

ผลของการอบอ่อนต่อสัณฐานและสมบัติเชิงกลของโลหะผสมนิกเกิล-ทังสแตน
ที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

นายนราศักดิ์ สันวัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EFFECT OF ANNEALING ON MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF
ELECTRODEPOSITED NICKEL-TUNGSTEN ALLOYS

Mr. Narasak Sunwang

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการอบอุ่นต่อสัญญาณและสมบัติเชิงกลของโลหะผสม
นิกเกิล-ทังสเตนที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

โดย นายนราศักดิ์ สันวัง

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชاکร จารุพิสิฐธร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.อัมพิกา บันลิตี)

นราศักดิ์ สันวัง : ผลของการอบอ่อนต่อสัณฐานและสมบัติเชิงกลของโลหะผสมนิกเกิล-ทังสเทนที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (EFFECT OF ANNEALING ON MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTRODEPOSITED NICKEL-TUNGSTEN ALLOYS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยมณีรัตน์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ.ดร.ปัญญาวัชร วังยาว, 86 หน้า.

วัสดุชุบไฟฟ้า นิกเกิล-ทังสเทน (Ni-W) โครงสร้างนาโนเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่การผลิตชิ้นงานชุบไฟฟ้า 3 ประเภท (A, B และ C) ซึ่งมีปริมาณทังสเทน 22, 13 และ 6 at.% ขนาดเกรน 3, 13 และ 56 nm ตามลำดับ รวมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานและสมบัติเชิงกลของวัสดุภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700-1100°C จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงปัจจัยของกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเคลือบ ซึ่งเหมาะต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยที่อุณหภูมิ 700°C พบว่าวัสดุ A (W 22 at.%) มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 7 GPa เป็น 10.5 GPa ซึ่งเกิดจาก Grain relaxation ระหว่างกรรมวิธีทางความร้อน แต่วัสดุ B และ C (W 13 และ 6 at.%) กลับพบว่าความแข็งลดลงจาก 6 GPa เป็น 5.2 GPa ความแข็งลดลงจาก 4.5 GPa เหลือ 2.1 GPa ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 900 และ 1100°C พบว่าวัสดุทุกประเภทมีความแข็งลดลงเกิดจากการโตของเกรน ทั้งนี้จากการตรวจสอบขนาดเกรนพบว่าวัสดุ A มีการโตของเกรน แต่อยู่ในระดับนาโนเมตร โดยที่ B และ C มีการโตเกรนสูงสุดในระดับไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า วัสดุประเภท A ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอที่ลดลง เนื่องจากเกิด Grain relaxation และกลไก การทดสอบการสึกหรอที่แตกต่างกันของวัสดุที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าและวัสดุที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่านิกเกิล-ทังสเทนชุบไฟฟ้าเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกิดการเปลี่ยนแปลงของ สัณฐานในลักษณะ การโตของเกรนรวมถึงการ ตกผลึกของ เฟสที่สอง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งและความต้านทานต่อการสึกกร่อน โดยวัสดุที่ปริมาณทังสเทนสูง (22 at.%) และมีขนาดเกรนระดับนาโนเมตรเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจาก โครงสร้างจุลภาคที่ค่อนข้างเสถียร และมีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง

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

5170346121 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : NICKEL-TUNGSTEN / ELECTRODEPOSITION / ANNEALING /

MECHANICAL PROPERTIES

NARASAK SUNWANG: EFFECT OF ANNEALING ON MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTRODEPOSITED NICKEL-TUNGSTEN ALLOYS. ADVISOR: YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D., CO-ADVISOR: PANYAWAY WANGYAO, Ph.D., 86 pp.

The microstructure and mechanical properties of electrodeposited nanostructured nickel-tungsten (Ni-W) alloys may be influenced by elevated temperatures. In this research, 3 sets of Ni-W alloy coatings (A, B and C), which have 22, 13, and 6 at.% of W, and grain size of 3, 13, and 56 nm, respectively, were fabricated, and the evolution of their microstructure and their mechanical response following annealing at 700-1100^oC were investigated. With the annealing temperature of 700^oC, specimen A (W 22 at.%) showed an increase of hardness from 7 GPa to 10.5 GPa owing to grain relaxation. Specimen B and C (W 13 and 6 at.%) however, showed decrement of hardness from 6 GPa to 5.2 GPa, and from 4.5 GPa to 2.1 GPa, respectively. At 900^oC and 1100^oC, the hardness of all specimens was reduced due to grain growth, At these stages, grain size of specimen A remained in the nano-regime, while that of B and C now fell into the micro-regime. It was also found that the wear resistance of specimen A declined after heat treatment, and grain relaxation and the dominant wear mechanisms explain the difference in wear performance observed in the as-plated and as-annealed specimens.

From this work, it has been thus found that Ni-W alloys experience grain growth and development of new phases, which correspondingly affect their hardness and wear resistance. The alloys with high tungsten content (22 at.%) and nano-sized grains are found suitable for use at elevated temperatures, as they are relatively stable and show high hardness at high temperatures.

Department:Metallurgical Engineering.....Student's Signature:

Field of Study: ...Metallurgical Engineering....Advisor's Signature:

Academic Year: 2011.....Co-advisor's Signature:.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ หลัก ดร.ยุททนต์ บุญยมณีรัตน์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ปัญญาวัชร วังยาว เป็นอย่างสูงสำหรับ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำต่างๆ และสละเวลาในการถ่ายทอดความรู้ แนวความคิดการศึกษางานวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย , รองศาสตราจารย์ ชวคร จารุพิสิฐธร และ ดร.อัมพิกา บันสิทธิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้คำแนะนำ ข้าพเจ้าในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองตลอดมาจนเสร็จงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและ พี่สาวของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจ คำแนะนำในการทำงานตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งสมาชิกวิจัย Poretege Research Group จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและเพื่อนนิสิตในระดับปริญญามหา บัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้ความร่วมมือและข้อมูล คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.1.1 นิกเกิล.....	4
2.1.2 ทังสเตน.....	5
2.1.3 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า.....	6
2.1.4 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะนิกเกิล-ทังสเตน.....	11
2.1.5 กรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า.....	13
2.1.6 พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุชุบเคลือบและการปรับปรุงผิวด้วยวิธีต่างๆ.....	16
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง	28
3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย.....	28
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย	29

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและการอภิปราย	35
4.1 การชุบเคลือบนิกเกิล-ทังสเทนโดยใช้เทคนิค Reverse pulse.....	35
4.1.1 ปริมาณของโลหะที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะการชุบแบบ Reverse Pulse....	35
4.1.2 ลักษณะของผิววัสดุชุบเคลือบที่มีปริมาณทังสเทนที่ต่างกัน.....	37
4.1.3 การตรวจสอบขนาดเกรนและเฟสที่เกิดขึ้นภายหลังทำการชุบเคลือบ ด้วยไฟฟ้าของนิกเกิล-ทังสเทน.....	39
4.1.4 การตรวจสอบสมบัติความแข็งของชั้นเคลือบภายหลังทำการ ชุบด้วยไฟฟ้า.....	40
4.2 กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมนิกเกิล-ทังสเทนที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า.....	41
4.2.1 ผลการศึกษากรรมวิธีทางความร้อนวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทนที่อุณหภูมิ 700°C....	42
4.2.2 ผลการศึกษากรรมวิธีทางความร้อนวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทนที่อุณหภูมิ 900°C....	47
4.2.3 ผลการศึกษากรรมวิธีทางความร้อนวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทนที่อุณหภูมิ 1100°C...	52
4.3 ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทน.....	56
4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุภายหลังการทดสอบ Ball on disk.....	57
4.3.2 การตรวจสอบปริมาณการสึกหรอของวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทน ภายหลังการทดสอบการสึกหรอ.....	58
4.3.3 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทน ภายหลังการทดสอบการสึกหรอ.....	61
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานของวัสดุชุบเคลือบด้วยใช้ไฟฟ้า.....	11
ตารางที่ 2.2 เทคนิคในการปรับปรุงผิวให้มีความต้านการสึกหรอที่ดี	16
ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่นของกระแสที่ส่งผลต่อปริมาณทั้งสแตน โดยใช้อุณหภูมิ 75 และ 85°C.....	20
ตารางที่ 2.4 ขนาดเกรนและสมบัติเชิงกลของวัสดุ Ni-W ภายหลังจากชุบไฟฟ้า.....	26
ตารางที่ 3.1 ปริมาณของสารเคมีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	30
ตารางที่ 4.1 ปริมาณทั้งสแตนของชั้นเคลือบนิเกิล-ทั้งสแตนในรูปแบบการชุบต่างๆ.....	35
ตารางที่ 4.2 Standard potential ของนิเกิลและทั้งสแตน.....	36
ตารางที่ 4.3 ความหนาของชั้นเคลือบนิเกิล-ทั้งสแตนเฉลี่ยภายหลังจากการวัดด้วย โปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ML ของกล้องจุลทรรศน์แสง.....	37
ตารางที่ 4.4 ความแข็งของชั้นเคลือบนิเกิล-ทั้งสแตน.....	40
ตารางที่ 4.5 ชื่อของชิ้นงานชุบนิกเกิล-ทั้งสแตน ภายหลังกรรมวิธีทาง ความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	42
ตารางที่ 4.6 ความแข็งภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700°C.....	44
ตารางที่ 4.7 ความแข็งภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 900°C.....	50
ตารางที่ 4.8 ความแข็งภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1100°C.....	54
ตารางที่ 4.9 ประเภทวัสดุนิเกิล-ทั้งสแตนที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ.....	56
ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยของนิเกิล-ทั้งสแตน.....	58
ตารางที่ 4.11 ปริมาตรการสึกหรอของวัสดุนิเกิล-ทั้งสแตน.....	61
ตารางที่ 4.12 ความร้อนที่เกิดของวัสดุนิเกิล-ทั้งสแตนแต่ละประเภท.....	64
ตารางที่ ก.1 ค่า FWHM ของวัสดุนิเกิล-ทั้งสแตนจากโปรแกรมในการ JADE 5 และค่าความคลาดเคลื่อน.....	73
ตารางที่ ก.2 จำนวน XRD ขนาดเกรนของวัสดุนิเกิล-ทั้งสแตน.....	78
ตารางที่ ข.1 การคำนวณหาขนาดเกรนด้วยวิธีการวัดจำนวนเกรนบนเส้นตรง.....	85

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 การจ่ายกระแสที่มีจ่ายกระแส Pulse ในรูปแบบคลื่นต่างๆ.....	9
ภาพที่ 2.2 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าในลักษณะแบบ Binary alloy และ Ternary alloy.....	10
ภาพที่ 2.3 แผนภูมิสมดุลเฟสของนิกเกิล-ทังสแตน.....	15
ภาพที่ 2.4 กลไกการสึกหรอแบบขัดสีในลักษณะต่างๆ.....	17
ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างการเกิดการสึกหรอแบบเชื่อมติดระหว่างวัสดุที่เป็นโลหะ.....	18
ภาพที่ 2.6 ระดับความเครียดของวัสดุที่เกิดการเสียรูป.....	18
ภาพที่ 2.7 ปริมาณของทังสแตนและอุณหภูมิที่ส่งผลกับขนาดผลึกที่เปลี่ยนแปลง.....	21
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของ Hall - Petch ของวัสดุ นิกเกิล-ทังสแตน ภายหลังการ ชุบเคลือบโดยใช้อุณหภูมิ 75 และ 85°C	21
ภาพที่ 2.9 อัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate) ของนิกเกิล-ทังสแตน ภาย หลังการทดสอบการสึกหรอแบบ Sliding wear เมื่อเทียบกับขนาด ของผลึกที่เปลี่ยนแปลง.....	22
ภาพที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient) ของนิกเกิล-ทังสแตน ที่ได้จากการชุบ 75 และ 85°C โดยใช้น้ำหนักในการทดสอบ 5 และ 10 N.....	23
ภาพที่ 2.11 ขนาดของเกรน XRD ของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	24
ภาพที่ 2.12 XRD ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 24 ชั่วโมงโดยมีปริมาณ ทังสแตน 21 at.%.....	25
ภาพที่ 2.13 Bright – field ของวัสดุ นิกเกิล-ทังสแตน จาก TEM โดยใช้วิธีการ Selected Area Diffraction (SAD).....	25
ภาพที่ 2.14 ปริมาตรการสึกหรอของวัสดุและความแข็งของวัสดุ เปรียบเทียบกับผล ที่ได้จากการคำนวณ Archard ซึ่งแมนด้วยเส้นประ.....	27
ภาพที่ 3.1 การจ่ายกระแสไฟ Reverse Pulse (ก) กำหนดช่วงเวลาจ่ายกระแสสลับ ชั่ว 1 มิลลิวินาที (ข) กำหนดช่วงเวลาจ่ายกระแสสลับชั่ว 6 มิลลิวินาที (ค) กำหนดช่วงเวลาจ่ายกระแสสลับชั่ว 9 มิลลิวินาที.....	31
ภาพที่ 3.2 การติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ในการชุบเคลือบ นิกเกิล – ทังสแตน ด้วยใช้ไฟฟ้า.....	32
ภาพที่ 3.3 กรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุ นิกเกิล-ทังสแตน ในสภาวะความร้อนต่างๆ.....	32

ภาพที่ 3.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอบแบบ Ball on disk.....	34
ภาพที่ 4.1 ปริมาณทั้งสเดนที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการจ่าย กระแส Reverse Pulse ที่ต่างกัน.....	36
ภาพที่ 4.2 ภาพตัดขวางวัสดุที่ผ่านการชุบนิกเกิล-ทั้งสเดนด้วยไฟฟ้าประเภท A (ก) ประเภท B (ข) และประเภท C (ค).....	37
ภาพที่ 4.3 ลักษณะของพื้นผิวชั้นเคลือบนิกเกิล-ทั้งสเดน A (ก), B (ข) และ C (ค).....	38
ภาพที่ 4.4 XRD ขนาดเกรนที่มีปริมาณทั้งสเดนต่างกัน.....	39
ภาพที่ 4.5 XRD ของวัสดุนิกเกิล-ทั้งสเดน A, B และ C	40
ภาพที่ 4.6 XRD ของวัสดุนิกเกิล-ทั้งสเดน A, B และ C ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700 ⁰ C.....	43
ภาพที่ 4.7 XRD ขนาดเกรนของวัสดุประเภทต่างๆ ภายหลัง กรรมวิธีทางความร้อนที่ 700 ⁰ C	43
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของ XRD ขนาดเกรนและความแข็งของวัสดุแต่ละประเภท ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 ⁰ C เวลา 1 ชั่วโมง.....	45
ภาพที่ 4.9 DSC การคายพลังงานของวัสดุนิกเกิล-ทั้งสเดนที่อุณหภูมิ 300 ⁰ C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีขนาดเกรนเริ่มต้น 3, 20 และ 70 nm	46
ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน XRD และความแข็งวัสดุประเภท A ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 ⁰ C	47
ภาพที่ 4.11 XRD ของวัสดุนิกเกิล-ทั้งสเดน A, B และ C ภายหลัง กรรมวิธีทางความร้อน 900 ⁰ C	47
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ A-900-0.5 (ก), A-900-1(ข), A-900-3 (ค), B-900-1(ง) และ C-900-1 (จ).....	48
ภาพที่ 4.13 ขนาดเกรน XRD และขนาดเกรนจากวิธีการนับจำนวนเกรนบน เส้นตรงของวัสดุประเภทต่างๆ ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 900 ⁰ C.....	49
ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของ XRD ขนาดเกรนและความแข็งของวัสดุแต่ละ ประเภทภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 ⁰ C เวลา 1 ชั่วโมง.....	51
ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน XRD และความแข็งวัสดุประเภท A ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900 ⁰ C	52

ภาพที่ 4.16 XRD ของวัสดุ निकเกิล-ທັງສເຕນ A, B และ C ภายหลังกกรรมวิธี ทางความร้อนที่ 1100°C	52
ภาพที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ A-1100-0.5 (ก), A-1100-1(ข), A-1100-3 (ค), B-1100-1(ง) และ C-1100-1 (จ).....	53
ภาพที่ 4.18 ขนาดเกรน XRD และขนาดเกรนจากวิธีการนับจำนวนเกรนบนเส้นตรงของ วัสดุประเภทต่างๆ ที่ภายหลังกกรรมวิธีทางความร้อน 1100°C	54
ภาพที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของ XRD ขนาดเกรนและความแข็งของวัสดุแต่ละประเภท ภายหลังกกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1100°C เวลา 1 ชั่วโมง.....	55
ภาพที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน XRD และความแข็งวัสดุประเภท A ภายหลังกกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1100°C	56
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบ การสึกหรอของวัสดุ निकเกิล-ທັງສເຕນแต่ละประเภท.....	57
ภาพที่ 4.22 ลักษณะของพื้นที่และการหาความยาวเส้นรอบวงของ Wear track.....	58
ภาพที่ 4.23 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการ คำนวณของวัสดุประเภท A ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข).....	59
ภาพที่ 4.24 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการ คำนวณของวัสดุประเภท A-700-0.5 ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข).....	59
ภาพที่ 4.25 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการ คำนวณของวัสดุประเภท A-900-0.5 ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข).....	60
ภาพที่ 4.26 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการ คำนวณของวัสดุประเภท A-1100-0.5 ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข).....	60
ภาพที่ 4.27 ลักษณะพื้นผิวของ Wear track ของวัสดุ निकเกิล-ທັງສເຕນของประเภท A (ก) ประเภท A-700-0.5 (ข) ประเภท A-900-0.5 (ค) ประเภท A-1100-0.5 (ง).....	65
ภาพที่ 4.28 ความแข็งของวัสดุเคลือบ निकเกิล-ທັງສເຕນก่อนการทดสอบความต้านทาน การสึกหรอและความแข็งบริเวณ Wear track.....	67
ภาพที่ ก.1 การหาสมการความสัมพันธ์เพื่อหาขนาดเกรน XRD	78
ภาพที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ທັງສເຕນประเภท B-900-1.....	84
ภาพที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ທັງສເຕນประเภท C-900-1.....	84
ภาพที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ທັງສເຕນประเภท B-1100-1.....	84
ภาพที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ທັງສເຕນประเภท C-1100-1.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปรับปรุงผิววัสดุโดยการชุบเคลือบผิวด้วยโครเมียมเป็นกระบวนการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานคือ 1.การชุบเพื่อความสวยงามและป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งมีการชุบหลายลักษณะเช่น Decorative bright chromium plating, Decorative black หรือ Colour chromium plating 2.การชุบเพื่อใช้ในงานที่ต้องการเพิ่มสมบัติทางด้านเชิงกล เช่น การชุบบแบบ Hard chromium deposition อย่างไรก็ตามได้พบว่ากระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยโครเมียมเป็นอันตรายแก่สิ่งแวดล้อมและผู้ปฏิบัติงาน บังคับงานเนื่องจากความเป็นพิษของ Hexavalent chromium (Cr^{6+}) [1] จึงได้มีความพยายามในการพัฒนาวัสดุชนิดเกิดและชนิดเกิดอัลลอยมาใช้ทดแทนโครเมียม ทั้งนี้เนื่องจากโดยทั่วไปชนิดเกิดเป็นโลหะที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี อย่างไรก็ตามชนิดเกิดที่มีโครงสร้าง Microcrystalline นั้นมีความแข็งที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับโครเมียม ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลโดยการเติมธาตุผสมทั้งสแตนซึ่งจะทำให้โครงสร้างผลึกที่ได้มีลักษณะเป็นวัสดุโครงสร้างนาโน (Nanocrystalline) ที่มีความแข็งสูง และสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น ในปัจจุบันได้เริ่มมีการใช้งานวัสดุชนิดนี้โดยเป็นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และมีแนวโน้มการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น

ถึงแม้ว่าได้มีการศึกษาการผลิตและสมบัติของวัสดุชนิดนี้ที่อุณหภูมิห้องบ้างแล้ว อย่างไรก็ตามก็ตามการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของชนิดเกิด-ทั้งสแตนยังมีอยู่โดยจำกัด ทั้งนี้อุณหภูมิถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากบ่อยครั้งที่วัสดุจะถูกนำไปใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ยกตัวอย่างเช่น เป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell) ที่มีลักษณะ การใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า $800^{\circ}C$ [2] หรือการขึ้นรูปวัสดุโดยใช้วิธีการเชื่อมวัสดุซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงในบริเวณที่เกิด Heat affected zone(HAZ) เป็นต้น [3] ในกรณีของวัสดุโครงสร้าง Nanocrystalline ของโลหะบริสุทธิ์ที่มีสภาวะการใช้งานที่ได้รับความร้อน พบว่าระบบจะมีความไม่เสถียร (Non-Stabilize) สูง แต่วัสดุที่มีโครงสร้าง นาโนที่เป็นโลหะผสมของชนิดเกิด – ทั้งสแตนจะเป็นระบบที่มีความเสถียรของระบบสูงกว่าโลหะบริสุทธิ์ เนื่องจากมีการลดระดับพลังงานจากการ Segregation ของธาตุผสม แต่ถึงอย่างไรก็ตามระบบของวัสดุชนิดเกิด – ทั้งสแตนก็ยังคงเข้าใกล้กับความไม่สมดุลเนื่องจากมีปริมาณของขอบเกรน (Volume fraction Grain boundary area) จำนวนมาก การนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงจึงมีโอกาสที่ทำให้เกิดการโตของเกรน (Grain growth) [4] โดยเกรนที่มีขนาดใหญ่จะทำให้วัสดุมีความแข็ง

และความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้หากพิจารณาจากแผนภูมิสมดุลเฟส (Equilibrium Phase diagram) โลหะนิกเกิล-ทังสเตนในช่วงอุณหภูมิและปริมาณธาตุผสมที่สูงพบว่านิกเกิล-ทังสเตนสามารถเกิด เฟสของสารประกอบเชิงโลหะที่มีความแข็งแรงสูงได้ จากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน และการเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะที่อาจส่งผลต่อสมบัติของวัสดุด้านความแข็งแรงและความแข็งแรง จะเห็นได้ว่ากรรมวิธีทางความร้อนอาจสามารถปรับใช้เพื่อเป็นวิธีพัฒนาและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของนิกเกิล-ทังสเตนได้อีกทางหนึ่งด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในการศึกษากรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุชุบเคลือบผิวนิกเกิล-ทังสเตน เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง คือปริมาณทังสเตน อุณหภูมิ และเวลาของกรรมวิธีทางความร้อน ที่ส่งผลต่อ โครงสร้างจุลภาคหรือเฟสของสารประกอบที่เกิดขึ้นรวมถึงสมบัติเชิงกล โดยเลือกศึกษาวัสดุที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการชุบเคลือบด้วยใช้ไฟฟ้า (Electrodeposition) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมขนาดเกรน ซึ่งขนาดเกรนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของธาตุผสมที่เพิ่มขึ้น โดยการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบผิวแบบใช้ไฟฟ้าและนอกจากนี้ข้อดีอีกส่วนหนึ่งของวิธีนี้คือ เนื่องจากว่าเป็นกระบวนการซ่อมบำรุงที่สามารถทำการแก้ไขหรือปรับปรุงวัสดุที่เกิดการเสียหาย ภายหลังการใช้งาน ซึ่งจะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตวัสดุขึ้นมาใหม่ นอกจากนี้ลักษณะของผิวเคลือบที่ได้จะมีความสม่ำเสมออีกด้วย จึงถือว่าเป็นกระบวนการที่เหมาะสม สามารถควบคุมได้ง่ายและให้คุณภาพที่ดี โดยภายหลังจากการผลิตชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยวัสดุ นิกเกิล-ทังสเตน ในส่วนต่อไปคือการให้ความร้อนแก่วัสดุในสภาพบรรยากาศก๊าซเฉื่อย

จากแนวทางขององค์ความรู้ที่จะได้จากงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและสมบัติของวัสดุชุบเคลือบ ซึ่งทำให้สามารถรู้ถึงสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานวัสดุประเภทนี้ที่อุณหภูมิสูงอย่างมีประสิทธิภาพ และที่สำคัญจะนำไปสู่การพัฒนาวัสดุโลหะผสมนิกเกิล – ทังสเตนที่ผลิตจากกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าและผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรในการชุบเคลือบผิวและการให้ความร้อน ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณของทั้งสแตน อลูมิเนียม เวลาของกรรมวิธีทางความร้อน ที่มีผลต่อ อัดแน่นที่เกิดขึ้นในวัสดุ นิกเกิล-ทั้งสแตน
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัดแน่นโลหะนิกเกิล – ทั้งสแตนที่ส่งผลกับสมบัติความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าในน้ำยาอิเล็กโตรไลต์โลหะนิกเกิล - ทั้งสแตน และใช้นิกเกิล เป็นวัสดุพื้น
2. ศึกษากรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมนิกเกิล – ทั้งสแตนในสภาพบรรยากาศแก๊ส ไนโตรเจน (ความบริสุทธิ์ 99.999%)
3. ศึกษาสมบัติความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถรู้ถึงอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งมีลักษณะ แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่ออัดแน่นของวัสดุชั้นเคลือบผิวที่เกิดขึ้นได้
2. สามารถรู้ถึงผลของอัดแน่นที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ นิกเกิล-ทั้งสแตนได้

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ทฤษฎีของงานวิจัยนี้จะมีความเกี่ยวข้องกับสมบัติของโลหะนิเกิลและทั้งสแตนที่ใช้เป็นวัสดุในการทดลอง การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะวัสดุพื้น รวมถึงกรรมวิธีทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ

2.1.1 นิกเกิล

2.1.1.1 สมบัติทั่วไปของนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมันวาวสีขาวยเงิน เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนสูง มีความเหนียวสูงสามารถขึ้นรูปได้ง่าย นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว ประมาณ 60% ของนิกเกิลจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ส่วนที่นอกเหนือจากนั้นจะใช้นิกเกิลผสมใช้งานลักษณะพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูง และใช้ชุบเคลือบวัสดุ โดยอาศัยสมบัติที่ทนการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สมบัติของนิกเกิลจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงและอะลูมิเนียม แต่ก็สามารถใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ หากในบรรยากาศที่ใช้งานมีกำมะถันอาจทำให้นิกเกิลเปราะและแตกหักได้ง่าย โดยทั่วไปไม่นิยมนำนิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์มาใช้เนื่องจากราคาสูง [5]

ลักษณะของนิกเกิลในแร่ธรรมชาติจะเกิดร่วมกับกำมะถัน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นแร่ มิลเลอร์ไรต์ (Millerite) หรืออาจเกิดกับสารหนู (Arsenic) แล้วเกิดปฏิกิริยาอยู่ในแร่นิคโคไลต์ (Nicolite) แต่หากนิกเกิลทำปฏิกิริยาทั้งกำมะถันและสารหนูจะอยู่ในรูปของแร่นิคเกิลกลานซ์ (Nickel glance) แร่ นิกเกิลถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2294 ในประเทศรัสเซีย โดยประเทศที่ทำการผลิตแร่ นิกเกิลรายใหญ่ของโลกในปัจจุบันได้แก่ รัสเซีย รองลงมาคือ แคนาดา ออสเตรเลีย อินโดนีเซีย จีน ฟิลิปปินส์ และทางตอนเหนือของประเทศพม่า

สมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	58.69 g/mol
ระบบผลึก (Crystal Structure)	FCC (Face center cubic)
อุณหภูมิหลอมเหลว	1455°C

อุณหภูมิกลายเป็นไอ (Boiling point)	2913°C
ความหนาแน่น (อุณหภูมิห้อง)	8.91 g/cm ³
ความร้อนจำเพาะ (25°C)	26.07 J/mol.K
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	17.48 KJ/mol
สัมประสิทธิ์การขยายตัว(25°C)	13.4 μm/m.K
สภาพตัวนำความร้อน (27°C)	90.9 W/m.K

2.1.2 ทังสเตน

2.1.2.1 สมบัติทั่วไปของทังสเตน

ทังสเตน (Tungsten) หรือวูลแฟรม (Wolfram) ซึ่งมาจากภาษาลาตินเป็นธาตุโลหะทรานซิชันสีเทาแข็งและหนัก มักพบในลักษณะที่ประกอบด้วยแร่หลายชนิด ลักษณะของสินแร่ทังสเตนที่ถูกค้นพบในประเทศไทยมีด้วยกันอยู่ 2 ประเภท คือวูลแฟรมไมต์ (Wolframite) และซีไลต์ (Scheelite) โดยทังสเตนที่อยู่ในรูปของวูลแฟรมไมต์จะมีสูตรเคมี $(Fe,Mn)WO_4$ โดยมีโครงสร้างผลึกในระบบโมโนคลินิก (Monoclinic) ทรงปริมาตร 2 ด้านประกบกัน ส่วนแร่ซีไลต์มีสูตรทางเคมี $CaWO_4$ ซึ่งประกอบด้วย CaO 19.4 % และประกอบด้วย WO_3 80.6 % มีโครงสร้างผลึกในระบบเตทราโกนอล (Tetragonal) เนื้อแร่มีลักษณะโปร่งแสง โดยจะเรืองแสงเมื่ออยู่ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งการเกิดของแร่ทังสเตนมักมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับหินแกรนิตมักพบในสายแร่เพกมาไทต์ สายแร่ควอตซ์ โดยทังสเตนจะแทรกตัวอยู่ในชั้นหินแกรนิตจะเกิดร่วมกับแร่ดีบุก โดยเฉพาะมักพบในบริเวณที่เป็นส่วนสัมผัสของหินแกรนิตกับหินปูนจะมีแร่ซีไลต์ขนาดใหญ่ แหล่งทังสเตนที่พบในประเทศไทย คือ ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้

แร่ทังสเตนในชนิดวูลแฟรมไมต์และซีไลต์ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวกับ ชิ้นส่วนบริเวณผิวสัมผัสของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีขนาดเล็กได้ [6] หากป้องกันความร้อนหรือรังสีในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องกำเนิดเอกซเรย์ เต้าอุณหภูมิสูง หรืองานที่ต้องการความแข็งแรงสูง มาใช้เป็นเกราะในยานพาหนะ อากาศสงคราม ทำใบมีดตัด ตะไบตกแต่งชิ้นงาน ส่วนประกอบในใบเลื่อย ซึ่งนอกจากนั้นยังมีการนำธาตุผสมที่เพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้นเช่น คาร์บอน นิกเกิล และโคบอลต์ เพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงและแข็งแรงให้สูงขึ้น ซึ่งนอกจากประโยชน์ของทังสเตนในด้านของเชิงกลที่ได้นำมาใช้งานอย่างแพร่หลายแล้ว ในส่วนของสมบัติที่สามารถเรืองแสงได้นำมาใช้ประโยชน์ทำเป็นวัสดุที่ใช้อยู่ อมสีของผ้าไหม ตกแต่งเครื่องแก้ว เครื่องปั้นดินเผา และหลอดภาพโทรทัศน์

สมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	183.84 g/mol
ระบบผลึก (Crystal Structure)	BCC (Body center cubic)
อุณหภูมิหลอมเหลว	3422°C
อุณหภูมิกลายเป็นไอ (Boiling point)	5555°C
ความหนาแน่น (อุณหภูมิห้อง)	19.25 g/cm ³
ความร้อนจำเพาะ (25°C)	24.27 J/mol.K
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	52.31 KJ/mol
สัมประสิทธิ์การขยายตัว(25°C)	4.5 μm/m.K
สภาพตัวนำความร้อน (27°C)	173 W/m.K

2.1.3 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการชุบที่ต้องการให้โลหะในสารละลาย ของอิเล็กโตรไลต์ ที่อยู่ในสภาวะโลหะที่เป็นอ็อกไซด์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) คือเกิดการรีดิวซ์ อิเล็กโตรดแล้วทำการเคลือบบนผิววัสดุที่ขั้วลบหรือแคโทด (Cathode) ส่วนขั้วบวกหรือแอโนด (Anode) ใช้แท่งแพลทินัมซึ่งจะไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นเพียงสะพานให้ไฟฟ้าผ่านได้เท่านั้น

ในกระบวนการ ชุบเคลือบ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโตรไลต์ อนุภาคของอิเล็กโตรไลต์จะวิ่งไปยังแอโนด และก็มีอนุภาคอีกพวกหนึ่งของอิเล็กโตรไลต์จะวิ่งไปยังแคโทด อนุภาคเล็กๆของอิเล็กโตรไลต์ที่วิ่งไปยังขั้วบวกหรือขั้วลบดังกล่าวแล้วนั้นเรียกว่า อิออน (Ion) แต่ละอิออนจะมีประจุไฟฟ้าประจำทุกตัว อิออนที่วิ่งไปยังขั้วบวกเรียกว่า แอนไอออน (Anions) จะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (-) ส่วนอิออนที่วิ่งไปยังขั้วลบเรียกว่า แคทไอออน (Cations) จะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก (+) ขณะที่เกิดการแยกสลายดังกล่าวในสารละลายนั้น จะมองไม่เห็นปฏิกิริยาใดๆเกิดขึ้นในสารละลายนั้นเลยแต่จะไปเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือขั้วบวก ตัวอย่างเช่นในสารละลายของอิเล็กโตรไลต์บางชนิดที่ใช้แผ่นขั้วแพลทินัมเป็นขั้วบวกและลบ เมื่อต่อแผ่นขั้วทั้งสองเข้ากับแบตเตอรี่ให้ครบวงจร จะปรากฏว่ามีฟองแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก และมีฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วลบเป็นต้น

2.1.3.1 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

กระบวนการชุบเคลือบที่ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่กระตุ้นให้สารละลาย อิเล็กโทรไลต์เกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสผ่าน สามารถใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการเพื่อกำหนดลักษณะปริมาณหรือความหนา ของชั้นผิวเคลือบ จากกฎของฟาราเดย์ ดังนี้

1. ปริมาณน้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยเป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าย่อมเป็นไปตามสัดส่วน โดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

2. น้ำหนักของไอออนชนิดต่างๆ ที่ถูกปล่อยอิสระโดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆ กันย่อมเป็น สัดส่วนโดยตรงกับสมมูลยศาสตร์ของไอออนนั้น

จากกฎข้อที่หนึ่ง สามารถนำมาใช้ในการชุบโลหะได้ คือ ถ้าต้องการให้โลหะมาเกาะที่ ความหนาจำนวนหนึ่ง อาจจะทำได้ 2 วิธีคือใช้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ แล้วใช้เวลานานๆ หรือ อาจใช้ กระแสไฟฟ้ามากๆ แต่ใช้เวลาสั้นๆ ก็จะได้โลหะไปเกาะจับที่แคโทดมีปริมาณ เท่ากัน ในส่วนของ กฎข้อที่สองทำให้ทราบว่าโลหะแต่ละชนิดมีสมบัติในการแยกสลายไม่เหมือนกัน กล่าวคือ ใน ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่าๆ กัน โลหะแต่ละชนิดจะแยกสลายออกมามีปริมาณไม่เท่ากัน โดย ความสามารถในการจะแยกสลายได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติประจำตัว หรือสมมูลยศาสตร์ของ โลหะนั้นๆ

2.1.3.2 ประสิทธิภาพของขั้วลบและขั้วบวก

จากกระบวนการผลิตจริงได้พบว่าผลภายหลังการชุบที่ได้มีปริมาณของโลหะที่มาเกาะที่ขั้ว แคโทดน้อยกว่าที่ทฤษฎีตามกฎของฟาราเดย์ข้อที่ 1 ซึ่งจากการทดสอบทำให้ทราบว่ากระบวนการ จริงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปยังน้ำยาชุบสารละลายของอิเล็กโทรไลต์นั้น ไม่ได้ใช้ในการแยกสลาย ให้แคโทดไอออนไปเกาะที่แคโทดแต่อย่างเดียว หากแต่ต้องสิ้นเปลืองไปกับการแยกสลายสิ่งอื่นๆ ที่มี ในน้ำยาอีก เช่น แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น โดยหากเอาน้ำหนักของแคโทดไอออนที่ไปเกาะที่ ขั้วลบอย่าง แท้จริงมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแคโทดไอออนที่ควรไปเกาะที่ขั้วลบตามทฤษฎีก็จะสามารถ ทราบถึงประสิทธิภาพของขั้วลบได้ ประสิทธิภาพขั้วลบของน้ำยาชนิดต่างๆ จะแตกต่างกันออกไป เช่น น้ำยาชุบโครเมียมจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำมากคือประมาณ 10 ถึง 25% น้ำยาชุบเงินมี ประสิทธิภาพขั้วลบสูงมากเกือบ 100% เต็มและในน้ำยาชุบดีบุกประสิทธิภาพขั้วลบจะประมาณ 50 ถึง 75%

2.1.3.3 ค่าของพีเอช (pH Values)

สูตรของน้ำบริสุทธิ์หนึ่งโมลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม เมื่อมีการแตกแยกจะได้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ดังสมการ 2.1



ในน้ำบริสุทธิ์ ค่าของไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งในสภาพนี้น้ำนั้นจะมีค่าเป็นกลาง คือไม่เป็นกรดหรือด่างแต่ ถ้าในน้ำยาชุป สารละลายของ อิเล็กโตรไลต์มีไฮโดรเจนไอออนมากกว่าไฮดรอกซิลไอออนน้ำยาชุปนั้นจะมีสภาพเป็นกรด และในทางตรงกันข้าม ถ้าในน้ำยาชุปมีไฮดรอกซิลไอออนมากกว่าไฮโดรเจนไอออนน้ำยาชุปนั้นก็จะมีสภาพเป็นด่าง

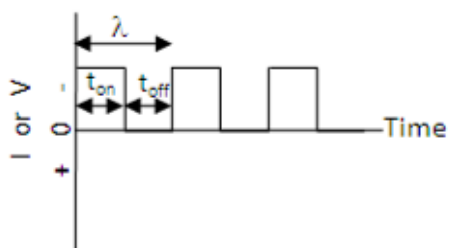
ค่าของ pH มีอิทธิพลต่อน้ำยาชุปโลหะมาก กล่าวคือถ้าค่าของ pH น้อย แสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นกรดมากเกินไปจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแคโทดลดต่ำลง ถ้าค่าของ pH มาก แสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นด่างมากเกินไปจะมีผลให้ประสิทธิภาพของแอโนดลดต่ำลง เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ค่า pH เป็นสิ่งที่สำคัญมากในกระบวนการผลิตจึงควรควบคุม pH ให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะ

ความหนาแน่นของกระแสของขั้วลบ คือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบที่ขั้วลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ปกติมักจะใช้แอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของแคโทด เพื่อทราบว่าจะจ่ายความหนาแน่นของกระแสแตกต่างกันออกไป แล ะงานแต่ละชิ้นก็มีเนื้อที่ต่างๆกัน ด้วยเหตุนี้ ความหนาแน่น กระแสและ พื้นที่ชิ้นงานจึงควรต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกเสมอ [7]

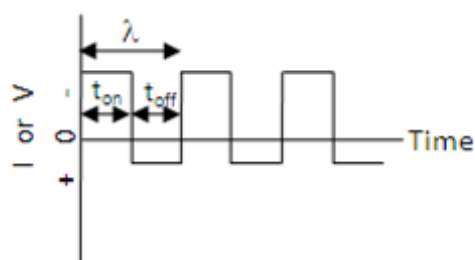
2.1.3.4 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าในลักษณะการจ่ายกระแสแบบ Pulse

การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าโดยทั่วไปจะการจ่ายกระแสบวกตลอดเวลาในการชุบเคลือบ แต่การจ่ายกระแสแบบ Pulse จะมีการจ่ายกระแสบวกและลบในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของกระแสเคลือบผิวของไอออนที่วัสดุพื้นหรือเป็นการกระจายความเข้มข้นของกระแส (Current distribution) ได้ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ผิวเคลือบหลังการชุบมีลักษณะสม่ำเสมอและมีความเงาเพิ่มขึ้น

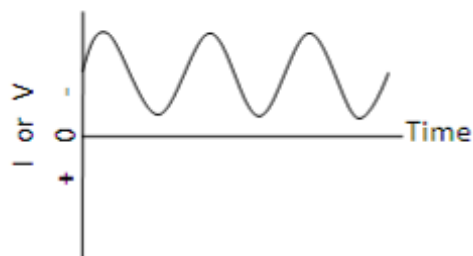
โดยลักษณะการจ่ายกระแสแบบ Pulse ได้แสดงในรูปแบบคลื่น (Wave form) ออกเป็น 3 แบบการจ่ายกระแส ดังภาพที่ 2.1



การจ่ายกระแส Pulse แบบ Rectangular Pulses (ก)



การจ่ายกระแส Pulse แบบ Periodic-Reverse Pulses (ข)



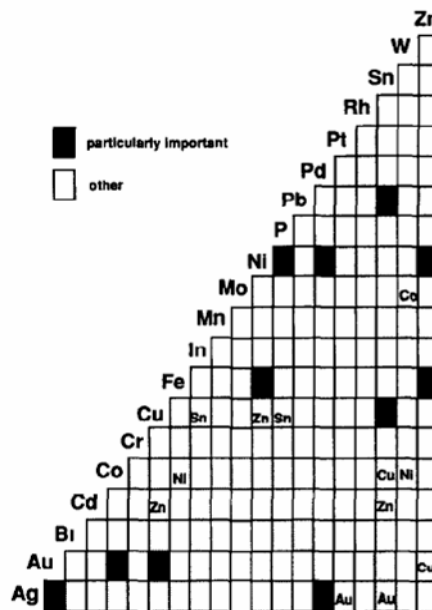
การจ่ายกระแส Pulse แบบ Symmetric Sinusoidal Pulses (ค)

ภาพที่ 2.1 การจ่ายกระแสที่มีจ่ายกระแส Pulse ในรูปแบบคลื่นต่างๆ

(ก) การจ่ายกระแสที่แยกออกเป็นสองส่วน คือ ช่วงที่จ่ายกระแสซึ่งแทนเวลาในช่วงนี้ด้วย t_{on} และช่วงที่สองคือ ช่วงที่เป็นการหยุดจ่ายกระแสแทนเวลาในช่วง นี้ด้วย t_{off} และแทนช่วงรอบ (cycle) การจ่ายกระแสด้วย λ ส่วนภาพ (ข)การจ่ายกระแสสลับกันระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ โดยที่ช่วงการจ่ายกระแสไปที่ขั้วบวกแทนด้วย t_{on} และช่วงที่สองคือช่วงที่จ่ายกระแสไปยังขั้วลบแทนด้วย t_{off} ภาพ (ค) การจ่ายกระแสที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นซึ่งทำให้มีการจ่ายกระแสขึ้นงานไม่คงที่ [8]

2.1.3.5 กระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะผสม

การชุบเคลือบของโลหะผสมเป็นวิธีการพัฒนาวัสดุอีกอย่างหนึ่งเพื่อให้มีสมบัติที่หลากหลาย นอกจากนั้นวัสดุเหล่านี้ยังสามารถทำการชุบในลักษณะของ Thin film (ที่มีความหนา ระหว่าง 1 ถึง 100 nm) หรือสามารถชุบในลักษณะที่เป็นชิ้นงานขนาดใหญ่ (ความหนาระดับ ไมโครเมตร) จึงทำให้วัสดุประเภทนี้สามารถใช้งานได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้ได้กับโลหะผสมทุกระบบได้ เช่นโลหะผสมในบางระบบไม่สามารถชุบระบบ Binary alloy ได้ เช่น ระบบโลหะผสมของทั้งสแตนกับโมลิบดีนัมที่ต้องชุบในระบบ Ternary alloy ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มโคบอลต์ไปด้วยจึงสามารถชุบได้ โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการชุบเคลือบที่เป็นแบบโลหะผสมกันอย่างแพร่หลาย ดังจะเห็นได้จากการชุบโลหะผสมสังกะสี การชุบโลหะผสมดีบุกหรือการชุบโลหะผสมนิกเกิล โดยจากภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันที่ขึ้นอยู่กับสมบัติของโลหะผสมที่เหมาะสมกับงานต่างๆ ดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าในลักษณะแบบ Binary alloy และ Ternary alloy

โดยสีดำแทนธาตุผสมที่มีความสำคัญ และในส่วน พื้นที่ที่มีการระบุธาตุผสมที่สามลงไปแสดงว่าเป็นระบบที่ต้องทำการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบ Ternary alloy เท่านั้น [9]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานของวัสดุชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า [10]

ประเภทวัสดุ	ลักษณะการใช้งาน
Ni, Ni-P, Ni-Mo, Ni-Zn, Ni-Fe	ป้องกันการกัดกร่อน
Ni-Fe-Cr	ผลิตวัสดุแม่เหล็ก, Catalysts
Ni-Al ₂ O ₃ , Ni-SiC	ป้องกันการกัดกร่อน, วัสดุต้านทานการสึกหรอ
Co, Co-W, Co-P	ผลิตวัสดุแม่เหล็ก,
Pd, Pd-Ni	ชิ้นส่วนของ Fuel cells

2.1.4 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะนิกเกิล-ทังสเทน

2.1.4.1 กระบวนการผลิตชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะนิกเกิล-ทังสเทน

1. การเตรียมผิวชิ้นงานวัสดุพื้นโดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้นิกเกิล ซึ่งวัสดุพื้นจะเป็นขั้วแคโทด ในกระบวนการชุบไฟฟ้าจะมีจ่ายกระแสไฟซึ่งทำให้แคโทดอ่อนไปแลกเปลี่ยนประจุและเกาะที่ผิววัสดุพื้น ซึ่งความเรียบผิวและความสะอาดถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นเคลือบอย่างมาก โดยความเรียบผิวของวัสดุพื้นสามารถเตรียมได้หลายวิธีเช่น วิธีทางกลด้วยกระดาษทราย การขัดด้วยผงเพชร หรือการเตรียมผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยการจุ่มวัสดุพื้นในสารละลายที่แตกต่างกัน เช่น กรดไนตริก (Nitric acid) หรือกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และใช้วัสดุพื้นที่ต่อเข้ากับขั้วแอโนดซึ่งจะทำให้เกิดการละลายของขั้วแอโนดมายังน้ำยาชุบ อิเล็กโตรไลต์ [11] ในส่วนการทำทำความสะอาดผิวมักจะใช้อัลคาไลด์ (Alkaline) ในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน ส่วนกรดนิยมทำความสะอาดผิวในกรณีที่คาดว่าจะมีสารประกอบออกไซด์ที่ผิว

2. การเตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ในปัจจุบันมีการพัฒนากันมากเพื่อให้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยส่วนผสมหลักดังนี้คือ

- แหล่งของนิกเกิล (Nickel source) เป็นสารเคมีสารละลายอิเล็กโตรไลต์มีหน้าที่แตกตัวเป็นแคโทดของนิกเกิลไปจับที่ขั้วแคโทดหรือวัสดุพื้น สารเคมีที่ใช้เป็นแหล่งของนิกเกิล ได้แก่ Nickel sulfate hexahydrate

- แหล่งของทังสเตน (Tungsten source) เป็นสารเคมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการแตกตัวให้แคทไอออนของทังสเตนไปจับที่วัสดุพื้น สารเคมีที่ใช้ได้แก่ Sodium tungsten dihydrate

- Complexing agent เป็นสารที่ทำหน้าที่ให้เกิดโลหะอิออนเชิงซ้อนระหว่างนิกเกิลและทังสเตน ได้แก่ กรดซิตริก (Citric acid) [12] หรือ ไตรโซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต (Trisodium citrate di hydrate)

- สารที่เพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า โดยจะทำให้กระแสไฟที่ใช้สามารถทำให้สารอิเล็กโทรไลต์เกิดการแตกตัวเป็นอิออนได้เพิ่มขึ้น ได้แก่ แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride)

- สารเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ โซเดียมโบรมไนด์ (Sodium Bromide)

นอกจากสารเคมีหลักดังกล่าวแล้วในการชุบนิกเกิล-ทังสเตนให้มีคุณภาพที่ดีจำเป็นต้องเติมสารที่ให้น้ำยามีประสิทธิภาพมากขึ้นเช่น สารลดความตึงผิว (Surfactant), Saccharin ($C_7H_5NO_3S$) จะช่วยลดความเครียดที่ตกค้างภายในชั้นเคลือบ [13] หรือสารอื่นๆตามสมบัติของวัสดุที่ต้องการ

3. การชุบเคลือบโลหะนิกเกิล-ทังสเตน เป็นขั้นตอนซึ่งจะทำโลหะในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์แตกตัวไอออนมาเกาะที่วัสดุพื้น โดยประสิทธิภาพ การชุบการไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆดังต่อไปนี้

- คุณหมุมิในกระบวนการชุบ เป็นตัวแปรที่ต้องทำการควบคุมในขั้นตอนนี้ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฟฟ้า โดยการเพิ่มคุณหมุมิมีส่วนทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่อนุภาคของสารที่เข้าไปทำปฏิกิริยา และเพิ่มจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้พลังงานศักย์ของระบบอยู่ในระดับที่สามารถไปทำปฏิกิริยาได้ [14]

- ความหนาแน่นของ กระแสไฟ โดยทั่วไปพบว่าในการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสจะทำให้ประสิทธิภาพของไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday efficiency) ลดน้อยลง แต่อย่างไรการใช้ปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟสูงก็จะทำให้ปริมาณทังสเตน และนิกเกิลที่เกาะยังวัสดุพื้นมีปริมาณมากขึ้น และใช้เวลาในการชุบน้อยลง [15]

- เวลาในการชุบเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สามารถกำหนดลักษณะของชั้นเคลือบผิวได้ เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการชุบก็จะทำให้เกิดการเกาะของแคทไอออนจากอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความหนาแน่นมากขึ้น ดังนั้นจึงควรปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานของวัสดุ

2.1.4.2 สมบัติของนิกเกิล-ทังสเตนที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ชั้นเคลือบนิกเกิล-ทังสเตนที่ผลิตจากกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามีสมบัติที่น่าสนใจในหลายด้านเช่น สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติแม่เหล็ก ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานในหลายประเภทดังจะเห็นได้จาก การใช้งานของวัสดุที่สามารถทนต่อกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 30°C ซึ่งมีอัตราการกัดกร่อนที่น้อยกว่าสแตนเลสสตีล ชนิด 304 ถึง 40 เท่า โดยมีความแข็งของวัสดุภายหลังทำการชุบ ไฟฟ้าประมาณ 650-750 HV

ในปัจจุบันมีการประยุกต์การใช้งานมากขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติทางด้านต่างๆของวัสดุ ตัวอย่างเช่น การนำวัสดุมาสร้างเป็น Barrier layer กั้นระหว่าง ทองแดงของวงจรมีความจุสูง (Ultra large scale integration) อุปกรณ์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าขนาดเล็ก (Microelectronic mechanical system) อุปกรณ์แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปที่มีขนาดเล็กที่ใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดสูง ชิ้นส่วนในแม่เหล็ก ชิ้นส่วนแบร์ริง และชิ้นส่วนของเครื่องบิน [13]

2.1.5 กรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

กรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วไม่ค่อยปรากฏมากนัก แต่อย่างไรก็ตามก็ถือเป็นกระบวนการที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุหลายๆ ด้านซึ่งมีเพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน อาทิเช่น การใช้กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงในการแก้ปัญหาของ Hydrogen embrittlement ที่เกิดจากการแพร่ของไฮโดรเจนเข้าไปในเนื้อของชั้นผิวเคลือบ ซึ่งในกระบวนการต้องมีการควบคุมทั้งเวลาและอุณหภูมิให้เหมาะสม เนื่องจากหากใช้อุณหภูมิหรือเวลาน้อยเกินไปจะไม่สามารถกำจัดไฮโดรเจนได้หมด แต่หากใช้อุณหภูมิหรือเวลามากเกินไปจะทำให้เกิดการโตของเกรนหรือเกิดเฟสของสารประกอบที่ไม่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้กรรมวิธีทางความร้อนในการลดความเครียดภายในของ ชั้นเคลือบ แต่อย่างไรก็ตามกรรมวิธีทางความร้อนก็เป็นสาเหตุที่ทำให้วัสดุที่ทำการเคลือบเกิดความเสียหายได้เช่น ในการชุบนิกเกิลเงา (Bright nickel plating) ภายหลังจากที่ได้รับความร้อนจะมีความเปราะมากขึ้นเนื่องจากเกิดเฟสของสารประกอบนิกเกิลซัลไฟด์ (Nickel sulfide) ตามขอบเกรน และในบางกรณีพบว่าความร้อนเป็นสาเหตุให้เกิดการพองหรือเกิด Blister ของชั้นผิวเคลือบได้ [17]

2.1.5.1 ความสัมพันธ์ของ Thermodynamic และขนาดของเกรนของวัสดุที่เกิด - ทั้งสแตนท์ที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ความเสถียรภาพ (Stabilization) ของวัสดุโครงสร้างนาโนถือว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อชั้นเคลือบมาก เนื่องจากหากนำไปใช้งานแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง จะส่งผลให้สมบัติของชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปการชุบวัสดุด้วยไฟฟ้าให้มีเกรนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนั้น จะมีพลังงานที่อยู่ระหว่างขอบเกรนสูง (High-energy interfaces) ที่พยายามจะปรับระบบให้เข้าสู่สมดุล (Equilibrium) จึงทำให้การควบคุมขนาดของเกรนทำได้ยาก โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นวัสดุบริสุทธิ์จะเกิดการโตขนาดของเกรนอย่างรวดเร็ว แต่ในกรณีโลหะผสมที่เกิด - ทั้งสแตนท์จะมีความเสถียรภาพมากกว่าการชุบโลหะบริสุทธิ์เนื่องจากเกิดกลไกการลดพลังงานที่ต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงพลังงานระบบของวัสดุในแง่ของ Thermodynamic ที่มีขนาดเกรนเล็ก ระดับนาโนเมตรจะส่งผล ต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติวัสดุโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงของ Gibbs free energy (G) ที่มีความสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่ของเกรน (A) ดังสมการที่ 2.2

