

การเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนความเร็วสูง ด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

Thermal Spray Coating Enhancing the Wear Resistance Performance of High-Speed Components by Using Thermal Spray Coating Technique

รวินท์ธันต์ ทิพย์เสนา¹ เอการัต ใจบุญ^{1*}, วิษณุ แฟงเมือง¹ ภัทรพงศ์ เกิดลาภ¹ ณัฐชานันท์ อังศุเรณีย์¹

เอกวิศว์ สงเคราะห์¹ สิทธิกร ทรัพย์ประดิษฐ์¹ วีรภัทร พากเพียร¹ และ ชัยยนต์ ใจบุญมา²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบราง วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

Rawintanath Thipsena¹ Eakarath Jaiboon,^{1*} Wisanu Fangmuang¹, Phattharaphong Kiedlaphi¹

Natchanun Angsuseranee¹, Ekawit Songkroh¹, Sittikorn Sappradid¹, Werapat Pakpren¹

and Chaiyun Jaiboonma²

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

²Department of Mechanical and Railway Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra, Phra Nakhon Si Ayutthaya,

Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000

*Corresponding author E-mail: eakarath.j@rmutsb.ac.th

(Received: June 16, 2026; Revise: June 29, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ทำงานภายใต้สภาวะความเร็วสูง โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพ่นเคลือบผิวด้วยความร้อน (Thermal Spray Coating) เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มสมรรถนะของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม วัสดุฐานที่ใช้ในการศึกษา คือ อลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061 ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงเหมาะสม โดยใช้ลวดพ่นชนิด Ni_5Al_5 เป็นชั้นรองประสาน (Bond Coat) และใช้วัสดุเคลือบผิวชนิด $\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ เป็นชั้นเคลือบหลัก (Top Coat) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของพื้นผิวกระบวนการเคลือบผิวประกอบด้วย การพ่นชั้นรองประสานด้วยเทคนิค Wire Arc Spray และการพ่นชั้นเคลือบหลักด้วยเทคนิค High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถสร้างชั้นเคลือบที่มีความหนาแน่นสูงและมีการยึดเกาะกับวัสดุฐานได้ดี หลังจากการพ่นเคลือบ ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคของชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมทั้งตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบ และทดสอบค่าความแข็งของผิวเคลือบเพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ได้ผลการศึกษาพบว่า การเคลือบผิวด้วยระบบ $\text{Ni}_5\text{Al}_5/\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ สามารถเพิ่มความแข็งแรงของพื้นผิวได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ชิ้นงานมีศักยภาพในการต้านทานการสึกหรอและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงเสียดทานหรือทำงานภายใต้สภาวะที่รุนแรง นอกจากนี้ โครงสร้างของชั้นเคลือบมีการยึดเกาะกับวัสดุฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และมีความต่อเนื่องของชั้นเคลือบตลอดพื้นที่การพ่น

คำสำคัญ: การสึกหรอ ชิ้นส่วนความเร็วสูง พ่นเคลือบด้วยความร้อน

Abstract

This research project aimed to investigate the enhancement of wear resistance in high-speed mechanical components through the application of Thermal Spray Coating technology to extend service life and improve engineering performance. The substrate material used in this study was Aluminum Alloy 6061, which is widely employed in industrial applications due to its lightweight characteristics, excellent mechanical strength, and good machinability. A $\text{Ni}_{95}\text{Al}_5$ alloy wire was employed as the bond coat to enhance the adhesion between the substrate and the coating layer, while $\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ was applied as the top coat to improve surface hardness and wear resistance. The coating process consisted of depositing the bond coat using the Wire Arc Spray technique, followed by the application of the top coat using the High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) spraying process. This combination of coating techniques is capable of producing a dense coating layer with excellent adhesion to the substrate. After the coating process, the microstructure of the coating layer was characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM). The coating thickness was measured, and the surface hardness was evaluated to determine the mechanical properties and overall coating quality. The experimental results revealed that the $\text{Ni}_{95}\text{Al}_5/\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$ coating system significantly increased the surface hardness of the Aluminum Alloy 6061 substrate, thereby enhancing its wear resistance and making it suitable for engineering components operating under severe frictional and high-speed conditions. Furthermore, microstructural analysis demonstrated that the coating exhibited good adhesion to the substrate, a continuous coating structure throughout the sprayed area, and a relatively uniform distribution of coating particles. These findings indicate that the selected thermal spray processes are effective in producing high-quality protective coatings with considerable potential for industrial applications requiring improved surface durability and wear performance.

