

การออกแบบและพัฒนาระบบชุบเคลือบผิววัสดุผสมด้วยไฟฟ้า โดยการหมุนขั้วคาโทดรอบตัวเองและรอบขั้วแอโนด

ธีระศักดิ์ หมากผิน¹ นภฉัตร ชารีลาภ² กฤษณพงศ์ กীরติกร³
และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ⁴

Abstract

Markpin, T., Tareelap, N., Kirtikara, K. and Sombatsompop, N.
**Design and development of electrodeposited composite coating systems
by cathode self-rotation and rotation around anode**
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2004, 26(2) : 245-257

This article reports a novel design and development of electrodeposited Ni-WC coating system, and the experimental design is discussed in detail. This experimental apparatus featured the possibilities of rotating the cathode in the transverse and horizontal directions or rotating around the anode. The rotating systems also had an advantage of stirring the electrolyte during the coating process. The results showed that as the cathode rotation speed was increased from 15 to 25 rpm the particle incorporation and hardness of the coating increased from 3.72 to 4.13% and from 577 to 631 HV, respectively. When the rotating velocity around the anode was increased from 10 to 20 rpm the particle incorporation and hardness of the coating

Division of Materials Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Tungkrui, Bangmod, Bangkok, 10140

¹วศ.ม.(เทคโนโลยีวัสดุ) นักวิจัย ²วศ.ม.(เทคโนโลยีวัสดุ) อาจารย์ ³Ph.D.(Electrical Engineering) อาจารย์ ⁴Ph.D.(Polymer Processing and Rheology) รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail: narongrit.som@kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ 6 สิงหาคม 2546 รับลงพิมพ์ 17 ธันวาคม 2546

increased from 13.24 to 20.29% and from 1129 to 1408 HV, respectively. A decrease in thickness consistency of the coating was observed when increasing self-rotating velocity of the cathode and rotating velocity around the anode. Increasing current density resulted in an increase in thickness consistency with no effect on particle incorporation and hardness. In addition, increasing coating time led to increases in particle incorporation and hardness, but did not affect thickness consistency of the coating.

Key words : electrodeposited composite coating, Ni-WC, cathode rotation

บทคัดย่อ

ธีระศักดิ์ หมากผิน นภจักร ธารีลาภ กฤษณพงศ์ กิรติกร และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
การออกแบบและพัฒนาระบบชุบเคลือบผิววัสดุผสมด้วยไฟฟ้า
โดยการหมุนขั้วคาโทดรอบตัวเองและรอบขั้วอโนด
ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(2) : 245-257

งานวิจัยฉบับนี้รายงานถึงการออกแบบและพัฒนาระบบการชุบเคลือบผิววัสดุผสมนิเกิล-ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยไฟฟ้าแบบใหม่ ซึ่งระบบดังกล่าวนี้มีความสามารถในการหมุนคาโทดหรือขั้วงานได้หลายมิติ กล่าวคือ หมุนขั้วงานรอบตัวเองทั้งในแนวอนและแนวตั้งและหมุนขั้วงานรอบขั้วอโนด โดยระบบการหมุนคาโทดดังกล่าวนี้ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกวนสารละลายอิเล็กโตรไลต์อีกด้วย ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบและความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 3.72 เป็น 4.13%/พื้นที่ และ 577 เป็น 631 HV ตามลำดับเมื่อความเร็วของการหมุนขั้วงานรอบตัวเองเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 25 รอบ/นาที ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบและความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 13.24 เป็น 20.29%/พื้นที่ และ 1129 เป็น 1408 HV ตามลำดับเมื่อความเร็วของการหมุนขั้วงานรอบอโนดเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 20 รอบ/นาที ในขณะที่ความสม่ำเสมอของความหนาผิวเคลือบลดลงเมื่อความเร็วของการหมุนขั้วงานรอบตัวเองและรอบขั้วอโนดเพิ่มขึ้น ผลการทดลองยังระบุว่าเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ความสม่ำเสมอของความหนาผิวเคลือบดีขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณอนุภาคและความแข็งของผิวเคลือบ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของเวลาในการชุบเคลือบไม่มีผลต่อความสม่ำเสมอของความหนาผิวเคลือบที่กระจายตัวบนขั้วงานชุบ แต่ส่งผลให้ปริมาณอนุภาคและความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น

การชุบเคลือบผิววัสดุผสมด้วยไฟฟ้า (electro-composited coating) มีหลักการคล้ายกับการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (electroplating) เพียงแต่ในสารละลายจะมีการเติมวัสดุเสริมแรง (reinforcement) ชนิดต่างๆ เช่น ผงเซรามิกส์ ผงโลหะ หรือผงโพลีเมอร์ ลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภท ผิวเคลือบวัสดุผสมถูกพัฒนาและนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ ที่รู้จักกันดีคือ ผิวชุบเคลือบวัสดุผสมนิเกิล-ซิลิกอนคาร์ไบด์ใน Wankel มอเตอร์ (Buelens et al., 1992) ในปัจจุบันระบบชุบเคลือบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมคือระบบการวางคาโทดตั้งฉากกับอโนดใน

แนวตั้ง (conventional electroco-deposition) และมีการกวนสารละลายอิเล็กโตรไลต์ตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) หรือการใช้ปั๊มสารละลายร่วมกับปั๊มลม (liquid-air process) โดยทั่วไปพบว่าระบบการชุบเคลือบแบบนี้ให้ปริมาณอนุภาคบนผิวเคลือบต่ำ (Mohammad et al., 1980) ซึ่งส่งผลให้ผิวเคลือบวัสดุผสมมีค่าความแข็ง (Raj Narayan and Surjit Singh, 1983) และความสามารถในการต้านทานการสึกหรอต่ำตามไปด้วย (Zahavi and Hazan, 1983) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอนุภาคกระจายตัวบนผิวเคลือบได้ไม่ดีเท่าที่ควร (Ramesh Babu, 1994)

