความแข็งผิวของโลหะและโลหะผสมแต่ละประเภทที่ได้จากการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้างแสดงในภาพที่ 2.3

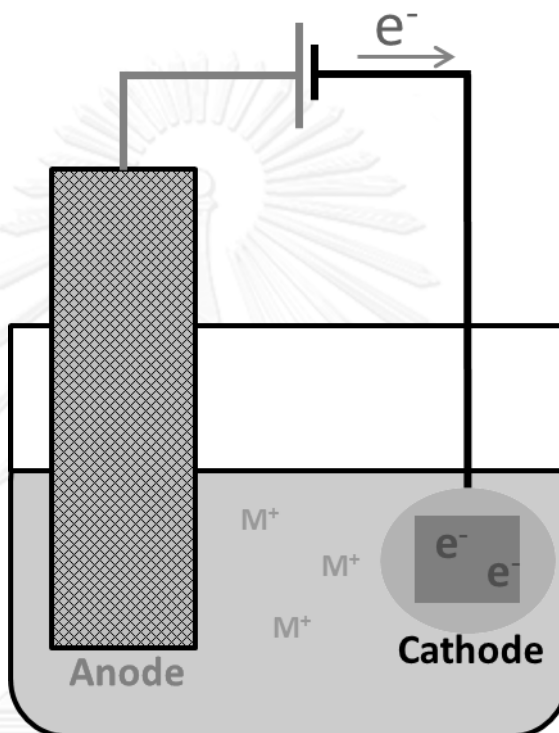


ภาพที่ 2. 3 ค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบที่ได้จากการชุบไฟฟ้าของโลหะและโลหะผสม [1]

ตารางที่ 2. 2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในการชุบโลหะแบบใช้ไฟฟ้าและคุณสมบัติของชั้นเคลือบ [1]

Deposited metal	Example electrolyte and plating conditions	Typical properties and applications
Chromium	CrO ₃ (250–400 g dm ⁻³) SO ₄ ²⁻ (2.5–4 g dm ⁻³) Temperature, 20–30 °C Current density, 10–30 A dm ⁻²	Applied, predominantly in the automotive, aerospace and mining industries, to increase wear, abrasion, corrosion and fretting resistance, reduce static and kinetic friction, reduce seizing of threaded parts, fill undersize or worn parts
Cobalt	CoCl ₂ ·6H ₂ O (90–105 g dm ⁻³) H ₃ BO ₃ (60 g dm ⁻³) Temperature, 50–55 °C Current density, 3–4 A dm ⁻²	Wear-resistant coatings
Copper	CuSO ₄ ·5H ₂ O (150–250 g dm ⁻³) H ₂ SO ₄ (38–62 g dm ⁻³) Temperature, 20–60 °C Current density, 3–10 A dm ⁻²	Widely deposited for electronics applications. Copper is also used for forming deposits on plastic substrates
Nickel	'Watts nickel' NiSO ₄ ·6H ₂ O (225–375 g dm ⁻³) NiCl ₂ ·6H ₂ O (30–60 g dm ⁻³) Temperature, 45–65 °C Current density, 2.5–10 A dm ⁻²	Wear, abrasion and corrosion (particularly in alkaline conditions) resistance
Silver	Ag (35–120 g dm ⁻³) AgCl (45–150 g dm ⁻³) KCN (70–230 g dm ⁻³) K ₂ CO ₃ (15–90 g dm ⁻³) KNO ₃ (40–60 g dm ⁻³) KOH (4–30 g dm ⁻³) Temperature, 35–50 °C Current density, 0.5–10 A dm ⁻²	Printed circuits
Zinc	ZnSO ₄ (240–480 g dm ⁻³) NaCl (15–30 g dm ⁻³) H ₃ BO ₃ (20–100 g dm ⁻³) Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O (25–35 g dm ⁻³) Temperature, 25–30 °C Current density, 0.5–3 A dm ⁻²	Corrosion protection

กระบวนการชุบไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่มีการใช้กระแสไฟฟ้า เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ของไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยการที่ไอออน (ion) ของโลหะมีการรับอิเล็กตรอน แล้วเกิดเป็นโลหะในสถานะของแข็ง เคลือบลงบนผิวชิ้นงานที่ต่อกับขั้วลบหรือแคโทด (cathode) และขั้วบวกหรือแอโนด (anode) จะใช้โลหะที่มีความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น แพลทินัม (Pt) เพื่อใช้เป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าและอิเล็กตรอนสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์



ภาพที่ 2. 4 ภาพจำลองอ่างชุบเคลือบโลหะแบบใช้ไฟฟ้า

เมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุเกิดการแยกตัว โดยอนุภาคประจุลบเรียกว่า แอนไอออน (anion) จะวิ่งไปที่ขั้วแอโนด อนุภาคที่มีประจุบวก เรียกว่า แคทไอออน (cation) จะวิ่งไปที่ขั้วแคโทด ซึ่งกระบวนการแยกสลายดังกล่าวไม่สามารถที่จะสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่จะสามารถสังเกตเห็นฟองแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนด และสังเกตเห็นฟองแก๊สไฮโดรเจนที่บริเวณขั้วแคโทด เมื่อมีการต่อกระแสไฟฟ้าครบวงจร

2.1.4.1 โลหะที่นิยมนำมาชุบไฟฟ้า

2.1.4.1.1 โครเมียม

โครเมียมเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ชุบเคลือบกันอย่างแพร่หลาย สำหรับการใช้งาน สำหรับการต้านทานการสึกหรอ การกัดเซาะ ตลอดจนต้านทานการกัดกร่อน ผิวเคลือบโครเมียมที่ได้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำ และมีค่าความแข็งพื้นผิวที่สูง สมบัติต่างๆ เช่น โครงสร้างจุลภาค ความแข็งผิว รอยแตกความเค้นคงค้าง (residue stress crack) และความแวววาวของผิวเคลือบ ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากความหนาแน่นกระแส และอุณหภูมิ [1] โดยทั่วไปการชุบเคลือบโครเมียมจะแบ่งออกเป็น 2 เกรด คือ โครเมียมแข็ง (hard chromium) ที่จะมีค่าความแข็งพื้นผิวสูง ความต้านทานการขีดสีสูง แต่มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำ เนื่องจากมีระดับของการรอยแตกในชั้นเคลือบที่มาก และโครเมียมเงา (bright chromium) ที่จะไม่มียอยแตกอยู่ภายในชั้นเคลือบ (crack free) ทำให้มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง แต่จะมีค่าความแข็งพื้นผิวและค่าความต้านทานการขีดสีที่ไม่สูงนัก

2.1.4.1.2 นิกเกิล

นิกเกิล โดยทั่วไปเป็นวัสดุที่ใช้ชุบเคลือบสำหรับงานที่ต้องการความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม โดยมีความแวววาวด้วยตัวของมันเอง อีกทั้งยังใช้กันอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้ในการชุบเคลือบโลหะผสมที่ใช้ในงานทางด้านต้านทานการสึกหรอ การต้านทานการขีดสี และโดยเฉพาะการต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะอัลคาไลน์

2.1.4.2 กฎฟาราเดย์

ในกระบวนการชุบเคลือบที่มีการใช้กระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยทางแคโทดและแอโนด โลหะที่ขั้วแอโนดจะมีการสลายตัวเป็นไอออน เกิดเป็นไอออนบวก และจะวิ่งไปที่ขั้วแคโทด เกิดการรีดิวเล็กน้อย เกิดเป็นโลหะของแข็งยึดเกาะที่ขั้วแคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง มีความสัมพันธ์กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ [22] ดังนี้

กฎข้อที่ 1 น้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

กฎข้อที่ 2 น้ำหนักของไอออนชนิดต่างๆที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระโดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆกันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลยเคมีของไอออนเหล่านั้น

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวในกฎข้อที่หนึ่ง สามารถนำมาประยุกต์ใช้งาน ในกระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะได้ เช่น ถ้าต้องการเพิ่มความหนาจากปริมาณการเคลือบของโลหะ อาจใช้การเพิ่มระยะเวลาในการชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ ๆ หรือ การใช้กระแสไฟฟ้าปริมาณมากแต่ระยะเวลาใน

การชุบน้อย ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณโลหะไปเกาะปริมาณเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น และจากความสัมพันธ์ของกฎข้อที่สอง โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายแตกต่างกัน โลหะบางชนิดมีความสามารถในการสลายตัวน้อย โลหะบางชนิดมีความสามารถในการสลายตัวมาก ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งจะทำให้โลหะต่างชนิดกันแยกสลายตัวออกมาปริมาณต่างกัน

การคำนวณหาปริมาณโลหะที่ไปเกาะที่แคโทด โดยใช้กฎของฟาราเดย์

$$W = I \cdot T \cdot A / Z \cdot F \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

W คือ ปริมาณโลหะที่ไปเกาะที่แคโทด

I คือ กระแสไฟฟ้า

T คือ เวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบผิว

A คือ น้ำหนักอะตอมของโลหะ

Z คือ จำนวนวาเลนซ์ของโลหะ

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 คูลอมป์)

2.1.4.3 ชั่ว

กระแสไฟฟ้าที่ใช้ไหลผ่านไปยังน้ำยาชุบสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ ไม่ได้ถูกใช้ในการแยกสลายไอออนโลหะเพียงอย่างเดียว แต่ยังคงสูญเสียไปกับการแยกสลายสารอื่น ๆ ที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น ส่งผลทำให้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่าการชุบเคลือบที่ได้มีปริมาณของโลหะที่เคลือบลงบนชิ้นแคโทดน้อยกว่าตามทฤษฎีกฎข้อที่หนึ่งของฟาราเดย์ โดยหากเอาน้ำหนักของแคโทดที่ไปเกาะที่ขั้วลบของจริง มาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของโลหะที่ควรจะไปเกาะที่ขั้วลบตามทฤษฎี ก็จะสามารถทราบถึงประสิทธิภาพของขั้วลบได้ โดยประสิทธิภาพของขั้วลบของน้ำยาชนิดต่าง ๆ จะแตกต่างกันออกไป เช่น น้ำยาชุบโครเมียมจะมีประสิทธิภาพขั้วลบต่ำมาก คือประมาณ 10-25% เท่านั้น น้ำยาชุบเงินมีประสิทธิภาพขั้วลบสูงมากคือเกือบ 100% เป็นต้น [22]

2.1.4.4 พีเอช (pH)

น้ำบริสุทธิ์ มีสูตรโมเลกุลคือ H_2O โดยทั่วไปจะมีค่าพีเอชเป็นกลางคือเท่ากับ 7 โดยที่น้ำ 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ในการแยกสลายด้วยไฟฟ้า น้ำบางส่วนจะสามารถแยกสลายออกได้เป็น ไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออน ดังสมการ



ในน้ำบริสุทธิ์ที่เป็นกลาง จะมีจำนวนของไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนเท่ากัน แต่ถ้าในน้ำที่มีไฮโดรเจนไอออนมากกว่าไฮดรอกซิลไอออน น้ำนั้นจะมีสภาพเป็นกรด ค่า pH ตั้งแต่ 7 ลงมาถึง 1 และในทางตรงกันข้ามถ้าในน้ำมีไฮดรอกซิลไอออนมากกว่าไฮโดรเจนไอออน น้ำนั้นก็จะมีสภาพเป็นด่าง พีเอชตั้งแต่ 7 ถึง 13

ค่าพีเอชนั้นมีผลต่อน้ำยาชุบมาก ถ้าค่าของพีเอชน้อย แสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดลดต่ำลง แต่ถ้าค่าของพีเอชมาก น้ำยาจะมีสภาพเป็นด่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดต่ำลงเช่นกัน ดังนั้นการควบคุมค่าพีเอชจึงมีความสำคัญมาก ซึ่งน้ำยาชุบทุกชนิดจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง ในการใช้งานควรควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม สำหรับการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า น้ำยานี้หากน้ำยาชุบมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป หรือมีค่าพีเอชลดลงจะมีผลกระทบต่อความเงาและมีแนวโน้มที่จะเกิดรูพรุนขึ้น แต่ถ้ามีค่าพีเอชสูงเกินไปนิเกิลที่ได้จะมีความยืดหยุ่นต่ำ ดังนั้นการควบคุมค่าพีเอชของสารละลายไว้จึงมีความสำคัญมากซึ่งการลดค่าพีเอชลงทำได้โดยการเติมกรดซัลฟิวริกหรือไฮโดรคลอริก และการเพิ่มค่าพีเอชโดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.1.4.5 ความหนาแน่นของกระแส (current density)

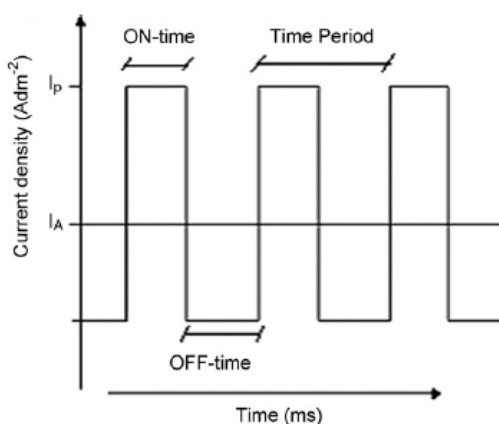
ความหนาแน่นของกระแสในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า [22] ซึ่งก็คือ ความหนาแน่นกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบที่ขั้วแคโทดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยปกติมักจะกำหนดค่าในหน่วยของแอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ดังนั้นการคำนวณหาพื้นที่ของชิ้นงานที่ถูกต่อกับขั้วแคโทดที่จะทำการชุบโลหะ เพื่อที่จะกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เนื่องจากแต่ละชิ้นงานจะมีพื้นที่ไม่เท่ากันทำให้มีความต้องการกระแสไฟฟ้าที่ใช้แตกต่างกัน

ความหนาแน่นของกระแสของขั้วลบ คือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบที่ขั้วลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ปกติมักใช้แอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของแคโทด เพื่อทราบว่าจะจ่ายความหนาแน่นของกระแสแตกต่างกันออกไป และงานแต่ละชิ้นก็มีเนื้อที่แตกต่างกันด้วยเหตุนี้กระแสและเนื้อที่จึงควรต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกเสมอ

2.1.4.6 กระแสแบบ pulse

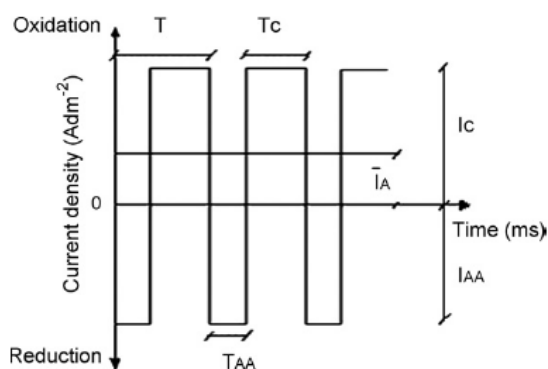
เป็นวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าที่จ่ายกระแสแบบ pulse [23] ส่งผลทำให้เกิดการกระจายตัวของกระแสเคลือบผิวของไอออนที่วัสดุพื้น ช่วยทำให้ความหนาแน่นของกระแสมีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอขึ้น ทำให้ผิวเคลือบที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และยังช่วยในเรื่องความเงาของผิวเคลือบอีกด้วย

ในวิธีการชุบเคลือบแบบ pulse ค่าศักย์ไฟฟ้าหรือกระแส จะมีการสลับไปมาระหว่างสองค่าที่มีค่าแอมพลิจูดของช่วงที่เท่ากัน ซึ่งในแต่ละช่วงจะประกอบไปด้วย เวลาเปิด ในระหว่างที่มีการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป และเวลาปิด ในระหว่างที่ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2. 5 รูปแบบการชุบเคลือบแบบ pulse [23]

มีความเป็นไปได้ที่จะใช้การกำหนดลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นการใช้ควบคุม ส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบ และความหนาผิวเคลือบ เนื่องจากการใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้า แบบ pulse ส่งผลทำให้มีการเกิดนิวคลีเอชันเพิ่มขึ้น โดยจะมีจำนวนเกรนต่อพื้นที่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ ชั้นเคลือบที่มีเกรนละเอียด และมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวิธีการชุบเคลือบแบบใช้กระแสตรงทั่วไป โดยแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ กระแสแบบ pulse และกระแส reverse pulse ดังแสดงในภาพที่ 2.6 กระแสจะถูกขัดจังหวะโดยกระแสแบบ reverse pulse



ภาพที่ 2. 6 รูปแบบการชุบเคลือบแบบ reverse pulse [23]

การใช้กระแส reverse pulse ช่วยในการเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพของอ่างเคลือบ โดยการลดความต้องการของการเติมสารเติมแต่ง การกำจัดความหนาที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสมาก ในระหว่างการผกผันของกระแส และปรับปรุงโครงสร้างให้มีชั้นเคลือบที่ปราศจากรูพรุน โดยประสิทธิภาพของกระแสแบบ reverse pulse จะมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพของ กระแสปกติ แต่การใช้กระแส reverse pulse ส่งผลต่อโครงสร้างและส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบที่มีความสม่ำเสมอจากการชุบเคลือบที่ความถี่สูง (>10 Hz.)

การชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้ากระแส reverse pulse สามารถนำไปใช้ในการชุบเคลือบกับวัสดุได้หลากหลายชนิด เช่น นิกเกิล การชุบเคลือบนิกเกิลแบบใช้ไฟฟ้ากระแส reverse pulse สามารถทำให้เกิดชั้นเคลือบของนิกเกิลที่มีความบางมากได้ และไร้รูพรุน การชุบเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงจากการลดปริมาณทั้งสแตน ตลอดจนการชุบเคลือบวัสดุชั้นเคลือบคอมโพสิตนิกเกิลซิลิคอนคาร์ไบด์ การใช้กระแส reverse pulse ช่วยในการปรับปรุงปริมาณการใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ ชั้นเคลือบคอมโพสิตที่ได้จากการใช้กระแส reverse pulse จะมีค่าความแข็งพื้นผิว 611 HV ซึ่งมีความมากกว่าการชุบเคลือบแบบกระแสตรงปกติที่มีค่าความแข็งพื้นผิว 540 HV

2.1.5 การชุบนิกเกิลสไตรค์ (Nickel strike)

นิกเกิลสไตรค์ [22] เป็นการชุบที่จะได้ชั้นเคลือบบาง ๆ โดยทั่วไปจะใช้ชุบเคลือบลงบนชิ้นงานประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีออกไซด์อยู่บริเวณผิว ดังนั้นก่อนทำการชุบนิกเกิลสไตรค์จึงต้องมีการขัดผิวก่อน การชุบนิกเกิลสไตรค์เป็นการกระตุ้นผิวก่อนที่จะนำไปชุบเคลือบในขั้นต่อไป

2.1.5.1 นิกเกิลสไตรค์ ชนิดคลอไรด์

สูตร	นิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	240 กรัม/ลิตร
	กรดไฮโดรคลอริก(HCl)	86 มิลลิลิตร/ลิตร
	ความหนาแน่นกระแส	3 แอมป์/ตารางเดซิเมตร
	อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
	เวลาชุบ	2-3 นาทีใช้งานเป็นขั้วบวก และ 6 นาที ใช้งานเป็นขั้วลบ

2.1.5.2 นิกเกิลสไตรค์ ชนิดซัลเฟต

สูตร	นิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	250 กรัม/ลิตร
	กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)	25 มิลลิลิตร/ลิตร
	กระแสไฟฟ้า	16-22 แอมป์/ตารางเดซิเมตร
	อุณหภูมิ	35-40 องศาเซลเซียส
	เวลาชุบ	5-10 นาที

2.1.6 สมบัติเชิงกลที่สำคัญของการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้า

สำหรับการชุบเคลือบโลหะ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในหลักการของวัสดุศาสตร์ ในด้านของสมบัติวัสดุ คือ ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของวัสดุ ความแตกต่างกันของโครงสร้างจุลภาคจะส่งผลต่อกลไกด้านสมบัติเชิงกลของวัสดุ ทำให้วัสดุมีค่าสมบัติที่แตกต่างกัน โดยสมบัติเชิงกลที่สำคัญ คือ ความแข็งแรง ความเหนียว ความแข็งผิว

2.1.6.1 ความแข็งผิว

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนของโลหะ และค่า ความแข็งพื้นผิว สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการของ Hall-Petch [24, 25] ดังนี้

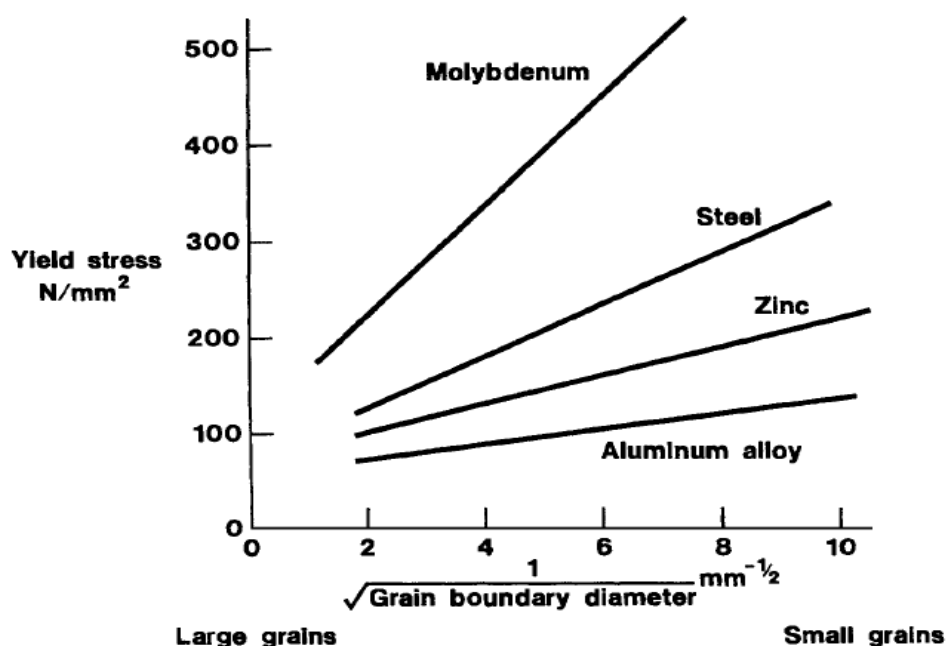
$$H = H_0 + K_H \cdot D^{-1/2} \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

H คือ ค่าความแข็งผิวของวัสดุหลายผลึก

H_0, K_H คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

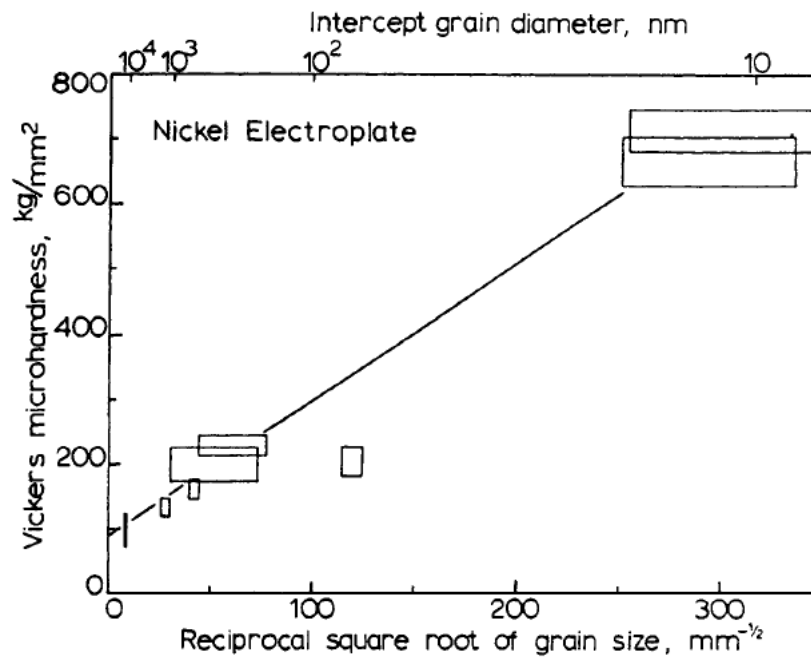
D คือ ขนาดเกรนของวัสดุ

โดยที่ H_0 และ K_H เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง และเป็นค่าเฉพาะของวัสดุโลหะแต่ละชนิดโดยสมการนี้ใช้ได้กับวัสดุหลายผลึกโดยทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ของชั้นเคลือบโลหะชนิดต่าง ๆ [25]

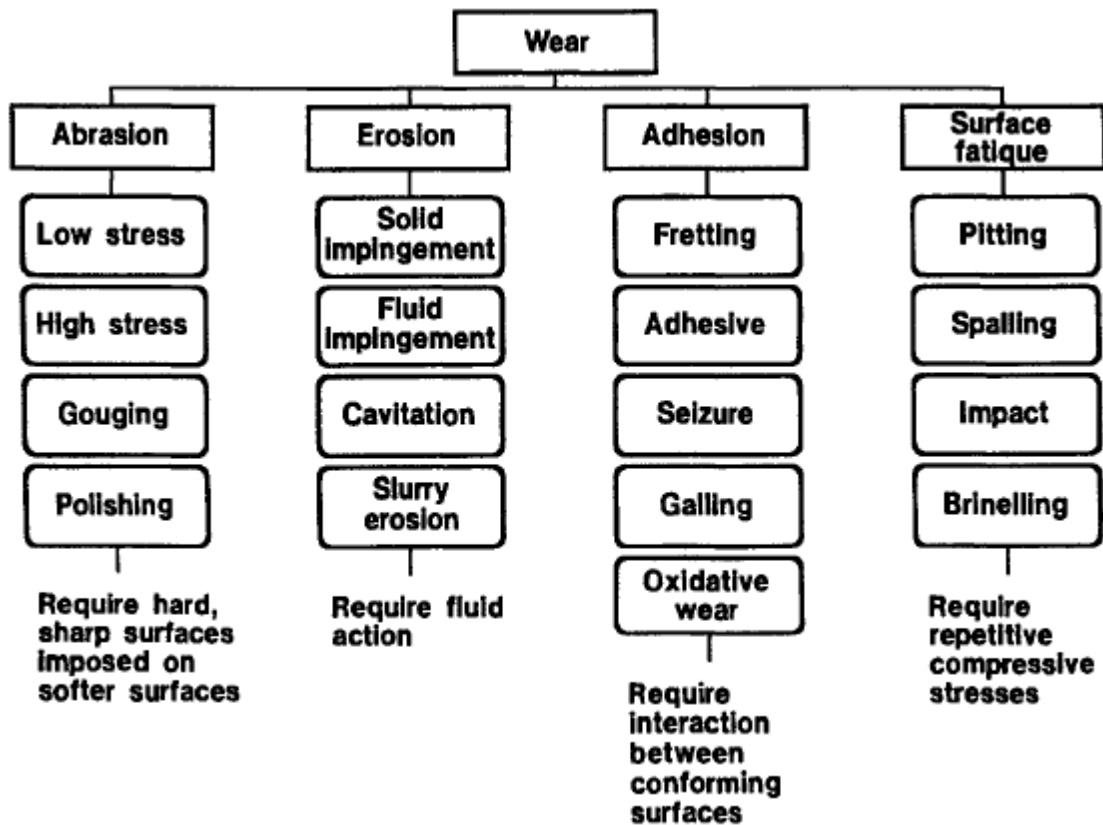
การชุบเคลือบนิเกิลโดยวิธีแบบใช้ไฟฟ้า จะมีความสัมพันธ์ตามทฤษฎีของ Hall-Petch สำหรับช่วงขนาดเกรน 12500 – 12 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.8 โดยจะมีค่าความแข็งผิวที่สูงสุดคือ 700 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร



ภาพที่ 2. 8 ค่าความแข็งผิวที่สัมพันธ์กับขนาดเกรนของชั้นเคลือบนิเกิล [25]

2.1.6.2 การสึกหรอ

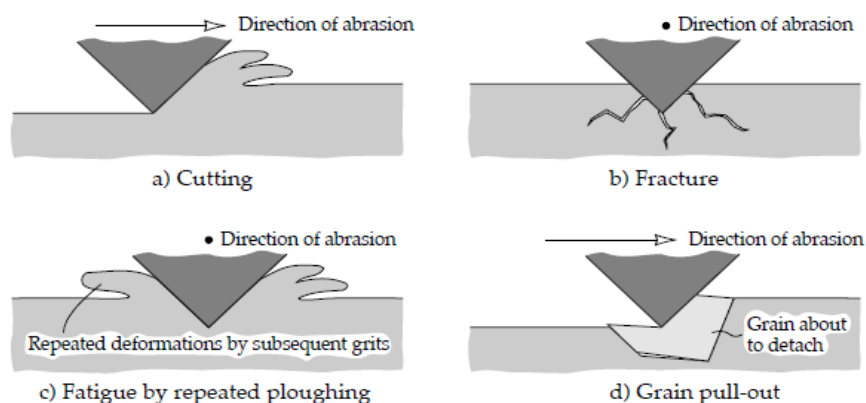
การสึกหรอเป็นสมบัติเชิงกลที่มีความสำคัญมาก แต่ในความเป็นจริงนั้นการศึกษาถึงกลไกการสึกหรอนั้นยังมีความซับซ้อนและไม่แน่ชัด การสึกหรอเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของวัสดุในสถานะของแข็ง อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุ และผิวสัมผัสของชิ้นงาน มีความเสียหายคือการสูญเสียเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อนเนื่องจากไม่สามารถที่จะสังเกตถึงสิ่งที่เกิดขึ้นได้อย่างแน่ชัด ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องในกลไกการสึกหรอคือ ค่าความแข็งผิว โครงสร้างจุลภาค พื้นผิวสัมผัส รูปร่างของวัสดุ โดยการสึกหรอสามารถแบ่งได้เป็นสี่ประเภทตามลักษณะของกลไก [26] ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2. 9 แผนภาพแสดงการสึกหรอในลักษณะต่าง ๆ [25]

2.1.6.2.1 การสึกหรอแบบขัดสี (abrasion)

เป็นกลไกที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของวัสดุกับอนุภาคแข็ง จากการสัมผัสกันภายใต้แรงกระทำ เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการเคลื่อนผ่านของอนุภาคแข็งผ่านผิวสัมผัส เช่น การขัดผิวชิ้นงานโลหะด้วยกระดาษทราย เป็นต้น โดยการสึกหรอแบบขัดสี มีกลไกที่สำคัญ 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 โดยที่สำหรับวัสดุโลหะจะเกิดกลไกของ cutting และ ploughing แต่กลไก fracture และ grain pull-out จะเกิดในวัสดุเซรามิกส์



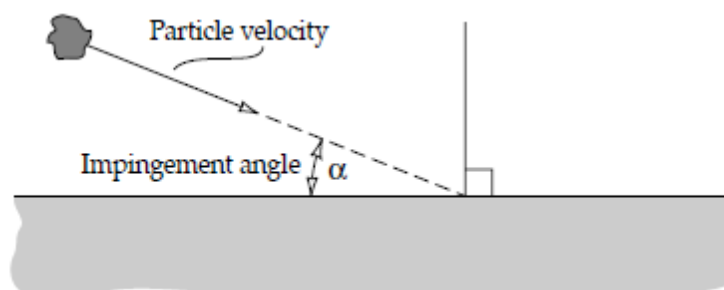
ภาพที่ 2. 10 กลไกการสึกหรอแบบขัดสี [26]

การจำแนกกลไกการสึกหรอแบบขัดสี

- Cutting เป็นการแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ของวัสดุ
- Fracture เป็นการแตกหักภายในเนื้อวัสดุ
- Fatigue by repeated ploughing เป็นการแยกออกของเนื้อวัสดุ ลักษณะรูปตัววี
- Grain pull-out เป็นการหลุดของเนื้อวัสดุในลักษณะเป็นเกรน

2.1.6.2.2 การสึกหรอแบบกัดเซาะ (erosion)

เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากกลไกการกระแทกของอนุภาคของแข็งภายใต้ตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ หรืออนุภาคของเหลวที่มีความเร็วสูง ความเสียหายเกิดขึ้นจากการตกระแทกของอนุภาคกับผิววัสดุ เช่น การสึกหรอที่เกิดขึ้นภายในท่อ ระบบปั๊ม กลไกที่ควบคุมการสึกหรอแบบกัดเซาะคือ สมบัติของอนุภาค รูปทรง อัตราการพุ่งชน ขนาดอนุภาค ความเร็ว และมุมตกระแทก โดยถ้าค่ามุมตกระแทกคือศูนย์องศาจะเปรียบได้กับการสึกหรอแบบขัดสี ตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 2.11