Keywords: Wear Resistance, High-Speed Components, Thermal Spray Coating Technique

1. บทนำ

การสึกหรอ หรือ การชำรุดเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในเครื่องจักรและโครงสร้างทางวิศวกรรมการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน การเลือกกระบวนการปรับปรุง คุณภาพของวัสดุที่มีประสิทธิภาพตลอดจนความเข้าใจในธรรมชาติของการสึกหรอและการเลือกวิธีการซ่อมบำรุงที่ถูกต้องอย่างเหมาะสม จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นพื้นฐานสำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานและการบำรุงรักษาสำหรับการสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องจักรอุตสาหกรรมบางชนิดสามารถทำการซ่อมแซมให้กลับมาใช้งานได้ดังเดิมด้วยวิธีการต่าง ๆ อาทิการเชื่อม หรือการพ่นพอก (Thermal' Spraying) โดยปัจจุบันการซ่อมแซมชิ้นส่วนของเครื่องจักรอุตสาหกรรมด้วยวิธีการพ่นพอกได้รับความนิยม กรรมวิธีการซ่อมดังกล่าวสามารถเลือกวิธีการได้หลากหลาย ให้เหมาะสมต่อลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนที่ต้องการซ่อม

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

เตรียมวัสดุฐานโดยใช้อลูมิเนียม 6061 จากนั้นทำการตัดชิ้นงานและปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการ Sandblasting เพื่อเตรียมพื้นผิวให้เหมาะสมสำหรับการพ่นเคลือบผิว และตรวจสอบความหยาบผิวด้วย Testex Press-O-Film และวัดค่าด้วย Dial Thickness Gauge เพื่อให้ได้พื้นผิวที่เหมาะสมก่อนทำการเคลือบจากนั้นเตรียมวัสดุเคลือบโดยใช้ลวด $\text{Ni}_{95}\text{Al}_5$ และ

ผง $WC_{10}Co_4Cr$ นำไปพ่นเคลือบด้วยเครื่อง Arc Spray และ HVOF ก่อนการพ่นจริงจะทำการพ่นรองพื้นด้วย $Ni_{20}Cr$ (Nickel–Chromium) ความหนาประมาณ 50–100 μm เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของชั้นเคลือบกับผิวชิ้นงาน จากนั้นพ่นเคลือบที่อุณหภูมิประมาณ 80–120 องศาเซลเซียส โดยรักษาระยะห่างระหว่างหัวพ่นกับชิ้นงานประมาณ 15 นิ้ว และควบคุมความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 200–400 μm หลังจากพ่นเคลือบเสร็จแล้ว ทำการตัดชิ้นงานและเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติของชั้นเคลือบ ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างผิว SEM และทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบด้วย Hardness Test เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการเคลือบผิววัสดุ

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

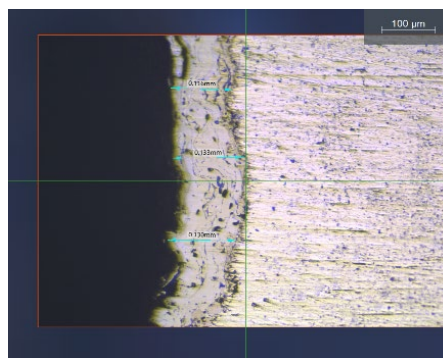
การทดสอบด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างผิวและหน้าตัดของชั้นเคลือบหลังการพ่น ด้วยการใช้ลำอิเล็กตรอนกำลังสูงเพื่อแสดงภาพกำลังขยายสูงการทดสอบนี้ใช้เพื่อวิเคราะห์ความหนาชั้นเคลือบความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบการยึดเกาะกับวัสดุฐานรูพรุนและรอยแตกร้าวของชั้นเคลือบ

ตารางที่ 1 ผลการวัดชั้นผิวเคลือบโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope

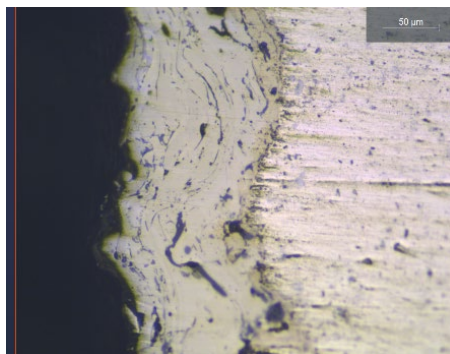
ชิ้นงาน	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย
Arc Spray	0.116	0.133	0.130	126 μm
HVOF	0.073	0.056	0.073	67 μm



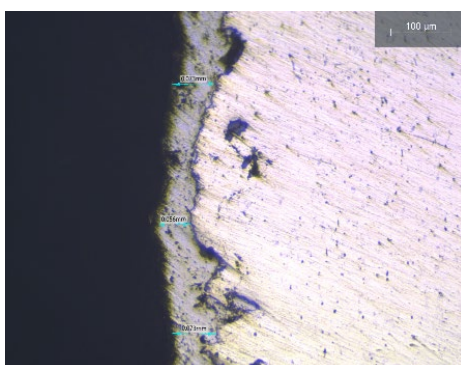
รูปที่ 1 เครื่องมือ Scanning Electron Microscope



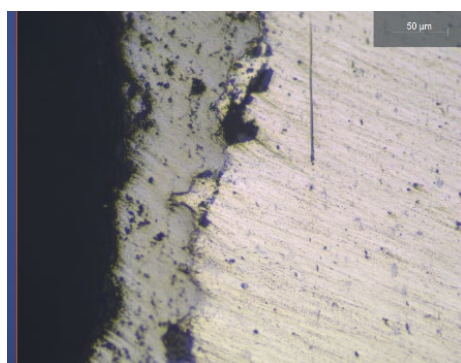
รูปที่ 2 การเคลือบ Arc Spray ขยาย x10



รูปที่ 3 การเคลือบ HVOF ขยาย x10

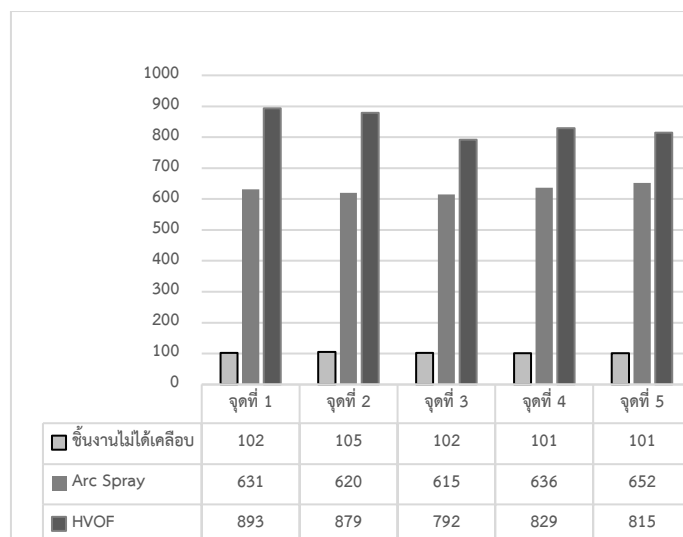


รูปที่ 4 การเคลือบ HVOF ขยาย x20



รูปที่ 5 ทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers Hardness Test) โดยทำการกดหัวกดเพชรรูปทรงพีระมิดลงบนพื้นผิวของชิ้นงานด้วยแรงกด 0.2 กิโลกรัม (0.2 kgf หรือ 200 gf) จากนั้นวัดขนาดรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเครื่องทดสอบ เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความแข็งของวัสดุ การใช้แรงกด 0.2 กิโลกรัม เหมาะสำหรับการทดสอบชั้นเคลือบที่มีความบาง เนื่องจากช่วยลดผลกระทบจากวัสดุฐาน และทำให้สามารถวัดค่าความแข็งของชั้นเคลือบได้อย่างแม่นยำมากขึ้น โดยทำการทดสอบหลายตำแหน่งบนชิ้นงานแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น หัวกดที่ใช้เป็น เพชรแท้คุณภาพสูง (Diamond) รูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Vicker Qness) มุม 136 องศา เนื่องจากเพชรมีความแข็งสูง ไม่สึกหรอ และสามารถสร้างรอยกดขนาดเล็กที่ชัดเจน เหมาะสำหรับการทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบบาง ทำให้วัดค่าได้แม่นยำและเป็นมาตรฐานในการทดสอบความแข็งของวัสดุ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ความแข็งแบบ Vicker กับ การเคลือบด้วย HVOF



รูปที่ 7 เครื่องมือ Qness 60 A+ EVO

2.2 มาตรฐานของงานวิจัยนี้

การทดสอบความแข็ง(Hardness Test) ใช้มาตรฐาน ASTM E384/E92 สำหรับการทดสอบ Micro Vickers Hardness เพื่อวัดค่าความแข็งของชิ้นเคลือบการตรวจสอบโครงสร้างผิว(Scanning Electron Microscope) ใช้มาตรฐาน ASTM B748 สำหรับวัดความ Scanning Electron Microscope มาตรฐานเหล่านี้ใช้เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ และสามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นได้ โดยการทดลองนี้ประกอบด้วย การทดสอบ SEM การตรวจสอบโครงสร้างผิว และการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการเคลือบ

3. ผลการวิจัย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 102.2 HV ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานของวัสดุฐาน ขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยเทคนิค Arc Spray และ HVOF มีค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 630.8 HV และ 841.6 HV ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าการเคลือบผิวสามารถเพิ่มความแข็งของวัสดุได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการเคลือบ พบว่าเทคนิค HVOF ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะของ

กระบวนการที่มีความเร็วของอนุภาคสูง ส่งผลให้อนุภาคเคลือบสามารถยึดตัวแน่นบนพื้นผิว เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณรูพรุนต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของกระบวนการพ่นเคลือบแบบความเร็วสูงที่ระบุว่า ความหนาแน่นของชั้นเคลือบและขนาดเกรนที่ละเอียดมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ

4. สรุปผล

การศึกษาการพ่นเคลือบผิวชิ้นงานด้วย($\text{Ni}_{95}\text{Al}_5$) และ ($\text{WC}_{10}\text{Co}_4\text{Cr}$) ด้วยเทคนิค Thermal Spray Coating แบบ Flame Spray บนอลูมิเนียม 6061 พบว่าสามารถเพิ่มสมบัติทางกลของผิวชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชั้นเคลือบที่ได้มีผลการวัดชั้นผิวเคลือบ 126–67 ไมโครเมตร และสามารถยึดเกาะกับวัสดุฐานได้ดีผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่าการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 102.2 HV ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานของวัสดุฐาน ขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยเทคนิค Arc Spray และ HVOF มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 630.8 HV และ 841.6 HV ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าการเคลือบผิวสามารถเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้อย่างชัดเจนมากขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานได้ดีกว่า จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย SEM พบว่าชั้นเคลือบมีการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานได้ดี แม้ว่าจะพบรูพรุนและฟองอากาศบางส่วน ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของค่าความแข็งแรง อย่างไรก็ตาม โดยรวมแล้วการเคลือบผิวด้วยเทคนิค Arc Spray และ HVOF เพิ่มประสิทธิภาพของผิวชิ้นงานได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรและลดต้นทุนการบำรุงรักษาได้ในอนาคต

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM International, *ASTM G99–17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.
- [2] ASTM International, *ASTM C1624–22: Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [3] S. Sardar, S. Dey, and D. Das, “Modelling of Tribological Responses of Composites Using Integrated ANN–GA Technique,” *Journal of Composite Materials*, vol. 56, no. 3, pp. 451–465, 2022, doi: 10.1177/0021998320960520.
- [4] ASTM International, *ASTM E384–22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022 (Used for Micro Vickers Hardness Testing) (in Thai).
- [5] International Organization for Standardization, *ISO 14923:2017 Thermal Spraying — Characterization and Testing of Thermal Sprayed Coatings*, Geneva, Switzerland: ISO, 2017 (Used for Characterization and Testing of Thermal Sprayed Coatings) (in Thai).
- [6] ASTM International, *ASTM C633–13: Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2013 (Used for Adhesion Testing of Coatings) (in Thai).
- [7] International Organization for Standardization, *ISO 6507–1:2018 Metallic Materials — Vickers Hardness Test*, Geneva, Switzerland: ISO, 2018 (Used for Vickers Hardness Testing) (in Thai).

- [8] ASTM International, *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 2016.