งานวิจัยเกี่ยวกับการชุบเคลือบวัสดุผสมที่ผ่านมามี

ดังนี้ Fransaer และคณะ (1992) ได้แสดงแบบจำลองของการชุบเคลือบร่วมระหว่างอนุภาคทรงกลมกับโลหะบน rotating disc electrode (RDE) การชุบเคลือบร่วมเกิดบนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของอนุภาคมายังผิวเคลือบ การเคลื่อนที่เนื่องจากการพา การเคลื่อนที่ภายใต้แรงกระทำจากภายนอกและการเกิดการฝังตัวที่ผิว โดยทำการทดลองจากการชุบเคลือบร่วม ระหว่างอนุภาคโพลิสไตรีนทรงกลมกับทองแดงจาก acid copper sulfate solution บน RDE (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม.) ผลการทดลองแสดงว่าปริมาณของอนุภาคลดลงเมื่อรัศมีของ RDE และความเร็วรอบเพิ่มขึ้น Celis และ Fransaer (1997) ศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการชุบเคลือบร่วมวัสดุผสมของอนุภาคทรงกลมบน rotating disc electrode พบว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยังอิเล็กโทรดไม่ขึ้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการเคลือบร่วมบน rotating disc electrode จึงไม่ขึ้นกับความหนาแน่นไฟฟ้า แรงที่ทำให้อนุภาคฝังตัวบนคาโทดคือ London-van der Waals force, double layer force, gravity force, buoyancy force และ electrophoretic force แรงที่ทำให้การชุบเคลือบร่วมของอนุภาคเกิดได้น้อยลงคือ shearing force ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคและรัศมีบน rotating disc electrode เพิ่มขึ้น การฝังตัวจะเกิดง่ายขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคขึ้นกับการพาอนุภาคจากสารละลายไปยังผิวคาโทด ดังนั้นการเคลือบร่วมบน rotating disc electrode จึงไม่ขึ้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า Aslanidis และคณะ (1997) ศึกษาอิทธิพลของ pH ในการชุบเคลือบร่วมวัสดุผสมด้วยไฟฟ้าของซิลิกา และซิลิกาที่ถูกปรับปรุงด้วยไททาเนียกับสังกะสีจาก zinc sulfate electrolytes บน rotating disc electrode จากการศึกษพบว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ไอออนของสังกะสีที่ถูกดูดซับบนอนุภาค การเคลือบร่วมของซิลิกา และปริมาณไฮดรอกไซด์ในสารละลายจะเพิ่มขึ้น อนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงด้วยไททาเนียเคลือบร่วมได้ดีที่ pH ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลายเพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีไอออนบวกเคลือบบนผิวอนุภาคมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้อนุภาคเข้าไปเคลือบที่ผิวคาโทดได้มากขึ้นด้วย Pushpavanam และ Varadarajan (1974) ได้ศึกษาอิทธิพลของเวลา และความเข้มข้นของอนุภาคที่มีผลต่อ

การชุบเคลือบร่วมวัสดุผสมนิเกิล-ไททาเนีย จากสารละลาย nickel watts bath จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณของอนุภาค และความเข้มข้นบนผิวเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับของอนุภาคบนผิวคาโทดเพิ่มขึ้นด้วย Ramech Babu และคณะ (1991) ได้ศึกษาอิทธิพลของการกวนสารละลายที่มีผลต่อการชุบเคลือบร่วมวัสดุผสมนิเกิล-ไททาเนียบน rotating disc electrode จากผลการทดลองพบว่า อัตราการชุบเคลือบร่วมของอนุภาคไททาเนียในสารละลาย nickel fluoborate bath เพิ่มขึ้นตามปริมาณการกวนสารละลาย และความเข้มข้นของนิเกิลไอออนในสารละลาย เนื่องจากการกวนสารละลายช่วยให้อนุภาคเคลื่อนที่จากสารละลายมายังผิวคาโทดได้มากขึ้น Rajiv และ Seshadi (1993) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณการกวนสารละลายที่มีผลต่อการชุบเคลือบร่วมวัสดุผสมโคบอลต์-ไททาเนีย จากสารละลาย sulfate bath จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณของอนุภาคบนผิวเคลือบลดลงเมื่อปริมาณการกวนสารละลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายไหลรุนแรงขึ้นจนพัดเอาอนุภาคที่ยังฝังตัวไม่แน่นหลุดออกไปจากผิวเคลือบ ทำให้ปริมาณของอนุภาคบนผิวเคลือบลดลง Ramesh และคณะ (1991) ได้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลายที่มีผลต่อปริมาณของอนุภาคบนผิวเคลือบจากการเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสม nickel-flyash โดยใช้วิธี sediment codeposition ในสารละลาย nickel watts bath ผลการทดลองพบว่า ปริมาณของอนุภาคบนผิวเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลาย และความเข้มข้นของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคบนผิวเคลือบ เนื่องจากอนุภาคมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอบนผิวเคลือบ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาอีกขั้นตอนหนึ่งของระบบการชุบเคลือบผิววัสดุผสมด้วยไฟฟ้าแบบ conventional electrocodeposition ซึ่งเป็นการวางชิ้นงานขนานกับอาโนดในแนวตั้ง ให้สามารถหมุนชิ้นงานได้หลายทิศทาง และทำการชุบเคลือบได้หลายระบบในอุปกรณ์ชุดเดียวกันคือ ระบบ cathode rotating ซึ่งเป็นการชุบเคลือบวัสดุผสมโดยการหมุนชิ้นงานรอบตัวเอง และระบบ anode circumference rotating ซึ่งเป็นการชุบเคลือบวัสดุผสมโดยการ

หมุนชิ้นงานรอบแอโนด เพื่อศึกษาผลของการหมุนชิ้นงาน ต่อปริมาณอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาคบนผิวเคลือบ และความแข็งแรงของผิวเคลือบ ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้แนวความคิดใหม่ของอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของผิวเคลือบวัสดุผสม

การออกแบบการทดลอง

การออกแบบโดยทั่วไป

ระบบการชุบเคลือบผิววัสดุผสมโดยการหมุนคาโทด ที่ได้จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถหมุนคาโทดรอบตัวเอง ได้ทั้งแนวอนและแนวตั้ง ขณะเดียวกันยังสามารถหมุนชิ้นงานรอบแอโนดไปพร้อมกันได้ด้วย นอกจากนี้ยังได้ออกแบบให้สามารถทำการชุบเคลือบได้ 3 ระบบด้วยกัน คือ ระบบการวางชิ้นงานขนานกับแอโนดในแนวตั้ง (conventional electrocodeposition: CECD) ระบบการหมุนชิ้นงานในแนวอนและแนวตั้งพร้อมกัน (cathode rotating: CR) และระบบการหมุนชิ้นงานในแนวอนและ

แนวตั้งพร้อมๆ กับการหมุนชิ้นงานรอบแอโนด (anode circumference rotating: ACR)