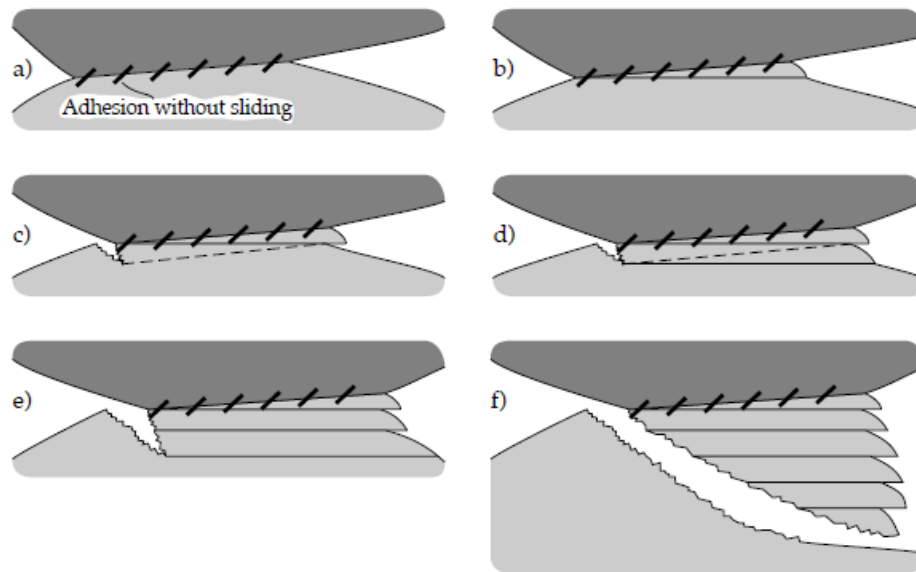


ภาพที่ 2. 11 ลักษณะการสึกหรอแบบกัดเซาะ [26]

2.1.6.2.3 การสีกหรือแบบเกาะติด (adhesion)

การสีกหรือแบบเชื่อมติดจัดเป็นการสีกหรือที่มีความรุนแรงมาก เมื่อเทียบกับการสีกหรือแบบขัดถู เป็นการสีกหรือที่ทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากเนื่องจากมีอัตราการผลิตสีกหรือที่สูง มักพบในวัสดุประเภทโลหะ เกิดจากการที่ผิวสัมผัสกันและมีการเกิดพันธะทำให้มีการเชื่อมติดกันของผิววัสดุและทำให้มีการฉีกขาดของเนื้อวัสดุเมื่อวัสดุทั้งสองหลุดออกจากกัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการสีกหรือแบบเกาะติด สามารถสังเกตได้จากชั้นผิวหน้าที่มีการหลุดออกไปติดกับวัสดุที่มาเกาะติด เรียกว่า transfer film โดยที่การเกาะติดจะเกิดได้ติดกับวัสดุชนิดเดียวกัน

การสีกหรือแบบเกาะติดสามารถลดความรุนแรงลงได้จากการใช้สารหล่อลื่น (lubricant) เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์เสียดทาน (friction coefficient) ระหว่างผิวของวัสดุทั้งสองชนิด หรือการที่อยู่ในสถานะที่มีสิ่งเจือปนเช่นน้ำ ที่ทำให้เกิดชั้นออกไซด์บริเวณผิวหน้าวัสดุทำหน้าที่เป็นตัวกลางป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงของผิววัสดุ ตลอดจนการเลือกใช้วัสดุต่างชนิดกันเพื่อลดโอกาสการเกิดพันธะ กลไกการเกิดการสีกหรือแบบเกาะติดดังแสดงในภาพที่ 2.12

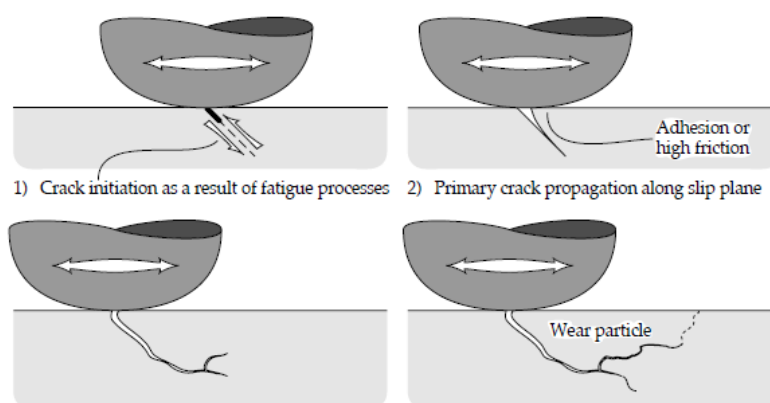


ภาพที่ 2. 12 กลไกการสีกหรือแบบเกาะติด [26]

2.1.6.2.4 การสีกหรือโดยกลไกการล้า (surface fatigue)

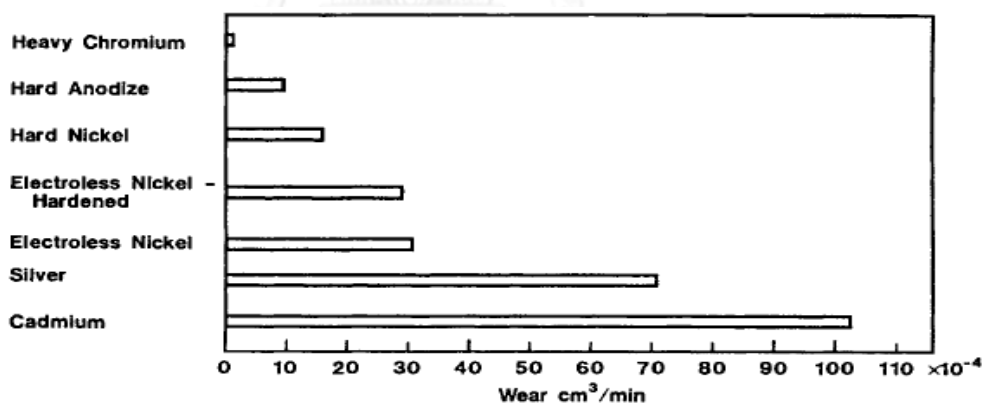
การสีกหรือที่เกิดจากการล้า จัดเป็นการสีกหรือที่มีอัตราความเสียหายต่ำ เป็นการสีกหรือที่เกิดขึ้นจากการกระทำซ้ำ ๆ กันเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสะสมของความเสียหายจากการโตของรอยแตกอย่างช้า ๆ โดยความเสียหายจะเกิดที่บริเวณผิวด้านบนก่อน

โดยมากความเสียหายจะทำมุม 45 องศากับผิวชิ้นงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเค้นมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2. 13 กลไกการสึกหรอที่เกิดจากการล้า [26]

เมื่อมีการสึกหรอเกิดขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของวัสดุหรือเครื่องมือ นั้น ๆ ลดน้อยลง และนำไปสู่ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาค่าความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก่อนการเลือกนำไปใช้งาน โดยการสึกหรอของชิ้นเคลือบวัสดุต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.14



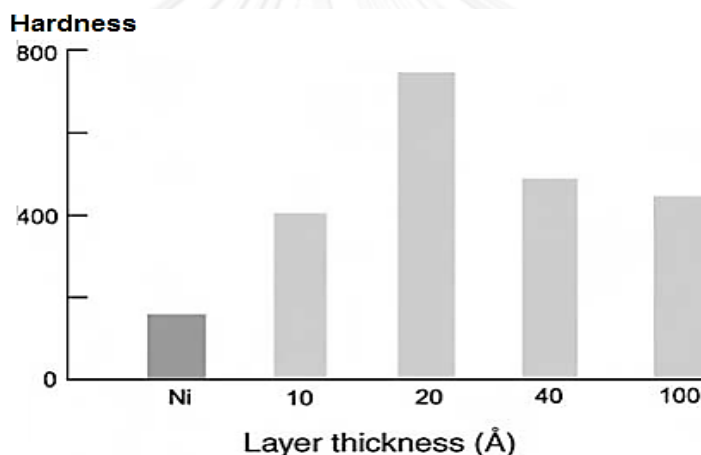
ภาพที่ 2. 14 ปริมาณการสึกหรอต่อหน่วยเวลาของผิวเคลือบวัสดุชนิดต่าง ๆ [25]

2.1.7 ชั้นเคลือบแบบหลายชั้น (multilayer)

ชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมี (Composition Modulated Multilayer Coating, CMMC) [25-27] เป็นวิธีการที่มีความน่าสนใจเนื่องจากโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษเฉพาะ ประกอบด้วยชั้นเคลือบบางในระดับนาโนเมตรจำนวนมากต่อกัน ทำให้ส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้น โดยในการชุบเคลือบแบบหลายชั้นสามารถทำได้โดยวิธีการชุบไฟฟ้า โดยภายในชั้นเคลือบอาจมีการสลับชั้นของวัสดุที่ใช้ชุบเคลือบเพื่อทำให้ชั้นเคลือบ

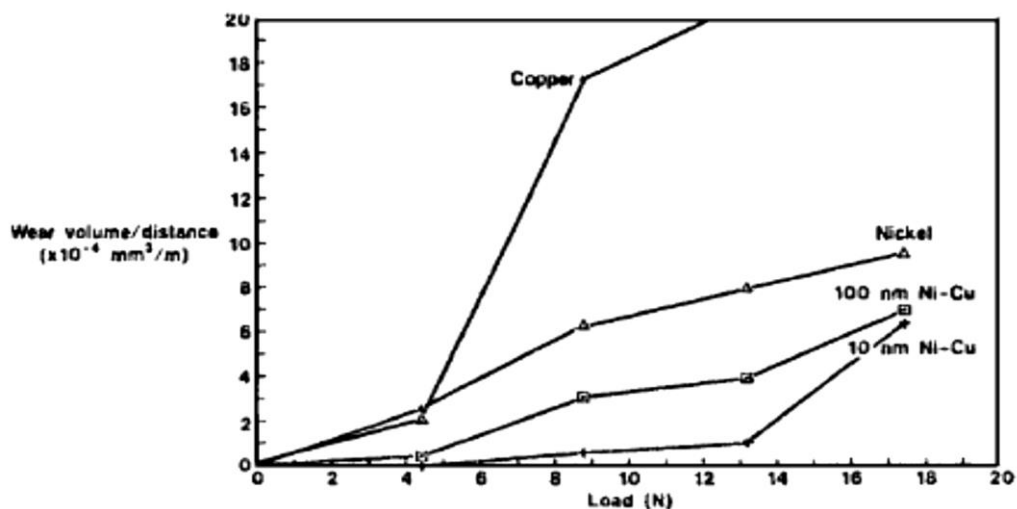
กลายเป็นวัสดุคอมโพสิต ทำให้โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบโลหะจะประกอบด้วยชั้นบางในระดับนาโนเมตร ที่มีส่วนประกอบเชิงเคมีที่แตกต่างกัน สำหรับระบบที่ประกอบด้วยชั้นเคลือบวัสดุสองชนิดสลับกัน จะช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลในด้านการต้านทานการสึกหรอ

ผลที่แสดงถึงโครงสร้างนาโนคอมโพสิต ที่ได้จากการชุบเคลือบวัสดุโลหะสองชนิดคือนิกเกิลและทองแดง ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการลดของค่าความหนาของแต่ละชั้นเคลือบ โดยที่ค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากค่าความต้านทานในการแปรรูป และ lattice parameter mismatch ส่งผลทำให้เกิดความเค้น ความไม่เข้ากันของดิสโลเคชัน และส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้มีค่าความเค้นจุดคราก (yield strength) ลดลงเมื่อมีการเพิ่มความหนาของชั้นผิวเคลือบ โดยทั่วไประบบจะมีสมบัติเชิงกลที่ต่างจากวัสดุต้นแบบเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ที่มีค่าความแข็งพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 2.9 GPa ไปเป็น 5.6 GPa ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุ นิกเกิลหรือทองแดง



ภาพที่ 2.15 ค่าความแข็งพื้นผิวของชั้นเคลือบวัสดุ นิกเกิลและโคบอลต์แบบหลายชั้นที่ความหนาชั้นเคลือบต่างกัน [27]

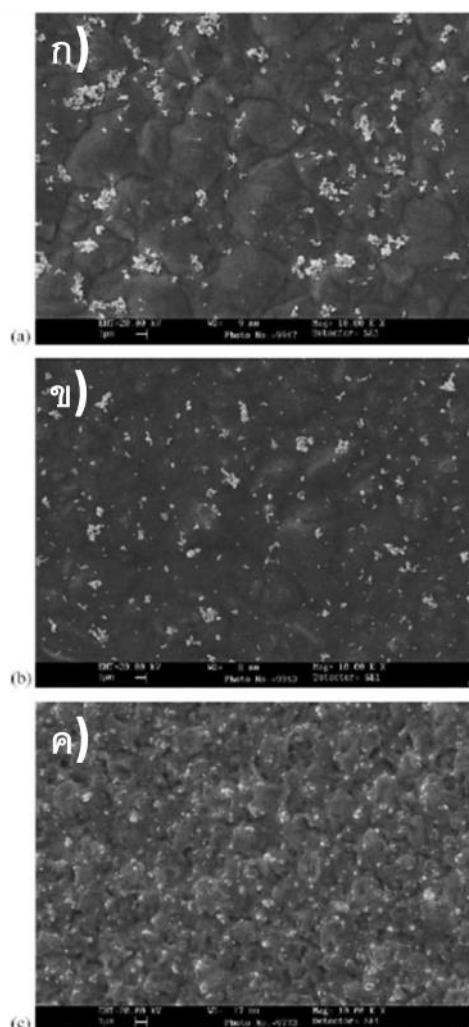
การศึกษากลไกการสึกหรอของชั้นเคลือบที่มีการสลับส่วนประกอบเชิงเคมี ทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้น ๆ รอยต่อระหว่างชั้นอาจป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอ ทำให้โครงสร้างแบบหลายชั้นสนับสนุนการต้านทานการสึกหรอของชั้นผิวเคลือบ ค่าการสึกหรอแบบไถลในระบบชั้นเคลือบแบบสลับของวัสดุ นิกเกิลและทองแดง บนชิ้นงานเหล็กเกรด 52100 การสลับกันของชั้นเคลือบ นิกเกิลทองแดงที่ความหนาเท่ากัน พบว่ามีค่าความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าวัสดุ นิกเกิลหรือทองแดง วัสดุ นิกเกิลมีการสึกหรอน้อยกว่าวัสดุทองแดงสองเท่า และระบบที่มีการสลับ นิกเกิลทองแดงจะมีค่าการสึกหรอน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2. 16 ปริมาตรการสึกหรต่อหน่วยระยะไกลของชั้นเคลือบวัสดุคอมโพสิตนิกเกิลทองแดง โลหะนิกเกิล และโลหะทองแดง [25]

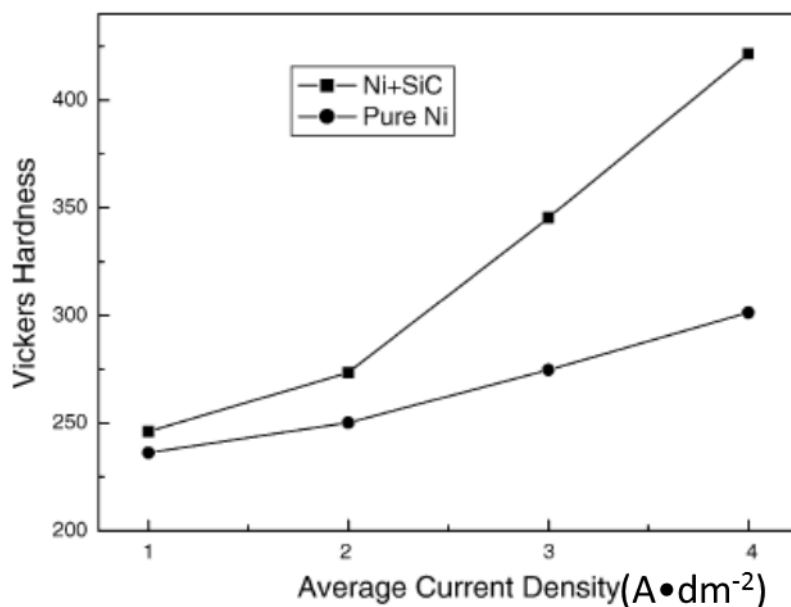
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2004 F. Hu, K.C. Chan [28] ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการชุบเคลือบโลหะนิกเกิลลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีการชุบแบบใช้ไฟฟ้า ที่มีการใช้อุณหภูมิของคาร์โบไนด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวัสดุประเภทเซรามิกส์ที่มีค่าความแข็งสูง เพื่อทำให้ชั้นเคลือบกลายเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นนิกเกิล พบว่าผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการชุบเคลือบส่งผลต่อโครงสร้างของชั้นเคลือบ คือ การใช้ความหนาแน่นกระแสที่สูงจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเกรนที่เล็กกว่าการใช้ความหนาแน่นกระแสต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2. 17 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากเทคนิค SEM ของชั้นเคลือบโลหะเนื้อฟ้านิกเกิลและอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ผลิตโดยวิธีชุบไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแส ก) $2 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$, ข) $3 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$, ค) $4 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ [28]

ผลกระทบจากค่าความหนาแน่นกระแสที่มีต่อขนาดเกรนของชั้นเคลือบส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงตามความสัมพันธ์ของ Hall-Petch และผลของการนำอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มาทำให้ชั้นเคลือบกลายเป็นวัสดุคอมโพสิตทำให้ชั้นเคลือบมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบนิกเกิลที่ไม่มีการใช้อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2. 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวและความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในวัสดุ निकิล และนิกเกิลที่มีการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ [28]

และในปี 2010 Timothy J. Rupert และ Christopher A. Schuh [4] ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน ที่ได้จากการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้ากระแสช่วงสลับ โดยควบคุมปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบโดยการปรับค่ากระแสช่วงสลับ และทำการทดสอบการสึกหรอแบบไกลโดยวิธี pin-on-disk ได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2. 3 ปริมาณธาตุทั้งสแตน ขนาดเกรน และสมบัติเชิงกลของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนที่ได้จากการชุบไฟฟ้า [4]

W content (at.%)	Average XRD grain size (nm)	Average TEM grain size (nm)	Hardness (GPa)	Wear volume (μm^3)	Friction coefficient
3.0	47		4.0	9.49×10^6	0.63
6.0	30		5.6	7.40×10^6	0.67
8.2	26	25	5.9	5.88×10^6	0.61
12.5	15		6.6	5.12×10^6	0.65
15.7	9		6.8	5.06×10^6	0.66
18.2	6	6	6.9	4.03×10^6	0.65
22.9	5		7.1	3.79×10^6	0.60
27.9	3	3	7.1	2.77×10^6	0.66

จากผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรการสึกหรอและค่าความแข็งผิว สามารถอธิบายได้ดังสมการของ Archard ดังนี้

$$V = (K l P) / H \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

V คือ ปริมาตรการสึกหรอ

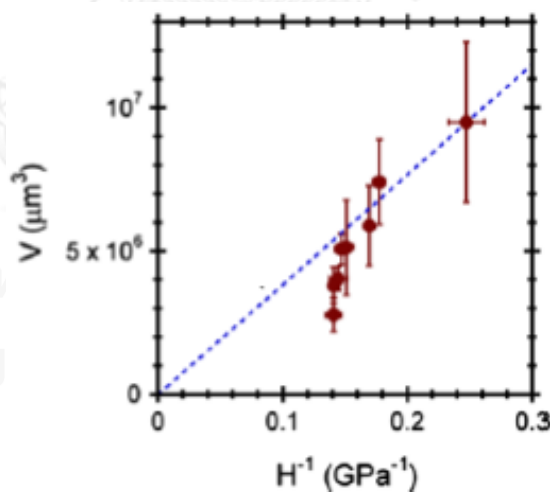
K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ

l คือ ระยะไกลที่ใช้ในการทดสอบ

P คือ แรงกด

H คือ ค่าความแข็งผิว

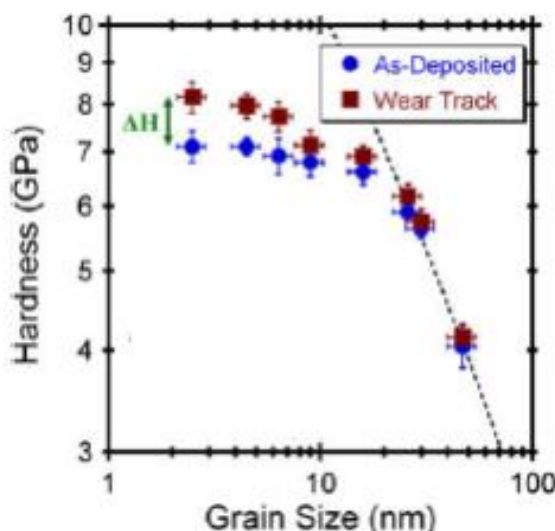
และจากผลการทดลองจริง พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรการสึกหรอและค่าความแข็งผิว เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.4 พบว่ามีความแตกต่าง ในบางช่วง ดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2. 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรการสึกหรอและค่าความแข็งผิวของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [4]

ภายหลังได้มีการวิเคราะห์ถึงกลไกที่ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองเบี่ยงเบนไปจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4 พบว่า ในระหว่างการทดสอบการสึกหรอมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นจากการเสียดสีของวัสดุ เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของเกรน และนอกจากนั้นยังพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงในงาน

(work hardening) ส่งผลทำให้วัสดุมีค่าความแข็งผิวเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้การสึกหรอของวัสดุไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.4 ความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นภายหลังการทดสอบการสึกหรอแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2. 20 กราฟแสดงผลของค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นภายหลังการทดสอบการสึกหรอ [4]

ในปี 2010 Amnuaysak Chianpairot และคณะ [10] ได้ทำการชุบเคลือบโลหะนิกเกิลและโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนผลึกนาโน โดยการชุบไฟฟ้าที่ใช้กระแสไฟฟ้า reverse pulse เพื่อศึกษาพฤติกรรมความต้านทานการกัดกร่อน โดยการใช้ส่วนประกอบในอ่างเคลือบของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ชุบเคลือบที่สภาวะอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบและขนาดเกรนจากการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแส reverse pulse โดยใช้ความหนาแน่นกระแส forward 0.20 A/cm^2 และจะมีการปรับค่าความหนาแน่นกระแส reverse pulse ที่ 0, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.30 A/cm^2 ใช้ forward pulse time และ reverse pulse time คือ 20 และ 3 ms ตามลำดับ และได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.5

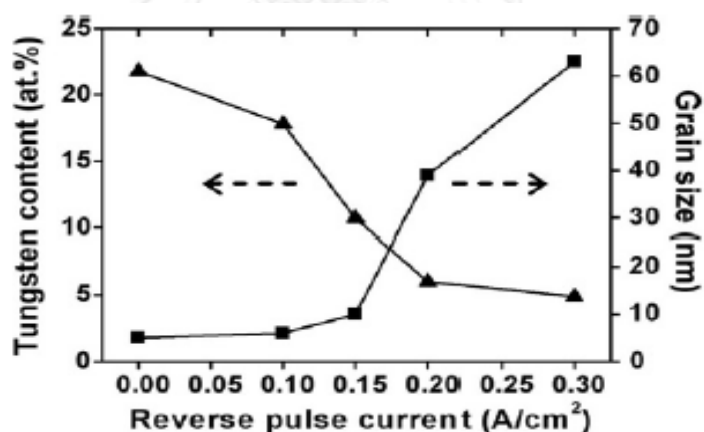
ตารางที่ 2. 4 สารเคมีและปริมาณที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [10]

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)
Sodium citrate dihydrate	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	147
Ammonium chloride	NH_4Cl	26.7
Nickel sulfate hexahydrate	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	15.8
Sodium tungstate dihydrate	$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	46.2
Sodium bromide	NaBr	15.5

ตารางที่ 2. 5 การจ่ายค่ากระแส reverse pulse ปริมาณธาตุทังสเตน และขนาดเกรน ของโลหะผสมนิกเกิลทังสเตน [10]

Sample	Reverse pulse current (A/cm ²)	Tungsten content (at.%)	Average grain size (nm)
mc Ni	0	0	7 μm
Ni-5 W	0.30	4.9	63
Ni-6 W	0.20	6.0	39
Ni-11 W	0.15	10.7	10
Ni-18 W	0.10	17.8	6
Ni-22 W	0	21.8	5

การลดลงของค่าความหนาแน่นกระแส reverse pulse ส่งผลทำให้ปริมาณทังสเตนในชั้นเคลือบโลหะผสมเพิ่มสูงขึ้น สนับสนุนการเกิดเกรนที่เล็กจากการแยกตัวผ่านขอบเกรนของทังสเตนในเนื้อพื้ นิกเกิล ทำให้สามารถที่จะทำนายและควบคุมปริมาณทังสเตนในชั้นเคลือบและโครงสร้างจุลภาค จากการปรับค่าตัวแปรความหนาแน่นกระแส reverse pulse ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2. 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสย้อนกลับ, ปริมาณทังสเตน และขนาดเกรน ของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทังสเตน [10]

และในปี 2011 มีงานวิจัยของ Narasak Sunwang และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนที่มีต่อค่าความแข็งผิวและความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทังสเตนเพื่อใช้ในงานที่อุณหภูมิสูง ความสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิต และโครงสร้างจุลภาค ที่ได้จากการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้ากระแสแบบช่วงสลับ โดยที่สามารถที่จะควบคุมปริมาณของทังสเตน และขนาดเกรนในชั้นเคลือบได้ จาก reverse pulse time ที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2. 6 ค่าช่วง reverse pulse ปริมาณส่วนประกอบทางเคมี และขนาดเกรน ของชั้นเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน [3]

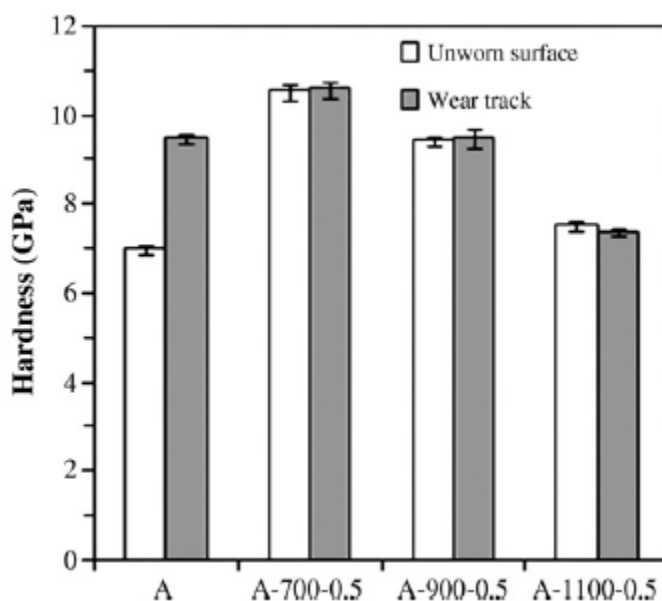
Reverse pulse duration (ms)	Ni (at.%)	W (at.%)	Grain size (nm)
1	78	22	3
6	87	13	13
9	94	6	56

จะเห็นได้ว่าชั้นเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนสูงสุดในการทดลองนี้คือ Ni-22W ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ช่วงเวลาที่กระแสนอนกลับน้อยสุด จะมีขนาดเกรนเล็กที่สุดคือ 3 นาโนเมตร ส่งผลทำให้มีค่าความแข็งผิวที่สูงที่สุด สอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ Hall-Petch จึงได้มีการนำชั้นเคลือบ Ni-22W ดังกล่าวมาผ่านกระบวนการอบอ่อน (annealing) ที่อุณหภูมิ 700, 900 และ 1100 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะเพิ่มค่าความแข็งผิว และนำไปทดสอบหาค่าสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งผิวโดยเทคนิคไมโครวิกเกอร์ และการสึกหรอแบบไถโดยเทคนิค ball-on-disc ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งพบว่ากระบวนการอบอ่อน ทำให้ค่าความแข็งผิวเพิ่มขึ้นจากกระบวนการการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึก (grain relaxation) เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน แต่จะทำให้เกิดการโตของเกรน (grain growth) ส่งผลให้การสึกหรอเกิดมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการอบอ่อนที่ 700 องศาเซลเซียสจะให้ค่าความแข็งผิวที่สูงที่สุดคือ 10.5 GPa และมีค่าการสึกหรอเพิ่มขึ้นจาก $1.6 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ ไปเป็น $12.7 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 2. 7 ค่าขนาดเกรน และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน Ni-22%W ที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที [3]

Heat treatment temperature (°C)	Grain size (nm)	Hardness (GPa)	Wear loss ($\times 10^6 \mu\text{m}^3$)
As-plated	3	7	1.6
700	44	10.5	12.7
900	50	9.5	31.1
1100	70	7.5	126.3

ต่อมาได้มีการนำชั้นเคลือบ Ni-22W ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ นำมาวัดหาค่าความแข็งผิวอีกครั้งที่บริเวณรอยการสึกหรอที่เกิดขึ้น พบว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนมีค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นบริเวณรอยการสึกหรอ ซึ่งเกิดมีความร้อนเกิดขึ้นในระหว่างการสึกหรอจากการเสียดสี ส่งผลให้กลไกที่เกิดขึ้นคือการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึก ทำให้มีค่าความแข็งผิวเพิ่มสูงขึ้นจากชิ้นงานก่อนทำการทดสอบการสึกหรอ ดังแสดงในภาพที่ 2.22

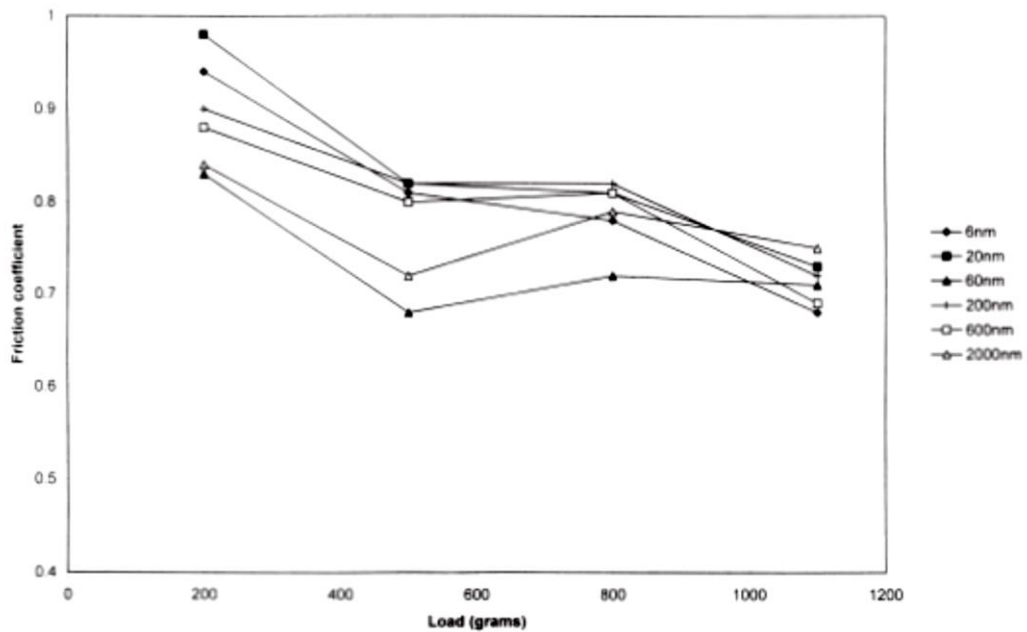


ภาพที่ 2. 22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของค่าความแข็งผิวของชั้นงาน Ni-22W ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในบริเวณที่ไม่มีการสึกหรอ และบริเวณรอยการสึกหรอ [3]

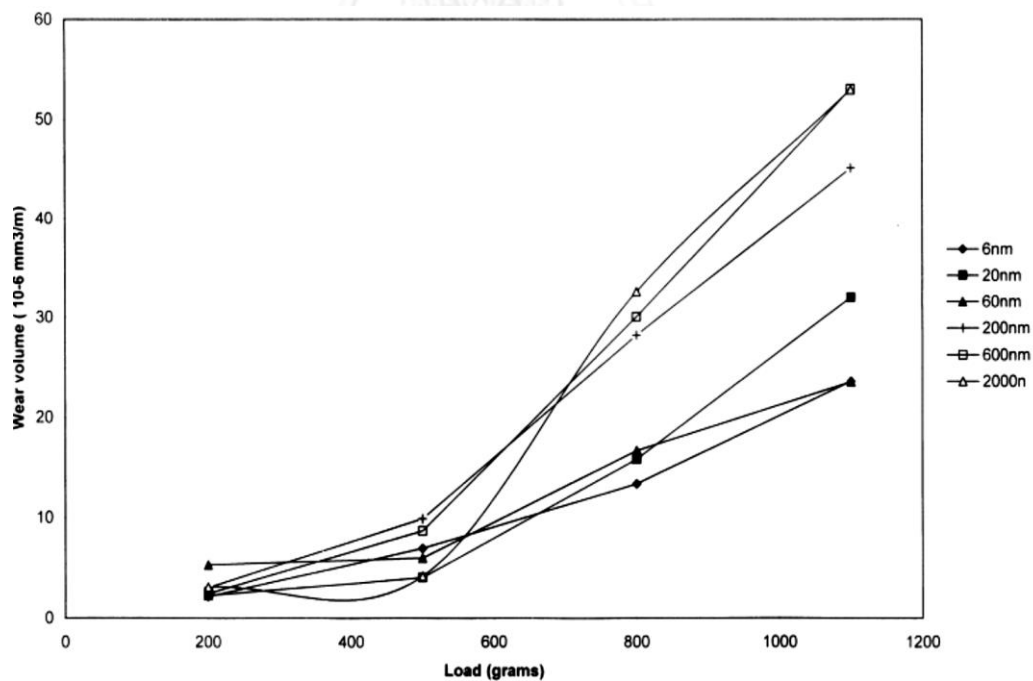
แนวทางการชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่น่าสนใจจากงานวิจัยของ V.D. Papachristos และคณะในปี 1998 [18] ได้ทำการศึกษาการประพัตต์ผิวของการสึกหรอของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลฟอสฟอรัสทั้งสแตน (Ni-P-W) โครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) ที่ได้การชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้าลงบน pin steel โดยมุ่งเน้นไปที่ส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบ นั่นคือ ปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบจากการชุบเคลือบแบบสลับหลายชั้น ที่มีการสลับชั้นที่มีปริมาณทั้งสแตนต่ำ (Ni-10P-10W) สลับกับชั้นที่มีปริมาณทั้งสแตนสูง (Ni-5P-45W) โดยใช้อ่างชุบเคลือบเดี่ยวที่ควบคุมปริมาณของทั้งสแตนโดยใช้กระแสแบบช่วงสลับ ในรูปแบบของคลื่น

