

การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแม่พิมพ์ปั๊ม
เหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

STUDY OF TOOL STEEL AND COATING MATERIALS ON
STAMPING DIES OF THE TWO – BAHT COINS

วรพจน์ อ้นกระทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษานิตของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแม่พิมพ์
ป้่มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

วรพจน์ อ้นกระทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณเฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแม่พิมพ์
ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

Study of Tool Steels and Coating Materials on Stamping Dies of Two-Baht
Coins

ชื่อ - นามสกุล

นายวรพจน์ อ้นกระทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

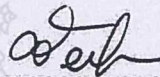
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.-Ing.

ปีการศึกษา

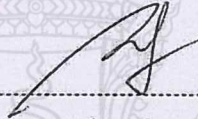
2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



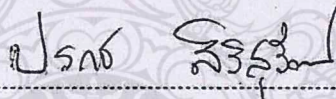
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)



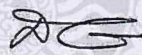
กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วารุณี เปรมานนท์, Ph.D.)



กรรมการ

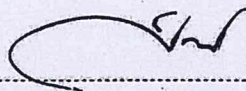
(อาจารย์ปรกช สิริสุวัฒน์, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 16 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแม่พิมพ์ ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท
ชื่อ – นามสกุล	นายวรพจน์ อ้นกระทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้วัสดุแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาทและเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ จากเดิมแม่พิมพ์ที่ใช้ในการปั๊มขึ้นรูป มีอายุการใช้งานสำหรับปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท โดยเฉลี่ยประมาณ 600,000 เหรียญต่อคู่ของแม่พิมพ์ ทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่ากำหนด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาแนวทางในการเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท ให้มีปริมาณการผลิตมากกว่า 900,000 เหรียญต่อคู่ของแม่พิมพ์

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดวัสดุทดลองสำหรับผลิตแม่พิมพ์จำนวน 3 วัสดุ ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือ KD 21, K490 และ W360 และทำการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (Physical Vapor Deposition; PVD) โดยใช้สารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) ที่ความหนาของสารเคลือบประมาณ 2.5-3 μm จากนั้นทำการทดลองปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท ด้วยเครื่องปั๊มเหรียญ Grabener ขนาดแรงในปั๊ม 40 ตัน ที่ความเร็ว 850 เหรียญต่อนาที

ผลการทดลองพบว่าวัสดุแม่พิมพ์ W360 มีอายุการใช้งานมากกว่า วัสดุแม่พิมพ์ KD21 และ K490 เนื่องจากวัสดุแม่พิมพ์ KD21 และ K490 เกิดการแตกร้าวที่ผิวด้านหน้าแม่พิมพ์โดยเฉพาะ วัสดุ KD21 ที่มีอายุการใช้งานโดยประมาณเพียง 600,000 เหรียญ ขณะที่วัสดุแม่พิมพ์ K490 มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นเป็น 800,000 - 900,000 เหรียญโดยประมาณ และวัสดุแม่พิมพ์ W360 เป็นวัสดุที่มีอายุการใช้งานสูงที่สุดที่ 900,000 - 1,300,000 เหรียญโดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคลือบผิวด้วยวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบโครเมียมไนไตรด์ (CrN) จะมีข้อดีในการผลิตมากกว่าสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ถึง 400,000 เหรียญ

คำสำคัญ: แม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป สารเคลือบผิวโครเมียมไนไตรด์ ไทเทเนียมไนไตรด์

Thesis Title	Study of Tool Steels and Coating Materials on Stamping Dies of Two - Baht Coins
Name – Surname	Mr. Worapot Onkratong
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic Year	2018

ABSTRACT

The purpose of this research was to identify appropriate materials to extend the life cycle of a stamping die used for manufacturing circulating 2-Baht coins. Currently, the stamping die has a life cycle of up to 600,000 coins per pair of stamping dies resulting in a high manufacturing cost per batch of 2-Baht coins. Accordingly, this study aimed to extend the life cycle up to 900,000 coins per pair of stamping dies.

Three kinds of materials were used to produce stamping dies, i.e. KD21 tool steel, K490 cold-work tool steel, and W360 hot-work tool steel. Then the stamping dies were coated with either Titanium Nitride (TiN) and Chromium Nitride (CrN) using the Physical Vapor Deposition (PVD) process with a coating thickness of 2.5 – 3 μm . The experiments were carried out by using the Grabener's coining machine with a set-up stamping force of 40 metric tons and a speed of 850 coins per minute.

The experimental results showed that the W360 had a higher life cycle than the other two since cracks were found in the KD21 and K490 where the life cycle was 600,000 and 800,000 to 900,000 coins per pair of stamping dies, respectively. The life cycle of the W360 was between 900,000 and 1,300,000 coins per pair of stamping dies depending on the coating materials. That is the W360 coated with CrN could produce up to 400,000 coins, far better than that with TiN.

Keywords: Physical Vapor Deposition, Chromium Nitride (CrN), Titanium Nitride (TiN)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ประธานหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ปรกช สิริสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วารุณี เปรมมานนท์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สมศักดิ์ อธิธิโสณกุล (วิศวิวิศวกร อุตสาหกรรม วอ. 187) ที่ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและเจ้าหน้าที่ ให้ความอนุเคราะห์เครื่องจักร เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ พี่น้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกและแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง คุณค่าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเพื่อเป็นประโยชน์แก่ประเทศชาติและเป็นที่ยุชาขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทุกท่าน

วรพจน์ อั้นกระทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 เหรียญ 2 บาท.....	16
2.2 โลหะทองแดง (Copper).....	16
2.3 โลหะทองแดงผสม (Copper Alloys).....	17
2.4 โลหะอลูมิเนียม (Aluminium).....	18
2.5 โลหะอลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys).....	19
2.6 โลหะวิทยาของนิกเกิลและโลหะนิกเกิลผสม.....	20
2.7 โลหะที่ใช้ทำเหรียญ 2 บาท.....	21
2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 2 บาท (รุ่นเก่า).....	22
2.9 การชุบแข็ง (Hardening).....	23
2.10 การอบอ่อน (Annealing).....	24
2.11 การอบคืนไฟ (Tempering).....	27
2.12 การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ Physical Vapour Deposition (PVD).....	28
2.13 ขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ.....	32
2.14 การผลิตเหรียญเปล่า (Coin Blank).....	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.15 การทดสอบผิวเคลือบ (Coating hardness test)	40
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง.....	44
3.2 การทดลองป้อนชิ้นรูปเหรียญ และการเก็บผลการทดลอง	49
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล.....	53
4.1 ผลการทดลอง.....	53
4.2 การวิเคราะห์ผล	61
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก การคำนวณแรง.....	72
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	99
ประวัติผู้เขียน	110

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของนิกเกิล.....	21
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของนิกเกิล	21
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ	44
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการปรับปรุงวัสดุแม่พิมพ์ด้วยการ Heat treatment	46
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางบันทึกการติดตามการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญก 2 บาท	52
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบแม่พิมพ์	52
ตารางที่ 4.1 สาเหตุความเสียหายที่มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท.....	62



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 เหรียญราคา 2 บาท.....	12
รูปที่ 1.2 แสดงความเสียหายที่เกิดกับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 2 บาท.....	13
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียม.....	19
รูปที่ 2.2 เหรียญตัวเปล่า (Blank coin).....	22
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบคืนไฟ กับ ความแข็ง ของเหล็ก KD21.....	22
รูปที่ 2.4 (Fe-C) Phase Diagram.....	23
รูปที่ 2.5 TTT Diagram.....	23
รูปที่ 2.6 ช่วงอุณหภูมิในการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์.....	24
รูปที่ 2.7 ช่วงอุณหภูมิในการการอบคลายความเค้น หรือการอบได้ภาวะวิกฤต.....	25
รูปที่ 2.8 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงต่ำกว่าเส้น A_{C1}	26
รูปที่ 2.9 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงต่ำและสูงกว่าเส้น A_{C1}	26
รูปที่ 2.10 แสดงช่วงการชุบแข็ง และการอบคืนไฟ.....	27
รูปที่ 2.11 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.12 แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบ.....	29
รูปที่ 2.13 แสดงคุณลักษณะของผิวเคลือบแต่ละชนิด.....	30
รูปที่ 2.14 PVD ARC Technology.....	30
รูปที่ 2.15 PVD Sputter technology.....	31
รูปที่ 2.16 การทำงานของ PVD ARC and Sputter.....	31
รูปที่ 2.17 เครื่อง PVD ARC and Sputter.....	32
รูปที่ 2.18 กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ.....	33
รูปที่ 2.19 แม่พิมพ์สำหรับกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ.....	33
รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการหล่อลวดลาย.....	34
รูปที่ 2.21 แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญก่อนการกดอัด.....	34
รูปที่ 2.22 เครื่องกดอัดแม่พิมพ์ปั๊ม.....	35
รูปที่ 2.23 หุ่นแหลมหลังผ่านการกดอัดแม่พิมพ์ปั๊ม.....	35
รูปที่ 2.24 รูปเหรียญตัวเปล่าที่ทำการยกขอบพร้อมนำมามีขึ้นรูป.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 วัตถุดิบก่อนการหลอม Raw Material for Melting Charge.....	36
รูปที่ 2.26 เตาหลอม (Melting Furnace)	37
รูปที่ 2.27 น้ำโลหะเตาหลอม Holding Furnace.....	37
รูปที่ 2.28 แผ่นโลหะถูกดึงจาก Die (Strips exiting Graphite dies).....	38
รูปที่ 2.29 แผ่นงานที่ผ่านการดึงออกมาจาก Die จะถูกทำให้เย็นตัวด้วยน้ำ.....	38
รูปที่ 2.30 การกัดผิวแผ่นโลหะด้วยเครื่อง Scalping Machine.....	38
รูปที่ 2.31 เครื่องรีดหยาบ (Break downmill).....	39
รูปที่ 2.32 เครื่องรีดละเอียด (Rolling mill).....	39
รูปที่ 2.33 เหรียญตัวเปล่าที่ทำการตัดแล้ว.....	40
รูปที่ 2.34 แสดงหลักการทั่วไปของ scratch tester.....	41
รูปที่ 2.35 แสดงกราฟที่ได้จาก Sensor ในเครื่อง Scratch test บนฟิล์ม TiN/TiCN แบบ Multilayer.....	41
รูปที่ 2.36 แสดงภาพขยายของรอยขีดจากเครื่อง scratchtest บนฟิล์ม TiN/TiCNแบบ multilayer.....	42
รูปที่ 3.1 เครื่องขัดเงาแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ (Polishing).....	45
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานหลังการขัดผิว.....	45
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานก่อนการปั๊มขึ้นรูป (ก) และหลังการปั๊มขึ้นรูป (ข).....	46
รูปที่ 3.4 รูปเตาอบชุบแข็งที่ใช้ในการชุบแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ (Hardening furnace).....	47
รูปที่ 3.5 ทดสอบความแข็ง.....	47
รูปที่ 3.6 กล้อง Microscope.....	47
รูปที่ 3.7 รูปแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาทที่ล้างทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก.....	48
รูปที่ 3.8 ภาพการชุบเคลือบ PVD ที่ผิวแม่พิมพ์ผิวแม่พิมพ์ ด้วยเครื่อง Sulzer Metaplas Ionon.....	48
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบ Scratch test FISCHERSCOPE ST200.....	49
รูปที่ 3.10 เหรียญตัวเปล่า (Coins Black) ก่อนการปั๊มขึ้นรูปเป็นเหรียญ 2 บาท.....	49
รูปที่ 3.11 ภาพการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท.....	50
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ FISCHER SCOPE HM2000.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการวัดความหนาผิวเคลือบแม่พิมพ์ด้านหน้า (ก) และแม่พิมพ์ด้านหลัง (ข).....	51
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างรูปภาพแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วย CrN ที่เกิดการแตกร้าวที่ฐานเจดีย์และเลข 5 ไทยที่ตรวจสอบด้วยกล้อง Microscope.....	51
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 (ก), K490 (ข), และ W360 (ค).....	54
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบของแม่พิมพ์ด้านหน้า ก่อนการบ่มขึ้นรูป และหลังการบ่มขึ้นรูป.....	55
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบของแม่พิมพ์ด้านหลัง ก่อนการบ่มขึ้นรูป และหลังการบ่มขึ้นรูป.....	56
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN.....	57
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN.....	57
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN.....	58
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN.....	58
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN.....	59
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN.....	59
รูปที่ 4.10 ค่า Lc1, Lc2, Lc3 ของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิดที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN.....	60
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบจำนวนการบ่มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท ด้วยวัสดุแม่พิมพ์ที่ต่างกัน.....	61
รูปที่ 4.12 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว TiN บริเวณฐานเจดีย์.....	63
รูปที่ 4.13 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว CrN บริเวณยอดเจดีย์.....	63
รูปที่ 4.14 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว TiN บริเวณเลขสอง.....	64
รูปที่ 4.15 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว CrN บริเวณเลขสอง.....	64
รูปที่ 4.16 การหลุดลอกของผิวเคลือบ TiN ในวัสดุแม่พิมพ์ W360.....	65
รูปที่ 4.17 การขีดเกาะของวัสดุเหรียญที่ผิวเคลือบ TiN ในวัสดุแม่พิมพ์ W360.....	66
รูปที่ 4.18 การขีดเกาะของวัสดุเหรียญที่ผิวเคลือบ CrN ในวัสดุแม่พิมพ์ W360.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรมธนารักษ์ได้ผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนออกใช้ในระบบเศรษฐกิจเริ่มตั้งแต่ พ.ศ. 2493 เป็นต้นมา ซึ่งมีหลายรุ่น หลายแบบ โดยได้ปรับเปลี่ยนรูปลักษณะ ลวดลาย อัตราส่วนผสม และกรรมวิธีการผลิตเรื่อยมา เพื่อให้สามารถผลิตเหรียญกษาปณ์ได้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของประชาชน ตลอดจนมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม สะดวกต่อการพกพา การใช้สอยและยากต่อการปลอมแปลงการปรับเปลี่ยนรูปลักษณะ อัตราส่วนผสม ตลอดจนน้ำหนักเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนในปัจจุบันมีทั้งหมด 9 ชนิด ประกอบด้วย ชนิดราคา 10 บาท 5 บาท 2 บาท 1 บาท 50 สตางค์ 25 สตางค์ 10 สตางค์ 5 สตางค์ และ 1 สตางค์ แต่เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนที่ถูกนำมาใช้ในระบบเศรษฐกิจมีทั้งหมด 6 ชนิดราคา ประกอบด้วย ชนิดราคา 10 บาท 5 บาท 2 บาท 1 บาท 50 สตางค์ 25 สตางค์

เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 2 บาท ในชุดปัจจุบันมีด้านหน้าเป็นภาพพระบรมฉายาลักษณ์ของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชด้านหลังเป็นรูปพระบรมบรรพตวัดสระเกศราชวรมหาวิหารประกาศ่ออกใช้เมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2548 โดยใช้วัสดุคิวโปรนิกเกิลในการผลิตเหรียญชนิดราคา 2 บาท กระทั่งวันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 ได้มีการเปลี่ยนวัสดุจากคิวโปรนิกเกิลมาเป็นอะลูมิเนียมบรอนซ์ดังรูปที่ 1.1 เพื่อให้ประชาชนสามารถแยกความแตกต่างระหว่างเหรียญชนิดราคา 1 บาท และเหรียญชนิดราคา 2 บาท ได้ง่ายขึ้นและเปลี่ยนภาพด้านหน้าเหรียญเป็นภาพพระบรมฉายาลักษณ์ของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชพระชนมายุใกล้เคียงปัจจุบันมากขึ้น [1]



ด้านหน้า



ด้านหลัง

รูปที่ 1.1 เหรียญชนิดราคา 2 บาท

วัสดุอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ใช้ในการผลิตเหรียญชนิดราคา 2 บาท เป็นวัสดุที่มีค่าความแข็งประมาณ 80 - 85HV ทำให้ทำการปั๊มขึ้นรูปได้ยากมากขึ้น ประกอบกับลวดลายบนเหรียญมีความนูนและลวดลายความสูงต่ำค่อนข้างมาก ทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท มีอายุการใช้งานลดลง เนื่องจากแม่พิมพ์เกิดความเสียหาย เช่น เกิดรอยแตกร้าว เกิดการสึกหรอของผิวเคลือบแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 1.2 จากเดิมแม่พิมพ์ที่ใช้ในการปั๊มขึ้นรูป มีอายุการใช้งานสำหรับปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาทโดยเฉลี่ยประมาณ 600,000 เหรียญ/ คู่ของแม่พิมพ์ 1 คู่ (ข้อมูลจากการบันทึกประจำเดือน) ทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่ากำหนด จากปัญหาดังกล่าวทำให้สำนักกษาปณ์ประสบปัญหาในเรื่องต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญชนิดราคา 2 บาท และยอดการผลิตต่ำลง เนื่องจากการผลิตแม่พิมพ์ใหม่ต้องใช้ระยะเวลาในการผลิต และมีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท ให้มีปริมาณการผลิตมากกว่า 900,000 เหรียญ/ คู่ของแม่พิมพ์ และลดต้นทุนในการผลิตเหรียญชนิดราคา 2 บาท



รูปที่ 1.2 แสดงความเสียหายที่เกิดกับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 2 บาท

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีผลต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

1.2.2 เพื่อศึกษาชนิดของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองโดยใช้วัสดุแม่พิมพ์ 3 ชนิด

1.3.1.1 เหล็กกล้า Bohler W360 จำนวน 10 คู่

1.3.1.2 เหล็กกล้า Bohler K490 จำนวน 10 คู่

1.3.1.3 เหล็กกล้า KD 21 จำนวน 10 คู่

1.3.2 ทำการทดลองเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยวิธีไอกายภาพ PVD (Physical Vapour Deposition) โดยใช้สารเคลือบผิวแม่พิมพ์ 2 ชนิดที่ความหนาของสารเคลือบ 2.5 - 3 μm

1.3.2.1 ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN)

1.3.2.2 โครเมียมไนไตรด์ (CrN)

1.3.3 ทำการอบชุบแม่พิมพ์มีดังต่อไปนี้

1.3.3.1 ทำการอบชุบแม่พิมพ์ W360 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,050°C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่แรงดัน 6 บาร์จากนั้นทำการอบคืนไฟ (Tempering) ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 530°C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 2 ชั่วโมง [2]

1.3.3.2 ทำการอบชุบแม่พิมพ์ K490 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,050°C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่แรงดัน 6 บาร์จากนั้นทำการอบคืนไฟ (Tempering) ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 530°C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 550°C [2]

1.3.3.3 ทำการอบชุบแม่พิมพ์ KD21 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,050°C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่แรงดัน 6 บาร์จากนั้นทำการอบคืนไฟ (Tempering) ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 530°C เวลา 2 ชั่วโมง [2]

1.3.3.4 วัสดุที่ใช้ในการผลิตเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท คือ อลูมิเนียมบรอนซ์ (Cu92 Al6 Ni2) DIN; CuAlNi2

1.3.3.5 ใช้เครื่องปั๊มรุ่น GRABENER ที่อัตราความเร็วเฉลี่ย 700 - 800 เหยียดต่อ
นาที ควบคุมแรงในการปั๊มขึ้นรูปประมาณ 350-380 kN[2]

1.3.3.6 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

1.3.3.7 ศึกษาการยึดเกาะและอายุของสารเคลือบผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา
2 บาท ตามมาตรฐาน ISO 20502

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

1.4.2 เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท

1.4.3 พัฒนาองค์ความรู้ชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแม่พิมพ์
ปั๊มขึ้นรูปเหรียญกษาปณ์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เบริลลียม 2 บาท

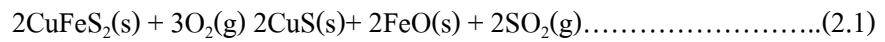
เบริลลียม 2 บาท เป็นหินกึ่งอัญมณีที่มีค่าในตัวเองเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนสินค้า โดยกำหนดให้มีขนาดและน้ำหนักสอดคล้องกับราคาหน้าเบริลลียมในการกำหนดรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเบริลลียม 2 บาท แต่ละชนิดราคาต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของโลหะ ต้นทุนการผลิต แหล่งแร่ภายในประเทศ จำนวนผู้ผลิตและแหล่งผลิต การใช้กับเครื่องหยอดเบริลลียมในบางชนิดราคา ผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งความสะดวกในการจับจ่ายใช้สอย

ในปัจจุบันเบริลลียม 2 บาท ได้เปลี่ยนมาใช้วัสดุชนิดออลูมิเนียมบรอนซ์ (ทองแดง 92% ออลูมิเนียม 6% นิกเกิล 2%) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสวยงาม มีคุณค่า สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กหรือโลหะผสมที่มีธาตุชนิดอื่นๆ ในส่วนผสมนอกเหนือจากเหล็กโลหะผสมกลุ่มนี้ได้แก่ออลูมิเนียม ทองแดง นิกเกิล โคบอลต์ สังกะสี และกลุ่มโลหะมีค่า เช่น ทองคำขาว เงิน ทองคำ และแพลเลเดียม เป็นต้น การใช้งานโลหะผสมหลายรูปแบบจะคำนึงถึงน้ำหนักเป็นสำคัญ โดยกำหนดให้น้ำหนักเป็นตัวแปรสำคัญในการใช้งาน เราสามารถพิจารณาจากความแข็งแรงของวัสดุต่อน้ำหนัก หรือความแข็งแรงเฉพาะ ความแข็งแรงต่อความหนาแน่น[3]

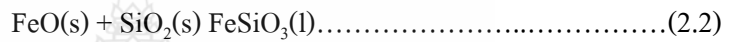
2.2 โลหะทองแดง (Copper)

คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงอยู่ในตารางธาตุหมู่ 29 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำโดยมนุษย์รู้จักทองคำ เมื่อประมาณ 4000 ปีก่อนคริสตกาล การถลุงทองแดงจากแร่ ชั้นแรกคือ การแยกแร่ที่ต้องการออกจากสิ่งเจือปนหรือ กากแร่ อาจใช้วิธีการลอยตัว โดยนำแร่ที่บดละเอียดแล้วผสมเข้ากับน้ำ น้ำมันและสารซัลไฟในถังผสม จากนั้นกวนและผ่านอากาศเข้าไปในของเหลวที่อยู่ในถังผสมตลอดเวลา เพื่อให้มีฟองเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ฟองอากาศ และน้ำมัน ไปเกาะอยู่กับอนุภาคของแร่และลอยตัวอยู่ด้านบน ส่วนกากแร่จะจมลงอยู่ด้านล่าง เมื่อตักฟองที่ลอยอยู่ด้านบนออกและทำให้แห้ง จะได้ผลแร่ที่มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15 โดยมวล ขึ้นต่อไปน้ำแร่มาเผาใน

อากาศ เรียกกระบวนการนี้ว่า การย่างแร่ ไอร์ออน ซัลเฟตบางส่วนจะถูกออกซิไดส์เป็นไอร์ออนออกไซด์ ดังสมการ



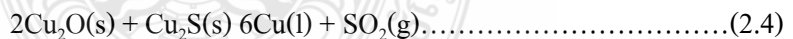
กำจัดไอร์ออน (II) ออกไซด์ออกไป โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเผาพร้อมกับออกไซด์ของซิลิกอนในเตาถลุงอุณหภูมิประมาณ 1100 °C ไอร์ออน (II) ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิกอน ได้กากตะกอนเหลวซึ่งแยกออกมาได้ ดังสมการ



ส่วนคอปเปอร์ (II) ซัลไฟด์เมื่ออยู่ในที่มีอุณหภูมิสูงจะสลายตัวได้เป็นคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์ในสถานะของเหลวซึ่งสามารถแยกออกได้ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อแยกคอปเปอร์ (I) ซัลไฟด์ในอากาศบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์(I)ออกไซด์ดังสมการ



และคอปเปอร์(I)ออกไซด์กับคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากัน โดยมีซัลไฟด์ไอออนทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ได้โลหะทองแดงและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการ



ทองแดงที่ถลุงได้ในขั้นนี้ยังมีสิ่งเจือปนจึงต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ก่อน การทำทองแดงให้บริสุทธิ์โดยทั่วไปจะใช้วิธีแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า

2.3 โลหะทองแดงผสม (Copper Alloys)

ทองแดงผสมจะมีความหนาแน่นมากกว่าเหล็กกล้า ค่าความแข็งแรงครากของทองแดงผสมบางชนิดจะมีค่าสูง แต่ความแข็งแรงบางชนิดจะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมผสมและแมกนีเซียมผสม โลหะผสมบางชนิดมีความสามารถยึดตัวดีเยี่ยม มีความต้านทานการกัดกร่อน และมีค่าการนำ

ไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีทั้งยังสามารถเชื่อมประกอบรูปร่างได้ง่าย ทองแดงผสมมักใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการนำไฟฟ้า เช่น สายไฟฟ้า บั๊ม วาล์ว และระบบท่อต่างๆ ทองแดงผสมมีความพิเศษที่สามารถนำมาใช้ในการตกแต่งทำเครื่องประดับ ทองแดงบริสุทธิ์มีสีแดง เมื่อเติมสังกะสีจะมีสีเหลือง และเมื่อเติมนิกเกิลจะทำให้มีสีเงินทองแดงเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายและจะเกิดสารประกอบสีเขียวทองแดงซัลเฟต $[CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2]$ ขึ้นที่ผิวซึ่งไม่สามารถละลายในน้ำได้(ละลายในกรด)ฟิล์มสีเขียวนี้สวยงามนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ตัวอย่างการกัดกร่อนในทองแดง เช่น รูปปั้นเทพีเสรีรูปที่สร้างจากโลหะทองแดงที่มีสีเขียวเนื่องจากการเกิดออกไซด์ในทองแดงปกคลุมผิวของรูปปั้น

ทองแดงมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า 0.1% จะใช้งานด้านไฟฟ้าและใช้ทำชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การเติมแคดเมียม เงิน และอะลูมิเนียมออกไซด์จำนวนเล็กน้อยช่วยปรับปรุงความแข็งให้แก่ทองแดง โดยที่ค่าความนำไฟฟ้าและค่าการนำความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง ทองแดงผสมที่มีเฟสเดี่ยวสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการขึ้นรูปเย็น ผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้วยการปรับปรุงความแข็งแรงแบบต่างๆ

ทองแดงผสมที่สำคัญคือ บรอนซ์ (Bronze) ซึ่งเป็นชื่อเรียกทองแดงที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ เช่น บรอนซ์ดีบุกมีธาตุดีบุกผสมอยู่ในทองแดง บรอนซ์แมกนีเซียมมีธาตุแมกนีเซียมผสมอยู่ในทองแดงมีความแข็งแรงสูงเนื่องจากการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็งเป็นต้น