ส่วนประกอบและหลักการทำงาน

ระบบชุบเคลือบผิววัสดุผสมโดยการหมุนคาโทดมี ส่วนประกอบหลักคือ ระบบการหมุนชิ้นงาน ระบบไฟฟ้า และระบบการกวนสารละลาย โดยส่วนประกอบทั้งหมดมี ลักษณะเฉพาะที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ รวมทั้งการเลือกวัสดุต้องคำนึงถึงการใช้งานในสารละลายที่มีสภาวะ เป็นกรด การออกแบบและจัดสร้างได้มุ่งเน้นความสามารถ ในการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์เสริม และสามารถปรับเปลี่ยน ให้ทำการชุบเคลือบได้ถึง 3 ระบบคือ CECD CR และ ACR โดยใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันทั้งหมด วิธีการสร้างและ รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ แสดงดัง Figure 1

หมายเลข (1) และ (2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มี 2 ขนาดคือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ความเร็วรอบ สูงสุด 130 รอบ/นาที (130 rpm 24 VDC) ทำหน้าที่ เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนชิ้นงานให้หมุนรอบแอโนด และขนาด แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ความเร็วรอบสูงสุด 21 รอบ/นาที (21 rpm 24 VDC) ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน ชิ้นงานให้หมุนรอบตัวเองได้ทั้งในแนวอนและแนวตั้ง ตาม ลำดับ

หมายเลข (3) และ (4) เฟืองตรง (Spur Gear) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนชิ้นงานให้หมุนรอบตัวเองในแนวตั้ง วัสดุที่ เลือกนำมาใช้งานคือ โพลีอะซีตอล (Polyacetal: POM) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและมีความสามารถในการต้านทานการ กัดกร่อนจากสารเคมีจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ในสภาวะที่สารละลายมีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ ได้

หมายเลข (5) และ (6) เฟืองดอกจอก (Straight Bevel Gear) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนชิ้นงานให้หมุนรอบตัวเองในแนว อน เนื่องจากเฟืองดอกจอกเป็นอุปกรณ์ที่ต้องแช่อยู่ใน สารละลายอิเล็กโตรไลต์ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ต้องมีน้ำหนักเบา ไม่นำไฟฟ้า และต้องทนทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะที่ เป็นกรดอ่อนได้ดี วัสดุที่เลือกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ โพลี อะซีตอล (Polyacetal: POM)

หมายเลข (7) อุปกรณ์จับชิ้นงาน ทำหน้าที่ยึดจับ ชิ้นงานและนำไฟฟ้าไปยังชิ้นงานโดยผ่านมาจากเพลาสัน อุปกรณ์จับชิ้นงานมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ กรอบ

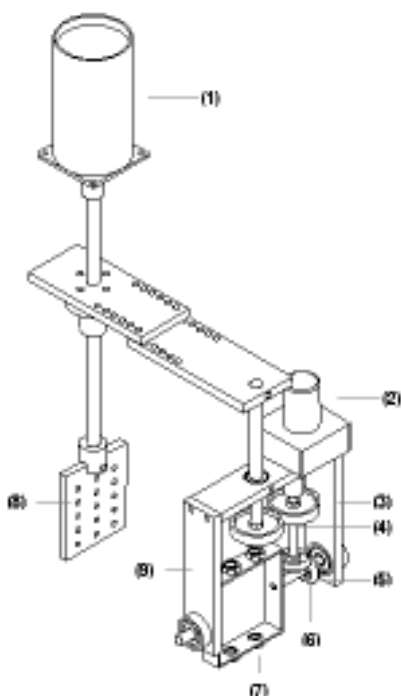


Figure 1. Design of electrodeposited composite coating systems by cathode rotation

และสกรูพลาสติก

หมายเลข (8) อาโนด ทำจากนิกเกิลบริสุทธิ์ 99% ทำหน้าที่เพิ่มอ็อกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

หมายเลข (9) กรอบยึดชิ้นงาน ทำหน้าที่ยึดอุปกรณ์จับชิ้นงานและเป็นฐานวางมอเตอร์ วัสดุที่ใช้คือ อะลูมิเนียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา

วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

ชิ้นงานหรือขั้วคาโทด

ชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 หนา 0.9 มม. หรือที่เรียกกันตามท้องตลาดว่าเหล็กแผ่นขาว นำมาตัดให้ได้ขนาด 6×6 ซม. แล้วตัดให้เป็นรูปตัววี แสดงดัง Figure 2

ขั้วอาโนด

ขั้วอาโนดใช้นิกเกิลแผ่นบริสุทธิ์ขนาด 7.5×9 ซม. หนา 0.8 มม. และเจาะรูให้ทั่วชิ้นงานเพื่อช่วยให้นิกเกิลละลายออกมาได้ดีขึ้น

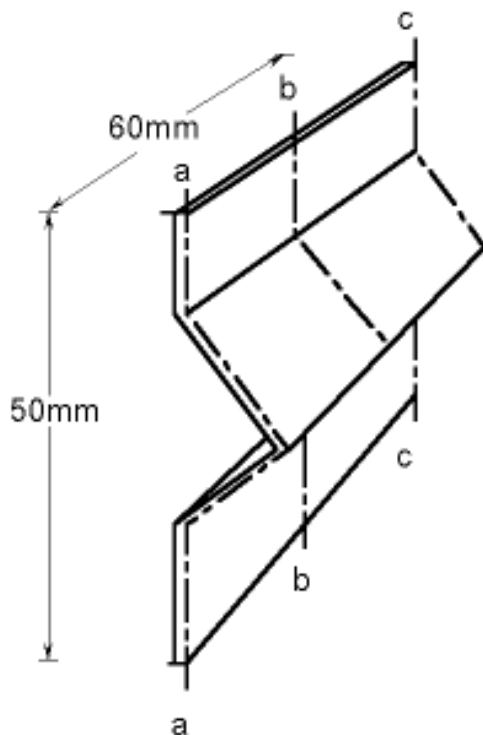


Figure 2. Positions on test specimens

น้ำยาชุบเคลือบหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์

น้ำยาที่ใช้ในการชุบเคลือบเป็นสารละลายผสม nickel watts bath โดยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

นิกเกิลซัลเฟต	240	กรัม/ลิตร
นิกเกิลคลอไรด์	45	กรัม/ลิตร
กรดบอริก	30	กรัม/ลิตร
น้ำยาเงา	3	มล./ลิตร

รักษา pH ของสารละลายเท่ากับ 5.0

อนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์

อนุภาคที่ใช้ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง และความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบให้สูงขึ้น อนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นของบริษัท Aldrich Chemical Company Inc. โดยมีขนาด 2-10 μm และมีความเข้มข้นของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ในถังชุบเท่ากับ 5 กรัม/ลิตร

การศึกษาตัวแปรในการทดลอง

ในเอกสารวิจัยฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ในอุปกรณ์ทดลองที่มีผลต่อคุณสมบัติของผิวเคลือบและชิ้นงานที่ใช้ในการชุบเคลือบ ดังนี้

1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i) ตั้งแต่ 7-17 amp/dm²
2. เวลา (t) ตั้งแต่ 20-60 นาที
3. ความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบตัวเอง (v_c) ตั้งแต่ 15-25 รอบ/นาที
4. ความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบอาโนด (v_a) ตั้งแต่ 10-25 รอบ/นาที

หลังจากที่ประกอบระบบการชุบเคลือบแล้วได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุม (regulator) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุม แล้วนับจำนวนรอบของมอเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้ความเร็วรอบตรงตามความต้องการ และทำการทดลองหมุนชิ้นงานในขณะที่ยังไม่มีสารละลายในถังชุบแล้ว พบว่าความเร็วของการหมุนไม่ต่างกัน นั่นหมายความว่าระบบการหมุนชิ้นงานที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพที่น่าเชื่อถือได้

การทดสอบคุณสมบัติของผิวเคลือบ

การทดสอบความสม่ำเสมอของความหนาผิวเคลือบ คือ การวัดความหนาของผิวเคลือบแต่ละจุดบนผิวชิ้นงานผิวเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอจะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดี วิธีการทดสอบความสม่ำเสมอของความหนาผิวเคลือบสามารถทำได้โดย นำชิ้นงานมาตัดตามขวาง (cross section) ที่ตำแหน่ง a, b และ c ตาม Figure 2 แล้วนำมาทำการอัดเย็น (cold mount) ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220, 320, 400, 600 และ 1000 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6 μm และ 1 μm ตามลำดับ แล้วจึงนำมากัดกรด (etching) ด้วย 1:1 ไฮโดรคลอริกและอะซิติก และทำการวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) ตามมาตรฐาน ASTM B 487-85 (Reapproved 1990) กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้เป็นของบริษัท OLYMPUS รุ่น BHM-112KL โดยทำการวัดความหนาทุกๆ 5 มม. ตั้งแต่ 0-60 มม. แสดงดัง Figure 2 เมื่อวัดความหนาเสร็จแล้วจึงนำมาหาความสม่ำเสมอของความหนาผิวเคลือบซึ่งเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความหนาเฉลี่ยต่อความหนาท่ำสุด (AMR) ซึ่งมีค่าในอุดมคติเท่ากับ 1 ($AMR = \frac{Average}{Minimum}$)

การทดสอบปริมาณอนุภาคทั้งสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบ

การทดสอบปริมาณอนุภาคทั้งสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบ มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการทดสอบความสม่ำเสมอของความหนาผิวเคลือบโดยนำชิ้นงานที่วัดความหนาแล้วมาทำการวัดปริมาณอนุภาคทั้งสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ภาพ (image analyzer) ตามมาตรฐาน ASTM E 1245-95 ค่าที่วัดได้คือปริมาณอนุภาคทั้งสเตนคาร์ไบด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เครื่องวิเคราะห์ภาพที่ใช้เป็นของบริษัท Leica รุ่น Q 600HR

การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ

การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี microhardness testing ตามมาตรฐาน ASTM B 578-87 (Reapproved 1993) โดยนำชิ้นงานที่วัดความหนาเสร็จแล้วมาวัดความแข็งเฉลี่ย 3 จุด ด้วยการใช้แบบสุ่ม ใช้น้ำหนักกด 5 gf เป็นเวลา 5 วินาที การที่ใช้ น้ำหนัก

และเวลาน้อยเนื่องจากชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความหนาดังแต่ 3-20 μm และชิ้นงานทุกชิ้นสามารถวัดความแข็งได้ที่น้ำหนัก 5 gf ค่าที่ได้จะเป็นความแข็งในหน่วยของ Vickers hardness (HV) เครื่องวัดความแข็งที่ใช้เป็นของบริษัท SHIMADZU รุ่น HMV-2000

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ

Figure 3 แสดงความหนาของผิวเคลือบที่ตำแหน่ง a, b และ c ของชิ้นงานที่ได้จากระบบ CR โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 17 amp/dm² เวลาในการชุบเคลือบเท่ากับ 40 นาที และความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบตัวเองเท่ากับ 15 rpm จากรูปจะเห็นว่าตำแหน่ง a และ c ซึ่งเป็นบริเวณขอบชิ้นงานมีความหนาของผิวเคลือบใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าตำแหน่ง b ซึ่งเป็นตำแหน่งตรงกลางชิ้นงาน หากพิจารณาตามภาคตัดขวางของชิ้นงาน (พิจารณาช่วง i, ii และ iii ดัง Figure 3) การกระจายตัวของความหนาของผิวเคลือบของตำแหน่ง a, b และ c เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ความหนาของผิวเคลือบมีค่าสูงบริเวณขอบของชิ้นงานและตำแหน่งตรงกลางชิ้นงานที่เป็นมุมแหลม ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของเส้นแรงของสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงบริเวณขอบและมุมแหลมของชิ้นงาน (Raub and Muller, 1967)

อิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

Table 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความสม่ำเสมอของผิวเคลือบของระบบ CECD และ CR พิจารณาที่ระบบ CECD พบว่าผิวเคลือบมีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยค่า AMR ลดลงจาก 2.2 เป็น 1.4 เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 13 amp/dm² เป็น 17 amp/dm² ตามลำดับ ขณะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7 amp/dm² ไม่สามารถทำการชุบเคลือบได้เนื่องจากในระบบมีความต้านทานสูง เมื่อพิจารณาที่ระบบ CR พบว่าค่า AMR ลดลงจาก 3.2 เป็น 2.3 เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 7 amp/dm² เป็น 17 amp/dm² ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7 amp/dm² สามารถทำการชุบเคลือบได้เนื่องจากระบบ CR เป็นระบบที่มีการหมุนชิ้นงานซึ่งช่วยในการกระจายละลายทำให้ความ

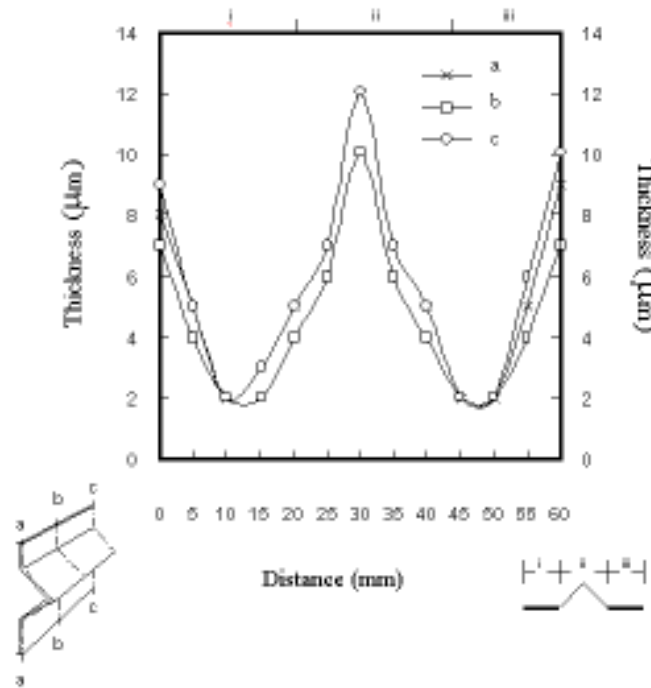


Figure 3. Coating thickness on other specimen sides of the CR coating system

ด้านทานในระบบลดลง เมื่อเปรียบเทียบระบบ CECD และ CR พบว่าความสม่ำเสมอของผิวเคลือบในระบบ CECD ดีกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระบบ CR เป็นระบบที่มีการกวนสารละลายโดยการหมุนชิ้นงานซึ่งทำให้ความต้านทานในระบบลดลง (Lainer, 1970) ผิวเคลือบจึงมีความหนาเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความหนาต่ำสุดยังคงเท่าเดิม ดังนั้น

เมื่อนำมาคำนวณหาค่า AMR จึงพบว่าระบบ CECD มีค่า AMR ต่ำกว่าระบบ CR นั้นหมายความว่าระบบ CECD มีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบดีกว่าระบบ CR

อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบ

Table 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบกับความสม่ำเสมอของผิวเคลือบระบบ CR

Table 1. Effect of current density on the thickness consistency

System	<i>i</i>	<i>t</i>	<i>v_c</i>	<i>v_a</i>	<i>V</i>	AMR
CECD	7	40	-	-	-	-
	13	40	-	-	14.50	2.2
	15	40	-	-	15.50	1.7
	17	40	-	-	16.40	1.4
CR	7	40	18	-	13.30	3.2
	15	40	18	-	14.00	2.7
	17	40	18	-	15.05	2.3

i = Current Density (amp/dm²)

t = Time (sec)

v_c = Cathode Velocity (rpm)

V = Voltage (volt)

v_a = Cathode Velocity around the Anode (rpm)

AMR = Average Minimum Ratio

Table 2. Effect of coating time on the thickness consistency

System	i	t	v_c	v_a	V	AMR
CR	15	20	18	-	15.00	2.7
	15	40	18	-	14.00	2.7
	15	60	18	-	13.60	2.7

Table 3. Effect of cathode velocity on the thickness consistency

System	i	t	v_c	v_a	V	AMR
CR	17	40	15	-	15.25	2.1
	17	40	18	-	15.05	2.3
	17	40	25	-	14.50	2.5

Table 4. Effect of cathode velocity around the anode on the thickness consistency

System	i	t	v_c	v_a	V	AMR
ACR	17	40	15	10	15	2.8
	17	40	15	15	14	3.0
	17	40	15	20	13.5	3.2
	17	40	15	25	13	3.6

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 20 นาที เป็น 40 นาที ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบยังคงมีค่าเท่ากับ 2.7 ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบไม่ขึ้นกับเวลา ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความหนาของผิวเคลือบในแต่ละจุดก็จะเพิ่มขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ (Kenneth, 1971) ดังนั้นเมื่อหาอัตราส่วนระหว่างความหนาเฉลี่ย ต่อความหนาต่ำสุดของผิวเคลือบออกมาแล้วอัตราส่วนนี้จึงยังคงเท่าเดิม

อิทธิพลของความเร็วในการหมุนรอบตัวเองและความเร็วในการหมุนรอบแอโนด

Tables 3 และ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนรอบตัวเอง และความเร็วในการหมุนรอบแอโนด กับความสม่ำเสมอของผิวเคลือบระบบ CR และ ACR ตามลำดับ พิจารณาที่ระบบ CR พบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนรอบตัวเองเพิ่มขึ้นจาก 15 รอบ/นาที เป็น 25 รอบ/นาที ค่า AMR เพิ่มขึ้นจาก 2.1 เป็น 2.5 และเมื่อ

พิจารณาที่ระบบ ACR พบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนรอบแอโนดเพิ่มขึ้นจาก 10 รอบ/นาที เป็น 25 รอบ/นาที ค่า AMR เพิ่มขึ้นจาก 2.8 เป็น 3.6 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสม่ำเสมอลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนรอบตัวเองและรอบแอโนดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะช่วยให้เกิดการกวาดสารละลายมากขึ้น ทำให้ความต้านทานในระบบลดลง (Lainer, 1970) ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบจึงมากขึ้น ในขณะที่ความหนาต่ำสุดยังคงเท่าเดิม ดังนั้นเมื่อคำนวณหาค่า AMR จึงพบว่าค่า AMR เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่า การเพิ่มความเร็วรอบจะทำให้ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระบบ CR และ ACR กับระบบ CECD พบว่าระบบ CECD มีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบมากกว่าระบบ CR และ ACR ทั้งนี้เนื่องจากผลของการหมุนขึ้นงานช่วยเพิ่มการกวาดสารละลายทำให้ con-

centration polarization ที่ผิวคาโทดลดการเคลือบบริเวณขอบ มุม และส่วนที่ยื่นออกมาจากชิ้นงานเพิ่มขึ้น ขณะที่การเข้าเคลือบบริเวณจุดอับยังคงเท่าเดิม ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบจึงลดลง โดยสรุปสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ผิวเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอของแต่ละระบบมีดังนี้