ชั้นผิวเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนต่ำ ได้จากการชุบเคลือบในช่วงความหนาแน่นกระแสต่ำ ชั้นผิวเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนสูง ได้จากการชุบเคลือบในช่วงความหนาแน่นกระแสสูง โดยการชุบเคลือบของชั้นที่สลับติดกันรวมเรียกว่าไบเลเยอร์ จะมีค่า 6, 20, 60, 200, 600, 2000 นาโนเมตร โดยชั้นเคลือบจะมีความหนารวมประมาณ 25 ไมครอน

จากการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ของจำนวนชั้นเคลือบที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพบว่าจำนวนชั้นเคลือบไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 2.23



ภาพที่ 2. 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงกดของชั้นเคลือบหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน [18]

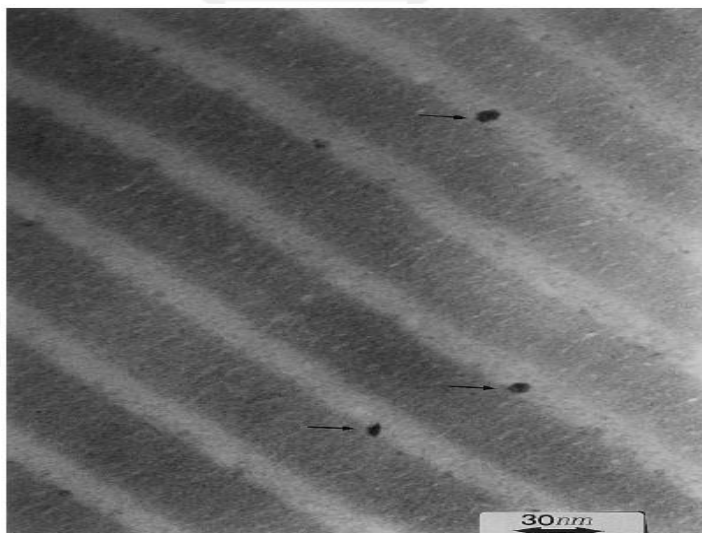


ภาพที่ 2. 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรการสึกหรอและแรงกดของชั้นเคลือบหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน [18]

จากภาพที่ 2.24 แสดงให้เห็นถึงผลของการทำการชุบเคลือบแบบหลายชั้น ที่มีต่อค่าการสึกหรอของวัสดุ Ni-P-W เมื่อมีแรงกดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีปริมาณของเนื้อวัสดุที่ถูกสึกหรอเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของความหนาแต่ละชั้นเคลือบพบว่า เมื่อชั้นเคลือบบางหลายชั้นจำนวนมากจะส่งผลทำให้มีปริมาณของเนื้อวัสดุสึกหรอลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแต่ละชั้นเคลือบของวัสดุ Ni-P-W ประพฤติตัวเป็นวัสดุแบบเปราะ เนื่องจากโครงสร้างแทบจะเป็นวัสดุอสัณฐาน ดังนั้นกลไกการสึกหรอในงานวิจัยนี้ไม่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปแบบถาวร (plastic deformation) การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน การที่มีชั้นเคลือบบางหลายชั้นจำนวนมาก ทำให้มีการสะสมของจำนวนพื้นที่ผิวสัมผัส ส่งผลทำให้รอยแตกมีการโตได้ยาก ต้องใช้พลังงานสูงในการที่จะทำให้รอยแตกโต วัสดุจึงมีค่าความแกร่งเพิ่มขึ้นจากการที่มีจำนวนชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนารวมคงที่

ต่อมาในปี 1999 V.D. Papachristos และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาทดลองเพิ่มเติมศึกษาการชุบเคลือบวัสดุ Ni-P-W แบบหลายชั้นลงบนแผ่นทองแดงโดยวิธีชุบไฟฟ้าที่ใช้กระแสแบบช่วงชั้นเคลือบประกอบไปด้วยชั้นที่มีปริมาณทั้งสแตนต์ต่ำ (Ni-10P-10W) สลับกับชั้นที่มีปริมาณทั้งสแตนต์สูง (Ni-5P-45W) โดยสนใจที่ผลกระทบของการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200-800 องศาเซลเซียส เพื่อหาผลกระทบของการเกิดการตกผลึกใหม่ และนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น โดยชั้นเคลือบที่ได้จะมีโครงสร้างแบบหลายชั้นดังแสดงในภาพที่ 2.25

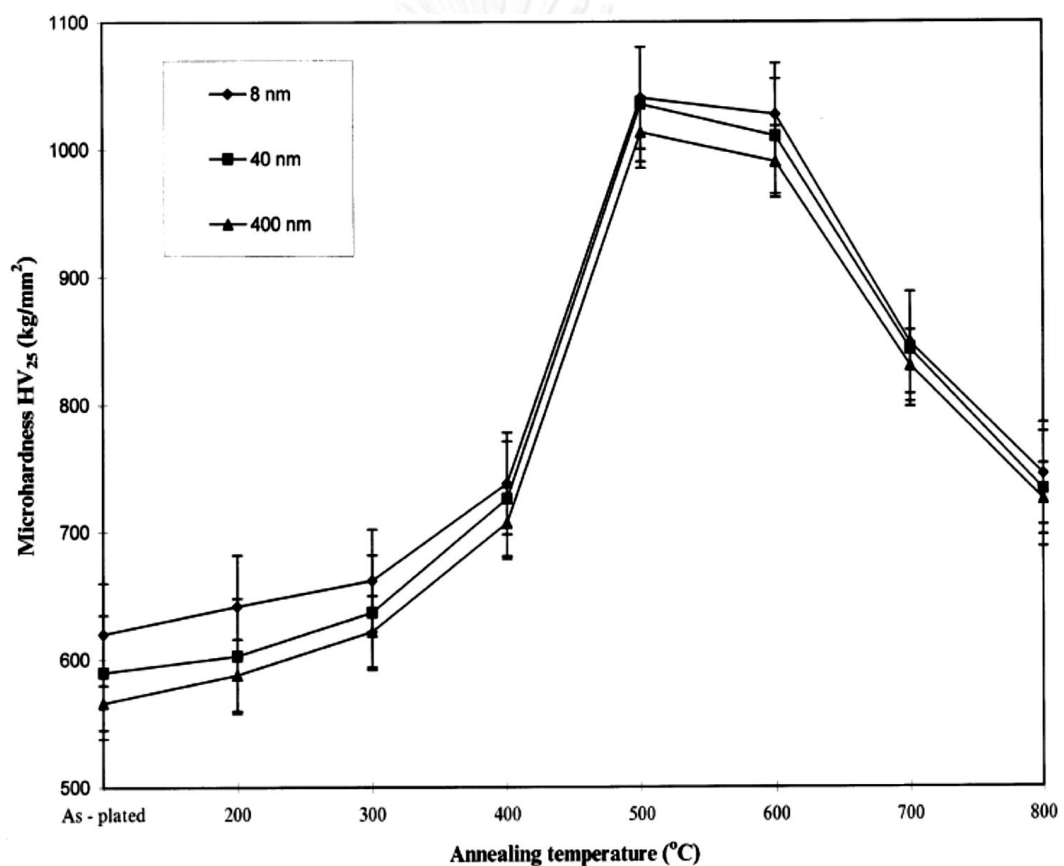


ภาพที่ 2. 25 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากเทคนิค TEM มีลักษณะเป็นชั้น ๆ ของชั้นเคลือบอสัณฐาน Ni-P-W [17]

โครงสร้างที่ได้จาก TEM แสดงให้เห็นเป็นลักษณะหลายชั้น ของชั้นเคลือบอสัณฐาน โดยที่ชั้นสีเข้มจะแสดงถึงชั้นเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนต์สูง และชั้นสีอ่อนจะแสดงชั้นเคลือบที่มีปริมาณ

ทั้งสแตนดาร์ และมีการพบเห็นผลึกขนาดเล็กเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นเคลือบช่วงที่มีปริมาณทั้งสแตนดาร์ และจากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ กลไกการตกผลึกในระหว่างการอบอ่อนจะเกิดขึ้นในช่วง 300 และไปสิ้นสุดที่ 600 องศาเซลเซียส

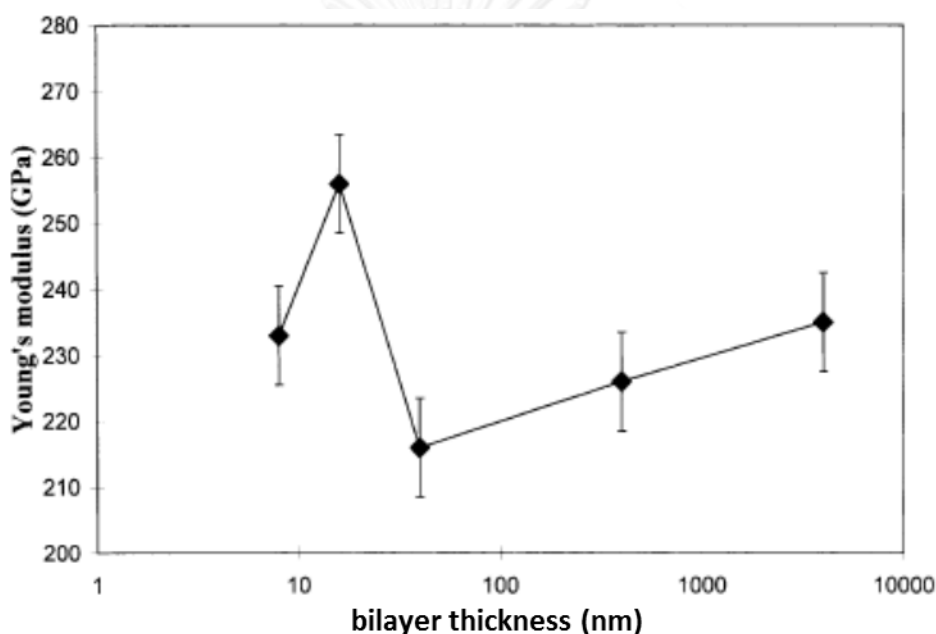
การนำไปผ่านการอบอ่อน จะทำให้ได้ค่าความแข็งพื้นผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการเกิดการตกผลึกใหม่ของชั้นผิวโครงสร้างออสเทนไนต์กลายเป็นโครงสร้างผลึกระดับนาโนรวมกับโครงสร้างออสเทนไนต์ ประกอบไปด้วยสารละลายของแข็งของนิกเกิลทั้งสแตนดาร์ที่มีโครงสร้างผลึก fcc และสารประกอบโลหะ Ni_3P ที่มีโครงสร้างผลึก bcc ซึ่งสนับสนุนการเพิ่มขึ้นของความแข็งพื้นผิว



ภาพที่ 2. 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งพื้นผิวกับอุณหภูมิการอบอ่อนของวัสดุที่ผ่านการชุบเคลือบแบบหลายชั้น [17]

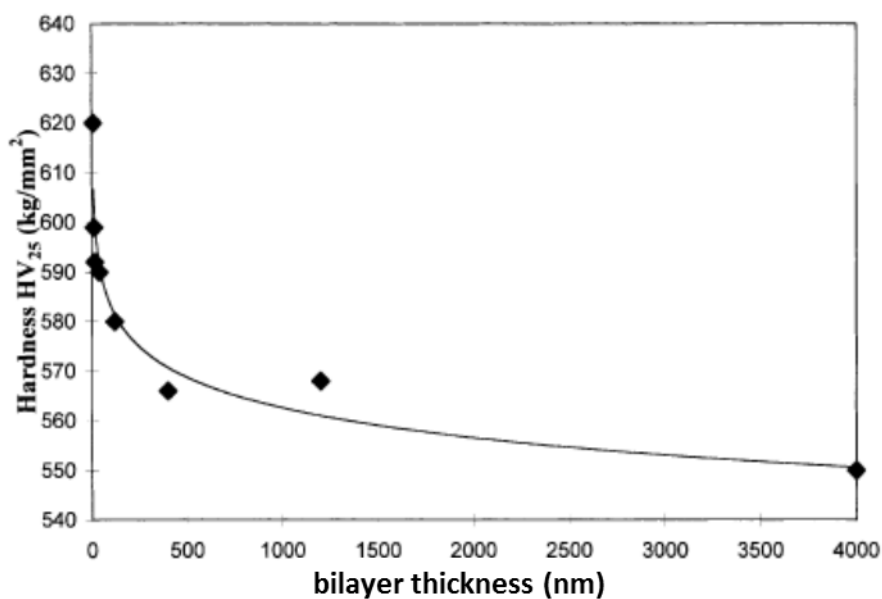
จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการอบอ่อนจะมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความแข็งพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากกลไกการตกผลึก แต่ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดกลไกการโตของผลึกซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งผิวลดลง ดังรูปที่ 2.26 โดยที่การเกิดผลึกจะเริ่มเกิดขึ้นในบริเวณที่มีทั้งสแตนดาร์ก่อน เนื่องจากทั้งสแตนดาร์มีส่วนช่วยในการเพิ่มความเสถียรทางความร้อนของชั้นเคลือบ

ในปี 2001 V.D. Papachristos และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาถึงค่ามอดูลัส ความแข็งพื้นผิว ของชั้นเคลือบ Ni-P-W แบบหลายชั้นที่ได้จากการชุบไฟฟ้าโดยใช้กระแสแบบช่วง ในรูปแบบคลื่น ที่ประกอบด้วยช่วง ชั้นเคลือบประกอบไปด้วยชั้นที่มีปริมาณทั้งสเตนต่ำ (Ni-10P-10W) สลับกับชั้นที่มีปริมาณทั้งสเตนสูง (Ni-5P-45W) ที่มีความหนาและจำนวนชั้นเคลือบแตกต่างกัน โดยการปรับค่าความยาวคลื่นในการเคลือบ และมีการใช้ acoustic resonance method ในการวัดค่ามอดูลัสได้ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 2.27 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ของค่าความยาวคลื่นและค่า Young's modulus แต่ค่ามอดูลัสของชั้นเคลือบ Ni-P-W แบบหลายชั้นที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบโลหะนิกเกิล พบว่ามีค่ามอดูลัสมากกว่าชั้นเคลือบนิกเกิล 10 . 4 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2. 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและความหนาของชั้นเคลือบย่อยที่อยู่ติดกันของวัสดุ Ni-P-W [15]

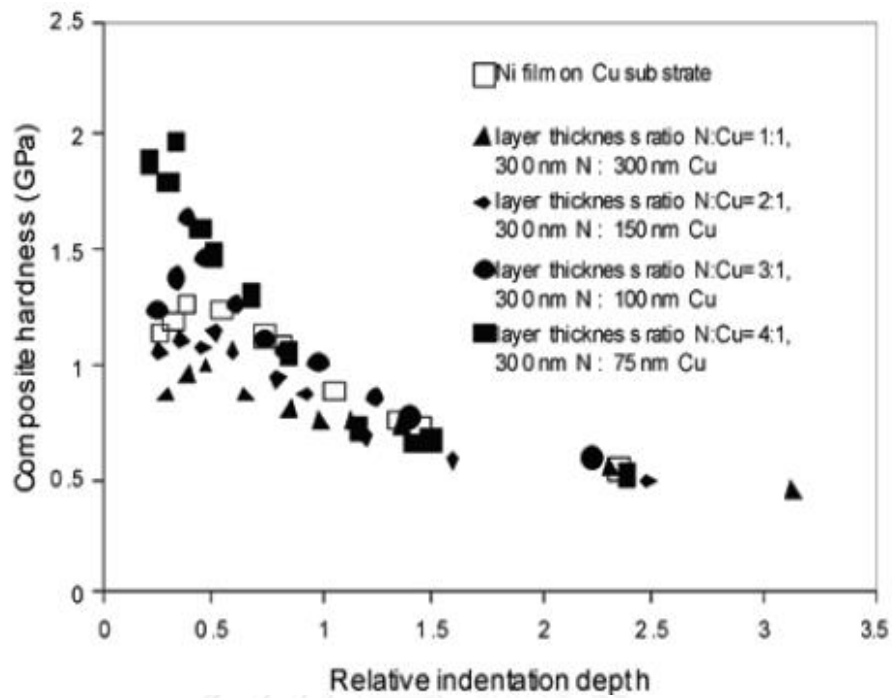
จากการทดสอบค่าความแข็งผิวโดยไมโครวิกเกอร์ พบว่าค่าความแข็งพื้นผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแต่ละชั้นเคลือบลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.28 โดยที่การความแข็งพื้นผิว ของวัสดุออสตราอนมีแนวโน้มเดียวกับวัสดุมีผลึก ค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้คือ โดยทั่วไปวัสดุออสตราอนจะมีเลขโคออดิเนชัน น้อยกว่าวัสดุที่มีผลึก ทำให้ค่าปริมาณอะตอมมีความไม่สม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาปริมาตรว่าง (free volume) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เป็นตำหนิ จะเป็นบริเวณที่มีการสะสมของพลังงาน และความเค้นสะสม การที่ความยาวคลื่นในการเคลือบมาก ทำให้มีปริมาตรว่างมาก จึงส่งผลทำให้มีค่าความแข็งพื้นผิวต่ำ อีกทั้งการที่ความยาวคลื่นในการเคลือบน้อยเป็นการส่งเสริมการด้านการแปรรูปแบบถาวร



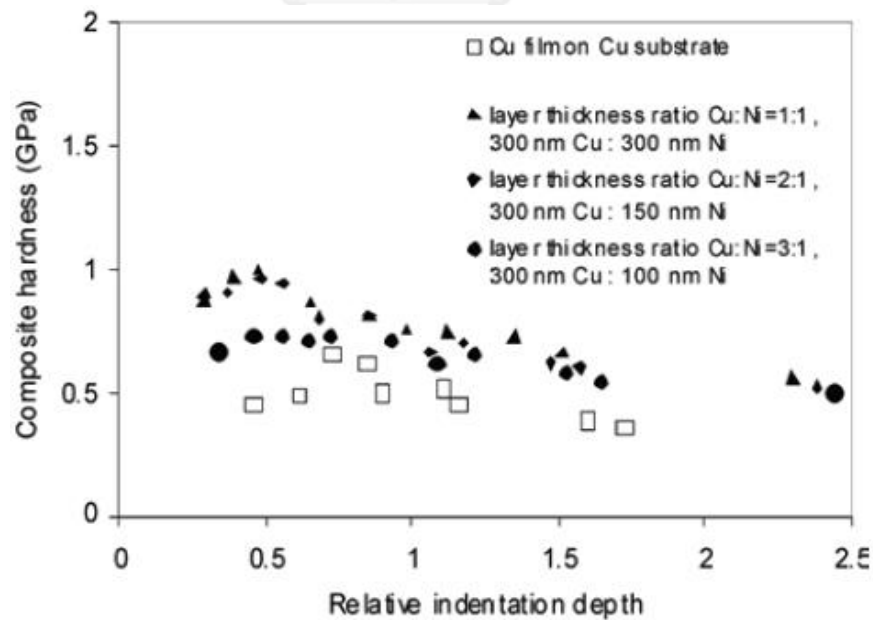
ภาพที่ 2. 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งพื้นผิวและค่าความหนาของชั้นเคลือบย่อยที่อยู่ติดกันของวัสดุ Ni-P-W [15]

ในปี 2011 J. Lamovec และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของชั้นเคลือบคอมโพสิตวัสดุ निकิลและทองแดง ลงบนชิ้นงานแผ่นทองแดง โดยสนใจที่ค่าความหนาของผิวแต่ละชั้นเคลือบ ค่าความหนารวม และสัดส่วนความหนาที่มีการสลับของชั้นเคลือบวัสดุคอมโพสิตที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิว

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวชั้นเคลือบคอมโพสิตและสัดส่วนความหนาของชั้นเคลือบ โดยที่วัสดุ निकิลมีค่าความแข็งผิวประมาณ 1 GPa และวัสดุทองแดงมีค่าความแข็งผิวประมาณ 0.5 GPa พบว่าชั้นเคลือบที่มีสัดส่วนความหนาชั้นเคลือบ निकิลมาก จะทำให้มีค่าความแข็งผิวคอมโพสิตมาก และชั้นเคลือบที่มีสัดส่วนความหนาชั้นเคลือบทองแดงมาก จะทำให้ค่าความแข็งผิวคอมโพสิตลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.29 และ 2.30

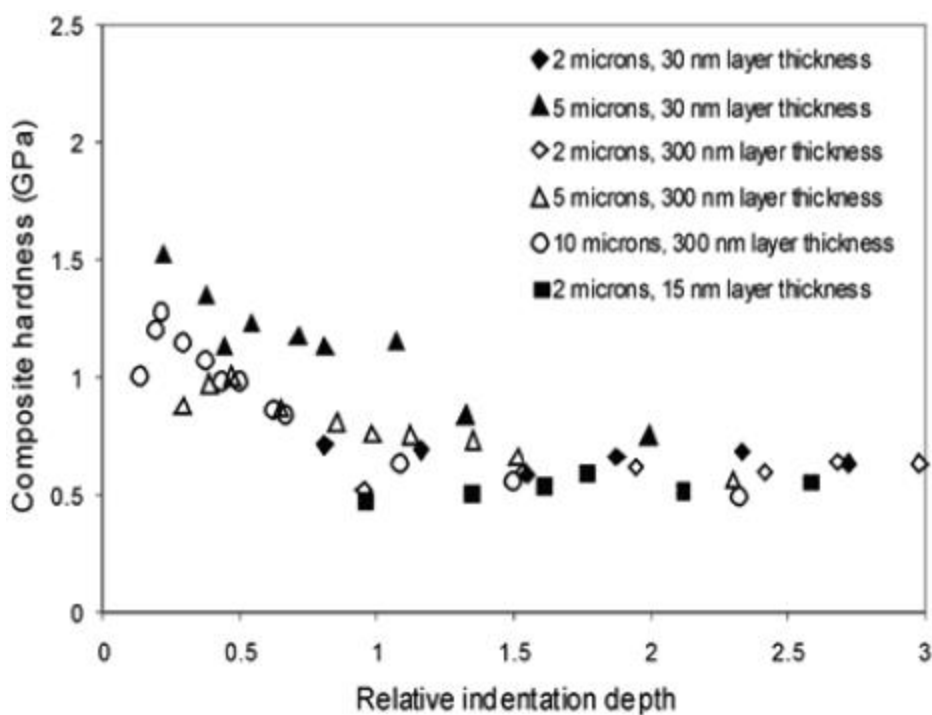


ภาพที่ 2. 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวชั้นเคลือบคอมโพสิตและความลึกรอยกด ที่สัดส่วนความหนาของชั้นเคลือบนิเกิลมากกว่าทองแดง [19]



ภาพที่ 2. 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวชั้นเคลือบคอมโพสิตและความลึกรอยกด ที่สัดส่วนความหนาของชั้นเคลือบทองแดงมากกว่านิเกิล [19]

และเมื่อพิจารณาจากความหนาแน่นของชั้นเคลือบคอมโพสิต และความหนาของแต่ละชั้นเคลือบที่มีสัดส่วนปริมาณนิกเกิลหรือทองแดงเท่ากัน พบว่าที่ความหนาแน่นเท่ากันชั้นเคลือบที่มีความบางจะส่งเสริมค่าความแข็งผิวคอมโพสิต และที่ความหนาชั้นเคลือบเท่ากัน ชั้นงานที่มีความหนาแน่นมากจะทำให้มีค่าความแข็งผิวคอมโพสิตมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.31

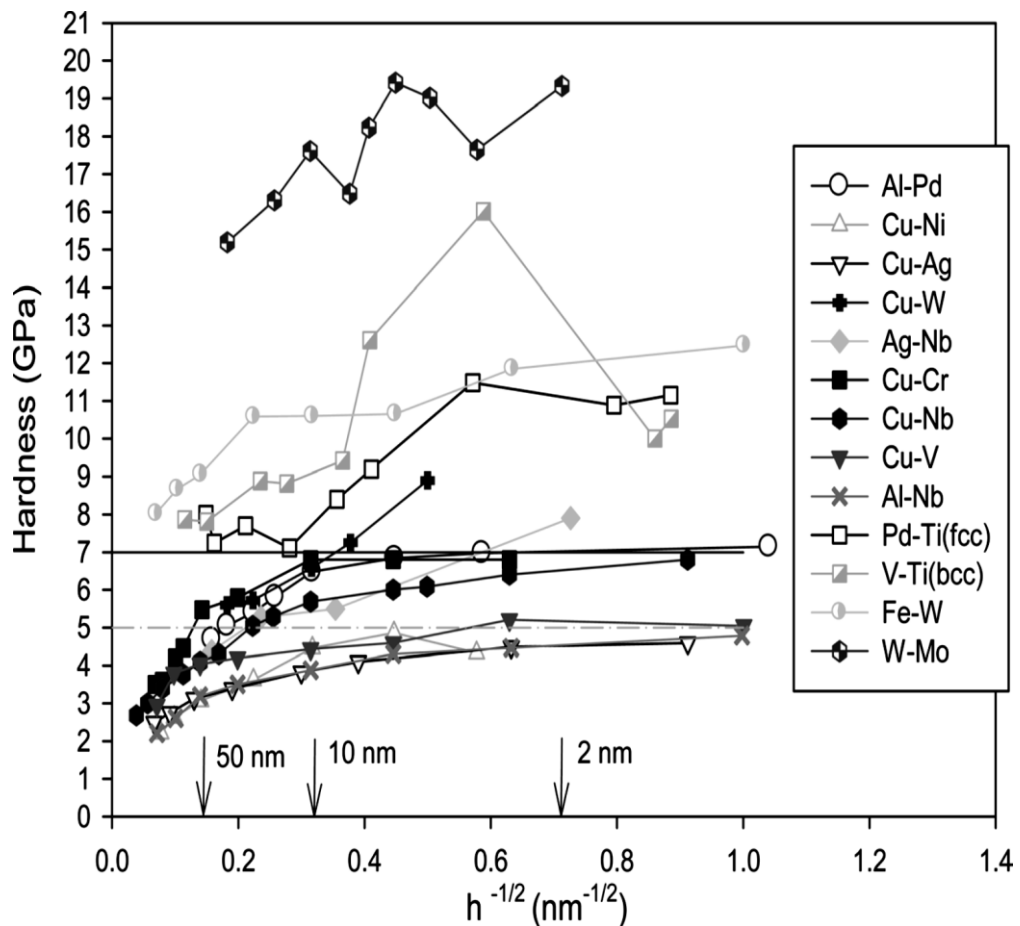


ภาพที่ 2. 31 ความสัมพันธ์ของความแข็งผิวชั้นเคลือบคอมโพสิตและความลึกรอยกด ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ [19]

ผลของชั้นเคลือบแบบคอมโพสิตหลายชั้นสามารถเพิ่มค่าความแข็งของผิวเคลือบได้ 2 เท่าของค่าความแข็งผิววัสดุฐาน เนื่องจากกรณีที่โครงสร้างแบบหลายชั้นทำให้มีจำนวนรอยต่อระหว่างแต่ละชั้นเคลือบมาก สามารถต่อต้านการเกิดการแปรรูปถาวรได้

ในปี 2011 Yi Kong และ Luming Shen [29] ได้ทำการศึกษาถึงกลไกที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างการชุบเคลือบแบบหลายชั้น ที่มีความหนาของชั้นเคลือบย่อยอยู่ในระดับนาโน โดยได้ทำการศึกษาถึงการทำให้ได้โครงสร้างแบบหลายชั้นของวัสดุโลหะต่างชนิดกันในหลากหลายระบบ ซึ่งสามารถที่จะทำให้ได้ลักษณะของรอยต่อของชั้นเคลือบที่แตกต่างกันออกไป โดยจะสนใจที่ระบบของรอยต่อ คือ รอยต่อแบบมีความเข้ากันได้ (coherent interface) ที่เกิดจากการมีชนิดโครงสร้างผลึกเหมือนกัน เช่น fcc/fcc ของวัสดุ Cu-Ni และรอยต่อที่ไม่เข้ากันได้ (incoherent interface) ที่เกิดจากการมีชนิดโครงสร้างผลึกที่ต่างกัน เช่น fcc/bcc ของวัสดุ

Cu-Nb, Al-Nb เป็นต้น โดยมีความสัมพันธ์ของค่าความแข็งผิวและความหนาของชั้นเคลือบย่อยในชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุในระบบต่าง ๆ ดังแสดงในภาพ 2.32



ภาพที่ 2. 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งผิวและความหนาของชั้นเคลือบย่อยในชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุในระบบต่าง ๆ [29]

กลไกที่ช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น หลัก ๆ จะเกี่ยวข้องกับ

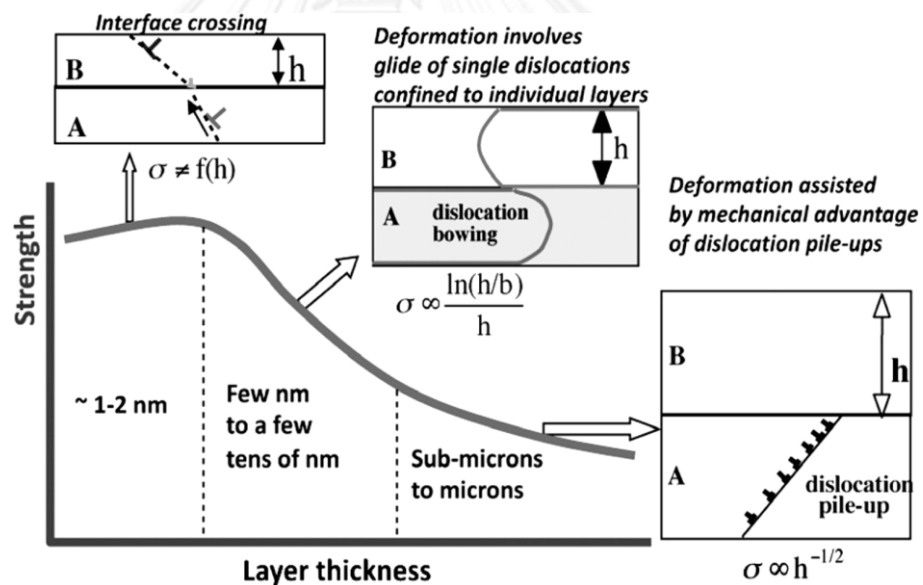
1. แบบจำลองการข้ามดิสโลเคชันแบบ Hall-Petch
2. ความแข็งที่เพิ่มจากการมีค่าโมดูลัสที่แตกต่างกัน
3. การเพิ่มความแข็งแรงแบบ Orowan
4. การเพิ่มความแข็งแรงจากการมีความเค้นที่เข้ากันได้
5. การเพิ่มความแข็งแรงจากการขัดขวางของโครงสร้าง

6. การไหลที่ถูกกักขังภายในชั้นเคลือบ

7. การเพิ่มความแข็งแรงจากสารละลายของแข็ง

ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างแบบหลายชั้นยังไม่สามารถที่จะระบุสาเหตุที่แน่นอนได้ แต่อย่างไรก็ตามความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นมาจากการรวมกันของกลไกที่ต่างกัันเหล่านี้ และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมายภายในโครงสร้างหนึ่งระบบ

ในปี 2010 J. Wang และ A. Misra [30] ได้ทำการศึกษาภาพรวมของอิทธิพลของรอยต่อชั้นเคลือบในโครงสร้างแบบหลายชั้นในวัสดุโลหะ ที่มีโครงสร้างของรอยต่อแบบไม่เข้ากันของโครงสร้าง fcc/bcc พบว่า ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบหลายชั้นในวัสดุโลหะจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากการลดลงของความหนาชั้นเคลือบย่อย ตามกระบวนการย่อยดังแสดงในแบบจำลองภาพที่ 2.33



