

ผิวเคลือบอะลูมิเนียม-12% โดยนำหนักซิลิกอนที่เตรียมโดย
เทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน: ตอนที่ 2 โครงสร้างทาง
จุลภาคและสมบัติต่าง ๆ

อภากร อยู่ดี¹ อภิชาติ โสภาแดง² สิทธิชัย วิโรจน์อุปถัมภ์³
และ สุกานดา เจียรศิริสมบูรณ์⁴

Abstract

Yudee, A.¹, Sopadang, A.², Wirojanupatump, S.³ and Jiansirisomboon, S.¹
**Aluminium-12wt% silicon coating prepared by thermal spraying technique:
Part 2 microstructure and properties**
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2006, 28(2) : 441-448

At present, thermal spray technology has been widely used as an alternative method for wear protection in materials by applying coated layer on an original worn surface. This research studied the thermal sprayed Al-12wt%Si coating prepared by flame spray technique. This material has been known as a candidate for wear resistance in particularly an automobile industry. In this research, the most suitable spraying condition had been achieved by a design of experiment which was 38 ft³/hr (1.026 m³/hr) of oxygen flow rate, 27 ft³/hr (0.729 m³/hr) of acetylene flow rate and 58 mm of spray distance. The as-sprayed coating had a hardness of 87.0±8.3 HV, thickness of 236.7±20.5 µm, percentage volume fraction of porosity of 14.99±1.63 and wear rate of 1.108x10⁻³ ± 0.001 mm³/m. Microstructure of the coating was also investigated.

Key words : thermal spray, Al-12wt%Si, microstructure, hardness, wear

¹Department of Physics, ³Department of Chemistry, Faculty of Science, ²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand.

¹M.Sc.(Materials Science) ⁴D.Phil.(Materials Science) ภาควิชาฟิสิกส์ ³Ph.D.(Analytical Chemistry) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ²Ph.D.(Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Corresponding e-mail: sukanda@chiangmai.ac.th

รับต้นฉบับ 29 เมษายน 2548 รับลงพิมพ์ 2 สิงหาคม 2548

บทคัดย่อ

อากาศ อยู่ดี อภิชาติ โสภางแดง สิทธิชัย วิโรจน์ปฐมภัก และ สุกานดา เจียรศิริสมบุรณ์
ผิวเคลือบอะลูมิเนียม-12% โดยนำหนักซิลิกอนที่เตรียมโดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน: ตอนที่ 2 โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติต่าง ๆ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(2) : 441-448

ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการพ่นเคลือบด้วยความร้อน ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการป้องกันการสึกหรอของวัสดุมาใช้ในการแก้ปัญหาอย่างแพร่หลาย โดยการสร้าง "ชั้นเคลือบบนผิวเดิม" ของชิ้นงานที่สึกหรอ งานวิจัยนี้ศึกษาผิวเคลือบอะลูมิเนียม-12% โดยนำหนักซิลิกอนที่เตรียมโดยเทคนิคการพ่นแบบเปลวไฟ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุนี้สามารถใช้ต้านทานการสึกหรอได้ดีโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ ในงานวิจัยนี้ใช้เงื่อนไขการพ่นเคลือบด้วยความร้อนที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลอง นั่นคือ อัตราการไหลของออกซิเจน 38 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (1.026 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน 27 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (0.729 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) และระยะห่างในการพ่น 58 มม. โดยผิวเคลือบที่ได้มีความแข็งเท่ากับ 87.0 ± 8.3 HV ความหนาเท่ากับ 236.7 ± 20.5 ไมครอน ร้อยละรูพรุนของผิวเคลือบเท่ากับ 14.99 ± 1.63 และอัตราการสึกหรอเท่ากับ $1.108 \times 10^{-3} \pm 0.001$ ลบ.มม./เมตร นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบด้วยเงื่อนไขดังกล่าว

ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้น ต้นทุนการผลิตที่ต่ำเป็นสิ่งที่ต้องการเป็นอย่างยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นต้นทุนการผลิตที่เป็นรูปของมูลค่าหรือเวลา ดังนั้นผู้ที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนการผลิตต่างมักจะหาวิธีการที่จะลดต้นทุนเหล่านั้นเพื่อให้เกิดผลกำไรมากที่สุดเท่าที่ทำได้ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตนั้นก็เป็นสิ่งหนึ่งที่น่าไปสู่การสร้างต้นทุนในการผลิตที่สูงขึ้น ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่พบในอุตสาหกรรมจะเกี่ยวข้องกับการที่ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรนั้นเกิดการเสียหายขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการคิดค้นเทคนิคเพื่อที่จะช่วยทำให้ลดต้นทุนเหล่านั้นลงได้ จึงได้รับการสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเทคนิคที่ได้รับความสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของชิ้นงาน เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานอย่างหนึ่งคือ การพ่นเคลือบด้วยความร้อน (thermal spray) (Priit and Sergei 2000; Malcolm and Vinod, 2001; Rosso et al., 2001)

กระบวนการหลักของเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน คือ การพ่นวัสดุที่หลอมเหลวให้วิ่งไปกระทบและประสานเข้ากับผิวของชิ้นงาน (substrate) โดยวัสดุที่ใช้พ่นจะถูกทำให้หลอมเหลวได้ด้วยแหล่งความร้อนหลายแหล่ง เช่น จากการเผาไหม้ (combustion) พลาสมา (plasma) การอาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า (electrical arc)

วัสดุที่ใช้จะอยู่ในรูปของผงหรือเส้นลวด เมื่อวัสดุถูกหลอม (melt) จะถูกเร่ง (accelerate) ด้วยอากาศอัดให้วิ่งไปกระทบ (impact) ผิวชิ้นงานด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการฝังตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (rapid solidification) ชั้นผิวเคลือบที่ได้จึงมีโครงสร้างที่มีความละเอียดถึงระดับไมโครเมตร โดยที่ผิวเคลือบและชิ้นงานจะยึดเกาะกันด้วยพันธะทางกลแบบเกาะเกี่ยวกัน (mechanical interlocking) เป็นหลัก (Tucker, 1997; ปนัดดา, 2544) โดยลักษณะการเกิดเป็นชั้นของผิวเคลือบแสดงดัง Figure 1

สำหรับการพ่นเคลือบด้วยความร้อนนั้น จะสามารถแบ่งได้เป็นหลายเทคนิคขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดความร้อน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การพ่นแบบเปลวไฟ (combustion flame spray) ซึ่งเป็นวิวัฒนาการเริ่มแรกสุดของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน โดยอาศัยแหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้มีหลายชนิด ได้แก่ อะเซทิลีน โพรเพน เมทิลอะเซทิลีน-โพรพาไดอิน และไฮโดรเจน โดยที่ชนิดและอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจนนี้เองจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิ (ซึ่งจะอยู่ในช่วง 2000-3000°C) และลักษณะของเปลวไฟ การพ่นแบบเปลวไฟเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย ได้อัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบสูง ใช้พ่นวัสดุที่มีจุด

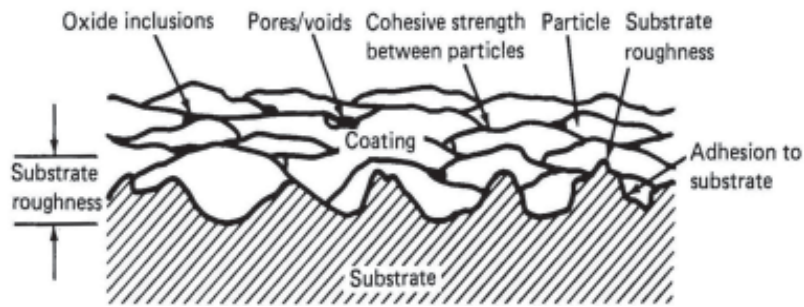


Figure 1. Typical coating cross section to illustrate lamellar structure of oxides and inclusions. (AWS ,1985)

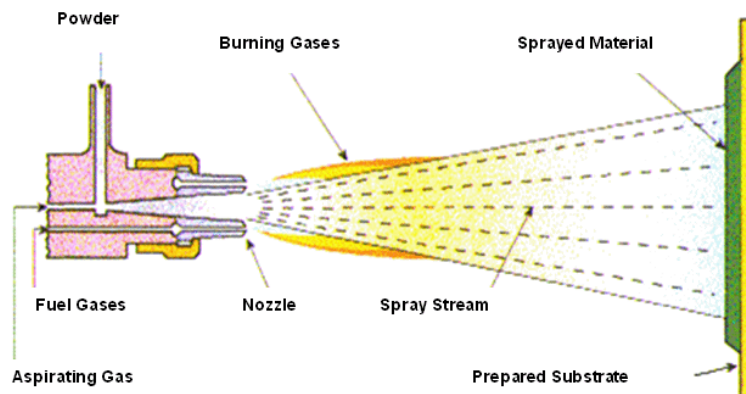


Figure 2. Sketch of flame spraying. (Tucker, 1997).