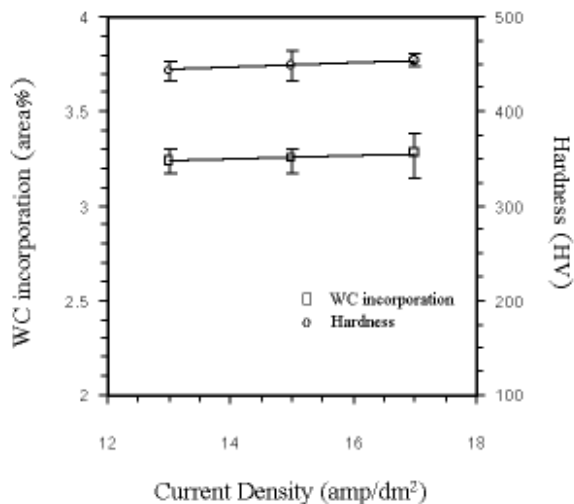
ระบบ CECD	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที
ระบบ CR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 15 rpm
ระบบ ACR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 15 rpm หมุนรอบอาโนด 10 rpm

ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบ

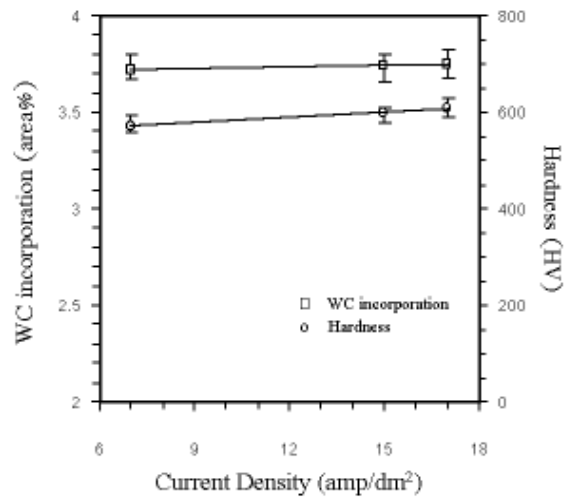
อิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

Figures 4a และ 4b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์-

ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบระบบ CECD และ CR ตามลำดับ พิจารณาที่ระบบ CECD พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 13 amp/dm² เป็น 17 amp/dm² ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบมีค่าไม่แตกต่างกันคือประมาณ 3.2%/พื้นที่ และยังพบว่าความแข็งของผิวเคลือบก็ไม่แตกต่างกันโดยมีค่าประมาณ 450 HV และเมื่อพิจารณาที่ระบบ CR พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 7 amp/dm² เป็น 17 amp/dm² ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบมีค่าไม่แตกต่างกันเช่นเดียวกันคือประมาณ 3.5%/พื้นที่ และความแข็งของผิวเคลือบก็ไม่แตกต่างกันโดยมีค่าประมาณ 700 HV เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบ CECD และ CR พบว่าระบบ CR มีปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบและความแข็งของผิวเคลือบมากกว่าระบบ CECD ทั้งนี้เนื่องจากระบบ CR เป็นระบบที่มีการหมุนชิ้นงานรอบตัวเองซึ่งช่วยกวนสารละลายทำให้เกิดการพาอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์มายังผิวชิ้นงานมากขึ้น จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่มีผลต่อปริมาณอนุภาคบนผิวเคลือบ (Celis and Fransaeer, 1997) เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณอนุภาคบนผิวเคลือบคือ การพาอนุภาคจากสารละลายมายังผิวคาโทดซึ่งขึ้นกับปริมาณและ



4(a)



4(b)

**Figure 4. a Effect of current density on the incorporation and hardness of the CECD coating system
b Effect of current density on the incorporation and hardness of the CR coating system**

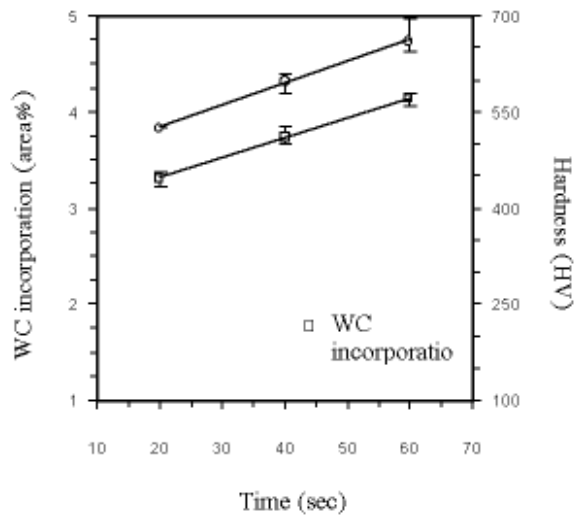


Figure 5. Effect of coating time on the incorporation and hardness of the CR coating system

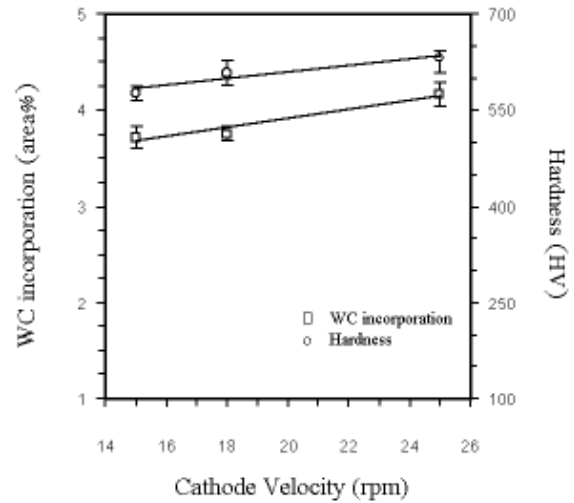


Figure 6. Effect of cathode velocity on the incorporation and hardness of the CR coating system

ประสิทธิภาพของการกวนสารละลาย ความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบ (Rajiv and Seshadri, 1993)

อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชุบเคลือบ

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบในระบบ CR จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาจาก 20 นาที เป็น 60 นาที ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบเพิ่มขึ้น 25% คือเพิ่มขึ้นจาก 3.31 เป็น 4.13%/พื้นที่ และความแข็งเพิ่มขึ้น 26% คือเพิ่มขึ้นจาก 525 เป็น 660 HV ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นความแข็งของผิวเคลือบจึงเพิ่มขึ้นตามเวลาด้วยเช่นกัน

อิทธิพลของความเร็วในการหมุนรอบตัวเองและความเร็วในการหมุนรอบอานอด

Figures 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนรอบตัวเองและความเร็วในการหมุนรอบอานอดต่อปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบระบบ CR และ ACR ตามลำดับ พิจารณาที่ระบบ CR พบว่า เมื่อความเร็วในการหมุนรอบตัวเองเพิ่มขึ้นจาก 15 รอบ/นาที เป็น 25 รอบ/นาที ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 3.72

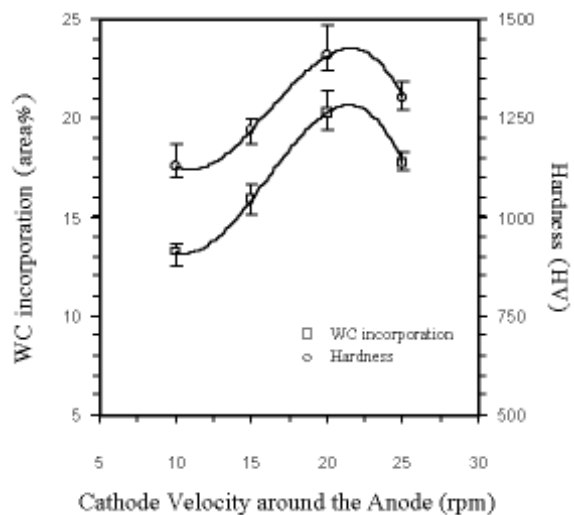


Figure 7. Effect of cathode velocity around the anode on the incorporation and hardness of the ACR coating system

เป็น 4.13%/พื้นที่ ขณะที่ความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 577 เป็น 631 HV และเมื่อพิจารณาที่ระบบ ACR พบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนรอบอานอดเพิ่มขึ้นจาก 10 รอบ/นาที เป็น 20 รอบ/นาที ปริมาณอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 13.24 เป็น 20.29 %/พื้นที่ ขณะที่ความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 1129

เป็น 1408 HV อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วในการหมุนรอบ อาโนดของระบบ ACR เพิ่มขึ้นเป็น 25 รอบ/นาที พบว่า ปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบและความแข็ง ของผิวเคลือบลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วรอบ 25 rpm การหมุนขึ้นงานแรงเกินไปทำให้อนุภาคอนุภาคที่ ยังเกาะไม่แน่นหลุดออกจากผิวเคลือบ เมื่อเปรียบเทียบผล การทดลองของระบบ CR และ ACR ยังพบอีกว่าระบบ CR มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคและความแข็งของผิว เคลือบเท่ากับ 11% และ 9% ตามลำดับ ขณะที่ระบบ ACR มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคและความแข็งของผิวเคลือบ เท่ากับ 53% และ 25% ตามลำดับ จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น ตามความเร็วในการหมุนรอบอาโนด ทั้งนี้เนื่องจากการ หมุนขึ้นงานรอบตัวเองพร้อมๆ กับการหมุนขึ้นงานรอบ อาโนดช่วยกระจายละลายทำให้เกิดการพอกอนุภาคมายัง ผิวขึ้นงานมากขึ้น (Rajiv & Seshadri, 1993)

Figure 8 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งของผิว เคลือบและปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบ จากระบบ CECD, CR และ ACR จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบ ACR มีปริมาณของอนุภาคทั้งสแตน คาร์ไบด์ และความแข็งของผิวเคลือบมากกว่าระบบ CR

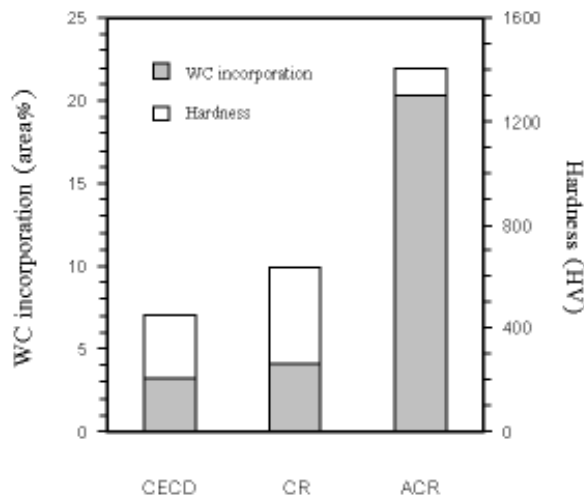


Figure 8. Comparison between the incorporation and hardness of the other coating systems

และ CECD คือ ประมาณ 3, 5 และ 20%/พื้นที่ และ 400, 600 และ 1300 HV ตามลำดับ เนื่องจากการหมุนขึ้นงาน รอบตัวเองพร้อมๆ กับการหมุนขึ้นงานรอบอาโนด ช่วย เพิ่มการกระจายละลายทำให้เกิดการพอกอนุภาคจากสาร ละลายไปยังผิวเคลือบมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยแก้ปัญหา การตกตะกอนของอนุภาคในบริเวณส่วนของชิ้นงานที่เป็น แนวนอนทำให้ผิวเคลือบมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อ ปริมาณอนุภาคบนผิวเคลือบมากขึ้นความแข็งของผิวเคลือบ จึงเพิ่มขึ้น

Figure 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ อนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์กับความแข็งของผิวเคลือบจาก ระบบ CECD, CR และ ACR จากผลการทดลองแสดงให้เห็น ว่าความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาค ทั้งสแตนคาร์ไบด์บนผิวเคลือบดังที่กล่าวมาแล้ว จากรูปยัง บอกเป็นนัยว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็ง ต่อ ปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์ของระบบ CR มีค่าสูงกว่า ระบบ ACR นั้นหมายความว่า ความแข็งของชิ้นงานจาก ระบบ CR มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ อนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์ในระบบมากกว่า ทั้งนี้อาจเป็น เพราะปริมาณและความสม่ำเสมอของอนุภาคในระบบ CR นั้นน้อยกว่าระบบ ACR ดูได้จาก Figure 8 ดังนั้นอาจ

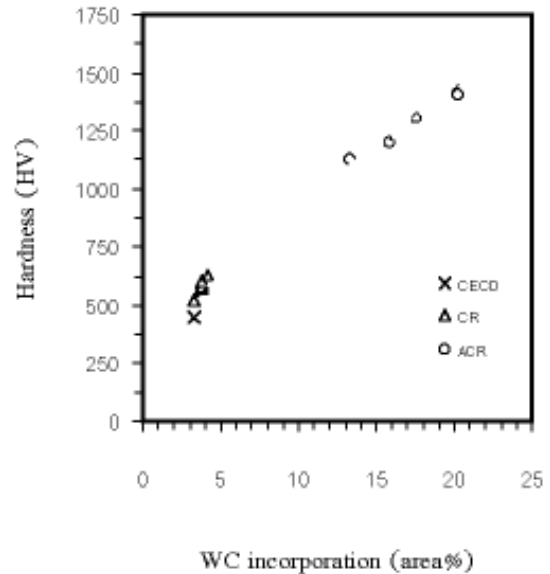


Figure 9. The incorporation and hardness for the coating surface

ส่งผลให้ค่าความแข็งค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ ค่าความแข็งอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากความแข็งของผิวเคลือบนี้เกิดแต่เพียงอย่างเดียว โดยสรุปสภาวะที่เหมาะสมที่มีปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์ และความแข็งของผิวเคลือบที่ดีที่สุดของแต่ละระบบมีดังนี้

ระบบ CECD	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที
ระบบ CR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 25 rpm
ระบบ ACR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 25 rpm หมุนรอบอาโนด 20 rpm

บทสรุป

จากการใช้ระบบชุบเคลือบผิววัสดุผสมโดยการหมุนคาโทดแบบใหม่ที่จัดสร้างขึ้นทำการชุบเคลือบและตรวจสอบคุณสมบัติของผิวเคลือบวัสดุผสมนิเกิล-ทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ระบบชุบเคลือบผิววัสดุผสมโดยการหมุนคาโทดที่จัดสร้างขึ้นสามารถทำการชุบเคลือบผิววัสดุผสมได้ 3 ระบบด้วยกันคือ ระบบการวางชิ้นงานตั้งฉากกับอาโนดในแนวตั้ง (CECD) ระบบการหมุนชิ้นงานรอบตัวเองในแนวนอนและแนวตั้ง (CR) และระบบการหมุนชิ้นงานรอบตัวเองในแนวนอนและแนวตั้งพร้อมๆ กับการหมุนชิ้นงานรอบหัวอาโนด (ACR) โดยระบบ ACR ให้ปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบสูงกว่าระบบ CECD และ CR

2. ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น และความสม่ำเสมอของผิวเคลือบลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบตัวเองและความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบอาโนดเพิ่มขึ้น เวลาไม่มีผลต่อความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้ ที่ทำให้ผิวเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอของแต่ละระบบมีดังนี้

ระบบ CECD	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที
ระบบ CR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 15 rpm
ระบบ ACR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 15 rpm หมุนรอบอาโนด 10 rpm

3. ปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อเวลา และความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบตัวเองเพิ่มขึ้น ปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบอาโนดเพิ่มขึ้นจาก 10 rpm ถึง 20 rpm และลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนชิ้นงานรอบอาโนดเพิ่มขึ้นถึง 25 rpm ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่มีผลต่อปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์และความแข็งของผิวเคลือบ สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้ ที่มีปริมาณอนุภาคทั้งสแตนคาร์ไบด์ และความแข็งของผิวเคลือบที่ดีที่สุดของแต่ละระบบมีดังนี้

ระบบ CECD	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที
ระบบ CR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 25 rpm
ระบบ ACR	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17 amp/dm ² เวลา 40 นาที หมุนรอบตัวเอง 25 rpm หมุนรอบอาโนด 20 rpm

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย (รหัสโครงการ MT-B-06-3A-20-301) และขอขอบพระคุณ ดร.นันทน์ ถาวรังกูร สำหรับคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Buelens, C., Fransaer, J., Celis, J.P. and Roos, J.R. 1992. The Mechanism of Electrolytic Codeposition of Particles with Metals: A Review, *Bulletin of Electrochemistry* 8: 371-375.
- Mohammad, G., Viswanathan, M. and Ramachandran, E.G. 1980. Electrocodeposition of Nickel-Molybdenum Disulfide and Nickel-Tungsten Disulfide, *Metal Finishing*, Apr: 44- 47.
- Raj Narayan and Surjit Singh. 1983. Composite Chromium Coatings Containing Tungsten Carbide, *Metal Finishing*, Mar.: 45-46.
- Zahavi, J. and Hazan, J. 1983. Electrodeposited Nickel Composites Containing Diamond Particles, *Plating and Surface Finishing*, Feb.: 57-61.
- Ramesh Babu, G.N.K. 1994. Electrodeposition and Characterization of Nickel-Molybdenum Disulfide Composites, *Metal Finishing*, July: 37-39.
- Fransaer, J., Celis, J.P. and Roos, J.R. 1992. Analysis of the Electrolytic Codeposition of Non-Brownian Particles with Metals, *Journal of The Electrochemical Society*, 139(2): 413-425.
- Celis, J.P. and Fransaer, J. 1997. Composite coating: New Insights Leading to Improved Process Control, *Trans IMF*, 75(3): 118-121.
- Aslanidis, D., Fransaer, J. and Celis, J.P. 1997. The Electrolytic Codeposition of Silica and Titania Modified Silica with Zinc, *Journal of The Electrochemical Society*, 144(7): 2352-2357.
- Pushpavanam, M. and Varadarajan, G. 1974. Occlusion Plating with Nickel: Codeposition of Titanium Dioxide Particles, *Metal Finishing*, Oct.: 46-52.
- Ramech Babu, G.N.K., Muralidhalan, V.S. and Vasu, K.I. 1991. Mechanism of the Codeposition of Titania Particles with Nickel from Fluoborate Baths, *Plating and Surface Finishing*, May: 126-132.
- Rajiv, E.P. and Seshadri, S.K. 1993. Characteristics of Electro-Codeposition Of Cobalt-Titania Composites, *Plating and Surface Finishing*, Oct.: 66-72.
- Ramesh, C.S., Seshadri, S.K. and Iyer, K.J.L. 1991. Characteristics of Nickel-Flyash Electrocomposite Coatings, *Plating and Surface Finishing*, Oct.: 52-54.
- ASTM B 487-85 (Reapproved 1990) Standard Test Method for Measurement of Metal and Oxide Coating Thickness by Microscopical Examination of a Cross Section.
- ASTM E 1245-95 Standard Practice for Determining the Inclusion or Second - Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis.
- ASTM B 578-87 (Re-approved 1993) Standard Test Method for Microhardness of Electroplated Coating.
- Raub, E. and Muller, K. 1967. *Fundamental of Metal Deposition*, Elsevier Publishing, Amsterdam.
- Lainer, V.I. 1970. *Modern Electroplating*, Israel Program for Scientific Translations Ltd.
- Kenneth, A. 1971. *Electroplating Engineering Handbook*, Litton Educational Publishing.