ภาพที่ 2. 33 แบบจำลองแสดงกระบวนการย่อยในการหักงอที่ได้รับในวัสดุโลหะโครงสร้างหลายชั้น

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเริ่มตั้งแต่การเตรียมชิ้นงาน จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือ และสารเคมีต่าง ๆ สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน การชุบเคลือบผิวทั้งแบบใช้ไฟฟ้า การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ การทดสอบค่าความแข็งผิว ตลอดจนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหรือเฟสต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือที่จำเป็นดังนี้

3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน

- แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430
- กระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 800, 1200, 2500 และผ้าสักหลาด
- ผงเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอน
- เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความเร็วต่ำ (Low speed cutting Machine)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10%wt
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 14%wt
- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 10% vol
- เครื่องขัดผิวชิ้นงาน
- เครื่องอัลตราโซนิก

3.1.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้สำหรับการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้า ได้แก่

- เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสลับ
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- แผ่นตะแกรงแพลทินัม
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิลสไตรค์

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบและทดสอบวัสดุ

- สารละลายอิเล็กโทรไลต์โลหะผสมนิกเกิล-ทั้งสแตน
- กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) ใช้ศึกษาความหนาของชั้นเคลือบและโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นของชั้นเคลือบ

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ศึกษา ขนาดของเกรน รวมทั้งลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นภายหลังการชุบเคลือบ
- เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive spectroscopy, EDS) ใช้ตรวจสอบชนิดและปริมาณส่วนประกอบทางเคมีแต่ละธาตุของเฟสภายในโครงสร้างจุลภาค เพื่อใช้วิเคราะห์ชนิดของสารประกอบและปริมาณธาตุผสม
- เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของธาตุ (Electron Probe Micro Analysis , EPMA) ใช้ศึกษาการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดในโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางชั้นเคลือบ
- เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อตรวจสอบหาชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นภายในชั้นเคลือบ
- เครื่องวัดความแข็ง (Microvicker hardness tester) ใช้ทดสอบความแข็งผิวของชั้นเคลือบ โดยใช้หัวกดเพชรรูปทรงปิรามิดขนาดเล็ก
- เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบไถชนิด Ball-on-disc เพื่อใช้ทดสอบหาการสึกหรอแบบไถของชั้นเคลือบ
- เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว Profilometer ใช้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ภาคตัดขวางของร่องการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยการใช้หัวเข็ม (stylus) ลากผ่านบริเวณที่ทำการทดสอบการสึกหรอ และทำการหาขนาดของร่องการสึกหรอที่เกิดขึ้น

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.2.1 การเตรียมผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430

ตัดชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร จากนั้น บัดกรีแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเข้ากับสายไฟทองแดง และนำไปหล่อเรซินปิดทับผิวชิ้นงานด้านที่มีการ บัดกรียึดติดกับสายไฟทองแดง เพื่อเป็นการทำให้เกิดการชุบเคลือบที่บริเวณด้านเดียวของแผ่นชิ้นงาน โดยที่ก่อนทำการชุบเคลือบผิววัสดุพื้นต้องผ่านขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานให้มีความเรียบและทำความสะอาดผิวให้ปราศจากสิ่งสกปรก โดยการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 ตามด้วยเบอร์ 240 จากนั้น นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมไปแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10%wt ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นนำไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริก 14%wt ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที แล้วล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่น ต่อจากนั้นนำไปชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลสไตรค์

3.2.2 การชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลสไตรค์

เตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์นิกเกิลสไตรค์ ชนิดซัลเฟต โดยมีส่วนผสมดังนี้

- น้ำกลั่น
- นิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 250 กรัม/ลิตร
- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 25 มิลลิลิตร/ลิตร

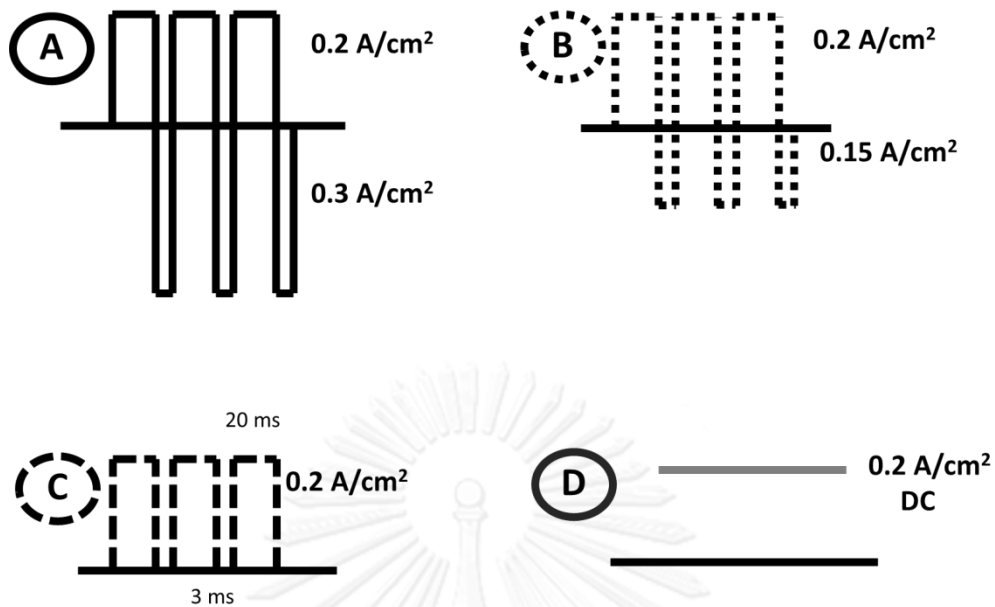
ในการชุบนิกเกิลสไตรค์จะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 0.16 แอมป์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิในอ่างเคลือบ 40 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการชุบ 10 นาที โดยที่หลังจากชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลสไตรค์เสร็จแล้ว ใช้น้ำกลั่นล้างชิ้นงานให้สะอาด และกระตุ้นผิวโดยการจุ่มลงในสารละลายกรดกำมะถัน 10wt% เป็นเวลา 10 วินาที จึงทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.2.3 การชุบเคลือบผิวโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนแบบใช้ไฟฟ้ากระแส reverse pulse

เตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์นิกเกิล-ทั้งสแตน โดยการเตรียมปิกเกอร์ที่ใส่น้ำกลั่น ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และกวนสารละลายตลอดเวลา โดยใช้ แท่งแม่เหล็ก และเติมสารเคมีดังตารางที่ 3.1 โดยการเติมต้องรอให้สารเคมีก่อนหน้าละลายหมดก่อน จึงค่อยเติมตัวต่อไปได้ เพื่อให้สารเคมีละลายได้อย่างสมบูรณ์ และมีการตั้งค่าเครื่องจ่ายกระแสแบบช่วงสลับแบ่งออกเป็น 4 ชุดดังแสดงในภาพที่ 3.1

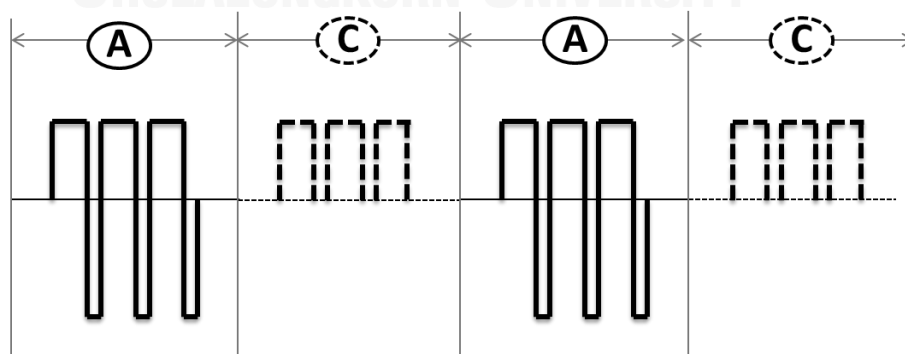
ตารางที่ 3. 1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์นิกเกิลทั้งสแตน

สารเคมี	สูตรเคมี	ปริมาณ (กรัมต่อลิตร)
Sodium citrate dihydrate	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	147
Ammonium chloride	NH_4Cl	26.7
Nickel sulfate hexahydrate	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	15.8
Sodium tungstate dihydrate	$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	46.2
Sodium bromide	NaBr	15.5



ภาพที่ 3. 1 รูปแบบการชุบเคลือบแบบช่วงสลับ โดยมีการปรับค่ากระแสช่วงกลับเพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีต่าง ๆ

ทำการชุบเคลือบโดยใช้สภาวะความหนาแน่นกระแส forward ที่ 0.2 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และใช้ความหนาแน่นกระแส reverse pulse ที่ 0, 0.15, 0.30 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ forward pulse time และ reverse pulse time คือ 20 และ 3 มิลลิวินาทีตามลำดับ ทั้งนี้ ต้องมีการนำค่าความหนาแน่นกระแสที่กำหนดมาคำนวณกับขนาดพื้นที่จริงก่อนทำการชุบเคลือบด้วย และสำหรับการชุบเคลือบแบบหลายชั้น นำรูปแบบลักษณะการจ่ายกระแสไฟตามภาพที่ 3.1 มาใช้ในการออกแบบโดยการเรียงสลับกัน เช่น การชุบเคลือบแบบหลายชั้น A สลับ C ดังภาพที่ 3.2

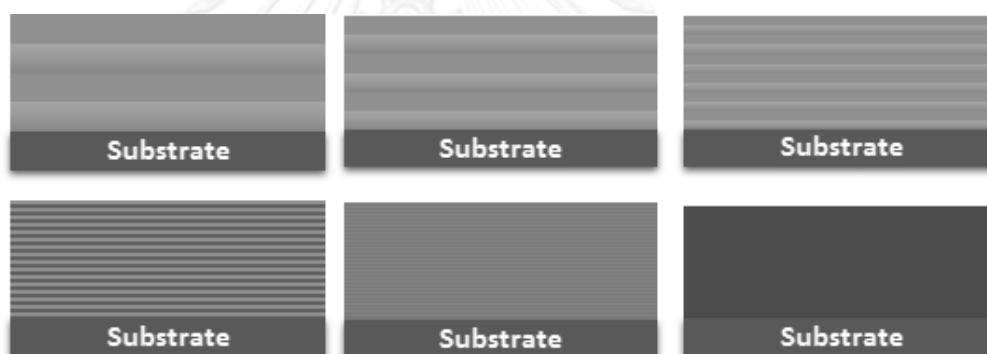


ภาพที่ 3. 2 แบบจำลองลักษณะการสลับรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า A สลับ C

โดยการทดลองในตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

3.2.3.1 กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวเพื่อหาผลกระทบของจำนวนชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน โดยมีความหนารวมคงที่

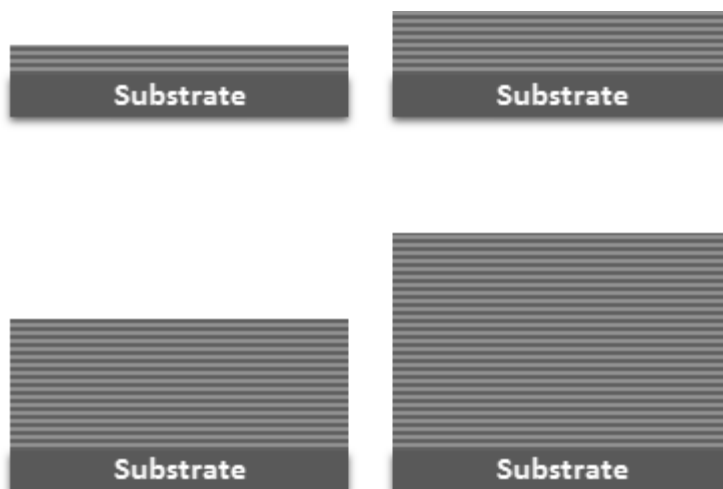
โดยจะใช้การชุบเคลือบสลับชั้นในรูปแบบ A และ C ที่มีการตั้งค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.2 และจะมีการตั้งค่ากำหนดช่วงเวลาในการชุบเคลือบในแต่ละรูปแบบเพื่อสลับชั้นกัน เพื่อให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาชั้นเคลือบย่อยที่แตกต่างกัน คือ 25, 50 , 250, 500, 2500 และ 5000 นาโนเมตร และมีการควบคุมระยะเวลาในการชุบเคลือบรวมที่ 60 นาที เพื่อให้ชิ้นงานทั้งหมดมีความหนารวมอยู่ในระดับเดียวกัน โดยมีตัวอย่างลักษณะการจำลองของชั้นเคลือบ ดังแสดงภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3. 3 การจำลองชั้นเคลือบที่มีความหนารวมเท่ากันแต่มีจำนวนชั้นเคลือบแตกต่างกัน

3.2.3.2 กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวเพื่อหาผลกระทบของความหนารวมของชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน

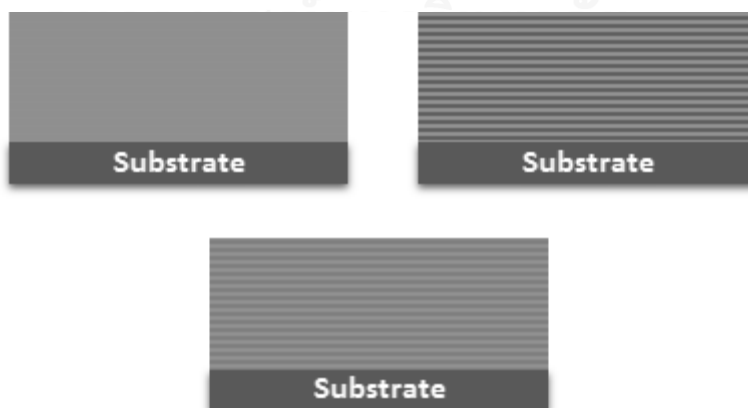
ทำการชุบเคลือบสลับชั้นในรูปแบบ A และ C ที่มีการตั้งค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 3.1 และมีการใช้ระยะเวลาช่วงจังหวะเวลาในการสลับการชุบเคลือบในแต่ละชั้นคงที่เท่ากัน คือประมาณ 50 นาโนเมตร โดยจะมีการใช้ระยะเวลาในการชุบเคลือบทั้งหมดที่แตกต่างกันคือ 15, 30, 60 และ 90 นาที เพื่อให้ได้ความหนารวมของชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีลักษณะแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3. 4 ภาพจำลองชั้นเคลือบที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน แต่มีความหนาแต่ละชั้นเคลือบเท่ากัน

3.2.3.3 กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวเพื่อหาผลกระทบของการสลับชั้นที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน

โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กลุ่มที่มีการสลับของรูปแบบในการชุบที่ต่างกันคือ A-B, A-C และ A-D โดยจะใช้ตัวแปรในการชุบเคลือบโดยการศึกษาที่ระดับความหนาชั้นเคลือบย่อย 50 นาโนเมตร และทำการชุบเคลือบเป็นเวลา 60 นาที ทั้งนี้เนื่องจากได้มีการศึกษาสภาวะการชุบเคลือบมาก่อนหน้านี้ในหัวข้อ 3.2.3.1 และ 3.2.3.2 พบว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษา ทั้งนี้ชั้นเคลือบจะมีลักษณะดังแบบจำลองในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3. 5 การจำลองชั้นเคลือบที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีในระบบที่แตกต่างกัน

3.3 การตรวจสอบชั้นเคลือบ

3.3.1 การตรวจสอบและพิสูจน์โครงสร้างจุลภาค

หลังจากผ่านการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ชิ้นงานต้องผ่านการตรวจสอบขนาดของเกรน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด หาปริมาณธาตุผสมที่อยู่ในชั้นเคลือบด้วยเทคนิค EDS และวัดความหนาชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง โดยทำการตัดแบบขวางด้วยเครื่องตัด Low speed หล่อภายในเรซิน แล้วขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 ถึง 2500 และขัดด้วยผ้าสักหลาด กับผงเพชรขนาด 3 ถึง 1 ไมครอน นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบโครงสร้างของชั้นเคลือบโดยการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุโดยใช้เทคนิค EPMA เพื่อพิสูจน์ปริมาณการกระจายตัวของธาตุ ทั้งสแตนในโครงสร้างชั้นเคลือบแบบหลายชั้น

3.3.3 การตรวจสอบความแข็งผิว

หลังจากผ่านการชุบเคลือบผิวแบบ จะนำชิ้นงานทั้งหมดทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Microvicker hardness tester โดยตั้งค่าน้ำหนักกด (load) 50 กรัม และใช้เวลาในการกดวัดความแข็ง 20 วินาที โดยแต่ละชิ้นงานจะทำการวัด 12 ครั้ง ซึ่งตำแหน่งของการวัดต้องห่างกันอย่างน้อย 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกดเดิม แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.3.3 การตรวจสอบความต้านทานการสึกหรอ

นำมาทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่อง Ball-on-disc ซึ่งบอลทำจากวัสดุ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยควบคุมน้ำหนักกด ความเร็ว ระยะทาง และทดสอบในสถานะที่ไม่มี lubricant ซึ่งการทดสอบสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ใช้แรงกด ในการทดสอบ 5 นิวตัน และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Profilometer เพื่อหาพื้นที่ภาคตัดขวางร่อง การสึกหรอ จากนั้นคำนวณปริมาณการสึกหรอ โดยการหาปริมาตรเนื้อวัสดุที่สูญเสียไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การเตรียมผิวชิ้นงานและการชุบนิกเกิลสไตรค์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 เป็นวัสดุพื้น จึงทำให้บริเวณผิวชิ้นงานมีชั้นฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ตามลักษณะของเหล็กกล้าไร้สนิมทำหน้าที่ในการป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งชั้นฟิล์มนี้เมื่อมีการสลายไปจะสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เองตลอดเวลา ตามลักษณะเฉพาะของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทำให้การชุบเป็นไปได้อย่างดี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการเตรียมผิวชิ้นงานโดยการชุบเคลือบนิกเกิลสไตรค์เป็นชั้นรองพื้น โดยกระบวนการชุบนิกเกิลสไตรค์ จากที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ การชุบนิกเกิลสไตรค์เป็นการชุบไฟฟ้าในสภาวะสารละลายที่เป็นกรด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดชั้นเคลือบของนิกเกิลบางที่บริเวณผิวชิ้นงาน และสามารถสังเกตเห็นชั้นนิกเกิลสไตรค์ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดดังแสดงในภาพที่ 4.2

4.2 การชุบไฟฟ้าโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน

4.2.1 การใช้กระแส reverse pulse ในการชุบไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณของโลหะที่เปลี่ยนแปลงตามการจ่ายค่ากระแสย้อนกลับ โดยทำการชุบเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนและมีการควบคุมการจ่ายค่ากระแสย้อนกลับ เพื่อที่จะให้ได้ชั้นเคลือบที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน อ้างอิงจากงานวิจัยของ Amnuaysak Chianpairot [10] รวมถึง Christopher A. Schuh[12] และ Detor Andrew J[31, 32]. ที่ได้ทำการศึกษาสภาวะการชุบเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนโดยมีการจ่ายค่ากระแสย้อนกลับ

โดยได้เลือกการชุบเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนโดยวิธีการชุบไฟฟ้าที่มีการจ่ายค่ากระแสช่วงสลับ 4 สภาวะ เพื่อให้ได้ชั้นเคลือบของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนที่มีปริมาณค่าทั้งสแตนในชั้นเคลือบแตกต่างกันจากน้อยไปมาก โดยให้เป็นชิ้นงาน A, B C และ D ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายค่ากระแสช่วงสลับ, ปริมาณของธาตุทั้งสแตนในชั้นเคลือบ และขนาดผลึกสัมพัทธ์

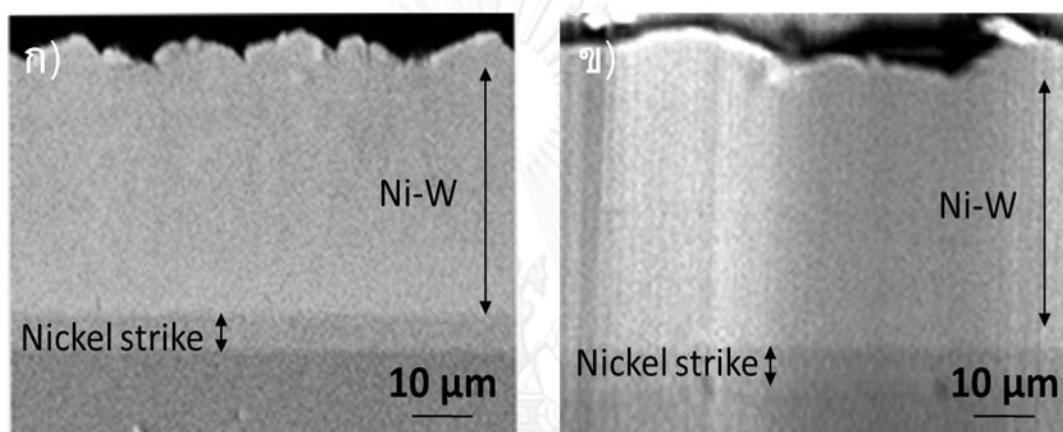
ชิ้นงาน	Forward Pulse		Reverse Pulse		ส่วนประกอบทางเคมี (at% W)	ขนาดผลึกสัมพัทธ์ (nm)
	ความหนาแน่นกระแส (Acm^{-2})	เวลา (ms)	ความหนาแน่นกระแส (Acm^{-2})	เวลา (ms)		
A	0.20	20	0.30	3	6.3	51
B			0.15		8.7	41
C			0.00		13.8	27
D		0	0	0	29.4	5

ในรายงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรเพื่อใช้ในการเป็นตัวแทนวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งมาจากสภาวะการชุบเคลือบที่แตกต่างกันคือ วัสดุ A , วัสดุ B , วัสดุ C และวัสดุ D ดังตารางที่ 4.1 ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการจำแนกและวิเคราะห์ในการเปรียบเทียบการทดลองในขั้นต่อไป



ภาพที่ 4. 1 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานภายหลังการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนผลึกนาโนลงบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม

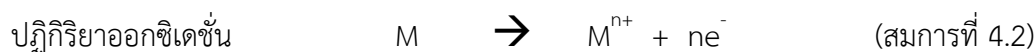
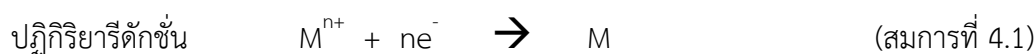
โดยลักษณะชั้นเคลือบภายหลังการชุบไฟฟ้านิกเกิลทั้งสแตนจะมีลักษณะดังภาพที่ 4.1 และจากผลการทดสอบหาโครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของชั้นเคลือบโดยใช้เทคนิค SEM ชิ้นงานที่การชุบเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนแบบแบบใช้ไฟฟ้าจะมีลักษณะภาคตัดขวางชั้นเคลือบดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งจากภาพที่ได้จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM) จะสามารถสังเกตเห็นถึงลักษณะของชั้นเคลือบนิกเกิลสไตรค์และนิกเกิลทั้งสแตน และมีความหนาของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนประมาณ 40 ไมครอน เมื่อทำการชุบเคลือบระยะเวลา 60 นาที



ภาพที่ 4. 2 โครงสร้างภาคตัดขวางของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแส reverse pulse ก) ชิ้นงาน A (Ni-6.3W) ข) ชิ้นงาน C (Ni-13.8W)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุผสมในเชิงปริมาณโดยใช้เทคนิค EDS ผลการทดลองที่ได้มีความสัมพันธ์ของการจ่ายค่ากระแส reverse pulse และปริมาณธาตุทั้งสแตนในชั้นเคลือบ คือ เมื่อมีการจ่ายค่ากระแส reverse pulse มากขึ้น จะส่งผลทำให้ชั้นเคลือบของวัสดุโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนมีปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amnuaysak Chianpairot [10] รวมถึง Timothy J. Rupert [4]

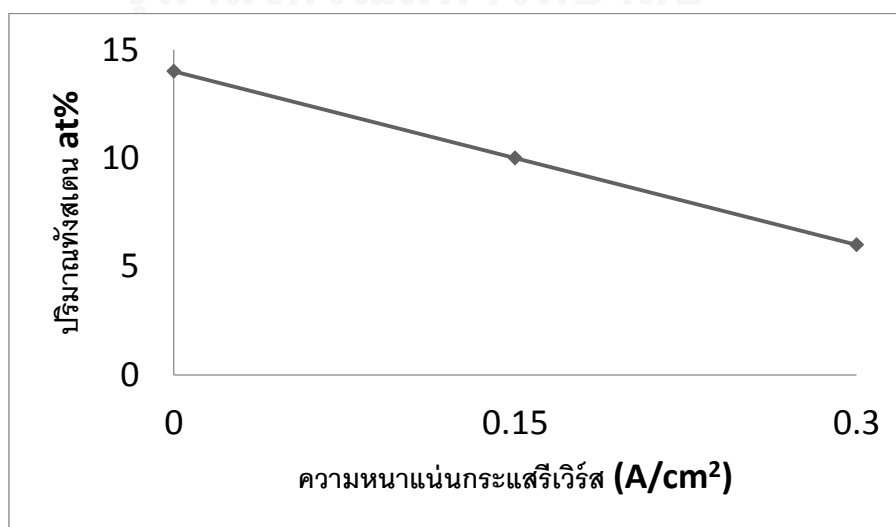
ทั้งนี้ ปริมาณของทั้งสแตนในชั้นเคลือบที่ลดลงเกิดจาก โดยทั่วไปแล้ววิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะมีการต่อขั้วไฟฟ้าให้ชิ้นงานเป็นแคโทด และจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังแสดงในสมการที่ 4.1 โดยไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะไปเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่มีอยู่บริเวณขั้วแคโทด ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นคือไอออนโลหะรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารละลายของแข็งชุบเคลือบที่บริเวณผิวชิ้นงานที่ต่ออยู่กับขั้วแคโทด แต่อย่างไรก็ตาม การจ่ายค่ากระแส reverse pulse จะเป็นการกลับขั้วทำให้ชิ้นงานมีสถานะเป็นขั้วแอโนด ดังนั้นในช่วงนี้ชิ้นงานจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในสมการที่ 4.2 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของการสูญเสียอิเล็กตรอน ทำให้วัสดุมีการสูญเสียเนื้อโลหะนิกเกิลและทั้งสแตนที่มากเคลือบ จากการกร่อนของปฏิกิริยา



ตารางที่ 4. 2 ปฏิกิริยารีดักชันและค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะนิกเกิลและทังสแตน[10]

ปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	-0.257
$WO_4^{2-} + 4H_2O + 6e^- \rightarrow W + 8OH^-$	-1.074

เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าสำหรับวัสดุ นิกเกิล และทังสแตน จากตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานอยู่ที่ -0.257 โวลต์ และ -1.074 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานดังกล่าว พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของทังสแตนมีค่าเป็นน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของนิกเกิล ทำให้นิกเกิลจึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า อีกทั้งการที่ทังสแตนมีค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าทำให้เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีความรุนแรงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amnuaysak Chianpairot [10] รวมถึง Narasak Sanwang [3] ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นกระแส reverse pulse จึงส่งผลทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีปริมาณทังสแตนลดลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส reverse pulse และปริมาณทังสแตนในชั้นเคลือบดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4. 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส reverse pulse และปริมาณທັงสเดนในชั้นเคลือบของวัสดุผสมนิกเกิลທັงสเดนผลึกนาโน

4.2.2 ขนาดเกรน XRD

การเติมธาตุผสม เพื่อทำให้โลหะบริสุทธิ์กลายเป็นโลหะผสม สามารถที่จะช่วยทำให้ขนาดเกรนที่ได้มีขนาดเล็กลงได้ โดยในวัสดุผสมที่มีທັงสเดนเป็นธาตุผสม อ้างอิงจากงานวิจัยของ Amnuaysak Chianpairot [10] รวมถึง Christopher A. Schuh[12] ที่พบว่าปริมาณของธาตุທັงสเดนที่เพิ่มสูงขึ้นในชั้นเคลือบวัสดุโลหะผสมนิกเกิลທັงสเดน ทำให้โครงสร้างที่ได้ของชั้นเคลือบมีขนาดเกรนที่ลดลง เนื่องจาก อะตอมของธาตุທັงสเดนจะเกิดการแยกตัวไปอยู่ที่บริเวณขอบเกรน (grain segregation) [31] และกลไกการแยกตัวที่ขอบเกรนดังกล่าวทำให้การมีธาตุທັงสเดนมากในชั้นเคลือบจะส่งผลทำให้โครงสร้างที่ได้มีขนาดเกรนที่เล็กในระดับนาโนเมตร ผลจากการเติมธาตุທັงสเดนจะทำให้เกิดพลังงานอิสระจากการแยกตัวที่ขอบเกรน และส่งผลทำให้พลังงานรวมของระบบลดน้อยลง ดังสมการที่ 4.3

$$\gamma = \gamma_0 - \Gamma (G_{\text{seg}} + RT \ln X) \quad (\text{สมการที่ 4.3})$$

γ คือ พลังงานขอบเกรน

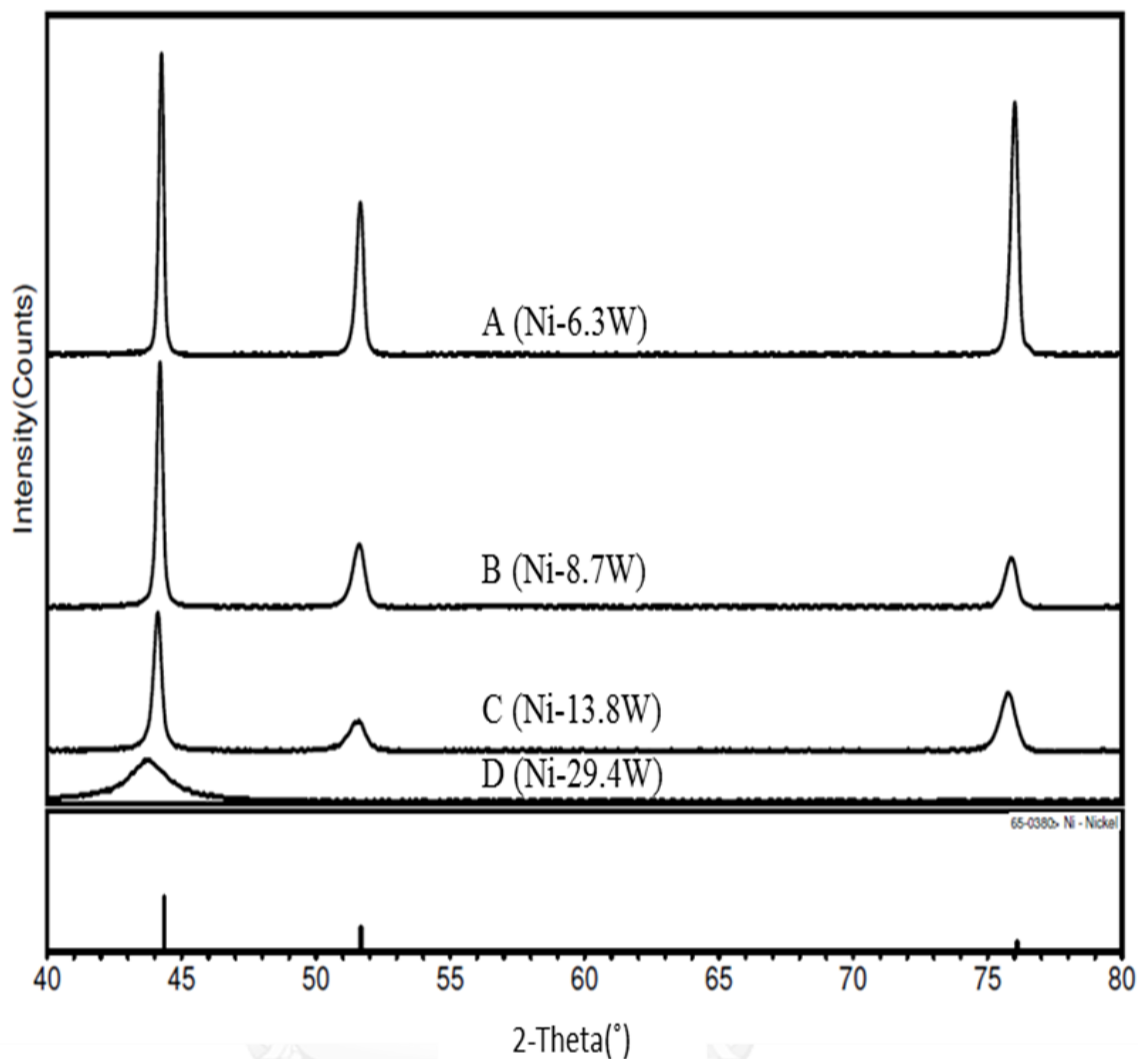
γ_0 คือ ค่าของพลังงานขอบเกรนของวัสดุที่บริสุทธิ์