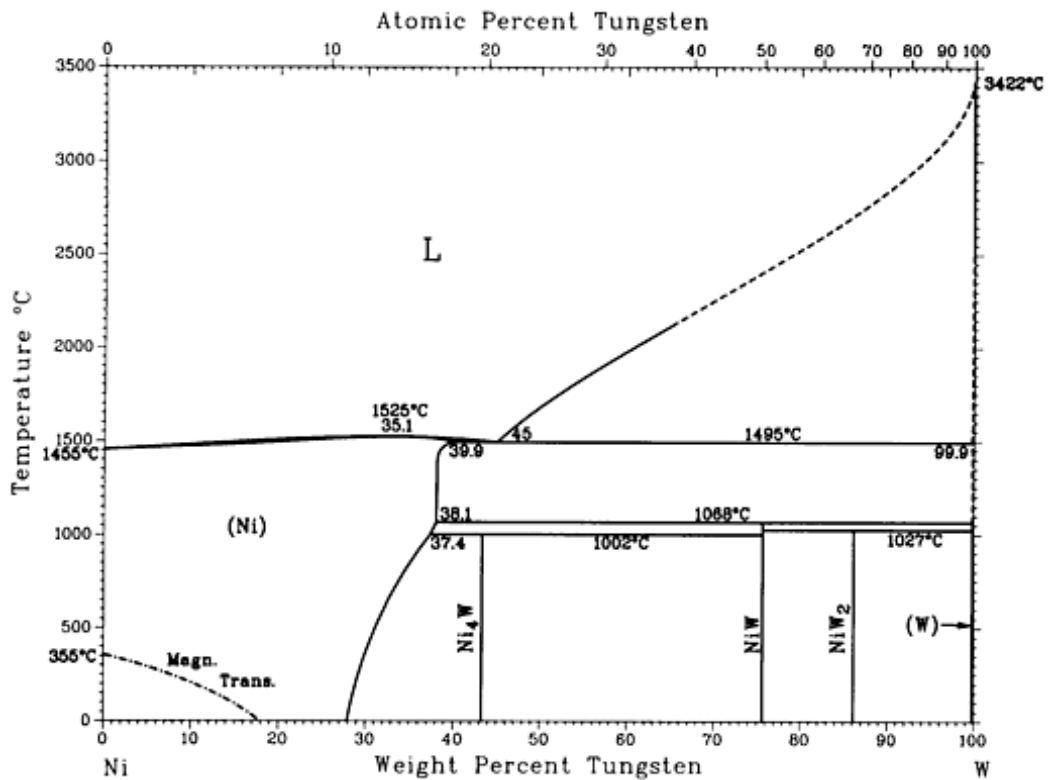
$$dG = \gamma dA \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

โดยหากในระบบของวัสดุที่ทำการศึกษาเป็นโลหะบริสุทธิ์ พลังงานที่ขอบเกรนหรือ Grain boundary energy (γ) จะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นถ้าระบบต้องการทำให้วัสดุมีความเสถียรมากขึ้น วัสดุจะต้องทำการลดพลังงานในระบบลง ซึ่งจากความสัมพันธ์สมการที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าระบบของวัสดุนั้นจะทำการเพิ่มขนาดของเกรน (dA) ซึ่งจะทำให้เกรนโต (Grain growth) มากขึ้นจึงทำให้การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะบริสุทธิ์ให้มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนั้นสามารถทำได้ยาก แต่การชุบด้วยไฟฟ้าในระบบที่มีธาตุผสมซึ่งในที่นี้คือทั้งสแตนท์ปรากฏว่าจะมีพลังงานภายในระบบที่น้อยกว่า เนื่องจากค่าของพลังงานที่ขอบเกรนเปลี่ยนไป เพราะเกิดการแยกตัว (Segregation) ของธาตุผสมที่เติมลงไปโดยจะแยกตัวออกมาตามขอบเกรน ดังสมการที่ 2.3

$$\gamma = \gamma_0 - \Gamma(G_{\text{seg}} + RT \ln X) \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

จากสมการที่ 2.3 ค่าของพลังงานขอบเกรนของวัสดุที่บริสุทธิ์ (γ_0) ซึ่งมีค่าเป็นบวกจะถูกปรับให้ลดลงและทำให้ระบบมีความเสถียรเพิ่มขึ้น จากพลังงานของการแยกตัวของธาตุผสม (G_{seg}) และค่าจำเพาะของปริมาณธาตุผสมที่มากเกินไปเกินความสามารถในการละลายได้ที่อยู่ตามขอบเกรน (Γ) ที่ค่าสูงเพียงพอจะทำให้ค่าของพลังงานที่ขอบเกรน (γ) จะมีค่าเป็นศูนย์หรือน้อยกว่า จึงเป็นผลทำให้ไม่มี Driving force ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน [16]

2.1.5.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและโลหะนิกเกิล-ทังสเทนที่มีโครงสร้างนาโน



ภาพที่ 2.3 แผนภูมิสมดุลเฟสของนิกเกิล-ทังสเทน

จากภาพที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของโลหะนิกเกิลในแต่ละส่วนผสมของทังสเทน ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยที่อยู่ในสภาวะที่สมดุล แต่ในส่วนวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทนที่มีโครงสร้างนาโน เป็นวัสดุที่อยู่ในสภาวะกึ่งสมดุล (Metastable) ดังนั้นภายหลังจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าจึงไม่ได้เป็นไปตามแผนภูมิสมดุล แต่เนื่องจากการรบกวนวิธีทางความร้อนเป็นวิธีที่เพิ่มพลังงานให้ระบบ ซึ่งทำให้เกิดเป็น Driving force ที่ทำให้วัสดุมีการปรับให้เข้าใกล้ความสมดุลมากขึ้น

หากพิจารณาจากแผนภูมิสมดุลจะพบว่านิกเกิลเป็นโลหะที่สามารถละลายธาตุผสมทังสเทนได้สูง โดยปริมาณที่ทังสเทนสามารถละลายในนิกเกิลในสภาวะละลายของแข็งสูงสุดได้ 39.9 %wt ที่อุณหภูมิประมาณ 1500°C ในส่วนผสมของทังสเทนที่มากกว่านั้นก็จะเกิดสารประกอบใหม่ ดังเช่นที่ส่วนผสมที่มีปริมาณทังสเทน 44 wt.% เกิดเฟสของ Ni_4W ส่วนผสมที่มีปริมาณทังสเทน 75.8 wt.% เกิดเฟส NiW และในวัสดุที่มีปริมาณทังสเทน 86.3 wt.% จะเกิดเฟส Ni_2W

2.1.6 พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุชุบเคลือบและการปรับปรุงผิวด้วยวิธีต่างๆ

สมบัติความต้านทานการสึกหรอ ของวัสดุชุบเคลือบนั้นโดยทั่วไปแล้วจะเลือกวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงในการใช้ป้องกันการสึกหรอ การสึกหรอแบบ Abrasive wear, Adhesive wear และ Fretting wear เป็นแบบของการสึกหรอที่พบมากในวัสดุชุบเคลือบ ซึ่งวิธีการในการปรับปรุงผิวให้มีสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั้นมีด้วยกันหลายวิธีที่นิยมใช้ เช่น Sputtering, Ion plating การใช้วิธีการชุบเคลือบเพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานการสึกหรอนั้นเป็นที่แพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุปกรณ์ขุดเจาะในเหมืองแร่ เครื่องเจาะ เครื่องที่ต้องรับภาระแตก หรือการตัดชิ้นงาน ซึ่งกระบวนการชุบเคลือบนี้เป็นวิธีการที่สามารถใช้ปรับปรุงให้วัสดุมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอที่ดีและราคาถูก

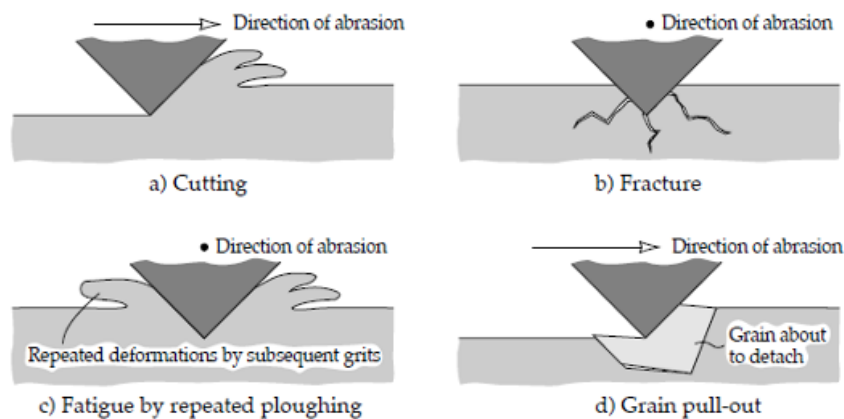
ตารางที่ 2.2 เทคนิคในการปรับปรุงผิวให้มีความต้านทานการสึกหรอที่ดี

Physical and chemical vapour deposition	สามารถใช้ได้กับวัสดุทุกชนิด ในลักษณะชั้นบางๆ
Ion implantation	เป็นการแพร่เข้าไปบางๆ และอาจเกิดปฏิกิริยากับวัสดุพื้น
Surface welding	เหมาะกับเฉพาะวัสดุที่ต้องการความหนาเท่านั้น วัสดุพื้นที่สามารถทำได้ต้องมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง
Friction surfacing	เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ชั้นเคลือบที่ได้มีความหนา
Thermal spraying	สามารถเคลือบให้มีความหนาได้ แต่ควบคุมความสะอาดชั้นเคลือบได้ยาก
Laser glazing and alloying	ให้ชั้นเคลือบที่หนา วัสดุที่จะนำมาเคลือบจะต้องสามารถหลอมได้
Explosive cladding	สามารถเคลือบชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้เร็วและมีแรงยึดติดที่ดี
Electroplating	สามารถชุบให้ได้ความหนาหลายระดับ แต่สมบัติการยึดเกาะไม่ดี และสามารถชุบในวัสดุที่นำไฟฟ้าเท่านั้น

2.1.6.1 กลไกการสึกหรอของวัสดุในแบบต่างๆ

2.1.6.1.1 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear)

การสึกหรอแบบขัดถู เป็นการสึกหรอที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค (Particle) กับวัสดุ การสึกหรอแบบขัดถูนั้นเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการเคลื่อนที่ผ่านของอนุภาคแข็งผ่านผิวสัมผัส ซึ่งโดยทั่วไปได้แบ่งออกเป็น 4 กลไกดังนี้ คือ Cutting, Fracture, Fatigue และ Grain pull out

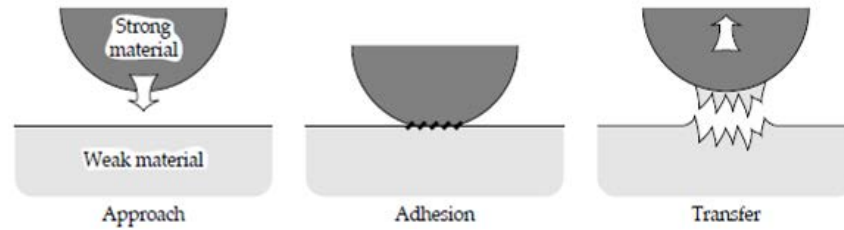


ภาพที่ 2.4 กลไกการสึกหรอแบบขัดสีในลักษณะต่างๆ

2.1.6.1.2 การสึกหรอแบบเชื่อมติด (Adhesive wear)

การสึกหรอแบบเชื่อมติดเป็นการสึกหรอแบบหนึ่งที่มีอัตราการสึกหรอที่สูง และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่คงที่ ซึ่งการสึกหรอประเภทนี้มักจะพบในวัสดุประเภทโลหะโดยอาจเกิดจากหลายสาเหตุเช่น เกิดจากของสารหล่อลื่น (Lubricant) ที่ไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากสารหล่อลื่นไม่สามารถแยกให้ผิวสัมผัสเคลื่อนที่มาเจอกันได้

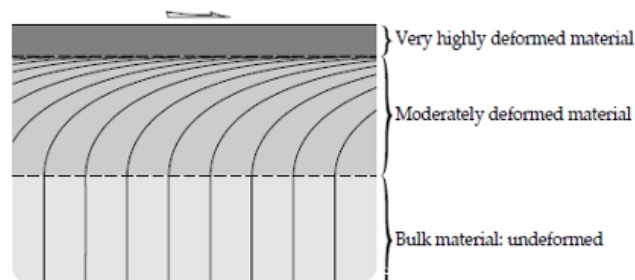
กลไกการสึกหรอประเภทนี้จะลดความรุนแรงลงเมื่อระหว่างผิวสัมผัสนั้นมีสิ่งเจือปน อาทิ เช่นมีออกซิเจน น้ำ เนื่องจากผิวของวัสดุทั้งสองจะไม่สัมผัสกันโดยตรง และนอกจากนั้นการเพิ่มความหยาบผิวและความแข็งที่ผิวก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดการสึกหรอแบบเชื่อมติดได้



ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างการเกิดการสึกหรอแบบเชื่อมติดระหว่างวัสดุที่เป็นโลหะ

2.1.6.1.3 การสึกหรอที่เกิดจากความล้า (Fatigue wear)

การสึกหรอประเภทนี้สาเหตุหนึ่งเกิดมาจากการที่ Asperity สะสมและรวมตัวกันซึ่งทำให้ความเค้นเฉพะที่มีค่าสูง และนอกจากนั้นก็ยังถูกกระทำซ้ำๆ จึงก่อให้เกิดรอยแตกที่เกิดจากความล้า ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสึกหรอประเภทนี้ บริเวณผิวสัมผัสของวัสดุที่เกิดการสึกหรอแบบนี้ จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) ที่สูงเมื่อเทียบกับบริเวณที่ไม่เกิดการสึกหรอ นอกจากนั้นความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุก็ยังส่งผลให้โครงสร้างวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2.6 ระดับความเครียดของวัสดุที่เกิดการเสียรูป

2.1.6.1 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานการสึกหรอ

กระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่เป็นประโยชน์ทั้งในงานลักษณะที่ต้านทานการกัดกร่อนและการสึกหรอ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมนำวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น โครเมียม นิกเกิล ทองแดง เงิน ทอง แพลทินัม หรืออื่นๆ บนวัสดุพื้น เนื่องจากกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปไม่ได้มีการควบคุมบรรยากาศและวัสดุที่เกาะหรือเคลือบนั้นเกิดด้วยพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบกับวัสดุพื้นไม่ดี

2.1.6.2 แนวโน้มของวิธีการชุบเคลือบที่มีสมบัติต้านทานการสึกหรอ

ในปัจจุบันกระบวนการชุบเคลือบที่เป็น เทคนิคใหม่ๆ นั้นมีหลากหลายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น

-วิธีการชุบเคลือบ บผิวด้วย Diamond-like Carbon (DLC) เป็นที่รู้จักแพร่หลาย โดยมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำและนอกจากนั้นก็สามารถที่จะป้องกันวัสดุที่เกิดการสึกหรอในสถานะที่มีความเค้นสูง วัสดุ DLC นิยมใช้กระบวนการ Chemical Vapour Deposition หรือ Physical Vapour Deposition ในการผลิต ซึ่งมักจะควบคุมบรรยากาศโดยแก๊ส เชื้อเพลิงหรือทำให้เป็นสุญญากาศ การชุบเคลือบด้วย DLC สามารถป้องกันการเกิดการสึกหรอที่เกิดจากความล้า โดยทั่วไปชั้นเคลือบจะหนาน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

-วิธีการชุบเคลือบด้วย Carbide และ Nitride เป็นกระบวนการที่ปรับปรุงให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำและมีความแข็งสูง ชั้นเคลือบประเภทนี้จะไม่เหมาะสมกับสถานะการใช้งานที่มีน้ำและออกซิเจน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการปล่อยแก๊ส ไนโตรเจนบริเวณของผิวสัมผัสที่เกิดการเสียดสีกัน โดยพบว่าวัสดุประเภทนี้จะเกิดการสึกในสถานะที่เกิดความล้าในจำนวนรอบที่ไม่สูง เนื่องจากเกิดการเสียดสีระหว่าง Asperity ที่มีความแข็งสูงโดยเกิดจากผิวของชั้นเคลือบมาเสียดสีกันเอง

-วิธีการชุบเคลือบหนา หรือ Thick Coatings ส่วนมากนิยมใช้วิธีการทำ Plasma Spraying โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเหมืองแร่ เนื่องจากในอุตสาหกรรมประเภทนี้จะประกอบไปด้วยแร่หรือสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ทำให้เกิดการ สึกหรอแบบ Abrasive wear ที่มีความเค้นสูง ดังนั้นงานในลักษณะดังกล่าวจึงจำเป็นต้องการชั้นเคลือบที่หนาและแข็งด้วยวิธี Plasma โดยที่มักจะนำวัสดุประเภทเซรามิก วัสดุแข็ง หรือประเภท Refractory มาทำเคลือบวัสดุพื้น

-วิธีการชุบเคลือบด้วยวัสดุนาโนเป็นเทคนิคที่ก้าวหน้าในปัจจุบันที่สามารถพัฒนาโครงสร้างของชั้นเคลือบให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งหรือเพิ่มอายุการใช้งาน ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการประกอบด้วยชั้นเคลือบหลายๆ ชั้นเข้าด้วยกัน โดยมีความหนาประมาณ 50 nm [18]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและศึกษาการชุบนิเกิล -ทังสเตนที่มีโครงสร้างนาโน โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่แสดงถึงตัวแปรของการชุบด้วยไฟฟ้าที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง สมบัติความต้านทานการสึกหรอ

จากงานวิจัย K.R.Sriraman และคณะปี ในค .ศ.2005 [19] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของนิเกิล-ทังสเตนที่ทำการชุบด้วยไฟฟ้าโดยมีปริมาณธาตุผสมต่างกัน โดยจากการ

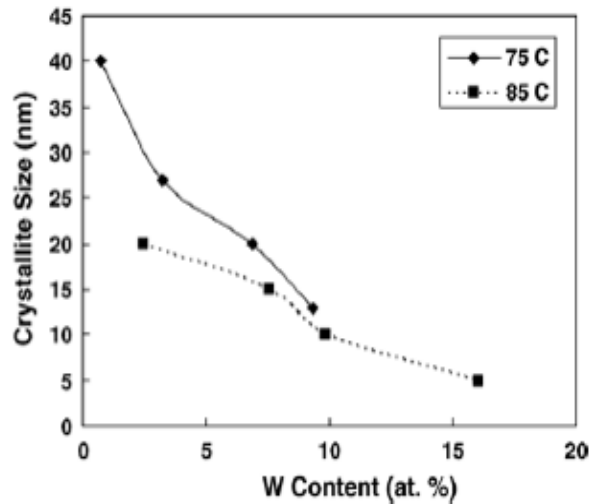
ทดลองสมบัติทางด้านความแข็งและสมบัติความต้านทานการสึกหรอในลักษณะ Sliding wear โดยทำการควบคุมตัวแปรในกระบวนการผลิต 2 ลักษณะคือ

- 1.) อุณหภูมิในการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า ซึ่งใช้อุณหภูมิ 75 และ 85°C
- 2.) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) โดยใช้ค่าที่แตกต่างกัน 4 ค่าคือ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.2 A/cm²

โดยผลจากการทดลองพบว่าทั้ง 2 ตัวแปรในกระบวนการผลิตมีผลต่อปริมาณทั้งสแตนท์ที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของกระแสจะทำให้อัตราการชุบเร็วขึ้น โดยที่อุณหภูมิในการชุบจะไม่ค่อยพบถึงความแตกต่างในช่วงความหนาแน่นของกระแสตั้งแต่ 0.05 – 0.15 A/cm² แต่เมื่อใช้กระแสเพิ่มขึ้นถึง 0.2 A/cm² อุณหภูมิ 85°C จะให้อัตราการชุบที่มากกว่าอุณหภูมิ 75°C ซึ่งนอกจากอัตราการชุบแล้วยังพบว่าปริมาณของทั้งสแตนท์ยังมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ในการชุบเคลือบ

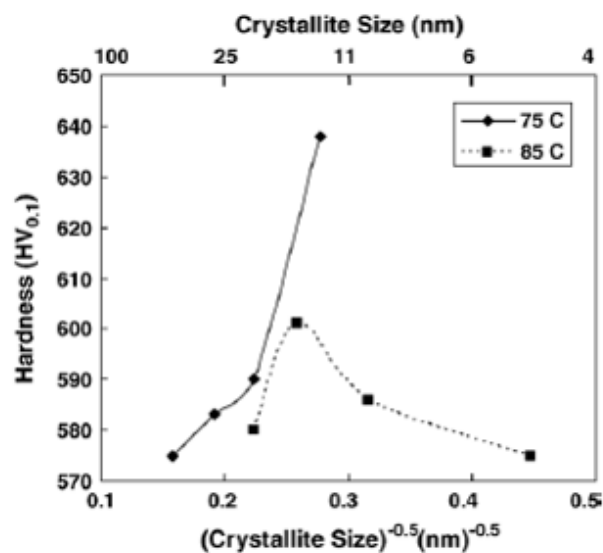
ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่นของกระแสที่ส่งผลต่อปริมาณทั้งสแตนท์ โดยใช้อุณหภูมิ 75 และ 85°C

ชนิดชั้นเคลือบ	ความหนาแน่นกระแส (A/cm ²)	ส่วนผสมทางเคมี	
		Ni (at%)	W (at%)
Ni-W (75°C)	0.05	99.28	0.72
	0.01	96.78	3.22
	0.15	93.11	6.87
	0.20	90.67	9.33
Ni-W (85°C)	0.05	97.57	2.43
	0.01	92.46	7.54
	0.15	90.18	9.82
	0.20	83.94	16.06



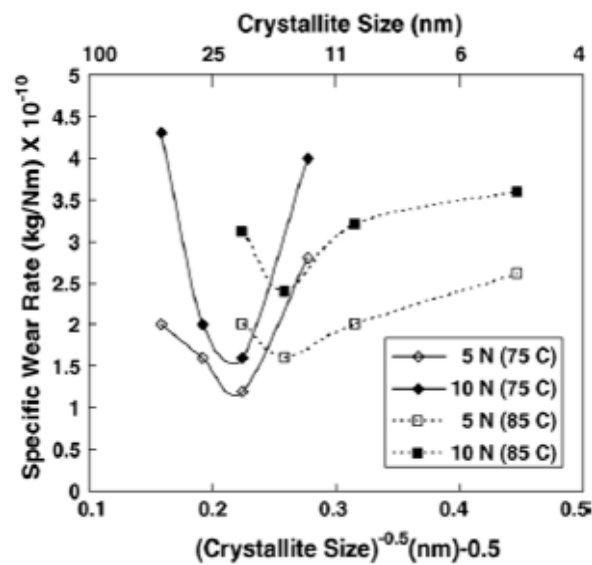
ภาพที่ 2.7 ปริมาณของทั้งสแตนและอนุภาคนิกเกิลที่ส่งผลกับขนาดผลึกที่เปลี่ยนแปลง

จากตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณนิกเกิลและ ทั้งสแตน จากการตรวจสอบโดยเครื่อง Energy Dispersive X-ray และภาพที่ 2.7 ผลการคำนวณขนาดผลึกโดยใช้ Shearer equation จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิและความหนาแน่นของกระแสที่ใช้สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของทั้งสแตน เพิ่มขึ้นและทำให้มีเกรนเล็กลง โดยนอกจากนั้นยังพบว่ายังทำสมบัติของความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบ Sliding wear ที่เปลี่ยนไป โดยการนำค่าความแข็งและขนาดเกรนมาหาความสัมพันธ์ของ Hall-Petch และทำการทดสอบการสึกหรอ



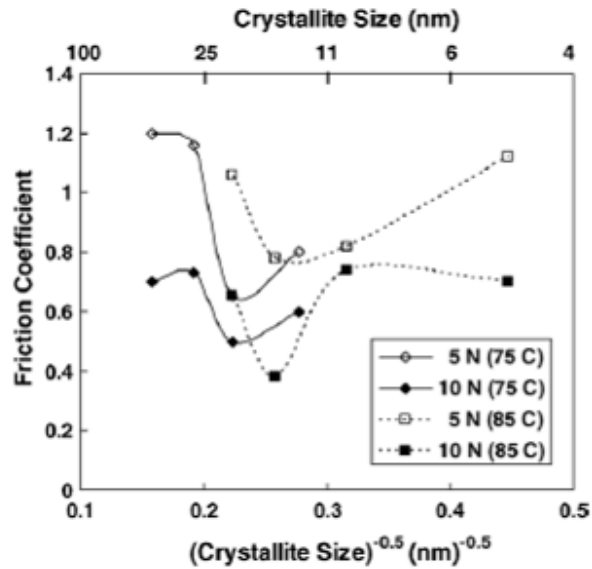
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของ Hall - Petch ของวัสดุ นิกเกิล-ทั้งสแตนภายหลังการชุบเคลือบโดยใช้ อนุภาคนิกเกิล 75 และ 85°C

จากภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าการชุบที่อุณหภูมิ 75°C มีความสัมพันธ์แบบ Hall-Petch ในทุกช่วงของความหนาแน่นกระแส ไฟฟ้าที่ใช้ และที่อุณหภูมิ 85°C ปรากฏว่าเกิดช่วง Hall-Petch break down ในช่วงที่เกรนมีขนาดน้อยกว่า 15 nm โดย K.R.Sriraman ได้อธิบายความแข็งแรงที่ลดลงเมื่อเกรนมีขนาดน้อยกว่า 15 nm ไว้ว่าเกิดจากการเพิ่มของ ปริมาณ ขอบเกรน (Intercrystalline volume fraction) มากขึ้นโดยเฉพาะบริเวณที่เป็นจุด Triple junction ของเกรน ซึ่งจะทำให้โครงสร้างที่ขอบเกรนไม่เป็นระเบียบและไม่เรียงตัวในแนวจุดกึ่งกลางของขอบเกรน ทำให้แรงที่กระทำไม่ได้ผ่านที่ขอบเกรนและอาจเกิดการเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลง



ภาพที่ 2.9 อัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate) ของนิกเกิล-ทังสเทนภายหลังการทดสอบการสึกหรอแบบ Sliding wear เมื่อเทียบกับขนาดของผลึกที่เปลี่ยนแปลง