หลอมเหลวไม่สูงมากนักประเภทโลหะและโลหะผสม เช่น Al, Mo, Cu, Zn และ Ni-base เป็นต้น โดยมีลักษณะการพ่นเคลือบดังแสดงใน Figure 2 (Tucker, 1997)

โลหะผสมอะลูมิเนียม-12% โดยน้ำหนักซิลิกอน (Al-12wt%Si) นั้นได้มีการผลิตเป็นผิวเคลือบด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อนและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากโลหะผสม Al-12wt%Si นั้นเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนของยานพาหนะต่างๆ ทั้งการผลิตรถยนต์ เครื่องบิน และยานอวกาศ โลหะผสมชนิดนี้มีสมบัติที่มีความหนาแน่นค่าน้ำหนักเบา แต่มีความสามารถในการต้านการสึกหรอและการกัดกร่อนสูง (Davis, 1993) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมในปัจจุบัน ดังนั้นการทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการพ่น Al-12wt%Si ด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟ เพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีคุณภาพดีและสามารถปกป้องชิ้นส่วนอุตสาหกรรมจาก

ปัญหาต่างๆ โดยเฉพาะการสึกหรอได้จึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้ได้ทำการพ่น Al-12wt%Si ด้วยเงื่อนไขการพ่นที่เหมาะสมที่สุด (อากาศ และคณะ, 2549) แล้วทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ ความแข็ง และอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบที่เตรียมได้ดังกล่าว

วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมผิวเคลือบ Al-12wt%Si ด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟตามเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการพ่น Al-12wt%Si (อากาศ และคณะ, 2549) ซึ่งเงื่อนไขในการพ่นดังกล่าวประกอบด้วยอัตราการไหลของออกซิเจน 38 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (1.026 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน 27 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (0.729 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) และระยะห่างในการพ่น 58 มม. โดยมีอัตรา

การปล่อยผง 38.33 กรัม/นาที่ แรงดันลมในการหล่อเย็นเป็น 1.5 บาร์ โดยใช้จำนวนรอบในการพ่นทั้งสิ้น 16 รอบ ลงบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. หนา 5 มม. ซึ่งผ่านการพ่นทราย (grit blasting) ให้มีผิวที่ขรุขระเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน และเมื่อได้ผิวเคลือบแล้วจะทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบโดยอาศัยเทคนิค EDS-SEM (JEOL JSM 5910LV) และทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

วัดความหนา ความแข็ง การสึกหรอ และสัดส่วนร้อยละรูพรุนของผิวเคลือบ

การวัดความหนาของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (MXT- α 7 Digital) จะทำการวัดทั้งสิ้น 10 บริเวณของแต่ละชิ้นงานแล้วคำนวณค่าเฉลี่ย ส่วนการวัดค่าความแข็งของผิวเคลือบนั้นทำได้โดยการกดผิวเคลือบด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness, HV) ด้วยเครื่อง Galileo Microscan OD โดยบริเวณที่กดจะเป็นบริเวณผิวตัดขวางของผิวเคลือบ (cross section) ที่ทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100, 600 และ 1000 จนกระทั่งถึงผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร โดยในการกดผิวเคลือบเพื่อวัดค่าความแข็งนั้นจะใช้น้ำหนัก 100 กรัม กดชิ้นงานในแต่ละจุดเป็นเวลา 15 วินาที โดยทำการกดทั้งหมด 5 จุดต่อชิ้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ย ส่วนอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบสามารถวัดได้โดยการทดสอบแบบ Pin-on-Disk (ISC-200 Tribometer) ซึ่งใช้หัวกดทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) น้ำหนักกด 50 กรัม และใช้ระยะทางในการทดสอบการสึกหรอเป็น 25, 50 และ 75 เมตร ตามลำดับ โดยจะทดสอบในสภาวะบรรยากาศปกติ แล้วทำการวัดความกว้างของรอยสึก 4 บริเวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย ในการคำนวณหาอัตราการสึกหรอนั้นเป็นไป