G_{seg} คือ พลังงานของการแยกตัวของธาตุผสม

Γ คือ ค่าจำเพาะของปริมาณธาตุผสมที่มากเกินไปความสามารถในการละลาย

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิ

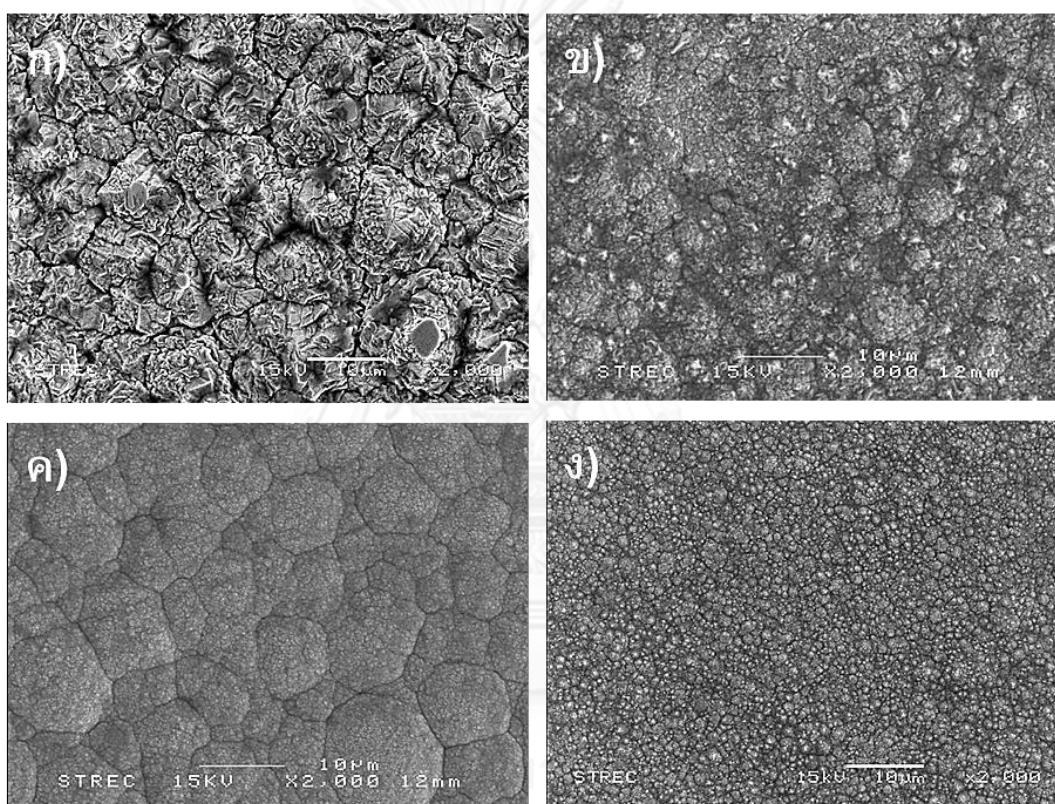


ภาพที่ 4. 4 X-ray diffraction ของวัสดุ निकิลทั้งสแตน ชิ้นงาน A, B, C และ D

และจากผลการทดลองของ X-ray diffraction จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานชั้นเคลือบนิเกิลทั้งสแตนที่มีปริมาณทั้งสแตนที่สูงขึ้นจะทำให้ความสูงของพีคหลักลดต่ำลง ซึ่งจากความสูงของพีคดังกล่าวสามารถที่จะนำไปใช้หาขนาดของผลึกแบบสัมพัทธ์ได้ โดยใช้โปรแกรม JADE ซึ่งผลการทดลองของขนาดผลึกสัมพัทธ์ได้แสดงในตารางที่ 4.1 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบจากเทคนิค EDS จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุทั้งสแตนในชั้นเคลือบและขนาดเกรนดังนี้ คือ การที่ชั้นเคลือบนิเกิลทั้งสแตนมีปริมาณธาตุทั้งสแตนในชั้นเคลือบมากขึ้นจะส่งผลทำให้มีขนาดเกรนที่เล็กลง อีกทั้งพีค X-ray diffraction ที่ได้ยังมีลักษณะที่เอนเอียงมาทางด้านซ้ายมือเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของธาตุทั้งสแตน แสดงถึงการมีธาตุทั้งสแตนเข้าไปแทรกอยู่ในระนาบผลึกทำให้โครงสร้างเกิดการขยายขนาด เนื่องจากขนาดอะตอมของธาตุทั้งสแตนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอะตอมของนิเกิล

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนในชิ้นงานต่าง ๆ ที่มีปริมาณธาตุทั้งสแตนแตกต่างกัน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเพิ่มปริมาณธาตุทั้งสแตนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) เพื่อหาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นผิวชั้นเคลือบ โดยในภาพที่ 4.5 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนที่ได้จากการใช้เทคนิค SEM



ภาพที่ 4. 5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนผลิตภัณฑ์ ก) ชิ้นงาน A ข) ชิ้นงาน B ค) ชิ้นงาน C ง) ชิ้นงาน D

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างที่ได้ในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนของเกรน ที่เรียกว่าโนดูล โดยพบว่าชิ้นงาน A ที่มีปริมาณทั้งสแตนต่ำกว่าในชั้นเคลือบจะส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะของโนดูลที่หยาบกว่า ชิ้นงาน B, C และ D ที่มีปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบสูงกว่า ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการแยกตัวที่ขอบเกรนของธาตุทั้งสแตน และผลการทดลองขนาดผลึกสัมพัทธ์ดังตารางที่ 4.1

4.2.4 ค่าความแข็งผิว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความแข็งผิวของชิ้นงานโดยใช้เทคนิค ไมโครวิกเกอร์ (Microvicker hardness) รุ่น Mitutoyo hardness testing machine ใช้น้ำหนักกด 50 g และทำการกด 12 ครั้งเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งผิว ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4. 3 ผลการทดลองความแข็งผิวของชิ้นเคลือบนิเกิลทั้งสแตนประเภทชิ้นเคลือบเดี่ยว

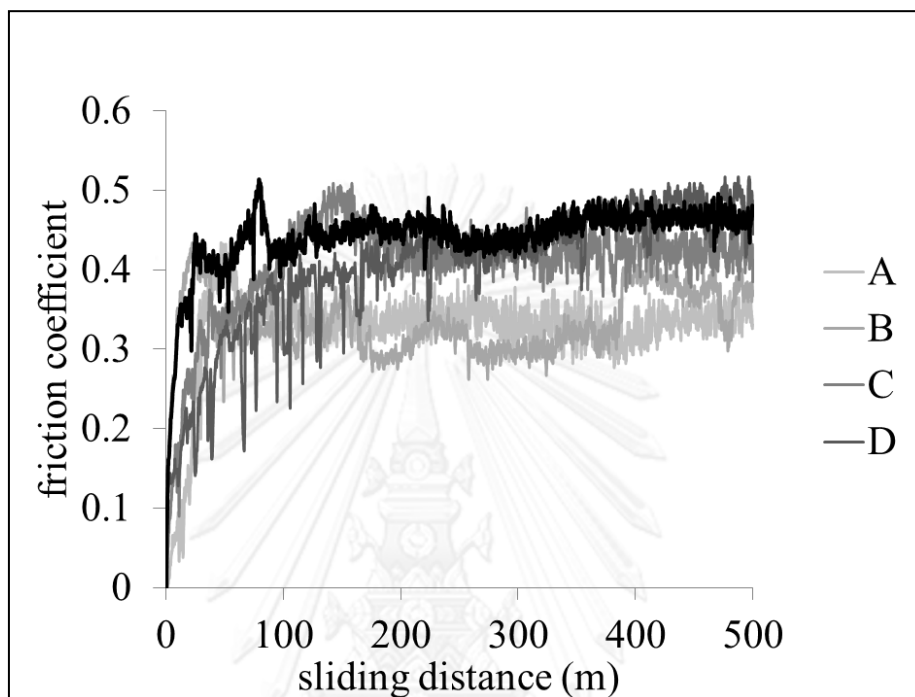
ชื่อชิ้นงาน	ค่าความแข็งผิวเฉลี่ย(GPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
A (Ni-6.3W)	3.48	0.40
B (Ni-8.7W)	5.08	0.33
C (Ni-13.8W)	6.77	0.15
D (Ni-29.4W)	7.10	0.51

จากผลการทดลองค่าความแข็งผิวของชิ้นเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนในชิ้นเคลือบที่ต่างกันพบว่า การที่ชิ้นเคลือบมีปริมาณธาตุทั้งสแตนมากขึ้นจะส่งผลทำให้ชิ้นเคลือบมีค่าความแข็งผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีธาตุผสมในชิ้นเคลือบจะส่งผลทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีขนาดเกรนที่ลดลง ตามกลไกการแยกตัวตามขอบเกรน (grain segregation) ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.4 และผลจากการที่วัสดุที่มีขนาดเกรนเล็กกว่าจะมีค่าความแข็งแรงที่มากกว่า ซึ่งอธิบายได้ตามความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ที่ว่าความแข็งผิวจะมีค่าแปรผกผันกับขนาดเกรน ดังสมการที่ 2.4 $H = H_0 + K_H d^{-1/2}$ สอดคล้องกับหลักการของโลหะเกรนละเอียด (grain refinement) ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุโลหะอันเนื่องมาจากการที่มีขนาดเกรนที่เล็ก

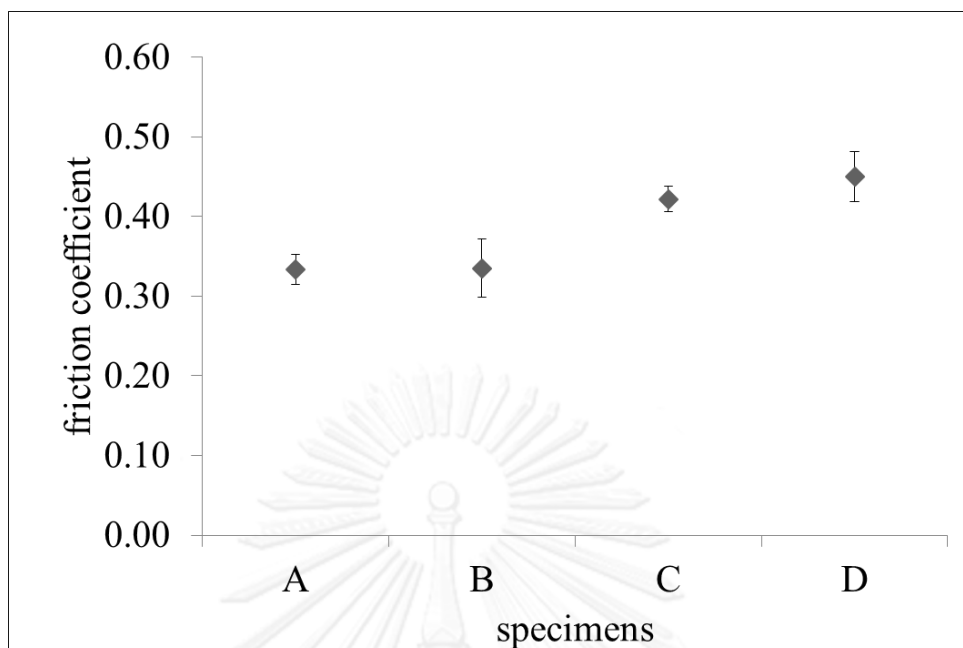
4.2.5 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นเคลือบ ได้จากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นเคลือบโดยวิธี ball-on-disc โดยการใช้โปรแกรม Plint ในการตรวจสอบ ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.6 และจากผลการทดลองดังภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นเคลือบในตอนเริ่มต้นจะมีค่าน้อยและจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนค่อนข้างคงที่ ดังนั้นเพื่อการนำค่ามาใช้ในการเปรียบเทียบ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย โดยเลือกในช่วง 200-500 เมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีความเสถียร ได้ผลการคำนวณดังภาพที่ 4.7 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานชิ้นเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนในชิ้นเคลือบที่สูงขึ้น จะ

ส่งผลทำให้ชั้นเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยที่สูงขึ้นด้วย แสดงถึงการที่ชั้นเคลือบมีปริมาณธาตุทั้งสแตนสูงและมีขนาดเกรนละเอียดจะทำให้มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงขึ้นด้วย



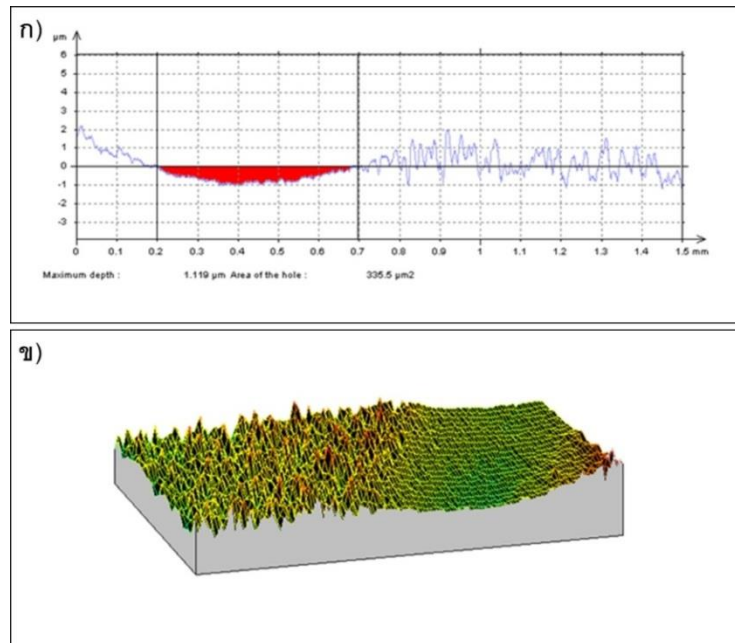
ภาพที่ 4. 6 กราฟแสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงานชั้นเคลือบเดี่ยวชนิดทุกสแตน



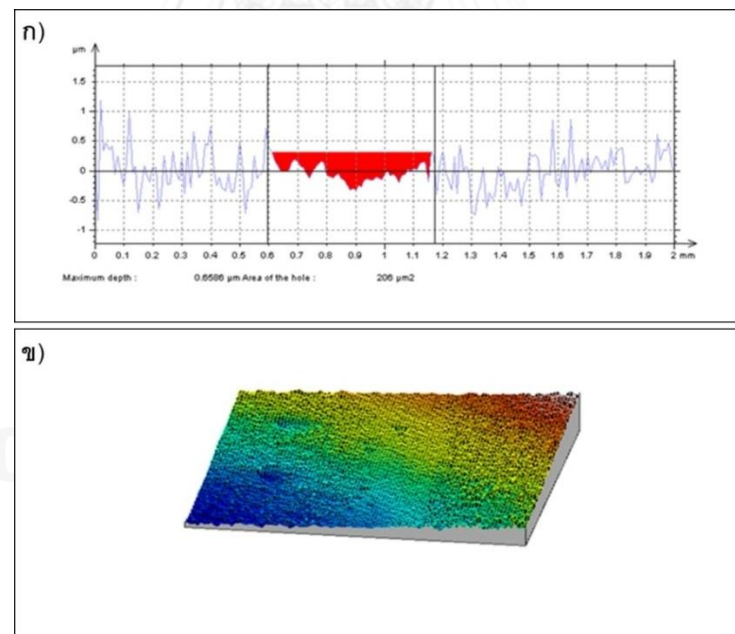
ภาพที่ 4. 7 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยของชิ้นงานกลุ่มชั้นเคลือบเดี่ยวชนิดกึ่งเคลือบทั้งสแตน

4.2.6 ค่าความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ

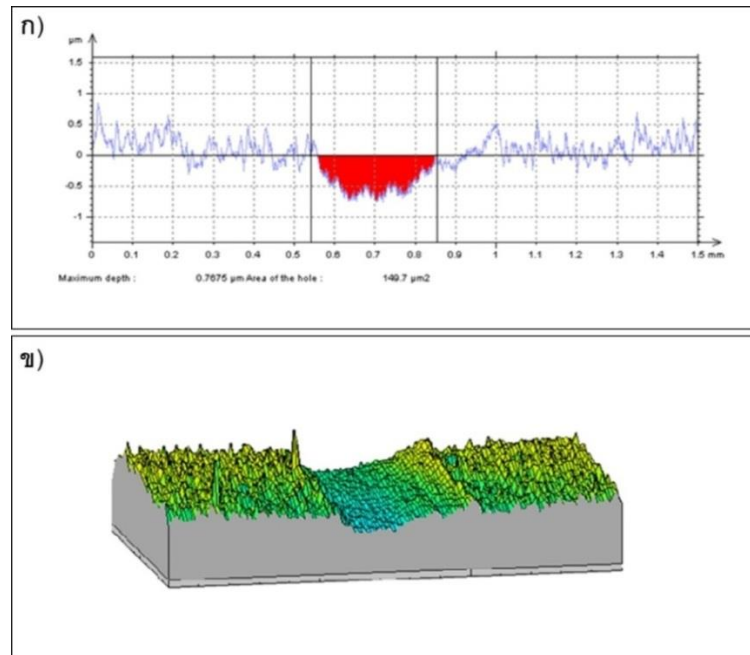
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบโดยการทดลองด้วยเทคนิค ball-on-disc โดยในการทดสอบจะใช้ลูกบอลที่ทำมาจากวัสดุ ทังสแตนคาร์ไบด์ (WC) ในสถานะที่ไม่มีสารหล่อลื่น โดยภายหลังการทดสอบการสึกหรอแบบ ball-on-disc จะได้ชิ้นงานที่มีร่องรอยการสึกหรอลักษณะวงแหวน และนำไปตรวจสอบโดยใช้เครื่องทดสอบพื้นผิว Profilometer จะสามารถหาได้ถึงลักษณะภาคตัดขวางของร่องการสึกหรอทั้งแบบสามมิติ และสองมิติ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 -4.11



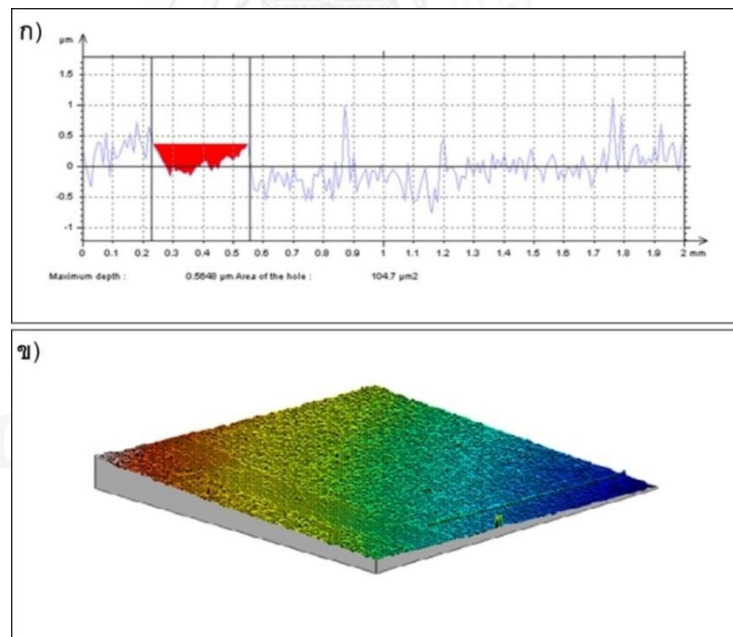
ภาพที่ 4. 8 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ A (Ni-6.3W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 9 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ B (Ni-8.7W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 10 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ C (Ni-13.8W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 11 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ D (Ni-29.4W) ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ

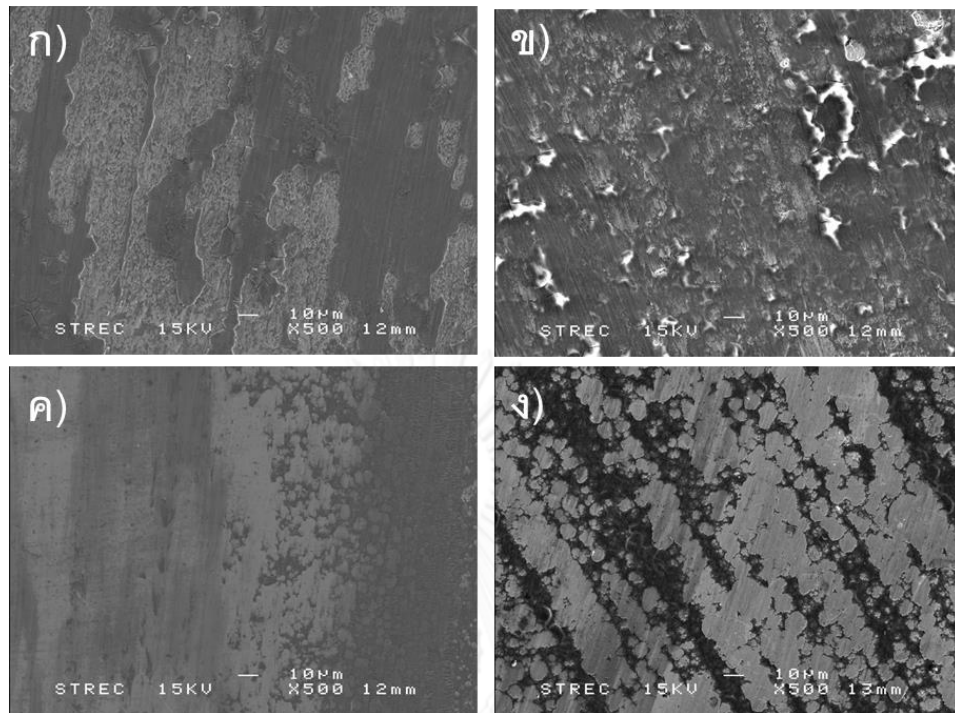
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 – 4.11 สามารถนำรูปแบบของพื้นที่ภาคตัดขวางร่องการสึกหรอแบบ 2 มิติ ที่ได้จากเครื่อง profilometer มาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาตรการสึกหรอ และได้ผลการทดลองปริมาตรการสึกหรอ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4. 4 ผลปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน

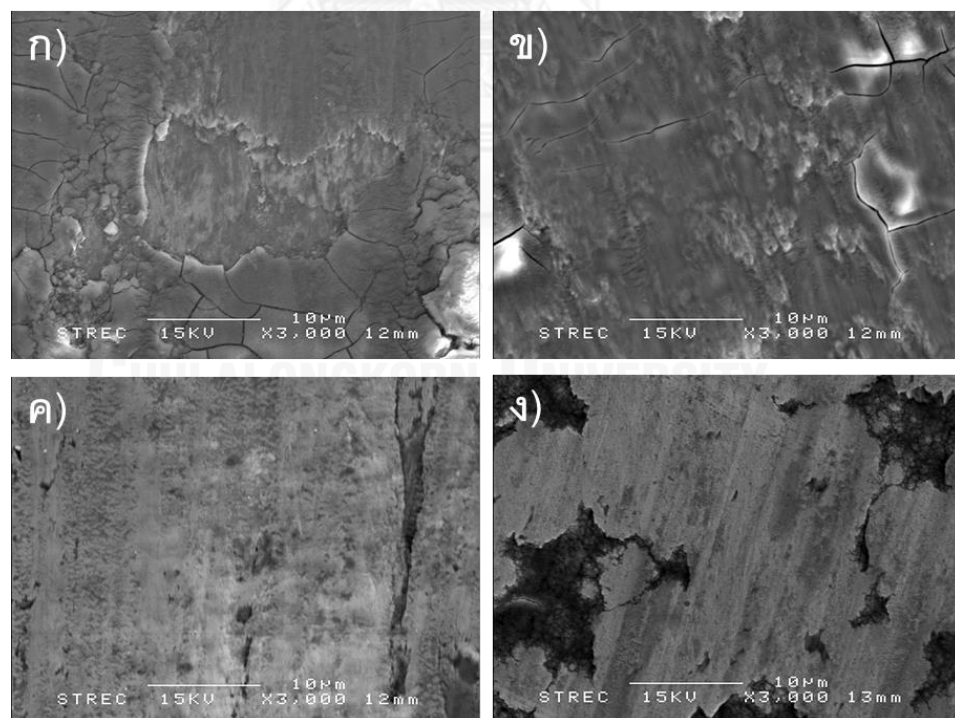
วัสดุ	ปริมาตรการสึกหรอ ($\times 10^6 \mu\text{m}^3$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\times 10^6 \mu\text{m}^3$)
A	10.02	1.39
B	6.85	1.32
C	4.96	1.48
D	3.38	0.51

จากการทดสอบปริมาตรการสึกหรอที่ได้จากเทคนิค ball-on-disc ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ชั้นงานที่มีปริมาณธาตุทั้งสแตนสูงจะส่งผลทำให้ปริมาตรการสึกหรอลดลง ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ Archard ในสมการที่ 2.4 ที่ว่า ความแข็งผิวส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขีดสีของวัสดุ จะเห็นได้จากชั้นงานที่มีขนาดเกรนเล็กและมีค่าความแข็งผิวที่สูงจะมีปริมาตรการสึกหรอที่ต่ำกว่าชั้นงานที่มีขนาดเกรนใหญ่และมีค่าความแข็งผิวดำ

นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.5 พบความสัมพันธ์ดังนี้คือ การที่ชั้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงจะทำให้ชั้นงานมีการสึกหรอที่มากกว่า ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาโครงสร้างจุลภาคภายในร่องการสึกหรอโดยใช้เทคนิค SEM ที่จะแสดงหลักฐานเชื่อมโยงไปถึงกลไกในการเกิดการสึกหรอจากเทคนิค ball on disc โดยจากผลการทดลองของโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากพื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่กำลังขยาย 500 เท่า และกำลังขยาย 3000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



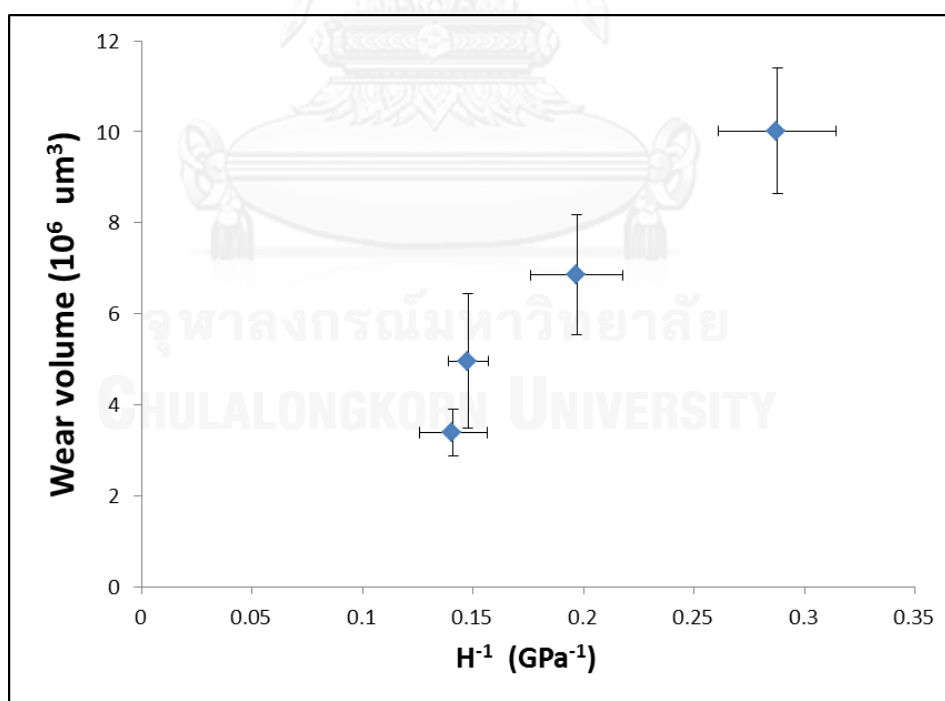
ภาพที่ 4. 12 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่กำลังขยาย 500 เท่า ก) ชิ้นงาน A
ข) ชิ้นงาน B ค) ชิ้นงาน C ง) ชิ้นงาน D



ภาพที่ 4. 13 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่กำลังขยาย 3000 เท่า ก) ชิ้นงาน A
ข) ชิ้นงาน B ค) ชิ้นงาน C ง) ชิ้นงาน D

จากผลการทดลองโครงสร้างจุลภาคของร่องการสึกหรอที่เกิดขึ้น ในภาพที่ 4.12 และ 4.13 สามารถที่จะสังเกตเห็นถึงทิศทางของการขีดสีในทุกชิ้นงานคือ A, B, C, และ D ที่เป็นหลักฐานแสดงถึงกลไกของการสึกหรอแบบขัดสี (abrasive wear) อีกทั้งยังสามารถสังเกตเห็นทรานสเฟอร์ฟิล์ม (transfer film) ที่มีลักษณะเป็นริ้วที่เกิดจากการที่เนื้อวัสดุหลุดออกและถูกบดขยี้และเกาะติด ตามลักษณะของกลไกการสึกหรอแบบเกาะติด (adhesive wear) โดยทรานสเฟอร์ฟิล์มจะมีส่วนประกอบทางเคมีคือ นิกเกิลออกไซด์ และนิกเกิลทั้งสแตน[3] ทำให้สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่าการทดสอบการสึกหรอแบบ ball-on-disc ซึ่งเป็นการสึกหรอแบบไถล กับวัสดุชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน จะประกอบไปด้วยกลไกการสึกหรอแบบขัดสีและกลไกการสึกหรอแบบเกาะติด และจากการพิจารณาจากลักษณะของโครงสร้างภายในร่องการสึกหรอที่กำลังขยายสูง ดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่มีปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบแตกต่างกันของวัสดุ A, B, C, และ D มาเปรียบเทียบกับกัน ชิ้นงาน A ในรูปที่ 4.13ก จะมีการสึกหรอที่รุนแรงมากที่สุด สังเกตได้จากรอยแตกและความสม่ำเสมอภายในโครงสร้างจุลภาคร่องการสึกหรอ และความรุนแรงของการสึกหรอจะลดน้อยลงลงเมื่อมีปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของค่าปริมาตรการสึกหรอในตารางที่ 4.4

นอกจากนี้เมื่อนำผลของปริมาตรการสึกหรอที่ได้จากเทคนิค ball-on-disc ไปหาความสัมพันธ์กับผลการทดลองค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.4 ได้ความสัมพันธ์ดังกราฟในภาพที่ 4.14 ดังความสัมพันธ์ของ Archard ในสมการที่ 2.4



ภาพที่ 4. 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของค่าความแข็งผิวและปริมาตรการสึกหรอ ของชิ้นงานชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตน

จากกราฟดังภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล ทั้งสแตนผลึกนาโน ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นเคลือบมีความแข็งผิวที่ลดลง สอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ Archard ผ่านกลไกการสึกหรอแบบเกาะติดและแบบขั้ดสี

4.3 การชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. การชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน โดยมีการควบคุมความหนาโดยรวมให้เท่ากัน
2. การชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีที่ต่างกัน โดยมีการควบคุมให้มีจำนวนชั้นเคลือบ ความหนาของแต่ละชั้นเคลือบ และความหนาโดยรวมให้เท่ากัน