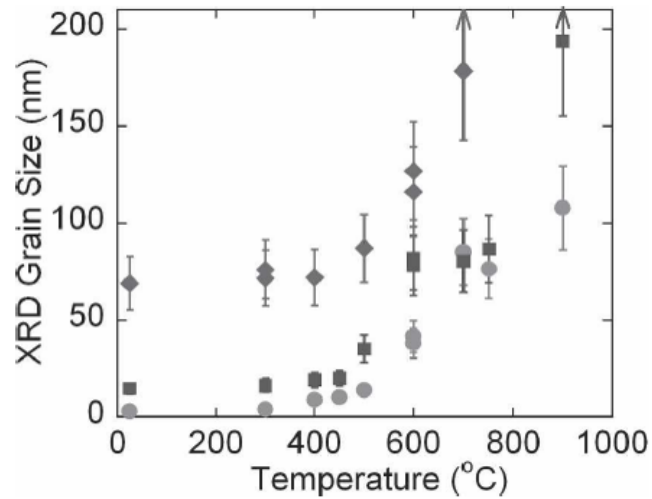
จากผลการทดลองการหาอัตราการสึกหรอจำเพาะในภาพที่ 2.9 โดยใช้อุณหภูมิในการชุบด้วยไฟฟ้า 75°C พบว่าเมื่อขนาดของเกรนลดลงจะทำให้อัตราการสึกหรอจำเพาะลดลง โดยขนาดของเกรนต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20 nm เนื่องจากหากขนาดเล็กกว่านี้จะมีอัตราการสึกหรอจำเพาะที่มากขึ้นเนื่องจากเกิดการแตกแบบเปราะของชั้นผิวเคลือบ ซึ่งในกรณีที่ใช้อุณหภูมิ 85°C พบว่าขนาดของเกรนที่ทำให้อัตราการสึกหรอจำเพาะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเกรนมีขนาด 15 nm จึงกล่าวได้ว่าเมื่อขนาดเกรนเล็กลงจะทำให้อัตราการสึกหรอจำเพาะน้อยลง



ภาพที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient) ของนิกเกิล-ทังสเตนที่ได้จากการชุบที่อุณหภูมิ 75 และ 85°C โดยใช้น้ำหนักในการทดสอบ 5 และ 10 N

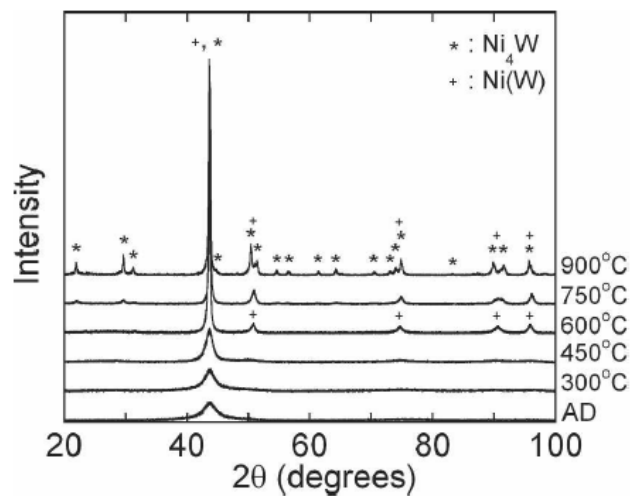
จากภาพที่ 2.10 เป็นการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยผลที่มีลักษณะของผลการทดลองที่สอดคล้องกับการหาอัตราการสึกหรอจำเพาะ คือเมื่อเกรนเล็กลงก็จะทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงโดยมีค่าจำกัดของเกรนที่เล็กที่สุดโดยไม่น้อยกว่า 20 nm ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิ 75°C และเมื่อใช้อุณหภูมิ 85°C จะต้องมีขนาดเกรนไม่น้อยกว่า 15 nm

ในปี ค.ศ.2007 Andrew J. Detor และ Christopher A. Schuh [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความเสถียรของโครงสร้างนาโนที่เปลี่ยนแปลงหลัง จากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยการชุบเคลือบโลหะ นิกเกิล - ทังสเตนบนวัสดุพื้นที่เป็นนิกเกิล ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในลักษณะ Reverse Pulse แล้วนำมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 150 – 900°C เป็นเวลา 0.5 – 72 ชั่วโมงจากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ แล้วทำการตรวจสอบโครงสร้างที่เกิดขึ้นด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) และใช้วิธีการ Integral breadth ในการหาขนาดเกรน



ภาพที่ 2.11 ขนาดเกรน XRD ของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

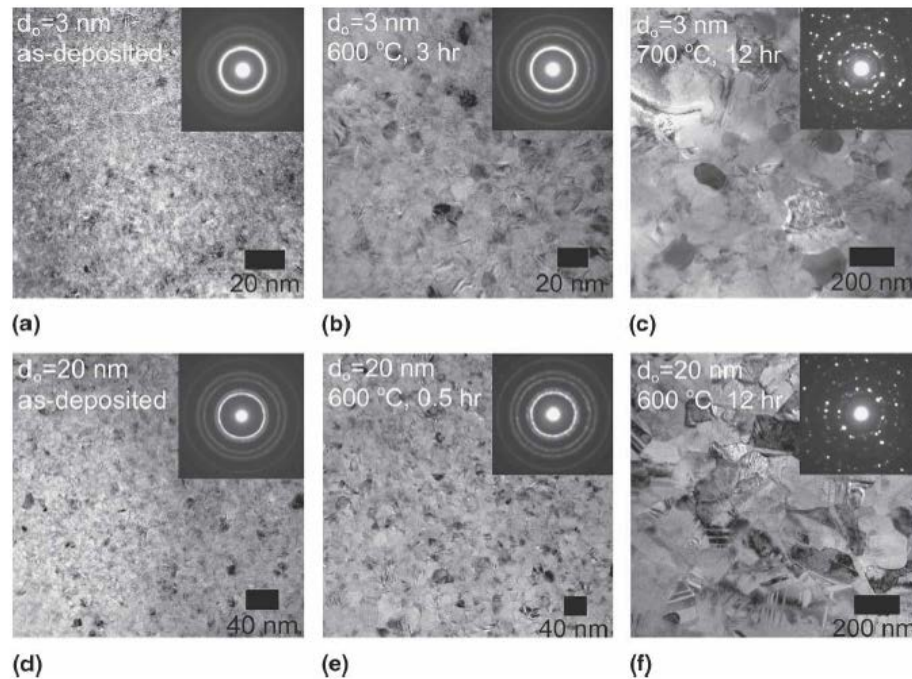
วัสดุ निकเกิล-ทังสเตนที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าภายหลังการให้ความร้อนปรากฏว่า เกิดการโตของเกรนเพิ่มขึ้น โดยมีขนาดสูงสุดประมาณ 200 nm ดังที่แสดงในรูป



ภาพที่ 2.12 XRD ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน 24 ชั่วโมงโดยมีปริมาณทังสเตน 21 at. %

จากการตรวจสอบเฟสของชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจากผล XRD พบว่าวัสดุเกิดการตกผลึกของเฟส Ni_4W ที่อุณหภูมิ 900°C

โดยเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองได้ทำการตรวจสอบการโตของเกรน จึงได้หาขนาดเกรนด้วยวิธี Transmission Electron Microscope (TEM) เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบ



ภาพที่ 2.13 Bright – field ของวัสดุ निकิล-ทังสเทนจาก TEM โดยใช้วิธีการ Selected Area Diffraction (SAD)

โดย(a – c) มีขนาดเกรนเริ่มต้น 3 nm และ (d – f) ภาพของชิ้นงานที่มีเกรนขนาดเริ่มต้น 20 nm โดยพบว่าทั้งชิ้นงานสองแบบมีการโตของเกรนภายหลังที่ได้รับความร้อน

นอกจากนั้นในส่วนของการทดสอบเกี่ยวกับการสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ निकิล-ทังสเทน ได้มีการศึกษาโดย Rupert และคณะในปี 2010 [20] ซึ่งทำการทดสอบแบบ Sliding wear กับวัสดุที่ปริมาณทังสเทนที่แตกต่างกัน ดังตารางต่อไปนี้

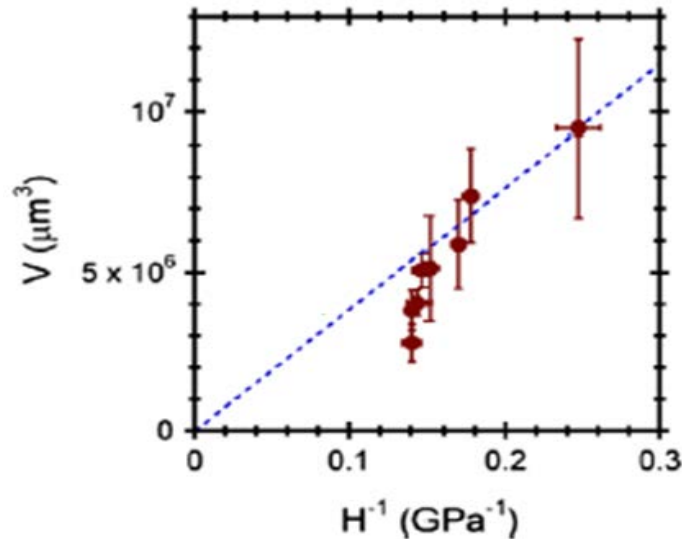
ตารางที่ 2.4 ขนาดเกรนและสมบัติเชิงกลของวัสดุ Ni-W ภายหลังจากชุบไฟฟ้า

ปริมาณทั้งสแตน (at.%)	ขนาดเกรน (nm)	ความแข็ง (GPa)	ปริมาตรการสึกหรอ (μm^3)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ)
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	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	6.9	4.03×10^6	0.65
22.9	5	7.1	3.79×10^6	0.60
27.9	3	7.1	2.77×10^6	0.66

โดยภายหลังจากทำการทดสอบการสึกหรอ Rupert ได้พยายามหาถึงความสัมพันธ์จากสมการของ Archard ที่แสดงในสมการ

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

โดยที่ V คือปริมาตรที่จะเกิดการสึกหรอ K คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอ I คือระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ P คือน้ำหนักที่กดขณะทำการทดสอบ H คือความแข็งของวัสดุ และเมื่อนำผลมาทำการเปรียบเทียบกับค่านวนจากสมการที่ 2.4 ซึ่งได้ผลดังในภาพ



ภาพที่ 2.14 ปริมาตรการสึกหรอของวัสดุและความแข็งของวัสดุ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ Archard ซึ่งแทนด้วยเส้นประ

พบว่ามีส่วนส่วนของผลการทดลองที่แตกต่างไปจากสมการของ Archard โดยภายหลัง Rupert ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่ส่งผลให้ วัสดุมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอที่ต่างจากสมการของ Archard โดยพบว่าเกิดพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบของวัสดุซึ่งประกอบด้วย การเกิดความร้อนระหว่างการเสียดสีของวัสดุ (Friction heating) โดยภายหลังที่ทำการคำนวณปรากฏว่าความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 560°C ซึ่งจะทำให้วัสดุบริเวณที่ได้รับความร้อนจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และนอกจากนั้นยังพบว่าวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคซึ่งเกิดจากความเครียดที่เกิดขึ้น โดยจากการคำนวณหาแรงที่กระทำกับวัสดุด้วยวิธี Finite element analysis พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบมีค่ามากกว่าค่า Shear stress ซึ่งส่งผลให้วัสดุเกิดการโตของเกรน จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สมบัติ ความต้านทานการสึกหรอไม่เป็นไปตามสมการของ Archard

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าวัสดุ निकิล-ทังสเตนเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางด้านต่างๆ ที่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งในด้านกระบวนการผลิตและอุณหภูมิของ สภาพการใช้งาน โดยเฉพาะปัจจัยของอุณหภูมิที่มี อิทธิพลต่อสัณฐานเช่นขนาดของเกรน หรือเกิดเฟสสารประกอบใหม่ของวัสดุที่เปลี่ยนไป ดังนั้นการศึกษากรรวมวิธีทางความร้อนจึงเป็นวิธีการที่สามารถทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ ที่ส่งผลกับสมบัติของวัสดุและสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่อุณหภูมิสูงได้มากขึ้น

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองโดยเริ่มตั้งแต่การเตรียมชิ้นงานที่ใช้เป็นวัสดุพื้นที่ใช้ทำการชุบเคลือบ กระบวนการชุบเคลือบ ด้วยใช้ไฟฟ้า กรรมวิธีทางความร้อน การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ และการตรวจสอบโครงสร้างหรือเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งใช้เครื่องมือที่จำเป็นดังนี้

1. อุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงานวัสดุพื้น ได้แก่

- กระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 400, 800, 1200, 2500, 4000 และผ้าสักหลาด
- ผงเพชรขนาด 3 μm
- กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10% vol
- เรซินเคลือบชิ้นงานชนิดแบบ Cold mount
- สายไฟฟ้าทองแดง
- เครื่องและตะกั่วบัดกรี
- เครื่องขัดผิวชิ้นงาน
- เครื่องอุดตราโซนิค

2. อุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีที่ใช้ทำการชุบเคลือบวัสดุด้วยไฟฟ้า ได้แก่

- เครื่องจ่ายกระแสแบบ Pulse
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- แท่งแพลทินัม
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล – ทังสเตน

3. อุปกรณ์ เครื่องมือกระบวนการทางความร้อน

- เตาให้ความร้อนแบบท่อ (Tube Furnace)
- Crucible ลักษณะ Boat
- แก๊สเฉื่อยโดยเลือกใช้แก๊สไนโตรเจน

4. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบและทดสอบวัสดุ

- กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) ใช้ศึกษาโครงสร้างของชิ้นงานก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ทำการศึกษารายละเอียดของสารประกอบต่างๆ รวมทั้งโครงสร้าง จุดภาคของผิววัสดุ หลังผ่านกระบวนการต่างๆ
- เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อตรวจสอบหาชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังกรรมวิธีทางความร้อน
 - EDX (Energy dispersive X-Ray) ใช้ตรวจชนิดของธาตุภายในโครงสร้าง เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบ
 - เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Ball on disk โดยจะใช้ชิ้นงานที่ทำกรชุบนิกเกิล-ทังสเทน เป็นส่วนของ Disk ในการทดสอบ และ Ball ทังสเทนคาร์ไบด์
 - เครื่อง Profilometer ใช้ในการหาขนาดร่องการสึกหรอ (Wear track) โดยการใช้นิ้ว Stylus ในลักษณะของการลากผ่านบริเวณที่ทำกรทดสอบ โดยความละเอียดของเครื่องนี้สามารถตรวจสอบผิวชิ้นงานที่มีความลึกมากกว่า 0.06 ไมโครเมตร

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

1. เตรียมผิวนิกเกิลที่ใช้เป็นวัสดุพื้น และการชุบเคลือบในน้ำยาอิเล็กโตรไลต์นิกเกิล – ทังสเทนด้วยไฟฟ้า

1.1 การเตรียมผิววัสดุพื้นนิกเกิล

การที่จะชุบเคลือบชิ้นงานให้ได้ผลดีจำเป็นต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ผิวมีความเรียบ ไม่มีสิ่งสกปรกเจือปน โดยเริ่มจากการตัดนิกเกิลด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์จากนั้นบัดกรีสายไฟเข้ากับวัสดุพื้นเพื่อเตรียมไว้ต่อเข้ากับวงจรของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า จากนั้นหล่อด้วยเรซิน แล้วจึงเตรียมผิวหน้าวัสดุพื้นให้เรียบ โดยการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 180 ถึง เบอร์ 4000 และขัดด้วยผ้าสักหลาดร่วมกับผงเพชรขนาด 3 μm และทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค

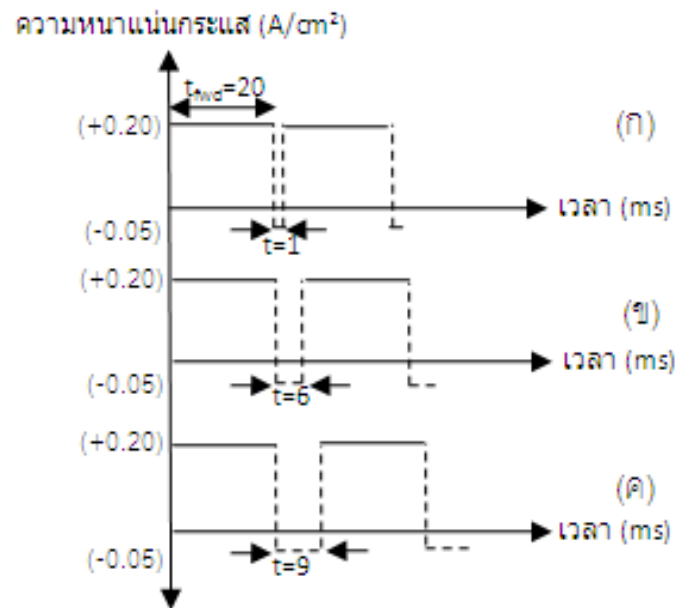
1.2 การชุบนิกเกิล – ทังสเทนด้วยไฟฟ้า

เตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์นิกเกิล – ทังสเทน โดยเริ่มจากการเติมน้ำกลั่นในปริมาณ 306 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์จากนั้นจึงให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 70 – 75°C เติมน้ำเค็ม ดังเช่นในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของสารเคมีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

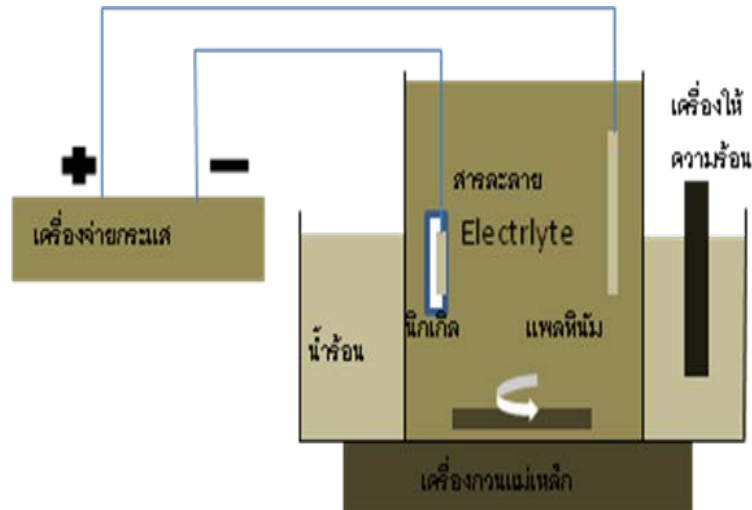
สารเคมี	สูตรสารเคมี	ปริมาณ (กรัม)
Sodium citrate dihydrate	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	51.47
Ammonium chloride	NH_4Cl	9.36
Nickel sulfate hexahydrate	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5.52
Sodium tungstate dihydrate	$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	16.17
Sodium bromide	NaBr	5.41

โดยทำการกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตลอดเวลา ในระหว่างที่เติมสารเคมี ด้วยแท่งแม่เหล็ก ในขณะที่เติมสารเคมีแต่ละชนิดต้องรอให้สารเคมีที่เติมไปก่อนหน้านี้ละลายหมดก่อนจึงเติมสารเคมีตัวต่อไป หลังจากเตรียมสารละลายเรียบร้อยแล้วจึงทำการตั้งค่าเครื่องจ่ายกระแสโดยทำการตั้งค่ากระแสที่จ่ายออกไปเป็นแบบ Reverse Pulse ซึ่งในการจ่ายกระแสในลักษณะนี้จะทำให้วัสดุพื้นได้รับกระแสบวกและลบสลับกัน ในการทดลองนี้จะกำหนดเวลาในการจ่ายกระแสและกำหนดความหนาแน่นของกระแส (Current density) เท่ากันแต่กำหนดเวลาการจ่ายกระแสในแบบ Reverse Pulse ที่ต่างกัน 3 แบบ ตามลักษณะที่กำหนดในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลักษณะการจ่ายกระแสไฟ Reverse Pulse (ก) กำหนดช่วงเวลาจ่ายกระแสสลับ บั้ว 1 มิลลิวินาที (ข) กำหนดช่วงเวลาจ่ายกระแสสลับ บั้ว 6 มิลลิวินาที (ค) กำหนดช่วงเวลาจ่ายกระแสสลับบั้ว 9 มิลลิวินาที

จากนั้นจึงนำค่าของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่กำหนดมาคำนวณกับขนาดพื้นที่จริงของวัสดุพื้น นำผลที่ได้มาตั้งค่าของกระแสที่จะต้องใช้ หลังจากนั้นนำวัสดุพื้นนิกเกิลที่ทำการเตรียมผิวเรียบร้อยแล้วในขั้นตอนที่ 1.1 มาทำความสะอาดในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10% vol แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจากนั้นจึงทำการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายที่เตรียมไว้ ดังภาพที่ 3.2 หลังจากนั้น ปล่อยให้ชิ้นงานไว้ในสารละลายโดยยังไม่ปล่อยกระแสเป็นเวลา 15 นาทีเพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิแต่ละส่วนไม่ต่างกัน จากนั้นจึงเริ่มทำการปล่อยกระแสในลักษณะที่ได้ทำการตั้งค่าไว้แล้วในตอนต้น

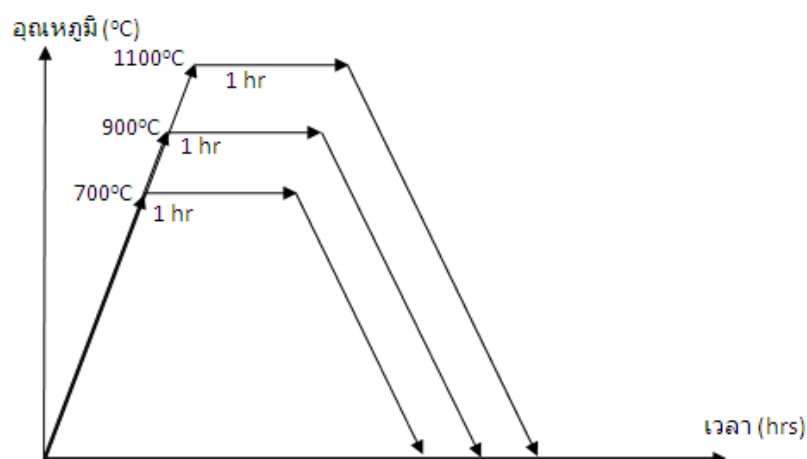


ภาพที่ 3.2 การติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ในการชุบเคลือบ นิกเกิล – ทังสเทนด้วยใช้ไฟฟ้า

2. กรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุภายหลังชุบเคลือบนิกเกิล – ทังสเทน

ในการทำกรรมวิธีทางความร้อนโดย ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

2.1 กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุที่มีปริมาณของทังสเทนที่แตกต่างกัน อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้เตาให้ความร้อนแบบท่อ ภายในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน จากนั้นจะนำชิ้นงานวางไว้บน Crucible แล้วให้ความร้อน โดยแบ่งออกเป็น 3 อุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 700, 900 และ 1100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งการเพิ่มความร้อนจากที่อุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิต่างๆ ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน 10°C/min จากนั้นจึงปล่อยให้วัสดุเย็นตัวภายในเตาดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 กรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุนิกเกิล-ทังสเทนที่อุณหภูมิต่างๆ

2.2 กรรมวิธีทางความร้อนที่ศึกษาผลของเวลาที่ส่งผลต่อสมบัติของชั้นเคลือบ โดยนำวัสดุที่มีความแข็งสูงสุดในแต่ละอุณหภูมิวัสดุในข้อที่ 2.1 มาทำการศึกษาผลของเวลาของกระบวนการทางความร้อน โดยจะใช้เวลา 0.5, 1 และ 3 ชั่วโมง ในการศึกษาที่อุณหภูมิ 700, 900 และ 1100°C

จากการวางแผนการทดลองในส่วนของการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าและกรรมวิธีทางความร้อน สามารถสรุปตัวแปรที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานทั้งหมด 18 ชิ้น ดังต่อไปนี้

- ชิ้นงานชุบเคลือบนิกเกิล-ทังสเตน โดยใช้เวลาจ่ายกระแส Reverse Pulse ต่างกัน 3 ชิ้น
- ชิ้นงานนิกเกิล-ทังสเตนที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนในส่วนที่ 2.1 โดยมีปริมาณทังสเตนต่างกันจำนวน 9 ชิ้น
- ชิ้นงานนิกเกิล-ทังสเตนที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนในส่วนที่ 2.2 โดยใช้เวลาที่ต่างกันจำนวน 6 ชิ้น

3. การตรวจสอบเฟสของสารประกอบที่เกิดขึ้น

นำชิ้นงานทั้งหมดไปทำการตรวจสอบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer เพื่อศึกษาเฟสที่เปลี่ยนแปลงภายหลังจากให้ความร้อน

4. การวัดความแข็งของชั้นเคลือบ

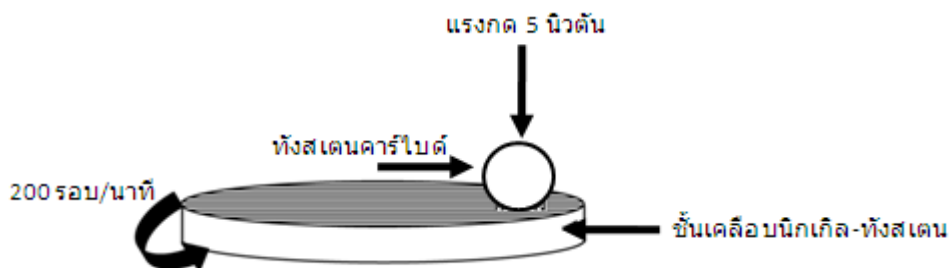
นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบ ด้วยไฟฟ้าและชิ้นงานที่ผ่าน กรรมวิธี ทางความร้อนมาทำการวัดความแข็งที่ผิว ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Micro hardness tester และใช้น้ำหนัก (Load) ที่เครื่อง 100 กรัม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยขีดข่วนถึงชั้นของวัสดุพื้นซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแข็งที่มาจากวัสดุพื้นและทำให้ค่าผิดพลาดได้ โดยใช้เวลาในการกดวัดความแข็ง 20 วินาที ค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ละชิ้นจะทำการวัด 10 ครั้ง โดยที่แต่ละตำแหน่งของการวัดต้องห่างกันอย่างน้อย 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกดเดิม [21] แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละชิ้นงาน เพื่อลดตัวแปรที่เกิดจากความผิดพลาดในการวัด

5. การทดสอบความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเคลือบนิกเกิล-ทังสเตน

ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอจะแบ่งวัสดุที่มาทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

- ส่วนแรกเป็นชิ้นงานที่ทำการชุบด้วยไฟฟ้า
- ส่วนที่สองเป็นชิ้นงานที่ชุบด้วยไฟฟ้าและผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

โดยจะนำชิ้นงานที่มีค่าความแข็งมากที่สุดของประเภท มาทำการทดสอบความต้านการสึกหรอแบบ Ball on disk และใช้แรงกดในการทดสอบ 5 นิวตัน มีระยะเส้นผ่านศูนย์กลางในการเคลื่อนที่ของลูกบอล 5 มิลลิเมตร ความเร็วของลูกบอลที่ใช้คือ 200 รอบต่อนาทีลักษณะดังภาพ



ภาพที่ 3.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Ball on disk

ภาพหลังการทดสอบแบบ Ball on disk จะทำการวิเคราะห์ผลโดยแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- ทำการตรวจสอบปริมาณการสึกหรอ โดยการคำนวณหาปริมาณชิ้นงานที่สูญเสียภายหลังการทดสอบ โดยการคำนวณ ระหว่างขนาดพื้นที่ของร่องการสึกหรอด้วยเครื่อง Profilometer คุณกับรัศมีที่ลูกบอลเคลื่อนที่
- ทำการวิเคราะห์ลักษณะของร่องการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ บสองกวาด

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 การชุบเคลือบนิเกิล-ทังสเทนโดยใช้เทคนิค Reverse pulse