ตามมาตรฐาน ASTM G66-90 ส่วนการวัดร้อยละพื้นที่ของรูพรุนของผิวเคลือบโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (image analysis) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์รูปพรุนจากภาพถ่าย Image Pro Plus ซึ่งอาศัยการพิจารณาความแตกต่างของระดับสี (contrast) ระหว่างรูปพรุนและเนื้อผิวเคลือบ โดยการเตรียมชิ้นงานสำหรับการวัดรูปพรุนนั้นเหมือนการวัดความแข็งผิวเคลือบ แล้วทำการตรวจสอบบริเวณผิวตัดขวางของผิวเคลือบที่ทำการขัดผิวจนกระทั่งถึงความละเอียด 0.3 ไมโครเมตร ซึ่งจะทำให้การวัดร้อยละรูปพรุนทั้งสิ้น 10 บริเวณต่อชิ้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ย จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบที่ทำการพ่นด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลอง คือ อัตราการไหลของออกซิเจน 38 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (1.026 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน 27 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (0.729 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) และระยะห่างในการพ่น 58 มม. กับผิวเคลือบที่ทำการพ่นด้วยตามเงื่อนไขที่บริษัทผู้ผลิตผง (Sulzer Metco) กำหนด คือ อัตราการไหลของออกซิเจนและก๊าซอะเซทิลีนเป็น 36 ลบ.ฟุต/ชั่วโมง (0.972 ลบ.เมตร/ชั่วโมง) และระยะห่างในการพ่นเป็น 75 มม. โดยผิวเคลือบทั้งสองนี้จะถูกพ่นด้วยอุปกรณ์พ่นเคลือบแบบเปลวไฟชุดเดียวกัน

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบบริเวณผิวตัดขวาง ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงดัง Figure 3 โดยผิวเคลือบดังกล่าวจะได้จากการพ่นตามเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลอง ดังนำเสนอในบทความตอนที่ 1 (อาการ และคณะ, 2549) พบว่าผิวเคลือบที่ได้ค่อนข้างหยาบ มีลักษณะของอนุภาคที่ไม่หลอมหรือหลอมไม่สมบูรณ์แทรกอยู่ในผิวเคลือบโดยอนุภาคที่ไม่หลอมนั้นจะมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จนเกินไปที่ไม่สามารถถูกหลอมได้สมบูรณ์ หรืออนุภาคขนาดเล็กที่ถูกพ่นด้วยความเร็วสูงเกินไปจนไม่มีเวลาเพียงพอที่จะหลอมก่อนที่จะวิ่งไปปะทะชิ้นงาน จากการแทรกตัวของอนุภาคไม่หลอมนี้ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในผิวเคลือบเนื่องจากการเชื่อมประสานที่ไม่สมบูรณ์ของอนุภาคไม่หลอม นอกจากนี้จะสังเกตเห็นรอย

แยก (crack) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุผิวเคลือบและชิ้นงานเป็นวัสดุคนละชนิดกัน ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (coefficient of thermal expansion; CTE) ที่แตกต่างกัน ด้วย ดังนั้นจึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (thermal expansion mismatch) ขึ้นในขณะผิวเคลือบเย็นตัวลงหลังถูกพ่น ส่งผลให้มีความเค้นสะสม (residual stresses) ในผิวเคลือบและชิ้นงานไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการแตกขึ้นระหว่างผิวเคลือบและชิ้นงานเพื่อปลดปล่อยความเค้นดังกล่าว และนอกจากนี้ Figure 3 ยังแสดงให้เห็นว่าผิวของชิ้นงานมีความหยาบน้อย ซึ่งอาจจะทำให้การยึดเกาะของผิวเคลือบแบบเชิงกลนั้นไม่ดีเท่าที่ควร

เมื่อพิจารณาผิวเคลือบ Al-12wt%Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดัง Figure 4 พบว่าลักษณะของผิวเคลือบซึ่งถ่ายด้วยเทคนิค BE-SEM ที่กำลังขยายสูงชัน พบว่ามีลักษณะของการเกิดโครงสร้างแบบ lamellar อันเนื่องจากการเรียงตัวเป็นชั้นๆ ของแต่ละอนุภาคที่หลอมที่ถูกแรงดันอัดให้แบนเป็นแผ่น (splat) และผิวเคลือบที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง โดยเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีโดยรวมของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDS-SEM พบว่าจะประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน ออกซิเจน และคาร์บอน โดยมีธาตุอะลูมิเนียมในปริมาณมากที่สุด และมีธาตุซิลิกอนในปริมาณรองลงมา รวมทั้งมีธาตุออกซิเจนและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบด้วย ดังสัดส่วนปริมาณธาตุแสดงใน Table 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีในผิวเคลือบกับผงเคลือบ จะเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุคาร์บอนและออกซิเจน และแนวโน้มการลดลงของธาตุซิลิกอนและอะลูมิเนียมใน

ผิวเคลือบเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุเหล่านี้ในผงเคลือบ ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (SiO_2) ออกไซด์ของธาตุอะลูมิเนียม (Al_2O_3) และ/หรือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2$) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของธาตุซิลิกอน และอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการพ่นเคลือบในบรรยากาศปกติตนเอง (Jiansirisomboon *et al.*, 2003)

จากผลการทดลองของชิ้นงานที่พ่นด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลอง (อากาศ และคณะ, 2549) พบว่าความแข็งของผิวเคลือบทดสอบด้วยเทคนิคการกดแบบวิกเกอร์ ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 87.0 ± 8.3 HV หรือเท่ากับ 853.5 นิวตัน/ตร.เมตร เมื่อพิจารณารอยกดวิกเกอร์ดังแสดงใน Figure 5 พบว่าลักษณะของรอยกด (indentation impression) ที่ทำการวัดในภาคตัดขวาง (cross-section) ของผิวเคลือบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมฐานปิระมิดที่สมมาตร ซึ่งความกว้างของเส้นทแยงมุมของสี่เหลี่ยมนี้สามารถนำไปคำนวณเป็นค่าความแข็งของผิวเคลือบได้ตามสูตร $HV = [2P \sin(\theta/2)]/d^2$ เมื่อ P คือน้ำหนักที่ใส่กดในหน่วยกิโลกรัม θ คือมุมของหัวกดเท่ากับ 136° และ d คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมที่เกิดจากหัวกดในหน่วย "มม." จากลักษณะของรอยกดดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าวัสดุเคลือบนี้มีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากไม่พบรอยแตกขยายตัวออกมาจากมุมทั้งสองของรอยกด ซึ่งลักษณะของรอยแตกดังกล่าวจะแสดงความเป็นวัสดุที่มีความเปราะสูง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของผิวเคลือบที่พ่นด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลองดังแสดงใน Table 2 พบว่ามีค่าน้อยกว่า

Table 1. Chemical composition of Al-12wt%Si powder and as-received coating.

Element	Powder		Coating	
	% weight	% mass of atom	% weight	% mass of atom
C	4.84	10.00	9.32	13.11
O	3.07	4.83	6.57	8.24
Al	79.70	75.21	73.53	69.06
Si	12.39	11.34	10.58	9.57

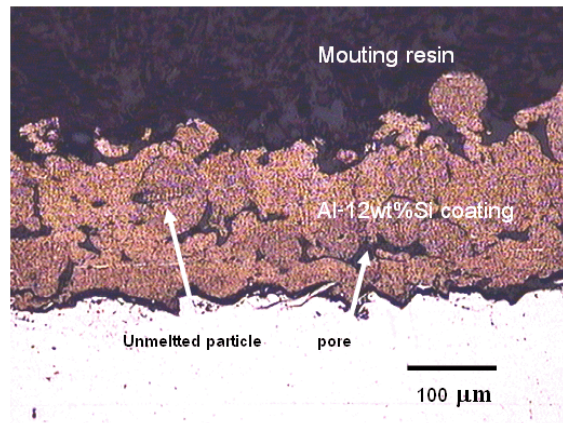


Figure 3. Microstructure of cross - sectional Al-12wt% Si coating taken by optical microscope at 100X magnification.

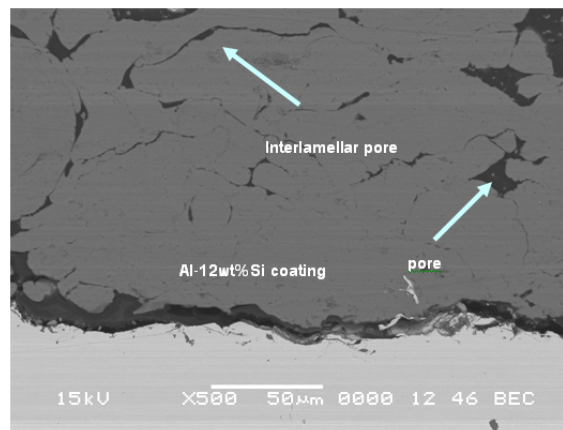


Figure 4. Microstructure of Al-12wt% Si coating taken by SEM at 500X magnification.

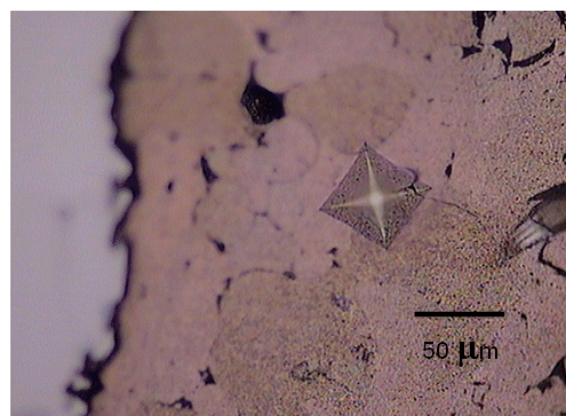


Figure 5. An indentation impression of Vickers indenter on Al-12wt%Si coating taken by optical microscope 250X magnification.

Table 2. Comparison of coating properties sprayed by the suitable condition based on a Design of Experiment and the condition provided by powder production company (Sulzer Metco).

Properties of coating	Design of Experiment condition	Sulzer Metco Condition
Hardness (HV)	87.0 ± 8.3	94.6 ± 3.9
Thickness (mm)	236.7 ± 20.5	195.8 ± 12.4
Wear rate (mm ³ /m)	1.108 x10 ⁻³ ± 0.001	3.981 x10 ⁻³ ± 0.025
Porosity (%)	14.99 ± 1.63	30.25 ± 3.57

ผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่บริษัทผู้ผลิตผงกำหนดประมาณ 8.7% แต่ถ้าพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงประกอบด้วย ก็อาจจะกล่าวได้ว่าค่าความแข็งแรงทั้งสองนั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ความหนาของผิวเคลือบ Al-12wt%Si นั้น เกิดจากอนุภาคเกิดการซ้อนทับกันจนกระทั่งเกิดเป็นความหนาของผิวเคลือบขึ้น โดยผิวเคลือบที่เกิดขึ้นมีการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอนุภาคเป็นการยึดเกาะแบบเชิงกล (mechanical interlocking) โดยความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจากการออกแบบการทดลองพบว่ามีความหนาเท่ากับ 236.7±20.5 ไมครอน ซึ่งมีค่ามากกว่าความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบตามเงื่อนไขที่บริษัทผู้ผลิตผงกำหนดประมาณ 17.28%

จากผลการทดสอบหาอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disk พบว่าผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบการทดลองมีค่าการสึกหรอเฉลี่ยคือ 1.108x10⁻³ ± 0.001 ลบ.มม./เมตร ซึ่งพบว่าผิวเคลือบมีความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพ่นเคลือบตามเงื่อนไขที่บริษัทผู้ผลิตผงกำหนดให้ พบว่าจะมีความต้านทานเพิ่มขึ้นประมาณ 259.29%

ค่าสัดส่วนปริมาณของรูพรุนของผิวเคลือบนั้นมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงและอัตราการสึกหรอ ถ้าค่าสัดส่วนปริมาณของรูพรุนมีค่าน้อยแล้วทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่ามากและมีอัตราการสึกหรอน้อย โดยค่าสัดส่วนปริมาณของรูพรุนของผิวเคลือบสามารถหาได้โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยปกติแล้วความพรุนที่เกิดขึ้นในผิวเคลือบนั้นอาจเกิดขึ้นได้ด้วยหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิของเปลวไฟ ความ