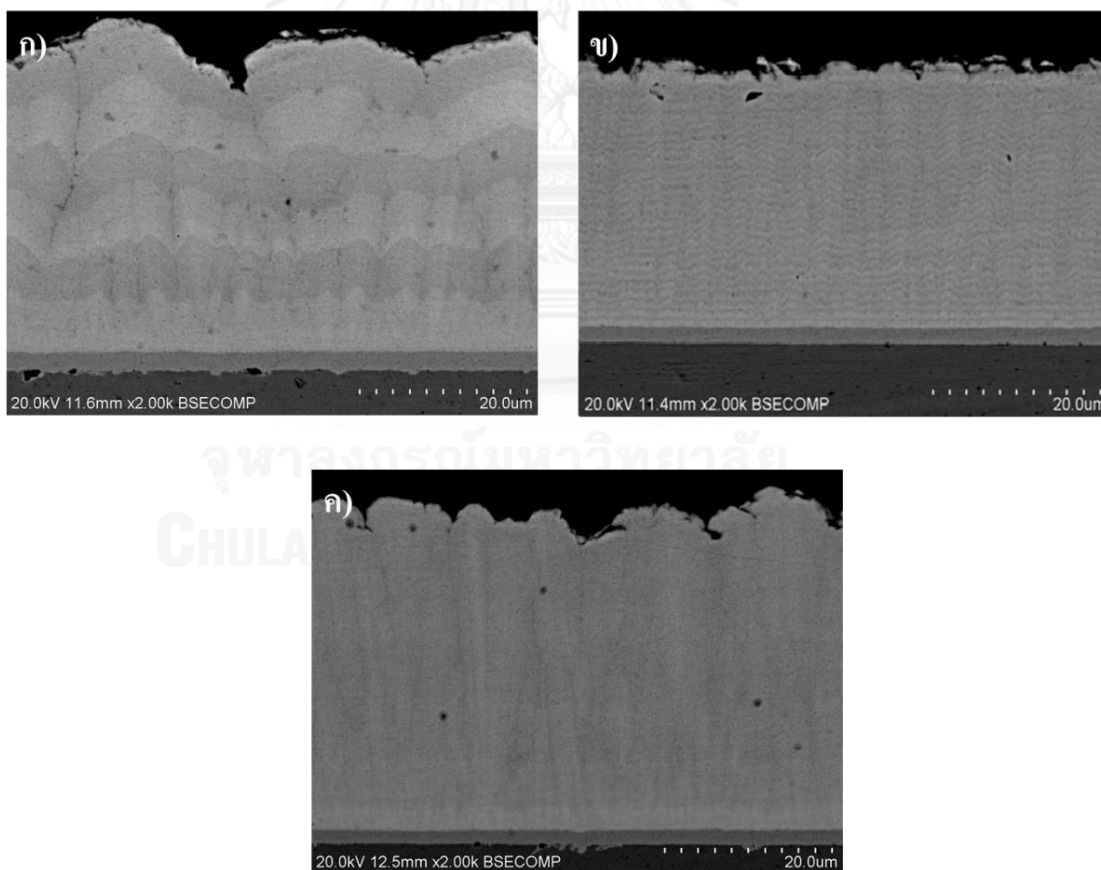
เพื่อป้องกันการสับสนในการเรียกชื่อชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งชื่อชิ้นงาน การชุบแบบหลายชั้นใน 3 ระบบ โดยในแต่ละระบบนั้นจะทำการชุบชิ้นงานที่ระยะเวลารวมเท่ากัน เพื่อให้ได้ความหนารวมเท่ากัน ดังนี้คือ ชิ้นงานในกลุ่ม AB-xx เป็นการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุ A สลับ B ,AC-xx เป็นการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุ A สลับ C และ AD-xx เป็นการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุ A สลับ D โดยที่ xx ที่กำกับท้ายชื่อแสดงถึงตัวเลขของค่าความหนาของชั้นเคลือบย่อย (individual layer thickness) ในหน่วยของนาโนเมตร

ตารางที่ 4. 5 ชั้นงานการชุบเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมี และตัวแปรต่าง ๆ

ชื่อชิ้นงาน	ความหนาชั้นเคลือบย่อย (นาโนเมตร)	การสลับสัญญาณ	ระยะเวลาของแต่ละชั้น (นาที)	จำนวนชั้นเคลือบย่อย
AB-5000	5000	A สลับ B	10	6
AB-2500	2500		5	12
AB-500	500		1	60
AB-250	250		0.5	120
AB-50	50		0.1	600
AB-25	25		0.05	1200
AC-5000	5000	A สลับ C	10	6
AC-2500	2500		5	12
AC-500	500		1	60
AC-250	250		0.5	120
AC-50	50		0.1	600
AC-25	25		0.05	1200
AD-5000	5000	A สลับ D	10	6
AD-2500	2500		5	12
AD-500	500		1	60
AD-250	250		0.5	120
AD-50	50		0.1	600
AD-25	25		0.05	1200

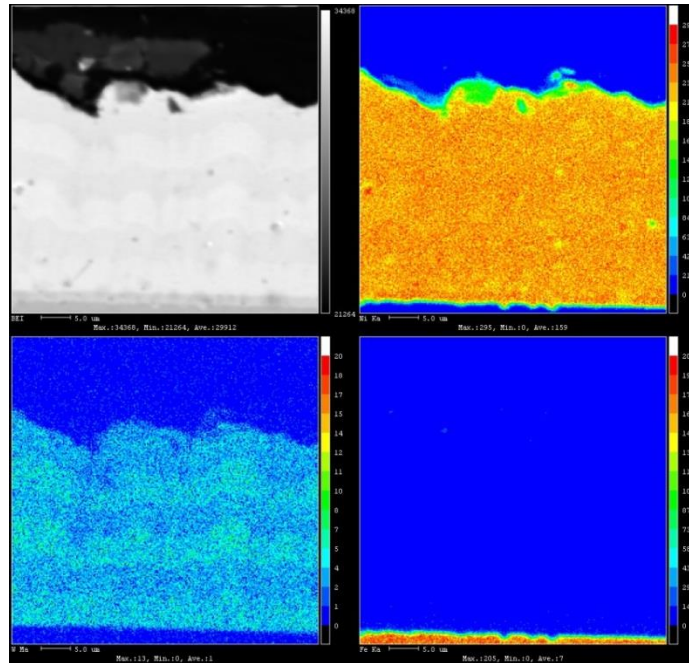
4.3.1 โครงสร้างที่ได้จากการชุบเคลือบแบบหลายชั้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาโครงสร้างตัดขวางของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่ได้จากการชุบโดยวิธีการชุบไฟฟ้าที่มีการใช้กระแส reverse pulse โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทั้งนี้ เพื่อที่จะเป็นการพิสูจน์ว่าการปรับค่ากระแสไฟฟ้าจากการชุบเคลือบโดยการชุบไฟฟ้าสามารถที่จะได้โครงสร้างของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น โดยจะนำชิ้นงาน AC-5000, AC-500 และ AC-50 เป็นตัวแทนของชิ้นงานทั้งหมดในการพิสูจน์หาโครงสร้างภาคตัดขวางของชิ้นงาน ได้ผลการทดลองดังปรากฏในภาพที่ 4.15 เมื่อพิจารณาภาพ 4.15ก จากภาพ จะเห็นได้ว่าเป็นไปได้ที่จะสังเกตความเป็นชั้นของโครงสร้างได้อย่างชัดเจน และปรากฏเป็นจำนวน 6 ชั้น สอดคล้องกับการทดลองที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ และโครงสร้างของชิ้นงาน AC-60 ที่มีจำนวนชั้นเคลือบ 60 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15ข จะปรากฏลักษณะของริ้วแนวขวางของชั้นเคลือบที่แสดงว่าโครงสร้างที่ได้มีหลายชั้นซ้อนทับกันไปมาในแนวขวางสอดคล้องกับการออกแบบการทดลอง และในชิ้นงาน AC-600 ที่มีจำนวนชั้นเคลือบ 600 ชั้น จากผลการทดลองภาพที่ 4.15ค จะเห็นได้ว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะสังเกตเห็นริ้ว ๆ ที่แสดงถึงรอยต่อของแต่ละชั้นเคลือบย่อยได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีความละเอียดไม่เพียงพอในการตรวจสอบ

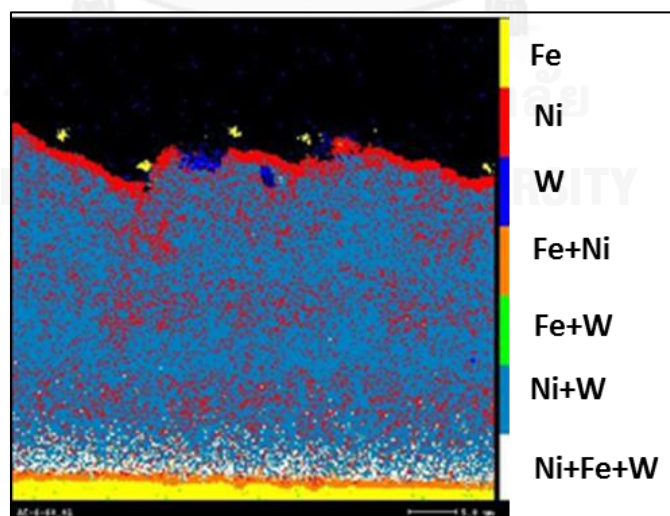


ภาพที่ 4. 15 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางที่ได้จากการชุบชิ้นงานแบบหลายชั้น ก) ชิ้นงาน AC-5000, ข) ชิ้นงาน AC-500, ค) ชิ้นงาน AC-50

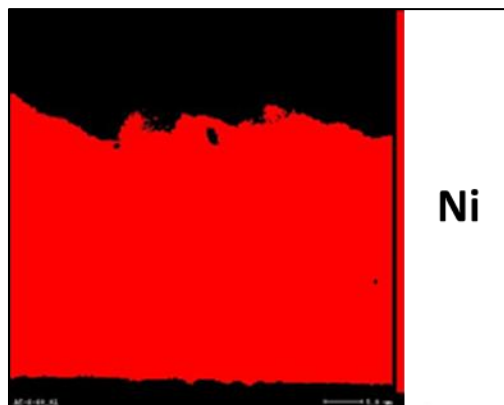
และนอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการใช้เทคนิค EPMA (electron probe micro analyzer) เพื่อช่วยในการพิสูจน์โครงสร้างแบบหลายชั้นที่ผ่านซุบเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมี โดยจากเทคนิคดังกล่าว จะทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้าง แสดงออกมาในรูปแบบของความหนาแน่นของเม็ดสี ดังแสดงในภาพที่ 4.16 – 4.20



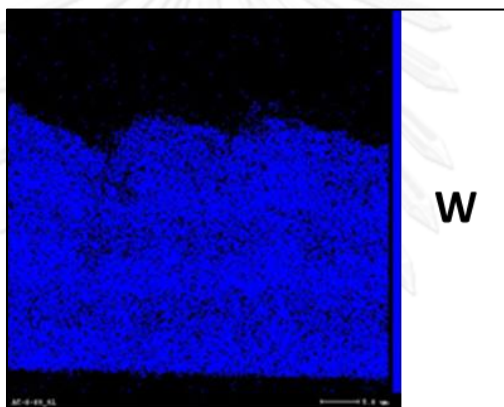
ภาพที่ 4. 16 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000



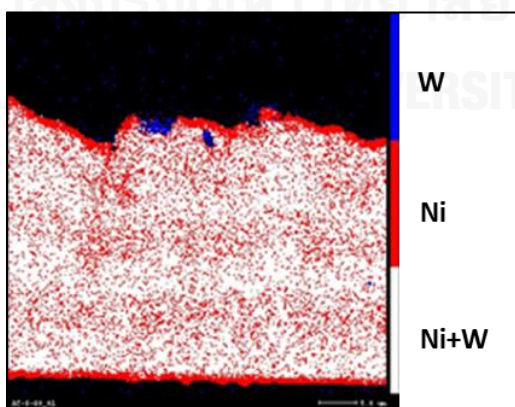
ภาพที่ 4. 17 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดที่ได้จากเทคนิค EPMA แบบรวมของชิ้นงาน AC-5000



ภาพที่ 4. 18 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนิกเกิล ที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000



ภาพที่ 4. 19 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุทังสเตน ที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000

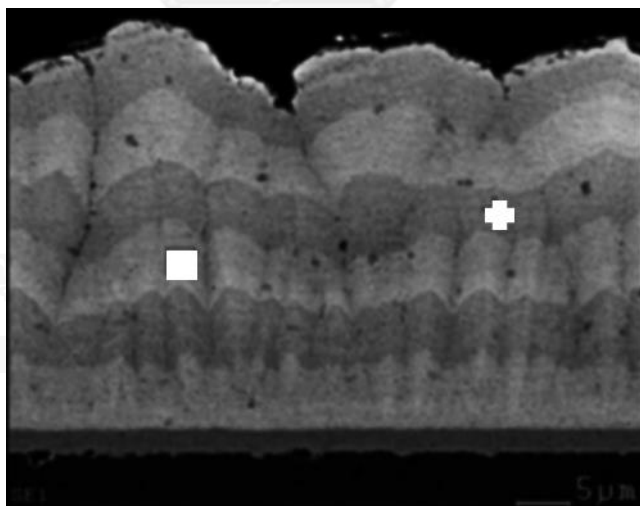


ภาพที่ 4. 20 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนิกเกิล ทังสเตน และนิกเกิลทังสเตน ที่ได้จากเทคนิค EPMA ของชิ้นงาน AC-5000

จากผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค EPMA ทำให้สามารถยืนยันให้ทราบได้ว่าชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้น AC-5000 ที่มีความหนาของชั้นเคลือบย่อยประมาณ 5 ไมครอน สามารถที่จะมีโครงสร้างแบบสลับชั้นของวัสดุ A และวัสดุ C ซึ่งมีปริมาณและการกระจายตัวของธาตุทั้งสแตนท์ที่ต่างกัน โดยจะเห็นได้ชัดเจน ดังภาพที่ 4.19 อีกทั้งยังสามารถที่จะระบุได้ว่าบริเวณใดของชั้นเคลือบที่จะประกอบไปด้วยธาตุนิกเกิล และวัสดุพื้นที่ประกอบไปด้วยธาตุเหล็ก

4.3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น

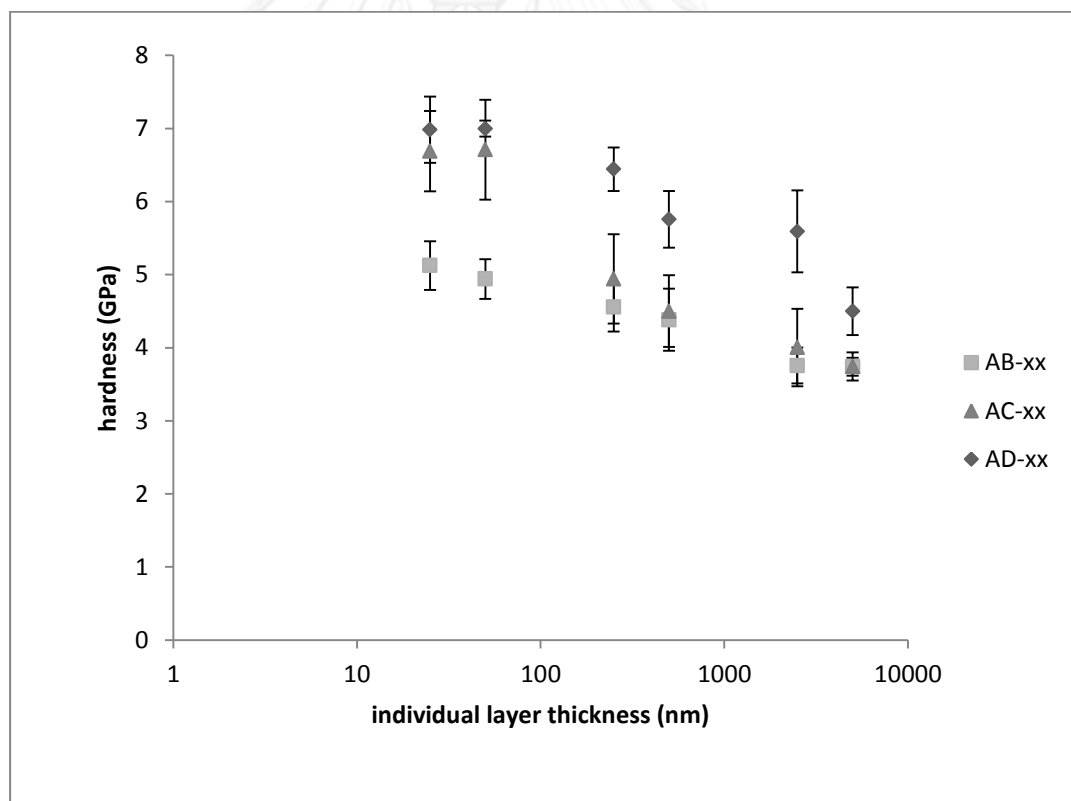
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าของส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้น โดยจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างภาคตัดขวางของชิ้นงาน AC-5000 เพื่อเป็นตัวแทนในการหาส่วนประกอบทางเคมี เนื่องจากสามารถสังเกตและแยกชั้นเคลือบย่อยได้ง่าย โดยใช้เทคนิค EDS วิเคราะห์ที่โครงสร้างภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ ดังแสดงในภาพที่ 4.21 ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ ชั้นเคลือบย่อยสีเข้มดังแสดงโดยเครื่องหมายบวกในภาพที่ 4.21 มีส่วนประกอบทางเคมีคือ Ni-7.0W และชั้นเคลือบย่อยที่มีสีอ่อนดังแสดงโดยเครื่องหมายสี่เหลี่ยมในภาพที่ 4.21 มีส่วนประกอบทางเคมีคือ Ni-11.3W ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการออกแบบการชุบเคลือบที่กำหนดไว้โดยใช้วัสดุ A และ C ที่มีส่วนประกอบทางเคมีคือ Ni-6.3W และ Ni-13.8W ตามลำดับ พบว่ามีความแตกต่างกับที่ได้ออกแบบไว้ 20-22% ทั้งนี้จึงสามารถที่จะพิสูจน์ให้เห็นได้ว่า ชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่ได้จากงานวิจัยนี้มีการสลับของส่วนประกอบทางเคมีตามที่ได้มีการออกแบบไว้



ภาพที่ 4. 21 ภาพลักษณะการหาส่วนประกอบทางเคมีในโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้น AC-5000 โดยเครื่องหมายสี่เหลี่ยมแสดงตำแหน่งชั้นเคลือบย่อย C และเครื่องหมายบวกแสดงตำแหน่งชั้นเคลือบย่อย A

4.4 ความแข็งผิวของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น โดยได้ทำการเลือกวัสดุที่จะนำมาชุบเคลือบทั้งหมด 3 ระบบคือ AB-xx เป็นการชุบเคลือบวัสดุ A สลับวัสดุ B ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ , AC-xx เป็นการชุบเคลือบวัสดุ A สลับวัสดุ C ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ และ AD-xx เป็นการชุบเคลือบวัสดุ A สลับวัสดุ D ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ (ตัวเลข xx แสดงถึงความหนาของชั้นเคลือบย่อย) ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นงานทั้งหมดดังตารางที่ 4.6 โดยควบคุมระยะเวลาในการชุบเคลือบที่ 60 นาที โดยจากระยะเวลาดังกล่าวจะทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาทั้งหมดประมาณ 30 ไมครอน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความแข็งผิวของชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Microvicker hardness รุ่น Mitutoyo hardness testing machine ใช้น้ำหนักกด 50 g และทำการกด 12 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งผิว สภาวะเดียวกับการทดสอบความแข็งผิวในระบบชั้นเคลือบเดี่ยว ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 และได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวและความหนาชั้นเคลือบย่อยดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4. 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบย่อย และค่าความแข็งผิวของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้น

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงและความหนาของชั้นเคลือบย่อย พบว่า เมื่อชั้นเคลือบย่อยมีความหนาลดลง จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของชั้นเคลือบเพิ่มสูงขึ้น[33] โดยจะเกิดทั้งในระบบ AB-xx, AC-xx และ AD-xx ทั้งนี้สามารถอธิบายได้โดย การที่ชั้นเคลือบย่อยมีความหนาในระดับนาโนเมตร โครงสร้างแบบสลับชั้นที่ภายในจะประกอบไปด้วยรอยต่อของแต่ละชั้นเคลือบมากมาย รอยต่อเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในการเคลื่อนที่ข้ามชั้นเคลือบ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุชั้นเคลือบ โดยอ้างอิงจากหลักการของการชุบเคลือบแบบหลายชั้น [29, 30, 33, 34] กล่าวคือ ความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้น เกี่ยวข้องกับ ความไม่เข้ากันของค่ามอดูลัส และความไม่เข้ากันของค่าตัวแปรผลึก ระหว่างชั้นเคลือบย่อยที่อยู่ติดกัน โดยที่ความไม่เข้ากันของค่ามอดูลัสจะทำให้เกิดรอยต่อของชั้นเคลือบ อีกทั้งความไม่เข้ากันของตัวแปรผลึกจะทำให้เกิดความเค้นที่จะช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลการสลับส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง พบว่า ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยเท่ากันที่ ความแข็งแรงของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบ AD จะมีค่าสูงกว่าระบบ AC และ AB ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ D เป็นวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็กและมีค่าความแข็งแรงที่สูง เมื่อนำมาใช้ในการสลับให้เป็นโครงสร้างแบบหลายชั้นจึงทำให้ได้ความแข็งแรงของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่สูง ในทางตรงกันข้ามกับในระบบ AB ซึ่งประกอบไปด้วยเกรนขนาดใหญ่นำมาสลับกัน จึงทำให้ค่าความแข็งแรงของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบ AB มีค่าน้อย

นอกจากนี้จากการที่ในระบบ AD ยังมีปริมาณทั้งสแตนเลสสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ AC และ AB จึงทำให้ชิ้นงานในระบบ AD มีค่าความแข็งแรงที่สูง ผ่านกลไกของสารละลายของแข็งที่เด่นชัดกว่าในระบบที่มีปริมาณของทั้งสแตนเลสน้อยกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Timothy J. Rupert และ C.A. Schuh [4] ที่พบว่า ที่ขนาดเกรนเท่ากัน ชิ้นงานที่มีปริมาณทั้งสแตนเลสสูงจะมีค่าความแข็งแรงที่ดีกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณทั้งสแตนเลสต่ำอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ดี พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ทำการชุบเคลือบแบบหลายชั้นมีค่าความแข็งแรงที่มากกว่าความแข็งแรงของชั้นเคลือบวัสดุทั้งสแตนเลสต่ำที่เลือกนำมาสลับชุบเคลือบ แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงของชั้นเคลือบวัสดุทั้งสแตนเลสสูงที่เลือกนำมาสลับชุบเคลือบ เมื่อพิจารณาหลักการของวัสดุคอมโพสิทที่ประกอบไปด้วยวัสดุสองชนิดผสมกัน มีหลักการของกฎการผสม ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการหาค่าความแข็งแรงโดยใช้กฎการผสม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของค่าความแข็งแรงในชั้นเคลือบที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น โดยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงตามกฎการผสมดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4. 6 ผลการทดลองค่าความแข็งผิวของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของนิกเกิลทั้งสแตน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งผิว

กลุ่มชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน	ค่าความแข็งผิว (GPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
AB-xx	AB-5000	3.74	0.12
	AB-2500	3.76	0.25
	AB-500	4.38	0.43
	AB-250	4.56	0.33
	AB-50	4.94	0.27
	AB-25	5.13	0.33
AC-xx	AC-5000	3.74	0.19
	AC-2500	4.00	0.53
	AC-500	4.50	0.49
	AC-250	4.94	0.61
	AC-50	6.71	0.68
	AC-25	6.69	0.55
AD-xx	AD-5000	4.50	0.33
	AD-2500	5.59	0.56
	AD-500	5.76	0.39
	AD-250	6.44	0.30
	AD-50	7.00	0.11
	AD-25	6.98	0.45

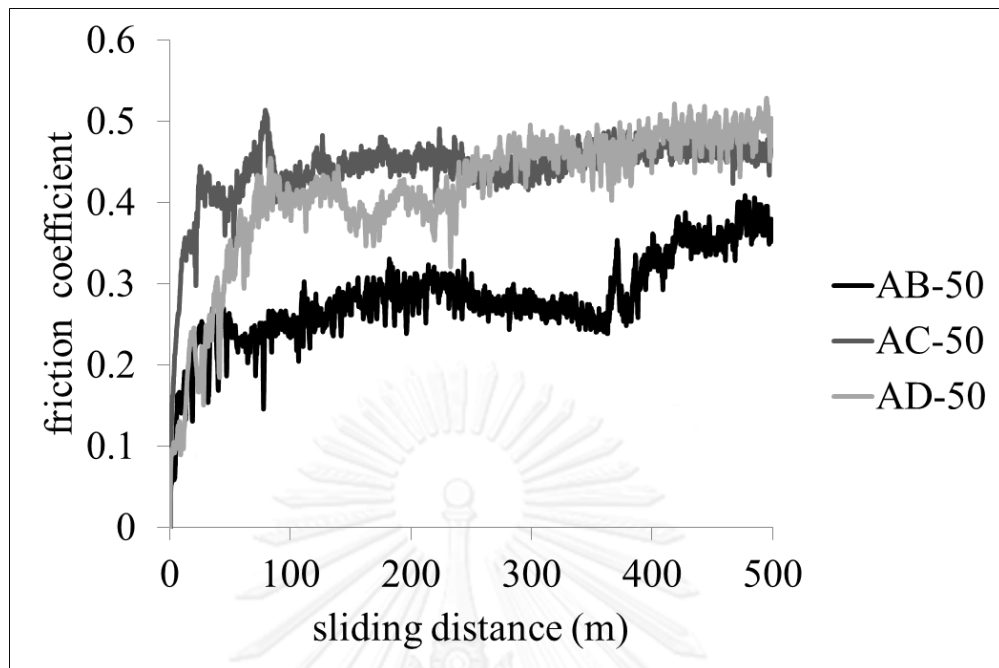
ตารางที่ 4. 7 ค่าความแข็งผิวที่ได้จากกฎการผสม เปรียบเทียบกับค่าความแข็งผิวของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีความหนาชั้นเคลือบย่อย 50 นาโนเมตร

รายการวัสดุ	ค่าความแข็งผิว จากกฎการผสม (GPa)	ค่าความแข็งผิว จากการชุบเคลือบโครงสร้างแบบหลายชั้น (GPa)
A และ B	4.28	4.94
A และ C	5.12	6.71
A และ D	5.29	7.00

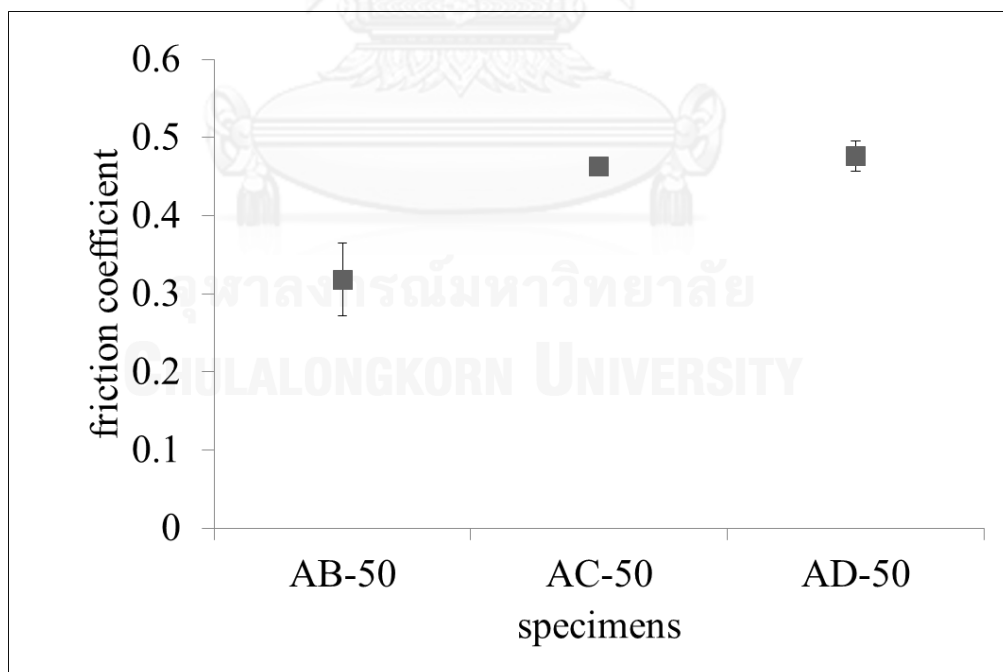
จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาผลของค่าความแข็งผิวที่ได้จากการคำนวณตามกฎการผสมของวัสดุ 2 ชนิด เปรียบเทียบกับค่าความแข็งผิวที่ได้จากโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีความหนาชั้นเคลือบย่อย 50 นาโนเมตร พบว่าความแข็งผิวที่ได้จากโครงสร้างแบบหลายชั้นมีค่าความแข็งผิวที่มากกว่าค่าความแข็งผิวตามกฎการผสม โดยคิดเป็น 15, 31 และ 32 เปอร์เซ็นต์ ในระบบของ AB, AC, และ AD ตามลำดับ แสดงถึงผลของการที่ชั้นเคลือบแบบหลายชั้นทำให้ค่าความแข็งผิวเพิ่มขึ้นจากการที่รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบย่อยทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

4.5 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้นเพื่อศึกษาผลของระบบส่วนประกอบทางเคมีที่ใช้ในการชุบเคลือบที่แตกต่างกัน คือ AB-50, AC-50 และ AD-50 รวมถึงศึกษาผลของค่าความหนาของชั้นเคลือบย่อยในระบบชิ้นงาน AC-xx ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ โดยผลการทดลองได้จากในระหว่างการทดสอบการสึกหรอด้วยเทคนิค ball on disc ดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.5 โดยผลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50 ที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่ใช้ในการชุบเคลือบที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.23 และ 4.24



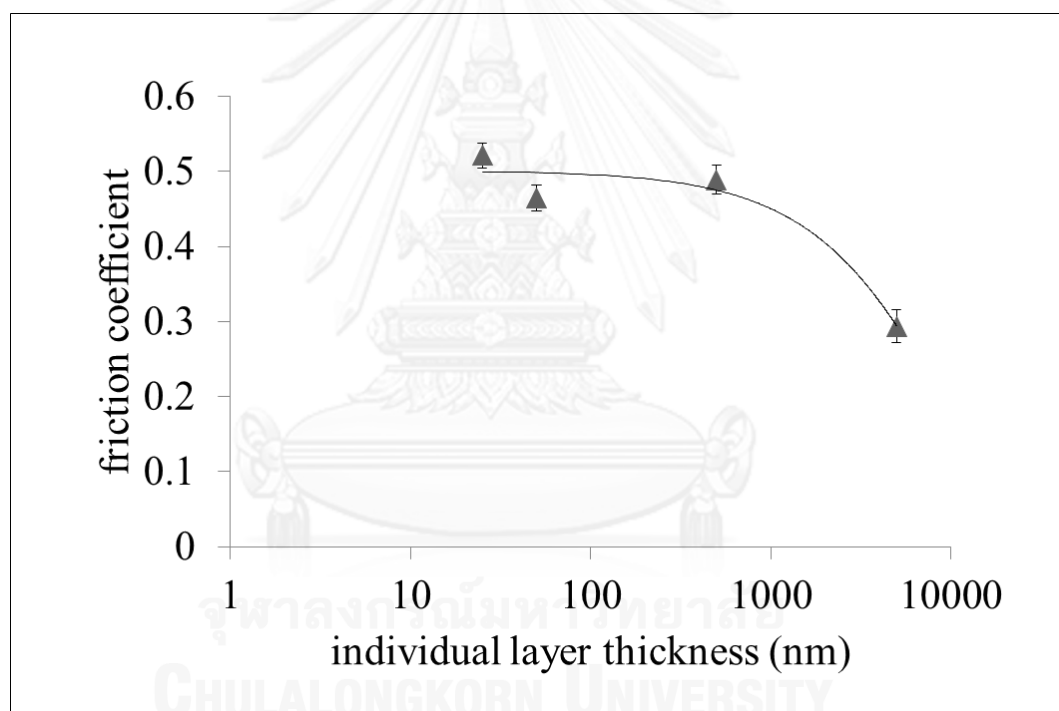
ภาพที่ 4. 23 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากระหว่างการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบการชุบเคลือบแบบสลับต่าง ๆ



ภาพที่ 4. 24 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย ของชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบการชุบเคลือบแบบสลับต่าง ๆ

จากผลของส่วนประกอบทางเคมีที่ใช้ในการชุบเคลือบที่แตกต่างกัน คือ AB-50, AC-50 และ AD-50 และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย พบว่า ชั้นงาน AD-50 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย มากที่สุด ตามมาด้วยชั้นงาน AC-50 และชั้นงาน AB-50 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยต่ำที่สุด และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยในชั้นเคลือบเดี่ยวของวัสดุ A, B, C และ D พบว่า ปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย ทำให้ชั้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่ประกอบไปด้วยวัสดุที่มีปริมาณทั้งสแตนสูงจะทำให้ชั้นงานดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยที่สูงตามไปด้วย

และผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย ที่ได้จากชั้นงานโครงสร้างแบบหลายชั้นของวัสดุ A และ C ในกลุ่มชั้นงาน AC-xx มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาของชั้นเคลือบย่อย ดังแสดงในภาพที่ 4.25 จากผลการทดลองในภาพที่ 4.26 พบว่าชั้นงานที่มีความหนาของชั้นเคลือบย่อยน้อย มีแนวโน้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น

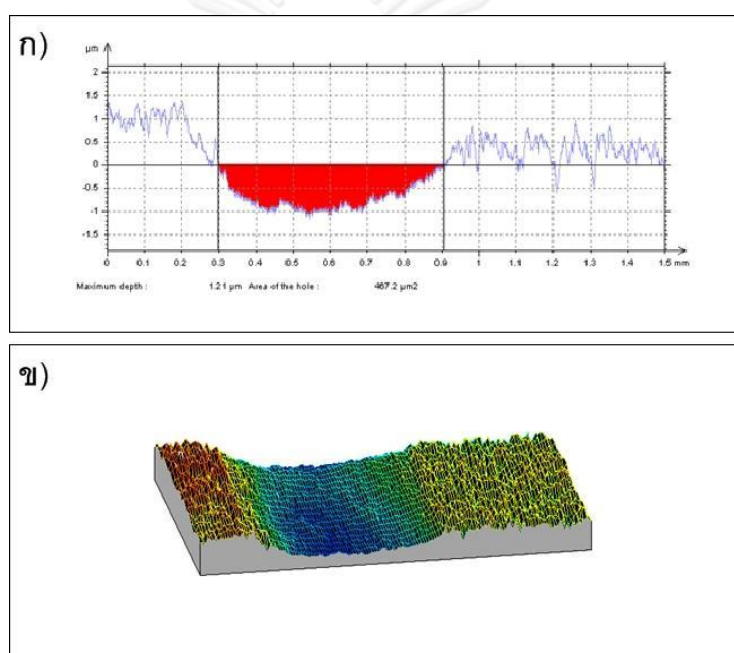


ภาพที่ 4. 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยและค่าความหนาของชั้นเคลือบย่อย ในชั้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นระบบ AC-xx