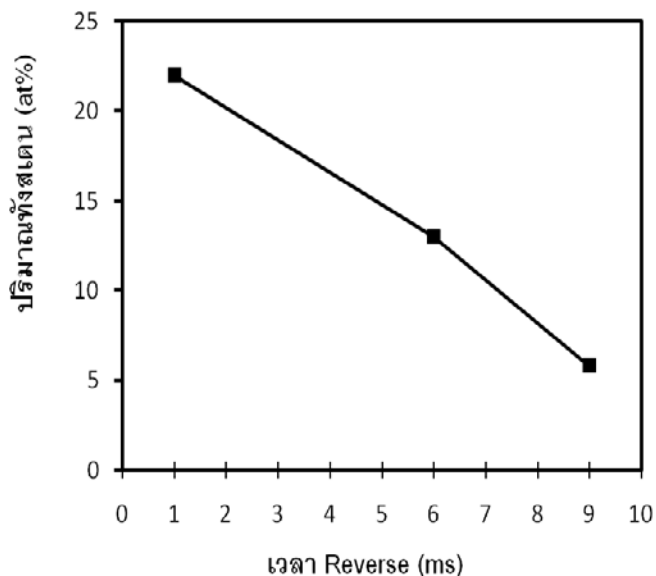
4.1.1 ปริมาณของโลหะที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะการชุบแบบ Reverse Pulse

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการชุบไฟฟ้าเพื่อให้ได้ปริมาณทังสเทนที่แตกต่างกันโดยกำหนดเวลาการทำ Reverse pulse ที่ต่างกัน 3 แบบ และทำการวิเคราะห์ธาตุผสมในเชิงปริมาณด้วยเครื่อง Energy dispersive X-Ray นอกจากนั้นเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุที่มีปริมาณทังสเทนและตัวแปรของกระบวนการที่แตกต่างกัน จึงได้กำหนดชื่อของวัสดุดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณทังสเทนของชั้นเคลือบนิเกิล-ทังสเทนในรูปแบบการชุบต่างๆ

ชิ้นงาน	เวลาในการจ่ายกระแส Forward (ms)	เวลาในการจ่ายกระแส Reverse (ms)	ปริมาณทังสเทน (at.%)
A	20	1	22
B	20	3	13
C	20	9	6

เมื่อนำปริมาณของทังสเทนมาเขียนแสดงความสัมพันธ์กับเวลาการจ่ายกระแส Reverse pulse ในภาพที่ 4.1 จะพบว่าปริมาณของทังสเทนมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการจ่ายกระแส Reverse มากขึ้น



ภาพที่ 4.1 ปริมาณที่งัดเตนที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการจ่ายกระแส Reverse Pulse ที่ต่างกัน

โดยปริมาณของที่งัดเตนที่ลดลงนั้นเกิดจากกระบวนการชุบนิกล-ที่งัดเตนซึ่งจะมีการจ่ายกระแส Reverse ทำให้ชิ้นงานที่เป็นวัสดุพื้นเกิดเป็นขั้วบวกและลบสลับกัน โดยในช่วงที่วัสดุเป็นขั้วบวกนั้นจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation ดังสมการที่ 4.1



ซึ่งหมายถึงการสูญเสียอิเล็กตรอนหรือวัสดุไปของทั้งนิกลและที่งัดเตนที่มาเกาะชั้นเคลือบ เมื่อพิจารณาจากค่าของศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า Standard potential (E^0) ที่แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ครึ่งเซลล์ [22] ของทั้งนิกลและที่งัดเตนดังตาราง

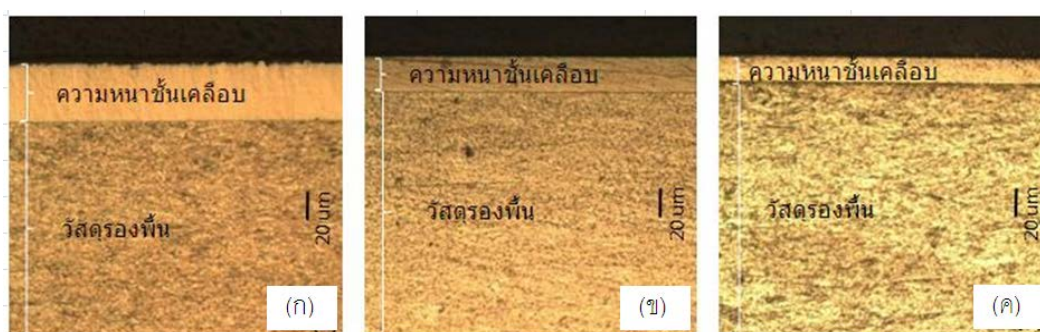
ตารางที่ 4.2 Standard potential ของนิกลและที่งัดเตน [23]

ปฏิกิริยา	ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (Volt)
$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	0.0
$Ni^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ni$	-0.257
$WO_4^{2-} + 4H_2O + 6e^- \rightleftharpoons W + 8OH^-$	-1.074

พบว่าค่าของ Standard potential ในการเกิดปฏิกิริยา Oxidation ของทั้งสแตน (1.074 โวลต์) มากกว่าค่าของนิกเกิล (0.257 โวลต์) ดังนั้นในช่วงที่จ่ายกระแสแบบ Reverse จึงทำให้ทั้งสแตนเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่รุนแรงกว่านิกเกิล และเมื่อเพิ่มเวลา Reverse จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณทั้งสแตนลดลง

4.1.2 ลักษณะของผิววัสดุชุบเคลือบที่มีปริมาณทั้งสแตนที่ต่างกัน

จากการชุบนิกเกิล -ทั้งสแตนโดยใช้ตัวแปรในการชุบที่แตกต่างกัน ได้ทำการตรวจสอบความหนาของชั้นผิวเคลือบโดยการตัดขวางและถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงดังภาพ



ภาพที่ 4.2 ภาพตัดขวางวัสดุที่ผ่านการชุบนิกเกิล-ทั้งสแตนด้วยไฟฟ้า A (ก), B (ข) และประเภท C (ค)

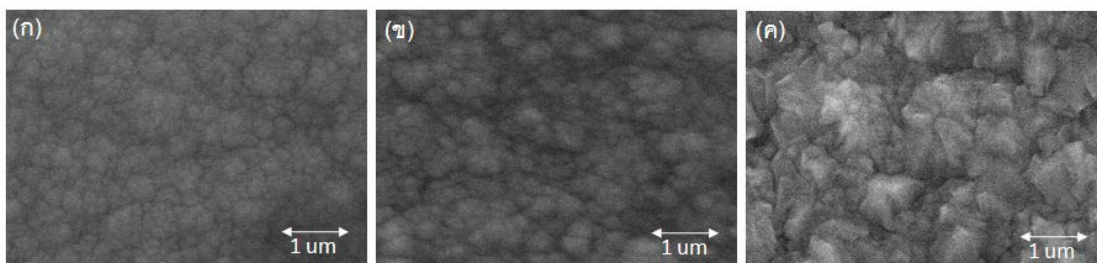
นอกจากนั้นได้นำความหนาชั้นเคลือบมาคำนวณหา Deposition rate โดยหาได้จากการความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบในเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ความหนาของชั้นเคลือบ นิกเกิล-ทั้งสแตนเฉลี่ยภายหลังทำการวัดด้วยโปรแกรม Motic Images Plus 2.0 ML ของกล้องจุลทรรศน์แสง

ชิ้นงาน	Deposition rate ($\mu\text{m}/\text{h}$)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
A (W 22 at.%)	38	1.2
B (W 13 at.%)	25	1.3
C (W 6 at.%)	20	0.7

จากผลการทดลองพบว่าวัสดุเคลือบประเภท A จะมีความหนามากที่สุดและความหนาชั้นเคลือบจะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการทำ Reverse ดังเช่นใน B และ C

นอกจากนั้นได้ทำการตรวจสอบลักษณะของสัณฐานชั้นเคลือบโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยได้ผลดังปรากฏในภาพ

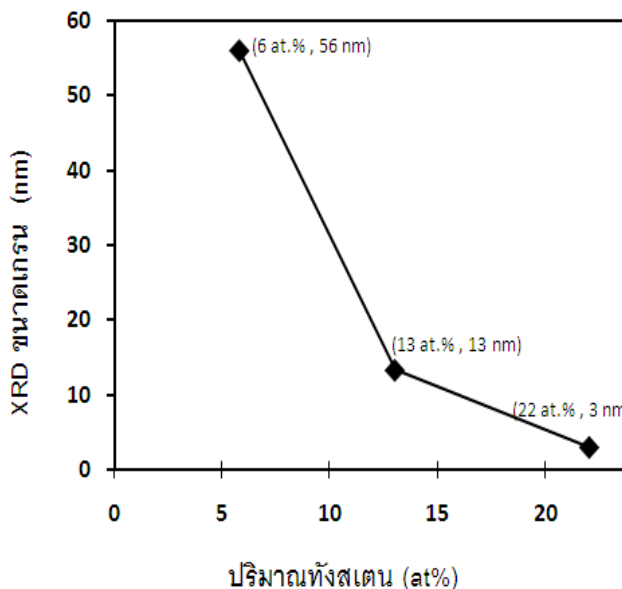


ภาพที่ 4.3 ลักษณะของพื้นผิวชั้นเคลือบนิกเกิล-ทังสแตน A (ก), B (ข) และ C (ค)

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าผิวเคลือบจะมีลักษณะกลมสำหรับชั้นเคลือบ A และ B ซึ่งมีปริมาณทังสแตน 13 และ 22 at.% แต่วัสดุประเภท C ซึ่งมีปริมาณทังสแตน 6 at.% ปรากฏว่าผิวเคลือบมีลักษณะเป็นมุมแหลมชัดเจน จึงกล่าวได้ว่าปริมาณของทังสแตนจะส่งผลต่อสัณฐานของชั้นเคลือบภายหลังการชุบด้วยไฟฟ้า

4.1.3 การตรวจสอบขนาดเกรนและเฟสที่เกิดขึ้นภายหลังทำการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของ นิกเกิล-ทังสเทน

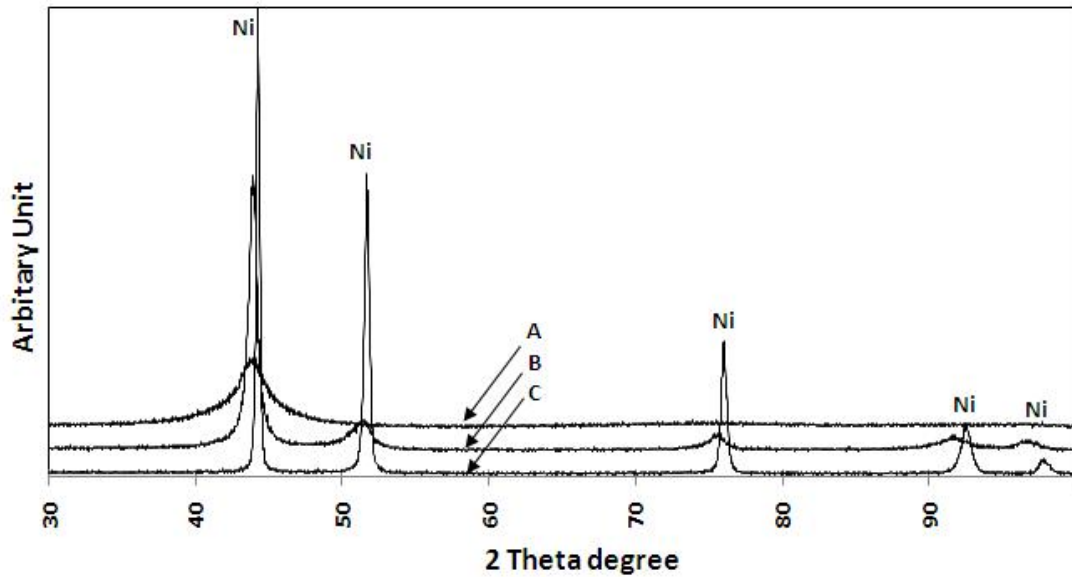
งานวิจัยนี้ได้ใช้การคำนวณโดยใช้วิธี Integral method (โดยแสดงดังในภาคผนวก ก) หาขนาดเกรน ซึ่งผลจากการคำนวณของชั้นเคลือบ A, B และ C ได้แสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 XRD ขนาดเกรนที่มีปริมาณทังสเทนต่างกัน

จากภาพชั้นเคลือบ A ที่มีปริมาณทังสเทนสูงสุด (22 at.%) จะมีขนาดเกรนเล็กที่สุดคือ 3 nm วัสดุ B ซึ่งมีปริมาณทังสเทนลดลงพบว่าขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นเป็น 13 nm และวัสดุ C ซึ่งมีปริมาณทังสเทนน้อยที่สุดจะมีขนาดเกรนใหญ่ที่สุดคือ 56 nm แสดงให้เห็นว่าปริมาณของทังสเทนมีผลต่อขนาดของเกรน คือเมื่อปริมาณทังสเทนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ขนาดของเกรนลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Chianpairot และคณะ [24]

การตรวจโครงสร้างของชั้นเคลือบนิกเกิล -ทังสเทนภายหลังการชุบไฟฟ้า ได้ทำการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 4.5 ปรากฏว่าพบเพียงเฟสของนิกเกิลอย่างเดียวโดยที่ทังสเทนในชั้นเคลือบอยู่ในรูปของ Solid solution และนอกจากนั้นยังพบว่า XRD pattern มีลักษณะแคบเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นเคลือบมีปริมาณทังสเทนลดลง



ภาพที่ 4.5 XRD ของวัสดุ निकเกิล-ทังสเตน A, B และ C

4.1.4 การตรวจสอบสมบัติความแข็งของชั้นเคลือบภายหลังทำการชุบด้วยไฟฟ้า

การตรวจสอบสมบัติความแข็งของวัสดุชุบ निकเกิลที่มีปริมาณทังสเตนและขนาดเกรนแตกต่างกันได้ผลดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 ความแข็งของชั้นเคลือบ निकเกิล-ทังสเตน

ชั้นงาน	ขนาดเกรน (nm)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (GPa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
A (W 22 at.%)	3	7.0	0.3
B (W 13 at.%)	13	6.0	0.1
C (W 6 at.%)	56	4.5	0.2

จากตารางจะเห็นได้ว่าวัสดุประเภท A ที่มีขนาดเกรนเล็กที่สุดมีค่าความแข็งสูง 7 GPa สำหรับวัสดุ B และ C ซึ่งมีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นพบว่ามีความแข็งลดลง

โดย C.A. Schuh และคณะในปี 2003 [25] ได้อธิบายกลไกในการเพิ่มความแข็ง ของชั้นเคลือบวัสดุ निकเกิล -ทังสเตนที่ชุบเคลือบ ด้วยไฟฟ้า จากการคำนวณ ซึ่งจะประกอบด้วย Solid solution strengthening และจาก Grain boundary strengthening ดังสมการ 4.2

$$H = H_0 + \Delta H_{ss} + \Delta H_{gb} \quad (\text{สมการ 4.2})$$

โดย H เป็นความแข็งแรงของชั้นเคลือบนิเกิล - ทังสเตน ส่วน H_0 คือความแข็งแรงของนิเกิลที่บริสุทธิ์ Single crystal โดยมีค่าประมาณ 0.8 GPa และ ΔH_{ss} แทนความแข็งแรงที่เกิดจาก Solid solution ของทังสเตนที่ก่อให้เกิด Dislocation ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของทังสเตนโดยมีค่าประมาณ 0.04 จนถึง 0.06 GPa ในส่วนสุดท้าย ΔH_{gb} คือความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากกลไก Grain boundary strengthening ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ดังสมการ โดยค่า K เป็นค่าคงที่ของวัสดุ และ d คือขนาดเกรน

$$H_{gb} = K / (d^{1/2}) \quad (\text{สมการ 4.3})$$

จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงที่เกิดจาก ΔH_{gb} มีค่าประมาณ 3.66 ถึง 6.14 GPa ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวัสดุชุบเคลือบนิเกิล-ทังสเตนด้วยไฟฟ้าที่มีขนาดเกรนระดับนาโนเมตร มีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงจาก Grain boundary strengthening เป็นปัจจัยหลัก

4.2 กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมนิเกิล-ทังสเตนที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในส่วนของกรรมวิธีทางความร้อนโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือในส่วนของกรรมวิธีทางความร้อนของวัสดุ A, B และ C ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน และในส่วนที่สองคือการทดลองที่ศึกษาเกี่ยวกับเวลาของกรรมวิธีทางความร้อน โดยเลือกวัสดุประเภท A ในการศึกษาในส่วนที่สอง เนื่องจากวัสดุ A มีความแข็งแรงภายหลังการชุบสูงสุดและเมื่อพิจารณาจากแผนภูมิสมดุลเฟสจะเห็นได้ว่า วัสดุประเภทนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงโลหะซึ่งมีแนวโน้มที่สามารถทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้

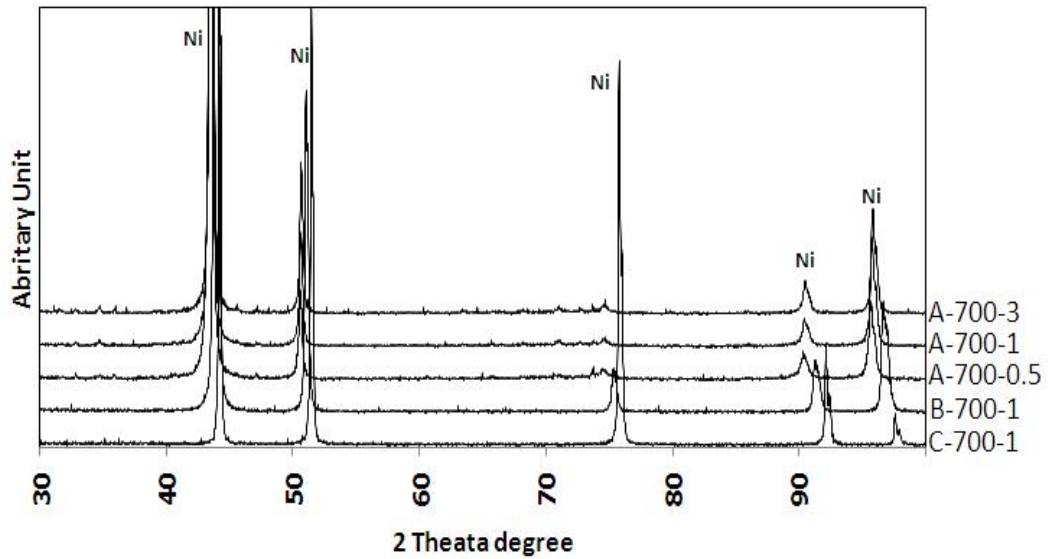
เนื่องจากการศึกษาวัสดุ A, B และ C จะใช้กรรมวิธีทางความร้อนที่มีอุณหภูมิและเวลาแตกต่างกันทำให้ชิ้นงานที่ทำการทดลองมีจำนวนมาก จึงกำหนดชื่อชิ้นงานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ชื่อของชิ้นงานชุบนิเกิล-ทั้งสแตน ภายหลังกกรรมวิธีทางความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิกรรมวิธีทางความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	เวลากรรมวิธีความร้อน (ชั่วโมง)	ประเภทชิ้นงาน
700	0.5	A-700-0.5
	1	A-700-1
		B-700-1
		C-700-1
	3	A-700-3
900	0.5	A-900-0.5
	1	A-900-1
		B-900-1
		C-900-1
	3	A-900-3
1100	0.5	A-1100-0.5
	1	A-1100-1
		B-1100-1
		C-1100-1
	3	A-1100-3

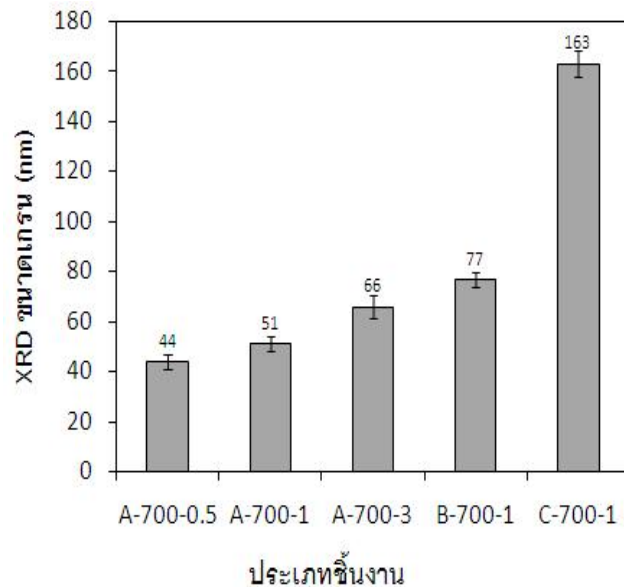
4.2.1 ผลการศึกษากรรมวิธีทางความร้อนวัสดุชุบนิเกิล-ทั้งสแตนที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}\text{C}$

การศึกษการเปลี่ยนแปลงของวัสดุภายหลังกกรรมวิธีทางความร้อนในส่วนแรก คือการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยได้ผลดังภาพ



ภาพที่ 4.6 XRD ของวัสดุ นิกเกิล-ทังสเตน A, B และ C ภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700°C

จากภาพ XRD pattern ของวัสดุ A, B และ C ปรากฏว่าวัสดุที่ชุบนิกเกิล-ทังสเตน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงเฟสภายหลังจากให้ความร้อนที่ 700°C โดยเฟสที่พบมีเพียงนิกเกิลเท่านั้น แต่ลักษณะของ XRD pattern พบว่ากราฟมีลักษณะที่แคบลงแสดงถึงความสัมพันธ์ของเกรนที่มีการเปลี่ยนแปลง จึงได้ทำการคำนวณหาขนาดเกรนโดยวิธี Integral breath method ซึ่งได้ผลดังภาพ 4.7



ภาพที่ 4.7 XRD ขนาดเกรนของวัสดุประเภทต่างๆ ภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700°C

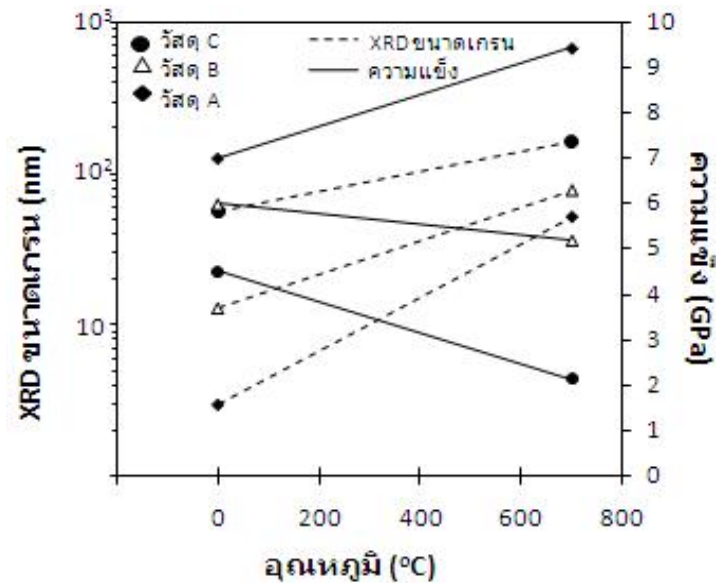
การเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนของวัสดุชุบนิเกิล-ทังสเตนทุกประเภท ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700°C จะเห็นได้ว่าวัสดุมีขนาดเกรนเพิ่มขึ้น โดยขนาดเกรนวัสดุประเภท C-700-1 มีขนาดเกรนมากที่สุด คือ 163 nm นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาวัสดุประเภท A-700-0.5, A-700-1 และ A-700-3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นจะทำให้วัสดุมีอัตราการโตของเกรนสูงขึ้น

ผลการตรวจสอบความแข็งของวัสดุชุบนิเกิล -ทังสเตน ประเภทต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งเห็นได้ว่าความแข็งของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งภายหลังการชุบไฟฟ้า โดยวัสดุประเภท B-700-1 และ C-700-1 ที่มีปริมาณทังสเตนต่ำปรากฏ ว่าค่าความแข็งลดลง ส่วนวัสดุประเภท A-700-0.5, A-700-1 และ A-700-3 พบว่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ความแข็งภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700°C

ชิ้นงาน	ความแข็งเฉลี่ย (GPa)		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ชั้นเคลือบที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	ชั้นเคลือบหลังกรรมวิธีทางความร้อนทางที่ 700°C	
A-700-0.5	7	10.5	0.4
A-700-1		9.4	0.2
A-700-3		8.8	0.1
B-700-1	6	5.2	0.1
C-700-1	4.5	2.1	0.2

เพื่อความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นภายหลังกรรมวิธีทางความร้อน จึงนำข้อมูลระหว่างขนาดเกรนและค่าความแข็งมาทำการเปรียบเทียบดังนี้

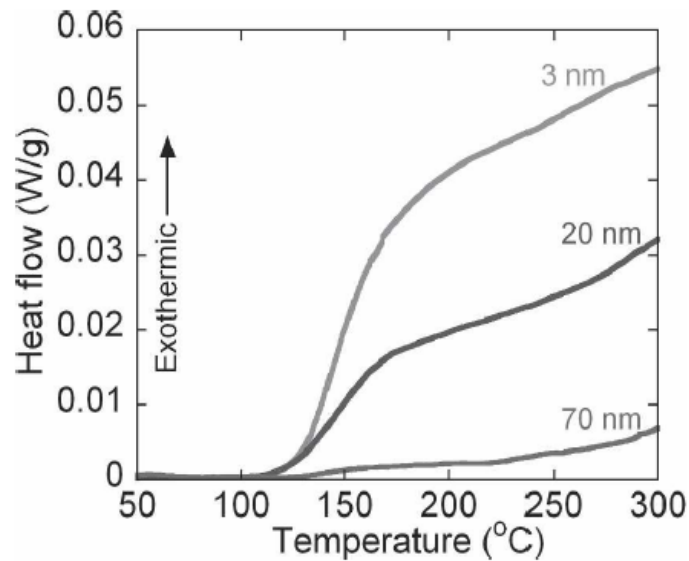


ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของ XRD ขนาดเกรนและความแข็งของวัสดุแต่ละประเภทภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C เวลา 1 ชั่วโมง

จากภาพแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและขนาดเกรน ที่ได้จากการชุบไฟฟ้าและหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้เวลาเท่ากันของวัสดุที่มีปริมาณทั้งสแตนตางกัน โดยวัสดุ B-700-1 และ C-700-1 มีการโตของเกรนมากขึ้นและนอกจากนั้นยังส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงด้วย

สำหรับวัสดุ A-700-1 พบว่ามีการโตของเกรนเช่นเดียวกับประเภทอื่นๆ แต่กลับพบว่าวัสดุ มีความแข็งเพิ่มขึ้นมาก โดยเกิดจากวัสดุ ชุบเคลือบนิกเกิล -ทังสแตนที่เป็นวัสดุนาโน เกิด Grain relaxation ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ Dislocation ของวัสดุที่เกิดจากการชุบไฟฟ้า บางส่วนถูกกำจัด ภายหลังจากที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ซึ่งส่งผลให้ค่าของ Critical shear stress ที่ทำให้เกิด การ slip ของ Dislocation เพิ่มขึ้น [26] และนอกจากนั้นในงานวิจัยของ Detor และคณะ ได้ แสดงให้ว่าวัสดุที่เกิด Grain relaxation จะทำให้พลังงานภายในของวัสดุมีความเสถียรมากขึ้น โดยการคายพลังงานส่วนเกินบริเวณขอบ เกรน (Excess grain boundary) ที่เกิดขึ้นระหว่างการ ชุบด้วยไฟฟ้า ดังที่แสดงในภาพที่ 4.9