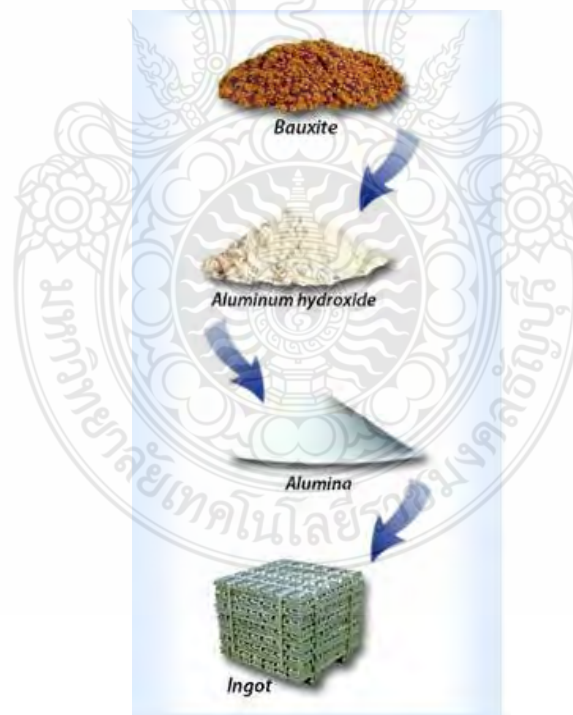
2.4 โลหะอะลูมิเนียม (Aluminium)

คือธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Al และมีเลขอะตอม 13 เป็นโลหะที่มันวาวและอ่อนดัดง่าย ในธรรมชาติอะลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก และมีคุณสมบัติเด่น คือ ต่อด้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี (เนื่องจากปรากฏการณ์ passivation) แข็งแรง และน้ำหนักเบา มีการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และอะลูมิเนียมสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกอย่างมาก ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอะลูมิเนียมสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน และสำคัญในด้านอื่น ๆ ของการขนส่งและการสร้างอาคาร ซึ่งต้องการน้ำหนักเบา ความทนทาน และความแข็งแรง อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 ล้านปาสกาล (MPa) และ 400 MPa ถ้าทำเป็น โลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดง อ่อนสามารถดัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อนและความทนเนื่องจากชั้นออกไซด์ที่ป้องกัน พื้นหน้ากระจกเงาที่เป็นอะลูมิเนียมมีการสะท้อน

แสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 200-400 nm (UV) และ 3000-10000 nm (IR ไกล) ส่วนในช่วงที่มองเห็นได้ คือ 400-700 nm โลหะเงินสะท้อนแสงได้ดีกว่าเล็กน้อย และในช่วง 700-3000 (IR ใกล้) โลหะเงิน ทองคำ และทองแดงสะท้อนแสงได้ดีกว่า อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ตัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็นอันดับที่ 6 อะลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมที่จะทำหม้อหุงต้มอาหาร

2.5 โลหะอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys)

การผลิตอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมถูกผลิตเริ่มต้นจากอุตสาหกรรมต้นน้ำในเหมืองแร่ผลิตแร่บอกไซต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง อัดตัวแน่น มีสีเหลืองออกสีน้ำตาลจนถึงน้ำตาลแดง แต่อาจพบในลักษณะสีอื่น เช่น สีขาว สีน้ำตาล ซึ่งมีการผลิตในต่างประเทศด้วยการนำแร่บอกไซต์มาหลอมจนได้อลูมินาบริสุทธิ์ และนำอลูมินาเข้าหลอมเป็นแท่งจนได้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กลายเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ สำหรับเศษอะลูมิเนียมเก่าสามารถนำมาหลอมเป็นแท่งอะลูมิเนียมนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่ได้ ดังรูปที่ 2.1 [4]



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียม [4]

อลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 ใน 3 ส่วนของความหนาแน่นเหล็กกล้า และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 10×10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้า ความแข็งแรงดึงของอลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าเหล็ก แต่อลูมิเนียมมีค่าความแข็งแรงจำเพาะที่ดีเยี่ยม ด้วยเหตุนี้อะลูมิเนียมบางชนิดจึงผลิตขึ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบาแต่ความแข็งแรงสูง เช่น ชิ้นส่วนอากาศยาน อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปง่ายมีค่าความนำความร้อนและการนำไฟฟ้าสูง ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากความเหนียวเป็นความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ไม่เป็นพิษและสามารถรีไซเคิลได้ด้วยพลังงานเพียง 5% ของพลังงานที่ใช้ผลิตอลูมิเนียมจากอลูมินา อลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เป็นประโยชน์หลายอย่างเช่น ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ด้านทานการเกิดออกซิเดชันและด้านทานการกัดกร่อน อย่างไรก็ตาม ในด้านคุณสมบัติทางกล อลูมิเนียมมีความต้านทานการล้าตัวต่ำ อะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำซึ่งไม่สามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังมีความแข็งต่ำทำให้สึกหรองง่าย แต่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยกระบวนการทางกล กระบวนการหลอมและกระบวนการอบอ่อน อะลูมิเนียมที่ผ่านการเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการต่างๆ จะมีความแข็งแรงมากกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ถึง 30 เท่า [4]

2.6 โลหะวิทยาของนิกเกิลและโลหะนิกเกิลผสม [5]

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูง เป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม มีความเหนียวและอ่อนตัวสูงสามารถขึ้นรูปเย็นได้โดยง่าย นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว ประมาณ 60% ของนิกเกิลที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ส่วนที่เหลือจะใช้ทำโลหะนิกเกิลผสมที่ใช้ในงานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) โดยอาศัยคุณสมบัติทนการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย เมื่อพิจารณาด้านสมบัติเชิงกลจะพบว่ามีความแข็งแรงเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่เหนือกว่าตรงที่สามารถรักษาความเหนียวได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าของนิกเกิลจะสูงไม่เท่าทองแดงและอลูมิเนียม แต่สูงพอที่จะใช้ได้ในงานที่ขั้วสายหรือเทอร์มินอลในงานอิเล็กทรอนิกส์ ในบรรยากาศใช้งานถ้ามีแก๊สของกำมะถันอยู่ด้วยจะมีส่วนทำให้นิกเกิลขาดความต้านทานที่ดี และบางทีอาจจะเปราะแตกง่าย ส่วนใหญ่ไม่ใช้นิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เพราะนิกเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสมและกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัยคุณสมบัติพิเศษของนิกเกิลเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของนิกเกิล [5]

น้ำหนักอะตอม	58.69
โครงสร้างระบบผลึก	face centered cubic ($a = 3.516 \text{ \AA}$)
ความหนาแน่น (25°C)	8.89 g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	1435-1445°C
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2730°C
ความร้อนจำเพาะ (27°-100°C)	0.130 cal/g°C
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	73.8 cal/g
สัมประสิทธิ์การขยาย (27°-100°C)	$13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20°C)	9.5 microhm.cm
สัมประสิทธิ์ตัวนำความร้อน (27°-100°C)	0.145 cal.cm/cm ² .s. °C

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของนิกเกิล [5]

ความแข็งแรงหรือต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)	47 kg/mm ²
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)	15 kg/mm ²
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40%
ความแข็ง (Hardness)	110 HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	21,000 kg/mm ²

2.7 โลหะที่ใช้ทำเหรียญ 2 บาท

อลูมิเนียมบรอนซ์ (ทองแดง 92% อลูมิเนียม 6% นิกเกิล 2%) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสวยงาม มีคุณค่า สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

เหรียญตัวเปล่า เป็นเหรียญที่มีลักษณะกลมแบน ไม่มีลวดลายบนเหรียญทั้งสองด้าน ผลิตจากโลหะ โดยส่วนผสมต่างๆ ขึ้นกับชนิดเหรียญที่ผลิต และมีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

2.7.1. หลอมโลหะส่วนผสมตามความต้องการและเทหล่อเป็นแท่งโลหะ

2.7.2. นำแท่งโลหะมารีดลดความหนาจนได้แผ่นโลหะที่มีความหนาตามความต้องการ

2.7.3. ตัดเหรียญตัวเปล่า นำแผ่นโลหะมาตัดตัว ให้ได้เหรียญตัวเปล่าที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางความหนา และน้ำหนักตามที่กำหนด

2.7.4. ยกขอบเหรียญ นำเหรียญตัวเปล่ามาก่อขอบให้เรียบมนและยกให้สูงเหรียญ

กษาปณ์หมุนเวียนส่วนใหญ่มีขอบเหรียญ เพื่อช่วยให้การตีตราดีขึ้น ใช้แรงกดน้อย ลดความคมชัด และขอบเหรียญยังช่วยป้องกันลดความสึกหรอของโลหะใช้งาน ทำให้เหรียญมีอายุการใช้งานนานขึ้น

2.7.5. อบอ่อน นำเหรียญตัวเปล่ามาอบที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เนื้อโลหะอ่อนตัว ล้างทำความสะอาดและอบให้แห้ง

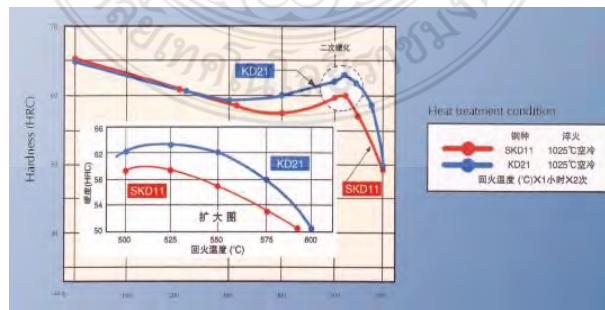
2.7.6. ล้างเหรียญตัวเปล่าด้วยสารเคมี เพื่อขจัดคราบน้ำมัน คราบเขม่า และสิ่งสกปรกบนพื้นเหรียญแล้วอบให้แห้ง [6]



รูปที่ 2.2 เหรียญตัวเปล่า (Blank coin)

2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 2 บาท (รุ่นเก่า)

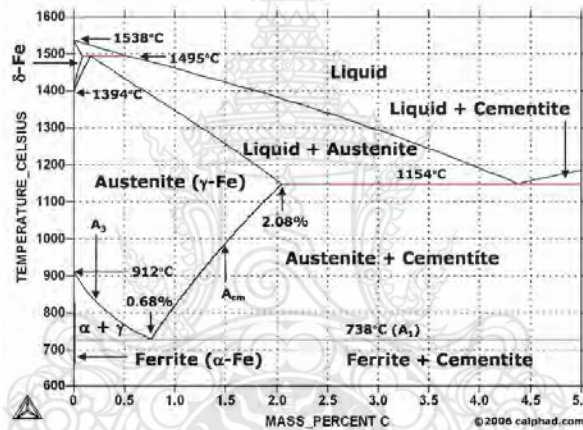
แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ 2 บาท ที่ใช้ในอดีตใช้วัสดุเหล็ก KD21 (NIPPON KOSHUHA) ประเทศญี่ปุ่น ส่วนผสมทางเคมี C 0.97%, Si 1%, Mn 0.34%, P 0.19%, S 0.08%, Cr 7.88%, Mo 1.90%, V 0.41% เป็นเหล็กเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งหลังการอบคืนไฟ (Tempering) สูงถึงประมาณ 60 – 62 HRC ดังรูปที่ 2.3 [7]



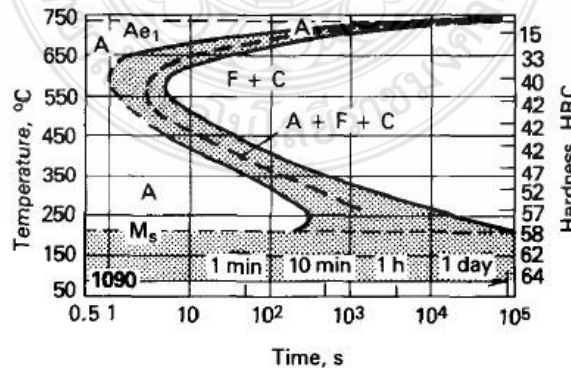
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบคืนไฟ กับ ความแข็ง ของเหล็ก KD21 [7]

2.9 การชุบแข็ง (Hardening)

กรรมวิธีการชุบแข็งเหล็กกล้ากระทำเพื่อให้เหล็กกล้ามีความแข็ง ทนต่อการเสียดสีและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น กรรมวิธีการชุบแข็งเหล็กกล้านี้กระทำได้โดยการเผาเหล็กให้ร้อนจนกระทั่งมีความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตสิ้นสุดประมาณ 50 °C ดังรูปที่ 2.4 ให้โครงสร้างเหล็กเป็น Austenite แล้วเผาแช่ไว้ระยะเวลาหนึ่ง ดังรูปที่ 2.5 เพื่อให้เหล็กกล้านั้นได้รับความร้อนโดยทั่วถึงตลอดทั้งชิ้น และให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างออสเทนไนต์โดยสมบูรณ์ แล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในสารจุ่มชุบในการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วให้โครงสร้างเหล็กเป็น Martensite โดยการจุ่มชุบเราเรียกว่า การจุ่มชุบ (Quenching) เพื่อให้เหล็กมีโครงสร้างภายในเป็นโครงสร้าง Martensite ที่มีความแข็ง (Hardness) [8]



รูปที่ 2.4 (Fe-C) Phase Diagram[8]



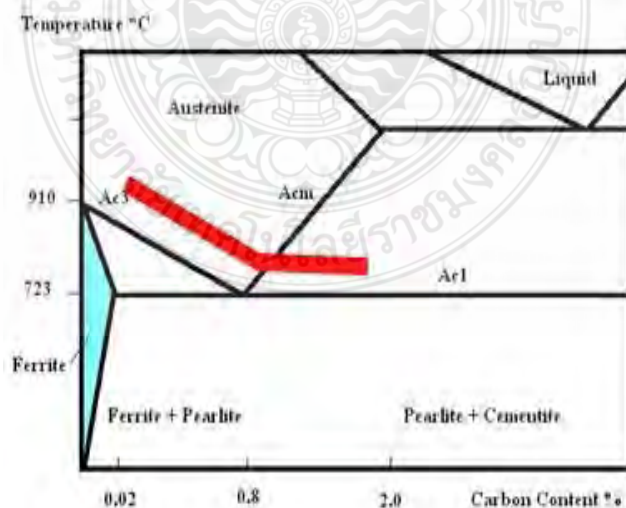
รูปที่ 2.5 TTT Diagram [8]

2.10 การอบอ่อน (Annealing) [8]

คือการให้ความร้อนและอบแช่โลหะที่ระดับอุณหภูมิเหมาะสมอุณหภูมิหนึ่งแล้วควบคุมการลดอุณหภูมิด้วยอัตราที่เหมาะสม มีความมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็กที่ผ่านกระบวนการต่างๆมาเช่น การขึ้นรูปร้อน (Forging and Hot Rolling Process) การขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling Process) หรือผ่านการหล่อ (Casting Process)

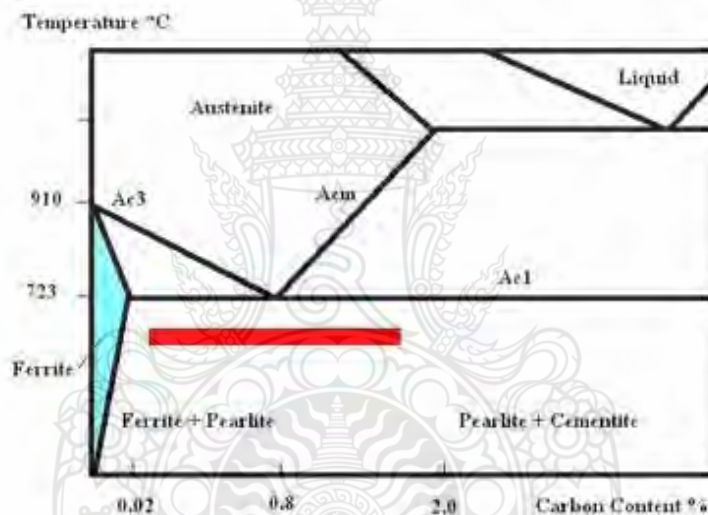
2.10.1 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing)

การอบอ่อนจะอบเหล็กให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น A_{C3} ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส ในกรณีของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo-Eutectoid) และเหนือเส้น A_{C1} ในกรณีของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (Hyper-Eutectoid) ดังรูปที่ 2.6 อัตราการให้ความร้อนประมาณ 30-200 องศาเซลเซียส ต่อชั่วโมงขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานมีรูปร่างแท่งตันจะอบที่อัตราสูง และควรใช้ที่อัตราอบที่ต่ำเมื่อแผ่นเหล็กมีความหนาที่แตกต่างกันมาก เมื่ออบจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วควรทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30-60 นาที ต่อความหนาเฉลี่ย 25 มิลลิเมตรหลังจากนั้นปล่อยให้เย็นช้าๆ ในอัตรา 150-200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง (ในทางปฏิบัติปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กจะไปเป็นในลักษณะใกล้เคียงสภาวะสมดุล โครงสร้างที่เป็นอยู่ก่อนอบอ่อนซึ่งอาจจะเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) เบนไนต์ (Beinite) หรือซอร์ไบต์ (Sorbite) เหล็กกล้าจะเปลี่ยนเป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) กับเฟอร์ไรต์ (Ferrite) สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะเป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ส่วนเหล็กยูเทคตอยด์ (Eutectoid) เป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.6 ช่วงอุณหภูมิในการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ [8]

2.10.2 การอบคลายความเค้น หรือการอบใต้ภาวะวิกฤต (Stress-Relief Annealing or Subcritical Annealing) เป็นการอบอ่อนเพื่อมุ่งทำลายความเครียดภายในเหล็กหลังจากการขึ้นรูปเย็น เช่นเหล็กที่ผ่านการรีดหรือการดึง จะทำให้กลุ่มก้อนของอะตอมของเหล็กอยู่ในสภาพบิดเบี้ยวทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้นและสูญเสียความเหนียว ไม่เหมาะนำไปใช้งานหรือไม่เหมาะสำหรับการขึ้นรูปครั้งต่อไป จะต้องทำการอบอ่อนภายในเสียก่อน โดยอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_{C1} (500- 650 องศาเซลเซียส) ดังรูปที่ 2.7 ใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง กลุ่มอะตอมที่ไม่สมดุลจะค่อยๆกลับคืนสภาพปกติหรือรวมตัวเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด โดยที่โครงสร้างส่วนใหญ่จะไม่เปลี่ยนแปลง เพราะอุณหภูมิไม่สูงจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิมจนเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ภายหลังจากเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 550-650 องศาเซลเซียสนานพอแล้วปล่อยให้เย็นในอากาศ

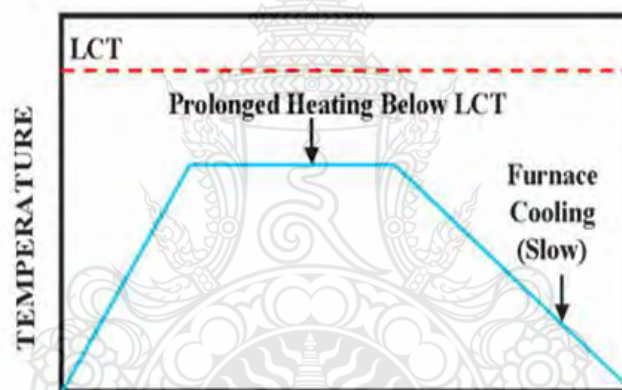


รูปที่ 2.7 ช่วงอุณหภูมิในการการอบคลายความเค้น หรือการอบใต้ภาวะวิกฤต[8]

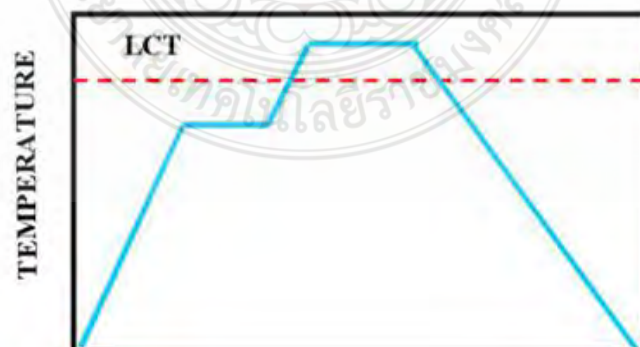
2.10.3 การอบเพื่อความอ่อนตัวสูง (Spheroidizing Annealing)

เป็นกรรมวิธีที่ใช้กับ เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนตั้งแต่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปซึ่งโครงสร้างของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ เป็นเฟอร์ไรต์ และเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนตั้งแต่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปโครงสร้างประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ และ โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ (Proeutectoid Cementite) ตามขอบเกรน ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้เหล็กจะมีความเหนียวลดลง และอีกคุณสมบัติทางการกลึงหรือไสจะไม่ดีทำให้ผิวเรียบยากเพราะปลายมีดกลึงตัดผ่านเนื้อเหล็กที่อ่อนและแข็งสลับกันเนื้อเหล็กจะไม่เรียบ การแก้ไขต้องทำให้โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ไม่ต่อเนื่องและยู

เทคตอยด์ซีเมนไทต์ (Eutectoid Cementite) ในเฟิร์สไลต์ให้มีลักษณะกลมๆเล็กๆ (Spherical) ไม่เป็นแถบบางๆ (Plate) ซึ่งทำได้โดยนำเหล็กไปอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{C1} เล็กน้อยสำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.8 หรือถ้าเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ จะอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า A_{C1} เล็กน้อยแล้วปล่อยให้สูงกว่า A_{C1} ทำสลับกันไปประมาณ 10-15 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นในอากาศ ในขณะที่เหล็กอยู่เหนือเส้น A_{C1} ซีเมนไทต์ (Cementite) ในเฟิร์สไลต์จะขาดเสถียรภาพเกิดการขาดเป็นช่วงๆ และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่า A_{C1} ซีเมนไทต์ จะแตกตัวเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) จะไปรวมตัวกับซีเมนไทต์ ดังรูปที่ 2.9 ที่เหลืออยู่ไม่ให้เกิดแถบบางๆ ถ้าเหล็กถูกอบอยู่ในช่วงนี้ระยษานานจะค่อยๆ ปรับตัวเป็นฟอร์มที่เสถียรภาพมากที่สุดคือ ค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเม็ดกลมทำให้เหล็กอ่อนตัวและความเหนียวการกลึงและไสจะทำให้เนื้อผิวเรียบ มีดกถึงจะไม่มีโอกาสตัดผ่านซีเมนไทต์เม็ดกลม โดยที่จะหลุดออกหรือไม่ก็เบนหลบไปทำให้มีดกถึงตัดผ่านเฉพาะเนื้อ



รูปที่ 2.8 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงต่ำกว่าเส้น A_{C1} [8]

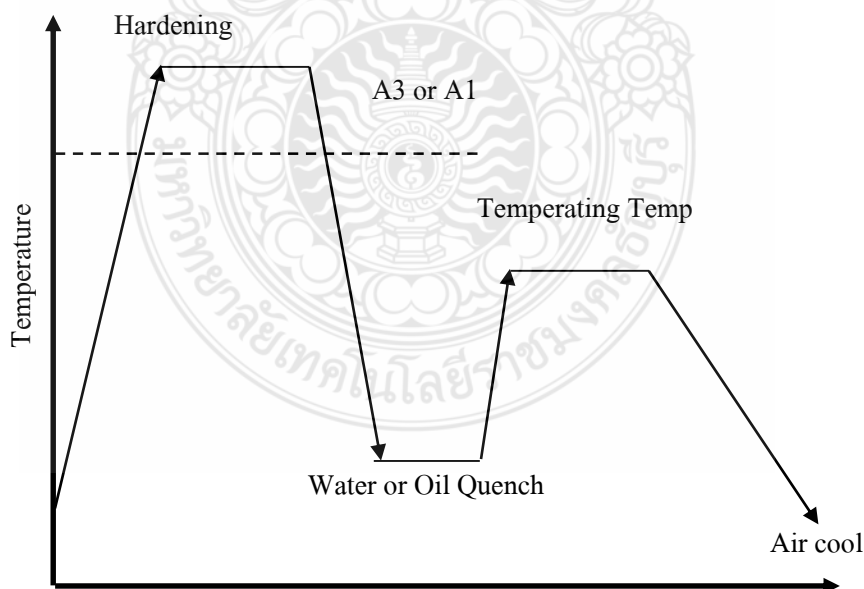


รูปที่ 2.9 อุณหภูมิการอบเพื่อความอ่อนตัวสูงต่ำและสูงกว่าเส้น A_{C1} [8]

2.11 การอบคืนไฟ (Tempering) [8]

เหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง (Hardening) มาแล้วย่อมจะเกิดความเครียด (Strain) ขึ้นภายใน มีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีออสเทนไนท์ตกค้างอยู่ทำให้เหล็กจะขาดสมบัติทางด้าน ความเหนียว (Ductility) ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ถ้าเกิดมีการกระทบขึ้นเหล็กอาจจะแตกร้าวได้ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเสียใหม่โดยการอบคืนไฟซึ่งมีวิธีการดังนี้

นำเหล็กที่ผ่านการชุบมาแล้วเผาภายในเตาที่อุณหภูมิค่าประมาณ 200 - 400 องศาเซลเซียส (เหล็กกล้าคาร์บอน) ทิ้งไว้ประมาณ 1 - 3 ชั่วโมงแล้วเอาออกปล่อยให้เย็นในอากาศธรรมดา ดังรูปที่ 2.10 เหล็กจะมีสมบัติด้านความเหนียว (Ductility) ดีขึ้น แต่ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่เผาที่อุณหภูมิค่า มาร์เทนไซต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยอะตอมคาร์บอนจะเคลื่อนไหวออกจากมาร์เทนไซต์มารวมกันเป็นเฟอร์ไรต์และซิเมนไทต์บางส่วน ที่เป็นเช่นนี้เพราะมาร์เทนไซต์ไม่ใช่โครงสร้างของเหล็กที่สมดุลที่อุณหภูมิบรรยากาศ เมื่อเหล็กได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อกลับไปเป็นโครงสร้างที่สมดุลคือเหล็กเฟอร์ไรท์ กับซิเมนไตต์ที่เราต้องเผาที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 400 องศาเซลเซียสก็เพื่อไม่ต้องทำให้มาร์เทนไซต์คืนตัวหมด เพราะเรายังต้องการความแข็งของเหล็กอยู่ ถ้าเราเผาให้อุณหภูมิสูงเกิน 400 องศาเซลเซียสความแข็งจะถูกทำลายหมดโดยทั่วไป การชุบแข็ง และการคืนไฟจะต้องกระทำติดต่อกันทันทีเพื่อให้ได้เหล็กแข็งและทนแรงกระทบได้ดีด้วย



รูปที่ 2.10 แสดงช่วงการชุบแข็ง และการอบคืนไฟ [8]

2.12 การชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ Physical Vapour Deposition (PVD)

การเคลือบผิวแข็ง (Hard Coating) ขึ้นงาน โดยวิธีอาร์คไฟฟ้าด้วยการใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำแต่กระแสสูง ที่บริเวณผิวของวัสดุที่เคลือบ (Target) เกิดการหลอมละลายที่ผิวหน้าของวัสดุที่เคลือบกลายเป็นไอระเหย เรียกว่า พลาสมา (Plasma) เป็นประจุบวกอยู่ในรูปของไอออนเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจน (N_2) หรือมีเทน (C_2H_2) ขึ้นอยู่กับกระบวนการ เนื่องจากขึ้นงานเป็นขั้วลบ ไอระเหยเป็นประจุบวกจึงวิ่งเข้าหาผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ซึ่งกระบวนการเคลือบผิวแข็งกระทำอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงไม่ปนเปื้อนกับสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ผิวเคลือบจึงมีความสมบูรณ์และวัสดุที่เคลือบผิวขึ้นงานมีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 10 μm ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเมื่อนำไปใช้งานมีความทนทานและอายุการใช้งานนานยิ่งขึ้น [9-10]

เป็นเทคนิคสำคัญอันหนึ่งสำหรับวิทยาการสมัยใหม่หลายแขนง เช่น วัสดุศาสตร์ Nanotechnology วิศวกรรมผิววัสดุ (Surface Engineering) การชุบ PVD นั้นมีอยู่หลายระบบ ปกติจะทำการชุบในเตาสุญญากาศกระบวนการชุบมักจะเกี่ยวข้องกับสุญญากาศสูง (High Vacuum) สามารถสร้างฟิล์มบาง (Thin Film) ได้หลายชนิดสำหรับงานแตกต่างกันไปในปัจจุบัน ได้มีการนำเครื่อง PVD ระบบต่างๆ มาทำการชุบงานทั้งทางด้านประดับตกแต่ง อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการชุบผิวแข็งให้แก่เครื่องมือตัดเจาะขึ้นรูปรวมถึงอุตสาหกรรมในการผลิตเหรียญในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศในแถบยุโรป โดยใช้ในการเคลือบผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเพื่อยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ประโยชน์ของการชุบเคลือบและรูปแบบการเคลือบผิวแบบ PVD [11]

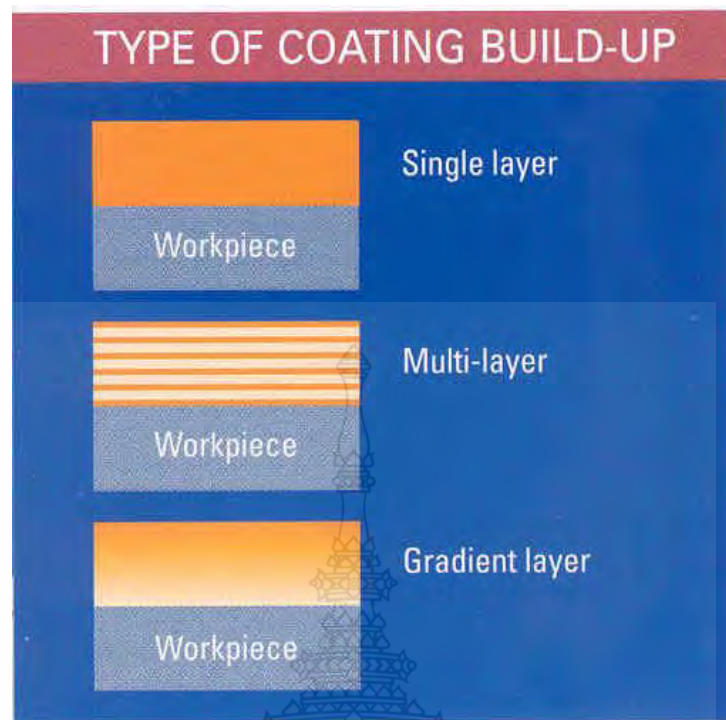
การชุบเคลือบผิวแบบ PVD มีประโยชน์กับอุตสาหกรรมที่หลากหลายรวมถึงในอุตสาหกรรมการผลิตเหรียญ สามารถป้องกันการสึกหรอ มีความแข็งสูงถึงประมาณ 2500 HV – 3500 HV ที่ความหนา 1-5 μm มีความต้านทานต่อสารเคมีสูง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ผิวเรียบ การนำความร้อนต่ำ มีการยึดเกาะของแต่ละชั้นดีเยี่ยมแม้จะใช้อุณหภูมิในการเคลือบต่ำทั่วไปไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส

2.12.1 รูปแบบการเคลือบผิวบนชิ้นงาน (Type of Coating Build-up) ดังนี้

2.12.1.1 ผิวเคลือบชั้นเดียว (Single Layer) ดังรูปที่ 2.11

2.12.1.2 ผิวเคลือบหลายชั้น (MultiLayer) (แต่ละชั้น เคลือบด้วยวัสดุต่างชนิด สลับกัน)

2.12.1.3 ผิวเคลือบผสม (Gradient Layer) (ผิวเคลือบชั้นเดียวแต่วัสดุเคลือบถูกผสมรวมด้วย ดังรูปที่ 2.12 วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียมดีเตเนียม (AlTi) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 แสดงชั้นเคลือบผิวในรูปแบบต่างๆ [11]



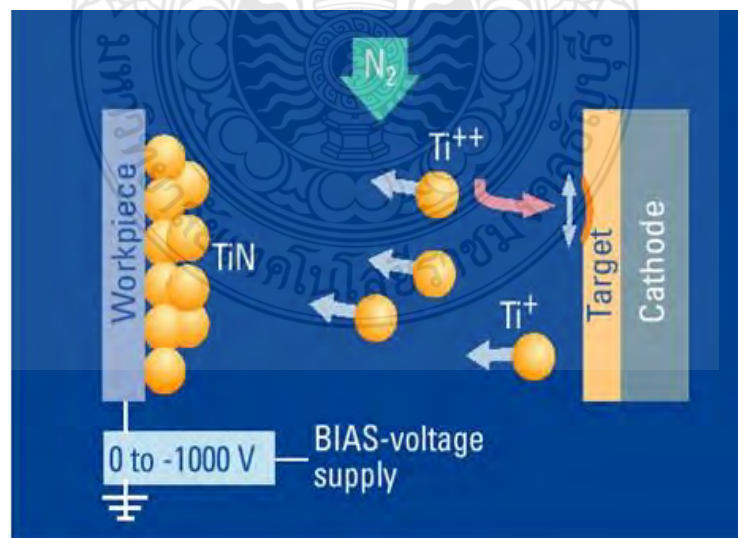
รูปที่ 2.12 แสดงคุณสมบัติของผิวเคลือบ [11]

SELECTED COATING PROPERTIES						
Coating material	TiN	TiCN	CrN	ZrN	AlTiN	W-C:H
Hardness HK (1N)	2500 ±400	2900 ±400	2300 ±300	2400 ±400	3000 ±400	900 to 1400
Temperature resistance °C	550 ±50	450 ±50	650 ±50	600 ±50	800 ±50	350 ±50
Electr. resistance $\mu\Omega$ cm	60 ±20	8 ±20	640	30 ±10	4000– 7000	– –
Thermal conductivity ($Ws^{0.5}$)/m ² K	8800 ±1000	8100 ±1400	8100 ±2600		7000 ±400	7600 ±1000
Coefficient of friction (100Cr6)	0.65– 0.70	0.40– 0.50	0.50– 0.60	0.50– 0.60	0.55– 0.65	0.15– 0.30
Layer thickness (μ m)	2–4	2–4	3–8	2–4	2–4	1–5
Colour	gold- yellow	red-brown/ grey	silver	light gold	anthracite	anthracite/ blue-grey
Ductility	good	satisfactory	very good	good	satisfactory	–

รูปที่ 2.13 แสดงคุณลักษณะของผิวเคลือบแต่ละชนิด [11]

2.12.2 เทคโนโลยี PVD แบบ ARC

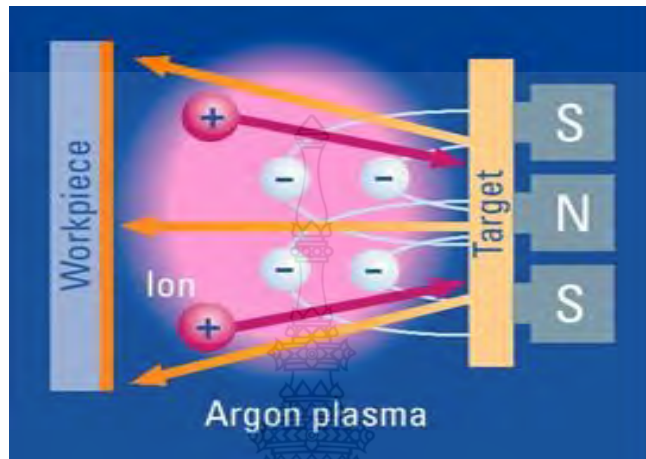
มีการขีดเกาะของสารเคลือบกับพื้นผิวดีเยี่ยมเนื่องจากใช้ประจุไฟฟ้าสูงพื้นผิวจะถูกทำลายเล็กทำให้เกิดการขีดเกาะที่ดี ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 PVD ARC Technology [11]

2.12.3 เทคโนโลยี PVD แบบ Sputter [11]

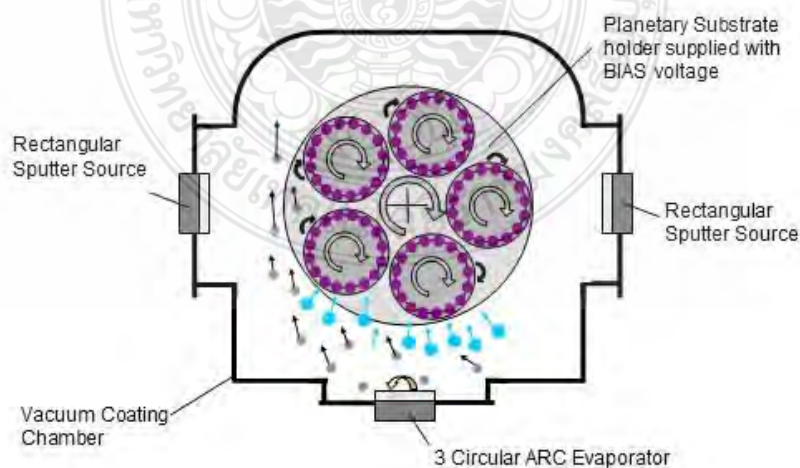
มีพื้นผิวหลังการเคลือบเรียบและสะอาดมีการเกิดเป็นประจุไฟฟ้าต่ำทำให้การยึดเกาะลดน้อยลง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 PVD Sputter technology [11]

2.12.4 เทคโนโลยี PVD แบบ ARC and Sputter [11]

เป็นระบบเดียวที่นำเทคโนโลยีทั้งหมดมารวมไว้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง เป็นชนิดที่ใช้งานอยู่ที่สำนักกษาปณ์ ดังรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 การทำงานของ PVD ARC and Sputter [11]

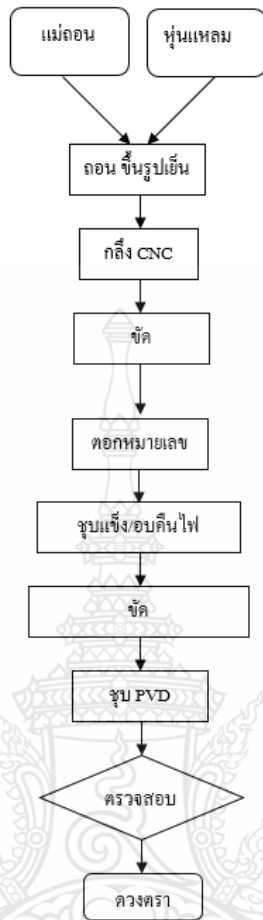


รูปที่ 2.17 เครื่อง PVD ARC and Sputter [11]

2.13 ขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ

กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ การชุบเคลือบผิวด้วยวิธีการPVD ชนิดสารเคลือบ CrN ซึ่งขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญดังรูปที่ 2.18 จากแผนภาพขั้นตอนกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ (แม่พิมพ์) ผู้ทำการวิจัยต้องให้ความหมายของคำต่างๆ ที่ใช้เรียกในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเพื่อจะได้เป็นที่เข้าใจถูกต้องตรงกัน พร้อมทั้งภาพประกอบเพื่อการสื่อสารให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ทำให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น

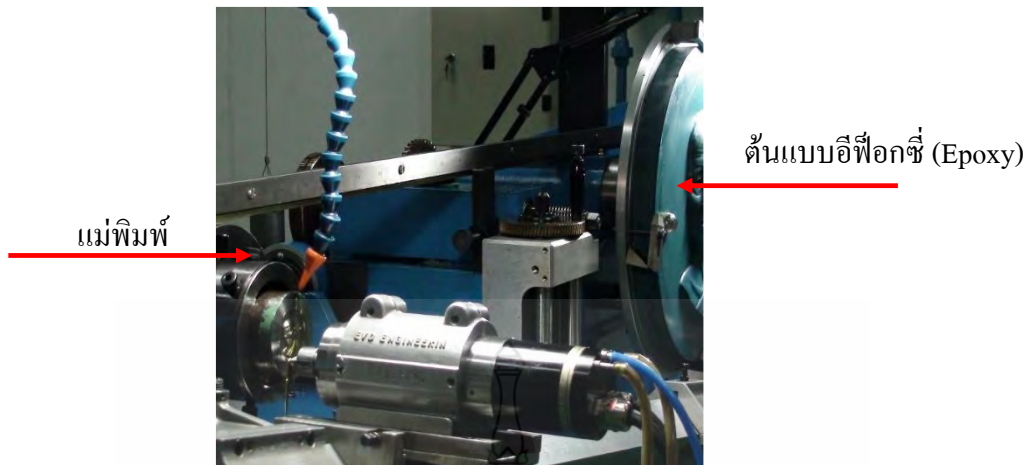
แม่พิมพ์ปั๊มแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ (Master Die) ดังรูปที่ 2.19 เป็นต้นแบบที่เกิดจากการผลิตด้วยเครื่องจักรเครื่องมือกลที่เรียกว่าเครื่องย่อลาย ดังรูปที่ 2.20 คือการนำต้นแบบที่ทำจากอีพ็อกซี่ (Epoxy) ทำการลอกลายลงบนวัสดุที่ทำแม่พิมพ์สำหรับกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ดังรูปที่ 2.21 เพื่อให้ได้รูดลายที่เหมือนกับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญแต่เป็นลักษณะลวดลายมีมีตรงกันข้ามเพื่อนำมาปั๊มเหรียญต่อไป



รูปที่ 2.18 กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ



รูปที่ 2.19 แม่พิมพ์สำหรับกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการย่อขนาด

แม่พิมพ์สำหรับกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเป็นต้นแบบที่เกิดจากการผลิตด้วยเครื่องจักร เครื่องมือกลที่เรียกว่าเครื่องย่อขนาด คือการนำต้นแบบที่ทำจากอีพ็อกซี่ (Epoxy) ทำการลอกขนาดลงบน วัสดุที่ทำแม่พิมพ์สำหรับกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญก่อนการกดอัด

หุ่นแหลมคือส่วนที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ (Die) โดยนำวัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ปั๊ม เหรียญนำมาถึงขึ้นรูปให้ได้ตามสัดส่วนที่ต้องการ ขนาดโดยทั่วไปเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 31 มิลลิเมตร มุม 80 สูง 30 มิลลิเมตร แล้วนำไปกดอัดด้วยเครื่องกดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ดังรูปที่ 2.22

เครื่องจะกัดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญจนได้ลวดลายตามแม่พิมพ์สำหรับกัดอัดแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 เครื่องกัดอัดแม่พิมพ์ปั๊ม



รูปที่ 2.23 หุ่นแหลมหลังผ่านการกัดอัดแม่พิมพ์ปั๊ม

หลังจากที่ได้แม่พิมพ์ปั๊มเหรียญสำเร็จรูปแล้วนำไปเข้ากระบวนการชุบแข็งด้วยเตาสุญญากาศและทำการอบคืนไฟ จากนั้นทำการชุบเคลือบผิวด้วยวิธีการ PVD และทำการขัดให้ผิวเคลือบให้เกิดความเงางาม ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของลวดลายอย่างละเอียดอีกครั้ง

2.14 การผลิตเหรียญเปล่า (Coin Blank)

- โลหะอลูมิเนียมบรอนซ์ (ทองแดง 92% อลูมิเนียม 6% นิกเกิล 2%) เหรียญจะต้องมีสีเหลือง และมีการยกขอบเหรียญ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 รูปเหรียญตัวเปล่าที่ทำการยกขอบพร้อมนำมาปั๊มขึ้นรูป

การผลิตเหรียญตัวเปล่า (blank production) ซึ่งจะมีขั้นตอนการผลิตดังต่อไปนี้ ต้องมีการ เบิกวัตถุดิบ สำหรับการนำไปหลอมหล่อหลอม ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วัตถุดิบก่อนการหลอม Raw Material for Melting Charge

การหลอมโลหะ ทำการหลอมด้วยระบบ (InductionFurnace) จะทำให้มีอุณหภูมิสูงถึง1200 °C – 1400°C ซึ่งจะทำให้โลหะเกิดการหลอมละลาย ดังรูปที่ 2.26 และจะทำการเติมส่วนผสมธาตุทางเคมีของโลหะให้ได้ตามชนิดโลหะที่ต้องการและส่งผล วิเคราะห์ เมื่อผลวิเคราะห์ผ่านก็จะทำการเทลงในเตาหล่อแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2.26 เตาหลอม (Melting Furnace)

เทโลหะหลอมละลาย เมื่อผลวิเคราะห์ผ่านก็จะทำการเทลงในเตาหล่อแบบต่อเนื่อง Holding Furnace เพื่อทำการหล่อ ดังรูปที่ 2.27 จากนั้นโลหะจะถูกหล่อและดึงออกมาผ่าน dies ที่ทำจาก Graphite ดังรูปที่ 2.28 และถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.27 น้ำโลหะเตาหลอม Holding Furnace



รูปที่ 2.28 แผ่น โลหะถูกดึงจาก Die (Strips exiting Graphite dies)



รูปที่ 2.29 แผ่นงานที่ผ่านการดึงออกจาก Die จะถูกทำให้เย็นตัวด้วยน้ำ

ทำการกัดผิวหน้า ของแผ่นโลหะออก เพราะผิวหน้าที่ได้จากการหล่อยังไม่สะอาด
ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การกัดผิวแผ่น โลหะด้วยเครื่อง Scalping Machine

ทำการรีดแผ่น โลหะ (Rolling) จากขนาดความหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร และทำการรีดลดขนาดความหนาให้ได้ความประมาณ 3 - 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.31 และทำการอบอ่อน (Annealing) เพื่อให้แผ่นโลหะมีความเครียดน้อยลงจะได้ง่ายในการรีดละเอียดด้วยเตาอบแผ่นม้วนซึ่งเป็นเตาแบบใช้ก๊าซไนโตรเจนปกคลุมทำให้ผิวที่หน้าแผ่นที่อบอ่อนไม่เกิดออกไซด์หรือทำให้แผ่นม้วนมีสีดำ ดังรูปที่ 2.32 และนำมารีดอีกครั้งเพื่อให้ได้ขนาดความหนา 1.25 มิลลิเมตร ก่อนการตัดเป็นเหรียญตัวเปล่า ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.31 เครื่องรีดหยาบ (Break downmill)



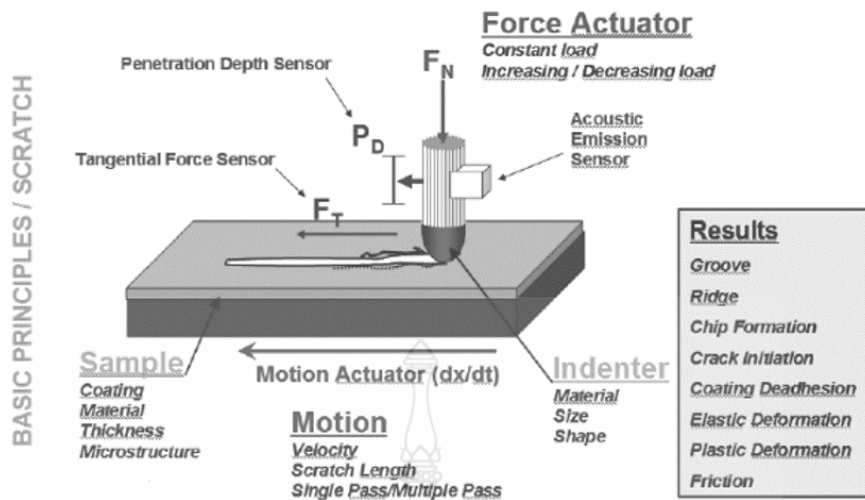
รูปที่ 2.32 เครื่องรีดละเอียด (Rolling mill)



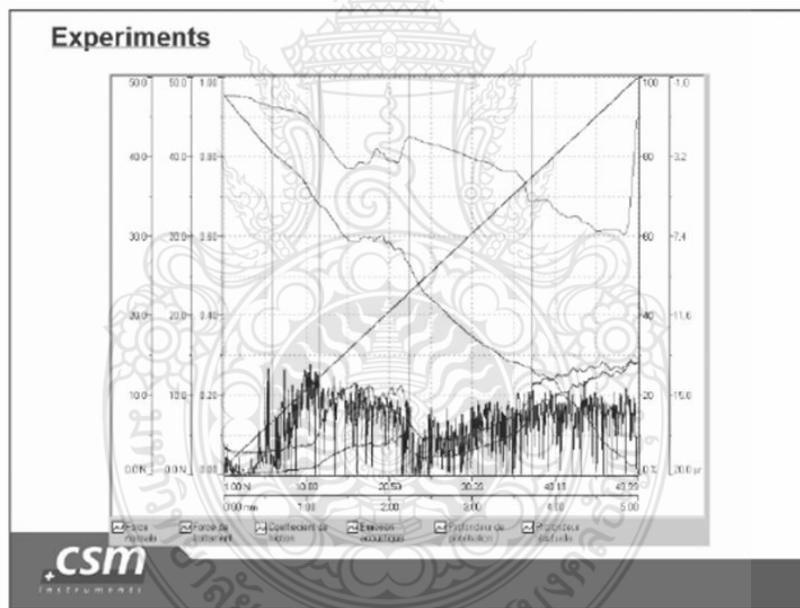
รูปที่ 2.33 เหรียญตัวเปล่าที่ทำการตัดแล้ว

2.15 การทดสอบผิวเคลือบ (Coating hardness test)

เนื่องจากผิวเคลือบ PVD ที่ทำการเคลือบมีความหนาอยู่ที่ประมาณ $3\ \mu\text{m}$ ดังนั้น ในการหาค่าความแข็งจะต้องใช้หัวกดที่ทำจากเพชร กดลงพื้นผิวชั้นเคลือบจะต้องกดลึกไม่เกิน $3.3\ \mu\text{m}$ จะต้องเป็นเครื่องวัดความแข็งที่มีความเที่ยงตรงสามารถปรับแรงในการกดทดสอบได้เหมาะสม การขูดทดสอบ (Scratch Test) ชิ้นงานที่มีการ coating จะถูกขูดด้วยหัวเข็มที่ทำจากเพชรดังรูปที่ 2.34 ลากไปด้วยความเร็วคงที่และมีการเพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อยๆ (Progressive load) และในระหว่างการทดสอบนี้ระบบ sensor จะตรวจวัดสัญญาณเสียง (Acoustic emission sensor) ความลึกของหัวเข็มที่เจาะลงไป ในชิ้นงาน (Penetration depth sensor) และค่าความฝืดที่กำลังเปลี่ยนแปลง (Tangential force sensor) ดังรูปที่ 2.35 เมื่อถึงแรงกดวิกฤติ (Critical load, l_c) ค่าใดค่าหนึ่งผิวเคลือบจะเริ่มเสียหายจะอยู่ในช่วง Plastic Deformation โดยการตรวจจับของ Sensor ต่างๆ ผู้วิจัยจะสามารถแบ่งระดับของความเสียหายที่ค่าแรงกดต่างๆ ออกได้หลายระดับ (เช่น l_{c1} , l_{c2} etc.) จนกว่าจะถึงค่าสุดท้ายที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบโดยสมบูรณ์ (complete delamination) ซึ่งค่าใดค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบโดยสมบูรณ์นี้ทางอุตสาหกรรม Hard coatings ถือว่ามีความสำคัญสูงสุดถึงแม้ว่าเครื่องนี้สามารถให้แรงกดสูงสุดได้ 200N แต่ในทางปฏิบัติแล้ว มักจะตั้งค่าสูงสุดที่ $120 - 150\text{N}$ เนื่องจาก Hard coating หลายๆ ตัวในปัจจุบันมีความแข็งระดับ Superhard (มากกว่า 40GPa) หรือใกล้เคียงและมีค่าการยึดเกาะ (Adhesion) สูงมากหากทำการทดสอบกับ Hard coatings เหล่านี้บน substrate ที่แข็งมาก เช่น Tungsten Carbide อาจทำให้หัวเข็มเพชรที่มีราคาสูงเสียหายได้ภายในการทดสอบเพียงไม่กี่ครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้มา เพื่อนำไปวิเคราะห์หานั้น ได้แก่ลักษณะของร่องที่เกิดขึ้นรอยขนหรือริ้วรอยต่างๆ การเกิดขึ้นของสะเก็ดจากผิว ร่องรอยเริ่มต้นของรอยแตก การหลุดลอกของผิวเคลือบ การคืนตัวและการยุบตัวของพื้นผิว ไปจนถึงพฤติกรรมของแรงเสียดทาน



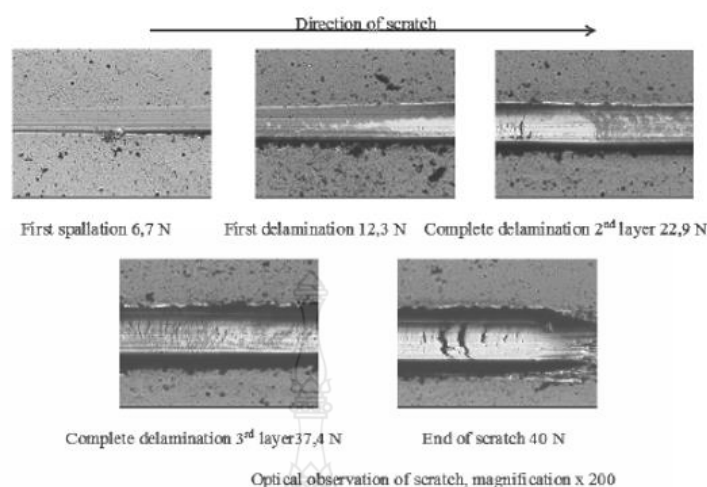
รูปที่ 2.34 แสดงหลักการทั่วไปของ scratch tester [12]



รูปที่ 2.35 แสดงกราฟที่ได้จาก Sensor ในเครื่อง Scratch test บนฟิล์ม TiN/TiCN แบบ Multilayer [12]

แถบด้านล่างเป็นตัวอธิบายการแสดงผลโดยใช้สีของค่าจากsensor ต่างๆ ที่สำคัญ เช่น แรงกดในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน สัญญาณเสียงของการขีด ความลึกของหัวขีดที่จมลงในผิววัสดุ และการคืนตัวของพื้นผิวหลังการขีด ดังรูปที่ 2.36

Experiments



รูปที่ 2.36 แสดงภาพขยายของรอยขีดจากเครื่อง scratchtest บนฟิล์ม TiN/TiCN แบบ multilayer [12]

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรวิทย์ สงวนพันธ์ (2554) ได้ศึกษาเรื่องการยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เหรียญชนิดราคา 1 บาท โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบวัสดุระหว่างเหล็ก X กับเหล็ก Y ใช้วิธีการเคลือบผิวแบบ PVD ชนิดสารเคลือบ CrN ผลการทดสอบแม่พิมพ์ไปใช้ในการปั๊มเหรียญชนิดราคา 1 บาท (โลหะ ไล่เหล็กชุบนิเกิล) ปรากฏว่าเหล็ก Y มีความหนาผิวเคลือบประมาณ 2.7 ไมครอน ได้จำนวนเหรียญ 400,000-450,000 เหรียญต่อคู่ ซึ่งมากที่สุดจากชิ้นงานทดสอบทั้งหมด [13]

ธีระยุทธ วงศ์สมานมณี (2555) ทำการปรับปรุงเพื่อกำหนดปัจจัยในการชุบเคลือบผิว PVD ชนิดสารเคลือบ TiN และ TiCN ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2 และ 3 ไมครอน อุณหภูมิชุบเคลือบผิวประมาณ 250 และ 500°C บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ปรากฏว่าสารเคลือบผิว TiN ความหนา 2.87-2.98 ไมครอน อุณหภูมิชุบเคลือบผิว 428°C ทำให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า จำนวนเหรียญสำเร็จรูปที่ได้ประมาณ 1,000,000 เหรียญ ต่อดวงตรา 1 คู่ [14]

Mo, J.L., Zhu, M.H. 2009. ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นเคลือบ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) อะลูมิเนียมโครเมียมไนไตรด์ (AlCrN) และ อะลูมิเนียมไทเทเนียมไนไตรด์ (AlTiN) ด้วยการทดสอบแบบ Ball on disc พบว่า เมื่อชั้นเคลือบได้รับแรงกระทำเป็น เวลานานในสิ่งแวดล้อมที่มีออกซิเจนร่วมจะเริ่มปรากฏออกไซด์ขึ้นและยังพบว่าออกไซด์ของธาตุ ไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) และอะลูมิเนียม (Al) ที่เกิดขึ้นให้ผลที่แตกต่างกัน สำหรับออกไซด์ ฟิล์มของอะลูมิเนียมและ

โครเมียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการทำน้ำที่เป็นสารหล่อลื่นและป้องกันการ 18 กระทบร้อน (Thermal protective) แต่สำหรับออกไซด์ฟิล์มของไทเทเนียมที่เกิดขึ้นจะมีผลในการ เพิ่มการสึกหรอและความเสียหาย [15]

ปกรณ ชุมรุม และคณะ ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งมาประยุกต์ใช้เพื่อยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ปรากฏว่าฟิล์มที่ไม่ได้เคลือบผิวสึกหรอมากที่สุด ฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยวิธี CVD ชนิดสารเคลือบ TiCN และ ฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยวิธี PVD ชนิดสารเคลือบ TiCN สึกหรอร่องลงมา การเคลือบผิวฟิล์มสามารถยืดอายุการใช้งานของชิ้นงานเจาะรูได้ประมาณ 2.7 เท่า [16]

L.W.Ma และคณะ ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกลของผิวเคลือบ TiN ที่ระดับความหนาต่างกัน โดยมีระดับความหนาประมาณ 0.7, 2.0, 3.7 และ 4.0 ไมครอน จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของระดับความหนาผิวเคลือบมีผลต่อลักษณะรอยแตกของ Columnar และรอยเยื้องของผิวเคลือบ ผิวเคลือบ TiN ที่บางทำให้เกิดรอยแตกเหมือนตามยาวขอบเกรน Columnar ผิวเคลือบ TiN ที่หนาขึ้นจะมีรอยแตกจำนวนมากตามยาวขอบเกรน มีลักษณะรอยแตกที่ขาดเป็นส่วน ๆ เป็นไปตามสัดส่วนของความหนาผิวเคลือบ แต่แนวขอบเกรน Columnar มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นได้ว่าโครงสร้างของ Columnar หรือระดับความหนาของผิวเคลือบ TiN มีอิทธิพลที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกลของผิวเคลือบ [17]

ปกรณ ชุมรุม และคณะ ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัด ภาผิว โดยทำการศึกษาความเสียหายและการสึกหรอโดยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) ด้วย เครื่องไตรบอมิเตอร์ร่วมกับการทำงานปัดโลหะโดยใช้แม่พิมพ์ตัดในการยืนยันถึงประสิทธิภาพของฟิล์มแข็ง เคลือบผิวแม่พิมพ์และการปรับสภาพผิวเพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางช่วยในการตัดสินใจในการเลือกใช้นิคมของฟิล์ม แข็งเคลือบผิว โดยวัสดุที่ใช้ทำพันธ์และบอลเป็นหลักเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS ทำการชุบ แข็งที่ค่าความแข็ง 60 HRC. จากนั้นจึงนำไปเคลือบผิวและปรับสภาพผิวได้แก่ TiC-CVD (Chemical Vapour Deposition), TiCN-CVD, TiCN-PVD (Physical Vapour Deposition), VC-TD (Thermal Diffusion) และ ไม่เคลือบผิว ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองการตัดและแผ่นจาน เป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น SPCC ตามมาตรฐาน JIS หนา 2 มิลลิเมตร จาก การทดลอง พบว่าการเคลือบผิวหรือปรับสภาพผิวช่วยลดการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายได้ ทั้งจาก การทดลองโดยวิธีหมุนบอลบนแผ่นจาน (Ball-on-Disk) ด้วยเครื่องไตรบอมิเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการปัดตัด แม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วย TiCN-CVD มีแนวโน้มการลดอัตราการสึกหรอได้มากกว่าผิวเคลือบตัวอื่นๆ ซึ่งพบว่าเกิดจาก ความแข็งแรงในการเกาะยึดของฟิล์ม TiCN บนวัสดุทำแม่พิมพ์มีค่าสูงกว่าตัวอื่น [18]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

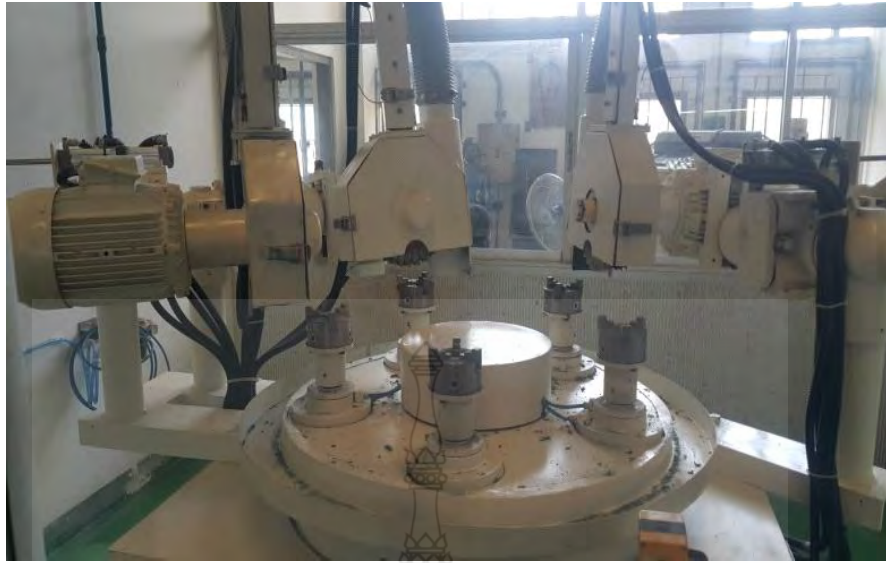
การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาวัสดุในการผลิตและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อการแตกร้าวของแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปของเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท โดยแบ่งชิ้นงานการทดลองเป็นวัสดุ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ KD21 เหล็กกล้าเครื่องมือ Bohler K490 และ เหล็กกล้าเครื่องมือ Bohler W360 โดยใช้สารเคลือบผิว 2 ชนิด คือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) โดยแต่ละตัวแปรจะใช้ตัวอย่างทดลองจำนวน 5 ตัวอย่าง การทดลองนำแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปแต่ละตัวแปรมาทำการปั๊มขึ้นรูปจนแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญเกิดการสึกหรอและแตกร้าวหลังจากนั้นนำแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญมาทำการตรวจสอบรอยแตกร้าวและการสึกหรอของสารเคลือบผิว โดยมีขั้นตอนการทดลองในการดำเนินงานดังนี้

3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ KD21 เหล็กกล้าเครื่องมือ Bohler K490 และ เหล็กกล้าเครื่องมือ Bohler W360 ที่มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งวัสดุทั้ง 3 ชนิด จะถูกนำมาตัดเป็นชิ้น และทำการกลึงขึ้นรูปให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร และมีความยาว 33 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาขัดด้วยเครื่องขัดผิวแบบล้อผ้า ดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความสะอาด และให้ได้คุณภาพผิวตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.2 ก่อนการนำไปกดอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ

Chemical composition (%)									
เกรด	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	อื่นๆ
KD21	0.9	1	0.34	7.88	1.90	0.41	-	-	
K490 PM	1.4	-	-	6.4	1.5	3.7	3.5		Nb
W360 IB	0.50	0.20	0.25	4.50	3.00	0.55	-	-	-

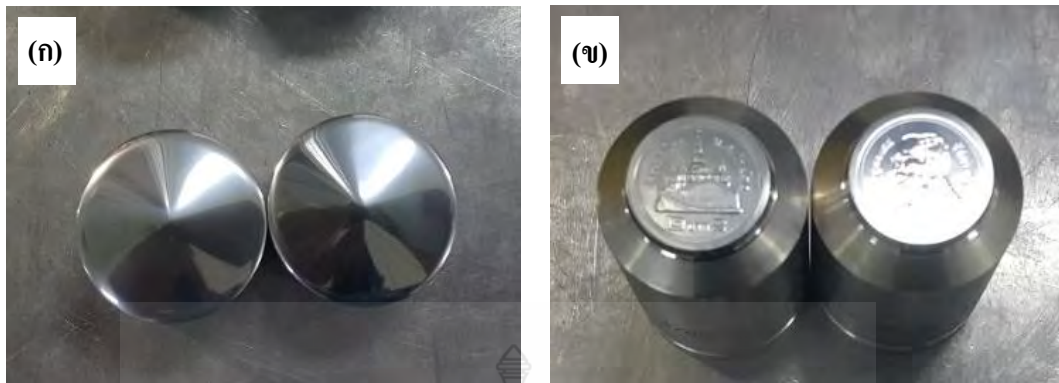


รูปที่ 3.1 เครื่องขัดเงาแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ (Polishing)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานหลังการขัดผิว

เมื่อทำการขัดผิวและทำความสะอาดชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำไปปั๊มขึ้นรูปเพื่อให้เกิดลวดลายตรงกันข้ามกับลวดลายของเหรียญ 2 บาท ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้เครื่องกดไฮดรอลิกขนาด 1,300 ตัน



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานก่อนการป้อนขึ้นรูป (ก) และหลังการป้อนขึ้นรูป (ข)

เพื่อให้เกิดความแข็งแรง ชิ้นงานหลังการป้อนขึ้นรูปจะนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน Heat treatment ด้วยเตาอบชุบแบบสูญญากาศ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งวัสดุทั้ง 3 ชนิด จะมีเงื่อนไขในการอบชุบที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.2 เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของวัสดุมีความแตกต่างกันดังที่กล่าวในข้างต้น โดยรายละเอียดในการอบชุบมีดังนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการปรับปรุงวัสดุแม่พิมพ์ด้วยการ Heat treatment

วัสดุ	เงื่อนไขการอบชุบ
KD21	ทำการอบชุบเหล็กกล้าแม่พิมพ์ป้อนขึ้นรูปหรือวัสดุเหล็กกล้า KD21 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,050°C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N ₂) ที่แรงดัน 6 บาร์จากนั้นทำการอบคืนไฟ (Tempering) ที่อุณหภูมิ 530°C เวลา 2 ชั่วโมง
K490	ทำการอบชุบเหล็กกล้าแม่พิมพ์ป้อนขึ้นรูปหรือวัสดุเหล็กกล้า Bohler K490 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,050°C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N ₂) ที่แรงดัน 6 บาร์จากนั้นทำการอบคืนไฟ (Tempering) ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 530°C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 550°C
W360	ทำการอบชุบเหล็กกล้าแม่พิมพ์ป้อนขึ้นรูปหรือวัสดุเหล็กกล้า Bohler W360 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,050°C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N ₂) ที่แรงดัน 6 บาร์ จากนั้นทำการอบคืนไฟ (Tempering) ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 530°C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 รูปเตาอบชุบแข็งที่ใช้ในการชุบแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ (Hardening furnace)

เมื่อวัสดุแม่พิมพ์ผ่านการอบชุบตามเงื่อนไขที่กำหนด จากนั้นจะทำการสุ่มตัวอย่าง (Dummy) มาทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ดังรูปที่ 3.5 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุแม่พิมพ์ ด้วยกล้อง Microscope หลังการอบชุบ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุถึงส่วนประกอบของเฟสต่างๆที่เป็นส่วนผสมที่อยู่ในผิววัสดุชิ้นงานแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ทดสอบความแข็ง



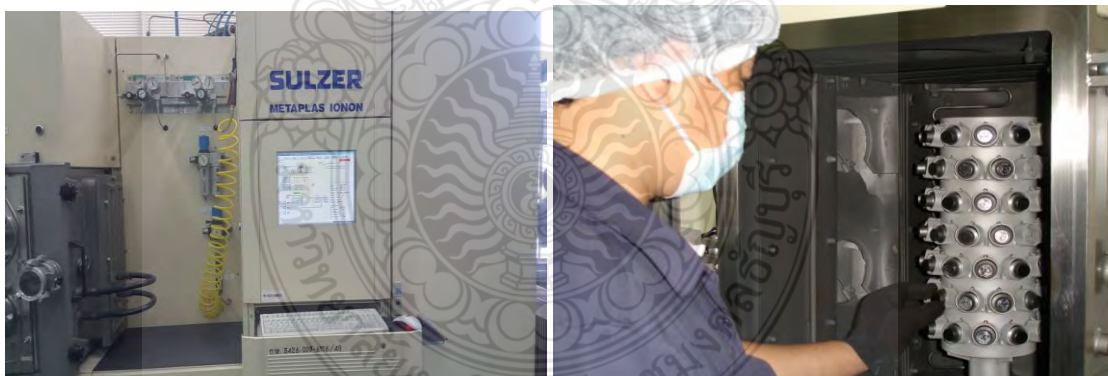
รูปที่ 3.6 กล้อง Microscope

นำแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญไปทำความสะอาดแล้วจัดให้แม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญมีความเงางามและล้างทำความสะอาด รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาทที่ล้างทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค

ทำการชุบเคลือบผิววัสดุแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการชุบแบบ PVD (Physical Vapour Deposition) ด้วยเครื่อง Sulzer Metaplas Ikonon ดังรูปที่ 3.8 โดยใช้สารเคลือบผิว 2 ชนิด คือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และ โครเมียมไนไตรด์ (CrN)



รูปที่ 3.8 ภาพการชุบเคลือบ PVD ที่ผิวแม่พิมพ์ด้วยแม่พิมพ์ ด้วยเครื่อง Sulzer Metaplas Ikonon

การทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีดซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวในการวิเคราะห์ความต้านทานต่อการสึกหรอของผิวเคลือบ โดยผิวเคลือบจะถูกหว่านเพชรขนาดเล็กลงด้วยความเร็วคงที่และมีการเพิ่มแรงกดขึ้นเรื่อยๆ จาก 1 นิวตัน ไปจนถึง 150 นิวตัน ซึ่งจะทำการทดสอบด้วยเครื่อง FISCHERSCOPE ST200 ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบ Scratch test FISCHERSCOPE ST200

3.2 การทดลองปั๊มขึ้นรูปเหรียญ และการเก็บผลการทดลอง

การทดลองผลิตเหรียญ 2 บาท โดยใช้เหรียญตัวเปล่า (Coins Black) ขนาดความหนา 1.25 มิลลิเมตร ที่ผ่านการรีดขอบเหรียญ (Coin Rimming) ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นนำมาปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท ด้วยเครื่องปั๊มขึ้นรูปอัตโนมัติแบบแนวนอนยี่ห้อ Grabener ดังรูปที่ 3.11 โดยความเร็วในการปั๊มขึ้นรูป 650 – 850 เหรียญต่อนาทีควบคุมแรงกดที่ใช้ในการปั๊ม 350 - 400 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.10 เหรียญตัวเปล่า (Coins Black) ก่อนการปั๊มขึ้นรูปเป็นเหรียญ 2 บาท



รูปที่ 3.11 ภาพการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท

ระหว่างการปั๊มขึ้นรูปพนักงานจะทำการสุ่มตรวจเหรียญทุกๆ 3,000 เหรียญโดยประมาณ เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของเหรียญ หากมีการตรวจพบความผิดปกติ หรือความเสียหายที่เหรียญ พนักงานจะทำการหยุดการทำงานของเครื่องและทำการบันทึกจำนวนเหรียญที่ได้รวมทั้งสาเหตุที่หยุดการปั๊มขึ้นรูปในตารางที่ 3.3 และเมื่อแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญได้จำนวน 600,000 เหรียญ แม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญจะถูกนำมาวัดความหนาผิวเคลือบด้วยเครื่อง FISCHER SCOPE HM2000 ดังรูปที่ 3.12 เพื่อเปรียบเทียบความหนาของผิวเคลือบก่อน และหลังการนำมาปั๊มขึ้นรูปว่ามีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใด โดยกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดทั้งหมด 10 จุด ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งผลที่ได้จะถูกบันทึกดังตารางที่ 3.4 ขณะที่แม่พิมพ์ที่ผ่านการทดลองจนหมดอายุการใช้งาน กล่าวคือมีการตรวจพบความเสียหายบนแม่พิมพ์จนไม่สามารถใช้งานได้ จะถูกนำมาตรวจสอบด้วยกล้อง Microscope เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น เช่นการเกิดรอยแตกร้าวบนผิวหน้าแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบแบบอิเล็กทรอนิกส์ฟูออเรสเซนซ์ FISCHER SCOPE HM2000



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการวัดความหนาผิวเคลือบแม่พิมพ์ด้านหน้า (ก) และแม่พิมพ์ด้านหลัง (ข)



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างรูปภาพแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วย CrN ที่เกิดการแตกร้าวที่ฐานเจดีย์และเลข 5 ไทย ที่ตรวจสอบด้วยกล้อง Microscope

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางบันทึกการติดตามการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท

No1	วัสดุแม่พิมพ์	ด้านแม่พิมพ์	จำนวนเหรียญต่อคู่	สาเหตุหยุดปั๊มเหรียญ	หมายเหตุ
1	KD21 CrN	ด้านหน้า	--	--	--
		ด้านหลัง	--	--	--
2	KD21 CrN	ด้านหน้า	--	--	--
		ด้านหลัง	--	--	--
3	KD21 CrN	ด้านหน้า	--	--	--
		ด้านหลัง	--	--	--
4	KD21 CrN	ด้านหน้า	--	--	--
		ด้านหลัง	--	--	--
5	KD21 CrN	ด้านหน้า	--	--	--
		ด้านหลัง	--	--	--

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบแม่พิมพ์

ตำแหน่ง	สารเคลือบผิว แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ KD21			
	วัด	TiN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	CrN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	TiN หลังปั๊มขึ้นรูป
1	--	--	--	--
2	--	--	--	--
3	--	--	--	--
4	--	--	--	--
5	--	--	--	--
6	--	--	--	--
7	--	--	--	--
8	--	--	--	--
9	--	--	--	--
10	--	--	--	--
ค่าเฉลี่ย	--	--	--	--

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการทดลองเคลือบผิววัสดุแม่พิมพ์ 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือ KD21 เหล็กกล้าเครื่องมือ K490 และเหล็กกล้าเครื่องมือ W360 โดยใช้การเคลือบผิวแบบไอระเหยทางฟิสิกส์ด้วยสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) และไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) โดยแต่ละตัวแปรจะใช้ตัวอย่างทดลองจำนวน 5 ตัวอย่าง เพื่อนำมาทดลองบ่มขึ้นรูปเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาอายุการใช้งานจริงของแม่พิมพ์บ่มขึ้นรูป

4.1 ผลการทดลอง

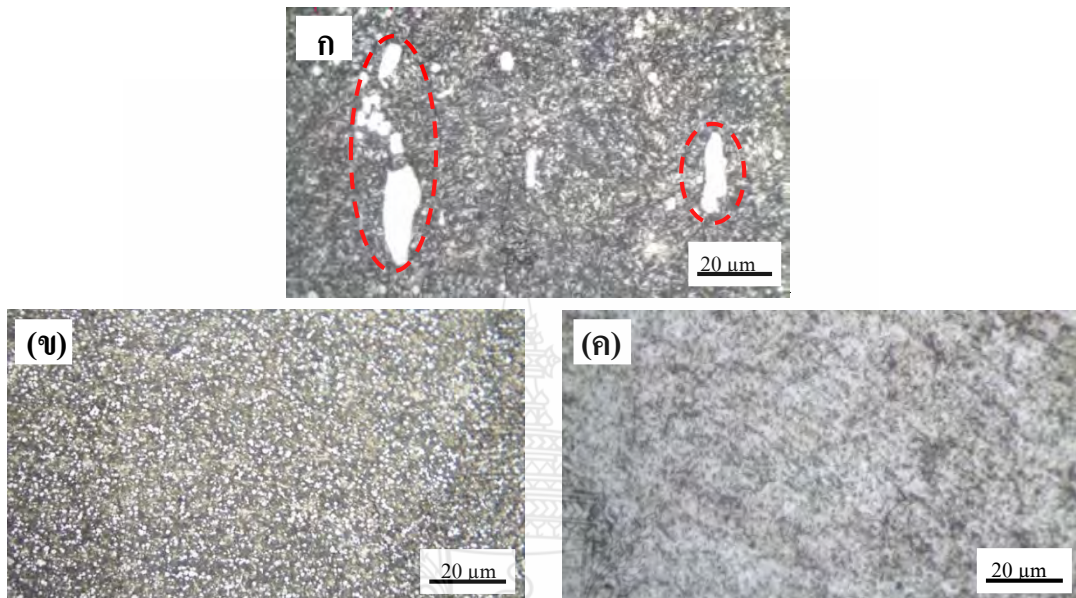
4.1.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของวัสดุ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของวัสดุแม่พิมพ์ ด้วยการขัดผิวและส่องด้วยกล้องส่องโครงสร้างจุลภาคด้วยกำลังขยาย 500 เท่า ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ดังรูปที่ 4.1 (ก) จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคหลังการอบคืนไฟ (Tempering) จะมีคาร์ไบด์ (Carbide) อีสรวมตัวอยู่ที่เป็นลักษณะสีขาว ซึ่งคาร์ไบด์อีสร่วมตัวเข้ารวมกับที่โครงสร้างหลักเป็นมาเทนไซด์ได้ และจากการทดสอบความแข็งคาร์ไบด์อีสร่วมตัวเข้ารวมมีค่าความแข็งเฉลี่ย 1128 HV ขณะที่โครงสร้างมาเทนไซด์มีความแข็งเฉลี่ย 852 HV จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพื้นผิวที่เป็นโครงสร้างมาเทนไซด์และคาร์ไบด์อีสร่วมตัวที่ไม่แตกตัวทำให้เกิดรอยต่อเกรน (Grain Boundary) ของโครงสร้างมาเทนไซด์และคาร์ไบด์ [13]

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังการอบคืนไฟ ของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ดังรูปที่ 4.1 (ข) เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะของตาข่ายซิเมนไทต์ ที่ประกอบด้วยคาร์ไบด์กลมและเนื้อพื้นเฟิร์ลไลต์ในลักษณะที่สมบูรณ์แบบ โครงสร้างมีความสม่ำเสมอของเฟิร์ลไลต์ และคาร์ไบด์กลม มีขนาดเกรนละเอียดเป็น โครงสร้างเนื้อเดียว (Homogeneous) ซึ่งรูปแบบของโครงสร้างจุลภาคนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับโลหะแบบ Powder Metallurgy ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Forging) [19] ทำให้วัสดุแม่พิมพ์ K490 มีความแข็งสูง (748 HV) และต้านทานการสึกหรอได้ดี สามารถรับแรงอัดได้สูง อย่างไรก็ตามคุณสมบัติดังกล่าวอาจไม่เหมาะกับการรับแรงกระแทก เนื่องจากวัสดุจะมีความเหนียวลดลง และอาจส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดความเสียหายอื่น ๆ ตามมาได้

ขณะที่การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังการอบคืนไฟของวัสดุแม่พิมพ์ W360 มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซด์แบบสม่ำเสมอที่มีขนาดเกรนละเอียดและเนื้อพื้นเฟิร์ลไลต์ ซึ่งเป็น

โครงสร้างเนื้อเดียว (Homogeneous) ดังรูปที่ 4.1 (ค) ทำให้วัสดุแม่พิมพ์ W360 มีความแข็งสูง (677 HV) และต้านทานการสึกหรอได้ดี สามารถรับแรงกระแทกได้ดีเนื่องจากวัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุแม่พิมพ์ K490



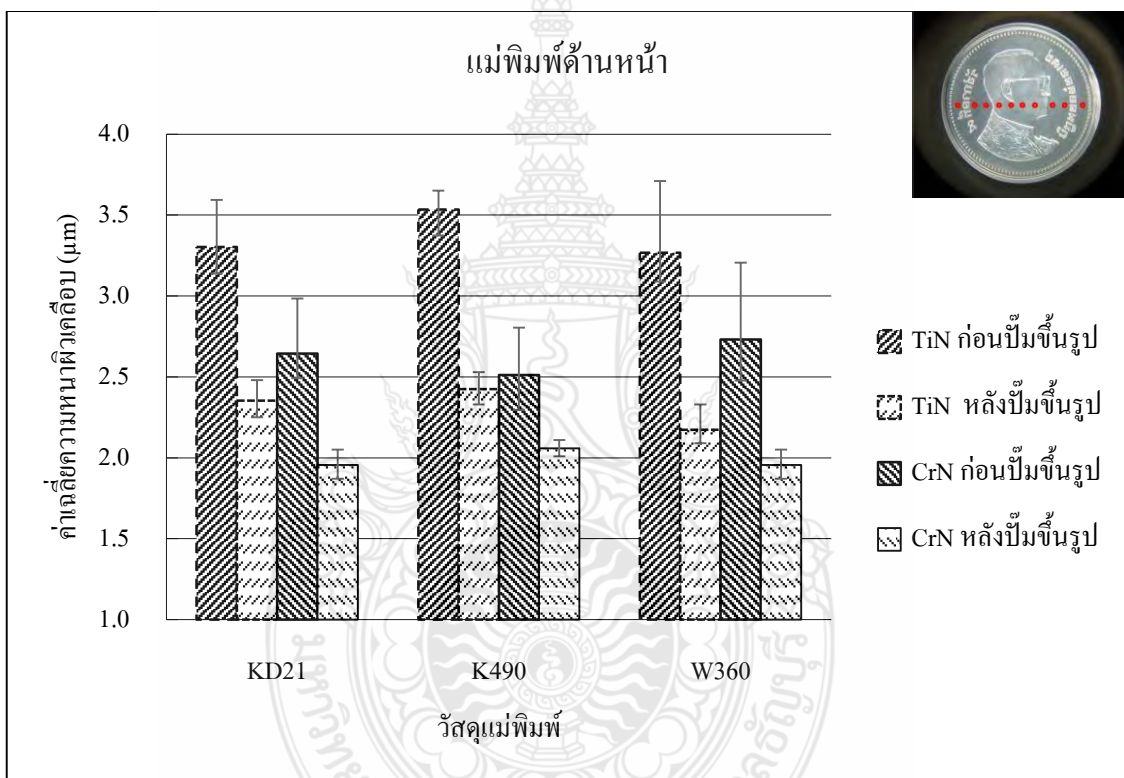
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 (ก), K490 (ข), และ W360 (ค)

4.1.2 ผลการวัดความหนาผิวเคลือบ

เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาผิวเคลือบของวัสดุแม่พิมพ์ KD21, K490 และ W360 ก่อนการปั๊มขึ้นรูป และหลังการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท ซึ่งผลที่นำมาวิเคราะห์ถูกคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดความหนาผิวเคลือบ 10 จุด บนแม่พิมพ์ด้านหน้า และด้านหลัง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3

จากผลการวัดความหนาผิวเคลือบแม่พิมพ์ด้านหน้า ดังรูปที่ 4.2 พบว่าวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ก่อนการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN เท่ากับ 3.3 และ 2.64 ไมครอน ตามลำดับ ในส่วนของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ก่อนการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN เท่ากับ 3.5 และ 2.5 ไมครอน ตามลำดับ และวัสดุแม่พิมพ์ W360 ก่อนการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN เท่ากับ 3.3 และ 2.7 ไมครอน จากนั้นเมื่อนำวัสดุแม่พิมพ์ทั้ง 3 ชนิด ไปทำการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท จำนวน 600,000 เหรียญ และนำมาวัดความหนาผิวเคลือบอีกครั้ง พบว่าความหนาผิวเคลือบบนแม่พิมพ์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยวัสดุแม่พิมพ์ KD21 หลังการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN ลดลงเท่ากับ 2.4 และ 2.0 ไมครอน ตามลำดับ ขณะที่วัสดุ

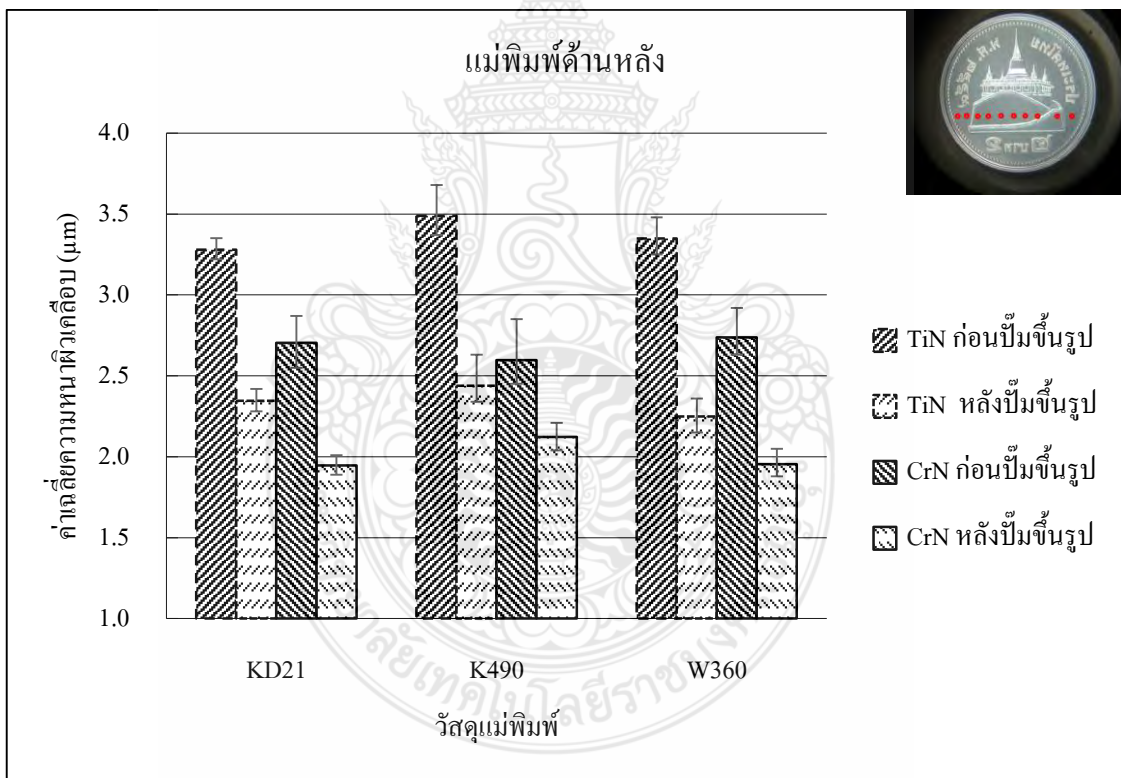
แม่พิมพ์ K490 หลังการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN ลดลงเท่ากับ 2.4 และ 2.1 ไมครอน ตามลำดับ และวัสดุแม่พิมพ์ W360 หลังการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN ลดลงเท่ากับ 2.2 และ 2.0 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งหากเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาของสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดแล้ว พบว่าสารเคลือบ TiN มีความหนาลดลงมากกว่าสารเคลือบ CrN โดยวัสดุแม่พิมพ์ KD21 K490 และ W360 มีร้อยละของความหนาผิวเคลือบ TiN ที่ลดลงหลังการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเท่ากับร้อยละ 29, 31 และ 33 ตามลำดับ แต่ในส่วนของความหนาผิวเคลือบ CrN มีความหนาลดลงเพียงร้อยละ 26, 18 และ 28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบของแม่พิมพ์ด้านหน้า ก่อนการปั๊มขึ้นรูป และหลังการปั๊มขึ้นรูป

ในส่วนของผลการวัดความหนาผิวเคลือบแม่พิมพ์ด้านหลัง ดังรูปที่ 4.3 พบว่าวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ก่อนการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN เท่ากับ 3.3 และ 2.7 ไมครอน ตามลำดับ ในส่วนของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ก่อนการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN เท่ากับ 3.5 และ 2.6 ไมครอน ตามลำดับ และวัสดุแม่พิมพ์ W360 ก่อนการปั๊มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN เท่ากับ 3.3 และ 2.7 ไมครอน จากนั้นเมื่อนำวัสดุแม่พิมพ์

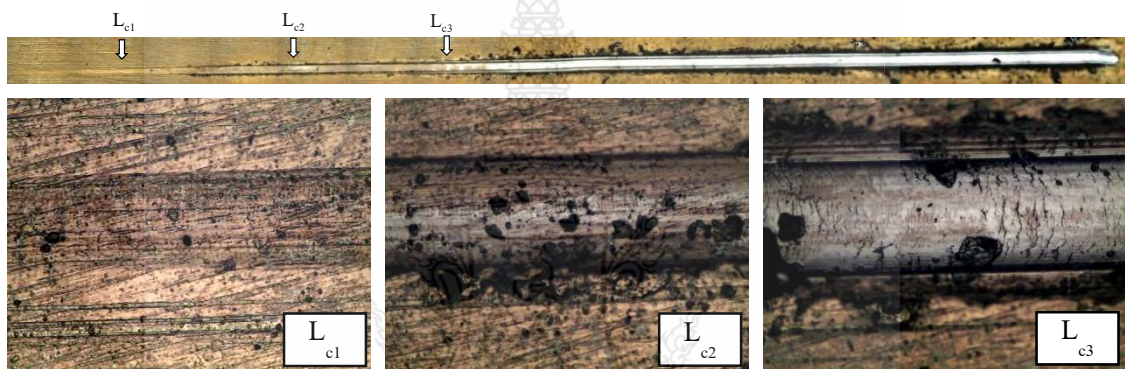
ทั้ง 3 ชนิด ไปทำการบ่มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท จำนวน 600,000 เหรียญ และนำมาวัดความหนาผิวเคลือบอีกครั้ง พบว่าความหนาผิวเคลือบบนแม่พิมพ์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยวัสดุแม่พิมพ์ KD21 หลังการบ่มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN ลดลงเท่ากับ 2.3 และ 1.9 ไมครอน ตามลำดับ ขณะที่วัสดุแม่พิมพ์ K490 หลังการบ่มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN ลดลงเท่ากับ 2.4 และ 2.1 ไมครอน ตามลำดับ และวัสดุแม่พิมพ์ W360 หลังการบ่มขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ TiN และ CrN ลดลงเท่ากับ 2.2 และ 2.0 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งหากเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาของสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดแล้ว พบว่าสารเคลือบ TiN มีความหนาลดลงมากกว่าสารเคลือบ CrN โดยวัสดุแม่พิมพ์ KD21 K490 และ W360 มีร้อยละของความหนาผิวเคลือบ TiN ที่ลดลงหลังการบ่มขึ้นรูปมีค่าเท่ากับร้อยละ 28, 30 และ 33 ตามลำดับ แต่ในส่วนของความหนาผิวเคลือบ CrN มีความหนาลดลงเพียงร้อยละ 28, 18 และ 29 ตามลำดับ



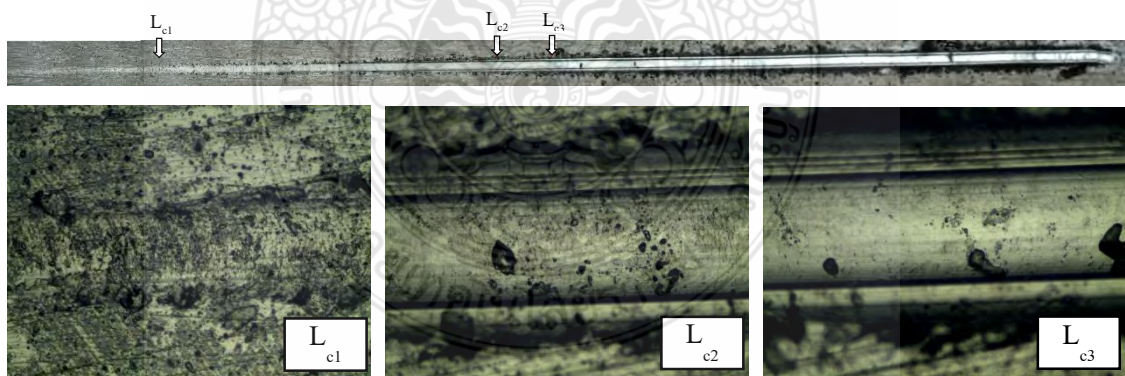
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบของแม่พิมพ์ด้านหลัง ก่อนการบ่มขึ้นรูป และหลังการบ่มขึ้นรูป

4.1.3 ผลการทดสอบขีดผิว (scratch testing)

ผลการทดลองขีดผิวเคลือบด้วยวิธี scratch testing ด้วยเครื่อง STSCHERSCOPE ST200 เพื่อทดสอบการเกาะยึดของผิวเคลือบกับผิววัสดุแม่พิมพ์ ด้วยแรงกระทำเริ่มต้น 1 นิวตัน และเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หัวกดกระทำไปจนถึงแรงกระทำสุดท้าย 150 นิวตัน ที่ระยะทางในการขีด 10 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบพบว่าสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดมีความเสียหายเกิดขึ้น 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ การเริ่มเกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบบริเวณรอยขีด (L_{c1}) การเกิดรอยแยกของผิวเคลือบบริเวณรอยขีด (L_{c2}) และ เกิดการหลุดล่อนสมบูรณ์ของผิวเคลือบจนสามารถมองเห็นผิวชิ้นงานได้ (L_{c3}) อย่างไรก็ตามผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบ TiN และ CrN



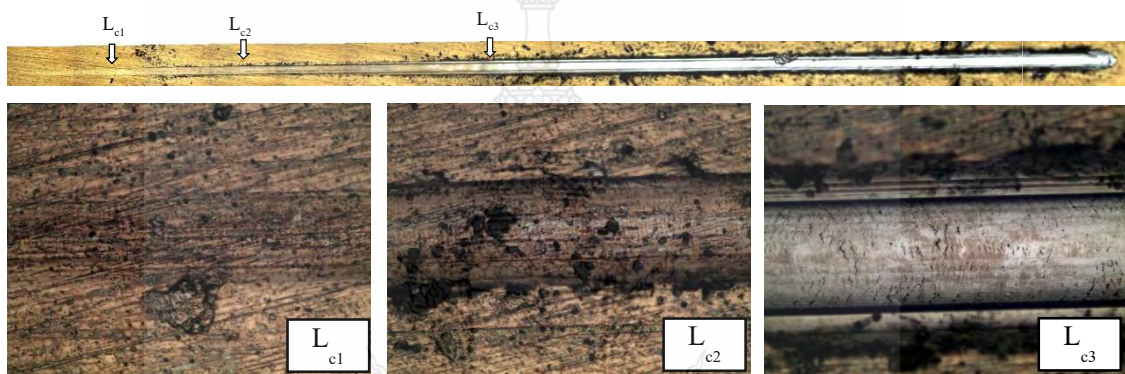
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN



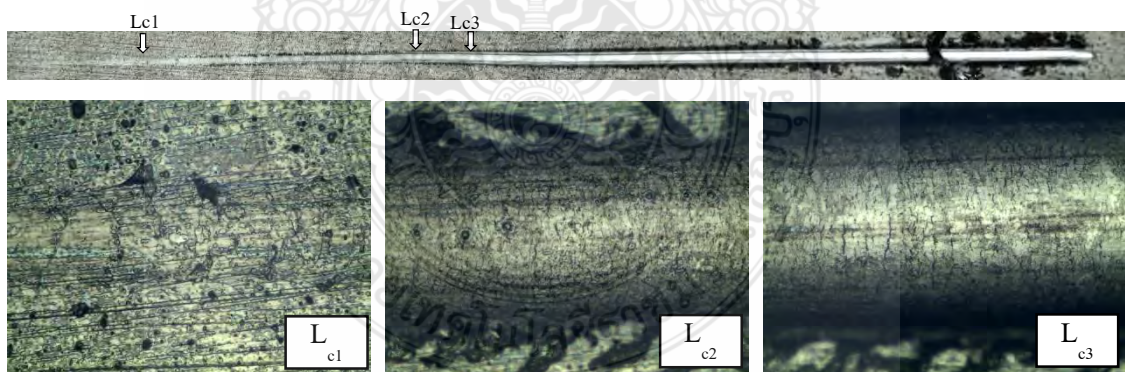
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN

จากรูปที่ 4.4 รอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด โดยการใช้แรงกระทำเริ่มต้น 1 นิวตัน และเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หัวกดกระทำไปจนถึงแรงกระทำสุดท้าย 150 นิวตัน พบว่าค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้เกิด

รอยแตกที่ผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c1} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.21 นิวตัน มีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดรอยแยกของผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c2} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 34.28 นิวตัน และมีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการหลุดลอกสมบูรณ์ของผิวเคลือบ หรือจุด L_{c3} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.75 นิวตัน ขณะที่รอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN ดังรูปที่ 4.5 มีค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c1} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.22 นิวตัน มีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดรอยแยกของผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c2} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 42.97 นิวตัน และมีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการหลุดลอกสมบูรณ์ของผิวเคลือบ หรือจุด L_{c3} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 47.96 นิวตัน



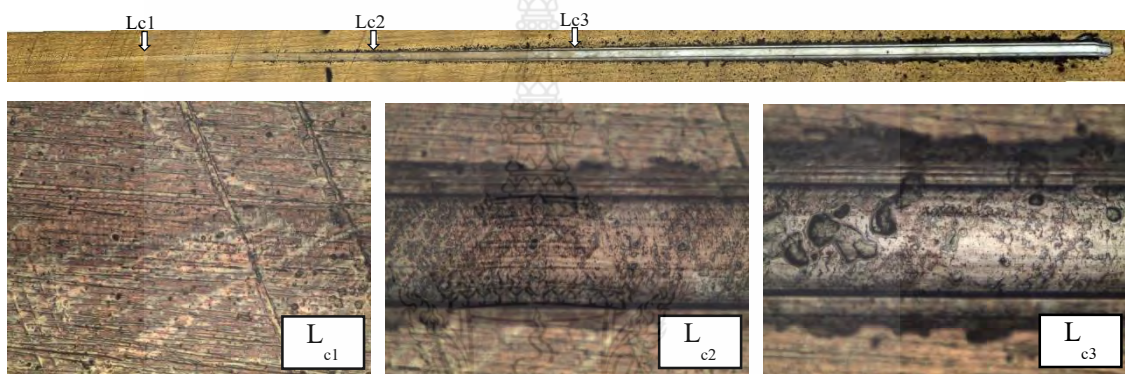
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN



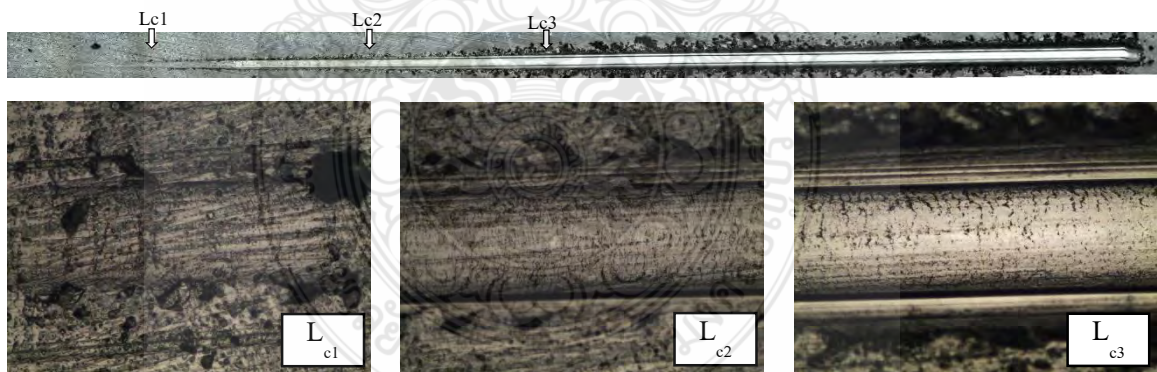
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN

จากรูปที่ 4.6 รอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด โดยการใช้แรงกระทำเริ่มต้น 1 นิวตัน และเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หัวกดกระทำไปจนถึงแรงกระทำสุดท้าย 150 นิวตัน พบว่าค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้เกิดรอย

แตกที่ผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c1} มีค่าเท่ากับ 11.49 นิวตัน มีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดรอยแยกของผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c2} มีค่าเท่ากับ 32.99 นิวตัน และมีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนสมบูรณ์ของผิวเคลือบ หรือจุด L_{c3} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 62.66 นิวตัน ขณะที่การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN มีค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c1} มีค่าเท่ากับ 15.00 นิวตัน ดังรูปที่ 4.7 มีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดรอยแยกของผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c2} มีค่าเท่ากับ 48.76 นิวตัน และมีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนสมบูรณ์ของผิวเคลือบ หรือจุด L_{c3} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 73.43 นิวตัน



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN

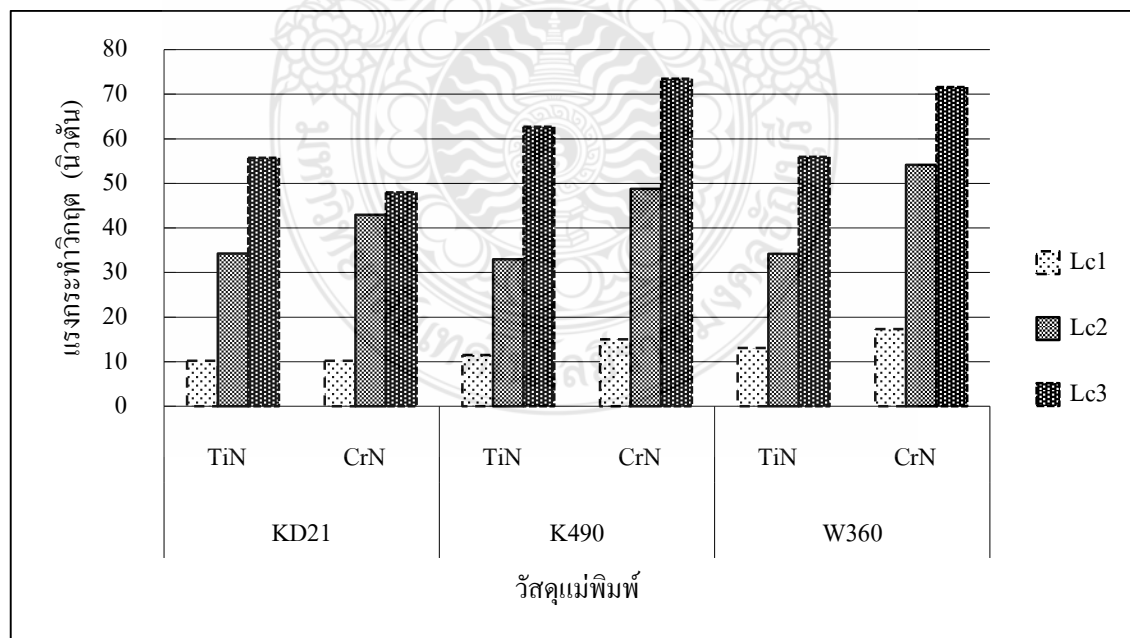


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบรอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN

จากรูปที่ 4.8 รอยขีดวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีด โดยการใช้แรงกระทำเริ่มต้น 1 นิวตัน และเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หัวกดกระทำไปจนถึงแรงกระทำสุดท้าย 150 นิวตัน พบว่าค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c1} มีค่าเท่ากับ 13.07 นิวตัน มีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิด

รอยแยกของผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือค่า L_{c2} มีค่าเท่ากับ 34.20 นิวตัน และมีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนสมบูรณ์ของผิวเคลือบ หรือจุด L_{c3} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.92 นิวตัน ขณะที่การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN มีค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นที่ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c1} มีค่าเท่ากับ 17.34 นิวตัน ดังรูปที่ 4.9 มีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดรอยแยกของผิวเคลือบบริเวณรอยขีด หรือจุด L_{c2} มีค่าเท่ากับ 54.15 นิวตัน และมีค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนสมบูรณ์ของผิวเคลือบ หรือจุด L_{c3} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.62 นิวตัน

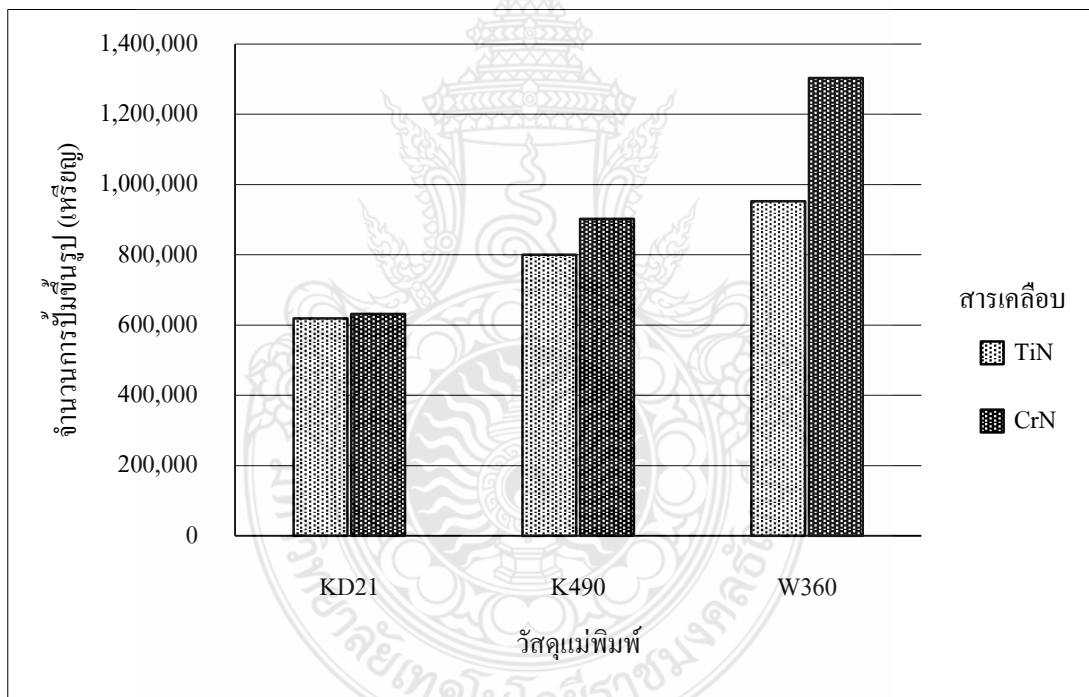
จากผลการทดสอบการขีดผิวชิ้นงานที่กล่าวในข้างต้นเมื่อนำจุดที่ผิวเคลือบเกิดความเสียหาย L_{c1}, L_{c2}, L_{c3} มาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุแม่พิมพ์ และชนิดของสารเคลือบ ดังรูปที่ 4.10 พบว่าที่จุด L_{c1}, L_{c2} , และ L_{c3} ผิวเคลือบ CrN มีค่าแรงกระทำวิกฤตสูงกว่าผิวเคลือบ TiN ในทุกๆ วัสดุแม่พิมพ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผิวเคลือบ CrN มีความเสียหายช้ากว่าผิวเคลือบ TiN ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ O. Knotek [20] ที่กล่าวสรุปในงานวิจัยไว้ว่าการเคลือบผิว TiN ด้วยวิธี PVD ทำให้เกิดค่า Compressive stress .ในปริมาณที่สูงมาก ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานต่ำลง แต่จะเพิ่มค่าความแข็งแรงของผิวเคลือบสูงขึ้น ประกอบกับ TiN มีค่าปฏิกิริสัมพันธ์ทางเคมีต่อไนโตรเจนสูงกว่าโครเมียม ทำให้เมื่อทำการเคลือบ TiN ด้วยวิธี PVD ผิวเคลือบดังกล่าวจะแยกออกเป็นชั้นๆ ที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนที่แตกต่างกันบนผิวหน้าของชิ้นงาน [21] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น



รูปที่ 4.10 ค่า L_{c1}, L_{c2}, L_{c3} ของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิดที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN

4.14 ผลการทดลองป้อนข้าว

จากการทดลองป้อนข้าว 2 บาท โดยใช้แม่พิมพ์ป้อนข้าวที่ผลิตจากวัสดุ 3 ชนิด และใช้สารเคลือบผิว 2 ชนิด ดังที่กล่าวในข้างต้น พบว่าวัสดุแม่พิมพ์ป้อนข้าวมีผลต่อจำนวนในการป้อนข้าวหรืออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ป้อนข้าว และพบว่าชนิดของสารเคลือบ TiN และ CrN มีผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ป้อนข้าวด้วยเช่นกัน โดยอายุการใช้งานของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN สามารถป้อนข้าว 2 บาท ได้จำนวน 618,684 และ 631,110 เหรียญ ตามลำดับ ในส่วนของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN สามารถป้อนข้าว 2 บาท ได้จำนวน 800,011 และ 902,477 เหรียญ ตามลำดับ และวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN สามารถป้อนข้าว 2 บาท ได้จำนวน 952,573 และ 1,302,991 เหรียญ ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนการป้อนข้าว 2 บาท ด้วยวัสดุแม่พิมพ์ที่ต่างกัน

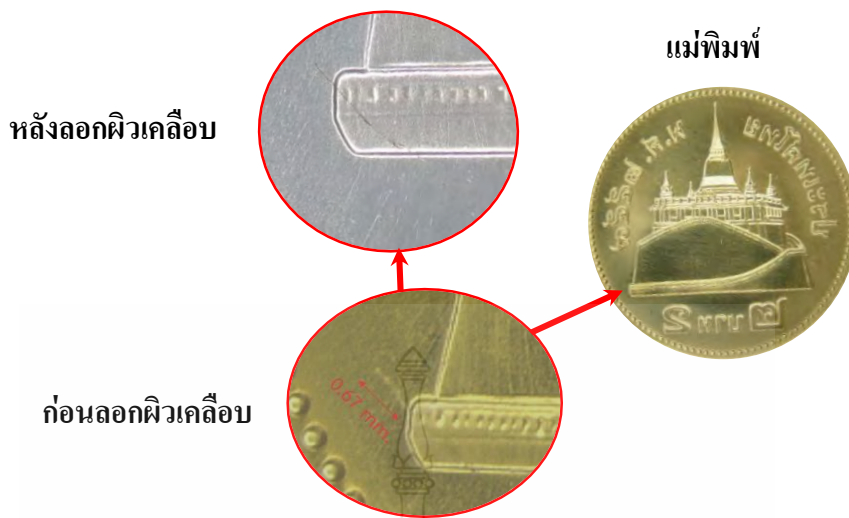
4.2 การวิเคราะห์ผล

จากผลการทดลองป้อนข้าว 2 บาท ตามตัวแปรที่กำหนด สามารถสรุปสาเหตุความเสียหายที่มีผลต่ออายุการใช้งานได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สาเหตุความเสียหายที่มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท

วัสดุ	สารเคลือบ	ความเสียหาย	อายุการใช้งาน โดยเฉลี่ย
KD21	TiN	เกิดการแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป ด้านหลัง (จำนวน 5 ตัวอย่าง)	618,684
	CrN	เกิดการแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป ด้านหลัง (จำนวน 5 ตัวอย่าง)	631,110
K490	TiN	เกิดการแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป ด้านหลัง (จำนวน 5 ตัวอย่าง)	800,011
	CrN	เกิดการแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป ด้านหลัง (จำนวน 5 ตัวอย่าง)	902,477
W360	TiN	เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบที่บริเวณจุด ไปป์ลาขอบแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปด้านหน้า และ ด้านหลัง (จำนวน 5 ตัวอย่าง) เกิดรอยร้าวที่ผิวแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปด้านหน้า (จำนวน 5 ตัวอย่าง)	952,573
	CrN	เกิดรอยร้าวที่ผิวแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปด้านหน้า (จำนวน 5 ตัวอย่าง)	1,302,991

จากตารางที่ 4.1 พบว่าวัสดุแม่พิมพ์ KD21 มีอายุการใช้งานต่ำที่สุดนั้น เนื่องจากวัสดุแม่พิมพ์ KD21 เมื่อทำการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท ที่จำนวน 600,000 เหรียญโดยประมาณ วัสดุแม่พิมพ์ KD21 เริ่มเกิดแตกรอยร้าวที่ผิวหน้าวัสดุแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 4.12 แสดงรอยแตกร้าวที่ผิวเคลือบของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว TiN บริเวณฐานเจดีย์ และเมื่อทำการลอกผิวเคลือบออกยังพบว่าเกิดรอยร้าวที่บริเวณฐานเจดีย์ นั้นหมายความว่ารอยร้าวเกิดขึ้นที่ตัววัสดุแม่พิมพ์โดยตรง โดยไม่ได้เป็นผลมาจากสารเคลือบ เช่นเดียวกันกับ รูปที่ 4.13 แสดงรอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิว CrN บริเวณยอดเจดีย์ ซึ่งพบว่าหลังการลอกผิวเคลือบออกยังพบรอยร้าวที่บริเวณยอดเจดีย์ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการแตกร้าวดังกล่าวเกิดขึ้นที่วัสดุแม่พิมพ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบโครงสร้างวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่มีคาร์ไบด์อิสระตกค้างอยู่ทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณผิวรอยต่อระหว่างคาร์ไบด์และมาเทนไซต์ได้



รูปที่ 4.12 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิว TiN บริเวณฐานเจดีย์



รูปที่ 4.13 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิว CrN บริเวณยอดเจดีย์

ในส่วน of วัสดุแม่พิมพ์ K490 แม้จะมีอายุการใช้งานสูงกว่าวัสดุแม่พิมพ์ KD21 แต่ยังคงพบว่ามีลักษณะความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ยังเกิดการแตกร้าวเช่นเดียวกับวัสดุแม่พิมพ์ KD21 แต่จะเริ่มเกิดการแตกร้าวเมื่อทำการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาทที่จำนวน 800,000 – 900,000 เหรียญ ดังรูปที่ 4.14 แสดงรอยแตกร้าวก่อน และหลังการลอกผิวเคลือบออกของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว

TiN บริเวณเลขสอง และฐานเจดีย์ ขณะที่วัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว CrN พบว่าเกิดรอยแตกร้าวก่อน และหลังการลอกผิวเคลือบออกที่บริเวณเลขสอง ดังรูปที่ 4.15 โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 เกิดจากสมบัติทางกลของวัสดุหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้โครงสร้างของวัสดุมีลักษณะของตาข่ายซีเมนไทต์ ประกอบด้วยคาร์ไบด์กลมและเนื้อพื้นเฟิร์ลไลต์ ซึ่งสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี รับแรงอัดได้สูง แต่ในทางกลับกัน โครงสร้างดังกล่าวไม่เหมาะกับการรับแรงกระแทก



รูปที่ 4.14 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว TiN บริเวณเลขสอง



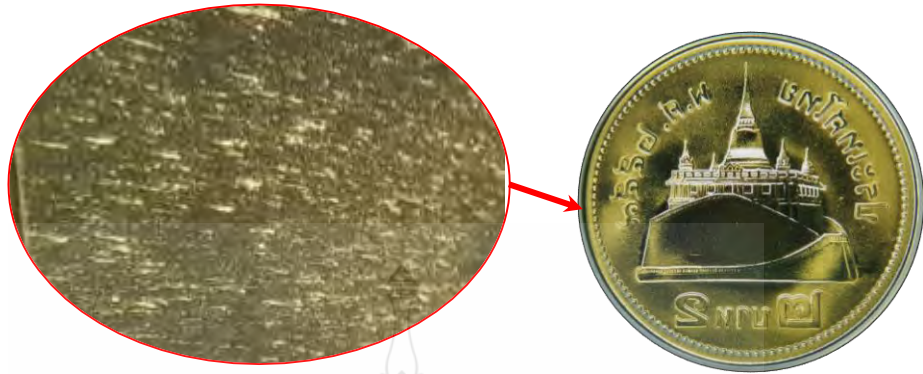
รูปที่ 4.15 รอยแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิว CrN บริเวณเลขสอง

ขณะที่วัสดุแม่พิมพ์ W360 มีอายุการใช้งานสูงที่สุด จากผลการทดลองพบว่าลักษณะความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN เมื่อทำการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาทที่จำนวน 900,000 เหรียญโดยประมาณ เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบแม่พิมพ์ด้านหน้า และด้านหลังที่บริเวณจุดไข่นาขอบเหรียญ ดังรูปที่ 4.16 ขณะที่การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN ไม่เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความหนาของสารเคลือบ TiN ที่มีความหนาลดลงมากกว่าสารเคลือบ CrN เมื่อทำการปั๊มขึ้นรูปที่จำนวน 600,000 เหรียญ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ TiN มีค่าสูงกว่าผิวเคลือบ CrN และสอดคล้องกับผลทดสอบชุดผิวชิ้นงาน ที่มีค่าแรงกระทำวิกฤต L_{c1} , L_{c2} , L_{c3} ต่ำกว่าผิวเคลือบ CrN ในทุกๆวัสดุแม่พิมพ์ ดังนั้นความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบ CrN กับวัสดุ W360 ย่อมดีกว่าผิวเคลือบ TiN นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุแม่พิมพ์ W360 เมื่อทำการปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาทที่จำนวน 900,000 – 1,300,000 เหรียญ ผิวด้านหน้าแม่พิมพ์จะเกิดรอยฝ้า ที่เกิดจากการยึดเกาะของเนื้อวัสดุ เหรียญบนผิวแม่พิมพ์ ทำให้เหรียญ 2 บาทที่ได้ไม่เงางามและคุณภาพความสวยงามลดลง โดยเฉพาะผิวเคลือบ TiN มีการยึดเกาะของเนื้อวัสดุเหรียญมากกว่าผิวเคลือบ CrN ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ทำให้วัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN มีอายุการใช้งานต่ำกว่าการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN



รูปที่ 4.16 การหลุดลอกของผิวเคลือบ TiN ในวัสดุแม่พิมพ์ W360

ผิวเคลือบที่เกิดการยึดเกาะของวัสดุหริยณ



แม่พิมพ์

รูปที่ 4.17 การยึดเกาะของวัสดุหริยณที่ผิวเคลือบ TiN ในวัสดุแม่พิมพ์ W360

ผิวเคลือบที่เกิดการยึดเกาะของวัสดุหริยณ



แม่พิมพ์

รูปที่ 4.18 การยึดเกาะของวัสดุหริยณที่ผิวเคลือบ CrN ในวัสดุแม่พิมพ์ W360

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้นำวัสดุแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือ KD21 เหล็กกล้าเครื่องมือ K490 และเหล็กกล้าเครื่องมือ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) และนำมาทดลองปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท เพื่อศึกษาการเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ จากเดิมที่มีปริมาณการผลิตโดยเฉลี่ยประมาณ 600,000 เหรียญ/คู่ ของแม่พิมพ์ ให้มีปริมาณการผลิตมากกว่า 900,000 เหรียญ/ คู่ของแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถสรุปการดำเนินงานได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยของวัสดุแม่พิมพ์ KD21, K490 และ W360 ที่มีผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท พบว่าวัสดุแม่พิมพ์ KD21 มีอายุการใช้งานที่ 600,000 เหรียญโดยประมาณ เนื่องจากวัสดุแม่พิมพ์ KD21 เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าวัสดุแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติทางกลของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โครงสร้างวัสดุมีคาร์ไบด์อิสระตกค้างอยู่ทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณผิวรอยต่อระหว่างคาร์ไบด์และมาเทนไซต์ได้

วัสดุแม่พิมพ์ K490 มีอายุการใช้งานที่ 800,000 – 900,000 เหรียญโดยประมาณ ซึ่งวัสดุแม่พิมพ์ K490 มีรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าวัสดุแม่พิมพ์เช่นเดียวกับวัสดุแม่พิมพ์ KD21 แต่จะมีอายุการใช้งานที่สูงกว่า โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของวัสดุแม่พิมพ์ K490 เกิดจากสมบัติทางกลของวัสดุหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โครงสร้างวัสดุมีลักษณะของตาข่ายซีเมนไทต์ ประกอบด้วยคาร์ไบด์กลมและเนื้อพื้นเฟิร์สไลต์ ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกต่ำลง

วัสดุแม่พิมพ์ W360 มีอายุการใช้งานสูงสุด ปริมาณการปั๊มขึ้นรูปที่ 900,000 – 1,300,000 เหรียญโดยประมาณ ซึ่งลักษณะความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบ TiN และเกิดรอยฝ้าบนผิวเคลือบ TiN และ CrN ที่เกิดจากการยึดเกาะของเนื้อวัสดุเหรียญ

ปัจจัยของสารเคลือบ TiN และ CrN พบว่าสารเคลือบ TiN มีความหนาของผิวในการเคลือบอยู่ที่ 3 – 3.5 ไมครอน และสารเคลือบ CrN มีความหนาของผิวในการเคลือบอยู่ที่ 2.5 – 3 ไมครอน โดยอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ TiN มีค่าสูงกว่าผิวเคลือบ CrN เมื่อทำการปั๊มขึ้นรูปที่จำนวน 600,000 เหรียญ และผิวเคลือบ TiN มีค่าแรงกระทำวิกฤต L_{c1} , L_{c2} , L_{c3} ต่ำกว่าผิวเคลือบ CrN

ในทุกๆวัสดุแม่พิมพ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบ CrN ดีกว่าผิวเคลือบ TiN และจากผลการทดลองบ่มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท พบว่าสารเคลือบ CrN ส่งผลให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคลือบ TiN โดยเฉพาะวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN จะมียอดในการผลิตมากกว่าสารเคลือบ TiN ถึง 400,000 เหรียญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนของการไปคัสสระ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ร่วมกับ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

5.2.2 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบด้วยวิธี PVD เพื่อศึกษาการยึดเกาะของผิวเคลือบ

5.2.3 ควรมีการศึกษาการเคลือบผิวแม่พิมพ์บ่มขึ้นรูปเหรียญด้วยวัสดุเคลือบผิวอื่น ๆ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ และช่วยลดต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์

5.2.4 ควรศึกษาการลดต้นทุนในการผลิตควรพิจารณาวัสดุแม่พิมพ์บ่มเหรียญกษาปณ์ที่มีราคาต่อหน่วยต่ำกว่า มาเป็นแนวทางเลือกในการผลิต

บรรณานุกรม

- [1] สำนักบริหารเงินตรา ส่วนงาน โครงการและวิเทศสัมพันธ์ กองแผนงาน ความสำคัญของเหรียญกษาปณ์. สืบค้นจาก http://www.treasury.go.th/ewt_news.php?nid=91 (9 มีนาคม 2561).
- [2] ชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ. สืบค้น จาก . <http://www.bohler-edelstahl.com/en/W360ISOBLOC.php> (21 มีนาคม 2561)
- [3] กรมธนารักษ์. เหรียญกษาปณ์ที่ออกใช้ในรัชกาลปัจจุบัน . สืบค้น จาก . http://www.treasury.go.th/ewt_news.php?nid=43910 (21 มีนาคม 2562)
- [4] อลูมิเนียม. สืบค้นจาก. (Online), Available: <https://www.siamchemi.com/อลูมิเนียม> (21 มีนาคม 2561).
- [5] รศ.มนัส สติรจินดา. (2538). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก, พิมพ์ครั้งที่ 2
- [6] สำนักบริหารเงินตรา ส่วนงาน โครงการและวิเทศสัมพันธ์ กองแผนงาน บทความ เรื่องเหรียญ 2 บาท สืบค้นจาก. http://www.treasury.go.th/ewt_news.php?nid=92 (22 มีนาคม 2561).
- [7] สุกัญญา ชูช่วย และคณะ. (2552). เทคนิคการผลิตเหรียญกษาปณ์สำเร็จรูป โลหะชุบเคลือบใส่เหล็กโรงกษาปณ์ฟินแลนด์. รายงานการฝึกอบรม. กรมธนารักษ์
- [8] รศ.มนัส สติรจินดา. (2537). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก กรุงเทพมหานคร:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [9] Donald M. Mattox, (1998). handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. New Mexico.
- [10] Physical Vapour Deposition (Online). สืบค้น จาก . http://www.nanoshield-pvd.com/pvd_thai.html (24 มีนาคม 2561).
- [11] M.Polok-Rubiiec*, L”A”Dobrzanski, M. Adamiak. (2008). The properties and wear resistance of the CrN PVD coating. Journal of Achievements in materials and Manufacturing Engineering. Vol 30, No.2; pp.1655-171.
- [12] สุรศักดิ์ สุรินทรพงษ์. Adhesion ของ PVDhard coating การวัด และ เกร็ดความรู้ที่เกี่ยวข้อง.วารสารแม่พิมพ์. สืบค้นจาก. https://www.researchgate.net/publication/272495685_Adhesion_khxng_PVD_Hard_Coating_karwad_laea_kerdkhwamruthikeiywkhxng

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] วรวิทย์ สงวนพันธ์. (2554). การเพิ่มอายุการใช้งานของควงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท ใหม่. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [14] ชีระยุทธ วงศ์สมานมณี. (2555). การกำหนดปัจจัยในการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 1 บาท เพื่อลดต้นทุนการผลิต. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [15] Mo, J.L., Zhu, M.H., Lei, B., Leng, Y.X., Huan, N. (2007). Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings—Deposited by physical vapor deposition. *Wear*.(263): 1423-1429.
- [16] ปกรณ์ ชุมชุม. (2553) การยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เจาะรูในการผลิตคลิปรัดเหน็บสปริง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [17] L.W.Ma, J.m. Caimey. M.J.Hoffman, P.R. Munroe. (2010). Effect of coating thickness on the deformation mechanisms in PVD TiN- coated steel. *Surface & Coating Technology* 204, pp. 1764-1773.
- [18] ปกรณ์ ชุมชุม. (2559). การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอในแม่พิมพ์ตัด. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 12 (1), 1-15.
- [19] S. Szczepanik, S. C. Mitchell, A. A. S. Abosbaia, A. S. Wronski. (2010). *Powder Metallurgy Progress*, Vol.10 .No.1
- [20] O. Knotek, REising, G. Kramer and F. Jungblut. (1990) *Metallurgical Coatings*, San Diego
- [21] R. Gahlin, M. Bromark, P. Hedenqvist, S. Hogmark, G. Hakansson. (1995) Properties of TiN and CrN coatings deposited at low temperature using reactive arc-evaporation. *Surface and Coatings Technology* 76-77. pp. 174-180.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

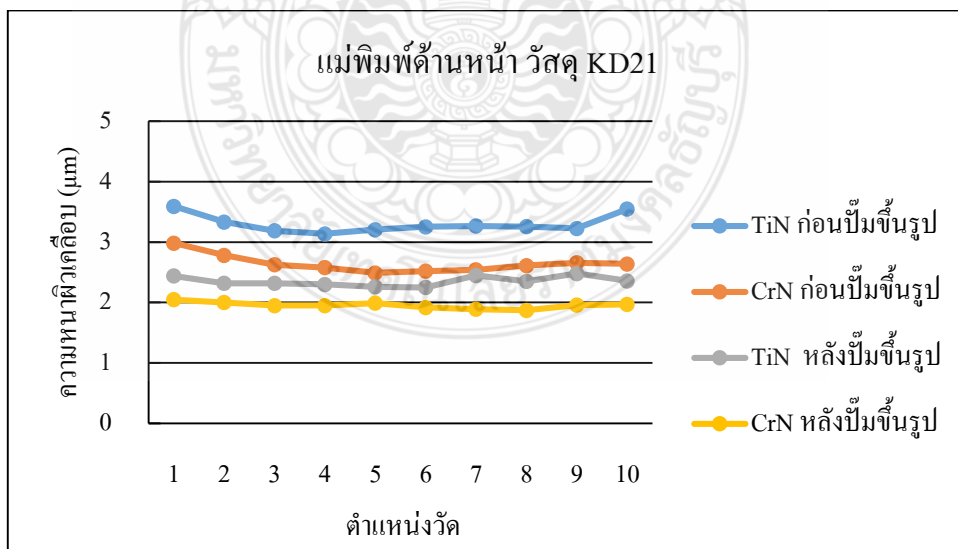
ผลการทดลอง

ก.1 ผลการวัดความหนาผิวเคลือบ

ก.1.1 ความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ KD21

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ KD21

ตำแหน่ง วัด	สารเคลือบผิว แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ KD21			
	TiN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	CrN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	TiN หลังปั๊มขึ้นรูป	CrN หลังปั๊มขึ้นรูป
1	3.6	3.0	2.4	2.1
2	3.3	2.8	2.3	2.0
3	3.2	2.6	2.3	2.0
4	3.1	2.6	2.3	2.0
5	3.2	2.5	2.3	2.0
6	3.3	2.5	2.3	1.9
7	3.3	2.5	2.5	1.9
8	3.3	2.6	2.4	1.9
9	3.2	2.7	2.5	2.0
10	3.5	2.6	2.4	2.0
ค่าเฉลี่ย	3.3	2.6	2.4	2.0

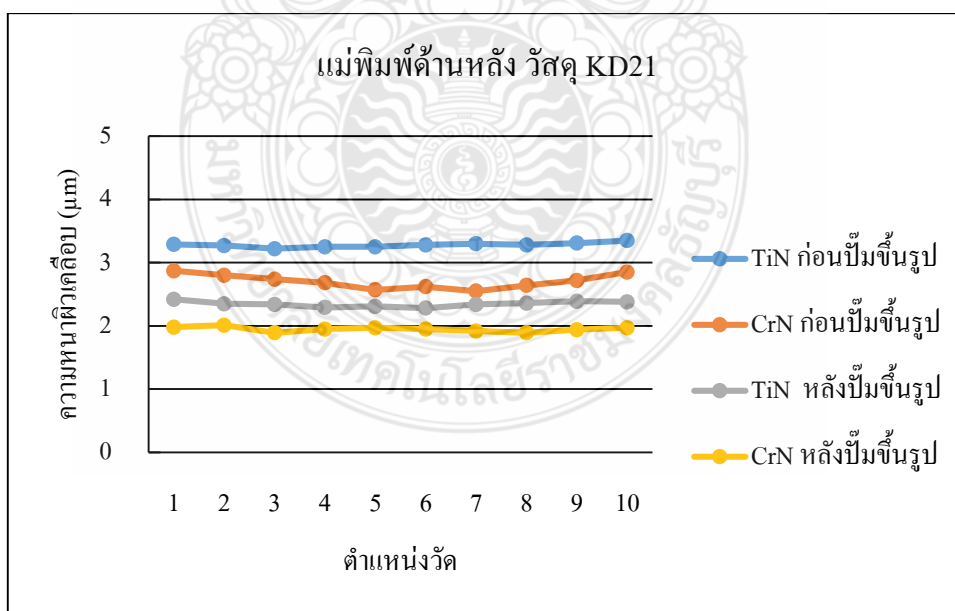


รูปที่ ก.1 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ KD21

ก.1.2 ความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ KD21

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ KD21

ตำแหน่ง วัด	สารเคลือบผิว แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ KD21			
	TiN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	CrN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	TiN หลังปั๊มขึ้นรูป	CrN หลังปั๊มขึ้นรูป
1	3.29	2.87	2.42	1.98
2	3.27	2.80	2.35	2.01
3	3.22	2.74	2.34	1.89
4	3.25	2.68	2.29	1.95
5	3.25	2.57	2.31	1.97
6	3.28	2.62	2.28	1.95
7	3.30	2.55	2.34	1.92
8	3.28	2.64	2.36	1.89
9	3.31	2.72	2.39	1.94
10	3.35	2.85	2.38	1.97
ค่าเฉลี่ย	3.3	2.7	2.3	1.9

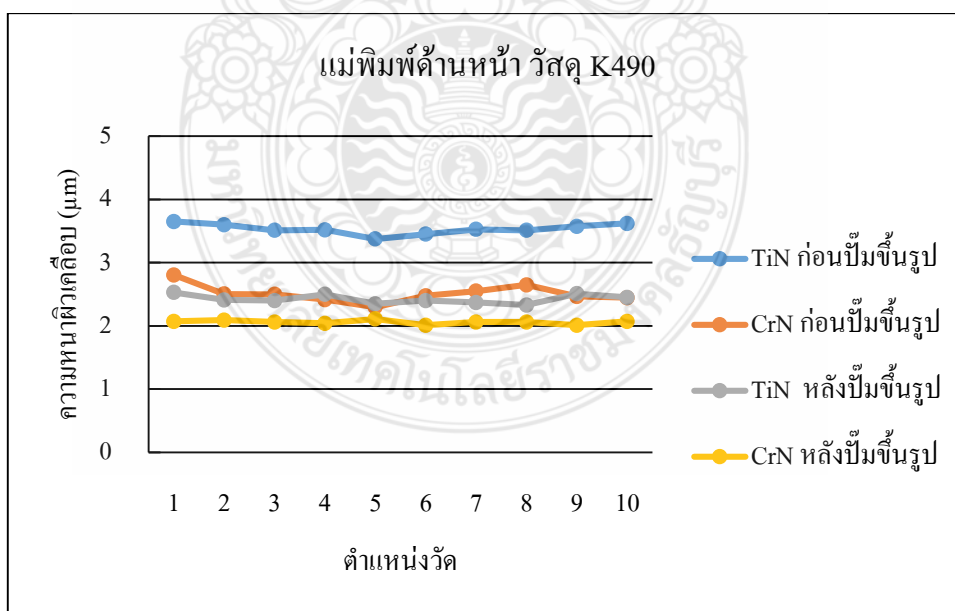


รูปที่ ก.2 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ KD21

ก.1.3 ความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ K490

ตารางที่ ก.3 ผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ K490

ตำแหน่ง วัด	สารเคลือบผิว แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ K490			
	TiN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	CrN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	TiN หลังปั๊มขึ้นรูป	CrN หลังปั๊มขึ้นรูป
1	3.65	2.81	2.53	2.07
2	3.60	2.51	2.41	2.09
3	3.51	2.50	2.40	2.06
4	3.52	2.42	2.50	2.04
5	3.37	2.30	2.35	2.11
6	3.45	2.48	2.40	2.01
7	3.53	2.55	2.37	2.06
8	3.51	2.65	2.33	2.06
9	3.58	2.47	2.51	2.01
10	3.62	2.45	2.45	2.07
ค่าเฉลี่ย	3.53	2.51	2.43	2.06

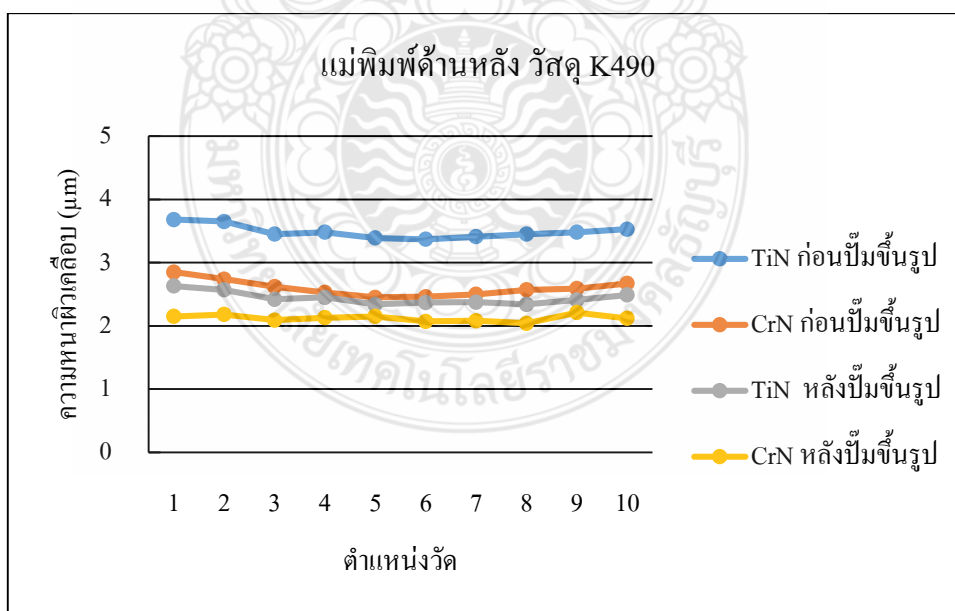


รูปที่ ก.3 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ K490

ก.1.4 ความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ K490

ตารางที่ ก.4 ผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ K490

ตำแหน่ง วัด	สารเคลือบผิว แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ K490			
	TiN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	CrN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	TiN หลังปั๊มขึ้นรูป	CrN หลังปั๊มขึ้นรูป
1	3.68	2.85	2.63	2.15
2	3.65	2.74	2.57	2.18
3	3.45	2.62	2.42	2.09
4	3.48	2.53	2.45	2.13
5	3.39	2.45	2.34	2.15
6	3.37	2.46	2.37	2.07
7	3.41	2.50	2.38	2.08
8	3.45	2.57	2.34	2.04
9	3.48	2.59	2.41	2.21
10	3.53	2.67	2.49	2.12
ค่าเฉลี่ย	3.49	2.60	2.44	2.12

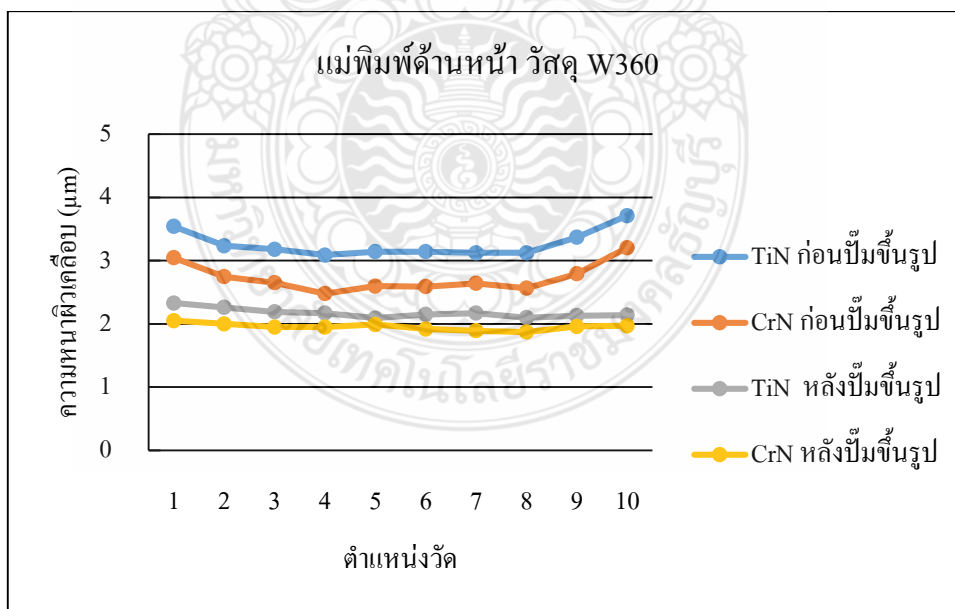


รูปที่ ก.4 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ K490

ก.1.5 ความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ W360

ตารางที่ ก.5 ผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ W360

ตำแหน่ง วัด	สารเคลือบผิว แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ W360			
	TiN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	CrN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	TiN หลังปั๊มขึ้นรูป	CrN หลังปั๊มขึ้นรูป
1	3.54	3.05	2.33	2.05
2	3.24	2.75	2.26	2.00
3	3.18	2.65	2.19	1.95
4	3.09	2.48	2.17	1.95
5	3.14	2.60	2.09	1.99
6	3.14	2.59	2.15	1.92
7	3.13	2.64	2.17	1.89
8	3.13	2.56	2.10	1.87
9	3.37	2.79	2.13	1.96
10	3.71	3.21	2.14	1.97
ค่าเฉลี่ย	3.27	2.73	2.17	1.96

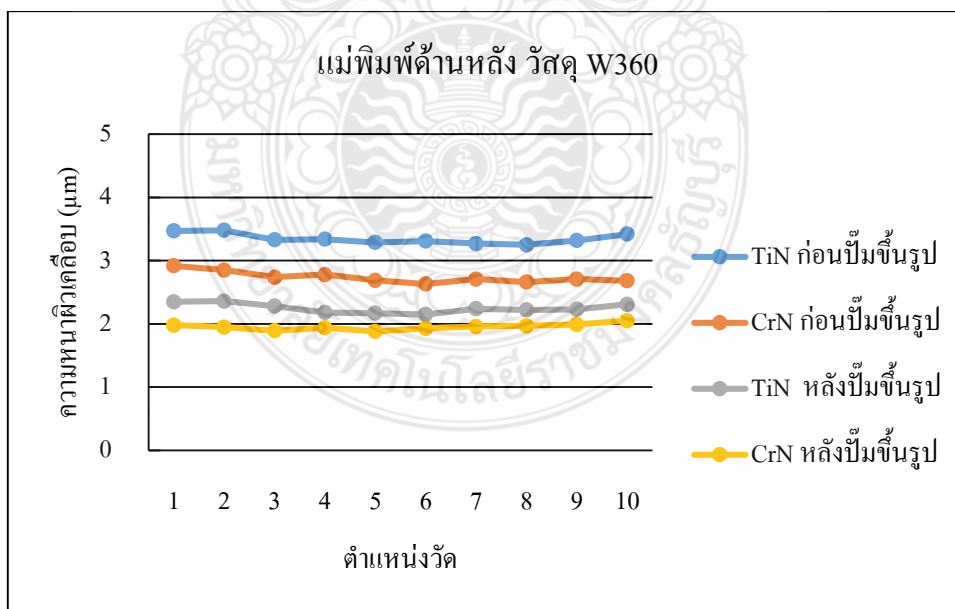


รูปที่ ก.5 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหน้า วัสดุ W360

ก.1.6 ความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ W360

ตารางที่ ก.6 ผลการวัดค่าความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ W360

ตำแหน่ง วัด	สารเคลือบผิว แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ W360			
	TiN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	CrN ก่อนปั๊มขึ้นรูป	TiN หลังปั๊มขึ้นรูป	CrN หลังปั๊มขึ้นรูป
1	3.47	2.92	2.35	1.98
2	3.48	2.85	2.36	1.95
3	3.33	2.74	2.28	1.89
4	3.34	2.78	2.18	1.94
5	3.29	2.69	2.17	1.88
6	3.31	2.63	2.15	1.93
7	3.27	2.71	2.24	1.96
8	3.25	2.66	2.22	1.97
9	3.32	2.71	2.23	1.99
10	3.42	2.68	2.31	2.05
ค่าเฉลี่ย	3.35	2.74	2.25	1.95



รูปที่ ก.6 การเปรียบเทียบความหนาผิวเคลือบ แม่พิมพ์ด้านหลัง วัสดุ W360

ก.2 ผลการทดสอบขีดผิว (Scratch testing)

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบขีดผิวเคลือบของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN

วัสดุแม่พิมพ์	สารเคลือบ	ครั้งที่	L_{c1}	L_{c2}	L_{c3}
KD21	TiN	1	11.68	34.96	55.62
		2	10.11	33.70	56.07
		3	8.83	34.17	55.55
		เฉลี่ย	10.21	34.28	55.75
	CrN	1	11.49	42.02	47.10
		2	9.22	42.82	47.53
		3	9.94	44.08	49.26
		เฉลี่ย	10.22	42.97	47.96
K490	TiN	1	13.53	29.97	62.84
		2	10.42	28.14	61.83
		3	10.52	40.86	63.31
		เฉลี่ย	11.49	32.99	62.66
	CrN	1	13.31	33.88	66.50
		2	17.95	58.67	92.07
		3	13.74	53.72	61.72
		เฉลี่ย	15.00	48.76	73.43
W360	TiN	1	14.28	33.21	54.30
		2	12.88	33.72	51.93
		3	12.04	35.66	61.53
		เฉลี่ย	13.07	34.20	55.92
	CrN	1	18.33	53.79	73.11
		2	17.50	62.93	71.47
		3	16.18	45.73	70.27
		เฉลี่ย	17.34	54.15	71.62

ก.3 ผลการทดลองบ่มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองบ่มขึ้นรูปเหรียญ 2 บาท ของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN

วัสดุแม่พิมพ์	สารเคลือบ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย
KD21	TiN	547,147	642,587	583,628	647,581	672,478	618,684
	CrN	627,256	541,284	661,356	674,421	651,235	631,110
K490	TiN	876,490	746,540	804,210	752,104	820,713	800,011
	CrN	994,221	875,441	899,257	798,255	945,211	902,477
W360	TiN	900,489	946,592	942,210	978,158	995,418	952,573
	CrN	1,241,147	1,157,436	1,348,754	1,362,974	1,404,644	1,302,991

ก.4 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN

ตารางที่ ก.8 สาเหตุความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN และ CrN

No1	ชนิดเหล็ก	แม่พิมพ์	อายุการใช้งาน (เหรียญ)	สาเหตุหยุดบ่มเหรียญ	หมายเหตุ
1	KD21 TiN	ด้านหน้า	547,147	รอยแตกที่ เลข 5,ฐานเจดีย์, เลข 2 ไทย	
		ด้านหลัง	547,147		
2	KD21 TiN	ด้านหน้า	642,587	รอยแตกที่ปลายเลข 5 ไทย	
		ด้านหลัง	642,587		
3	KD21 TiN	ด้านหน้า	583,628	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์	
		ด้านหลัง	583,628		

ตารางที่ ก.8 สาเหตุความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ
TiN และ CrN (ต่อ)

No1	ชนิดเหล็ก	แม่พิมพ์	อายุการใช้งาน (เหรียญ)	สาเหตุหยุดปั๊มเหรียญ	หมายเหตุ
		ด้านหน้า	647,581		
4	KD21 TiN	ด้านหลัง	647,581	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์ ทั้ง สองข้าง, และที่ พ.ศ.	
		ด้านหน้า	672,478		
5	KD21 TiN	ด้านหลัง	672,478	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์ ทั้ง สองข้าง,	
		ด้านหน้า	627,256		
6	KD21 CrN	ด้านหลัง	627,256	รอยแตกที่ เลข 5,ฐาน เจดีย์	
		ด้านหน้า	541,284		
7	KD21 CrN	ด้านหลัง	541,284	แตกที่ เลข 2,ฐานเจดีย์	
		ด้านหน้า	661,356		
8	KD21 CrN	ด้านหลัง	661,356	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์	
		ด้านหน้า	674,421		
9	KD21 CrN	ด้านหลัง	674,421	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์	
		ด้านหน้า	651,235		
10	KD21 CrN	ด้านหลัง	651,235	รอยแตกที่ เลข 5,ฐาน เจดีย์	
		ด้านหน้า	876,490		
11	K490 TiN	ด้านหลัง	876,490	รอยแตก ฐานเจดีย์, เลข สองไทย	
		ด้านหน้า	746,540		
12	K490 TiN	ด้านหลัง	746,540	รอยแตก เลข 5 ไทย	
		ด้านหน้า	804,210		
13	K490 TiN	ด้านหลัง	804,210	รอยแตกที่ตัว ย	

ตารางที่ ก.8 สาเหตุความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ
TiN และ CrN (ต่อ)

No1	ชนิดเหล็ก	แม่พิมพ์	อายุการใช้งาน (เหรียญ)	สาเหตุหยุดปั๊มเหรียญ	หมายเหตุ
14	K490 TiN	ด้านหน้า	752,104	รอยแตกที่เลข 9 ไทย	
		ด้านหลัง	752,104		
15	K490 TiN	ด้านหน้า	820,713	รอยแตกที่ยอดเจดีย์	
		ด้านหลัง	820,713		
16	K490 CrN	ด้านหน้า	994,221	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์ ทั้ง สองข้าง, และที่ได้ พ.ศ.	
		ด้านหลัง	994,221		
17	K490 CrN	ด้านหน้า	875,441	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์ ทั้ง สองข้าง, และที่ยอดเจดีย์	
		ด้านหลัง	875,441		
18	K490 CrN	ด้านหน้า	899,257	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์ ทั้ง สองข้าง, และที่ยอดเจดีย์ ปลายเลข 5 ไทย	
		ด้านหลัง	899,257		
19	K490 CrN	ด้านหน้า	798,255	รอยแตกที่ ฐานเจดีย์ ทั้ง สองข้าง, และที่ยอดเจดีย์ ปลายเลข 5 ไทย	
		ด้านหลัง	798,255		
20	K490 CrN	ด้านหน้า	945,211	รอยแตก ฐานเจดีย์, ยอด เจดีย์	
		ด้านหลัง	945,211		
21	W360 TiN	ด้านหน้า	900,489	ลอกที่จุดไขปลา รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหลัง	900,489		

ตารางที่ ก.8 สาเหตุความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ
TiN และ CrN (ต่อ)

No1	ชนิดเหล็ก	แม่พิมพ์	อายุการใช้งาน (เหรียญ)	สาเหตุหยุดปั๊มเหรียญ	หมายเหตุ
		ด้านหน้า	946,592		
22	W360 TiN	ด้านหลัง	946,592	ลอกที่จุดไขปลา รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	942,210		
23	W360 TiN	ด้านหลัง	942,210	ลอกที่จุดไขปลา รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	978,158		
24	W360 TiN	ด้านหลัง	978,158	ลอกที่จุดไขปลา รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	995,418		
25	W360 TiN	ด้านหลัง	995,418	ลอกที่จุดไขปลา รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	1,241,147		
26	W360 CrN	ด้านหลัง	1,241,147	รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	1,157,436		
27	W360 CrN	ด้านหลัง	1,157,436	รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	1,348,754		
28	W360 CrN	ด้านหลัง	1,348,754	รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	1,362,974		
29	W360 CrN	ด้านหลัง	1,362,974	รอยฝ้า (Flash line)	
		ด้านหน้า	1,404,644		
30	W360 CrN	ด้านหลัง	1,362,974	รอยฝ้า (Flash line)	



รูปที่ ก.7 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 1)



รูปที่ ก.8 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 2)



รูปที่ ก.9 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 3)



รูปที่ ก.10 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 4)



รูปที่ ก.11 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 5)



รูปที่ ก.12 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 1)



รูปที่ ก.13 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 2)



รูปที่ ก.14 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 3)



รูปที่ ก.15 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 4)



รูปที่ ก.16 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ KD21 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 5)



รูปที่ ก.17 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 1)



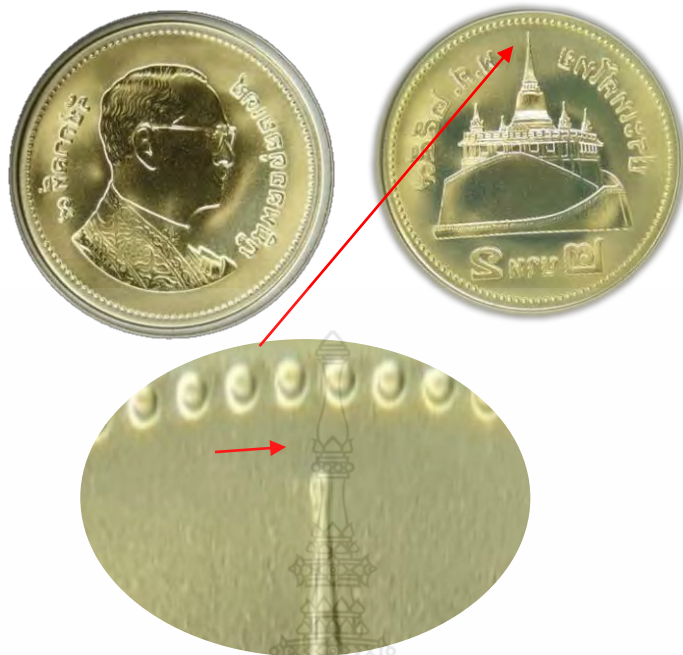
รูปที่ ก.18 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 2)



รูปที่ ก.19 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 3)



รูปที่ ก.20 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 4)



รูปที่ ก.21 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 5)



รูปที่ ก.22 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 1)



รูปที่ ก.23 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 2)



รูปที่ ก.24 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 3)



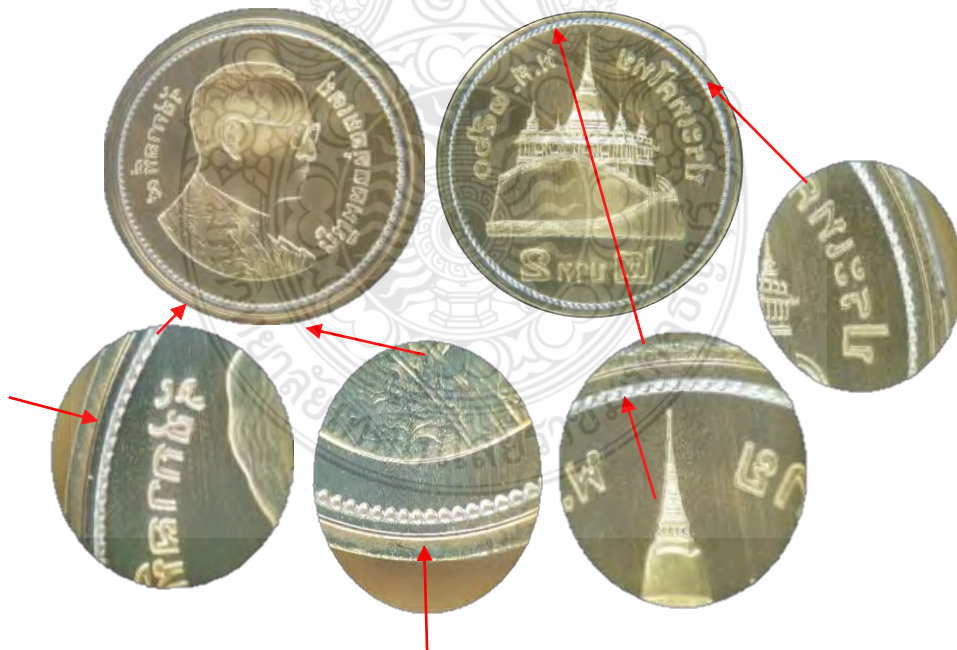
รูปที่ ก.25 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 4)



รูปที่ ก.26 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ K490 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 5)



รูปที่ ก.27 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 1)



รูปที่ ก.28 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 2)



รูปที่ ก.29 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 3)



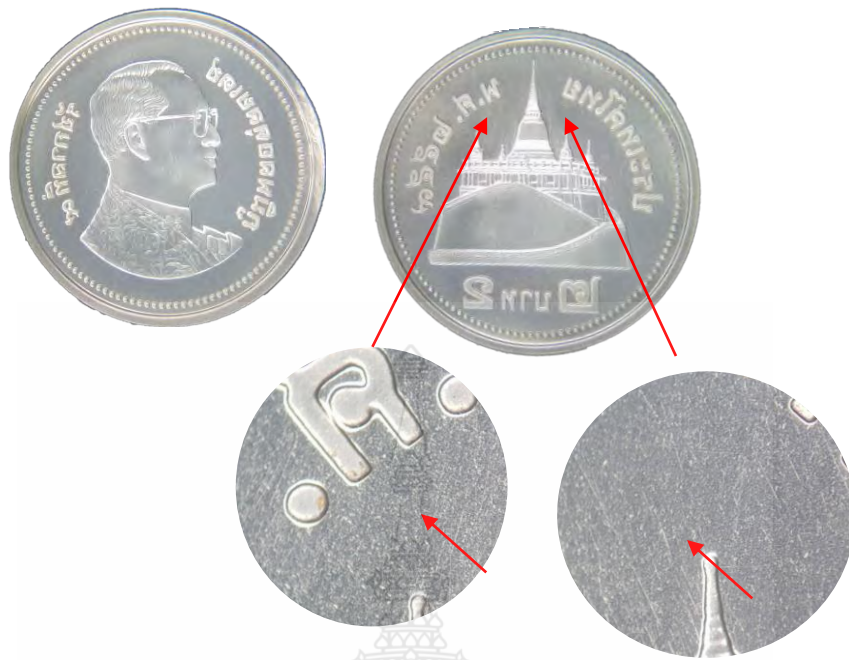
รูปที่ ก.30 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 4)



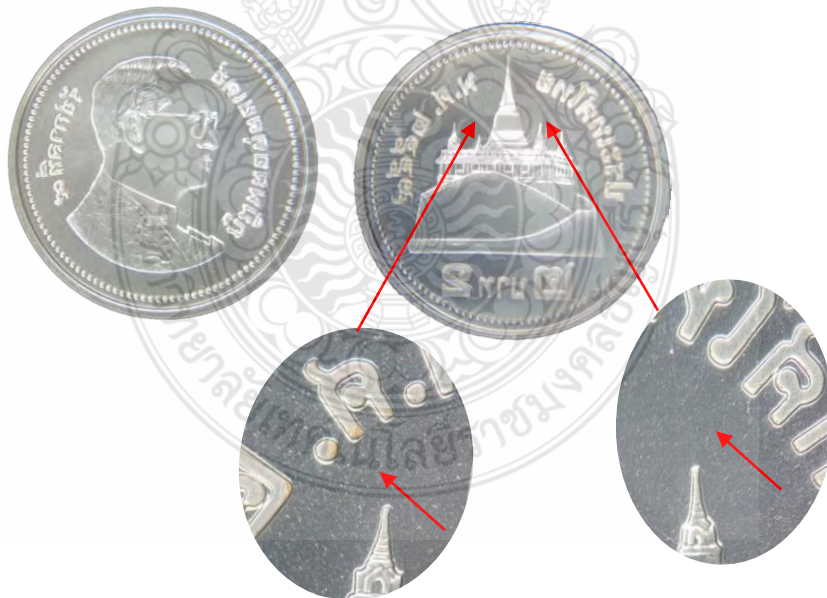
รูปที่ ก.31 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ TiN (ตัวอย่างทดลองที่ 5)



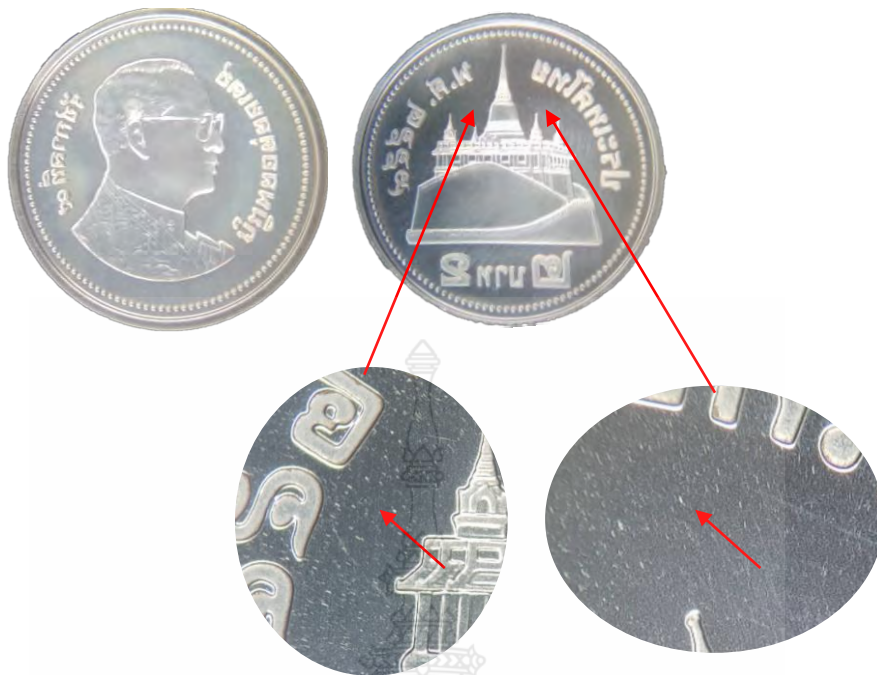
รูปที่ ก.32 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 1)



รูปที่ ก.33 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 2)



รูปที่ ก.34 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 3)



รูปที่ ก.35 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 4)



รูปที่ ก.36 ความเสียหายของวัสดุแม่พิมพ์ W360 ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ CrN (ตัวอย่างทดลองที่ 5)



ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

7th SUSTAINABLE INDUSTRIAL INNOVATION AND MANAGEMENT CONFERENCE 2018

การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม
และการจัดการอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 7
ภายใต้งาน ECO INNOVATION FORUM 2018:

TOWARD THE SMART ECO-CITY AND
SUSTAINABLE URBANIZATION

ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุม ไบเทค บางนา



ECO INNOVATION FORUM 2018

รายชื่อคณะกรรมการพิจารณาบทความ

คณะกรรมการด้านวิชาการประเมินและพิจารณาบทความวิชาการ

1. **ดร.เสกสรร พาป้อง**
นักวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
2. **ดร.ปิติพัฒน์ บุตรโคตร**
คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
3. **ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ มินคร**
สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
4. **ดร.รริศรา อัมภาประเสริฐ**
ภาควิชาจุลชีววิทยา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
5. **ดร.เทอดพงษ์ แดงสี**
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
6. **ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล**
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
7. **ดร.สุวิทย์ แพงกันยา**
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
8. **ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ**
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
9. **ดร.จันทิมา รั้วลายเงิน**
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สารบัญ

ชื่อบทความ	หน้า
Torrefaction of Rice Straw using Microwave Irradiation Prodpran Siritheerasas, Chayanit Chirandon and Tepparid Inkaew	1
การใช้เถ้าแกลบ เศษแก้วสีชา และดินอ่างทองสำหรับผลิตกระเบื้องบุผนังเผาที่อุณหภูมิต่ำ ดวงกมล พิรุณเจริญพร และอุบลรัตน์ หวังรัชชิตีสกุล	9
การลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด กรณีศึกษา โรงงานผลิตอาหารพร้อมรับประทาน ศิริธร แสงใส, ปริญญา บุญกนิษฐ และณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล	17
การพัฒนาเครื่องสกัดน้ำมันแบบประหยัดพลังงานด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์สมัยใหม่ สำหรับผลิตภัณฑ์กลอยทอดจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในเขตอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ ยศภัทรชัย คณิตปัญญาเจริญ และวีระพล คงนุ่น	31
กรณีศึกษาการจัดสรรทรัพยากรโดยการประมาณเวลาในการผลิตบางส่วน โดยใช้ข่ายงาน กิจกรรม สุรพงศ์ บางพาน, พีรพันธ์ บางพาน และจักรกฤษณ์ นิลผาย	39
การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่อแม่พิมพ์บีม์เหรียญกษาปณ์ชนิด ราคา 2 บาท วรพจน์ อ้นกระทอง และศิริชัย ต่อสกุล	45
การเพิ่มประสิทธิภาพหม้อต้มไอน้ำจากการใช้ความร้อนปล่อยทิ้งภายในปล่องควันด้วยเทคโนโลยี การแลกเปลี่ยนความร้อนอีโคโนไมเซอร์ ชาณยุทธ ชิมสกุล, ปริญญา บุญกนิษฐ และสหรัตน์ วงษ์ศรีชนะ	53

การศึกษาชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผล
ต่อแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท
Study Of Tool Steel And Coating On Die Stamping Of The
Two - Baht Coin

วราพจน์ อั้นกระทอง, ศิริชัย ต่อสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่1 ถนนรังสิตนครนายก จังหวัดปทุมธานี

worapot_o@mail.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

สำนักกษาปณ์ กรมธนารักษ์ ได้ผลิตเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนออกใช้ในระบบเศรษฐกิจเริ่มตั้งแต่ พ.ศ.2493 เป็นต้นมา ซึ่งมีหลากหลายแบบ โดยได้ปรับเปลี่ยนรูปลักษณะ ลวดลาย อัตราส่วนผสม และกรรมวิธีการผลิตเรื่อยมาตลอดจนมีขนาดน้ำหนักเหมาะสม สะดวกต่อการพกพา การใช้สอยและยากต่อการปลอมแปลงเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนในปัจจุบันมีทั้งหมด 9 ชนิด ประกอบด้วย ชนิดราคา 10 บาท 5 บาท 2 บาท 1 บาท 50 สตางค์ 25 สตางค์ 10 สตางค์ 5 สตางค์ และ 1 สตางค์ แต่เหรียญกษาปณ์หมุนเวียนที่ถูกนำมาใช้ในระบบเศรษฐกิจมีทั้งหมด 6 ชนิด ราคา ประกอบด้วย ชนิดราคา 10 บาท 5 บาท 2 บาท 1 บาท 50 สตางค์ 25 สตางค์ ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยวัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญชนิดราคา 2 บาท โดยใช้วัสดุในการทดลองจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้า W360 เหล็กกล้า K490 และ เหล็กกล้า KD 21 ทำการทดลองเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยวิธีการPVD (Physical Vapour Deposition)โดยใช้สารเคลือบผิวแม่พิมพ์ 2 ชนิดคือ ไทเทเนียมไนตรายด์ (TiN) และ โครเมียมไนตรายด์(CrN) ที่ความหนาของสารเคลือบ 3 μm จากผลการดำเนินงานวิจัยพบว่า เหล็กกล้า W360 ชนิดสารเคลือบ โครเมียมไนตรายด์ (CrN) ความหนาของสารเคลือบประมาณ3 μm ได้จำนวน เหรียญที่ปั๊มได้มากที่สุด หรือประมาณ 1,300,000 เหรียญ ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ (หน้า – หลัง)

คำสำคัญ (Key word): “Physical Vapour Deposition” ; “โครเมียมไนตรายด์(CrN)” ; “ไทเทเนียมไนตรายด์ (TiN)”

Abstract

The Royal Thai Mint has produced circulating coins for use in the economy since the 1950s, which has varied styles, patterns, ingredients, and process .The weight is appropriate. Easy to carry. There are 9 types of coins used in the current economic cycle, including 10 baht, 5 baht 2 baht 1 baht 50 satang 25 satang 10 satang 5 satang and 1 satang coin. There are 6 types. Price is 10 Baht 5 Baht 2 Baht 1 Baht 50 Satang 25 Satang Researcher has researched materials used to produce coins, Three types of materials were used W360, K490, KD 21, and PVD (Physical Vapor Deposition). Two types of coatings were used: titanium nitride (TiN) and Chromium nitride (CrN) at a coating thickness of 3 μm . Based on the results of the research, it was found that W360 coated steel Chrome Coating (CrN) Coating Thickness Approximately 3 μm has the maximum number of coin or approximately \$1,300,000perDie (Obverse – Reverse).

1. บทนำ (Introduction)

การศึกษาการเปลี่ยนรูปลักษณะทางกลของผิวเคลือบ TiN ด้วยกระบวนการเคลือบผิวแบบ PVD ที่ระดับความหนาประมาณ 0.7, 2.0, 3.7 และ 4.0 ไมครอน พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาผิวเคลือบมีผลต่อลักษณะรอยแตกของ Columnar และรอยเนียนของผิวเคลือบ ผิวเคลือบที่บางทำให้เกิดรอยแตกเนียนตามยาวขอบเกรน Columnar ผิวเคลือบที่หนาขึ้นจะมีรอยแตกจำนวนมากตามยาวขอบเกรน มีลักษณะรอยแตกที่ขาดเป็นส่วน ๆ เป็นไปตามสัดส่วนของความหนาผิวเคลือบ แต่แนวขอบเกรน Columnar มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งให้เห็นได้ว่าโครงสร้างของ Columnar หรือระดับความหนาของผิวเคลือบ TiN มีอิทธิพลที่สำคัญในการเปลี่ยนรูปลักษณะทางกลของผิวเคลือบ L.W. Ma และคณะ (2010) [1] การยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เหรียญชนิดราคา 1 บาท โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบวัสดุระหว่างเหล็ก X กับเหล็ก Y ใช้วิธีการเคลือบผิวแบบ PVD ชนิดสารเคลือบ CrN นำแม่พิมพ์ไปปั๊มเหรียญ (โลหะใส่เหล็กชุบนิเกิล) ปรากฏว่าเหล็ก Y ที่ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2.7 ไมครอน ได้จำนวนเหรียญ 400,000-450,000 เหรียญต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ เป็นจำนวนสูงสุดจากชิ้นงานทดสอบทั้งหมด วรวิทย์ สงวนพันธ์ (2554) [2] การปรับปรุงเพื่อกำหนดปัจจัยในการชุบเคลือบผิว PVD ชนิดสารเคลือบ TiN และ TiCN ความหนาผิวเคลือบประมาณ 2 และ 3 ไมครอน อุณหภูมิชุบเคลือบผิวประมาณ 250 °C และ 500 °C บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ ปรากฏว่าสารเคลือบผิว TiN ความหนา 2.87-2.98 ไมครอน อุณหภูมิชุบ 428 °C ได้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า จำนวนเหรียญสำเร็จรูปประมาณ 1,000,000 เหรียญ ต่อตัวตรา 1 คู่ ชีระยุทธ วงศ์สมานมณี (2555) [3] การชุบเคลือบผิว PVD ชนิดสารเคลือบ TiN และ TiCN ความหนาผิวเคลือบประมาณ 3 ไมครอน บนวัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้างานเย็น ชนิดไม่โครคลีน และการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดผงเพชรที่ขนาดต่างกัน พบว่าสารเคลือบ TiN ใช้ผงขัดเพชรขนาด 3 ไมครอน จำนวนเหรียญสำเร็จรูปที่ได้ 1.4 ล้านเหรียญ ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น 1.4 เท่า จากผลการทดลอง สารเคลือบ TiCN มีความแข็งแรงของผิวเคลือบสูงแต่มีความแข็งแรงต่ำทำให้ต้านการสึกหรอได้ไม่ดี เห็นได้จากหรือผิวเคลือบที่ลดลงต่างกันวัดจากความหนาเทียบกับจำนวนเหรียญสำเร็จรูปที่ผลิตได้เป็น พุฒิชัย เขตเจริญ (2560) [4]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งศึกษาชนิดของเหล็กกล้า เครื่องมือและสารเคลือบผิวที่มีผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ วัสดุอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ใช้ในการผลิตเหรียญชนิดราคา 2 บาท เป็นวัสดุที่มีความแข็งประมาณ 80 - 85HV ทำให้ทำการปั๊มขึ้นรูปได้ยากมากขึ้น ประกอบกับลวดสายบนเหรียญมีความนูน และลวดสายความสูง ต่ำ ที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากแม่พิมพ์เกิดความเสียหาย เช่น เกิดรอยแตก ร้าว เกิดการสึกหรอของผิวเคลือบแม่พิมพ์จากการใช้วัสดุเดิมที่เป็นเหล็กกล้าแม่พิมพ์



ภาพที่ 1 แสดงจุดบกพร่องเนื่องจากแม่พิมพ์

2. วิธีวิจัย (Research Methodology)

2.1 ทำการทดลองโดยใช้วัสดุแม่พิมพ์ 3 ชนิด

2.1.1 เหล็กกล้า BohlerW360 [3]

2.1.2 เหล็กกล้า BohlerK490

2.1.3 เหล็กกล้า KD 21(JIS)

2.2 ทำการทดลองเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยวิธีPVD (Physical Vapour Deposition) โดยใช้สารเคลือบผิวแม่พิมพ์ 2

ชนิดที่ความหนาของสารเคลือบ3 μm

2.2.1 ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN)

2.2.2 โครเมียมไนไตรด์(CrN)

2.3 ทำการอบชุบแม่พิมพ์ W360 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง

1,050 °C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂)ที่แรงดัน 6 บาร์จากนั้นทำการอบคืนไฟ(Tempering) ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 530 °C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550 °C เวลา 2 ชั่วโมง [5]

2.4 ทำการอบชุบแม่พิมพ์ K 490 ที่อุณหภูมิชุบแข็ง

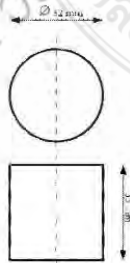
1,050 °C เวลาอบแช่ (Soaking) 30 นาที และชุบแข็งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂)ที่แรงดัน 6 บาร์จากนั้นทำการอบคืนไฟ(Tempering) ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 530 °C เวลา 2

- ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 2 ชั่วโมง ครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 2 ชั่วโมง [5]
- 2.5 วัสดุที่ใช้ในการผลิตเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท คือ อลูมิเนียมบรอนซ์ (Cu92 Al6 Ni2) DIN;CuAlNi2
- 2.6 ใช้เครื่องปั๊มที่อัตราความเร็วเฉลี่ย 750 เทรียญ ต่อหน้าที่ควบคุมแรงในการปั๊มขึ้นรูปประมาณ 350-380 kN [5]
- 2.7 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท
- 2.8 ศึกษาการสึกหรอของสารเคลือบผิวแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์ชนิดราคา 2 บาท
- ชิ้นงานทดลองใช้วัสดุ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ W360 K490 และ KD21 ที่มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแต่ละชนิด

Chemical composition (%)	ชนิดของวัสดุ		
	W360	K490	Kd21
C	0.50	1.40	0.90
Si	0.20	-	1.00
Mn	0.25	-	0.34
Cr	4.50	6.40	7.88
Mo	3.00	1.50	1.90
V	0.55	3.70	0.41
W	-	3.50	-
Co	-	-	-
Nb	-	+	-

เหล็กกล้าเครื่องมือถูกตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ความยาว 33 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขนาดของชิ้นงาน



ภาพที่ 4 ชิ้นงานหลังการกลึง(หุ่นแหลม)

หลังจากทำการกลึงขึ้นรูปให้เป็นหุ่นแหลม(Cone) แล้วจึงนำไปกดเพื่อให้เกิดลวดลายเป็นแม่พิมพ์เหรียญดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การอัดขึ้นลวดลายแม่พิมพ์เหรียญ

นำชิ้นงานที่กดอัดขึ้นลวดลายแล้วนำไปชุบแข็ง อบคืนไฟตามลำดับ ความแข็งหลังอบคืนไฟประมาณ 60 HRC นำเข้าเครื่องล้างทำความสะอาด



ภาพที่ 6 การล้างทำความสะอาด

หลังจากทำการล้างทำความสะอาดแล้วนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการชุบเคลือบผิวแบบ PVD



ภาพที่ 7 เตาชุบเคลือบผิว PVD

ในการดำเนินงานวิจัยนั้นได้ดำเนินการทดลองโดยกระบวนการผลิตจริงภายในสำนักวิชาปณซึ่งในการ

ดำเนินการวิจัยได้ทดลองใช้วัสดุทั้ง 3 ชนิด เข้าสู่กระบวนการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 2 บาท เหมือนกันทั้งหมด หลังจากสิ้นสุดกระบวนการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 2 บาท แล้ว จึงได้นำเข้าสู่กระบวนการทดสอบต่างๆ เพื่อเก็บข้อมูล ซึ่งผู้วิจัยได้แสดงรายละเอียดในส่วนของผลการวิจัยต่อไป

3. ผลการวิจัย (Results)

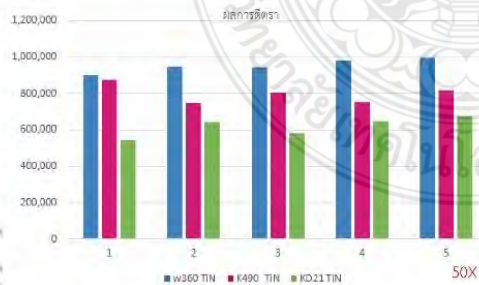
นำแม่พิมพ์ไปทดสอบปั๊มเหรียญ 2 บาท ที่ความเร็วเฉลี่ย 750 – 800 เหรียญต่อนาที แรงกดสูงสุด 150 ตัน ในการปั๊มเหรียญนั้นจะมีการสุ่มตรวจทุกๆ 5 นาที หรือประมาณทุกๆ 4,000 เหรียญ



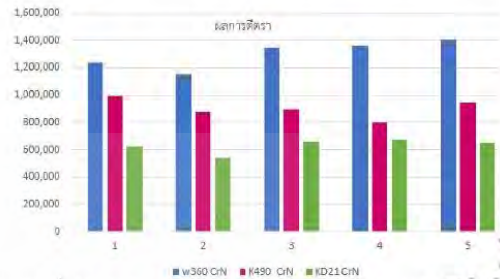
ภาพที่ 8 ภาพเครื่องปั๊มเหรียญ ชนิดราคา 2 บาท



ภาพที่ 9 เหรียญที่ผ่านการสุ่มตรวจ



ภาพที่ 10 กราฟแสดงจำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ ชนิดสารเคลือบ TiN



ภาพที่ 11 กราฟแสดงจำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ ชนิดสารเคลือบ CrN

จากกราฟภาพที่ 8 และ 9 จะเห็นได้ว่าวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ชนิด W360 ชนิดสารเคลือบ CrN ได้จำนวนเหรียญต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ (หน้า - หลัง) ได้สูงถึงประมาณ 1,400,000 – 1,500,000 เหรียญ เมื่อเปรียบเทียบกับ W360 ชนิดสารเคลือบ TiN ได้จำนวนเหรียญต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ (หน้า - หลัง) ประมาณ 1,000,000 เหรียญ เมื่อผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบปั๊มเหรียญแล้ว ผู้วิจัยได้มีการดำเนินการทดสอบทางกายภาพของวัสดุเพื่อวิเคราะห์ถึงข้อดีข้อด้อยของวัสดุแต่ละชนิดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

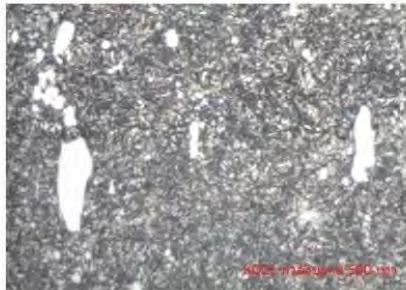
3.1 การวิเคราะห์ด้วยภาพโครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 12 กล้องส่องโครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 13 KD21 สภาพจำหน่าย Nitric 2%(50X)



ภาพที่ 14 KD21 สภาพหลังอบคินไฟ Nitric 2%(50X)
จากภาพจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุKD21จะมี
คาร์ไบด์ตกค้างซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดข้อ
บกพร่องของแม่พิมพ์เหรียญ



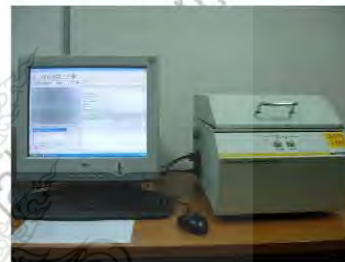
ภาพที่ 17 W360 สภาพหลังอบคินไฟ Nitric 5%(50X)

3.2 วัดความหนาของผิวเคลือบ

ในการวัดความหนาของผิวเคลือบผู้วิจัยได้ใช้เครื่อง X-Ray
แบบ XRF ในการวัดความหนาของผิวเคลือบเพื่อใช้ในการ
ยืนยันความหนาที่ดีที่สุด



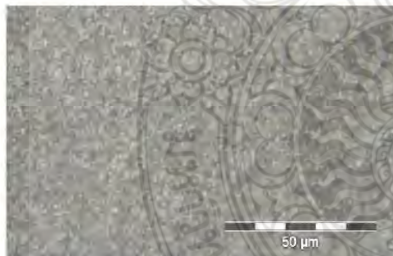
ภาพที่ 15 K490 Nitric 5% (50X)



ภาพที่ 18 เครื่อง X-Ray XRF

ในการวัดความหนาของผิวเคลือบมีความถี่ในการวัดแบบ 3
จุด จุดละ 3 ครั้ง การวัด เวลาในการวัดต่อครั้ง 20 วินาที
ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงผลการวัดความหนผิวเคลือบ



ภาพที่ 16 K490 สภาพหลังอบคินไฟ Nitric 5% (50X)
จากภาพที่11และ12 เป็นภาพโครงสร้างจุลภาคของวัสดุชนิด
K490 ในสภาพจำหน่าย และหลังอบคินไฟ จะเห็นได้ว่าเป็น
โครงสร้างในรูปแบบของมาร์เทนไซต์ แบบเอกพันธ์

จุดที่ / ครั้ง ที่	W360 CrN (um)	W360 TiN (um)	K490 CrN (um)	K490 TiN (um)	Kd21 CrN (um)	Kd21 TiN (um)
1/1	3.01	3.05	2.98	3.01	3.11	3.03
1/2	2.98	3.13	3.01	2.99	3.09	3.02
1/3	3.02	3.01	3.01	3.02	3.11	3.05
2/1	2.96	3.02	3.07	3.08	3.07	3.12
2/2	3.03	2.99	3.06	3.07	3.03	3.10
2/3	3.03	3.03	3.10	3.05	3.05	3.12
3/1	3.15	2.97	3.12	2.98	2.99	3.01
3/2	3.20	3.15	3.08	2.97	3.02	3.04
3/3	3.13	3.09	3.03	2.96	3.01	3.02
เฉลี่ย	3.05	3.04	3.05	3.01	3.05	3.05



ภาพที่ 16 W360 สภาพจำหน่าย Nitric 5%(50X)

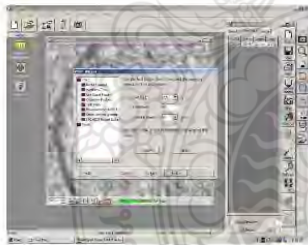
จากตารางแสดงผลการวัดความหนาผิวเคลือบแสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวมีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกับการเคลือบผิวเพื่อทำการทดสอบมีความน่าเชื่อถือว่าที่ความหนาระดับ 3 μm เหมาะกับการใช้งานมากที่สุด

3.3 ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องไมโครฮาร์ดเนส (Micro Hardness)

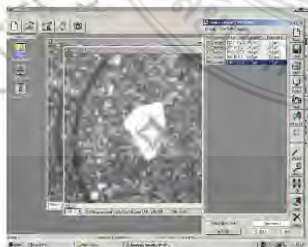
ในการวัดความแข็งแบบไมโครฮาร์ดเนสนั้นเนื่องมาจากการวิเคราะห์ด้วยภาพโครงสร้างจุลภาคเหล็กKD21 โครงสร้างมีจุดขาวๆ เป็น Cr Carbide ที่ไม่หลอมละลาย จึงต้องการทดสอบความแข็งบริเวณเนื้อ Cr Carbide เปรียบเทียบกับโครงสร้างที่เป็นHomogeneous



ภาพที่ 19 เครื่องวัดความแข็งMicro Hardness



ภาพที่ 20 แสดงค่าแรงกด200gf เวลา10 วินาที/จุด



ภาพที่ 21 แสดงการวัดความแข็ง

ตารางที่ 3 แสดงผลการวัดความแข็ง

ครั้งที่	W360(Hv)	K490(Hv)	KD21(Hv) homo	KD21(Hv) carbide
1	735			
2	775			
3	780			
1		782		
2		779		
3		783		
1			850	1166
2			845	1095
3			861	1125

4. อภิปรายผล (Discussion)

การขจัดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กW360 และ K490 กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นโครงสร้างละเอียด (Homogeneous) สม่ำเสมอตลอด มีความแข็งมีความแข็งเฉลี่ย (Hardness)สม่ำเสมอตลอดที่772 HV (0.2) ทำให้ PVD ยึดเกาะได้ดี Substrate ยึดตัวเท่ากันหรือสม่ำเสมอจำนวนเหรียญที่ผลิตได้ ประมาณ 1,000,000 – 1,400,000 เหรียญ ต่อ แม่พิมพ์ 1 คู่ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กKD21ที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นเนื้อคาร์ไบด์เป็นกลุ่มซึ่งมีความแข็งเฉลี่ย 1128 HV (0.2) และพื้นโลหะที่ติดกันซึ่งเป็นโครงสร้างมาแทนไซต์มีความแข็งเฉลี่ย 852 HV ไมโครฮาร์ดเนส (0.2) เหล็กKD21 จะมีความแตกต่างกันซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุทำให้การยึดเกาะของ PVD ไม่ดีเท่าที่ควร Substrate Material ยึดตัวไม่เท่ากันทำให้อายุแม่พิมพ์ด้านหัวและก้อยต่ำเหลือเพียง 600,000 เหรียญ ต่อ แม่พิมพ์ 1 คู่

5. สรุปผล (Conclusion)

จากการวิเคราะห์ผลพบว่าการผลิตแม่พิมพ์เหรียญ 2 บาท (หัว - ก้อย)ควรใช้เหล็กW360 ควบคุมอุณหภูมิในการอบคืนไฟอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 530 – 580 °C เพื่อให้ได้ความแข็งเฉลี่ยที่ 58-60 HRC ความหนาของผิวเคลือบ CrN เฉลี่ยที่ 2.8 – 3 μm จะทำให้จำนวนเหรียญที่ผลิตได้มีปริมาณเป็นที่น่าพอใจ โดยนำแม่พิมพ์เหรียญ 2บาท ที่มีลวดลายพร้อมใช้งานนำไปทดลองปั๊มด้วยเครื่องปั๊มเหรียญหมุนเวียนขนาดแรงกด 150 ตัน ความเร็วในการตีตรา 800 – 850 เหรียญ/นาที จำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ โดยประมาณ 1,300,000 – 1,400,000 เหรียญ ต่อแม่พิมพ์

1 คู่ ส่วนเหล็กKD21 นั้น พบว่าจำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ อยู่ที่ประมาณ 400,000 – 600,000 เหรียญ โดยใช้วิธีการทดลองแบบเดียวกันกับเหล็กW360 เหมือนกันทุกประการ เหล็กK490 จากการวิจัยพบว่าสามารถทำการชุบเคลือบผิวได้ดี จำนวนเหรียญที่ได้ต่อแม่พิมพ์ 1 คู่ ใกล้เคียงกันกับเหล็กW360 แต่เนื่องจากเหล็กK490 มีราคาค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงได้สรุปผลให้กับผู้บริหารเพื่อใช้กำหนดเป็นมาตรฐานในกระบวนการต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักกษาปณ์ ที่ให้การสนับสนุนการศึกษารวมทั้งวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณFischer Thailand ให้การสนับสนุนการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 เอกสารอ้างอิงภาษาไทย

[1] สำนักบริหารเงินตรา ส่วนงานโครงการและวิเทศสัมพันธ์ กองแผนงาน ความสำคัญของเหรียญกษาปณ์
http://www.treasury.go.th/ewt_news.php?nid=91

[2] สำนักบริหารเงินตรา ส่วนงานโครงการและวิเทศสัมพันธ์ กองแผนงาน จำนวนเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจ
http://www.treasury.go.th/ewt_news.php?nid=7665&filename

[3] รศ.มนัส สติระจินดา วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก กรุงเทพมหานคร:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2537

[4] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ศิริชัย ต่อสกุล อนินท์ มีมนต์ และนรพร กลั่นประชา. 2550. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : เซนเกจเลิร์นนิ่ง. 525 หน้า

[5]=index<http://www.bohleredelstahl.com/en/W360ISOBLOC.php>

[6] ชีระยุทธ วงศ์สภามณี. (2555). การกำหนดปัจจัยการชุบเคลือบผิว PVD บนแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาท เพื่อลดต้นทุนการผลิต. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

[7] วรวิทย์ สงวนพันธ์. (2554). การเพิ่มอายุการใช้งานของดวงตราเหรียญกษาปณ์หมุนเวียนชนิดราคา 1 บาทใหม่. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).

Bohler, (2014). Introducing K490.

7.2 เอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษ

[8]=index<http://www.bohleredelstahl.com/en/W360ISOBLOC.php>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวรพจน์ อ้นกระทอง
วัน เดือน ปีเกิด	18 ตุลาคม 2513
ที่อยู่	74/4 ม.6 ตำบลบางกรวย อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130
การศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการผลิต สถาบันราชภัฏพระนคร
ประสบการณ์การทำงาน	นายช่าง โลหะปี 2539 นายช่าง โลหะระดับ 6 และนายช่าง โลหะชำนาญงาน รับผิดชอบหัวหน้างานเหรียญตัวเปล่า สำนักกษาปณ์ ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	084-448-1629
อีเมล	worapot_o@mail.rmutt.ac.th