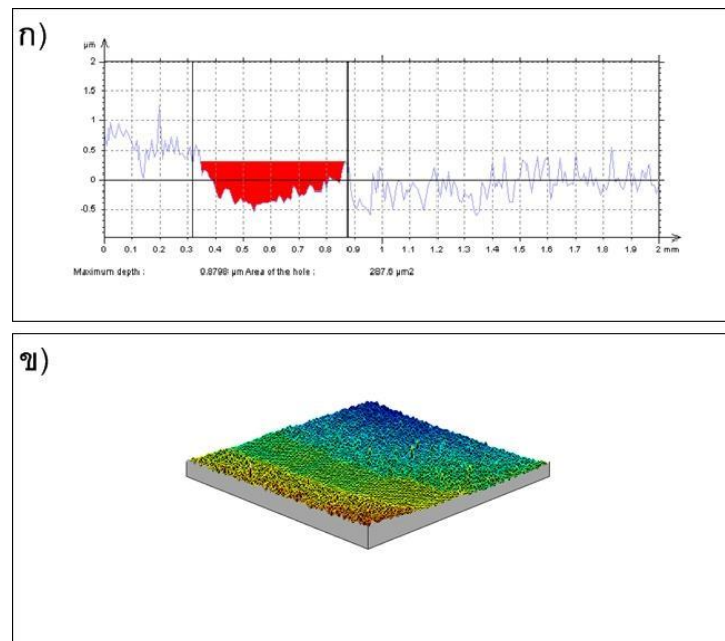
4.6 ความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น

4.6.1 ผลของความหนาชั้นเคลือบย่อย

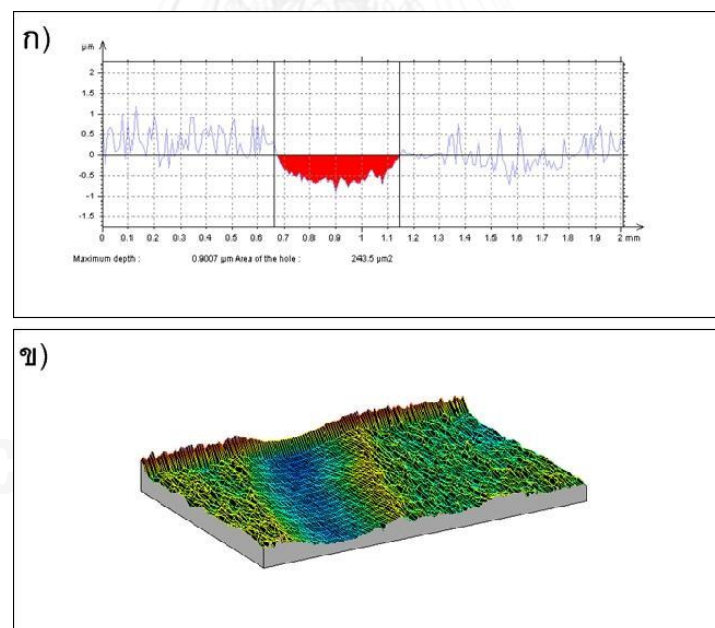
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษถึงผลกระทบของความหนาชั้นเคลือบย่อยที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ โดยทำการหาปริมาตรการสึกหรอที่ได้จากเทคนิค ball-on-disc เช่นเดียวกับชิ้นงานชั้นเคลือบเดี่ยว ดังรายละเอียดในที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1 และมีผลการทดลองของลักษณะร่องการสึกหรอที่ได้จากเครื่อง profilometer ดังแสดงในภาพที่ 4.26-4.29



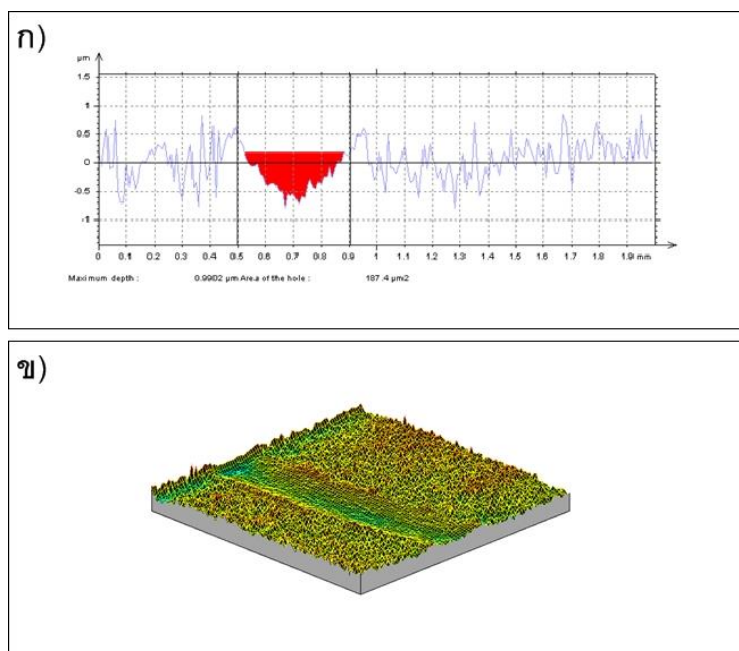
ภาพที่ 4. 26 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-5000 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 27 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AC-500 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 28 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AC-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 29 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AC-25 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ

จากผลการทดลองที่ดังรูปที่ 4.26 – 4.29 สามารถนำรูปแบบของพื้นที่ภาคตัดขวางร่องการสึกหรอแบบ 2 มิติ ที่ได้จากเครื่อง profilometer มาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาตรการสึกหรอ และได้ผลการทดลองปริมาตรการสึกหรอ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4. 8 ผลของปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น AC-xx ที่ความหนาชั้นเคลือบย่อยต่าง ๆ

ความหนาของชั้นเคลือบย่อย	ปริมาตรการสึกหรอ ($\times 10^6 \mu\text{m}^3$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ปริมาตรการสึกหรอ
5000	13.0	1.05
500	6.6	1.16
50	6.2	0.48
25	5.0	1.40

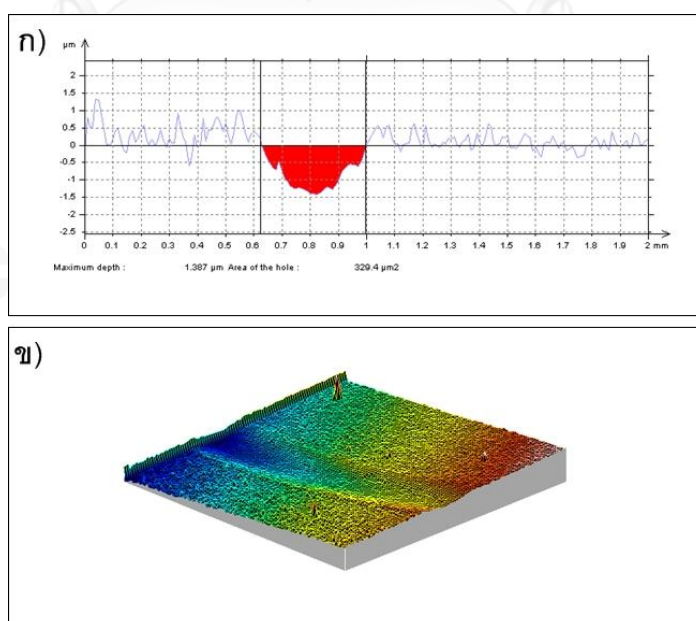
จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเคลือบย่อยที่ลดลงทำให้ชั้นงานมีปริมาตรการสึกหรอที่ลดลง โดยสามารถอธิบายได้โดย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบในชั้นงานเดียวกัน พบว่าค่าปริมาณการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อชั้นเคลือบมี

ค่าความแข็งผิวเพิ่มสูงขึ้น โดยผลมาจากการที่รอยต่อของชั้นเคลือบย่อยทำหน้าที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจึงทำให้ค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับในชั้นงานชั้นเคลือบเดี่ยวดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.6

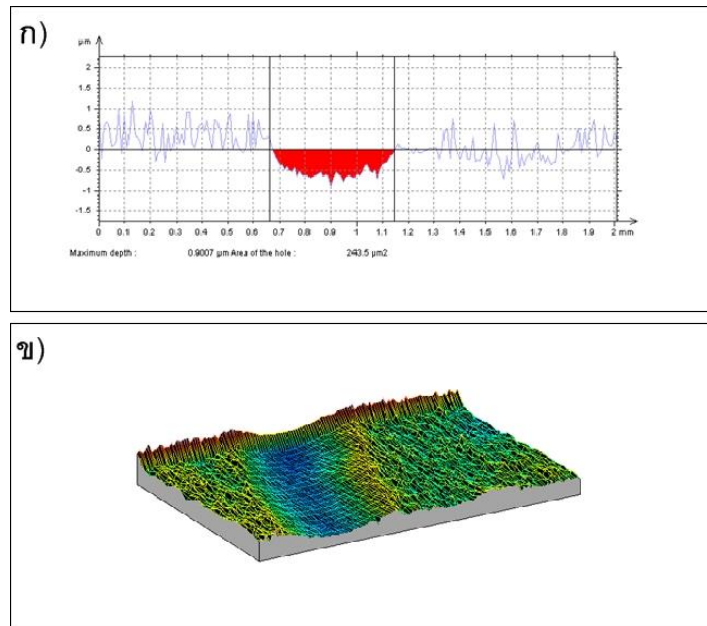
และนอกจากนี้ ผลการทดลองยังสอดคล้องโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีความหนาของชั้นเคลือบย่อยในระดับนาโน จากงานวิจัยของ V.D. Papachristos [18] กล่าวคือ ในโครงสร้างชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุที่มีมอดูลัสที่แตกต่างกัน จากการสลับส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ความไม่เข้ากันของมอดูลัสจะทำให้รอยแตกที่จะโตผ่านชั้นเคลือบย่อยเกิดการเบี่ยงเบนทิศทาง การที่ชั้นเคลือบย่อยมีความหนาลดลงจะทำให้ปริมาตรการสึกหรอลดลง เนื่องจากโครงสร้างแบบหลายชั้นจะทำให้รอยแตกที่ขยายตัวเกิดการเบี่ยงเบนไปในทิศทางขนานกับชั้นเคลือบ จึงลดโอกาสที่รอยแตกที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความเสียหายกับวัสดุ ทำให้วัสดุมีความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น

4.6.2 ผลของส่วนประกอบทางเคมีของชั้นเคลือบย่อย

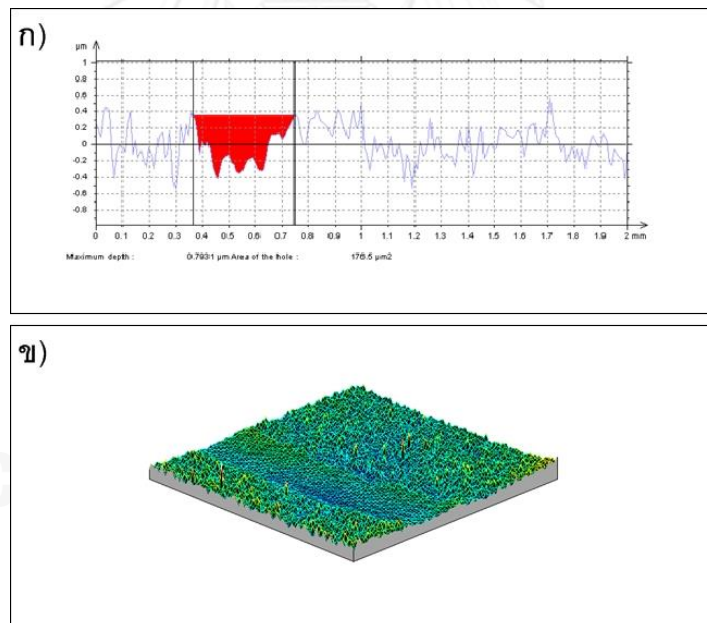
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของส่วนประกอบทางเคมีของระบบชั้นเคลือบที่แตกต่างกันของชั้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50 ที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ โดยทำการหาปริมาตรการสึกหรอที่ได้จากเทคนิค ball on disc ดังรายละเอียดในที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1 และมีผลการทดลองของลักษณะร่องการสึกหรอที่ได้จากเครื่อง profilometer ดังแสดงในภาพที่ 4.30-4.32



ภาพที่ 4. 30 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AB-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 31 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AC-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



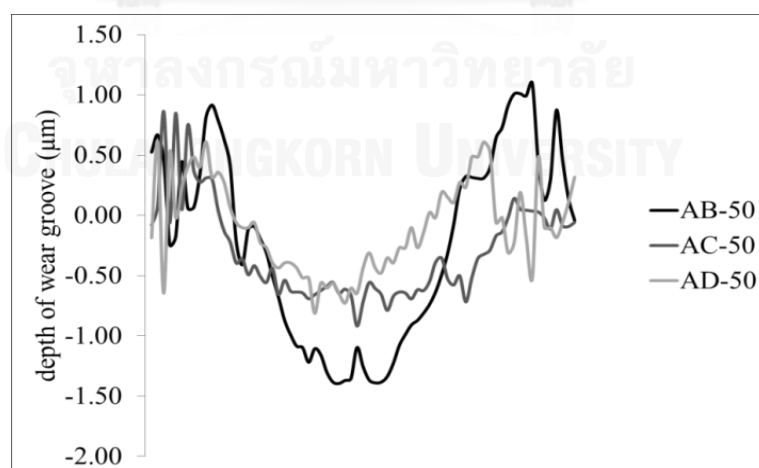
ภาพที่ 4. 32 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชิ้นงาน AD-50 ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ

จากผลการทดลองที่ดังรูปที่ 4.32 – 4.34 สามารถนำรูปแบบของพื้นที่ภาคตัดขวางร่องการสึกหรอแบบ 2 มิติ ที่ได้จากเครื่อง profilometer มาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาตรการสึกหรอ และได้ผลการทดลองปริมาตรการสึกหรอ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และจากร่องการสึกหรอที่เกิดขึ้นได้มีการหาค่าลักษณะของภาคตัดขวางร่องการสึกหรอดังแสดงในภาพที่ 4.35

ตารางที่ 4. 9 ผลของปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50

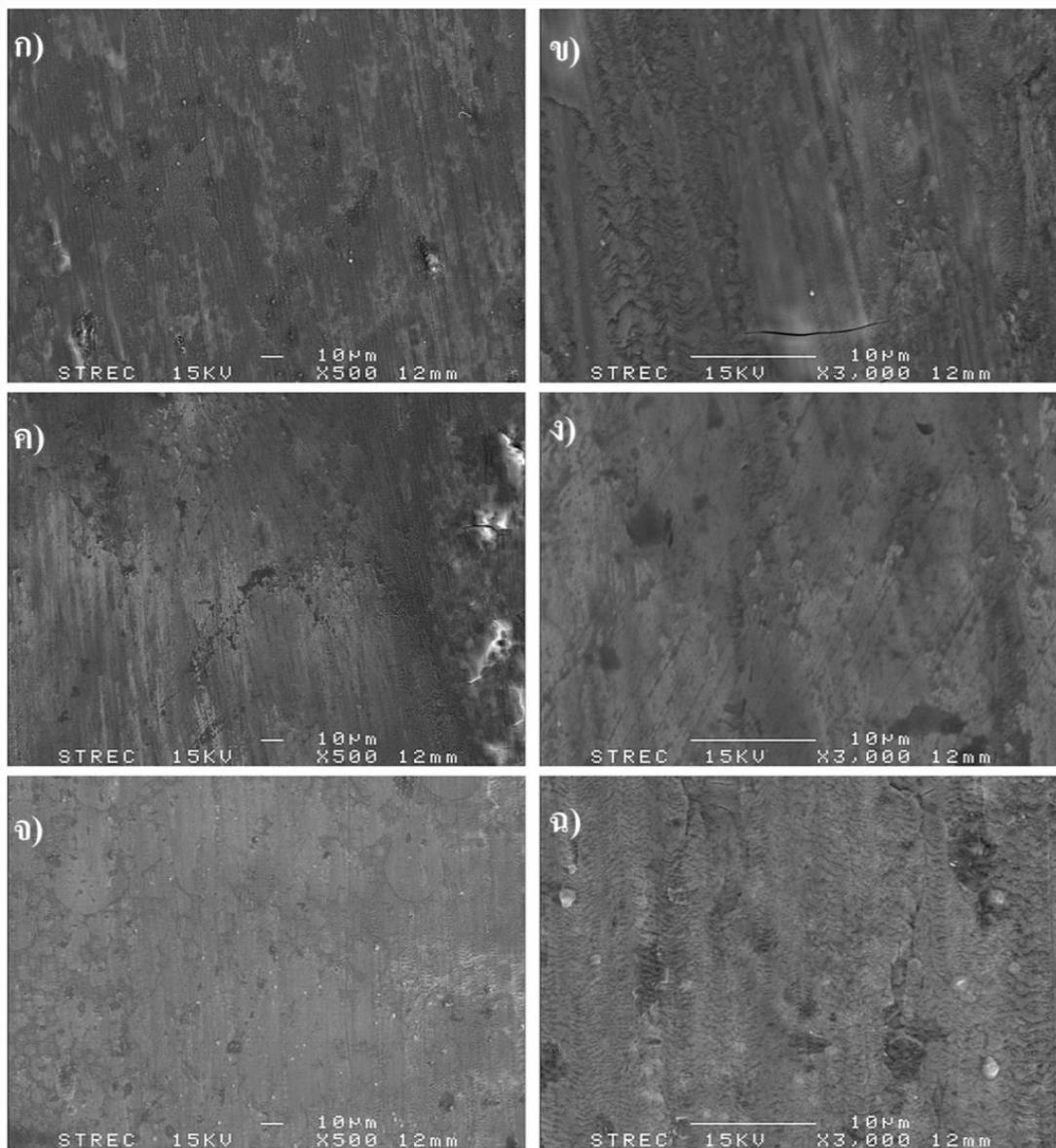
ชิ้นงาน	ปริมาตรการสึกหรอ ($\times 10^6 \mu\text{m}^3$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\times 10^6 \mu\text{m}^3$)
AB-50	9.57	1.64
AC-50	6.25	0.48
AD-50	3.94	0.67

จากผลการทดลองดังตาราง 4.9 ชิ้นงาน AD-50 มีปริมาตรการสึกหรอน้อยที่สุด ตามมาด้วยชิ้นงาน AC-50 และชิ้นงาน AB-50 มีปริมาตรการสึกหรอมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของลักษณะและขนาดของร่องการสึกหรอดังรูปที่ 4.33 และจากการพิจารณาเปรียบเทียบกับผลของค่าปริมาตรการสึกหรอในวัสดุ A, B, C และ D ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุที่เลือกนำมาชุบเคลือบส่งผลต่อปริมาตรการสึกหรอ โดยปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบส่งผลต่อค่าปริมาตรการสึกหรอ ทำให้ชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่ประกอบไปด้วยวัสดุที่มีปริมาณทั้งสแตนสูงจะทำให้ชิ้นงานดังกล่าวมีปริมาตรการสึกหรอที่สูงตามไปด้วย



ภาพที่ 4. 33 ลักษณะภาคตัดขวางของร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50

และในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาโครงสร้างจุลภาคภายในร่องการสึกหรอโดยใช้เทคนิค SEM ที่จะแสดงหลักฐานเชื่อมโยงไปถึงกลไกในการเกิดการสึกหรอจากเทคนิค ball-on-disc โดยจากผลการทดลองของโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากพื้นผิวร่องการสึกหรอของ ดังแสดงในภาพที่ 4.34



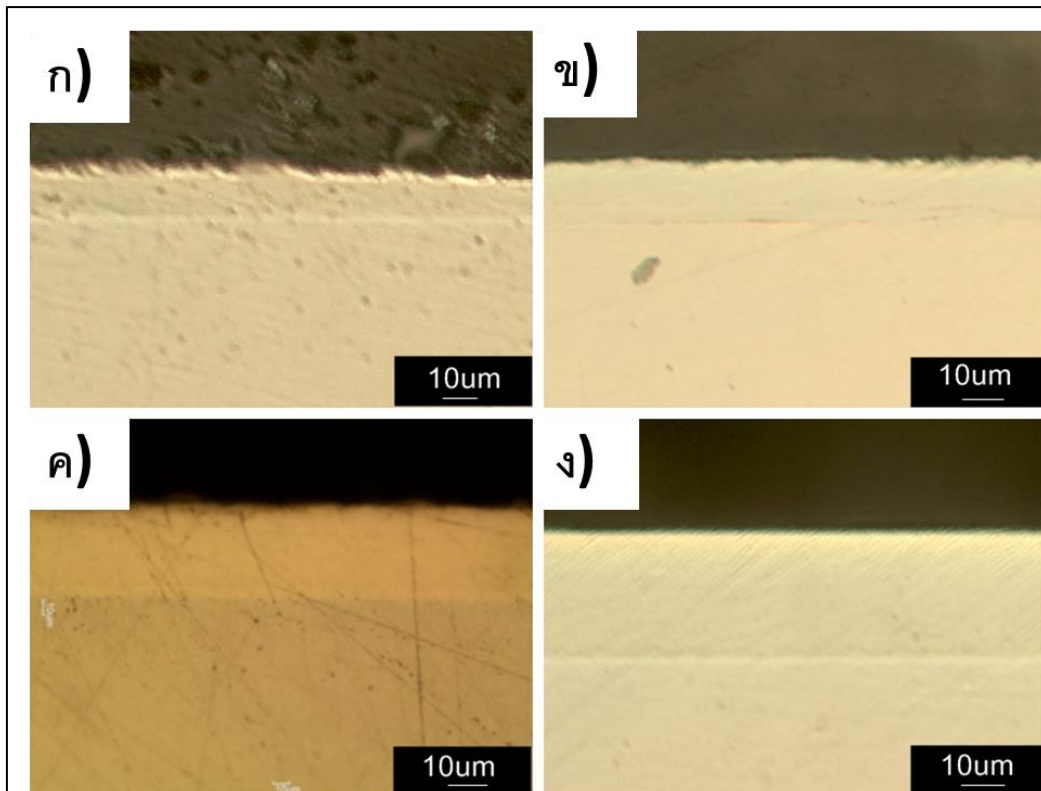
ภาพที่ 4. 34 พื้นผิวร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบที่กำลังขยาย ก) และ ข) ชิ้นงาน AB-50, ค) และ ง) ชิ้นงาน AC-50, ฉ) และ ฉ) ชิ้นงาน AD-50 ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองการหาโครงสร้างจุลภาคภายในร่องการสึกหรอของชั้นเคลือบของชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50 พบว่าเมื่อพิจารณาที่กำลังขยายเดียวกันคือ 3000 เท่า ในชั้นเคลือบของชิ้นงาน AB-50 พบรอยแตกที่แสดงถึงเกิดการสึกหรอที่รุนแรง สอดคล้องกับผลการทดลองของค่าปริมาตรการสึกหรอที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ และเมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคภายในร่องการสึกหรอจะสามารถสังเกตเห็นถึงรอยของทิศทางการไหลที่แสดงถึงเกิดกลไกการสึกหรอแบบขัดสี อีกทั้งยังสามารถสังเกตเห็นถึงทรานสเฟอร์ฟิล์ม ที่เป็นหลักฐานแสดงถึงกลไกการสึกหรอแบบเกาะติด

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลค่าของปริมาตรการสึกหรอของชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50 กับชิ้นงาน A, B, C และ D กล่าวคือ ค่าปริมาตรการสึกหรอของชิ้นงานโครงสร้างชั้นเคลือบแบบหลายชั้นเปรียบเทียบกับปริมาตรการสึกหรอของชิ้นงานชั้นเคลือบเดี่ยวของวัสดุที่มีทั้งสแตนสูงที่เลือกใช้ในการนำมาสลับ พบว่า ชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้นมีค่าปริมาตรการสึกหรอที่มากกว่าชิ้นงานชั้นเคลือบเดี่ยวของชั้นเคลือบทั้งสแตนสูง เพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรการสึกหรอ อาจกล่าวได้ว่าชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้นสามารถที่จะมีค่าความต้านทานการสึกหรออยู่ในระดับเดียวกับวัสดุทั้งสแตนสูงที่เลือกนำมาใช้สลับ

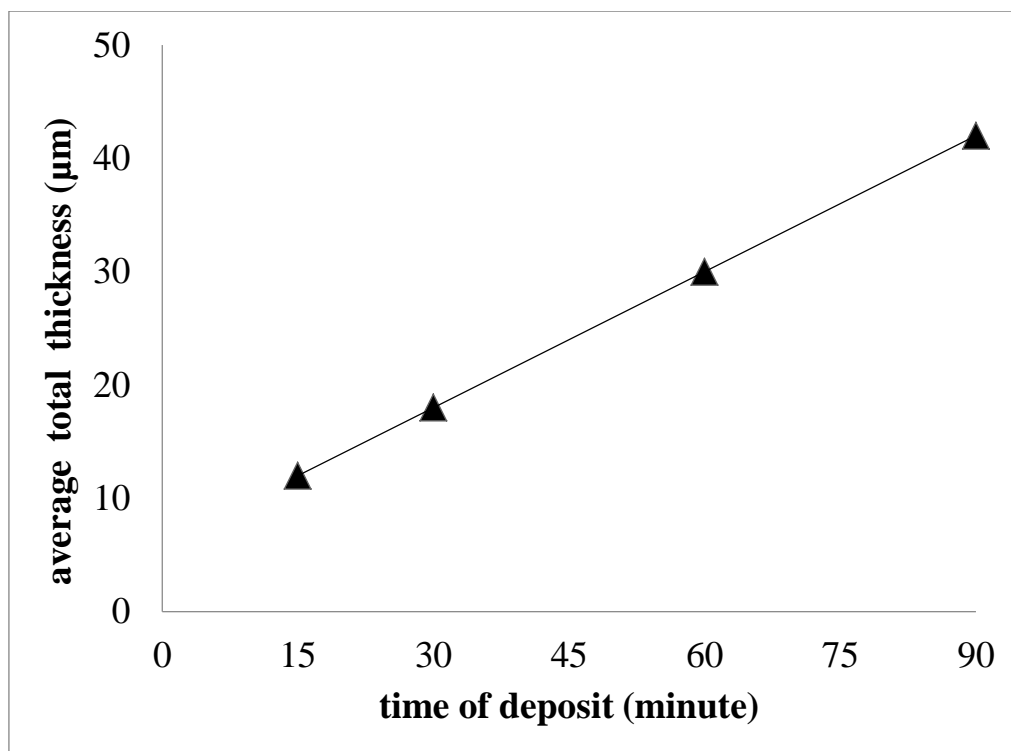
4.7 ผลของระยะเวลาในการชุบเคลือบและความหนารวมของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้น

ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาในการชุบเคลือบรวมทั้งหมดของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้นระบบ AC-50 ที่มีการควบคุมให้มีความหนาของชั้นเคลือบย่อยให้อยู่ในระดับ 50 นาโนเมตร ทั้งนี้เพื่อทำการหาถึงผลกระทบของความหนารวมของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่มีต่อค่าความแข็งผิวและค่าปริมาตรการสึกหรอ อีกทั้งยังเป็นการศึกษาตัวแปรเวลาเพื่อที่จะหาความหนารวมในการชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่ระยะเวลาแตกต่างกันอีกด้วย โดยจะทำการชุบเคลือบที่ระยะเวลา 15 นาที, 30 นาที, 60 นาที และ 90 นาที และนำไปวัดความหนารวมของชั้นเคลือบจากการตรวจโครงสร้างแบบตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.35



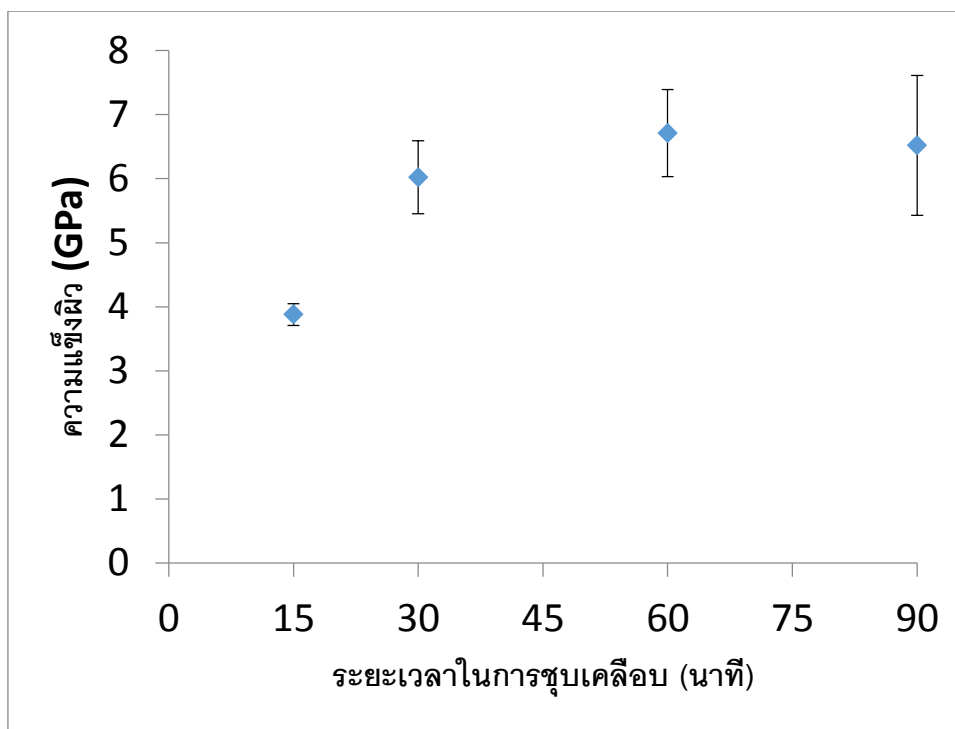
ภาพที่ 4. 35 ภาพแสดงโครงสร้างของภาคตัดขวางและความหนาแน่นของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในระบบชิ้นงาน AC-xx โดยในการชุบเคลือบรวมที่ระยะเวลา ก) 15 นาที, ข) 30 นาที, ค) 60 นาที และ ง) 90 นาที

และจากผลของค่าความหนาแน่นของชิ้นงานการชุบเคลือบแบบหลายชั้น ได้ความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบ ดังภาพที่ 4.36 จากความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการชุบเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น



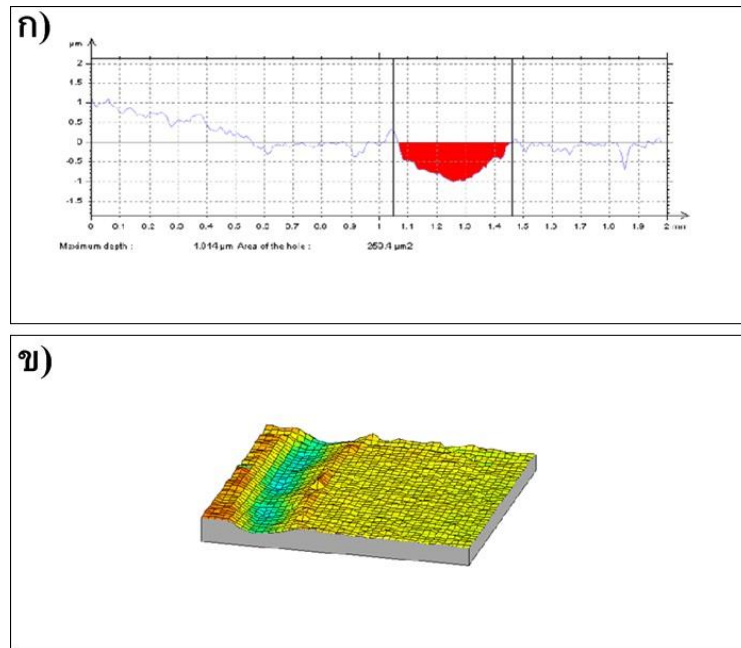
ภาพที่ 4. 36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบ และความหนาของชั้นเคลือบแบบหลายชั้น ในชิ้นงาน AC-50