สามารถในการหลอมของผงเคลือบ และความเร็วในการตกกระทบของอนุภาคหลอมลงบนชิ้นงาน เป็นต้น โดยในกรณีของผิวเคลือบ Al-12wt%Si นั้น รูพรุนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากการหดตัวของผิวที่ทำให้อนุภาคที่ไม่หลอมหรือกึ่งหลอมหลุดออกไปเกิดเป็นช่องว่าง (voids) ขึ้น หรืออาจเกิดจากการที่โลหะอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะที่มีช่วงอุณหภูมิระหว่างสถานะของเหลวกับไอที่แคบ (บันดดา, 2544) ดังนั้นภายใต้ภาวะที่ได้รับความร้อนที่มากเกินไป จะทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกลายเป็นไอกลายเป็นรูพรุนขึ้นได้เช่นกัน จากผลการทดลองเพื่อหาร้อยละพื้นที่รูพรุนของผิวเคลือบ พบว่าค่าร้อยละพื้นที่รูพรุนของผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองมีค่าเฉลี่ยคือ 14.99 ± 1.63 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละพื้นที่รูพรุนที่ได้จากเงื่อนไขการพ่นตามบริษัทผู้ผลิตกำหนดให้ พบว่าจะมีรูพรุนน้อยกว่าประมาณ 101%

จาก Table 2 สามารถสรุปได้ค่อนข้างชัดเจนว่าสมบัติของผิวเคลือบ Al-12wt%Si ที่ได้จากการพ่นด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลองไม่ว่าจะเป็นความหนา อัตราการสึกหรอ และปริมาณรูพรุนในผิวเคลือบจะให้ผิวเคลือบที่มีโครงสร้างทางจุลภาคที่ดีให้ความหนาที่มากกว่า และอัตราการสึกหรอและรูพรุนที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าค่าความแข็งแรงของผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงของผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต แต่ความแตกต่างนี้ก็ไม่มากนักเกินไปถ้าหากพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประกอบด้วย

สรุปผลการทดลอง

การพ่นผง Al-12wt%Si ตามเงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ ทำให้ได้ผิวเคลือบจากการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟ ที่มีลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคที่ค่อนข้างดีสม่ำเสมอ มีปริมาณรูพรุนต่ำ และมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างสูง โดยลักษณะเหล่านี้จะส่งผลต่อความแข็งและอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ ซึ่งพบว่าผิวเคลือบที่ได้นี้จะมีสมบัติดังกล่าวดีกว่าผิวเคลือบที่พ่นตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตผงเคลือบ

เอกสารอ้างอิง

- ปนัดดา นีรนาทลำพองศ์. 2544. ปกป้องผิวคุณจากสิ่งแวดล้อมยืดอายุชิ้นส่วนโดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยเปลวพลาสมา, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 21.
- อภากร อยู่ดี อภิชาติ โสภางค์ สิทธิชัย วิโรจน์ปัทม์ และสุกานดา เจียรศิริสมบุญ. 2549. ผิวเคลือบอะลูมิเนียม-12% โดยนำหลักซิลิกอนที่เตรียมโดยเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อน: ตอนที่ 1 การหาเงื่อนไขการพ่นเคลือบที่ดีที่สุดบนพื้นฐานการออกแบบการทดลอง. ว. สงขลานครินทร์ วทท. 28(2).
- AWS Committee on Thermal Spraying. 1985. Thermal Spraying Practice, Theory and Application, AMERICAN WELDING SOCIETY, INC, New York .
- Davis, J.R. and Associates. ASM International. 1993. Aluminum and Aluminum Alloys 1st ed, ASM International, New York.
- Jiansirisomboon, S., MacKenzie, K.J.D., Roberts, S.G. and Grant, P.S. 2003. Low pressure plasma-sprayed Al₂O₃ and Al₂O₃/SiC nanocomposite coatings from different feedstock powders, J. Euro. Ceram. Soc. 23: 961-976.
- Malcolm, K.S. and Vinod, K.J. 2001. Friction and wear characteristics of hard coatings, Wear 251: 990-996.
- Priit, K. and Sergei, Z. 2000. Wear resistance of thermal sprayed coating on the base of recycled hard-metal, Surf. Coat. Technol., 130: 46-51.
- Rosso, M., Scrivani, A. and Ugues, D. 2001. Corrosion resistance and properties of pump pistons coated with hard materials, Inter. J. Refrac. Mets. Hard Mats.,19: 45-52.
- Tucker, R.C. 1997. Thermal spray coating in Metal Handbook 9th ed, Praxair surface technology Inc.; 497-509.