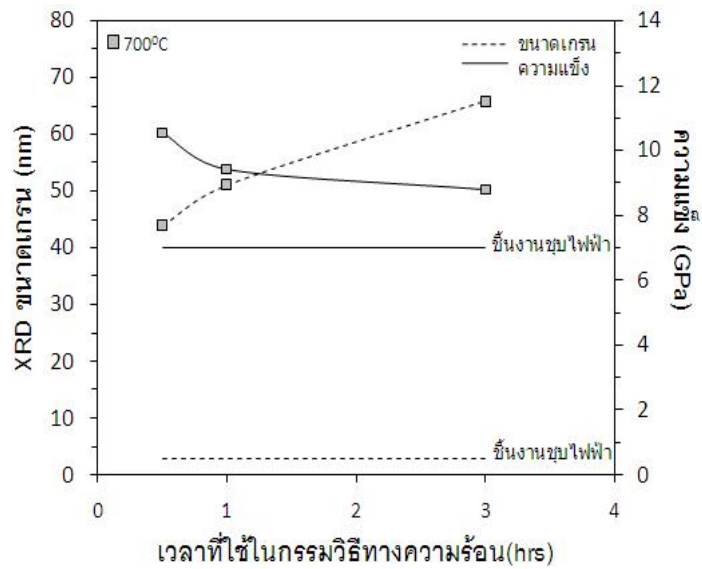
การเปลี่ยนแปลงของ Critical shear stress และโครงสร้างที่มีความเสถียรเพิ่มขึ้นจึงเป็น สาเหตุที่ทำให้ของขอบเกรนมีความแข็งแรงสามารถต้านทานแรงที่มากระทำได้มากขึ้น และทำให้ วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.9 DSC แสดงการคายพลังงานของวัสดุ निकเกิล - ทั้งสแตนท์ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีขนาดเกรนเริ่มต้น 3, 20 และ 70 nm [4]

ในกรณีของวัสดุ B-700-1 และ C-700-1 เกิดปรากฏการณ์ Grain boundary relaxation เช่นเดียวกับ A-700-1 แต่เนื่องจากวัสดุประเภทดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของค่า Critical shear stress เล็กน้อย และขนาดเกรนเริ่มต้นที่ใหญ่ซึ่งมีการคายพลังงานส่วนเกินบริเวณขอบเกรนจะมีปริมาณน้อยดังที่แสดงในภาพที่ 4.9 นอกจากนั้นสัดส่วนปริมาตรขอบเกรน (Grain boundary volume fraction) ที่น้อยกว่าวัสดุประเภท A-700-1 ทำให้การจัดเรียงตัวบริเวณขอบเกรนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก

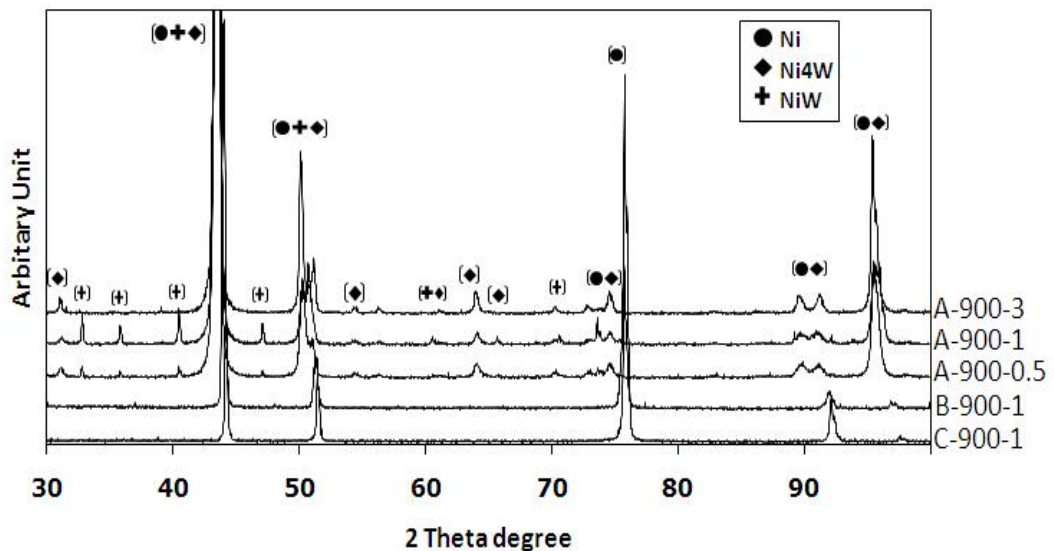
สำหรับตัวแปรของเวลาที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อนที่ต่างกันพบว่าส่งผลต่อความแข็งดังภาพที่ 4.10 โดยวัสดุ A-700-0.5 ซึ่งใช้เวลาน้อยที่สุดจะมีความแข็งสูงสุดเพราะว่าวัสดุจะเกิด Grain boundary relaxation และมีขนาดเกรนเล็กที่สุด โดยเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 1 และ 3 ชั่วโมง จะทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นและความแข็งลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน XRD และความแข็งวัสดุประเภท A ภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C

4.2.2 ผลการศึกษากรรมวิธีทางความร้อนวัสดุ निकเกิล-ทังสเตนที่อุณหภูมิ 900°C

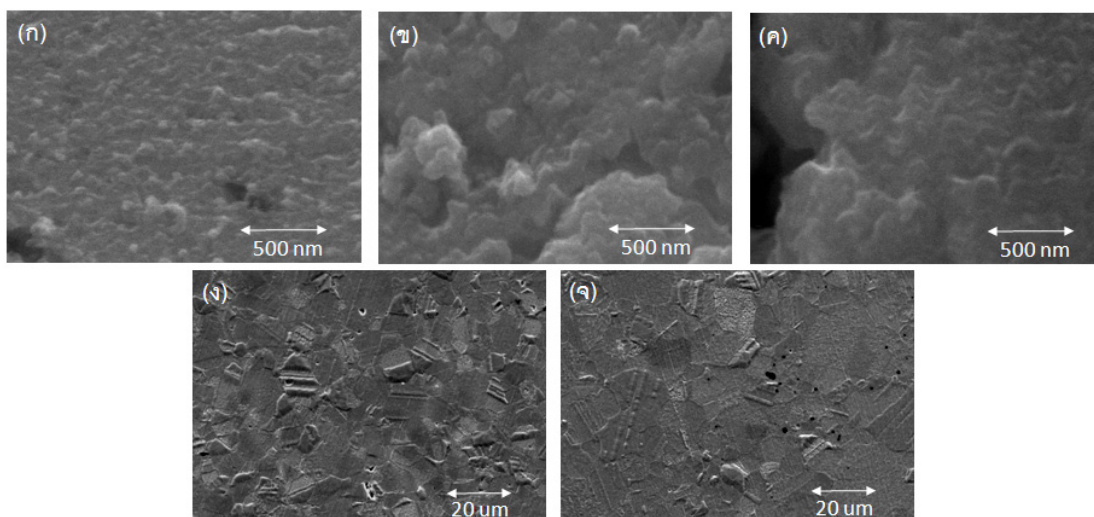
ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยใช้ เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 900°C นั้น ปรากฏว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดังที่ได้แสดงในภาพ



ภาพที่ 4.11 XRD ของวัสดุ निकเกิล-ทังสเตน A, B และ C ภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่ 900°C

โดยในวัสดุ A-900-0.5, A-900-1 และ A-900-3 ซึ่งมีปริมาณทั้งสแตนมากที่สุด (22 at.%) ปรากฏฟีกของนิกเกิล และการตกผลึกของเฟสที่สอง คือ เฟส Ni_4W และ NiW แต่ในวัสดุที่มีปริมาณทั้งสแตน 6 และ 13 at.% คือ B-900-1 และ C-900-1 ไม่ปรากฏการตกผลึกของเฟสใหม่ โดยพบเพียงฟีกของนิกเกิลเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับ แผนภูมิสมมูลเฟสของนิกเกิล -ทั้งสแตน ที่พบว่าในช่วงที่วัสดุเกิดสารประกอบได้นั้นต้องมีปริมาณทั้งสแตนมากกว่าประมาณ 15 at.% และนอกจากนั้นวัสดุทั้งหมดที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ $900^{\circ}C$ พบว่า XRD pattern มีความกว้างน้อยลง

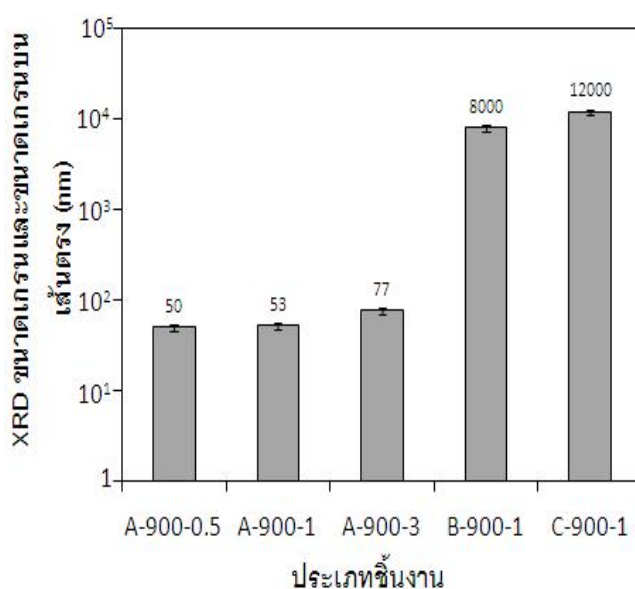
การคำนวณหาขนาดเกรนของวัสดุใช้วิธี Integral breath method โดยพบว่าขนาดเกรนของ A-900-0.5, A-900-1 และ A-900-3 มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยอยู่ในระดับนาโนเมตร แต่ในวัสดุ B-900-1 และ C-900-1 ปรากฏว่าภายหลังจากการคำนวณขนาดเกรนมีการโตเพิ่มมากขึ้นถึงระดับไมโครเมตร ซึ่งหากใช้วิธีดังกล่าวในการหาขนาดเกรนจะมีความแม่นยำน้อย จึงได้ใช้วิธีการวัดจำนวนเกรนบนเส้นตรง หรือ Linear intercept method (โดยแสดงรายละเอียดไว้ภาคผนวก ข) ซึ่งได้ทำการตรวจสอบขนาดเกรนจากภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดภายหลังจากทำการกัดกรดที่ประกอบด้วย น้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร, กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 37% ในปริมาณ 10 มิลลิลิตรและโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide) 2 กรัม โดยมีรูปโครงสร้างดังที่แสดงในภาพ 4.12



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ A-900-0.5 (ก), A-900-1(ข), A-900-3 (ค), B-900-1(ง) และ C-900-1 (จ)

โดยจากรูปโครงสร้างจุลภาค ของวัสดุ B-900-1 และ C-900-1 จะเห็นขนาดเกรนที่ชัดเจนในระดับไมโครเมตร แต่ในวัสดุ A-900-0.5, A-900-1 และ A-900-3 ซึ่งมีขนาดเกรนระดับนาโนเมตรไม่สามารถระบุขอบเกรนได้อย่างชัดเจน โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่พบจะประกอบไปด้วยเกรนเล็กๆ ซ้อนกันอยู่หลายเกรน หรือที่เรียกว่า Mesoscale structure [27]

ขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงภายหลังกรรมวิธีทางความร้อน 900°C จากการคำนวณของชิ้นงานทั้งหมด ได้แสดงในภาพที่ 4.13 พบว่าวัสดุทุกประเภทมีการโตของเกรนเกิดขึ้น โดยเฉพาะวัสดุ B-900-1 และ C-900-1 มีอัตราการโตของเกรนที่สูงเมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังผ่านการชุบไฟฟ้า และวัสดุที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 700°C



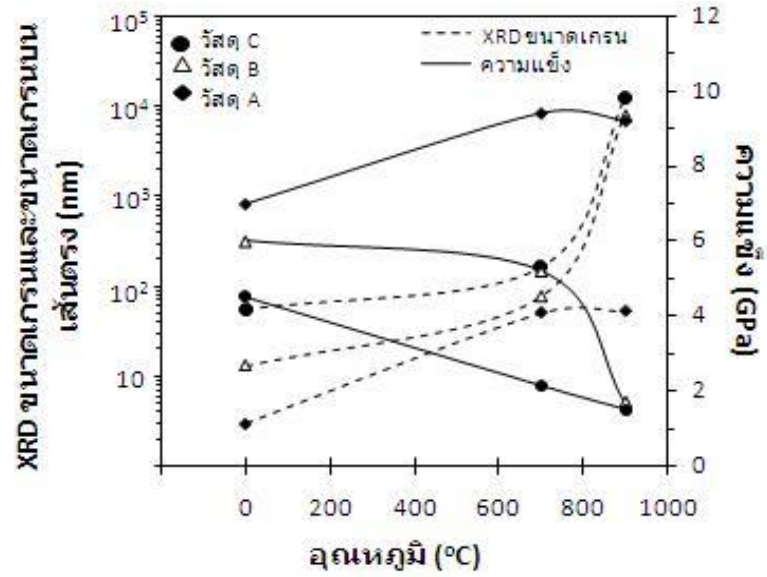
ภาพที่ 4.13 ขนาดเกรน XRD และขนาดเกรนจากวิธีการนับจำนวนเกรนบนเส้นตรงของวัสดุประเภทต่างๆ ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 900°C

สมบัติความแข็งวัสดุที่ชุบนิเกิล-ทังสเทนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ 900°C พบว่าวัสดุ B-900-1 และ C-900-1 มีค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเทียบกับความแข็งของวัสดุที่ได้จากการชุบไฟฟ้าคือ B และ C โดยที่วัสดุประเภท A-900-0.5, A-900-1 และ A-900-3 มีความแข็งที่มากกว่าวัสดุประเภท A ดังที่แสดงในตาราง

ตารางที่ 4.7 ความแข็งภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 900°C

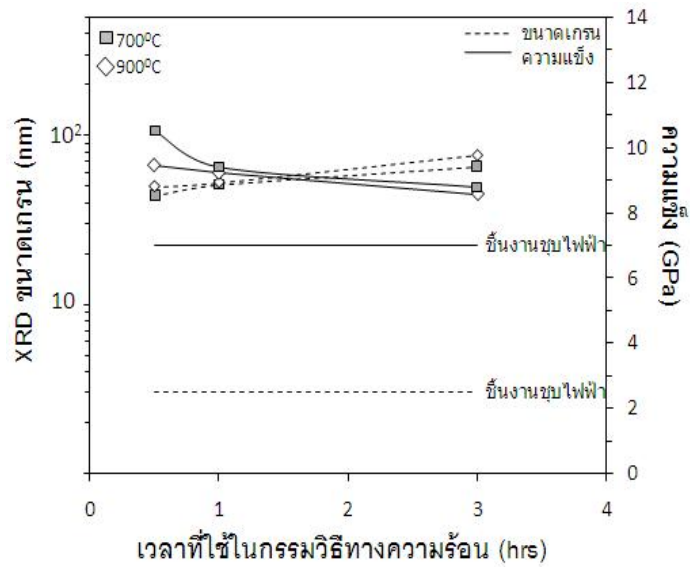
ชิ้นงาน	ความแข็งเฉลี่ย (GPa)		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ชั้นเคลือบที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	ชั้นเคลือบหลังกรรมวิธีทางความร้อนทางที่ 900°C	
A-900-0.5	7	9.5	0.2
A-900-1		9.2	0.2
A-900-3		8.6	0.1
B-900-1	6	1.7	0.1
C-900-1	4.5	1.5	0.1

เมื่อนำสมบัติความแข็งและขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละประเภทมาหาความสัมพันธ์ปรากฏว่าได้ผลดังภาพที่ 4.14 โดยขนาดเกรนของ B-900-1 และ C-900-1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างผลึกของเกรนระดับนาโนเมตรเป็นระดับไมโครเมตรส่งผลให้ความแข็งลดลงมากโดยมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ निकิลที่เกิดที่ชุบด้วยไฟฟ้าและมีขนาดเกรนระดับไมโครเมตร เช่นการชุบ निकิลแบบ Nickel Watt's bath [8] สำหรับวัสดุ A-900-1 ซึ่งมีการโตของเกรนเช่นเดียวกับวัสดุประเภท B-900-1 และ C-900-1 แต่ยังมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นไปได้ว่าวัสดุ A-900-1 ที่เกิดการตกผลึกของเฟสที่สองคือ Ni_4W และ NiW จะมีส่วนช่วยยับยั้งการโตของเกรน หรือที่เรียกว่า Grain pinning [28] นอกจากนั้นยังคาดว่า การตกผลึกของเฟสที่สองช่วยให้ความแข็งของ A-900-1 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน A ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ C.Borgia โดยพบว่าเฟสของ Ni_4W และ NiW เป็นเฟสที่สามารถช่วยเพิ่มความแข็งของวัสดุได้ประมาณ 2-3 GPa [29]



ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของ XRD ขนาดเกรนและความแข็งของวัสดุแต่ละประเภทภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 1 ชั่วโมง

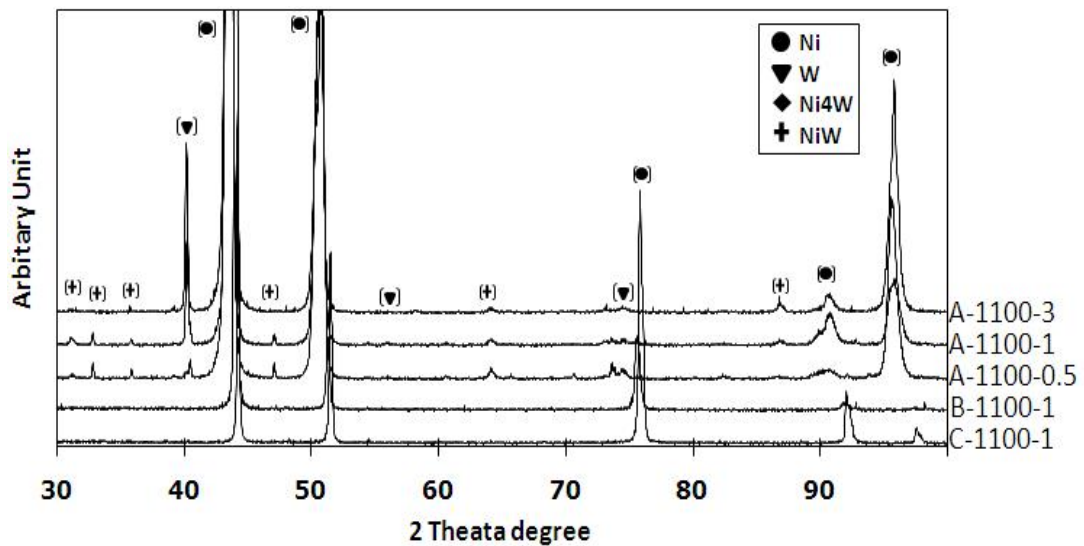
สำหรับการศึกษาตัวแปรของเวลาที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุซูบนิคเจล-ทังสเทนที่อุณหภูมิ 900°C นั้น ได้แสดงในภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาในขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อนมากขึ้น จะทำให้เกิดการโตของเกรนมากขึ้นและส่งผลให้ความแข็งลดลง



ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน XRD และความแข็งแรงวัสดุประเภท A ภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 900°C

4.2.3 ผลการศึกษากรรมวิธีทางความร้อนวัสดุ निकเกิล-ทังสเตนอุณหภูมิ 1100°C

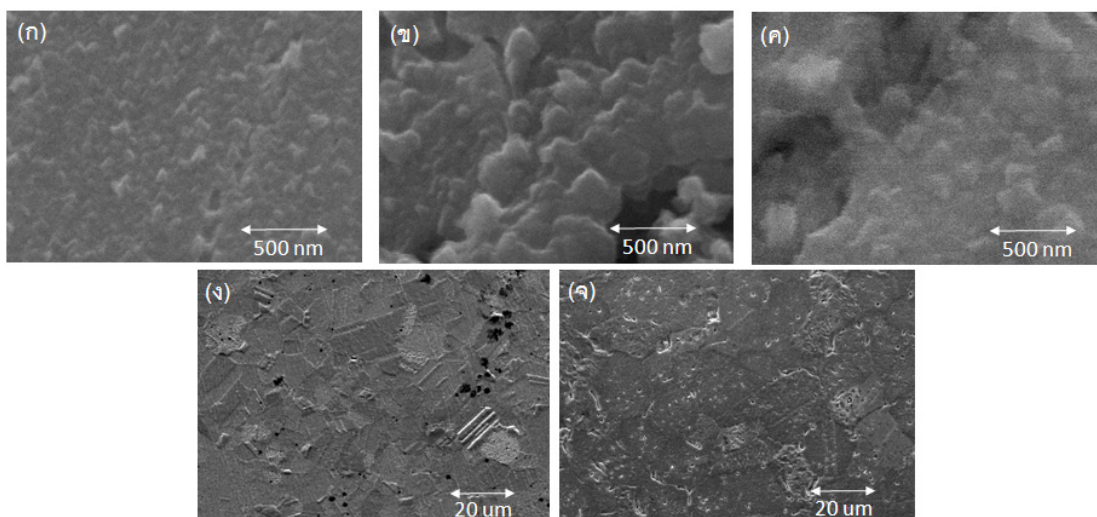
ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของวัสดุที่ชุบ निकเกิล - ทังสเตนที่ 1100°C ใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงดังที่แสดงในภาพ



ภาพที่ 4.16 XRD ของวัสดุ निकเกิล-ทังสเตน A, B และ C ภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1100°C

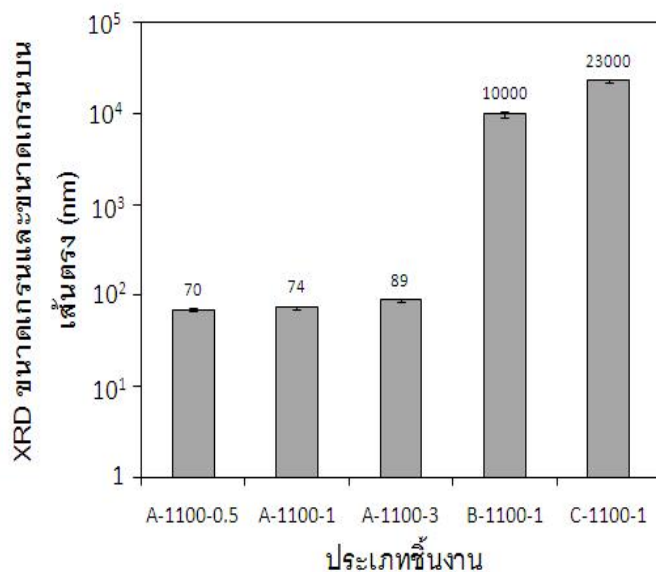
โดยวัสดุประเภท B-1100-1 และ C-1100-1 จะพบเพียงเฟสของนิกเกิลเพียงอย่างเดียวซึ่งมีลักษณะเหมือนกับอุณหภูมิที่ 700°C และ 900°C สำหรับวัสดุ A-1100-0.5, A-1100-1 และ A-1100-3 นั้นพบเฟสที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยเฟสของนิกเกิลและทังสเตน นอกจากนั้นยังพบเฟสที่สองซึ่งตกผลึก NiW เพียงเฟสเดียว โดยคาดว่าเฟสของ Ni_4W ที่เกิดอุณหภูมิ 900°C จะมีความไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง

การวัดขนาดเกรนที่อุณหภูมิที่ 1100°C จะมีลักษณะเหมือนกับที่ 900°C โดยวัสดุประเภท B-1100-1 และ C-1100-1 ซึ่งมีเกรนขนาดใหญ่จะทำการวัดจำนวนเกรนบนเส้นตรงจากรูปที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังในภาพที่ 4.17 และสำหรับวัสดุประเภท A-1100-0.5, A-1100-1 และ A-1100-3 จะใช้วิธี Integral breath method



ภาพที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ A-1100-0.5 (ก), A-1100-1(ข), A-1100-3 (ค), B-1100-1 (ง) และ C-1100-1 (จ)

ภายหลังจากการคำนวณขนาดเกรนของวัสดุทั้ง 5 ประเภทที่อุณหภูมิ 1100°C ได้นำผลมาทำการเปรียบเทียบกับวัสดุ นิกเกิล-ทังสเตนในแต่ละประเภท ดังภาพ



ภาพที่ 4.18 ขนาดเกรน XRD และขนาดเกรนจากวิธีการนับจำนวนเกรนบนเส้นตรงของวัสดุประเภทต่างๆ ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1100°C

ผลจากการคำนวณหาขนาดเกรนของวัสดุ निकเกิล-ทังสแตนที่อุณหภูมิ 1100°C จะเห็นได้ว่าวัสดุ A-1100-0.5, A-1100-1 และ A-1100-3 มีขนาดเกรนในระดับนาโนเมตร แต่วัสดุ B-1100-1 และ C-1100-1 มีการโตของเกรนระดับไมโครเมตรอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 900°C

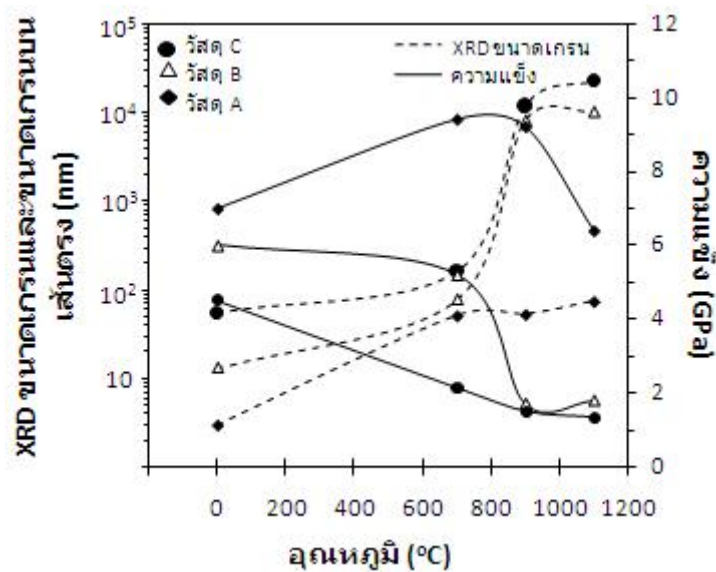
โดยสมบัติความแข็งของวัสดุ निकเกิล-ทังสแตนที่อุณหภูมิ 1100°C ได้ทำการตรวจสอบและสรุปในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความแข็งภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่ 1100°C

ชิ้นงาน	ความแข็งเฉลี่ย (GPa)		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ชั้นเคลือบที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	ชั้นเคลือบหลังกรรมวิธีทางความร้อนทางที่ 1100°C	
A-1100-0.5	7	7.5	0.2
A-1100-1		6.4	0.2
A-1100-3		6.0	0.1
B-1100-1	6	1.8	0.1
C-1100-1	4.5	1.3	0.1

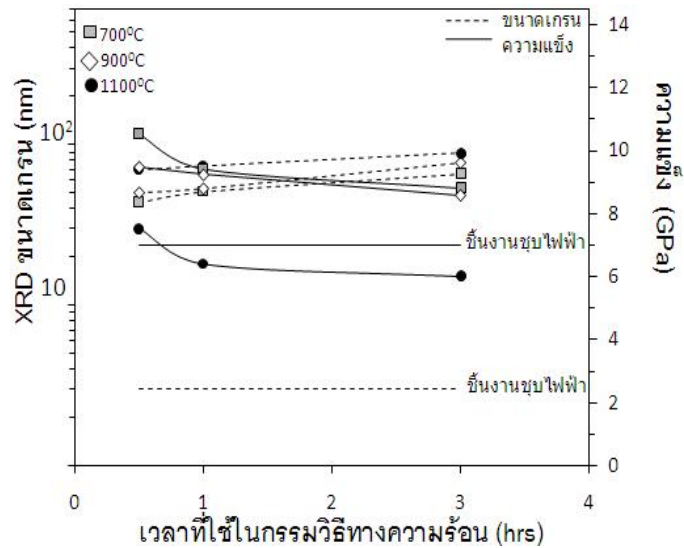
จากภาพที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าวัสดุ B-1100-1 และ C-1100-1 เป็นวัสดุที่มีสมบัติความแข็งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทเดียวกันในทุกอุณหภูมิ โดยสาเหตุที่ส่งผลต่อความแข็งวัสดุประเภทดังกล่าวเกิดจากการโตของเกรนสูงในระดับไมโครเมตร

สำหรับวัสดุประเภท A-1100-1 ถึงแม้จะมีอัตราการโตของเกรนที่เพิ่มมากขึ้น แต่ก็ยังมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยที่ความแข็งของชั้นเคลือบมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุประเภท A-900-1 มีสาเหตุมาจากการโตของเกรน



ภาพที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของ XRD ขนาดเกรนและความแข็งของวัสดุแต่ละประเภทภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1100°C เวลา 1 ชั่วโมง

การศึกษาตัวแปรของเวลาในกรรมวิธีทางความร้อน ณ อุณหภูมิ 1100°C ที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งและขนาดเกรนของวัสดุประเภท A ได้ผลดังนี้ คือวัสดุ A-1100-0.5 ซึ่งใช้เวลาการให้ความร้อนน้อยที่สุด จะมีการโตของเกรนน้อยที่สุดและมีค่าความแข็ง 7.5 GPa โดยเมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นเป็น A-1100-1 และ A-1100-3 จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับที่อุณหภูมิ 700 และ 900°C คือมีขนาดเกรนเพิ่มขึ้นและความแข็งลดลง และนอกจากนั้นยังพบว่าค่าความแข็งของ A-1100-1 และ A-1100-3 มีค่าน้อยกว่าวัสดุ A ที่ได้จากการชุบไฟฟ้าด้วย



ภาพที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรน XRD และความแข็งวัสดุประเภท A ภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1100°C

4.3 ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ निकเกิล-ทังสแตน

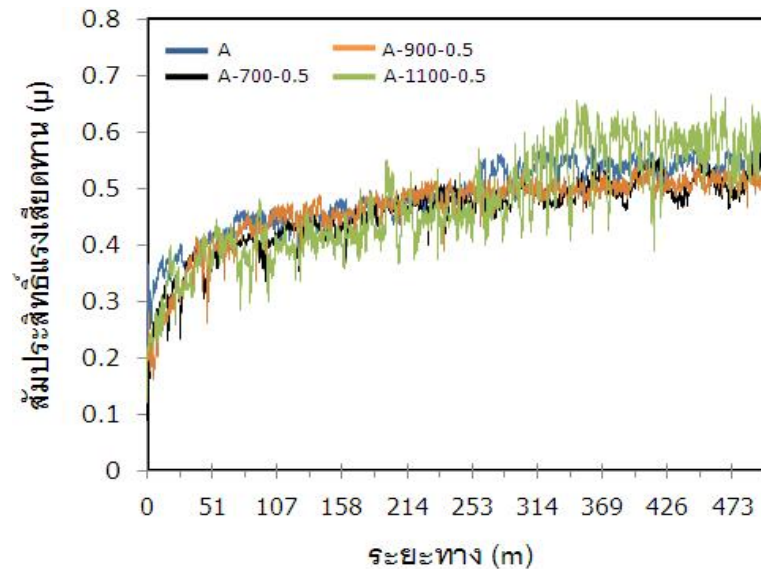
จากความสัมพันธ์ของสมการ Archard ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ของสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุที่เกิดขึ้นในลักษณะ Sliding wear โดยแสดงไว้ในสมการ 2.4 เห็นได้ว่าเมื่อวัสดุมีความแข็งสูงจะส่งผลให้วัสดุเกิดการสึกหรอแบบ Sliding wear ลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกวัสดุที่มีความแข็งสูงสุดของแต่ละอุณหภูมิทำการทดสอบโดยประกอบไปด้วยวัสดุดังต่อไปนี้คือ

ตารางที่ 4.9 ประเภทวัสดุ निकเกิล-ทังสแตนที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

ประเภทวัสดุ	ความแข็ง (GPa)
A	7.0
A-700-0.5	10.5
A-900-0.5	9.5
A-1100-0.5	7.5

4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุภายหลังการทดสอบ Ball on disk

การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุแต่ละประเภท หาได้จากเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Model TE79 โดยใช้โปรแกรม PLINT ในการตรวจสอบ ซึ่งได้ผลดังที่ได้แสดงในภาพ



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอของวัสดุชนิดกึ่ง-ทังสเตนแต่ละประเภท

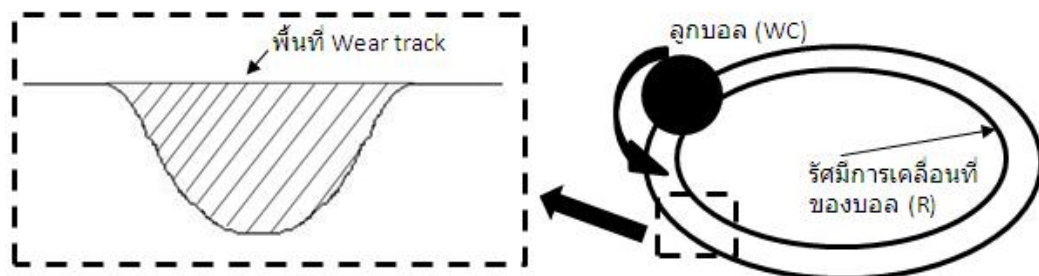
จากภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วงดังต่อไปนี้ คือช่วง 200 เมตรแรก ของระยะการไถลเป็นช่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.48 โดยมีลักษณะที่ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกิดจากผิวสัมผัสวัสดุหรือระดับความสูงของชิ้นงานยังไม่ได้ระนาบ และนอกจากนั้นอาจมีสาเหตุจากการเสียดรูปของผิววัสดุที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ในช่วงที่สองคือช่วงที่มีระยะการไถลระหว่าง 201 ถึง 500 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยมีค่าเฉลี่ยในช่วง 0.5-0.52 ดังที่แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยของนิกเกิล-ทังสเทน

ประเภทวัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ)
A	0.50
A-700-0.5	0.51
A-900-0.5	0.51
A-1100-0.5	0.52

4.3.2 การตรวจสอบปริมาณการสึกหรอของวัสดุ นิกเกิล-ทังสเทน ภายหลังการทดสอบการสึกหรอ

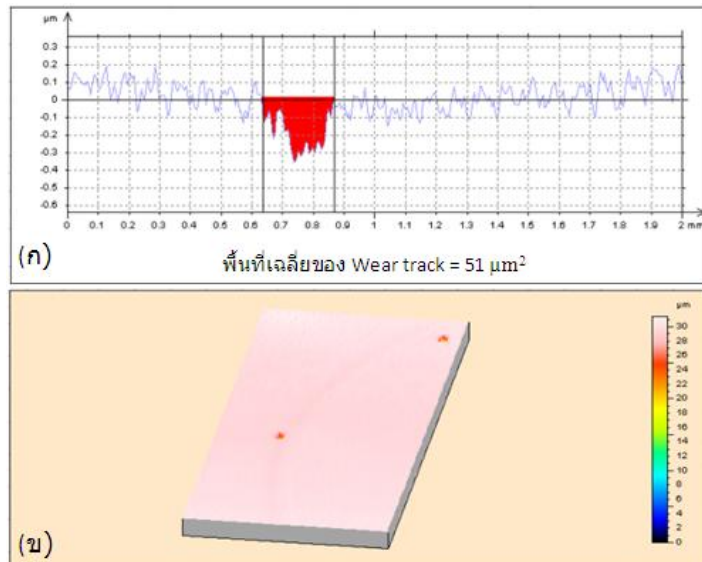
ในการตรวจสอบหาปริมาณของวัสดุภายหลังทำการทดสอบ Ball on disk ใช้วิธีการคำนวณหาปริมาณการสูญเสีย ของวัสดุ เนื่องจากภายหลังในการตรวจสอบน้ำหนักของ Disk มีการลดลงในปริมาณที่น้อยมากและอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการหาปริมาณการสึกหรอโดยการคำนวณจากการหาขนาดพื้นที่ของ Wear track เฉลี่ย คูณกับความยาวของเส้นรอบวงของ การเคลื่อนที่ลูกบอลที่ทำการเคลื่อนที่ขณะทดสอบซึ่งได้แสดงดังภาพ



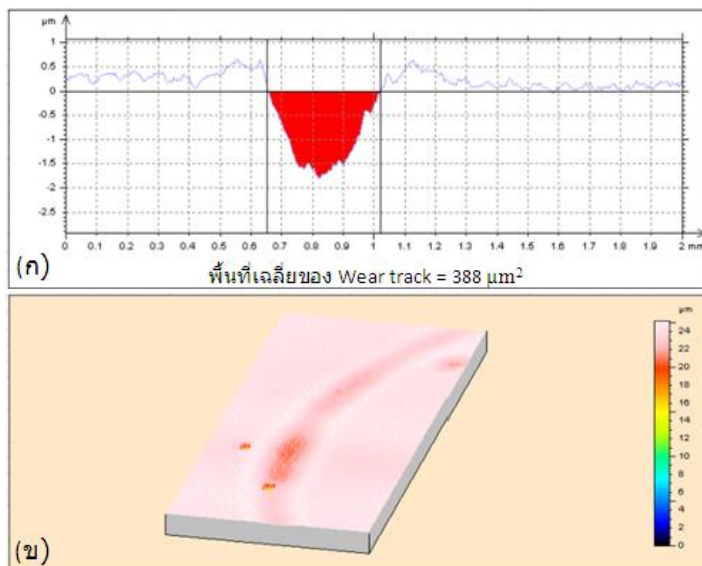
ภาพที่ 4.22 ลักษณะของพื้นที่และการหาความยาวเส้นรอบวงของ Wear track

โดยการหาเส้นรอบวงของการเคลื่อนที่ลูกบอลทังสเทนคาร์ไบด์ในการทดสอบของวัสดุทุกประเภท มีระยะทางเท่ากัน และหาได้จากการคำนวณของรัศมีการเคลื่อนที่ของลูกบอล ($2\pi R$) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้รัศมีการเคลื่อนที่ 5 mm ดังนั้นความยาวของเส้นรอบวงของแต่ละประเภทเท่ากับ 31 mm

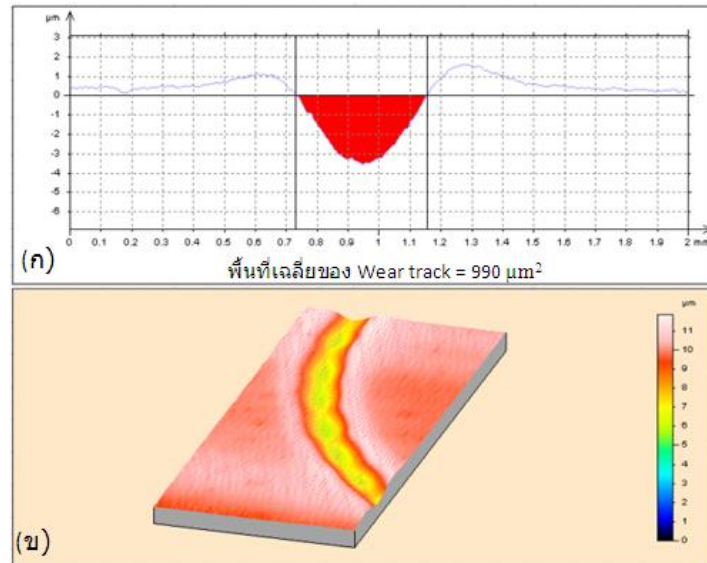
ในส่วนการหาพื้นที่ของ Wear track ของวัสดุชุบนิเกิล - ทังสเตนหาได้จากการใช้เครื่อง Profilometer ในการตรวจสอบของวัสดุแต่ละประเภท ซึ่งสามารถแสดงผลทั้งในภาพแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติได้ดังภาพ



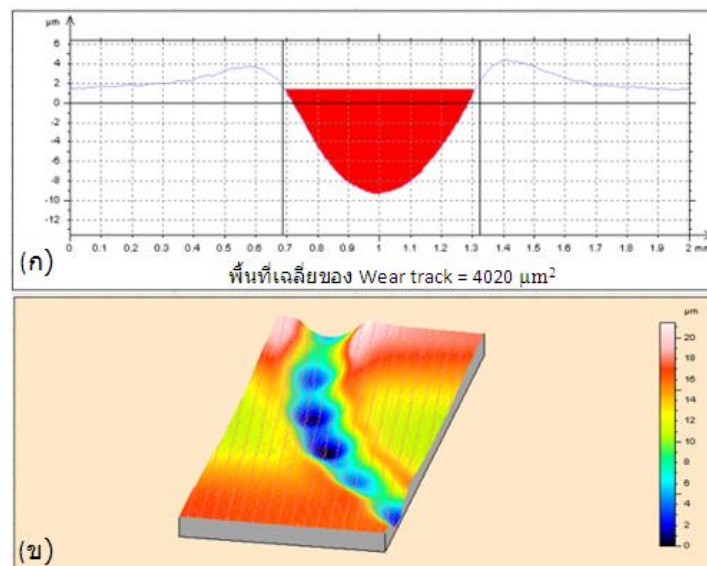
ภาพที่ 4.23 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการคำนวณของวัสดุประเภท A ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข)



ภาพที่ 4.24 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการคำนวณของวัสดุประเภท A-700-0.5 ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข)



ภาพที่ 4.25 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการคำนวณของวัสดุประเภท A-900-0.5 ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข)



ภาพที่ 4.26 พื้นที่ของ Wear track โดยการใช้โปรแกรม Taly scan Model#150 ในการคำนวณของวัสดุประเภท A-1100-0.5 ในแบบ 2 มิติ (ก) ในแบบ 3 มิติ (ข)

จากการหาขนาดพื้นที่ Wear track ของวัสดุแต่ละประเภทและความยาวของเส้นรอบวงการเคลื่อนที่ลูกลบดทั้งสแตนคาร์ไบด์ สามารถคำนวณหาปริมาตรการสึกห่อได้ดัง ตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปริมาตรการสึกหรอของวัสดุ निकเกิล-ทังสเตน

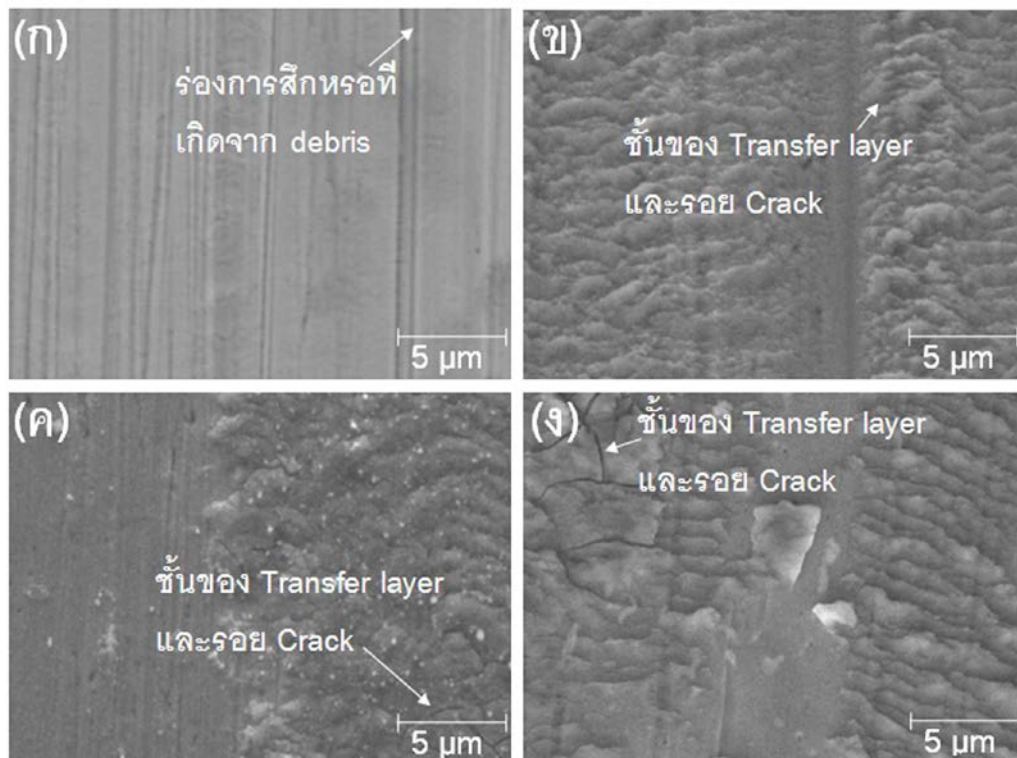
ประเภทวัสดุ	ความยาวเส้นรอบวง ของลูกบอล (μm)	พื้นที่ Wear track เฉลี่ย (μm^2)	ปริมาตรการสึกหรอ (μm^3)
A	31.42×10^3	51	1.6×10^6
A-700-0.5		388	12.7×10^6
A-900-0.5		990	31.1×10^6
A-1100-0.5		4020	126.3×10^6

โดยจากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวัสดุประเภท A ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีปริมาตรการสึกหรอที่น้อยที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุประเภท A มีสมบัติความต้านทานการสึกหรอดีที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุทุกประเภทที่ทำการทดสอบ

4.3.3 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ निकเกิล -ทังสเตนภายหลังการทดสอบการสึกหรอ

เพื่อความเข้าใจของสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุแต่ละประเภทจึงได้ทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของวัสดุภายหลังการทดลองดังต่อไปนี้

1.) การตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวของ Disk หรือวัสดุ निकเกิล -ทังสเตนประเภทต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดในโหมด Secondary electron ดังที่แสดงในภาพ



ภาพที่ 4.27 ลักษณะพื้นผิวของ Wear track ของวัสดุเหล็กกล้า-ทังสเตนของประเภท A (ก) ประเภท A-700-0.5 (ข) ประเภท A-900-0.5 (ค) ประเภท A-1100-0.5 (ง)

จากภาพแสดงให้เห็นว่าวัสดุเกิดการสึกหรอโดยมีลักษณะของพื้นผิวที่สึกหรอแตกต่างกัน โดยที่ในแบบแรกคือ ในภาพ 4.27 (ก) ซึ่งเป็นของวัสดุประเภท A ที่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนปรากฏว่ามีร่องที่เกิดจากการเสียดสีของ Wear debris ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุประเภท A เกิดการสึกหรอโดยมีกลไกที่ควบคุมจากกลไกแบบ Abrasive wear เป็นหลัก ลักษณะพื้นผิวการสึกหรอในแบบที่สองคือแบบในภาพที่ 4.27 (ข-ง) ซึ่งเป็นภาพของวัสดุประเภท A ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทั้งหมด โดยลักษณะของ Wear track ที่เกิดขึ้นพบว่าเกิดชั้นของ Transfer layer ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุเกิดการสึกหรอแบบ Adhesive wear [19] และนอกจากนั้นยังพบร่องที่เกิดจากการเสียดสีร่วมด้วย ดังนั้นกลไกที่เกิดระหว่างการทดสอบของวัสดุประเภท A-700-0.5, A-900-0.5 และ A-1100-0.5 จะประกอบด้วยกลไกระหว่าง Adhesive และ Abrasive wear

2.) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของวัสดุชุบนิเกิล -ทังสเตนภายหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Ball on disk โดยจากผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแสดงให้เห็นว่าวัสดุเหล็กกล้า-ทังสเตนที่ไม่เป็นไปตามสมการของ Archard คือวัสดุที่มีความแข็งจะมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอดี ซึ่งเกิดจากแรงกระทำที่เกิดจากการเสียดสีจะทำให้วัสดุได้รับพลังงานที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและสมบัติความต้านทานการสึกหรอ ดังต่อไปนี้

- ความเค้น (Stress) สูงที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบ โดยจากการศึกษาของ D.S. Gianola [30] พบว่าเมื่อวัสดุที่ได้รับแรงกระทำที่มีค่าสูงจะทำให้ขอบเกรนวัสดุมีการเคลื่อนที่ (Grain boundary migration) หรือเปลี่ยนทิศทาง โดยค่าของความเค้นที่กระทำซึ่งทำให้เกิดการเสียรูปแบบ Plastic deformation จะเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง เช่น การโตของเกรน นอกจากนี้ในงานของ Rupert ที่ทำการทดสอบโดยใช้วัสดุประเภทเดียวกันและตัวแปรในการทดสอบความต้านทานการล้าหรือที่มีค่าใกล้เคียงกัน แล้วทำการคำนวณแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการใช้โปรแกรม Finite element พบว่าค่าของแรงที่กระทำในลักษณะของความเค้นเฉือน (Shear stress) มีค่ามากกว่าของ Yield stress ของวัสดุ ดังนั้นเป็นไปได้ว่าวัสดุนี้เกิด - ทั้งสแตนท์ที่ทดสอบความต้านทานการล้าหรือในการศึกษานี้ วัสดุจะเกิดการโตของเกรนและทำให้วัสดุมีความแข็งลดลง

- ความร้อนที่เกิดขณะทำการทดสอบ (Frictional heating) โดยขณะที่วัสดุเกิดการเสียดสี จะเกิดความร้อนซึ่งทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการที่ 4.4 และ 4.5 เพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

$$T = \frac{Q_A}{h_s} \left\{ 1 - \operatorname{erfc} \left[h_s \sqrt{\frac{t}{K \rho c}} \right] \exp \left[\frac{h_s^2 t}{K \rho c} \right] \right\} \quad \text{สมการที่ 4.4}$$

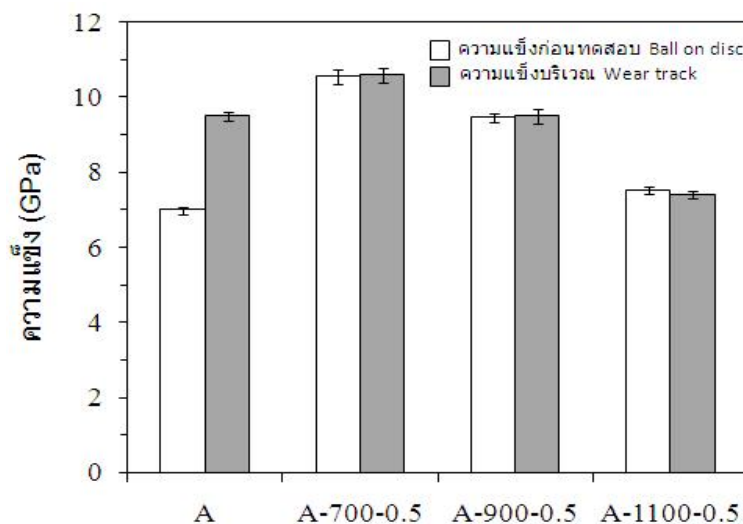
$$Q_A = \frac{\mu P v}{A_s} \quad \text{สมการที่ 4.5}$$

โดยตัวแปรต่างๆ ในสมการแทนด้วยค่าต่างๆ ดังนี้ h_s คือ Heat transfer coefficient (โดยมีค่าเท่ากับ $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), t คือ เวลาที่ทำการทดสอบ (4800 s), K แทนด้วย Thermal conductivity ($94 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ρ แทนด้วยความหนาแน่น ($1.19 \times 10^7 \text{ g.m}^{-3}$), c แทนด้วย Specific heat ($0.444 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$), Q_A แทนด้วย Frictional heating power per unit area โดยหาจากสมการที่ 1.9, μ คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11, P คือน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ (500 g), v คือความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ (0.104 m.s^{-1}), A_s คือพื้นที่ผิวของ Wear track (โดยที่วัสดุประเภท A, 700-0.5, A-900-0.5 และ A-1100-0.5 โดยมีขนาดเท่ากับ 3.21×10^{-3} , 3.3×10^{-3} , 3.35×10^{-3} และ $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ตามลำดับ) ภายหลังจากการแทนค่าในสมการสามารถคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.12 ความร้อนที่เกิดของวัสดุ निकเกิล-ทังสเตนแต่ละประเภท

ประเภทวัสดุ	อุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัส ($^{\circ}\text{C}$)
A	559
A-700-0.5	534
A-900-0.5	526
A-1100-0.5	494

จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าวัสดุจะมีความร้อนอยู่ ที่เกิดขึ้นประมาณ 500 ถึง 560°C โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลของการทดลองของวัสดุ निकเกิล -ทังสเตนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนของ Detor [4] จะพบว่าวัสดุจะมีการโตของเกรนเล็กน้อยและจะเกิด Grain relaxation ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งของวัสดุ เพื่อความเข้าใจผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุภายหลังการทดสอบการสึกหรอ จึงทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความแข็งของวัสดุบริเวณ Wear track



ภาพที่ 4.28 ความแข็งของวัสดุเคลือบ निकเกิล-ทังสเตนก่อนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ และความแข็งบริเวณ Wear track

จากภาพแสดงให้เห็นว่า Wear track ของวัสดุประเภท A มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างจาก 7 GPa เป็น 9.5 GPa ซึ่งเกิดจากวัสดุได้รับความร้อนขณะทำการทดสอบการสึกหรอและเกิด Grain

relaxation ทำให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่สำหรับวัสดุ A-700-0.5, A-900-0.5 และ A-1100-0.5 เป็นวัสดุที่เกิด Grain relaxation ในกรรมวิธีทางความร้อน โดยค่าความแข็งของ Wear track มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จึงเป็นไปได้ว่าความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อวัสดุประเภทดังกล่าว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัณฐาน ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุชุบนิเกิล-ทังสเทนด้วยไฟฟ้า รวมถึงชั้นเคลือบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในช่วง 700-1100°C สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. การชุบไฟฟ้าวัสดุ ดุนิกเกิล-ทังสเทน พบว่าการเพิ่มเวลา Reverse ส่งผลให้ปริมาณทังสเทนที่เกาะชั้นเคลือบลดลง เนื่องจากค่าของศักย์มาตรฐาน (Standard potential) ของขั้วไฟฟ้าทังสเทนน้อยกว่านิเกิลจึงทำให้สูญเสียทังสเทนออกจากชั้นเคลือบในปริมาณสูง และนอกจากนั้นยังพบว่าชั้นเคลือบที่มีปริมาณทังสเทนสูงจะมีเกรนขนาดเล็กและความแข็งสูง

2. กรรมวิธีทางความร้อนส่งผลต่อโครงสร้างและความแข็งวัสดุชุบนิเกิล-ทังสเทนดังต่อไปนี้

2.1) ขนาดเกรนชั้นเคลือบ พบว่าภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนตั้งแต่ 700°C ถึง 1100°C จะทำให้เกรนโตขึ้น ซึ่งวัสดุ A (ทังสเทน 22 at.%) มีการโตของเกรนที่มีขนาดสูงสุด 89 nm โดยวัสดุ B (ทังสเทน 13 at.%) และ C (ทังสเทน 6 at.%) มีอัตราการโตสูงซึ่งพบว่าขนาดเกรนโตขึ้นจากระดับนาโนเมตรเป็นไมโครเมตรที่อุณหภูมิสูงกว่า 900°C

2.2) โครงสร้างผลึกของชั้นเคลือบพบว่าวัสดุ B และ C ที่มีปริมาณทังสเทน 13 และ 6 at.% จะไม่เกิดการตกผลึกของเฟสที่สอง สำหรับวัสดุ A ซึ่งมีปริมาณทังสเทน 22 at.% จะเกิดการตกผลึกของเฟส Ni_4W และ NiW ที่อุณหภูมิ 900°C ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิสมดุลของนิเกิล-ทังสเทน และที่อุณหภูมิ 1100°C พบเพียงเฟสของ NiW

2.3) ความแข็งของชั้นเคลือบ พบว่าวัสดุ B (ทังสเทน 13 at.%) และ C (ทังสเทน 6 at.%) ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีความแข็งลดลง แต่สำหรับวัสดุ A (ทังสเทน 22 at.%) มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุด 10.5 GPa เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C เวลา 0.5 ชั่วโมง เนื่องจากวัสดุเกิด Grain relaxation ขณะที่ให้ความร้อน โดยเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิ พบว่าความแข็งวัสดุลดลงเนื่องเกิดจากการโตของเกรน

3. วัสดุ A (ทั้งสแตน 22 at.%) ที่ได้จากกระบวนการชุบไฟฟ้ามีการสึกหรอน้อยกว่าวัสดุ A ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเนื่องจาก

3.1 กลไกการสึกหรอที่แตกต่างกันโดยวัสดุ A จะเกิดการสึกหรอแบบ Abrasive wear เป็นหลัก ส่วนวัสดุ A-700-0.5, A-900-0.5 และ A-1100-0.5 มีการสึกหรอแบบ Abrasive และ Adhesive wear ซึ่งมีอัตราการสึกหรอที่สูง

3.2 วัสดุ A เกิด Grain relaxation จากความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีส่งผลทำให้ความแข็งของวัสดุและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น

4. จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงวัสดุชุบไฟฟ้าชนิดนิกเกิล-ทั้งสแตนที่เหมาะสมกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงคือวัสดุ A ที่มีปริมาณทั้งสแตนสูงสุดคือ 22 at.% เนื่องจากมีโครงสร้างที่ค่อนข้างเสถียร ดังจะเห็นได้จากวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนเล็กน้อย (ในระดับนาโนเมตร) และยังคงมีความแข็งสูงหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นพบว่ากรรมวิธีทางความร้อนส่งผลต่อลักษณะพื้นฐานและสมบัติเชิงกลคือ มีการโตของเกรน , Grain relaxation และเกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งของวัสดุชนิดนิกเกิล-ทั้งสแตน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ เพื่อให้ทราบแนวโน้มของกลไกการสึกหรอที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ
2. ควรมีการควบคุมบรรยากาศในขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเพิ่มเติม เช่น แก๊สไฮโดรเจน
3. ควรมีการควบคุมอัตราการเย็นตัวของวัสดุชนิดนิกเกิล-ทั้งสแตนที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้ได้ชั้นเคลือบที่มีเกรนเล็ก ซึ่งมีแนวโน้มที่สามารถเพิ่มความแข็งให้ชั้นเคลือบ

รายการอ้างอิง

- [1] Shaik Basha, Z.V.P. Murthy, B. Jha. Biosorption of hexavalent chromium by Chemically modified seaweed. Chemical engineering journal 137 (2008) : 480-488.
- [2] W.Z. Zhu, S.C. Deevi. Development of interconnect materials for solid oxide fuel cells. Materials science and engineering A 348 (2003) : 227-243.
- [3] Ana Ma. Paniagua-Mercado, Paulino Estrada-Diaz, Victor M. Lopez-Hirata. Chemical and structural characterization of the crystalline phase in agglomerated fluxes for submerged-arc welding. Journal of materials processing technology 141 (2003) : 93-100.
- [4] A.J. Detor, C.A. Schuh. Microstructure evolution during the heat treatment of nanocrystalline alloys. Journal of Materials Research 22 (2007) : 3233-3248.
- [5] มนต์ สติรจินดา . โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [6] W. Streinhogl, G. Steinlesberger, M. Perrin, G. Sceinbacher, G. Schindler, M. Traving, M. Engelhardt. Tungsten interconnects in the nano-scale regime. Microelectronic engineering 82 (2005) : 266-272.
- [7] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักพัฒนาอุตสาหกรรม สนับสนุน, 2544.
- [8] Mordechay Schlesinger, Milan Paunovic. Modern electroplating. Fourth edition. United states of America : A wiley – interscience publication, 2000.
- [9] D. Landolt. Electrochemical and materials science aspects of alloy deposition. Electrochimica acta 39 (2537) : 1075-1090.
- [10] U. Erb. Electrodeposited nanocrystals. Nanostructured materials 6 (1995) : 553-538.
- [11] Gunter Petzow. Metallographic etching. 2nd Edition. United states of America : ASM International, 1999.
- [12] Y. Yoshimura, T. Sato, H. Shimada, N. Matsubayashi, M. Imamura, A. Nishijima, M. Higo, S. Yoshitomi. Preparation of nickel-tungstate catalysts by a novel impregnation method. Catalysis today 29 (1996) : 221-228.

- [13] N. Eliaz, T.M. Sridhar, E. Gileadi. Synthesis and characterization of nickel tungsten alloys by Electrodeposition. Electrochimica acta 50 (2005): 2893-2904.
- [14] สาโรช พันธุ์แพ . การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2526.
- [15] O. Younes-Metzler, L. Zhu, E. Gileadi. The anomalous codeposition of tungsten in the presence of nickel. Electrochimica acta 48 (2003) : 2551-2562.
- [16] A.J. Deter, C.A. Schuh. Tailoring and patterning the grain size of Nanocrystalline alloys. Acta materialia 55 (2007) :371-379.
- [17] Fredericl A. Lowenheim. Electroplating. United state of America : McGraw-Hill book company, (1978).
- [18] Gwidon W.Stachowiak, Andrew W.Batchelor. 2005. Engineering Tribology. Elsevier Butterworth-Heinemann. United State of America
- [19] K.R. Sriraman, S.G. Sundara Raman, S.K. Seshadri. Synthesis and evaluation of hardness and sliding wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-W alloys. Materials science and engineering A 418 (2006) : 303-311.
- [20] T.J. Rupert, C.A. Schuh. Sliding wear of nanocrystalline Ni-W : Structural evolution and the apparent breakdown of Archard scaling. Acta Materialia 58 (2010): 4137-4148.
- [21] อธิพิณ เตี่ยวณิชย์. การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [22] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [23] A.J. Deter. Grain size control and microstructure evolution in nanocrystalline Ni-W alloys. United state of America: Massachusetts Institute of technology, 2007.
- [24] A. Chianpairot, G. Lothongkum, C.A. Schuh, Y. Boonyongmaneerat. Corrosion of nanocrystalline Ni-W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt% NaCl solution. Corrosion Science 53 (2011): 1066-1071.
- [25] T.J. Rupert, J.C. Trenkle, C.A. Schuh. Enhanced solid solution effects on the strength of nanocrystalline alloys. Acta materialia 59 (2011): 1619-1631.

- [26] A.J. Detor, M.K. Miller and C.A. Schuh. Measuring grain-boundary segregation in nanocrystalline alloys: direct validation of statistical techniques using atom probe tomography. Philosophical Magazine Letters vol.87 (2007): 581-587.
- [27] S. Ruan, C.A. Schuh. Mesoscale structure and segregation in electrodeposited nanocrystalline alloys. Scripta Materialia 59 (2008): 1218-1221.
- [28] Kai Song, Mark Aindow. Grain growth and particle pinning in a model Ni-based superalloy. Materials science and engineering A 479 (2008): 365-372.
- [29] C. Borgia, T. Scharowsky, A. Furrer, C. Solenthaler, R. Spolenak. A combination study on the influence of elemental composition and heat treatment on the phase composition, microstructure and mechanical properties of Ni-W alloy thin films. Acta materialia 59 (2011): 386-399.
- [30] D.S. Gianola, S. Van Petegem, M. Legros, S. Brandstetter, H. Van Swygenhoven, K.J. Hemker. Stress-assisted discontinuous grain growth and its effect on the deformation behavior of nanocrystalline aluminum thin films. Acta Materialia 54 (2006): 2253-2263.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาขนาดเกรนด้วยวิธี Integral Breath Method

การหาขนาดโดย Integral Breath Method เป็นวิธีการหาขนาดเกรน โดยใช้หลักการการ X-ray Diffraction ซึ่งจะมีค่าที่ขึ้นอยู่กับลักษณะจำเพาะของการหักเหของรังสีเอ็กซ์ที่ขึ้นกับขนาดเกรนดังสมการ

$$\frac{(\delta(2\theta))^2}{\tan^2(2\theta)} = \frac{K\lambda}{L} \left(\frac{\delta(2\theta)}{\tan(2\theta)\sin(2\theta)} \right) + 16e^2 \quad (\text{สมการที่ ก.1})$$

โดยค่าของ $\delta(2\theta)$ หาได้จากค่า β ซึ่งคือ Full Width Half Max (FWHM) หรือค่าความกว้างของพีค ณ ตำแหน่งที่มีความเข้มสูงเป็นครึ่งหนึ่งในบริเวณที่พิจารณา ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมในการ JADE 5 และ K คือค่าคงที่โดยมีค่าประมาณ 0.9 สำหรับ λ เป็นค่าความยาวคลื่นของรังสี X-ray ที่เกิดขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้ Target ของ Cu K_α ซึ่งมีค่า 0.154 nm และค่า e เป็น Microstrain ซึ่งเป็นค่าคงที่ นอกนั้นวิธีนี้ยังสามารถกำจัดค่าความผิดพลาดจากเครื่องหรือ Instrument Broadening โดยจากการทำ X-ray Diffraction ของ Lanthanum Hexaboride (LaB_6) จากสมการ

$$\beta = \beta_{\text{exp}} - \frac{\beta_{\text{ins}}^2}{\beta_{\text{exp}}} \quad (\text{สมการที่ ก.2})$$

โดยเมื่อได้ข้อมูล X-ray Diffraction ของ Lanthanum Hexaboride นำข้อมูลมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดจากเครื่องที่เปลี่ยนไปตามมุม 2θ ที่ตรวจสอบ ซึ่งจากการทดลองของงานวิจัยพบว่าค่าของความผิดพลาดจากเครื่อง X-ray Diffraction จะอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\beta_{\text{ins}} = [(2\theta)^2 \times (6 \times 10^{-6})] - (0.0007 \times (2\theta)) + 0.0804 \quad (\text{สมการที่ ก.3})$$

ตารางที่ ก.1 ค่า FWHM ของวัสดุ निकเกิด-ทั้งสแตนจากโปรแกรมในการ JADE 5 และค่าความคลาดเคลื่อน

ประเภทชิ้นงาน	2θ (องศา)	FWHM จาก XRD	ค่าความคลาดเคลื่อน
A	43.831	2.811	0.06120
B	43.899	0.621	0.06123
	51.429	1.234	0.06027
	75.584	1.446	0.06177
	91.540	2.234	0.06660
	96.560	1.509	0.06875
C	44.237	0.203	0.06118
	51.668	0.345	0.06025
	75.964	0.310	0.06185
	92.458	0.720	0.06697
	97.676	0.664	0.06927
A-700-0.5	41.661	0.285	0.06165
	43.502	0.243	0.06130
	50.587	0.253	0.06034
	90.324	0.427	0.06612
	95.653	0.239	0.06834

ประเภทชิ้นงาน	2 θ (องศา)	FWHM จาก XRD	ค่าความคลาดเคลื่อน
A-700-1	41.665	0.171	0.06165
	43.532	0.164	0.0613
	50.631	0.240	0.06034
	90.411	0.364	0.06616
	95.746	0.310	0.06838
A-700-3	41.664	0.209	0.06165
	43.561	0.141	0.06129
	50.650	0.210	0.06034
	90.457	0.336	0.06617
	95.798	0.296	0.0684
B-700-1	43.864	0.178	0.06124
	51.038	0.218	0.0603
	75.337	0.325	0.06172
	91.207	0.381	0.06647
	96.590	0.362	0.06876

ประเภทชิ้นงาน	2 θ (องศา)	FWHM จาก XRD	ค่าความคลาดเคลื่อน
C-700-1	44.201	0.098	0.06118
	51.468	0.135	0.06027
	75.784	0.158	0.06181
	92.121	0.199	0.06683
	97.574	0.203	0.06922
A-900-0.5	41.571	0.241	0.06167
	43.530	0.175	0.06130
	50.611	0.295	0.06034
	90.401	0.365	0.06615
	95.771	0.308	0.06839
A-900-1	41.631	0.241	0.06166
	43.532	0.165	0.06130
	50.631	0.239	0.06034
	90.405	0.365	0.06615
	95.747	0.308	0.06838

ประเภทชิ้นงาน	2 θ (องศา)	FWHM จาก XRD	ค่าความคลาดเคลื่อน
A-900-3	43.864	0.247	0.06124
	51.036	0.237	0.06030
	75.332	0.224	0.06172
	91.213	0.375	0.06647
	96.588	0.362	0.06876
A-1100-0.5	41.680	0.200	0.06165
	43.564	0.152	0.06129
	50.648	0.203	0.06034
	90.463	0.342	0.06618
	95.802	0.296	0.06841
A-1100-1	43.864	0.180	0.06124
	51.036	0.222	0.06030
	75.334	0.319	0.06172
	91.228	0.353	0.06648
	96.589	0.363	0.06876

ประเภทชิ้นงาน	2θ (องศา)	FWHM จาก XRD	ค่าความคลาดเคลื่อน
A-1100-3	43.560	0.143	0.06129
	50.648	0.202	0.06034
	90.457	0.334	0.06617
	91.321	0.296	0.06651
	95.803	0.398	0.06841

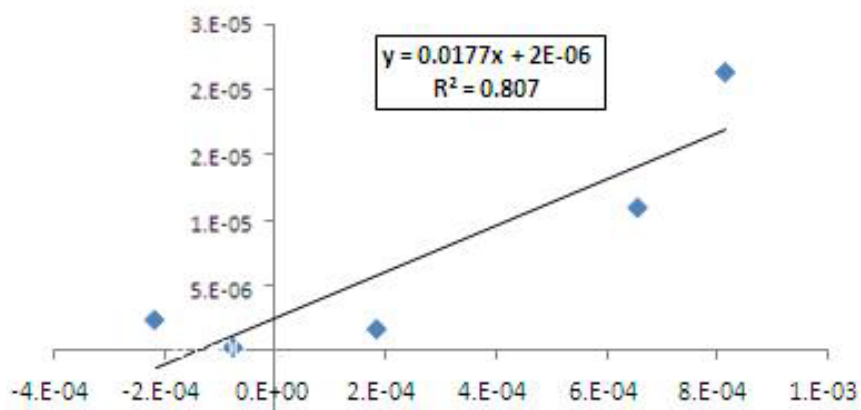
ดังนั้นในสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดเกรนจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\beta^2}{\tan^2(2\theta)} = \frac{(0.9)(0.154)}{L} \left(\frac{\beta}{\tan(2\theta) \sin(2\theta)} \right) + 16e^2 \quad (\text{สมการที่ ก.4})$$

โดย L จะแทนด้วยขนาดเกรน ซึ่งหาได้จากการนำค่าของสมการที่ ก.3 มาเขียนกราฟ โดยที่แกน Y จะเป็น

ค่า $\frac{\beta^2}{\tan^2(2\theta)}$ และค่าแกน X จะเป็นค่าที่ได้จาก $(0.9 \times 0.154) \times \left(\frac{\beta}{\tan(2\theta) \sin(2\theta)} \right)$ เพื่อหาขนาดเกรน

จากส่วนกลับของความชันดังเช่นในตัวอย่างภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 การหาสมการความสัมพันธ์เพื่อหาขนาดเกรน XRD

โดยในตัวอย่างรูปที่ ก.1 จะมีความชัน 0.0177 ซึ่งสามารถหาขนาดเกรนได้เท่ากับ $(1/0.0177)$ หรือ 56 nm

ตารางที่ ก.2 จำนวน XRD ขนาดเกรนของวัสดุ निकเกิล-สังกะสี

ประเภทชิ้นงาน	FWHM หลังจากหักล้าง ความคลาดเคลื่อนจากเครื่อง	ค่าแกน Y	ค่าแกน X	ขนาดเกรน (nm)
A	2.8097	-	-	3
B	0.6150	1.24E-04	2.23E-03	13
	1.2311	2.94E-04	3.04E-03	
	1.4434	4.19E-05	9.27E-04	
	2.2320	1.10E-06	-1.45E-04	
	1.5059	9.13E-06	-4.22E-04	

ประเภทชิ้นงาน	FWHM หลังจากหักล้าง ความคลาดเคลื่อนจากเครื่อง	ค่าแกน Y	ค่าแกน X	ขนาดเกรน (nm)
C	0.1846	1.09E-05	6.57E-04	56
	0.3345	2.13E-05	8.16E-04	
	0.2977	1.69E-06	1.86E-04	
	0.7138	2.86E-07	-7.42E-05	
	0.6568	2.39E-06	-2.16E-04	
A-700-0.5	0.2717	2.84E-05	1.11E-03	44
	0.2275	1.75E-05	8.43E-04	
	0.2386	1.17E-05	6.14E-04	
	0.4168	1.69E-09	-5.70E-06	
	0.2195	1.44E-07	-5.28E-05	
A-700-1	0.1488	8.51E-06	6.09E-04	51
	0.1411	6.72E-06	5.22E-04	
	0.2248	1.04E-05	5.77E-04	
	0.3520	1.94E-09	-6.11E-06	
	0.2949	2.68E-07	-7.22E-05	

ประเภทชิ้นงาน	FWHM หลังจากหักล้าง ความคลาดเคลื่อนจากเครื่อง	ค่าแกน Y	ค่าแกน X	ขนาดเกรน (nm)
A-700-3	0.1908	1.40E-05	7.81E-04	66
	0.1144	4.40E-06	4.22E-04	
	0.1927	7.60E-06	4.94E-04	
	0.3230	2.02E-09	-6.23E-06	
	0.2802	2.47E-07	-6.92E-05	
B-700-1	0.1569	8.12E-06	5.70E-04	77
	0.2013	8.07E-06	5.07E-04	
	0.3133	2.05E-06	2.05E-04	
	0.3694	1.85E-08	-1.88E-05	
	0.3489	4.95E-07	-9.82E-05	
C-700-1	0.0598	1.15E-06	2.13E-04	163
	0.1081	2.26E-06	2.66E-04	
	0.1338	3.50E-07	8.46E-05	
	0.1766	1.30E-08	-1.58E-05	
	0.1794	1.73E-07	-5.82E-05	

ประเภทชิ้นงาน	FWHM หลังจากหักล้าง ความคลาดเคลื่อนจากเครื่อง	ค่าแกน Y	ค่าแกน X	ขนาดเกรน (nm)
A-900-0.5	0.2252	1.96E-05	9.26E-04	50
	0.1535	7.96E-06	5.68E-04	
	0.2827	1.64E-05	7.27E-04	
	0.3530	1.86E-09	-5.98E-06	
	0.2928	2.67E-07	-7.20E-05	
A-900-1	0.2252	1.96E-05	9.23E-04	53
	0.1422	6.83E-06	5.26E-04	
	0.2238	1.03E-05	5.75E-04	
	0.3530	1.90E-09	-6.04E-06	
	0.2928	2.65E-07	-7.17E-05	
A-900-3	0.2318	1.77E-05	8.42E-04	77
	0.2217	9.79E-06	5.58E-04	
	0.2070	8.94E-07	1.36E-04	
	0.3632	1.80E-08	-1.86E-05	
	0.3489	4.95E-07	-9.82E-05	

ประเภทชิ้นงาน	FWHM หลังจากหักล้าง ความคลาดเคลื่อนจากเครื่อง	ค่าแกน Y	ค่าแกน X	ขนาดเกรน (nm)
A-1100-0.5	0.1810	1.26E-05	7.40E-04	70
	0.1273	5.46E-06	4.70E-04	
	0.1851	7.02E-06	4.75E-04	
	0.3292	2.16E-09	-6.44E-06	
	0.2802	2.47E-07	-6.93E-05	
A-1100-1	0.1592	8.35E-06	5.78E-04	74
	0.2056	8.42E-06	5.18E-04	
	0.3071	1.97E-06	2.01E-04	
	0.3405	1.62E-08	-1.77E-05	
	0.3500	4.98E-07	-9.85E-05	
A-1100-3	0.1167	4.59E-06	4.31E-04	89
	0.1840	6.93E-06	4.72E-04	
	0.3209	2.00E-09	-6.19E-06	
	0.2811	1.28E-08	-1.57E-05	
	0.3862	4.69E-07	-9.55E-05	

ภาคผนวก ข

การวัดจำนวนเกรนบนเส้นตรงหรือ Linear Intercept Method

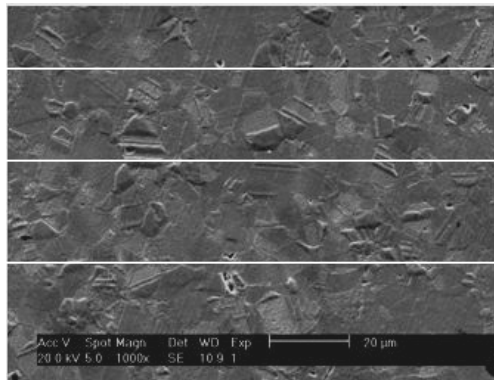
เป็นวิธีคำนวณหาขนาดเกรนวิธีหนึ่งที่ได้จากการหาขนาดเกรนเฉลี่ยจากรูปโครงสร้างจุลภาค เริ่มจากการถ่ายภาพรูปโครงสร้างโดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือกล้องส่อง อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดในการศึกษา หลังจากที่ได้รูปโครงสร้างจุลภาคแล้วจึงทำการขีดเส้นอย่างสุ่ม 1 เส้นลงบนภาพ และหาจำนวนเกรนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเส้นที่พิจารณา (N_L) จากสมการ

$$N_L = \frac{\text{จำนวนเกรนบนเส้นทดสอบ}}{\text{ความยาวจริงของเส้น}} \quad (\text{สมการที่ ข.1})$$

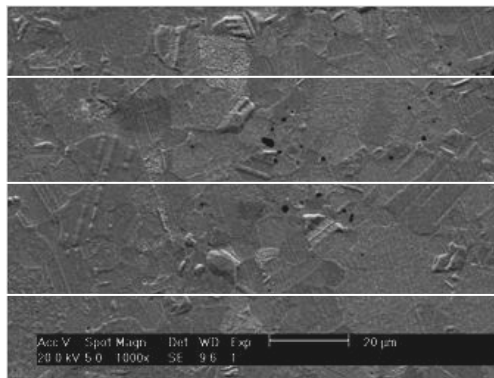
จากสมมุติฐานทางเรขาคณิตที่ว่าทุกเกรนมีขนาดเท่ากันและใกล้เคียงกับทรงกลม สามารถหาขนาดเกรนเฉลี่ยเกรน (D) ได้จาก

$$D = \frac{3}{2N_L} \quad (\text{สมการที่ ข.2})$$

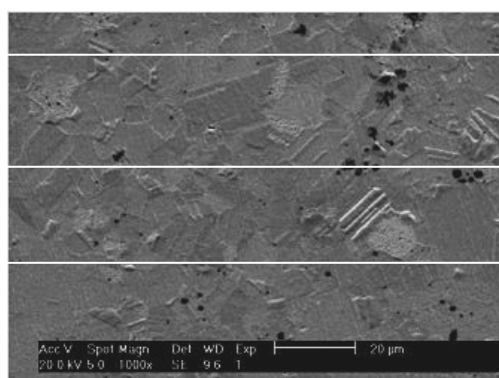
โดยจากการภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของวัสดุ निकเกิล-ทังสเตน ประเภท B-900-1, C-900-1, B-1100-1 และ C-1100-1 ที่ใช้หาขนาดเกรนได้ดังต่อไปนี้



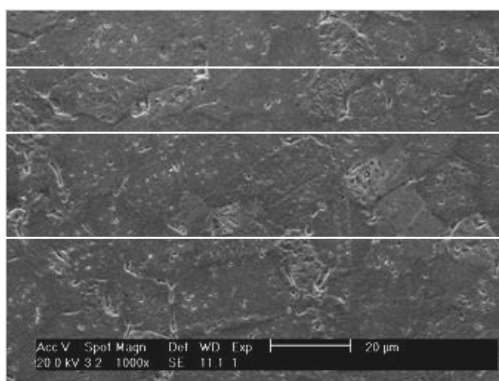
ภาพที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ทังสเตนประเภท B-900-1



ภาพที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ทังสเตนประเภท C-900-1



ภาพที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ทังสเตนประเภท B-1100-1



ภาพที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาควัสดุ निकเกิล-ทังสเทนประเภท C-1100-1

ตารางที่ ข.1 การคำนวณหาขนาดเกรนด้วยวิธีการวัดจำนวนเกรนบนเส้นตรง

ประเภทวัสดุ	จำนวนเกรน	ความยาวเส้นทดสอบ	จำนวนเกรนต่อหนึ่งหน่วย	ขนาดเกรน
		(μm)	ความยาวเส้นทดสอบ	(μm)
B-900-1	23	124	0.1855	8
C-900-1	16	124	0.1290	12
B-1100-1	19	124	0.1532	10
C-1100-1	8	124	0.0645	23

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นราศักดิ์ สันวัง
วัน – เดือน – ปีเกิด	24 เมษายน 2526
ที่อยู่	183/1 ม.1 ต.ท่าตูม อ.ท่าตูม จ.สุรินทร์ 32120
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2548
โทรศัพท์ติดต่อ	087-217-6542