ในงานวิจัยนี้ได้หาความสัมพันธ์ของค่าความหนาที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นในกลุ่มชิ้นงาน AC-50 ได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4.37 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าชั้นเคลือบในกลุ่มชิ้นงาน AC-50 ที่มีการสลัชั้นเคลือบย่อยด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน อีกทั้งยังมีการควบคุมความหนาของแต่ละชั้นเคลือบย่อยให้อยู่ที่ 50 นาโนเมตรเท่ากัน เมื่อนำไปทดสอบค่าความแข็งผิวแบบไมโครวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 50 กรัม จะทำให้ได้ค่าความแข็งผิวที่อยู่ในระดับเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ใช้ระยะเวลาในการชุบเคลือบน้อยจะทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบที่บาง จะทำให้ได้ความหนาของชั้นเคลือบไม่เพียงพอต่อการทดสอบคุณสมบัติความแข็งผิวโดยไมโครวิกเกอร์ กล่าวคือ ความลึกของรอยกดต้องไม่มากกว่า 1 ใน 10 ของความหนาของชั้นเคลือบ และจากการคำนวณค่าความลึกเฉลี่ยของรอยกดชิ้นงานจะมีค่าประมาณ 2.8 ไมครอน ทำให้ชั้นเคลือบที่มีการชุบเคลือบที่ระยะเวลา 15 นาที และ 30 นาที จะได้รับผลจากวัสดุพื้นเมื่อนำไปทดสอบหาค่าความแข็งผิว ทำให้ผลของค่าความแข็งผิวลดลง จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าความหนาโดยรวมของชั้นเคลือบที่มากโดยปราศจากอิทธิพลของวัสดุพื้น จะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวของชั้นเคลือบ

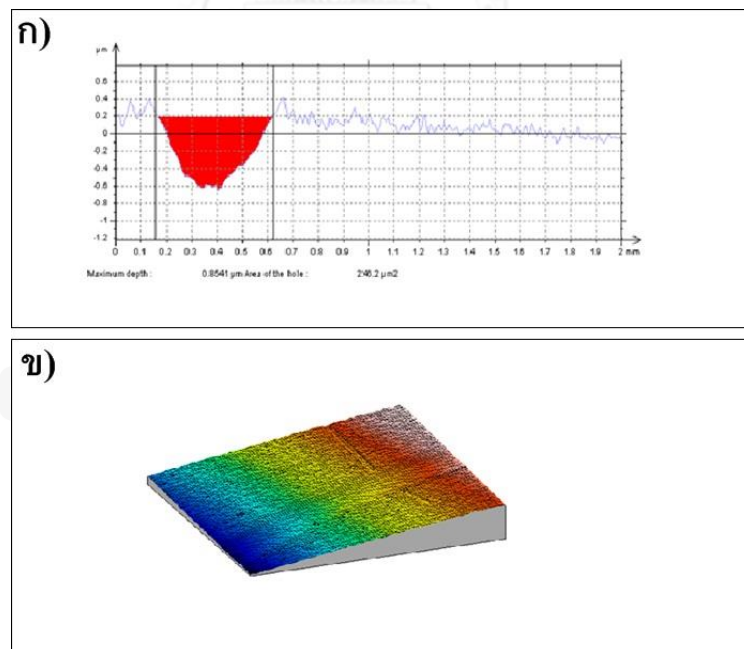


ภาพที่ 4. 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิว และระยะเวลาในการชุบเคลือบของชิ้นงาน AC-50

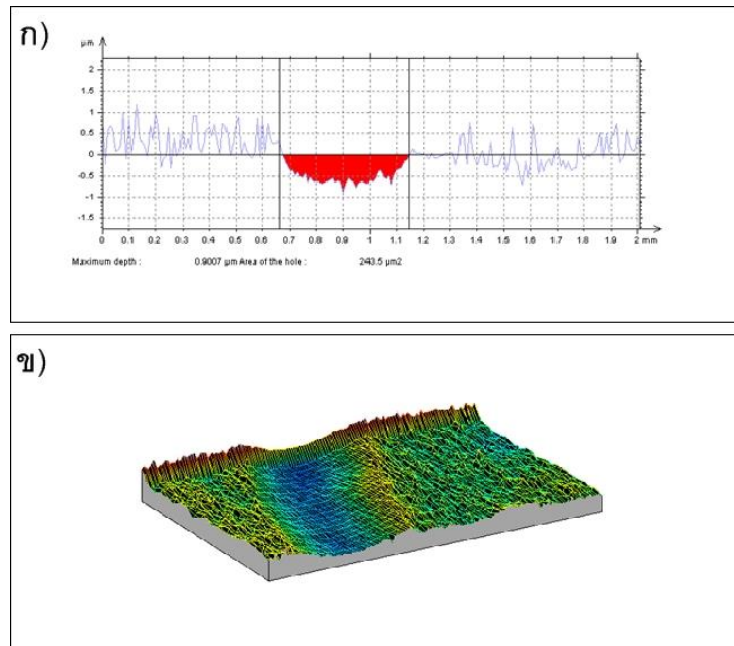
การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานในกลุ่ม AC-50 โดยทดสอบการสึกหรอโดยเทคนิค ball-on-disc จะได้ชิ้นงานที่มีร่องรอยการสึกหรอลักษณะวงแหวน และนำไปตรวจสอบโดยใช้เครื่องทดสอบพื้นผิว profilometer จะสามารถหาได้ถึงลักษณะภาคตัดขวางของร่องการสึกหรอทั้งแบบสามมิติ และสองมิติ ดังแสดงในภาพที่ 4.39-4.41 และสามารถนำรูปแบบของพื้นที่ภาคตัดขวางร่องการสึกหรอแบบ 2 มิติ ที่ได้จากเครื่อง profilometer มาคำนวณเพื่อหาค่าปริมาตรการสึกหรอ และได้ผลการทดลองปริมาตรการสึกหรอ ดังแสดงในตารางที่ 4.10



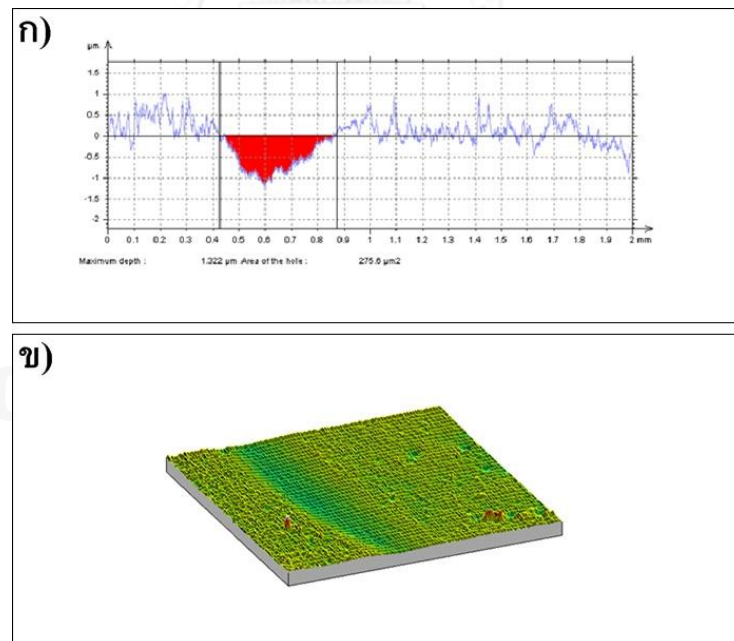
ภาพที่ 4. 38 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 15 นาที
ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 39 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 30 นาที
ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 40 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 60 นาที
ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4. 41 พื้นที่การสึกหรอของชั้นเคลือบ ชั้นงาน AC-50 ที่ใช้เวลาในการชุบเคลือบ 90 นาที
ก) แบบ 2 มิติ และ ข) แบบ 3 มิติ

ตารางที่ 4. 10 ผลของการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของชิ้นงาน AC-50 โดยใช้ระยะเวลาต่างกัน

ชิ้นงาน	ระยะเวลาในการชุบเคลือบ	ความหนารวม (μm)	ความแข็งผิวเฉลี่ย (GPa)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งผิว	ปริมาตรการสึกหรอเฉลี่ย (10^{-6} um^3)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าปริมาตรการสึกหรอ
AC-50	15	12	3.88	0.17	6.29	0.97
	30	18	6.02	0.57	5.92	0.45
	60	30	6.71	0.68	6.25	0.48
	90	42	6.52	1.09	6.30	0.53

จากผลการทดลองของค่าปริมาตรการสึกหรอที่แสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาผลของปริมาตรการสึกหรอของชิ้นงาน AC-50 ที่ทำการชุบเคลือบด้วยเวลาต่างกันและมีความหนารวมของชิ้นงานที่แตกต่างกัน พบว่ามีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงความหนารวมของชิ้นงานไม่ส่งผลต่อปริมาตรการสึกหรอของชิ้นเคลือบ

4.8 การเปรียบเทียบปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบเฉลี่ยและค่าความแข็งผิว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งผิวและปริมาตรการสึกหรอของชิ้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน และชั้นเคลือบนิกเกิลทั้งสแตนแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมี และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบแบบหลายชั้นที่ประกอบไปด้วย วัสดุที่มีปริมาณทั้งสแตนต่างกัน นำมาสลับกันในอัตราส่วนของจำนวนชั้นและความหนาชั้นเคลือบย่อยที่เท่ากัน จึงสามารถหาปริมาณทั้งสแตนของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นได้จากการหาค่าเฉลี่ยของวัสดุที่เลือกนำมาสลับ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยการชุบเคลือบแบบหลายชั้นจะเป็นการลดการใช้ปริมาณทั้งสแตนลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั้งสแตนสูงที่เลือกนำมาสลับ โดยการชุบเคลือบแบบหลายชั้นสามารถลดปริมาณการใช้ธาตุทั้งสแตนลงได้ 16, 37 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ในระบบ AB, AC และ AD ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาสมบัติด้านค่าความแข็งผิวของชิ้นงาน AB-50 ที่มีค่าความแข็งผิว 4.9 GPa เปรียบเทียบกับชิ้นงาน B ที่มีค่าความแข็งผิว 5.1 GPa พบว่าชิ้นงานที่มีชั้นเคลือบแบบหลายชั้น มีค่าความแข็งผิวที่น้อยกว่าชิ้นงานชั้นเคลือบทั้งสแตนสูงที่เลือกนำมาสลับ

เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในทำนองเดียวกันกับการเปรียบเทียบชิ้นงาน AC-50 กับชิ้นงาน C และการเปรียบเทียบชิ้นงาน AD-50 และชิ้นงาน D ที่พบว่า การชุบเคลือบแบบหลายชั้น จะมีค่าความแข็งผิวที่น้อยกว่าชิ้นงานชั้นเคลือบทั้งสแตนสูงที่เลือกนำมาสลับเพียงเล็กน้อย จึงสามารถบอกได้ว่าการชุบเคลือบแบบหลายชั้นสามารถคงสมบัติทางด้านความแข็งผิวของชั้นเคลือบไว้ได้เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานชั้นเคลือบทั้งสแตนสูง

และเมื่อพิจารณาสมบัติทางด้านค่าปริมาตรการสึกหรอของชิ้นงานชั้นเคลือบแบบหลายชั้นพบว่า ชิ้นเคลือบแบบหลายชั้นที่มีความหนาชั้นเคลือบย่อย 50 นาโนเมตร ในชิ้นงาน AB-50, AC-50 และ AD-50 จะมีปริมาตรการสึกหรออยู่ระหว่างค่าปริมาตรการสึกหรอของชั้นเคลือบวัสดุที่เลือกนำมาสลับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าปริมาตรการสึกหรอของชิ้นงาน AC-25 ในตารางที่ 4.8 พบว่าชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นเคลือบย่อยที่ 25 นาโนเมตร จะมีปริมาตรการสึกหรอที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานชั้นเคลือบทั้งสแตนสูง จึงอาจบอกได้ว่าการชุบเคลือบแบบหลายชั้นสามารถที่จะคงคุณสมบัติทางด้านความต้านทานการสึกหรอได้ ที่ในชิ้นงานที่มีความหนาชั้นเคลือบย่อย 25 นาโนเมตร

ตารางที่ 4. 11 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณทั้งสแตนของชั้นเคลือบและค่าสมบัติกล

ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ยปริมาณทั้งสแตน (at%)	ค่าความแข็งผิว (GPa)	ปริมาตรการสึกหรอ ($\times 10^6 \mu\text{m}^3$)
A	6.3	3.5	10.02
B	8.7	5.1	6.85
C	13.8	6.8	4.96
D	29.4	7.1	3.38
AB-50	7.5	4.9	9.57
AC-50	10.05	6.7	6.25
AD-50	17.85	7.0	3.94

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการชุบเคลือบแบบหลายชั้นของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตนที่สลับส่วนประกอบทางเคมี ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งผิวและความต้านทานการสึกหรอ โดยหาผลกระทบของความหนาชั้นเคลือบย่อยและการสลับส่วนประกอบทางเคมี สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในการชุบไฟฟ้าโลหะผสมนิกเกิลทั้งสแตน สามารถที่จะควบคุมปริมาณทั้งสแตนในชั้นเคลือบได้ โดยการใช้กระแส reverse pulse ที่สูงขึ้นจะทำให้ชั้นเคลือบมีปริมาณทั้งสแตนลดลง นอกจากนี้ชั้นเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนสูงจะมีเกรนขนาดเล็กอีกทั้งยังมีค่าความแข็งผิวและความต้านทานการสึกหรอที่สูง

2. สามารถผลิตโครงสร้างของชั้นเคลือบแบบหลายชั้นของวัสดุ นิกเกิลทั้งสแตนที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีจากการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าในอ่างชุบเดียว

3. ผลกระทบของความหนาชั้นเคลือบย่อย

3.1 ค่าความแข็งผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นงานมีความหนาชั้นเคลือบย่อยในระดับนาโนเมตร โดยจะมีค่าความแข็งผิวที่มากกว่าค่าจากการคำนวณตามกฎการผสม โดย ชั้นงาน AD-50 มีค่าความแข็งผิว 7.0 GPa มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในระดับเดียวกับชั้นเคลือบทั้งสแตนสูง ชั้นงาน D 7.1 GPa

3.2 ในการทดสอบการสึกหรอแบบ ball on disc จะเกิดการสึกหรอแบบขีดสีและแบบเกาะติด และการลดลงของความหนาชั้นเคลือบย่อยจะส่งผลทำให้ความต้านทานการสึกหรอมีค่าสูงขึ้น

4. ระยะเวลาในการชุบเคลือบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ชั้นงานมีความหนารวมเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนารวมของชั้นเคลือบไม่ส่งผลต่อสมบัติทางด้านความแข็งของชั้นเคลือบหากปราศจากผลของวัสดุพื้น และไม่ส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ

5. ผลของการสลับส่วนประกอบทางเคมี โดยชั้นเคลือบที่ประกอบไปด้วยชั้นเคลือบย่อยที่มีปริมาณทั้งสแตนสูงจะมีค่าความแข็งผิวและความต้านทานการสึกหรอที่สูงกว่าชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยชั้นเคลือบย่อยที่มีปริมาณทั้งสแตนต่ำ โดยชั้นงาน AD-50 จะมีค่าความต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งสูงที่สุด

6. การชุบเคลือบแบบหลายชั้นที่มีการสลับส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ 2 ชนิดที่มีปริมาณทั้งสแตนต่างกันที่ความหนาชั้นเคลือบย่อย 50 นาโนเมตร จะมีค่าความแข็งผิวที่มากกว่าค่าความแข็ง

ผิวที่ได้จากการคำนวณตามกฎการผสม 15, 31 และ 32 เปอร์เซ็นต์ ในระบบ AB, AC และ AD ตามลำดับ

7. จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการชุบเคลือบแบบหลายชั้นโดยให้ความหนาของชั้นเคลือบย่อยที่หนาประมาณ 50 นาโนเมตรจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งผิวอยู่ระดับเดียวกับวัสดุทั้งสแตนสูงที่เลือกนำมาสลับ แต่ช่วยลดปริมาณการใช้ธาตุทั้งสแตนลงได้ 16, 37 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ในระบบ AB, AC และ AD ตามลำดับ ซึ่งจะส่งผลดีต่อต้นทุนในการผลิต เนื่องจากทั้งสแตนเป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับนิกเกิล

ข้อเสนอแนะ

- 1.ควรมีการศึกษาการยึดติดของชั้นเคลือบ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการนำวัสดุไปใช้งาน
- 2.ควรมีการศึกษาการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติม เพื่อให้ทราบถึงกลไกการสึกหรอแบบอื่น ๆ

รายการอ้างอิง

1. Mellor, B.G., *Surface coatings for protection against wear*. 2006, Cambridge England: Woodhead publishing limited.
2. Kung-Hsu Houa, Ming-Chang Jeng, and M.-D. Ger, *A study on the wear resistance characteristics of pulse electroforming Ni-P alloy coatings as plated*. *Wear*, 2006. **262 (2007)**: p. 833–844.
3. Narasak Sunwang, Panyawat Wangyao, and Y. Boonyongmaneerat, *The effects of heat treatments on hardness and wear resistance in Ni-W alloy coatings*. *Surface & Coatings Technology* 2011. **206 (2011)**: p. 1096–1101.
4. Timothy J. Rupert and C.A. Schuh, *Sliding wear of nanocrystalline Ni-W: Structural evolution and the apparent breakdown of Archard scaling*. *Acta Materialia* 2010. **58 (2010)**: p. 4137–4148.
5. A.S.M.A. Haseeb, U. Albers, and K. Badea, *Friction and wear characteristics of electrodeposited nanocrystalline nickel-tungsten alloy films*. *Wear* 2007. **264 (2008)**: p. 106–112.
6. A. Grosjeana, et al., *Hardness, friction and wear characteristics of nickel-SiC electroless composite deposits*. *Surface and Coatings Technology* . , 2000. **137 (2001)**: p. 92-96.
7. Wood, R.J.K., *Tribology of thermal sprayed WC-Co coatings*. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2009. **28 (2010)**: p. 82–94.
8. J.M. Guilemany, S. Dosta, and J.R. Miguel, *The enhancement of the properties of WC-Co HVOF coatings through the use of nanostructured and microstructured feedstock powders*. *Surface & Coatings Technology* 2006. **201 (2006)**: p. 1180–1190.
9. D.H. Jeong, et al., *The effect of grain size on the wear properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings*. *Scripta mater.* , 2000. **44 (2001)**: p. 493–499.
10. Amnuaysak Chianpairot, et al., *Corrosion of nanocrystalline Ni-W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt.% NaCl solutions*. *Corrosion Science* 2010. **53 (2011)**: p. 1066–1071.
11. K.R. Sriraman, S. Ganesh Sundara Raman, and S.K. Seshadri, *Synthesis and evaluation of hardness and sliding wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-W alloys*. *Materials Science and Engineering A* 2005 **418 (2006)**: p. 303–311.

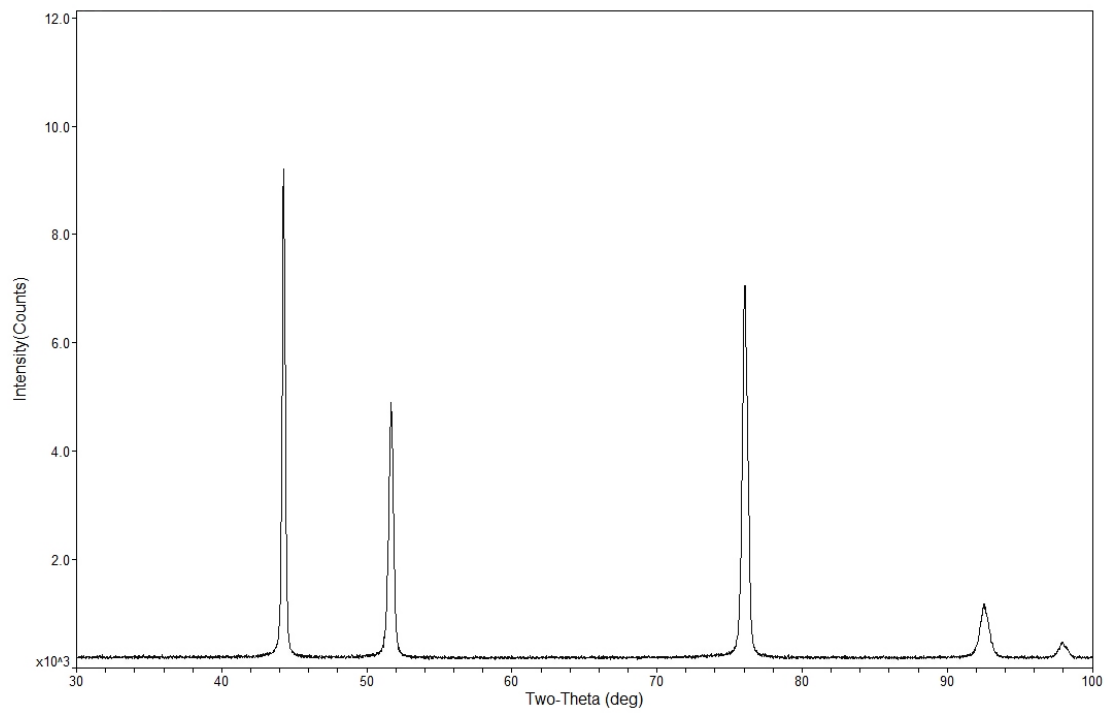
12. C.A. Schuh, T.G. Nieh, and H. Iwasaki, *The effect of solid solution W additions on the mechanical properties of nanocrystalline Ni*. Acta Materialia 2002. **51 (2003)**: p. 431–443.
13. Yamasaki, T., *High-strength nanocrystalline Ni-W alloys produced by electrodeposition and their embrittlement behaviors during grain growth*. Scripta mater., 2000. **44 (2001)**: p. 1497–1502.
14. S. Alirezaei, et al., *Wear behavior of Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ electroless coatings*. Wear 2006. **262 (2007)**: p. 978–985.
15. V.D. Papachristos, et al., *Young's modulus, hardness and scratch adhesion of Ni-P-W multilayered alloy coatings produced by pulse plating*. Thin Solid Films 2001. **396 (2001)**: p. 173–182.
16. C.N. Panagopoulos, et al., *Ni-P-W multilayered alloy coatings produced by pulse plating*. Scripta mater. , 2000. **43 (2000)**: p. 677–683.
17. V.D. Papachristos, et al., *Effect of annealing on the structure and hardness of Ni-P-W multilayered alloy coatings produced by pulse plating*. Materials Science and Engineering, 1999. **A279 (2000)**: p. 217–230.
18. V.D. Papachristos, et al., *Sliding wear behaviour of Ni-P-W composition-modulated coatings*. Surface and Coatings Technology 1998. **105 (1998)**: p. 224–231.
19. J. Lamovec, et al., *Microhardness analysis of thin metallic multilayer composite films on copper substrates*. Min. Metall. , 2011. **Sect. B-Metall. 47 (1) B (2011)**: p. 53 - 61.
20. สิริจินดา, ม., โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. 2543, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. Kenneth Holmberg and A. Matthews, *Coatings Tribology Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Vol. 56. 2009: TRIBOLOGY AND INTERFACE ENGINEERING SERIES.
22. ทองมอญ., อ., ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. 2544, กรุงเทพมหานคร: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน.
23. M.S. Chandrasekar and M. Pushpavanam, *Pulse and pulse reverse plating—Conceptual, advantages and applications*. Electrochimica Acta 2007. **53(2008)**: p. 3313–3322.
24. Hansen, N., *Hall–Petch relation and boundary strengthening*. Scripta Materialia, 2004. **51(8)**: p. 801-806.
25. Dini, J.W., *Electrodeposition The Materials Science of Coatings and Substrates*. 1993, California: NOYES.

26. Gwidon W. Stachowiak and A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*. 3 ed. 2005: ELSEVIER
27. Milan Paunovic and M. Schlesinger, *Fundamentals Of Electrochemical Deposition*. 2 ed. 2006: A John Wiley & Sons.
28. F. Hu and K.C. Chan, *Deposition behaviour and morphology of Ni-SiC electro-composites under triangular waveform*. *Applied Surface Science* 2004. **243 (2005)**: p. 251–258.
29. Yi Kong and L. Shen, *Strengthening mechanism of metallic nanoscale multilayer with negative enthalpy of mixing*. *J. Appl. Phys.*, 2011. **110(073522 (2011))**.
30. J. Wang and A. Misra, *An overview of interface-dominated deformation mechanisms in metallic multilayers*. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2010. **15(2011)**: p. 20–28.
31. Detor Andrew J. and S.C. A., *Grain boundary segregation, chemical ordering and stability of nanocrystalline alloys: Atomistic computer simulations in the Ni-W system*. *Acta Materialia*, 2007. **55(12)**: p. 4221-4232.
32. Andrew J. Detor and C.A. Schuh, *Tailoring and patterning the grain size of nanocrystalline alloys*. *Acta Materialia* 2006. **55 (2007)**: p. 371–379.
33. Watanabe, T., *Nano-plating: Microstructure Control Theory of Plated Film and Data Base of Plated Film Microstructure*. 1 ed. 2004.
34. Misra A., Hirth J. P., and H.R. G., *Length-scale-dependent deformation mechanisms in incoherent metallic multilayered composites*. *Acta Materialia*, 2005. **53(18)**: p. 4817-4824.

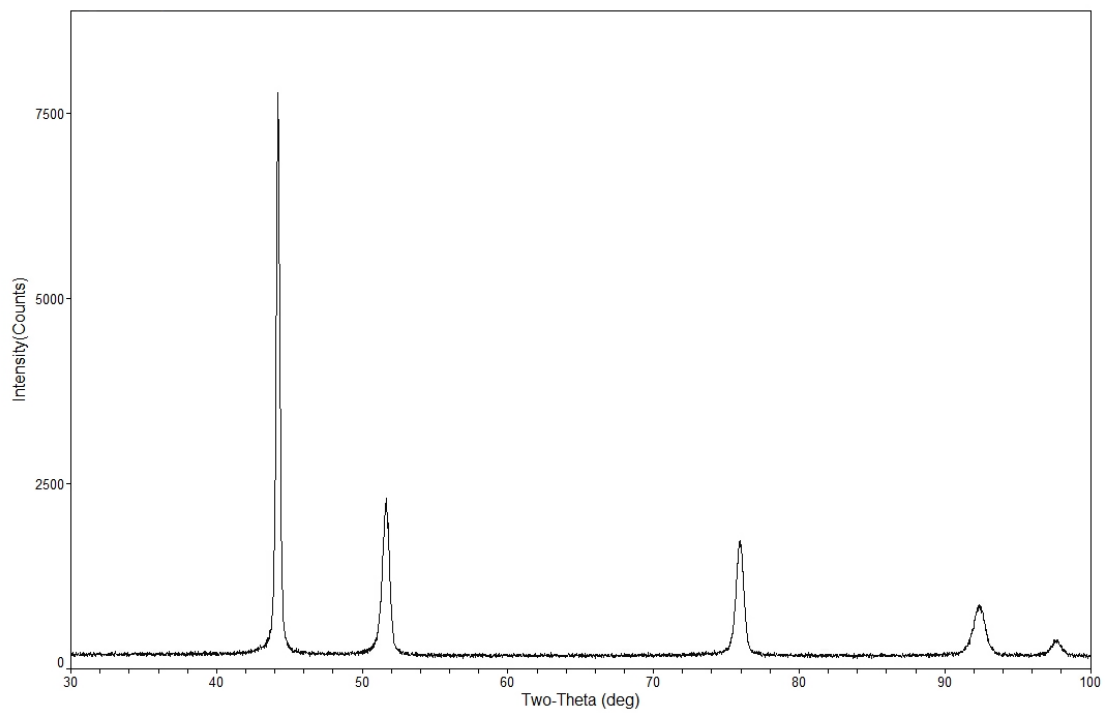


ภาคผนวก

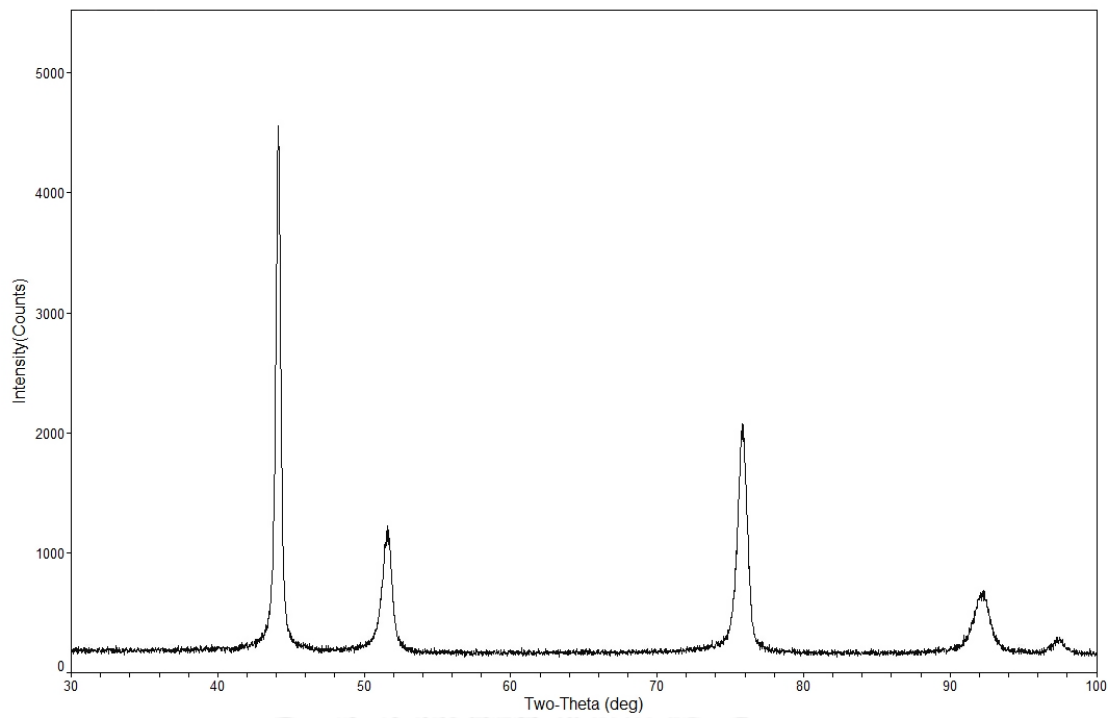
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



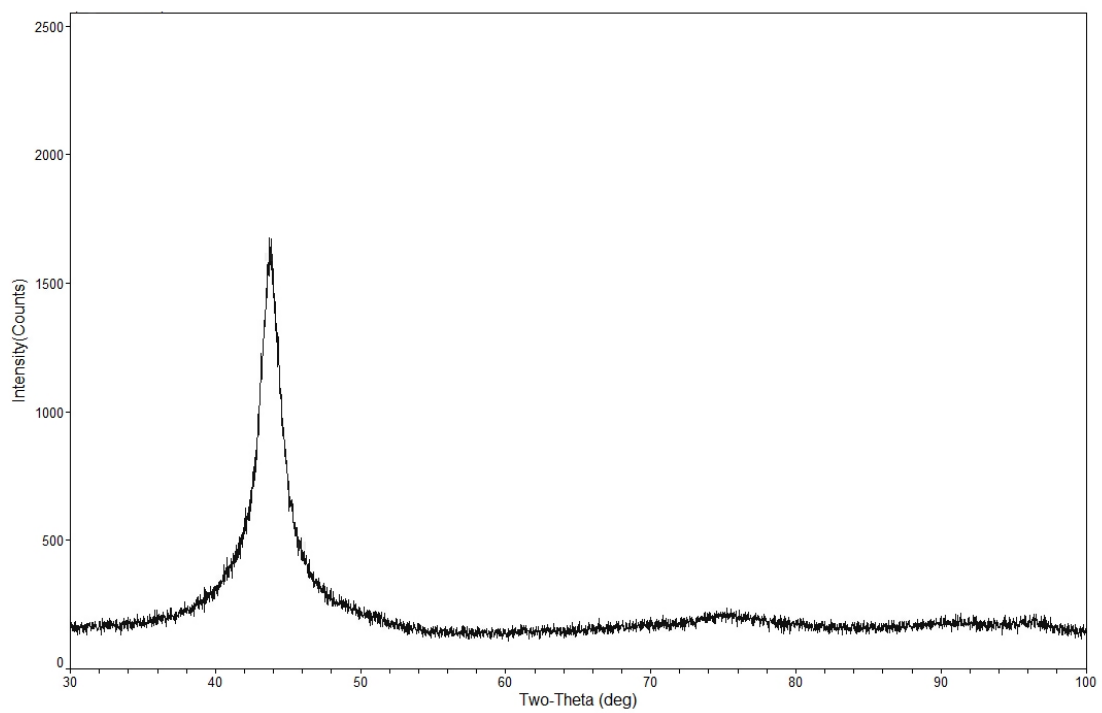
ภาพที่ ผ. 1 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน A



ภาพที่ ผ. 2 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน B



ภาพที่ ผ. 3 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน C



ภาพที่ ผ. 4 X-ray diffraction ของวัสดุ निकเกิลทั้งสแตน ชิ้นงาน D

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - นามสกุล นายณัฐดล อุดมปนิธ

วัน - เดือน - ปีเกิด 16 พฤษภาคม 2531

ที่อยู่ 2/58 ซอยลาดพร้าว17 แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

โทรศัพท์ติดต่อ 021400105



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY