

# แนวทางการตรวจประเมินสำหรับการใช้ลวดเชื่อมแทนลวดอาร์ก ในการพ่นเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีอาร์กไฟฟ้า

หทัยพัฒน์ ค่อยประเสริฐ<sup>1</sup> และ ปนัดดา นีรนาทล้ำพงส์<sup>2</sup>

## Abstract

Koiprasert, H. and Niranatlumpong, P.  
Investigation of method for Stainless Steel Welding Wire  
as a Replacement for Arc Wire Consumables  
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2005, 27(1) : 91-100

Arc spraying as a coating method is being employed in various industrial applications as a part of maintenance service, and also as a surface engineering technique for many machine parts and components. The major cost in producing the arc spray coating is, however, based on the cost of the arc wire consumables. This project was carried out to investigate the use of the commercially-available gas metal arc welding wire (GMAW wire) as a cheaper alternative to the special-purpose arc wire consumables. The wire material chosen for this early study is the 316L stainless steel, due to its popularity in many applications as a built-up coating for worn parts. The physical properties of the coatings produced from the two sets of 316L stainless steel wire were determined to be different in the percentage of porosity and the oxide content. The mechanical properties, including the tensile bond strength and the wear rate of the coatings produced from the two types of sprayed wire, were also different. This will, in turn, result in a slight difference in the performance of the coatings.

**Key words :** Electric arc spray, stainless steel 316L, welding wire, wear rate

National Metals and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency,  
Klong Luang, Pathum Thani, 12120 Thailand

<sup>1</sup>วศ.ม.(เทคโนโลยีวัสดุ), ผู้ช่วยนักวิจัย <sup>2</sup>Ph.D.(Metallurgy and Materials Engineering), นักวิจัย, เทคโนโลยีเซรามิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อําเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120  
Corresponding e-mail: panaddn@mtc.or.th

รับต้นฉบับ 24 มีนาคม 2547      รับลงพิมพ์ 12 กรกฎาคม 2547

### บทคัดย่อ

หทัยพัฒน์ ค่อยประเสริฐ และ ปณิตดา นิรนาทลำพอง  
แนวทางการตรวจประเมินสำหรับการใช้ลวดเชื่อมแทนลวดอาร์ก  
ในการพ่นเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีอาร์กไฟฟ้า

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2548 27(1) : 91-100

การพ่นเคลือบด้วยวิธีอาร์กไฟฟ้ามีการใช้งานกันมากในหลายกลุ่มอุตสาหกรรม เช่น ในส่วนของการซ่อมบำรุง และในงานวิศวกรรมพื้นผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ต้นทุนในการพ่นเคลือบด้วยอาร์กไฟฟ้าส่วนใหญ่จะหมดไปกับ ค่าวัสดุสิ้นเปลืองคือลวดอาร์กซึ่งมีราคาสูง บทความนี้ได้นำเสนอแนวทางการตรวจประเมินในการใช้ลวดเชื่อมซึ่งมี ราคาถูกกว่าเพื่อใช้ในการพ่นเคลือบแทนลวดอาร์ก โดยในขั้นต้นได้เลือกศึกษาลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เพราะ เป็นลวดชนิดที่นิยมใช้กันมากในงานซ่อมบำรุงและพ่นพอกผิวเพื่อเพิ่มเนื้องาน โดยเป็นการเปรียบเทียบลวดเชื่อม และลวดอาร์กในเกรดเดียวกัน เมื่อตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบที่ได้จากลวดทั้งสองชนิด พบว่ามี เฟอร์เซนต์ความพรุนและปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่างกัน ส่วนสมบัติทางกล ได้แก่ แรงยึดเกาะของผิวเคลือบและ อัตราการสึกหรอของผิวเคลือบที่ผลิตจากลวดทั้งสองก็ต่างกันด้วย ซึ่งสมบัติต่างๆ เหล่านี้ก็จะส่งผลต่อประสิทธิภาพ ในการใช้งานของผิวเคลือบที่แตกต่างกัน

การพ่นเคลือบด้วยการอาร์กไฟฟ้า (Electric arc spraying: EAS) เป็นเทคนิคการเคลือบผิววิธีหนึ่งที่มี ต้นทุนไม่สูงมากจึงทำให้เป็นที่ใช้งานอย่างแพร่หลายใน หลายประเทศทั่วโลก การใช้เทคนิค EAS สามารถเคลือบ ผิวชิ้นส่วนเพื่อวัตถุประสงค์หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเคลือบผิวเพื่อป้องกันการสึกหรอและการกัดกร่อน (Liu, 2001) นอกจากนี้ยังนิยมนำเทคนิค EAS มาใช้ในการ ซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเพื่อปรับขนาดชิ้นงานที่อาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเสียดสีหรือวัสดุไประหว่างการสึกหรอที่ เกิดขณะใช้งาน โดยการพ่นเคลือบผิวหนาเพื่อพอกเนื้อให้ แก่ชิ้นงาน ในปัจจุบันพบว่าเทคนิค EAS ได้เริ่มเข้ามา ทดแทนการเชื่อมพอกผิวเพื่อเพิ่มเนื้อและปรับขนาดใน งานซ่อมบำรุงของอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมการชุบ เจาะน้ำมัน อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ และอุตสาหกรรม เรือเดินสมุทร เป็นต้น ความนิยมในเทคนิค EAS ส่วน หนึ่งมาจากความคล่องตัวในกระบวนการผลิต และจาก การที่ EAS เป็นกระบวนการแบบเย็น (Cold process) ทำให้ในระหว่างการผลิต ชิ้นงานที่นำมาเคลือบได้รับความ ร้อนไม่เกิน 200-300°C ชิ้นงานไม่ได้รับผลกระทบจาก ความร้อนที่สูงเกินไป ซึ่งต่างจากการซ่อมบำรุงโดยวิธีการ เชื่อมพอกที่ความร้อนจากการเชื่อมสูงทำให้ชิ้นงานเสี่ยง

ต่อการแตกและบิดงอเสียรูปหรือชิ้นงานอาจเปลี่ยน โครงสร้างได้

ในการพ่นเคลือบด้วย EAS วัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้เป็น เนื้อผิวเคลือบอยู่ในรูปของลวด จากการศึกษาราคาต้นทุน การผลิตผิวเคลือบ EAS ในประเทศไทย พบว่าสัดส่วนของ ต้นทุนค่อนข้างสูง เนื่องจากวัสดุสิ้นเปลืองดังกล่าว ทั้งนี้ เป็นเพราะเทคนิค EAS ใช้ลวดที่ผลิตมาเฉพาะสำหรับใช้ ในงานพ่นเคลือบ วัสดุอีกตัวหนึ่งที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิว ชิ้นงานด้วยเทคนิค EAS โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานซ่อม บำรุงเพื่อปรับขนาดชิ้นงาน ได้แก่ ลวดเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมเกรด 316L จากการศึกษาในเบื้องต้นพบความ แตกต่างน้อยมากระหว่างลวดอาร์กเกรด 316L และลวด เชื่อมในเกรดเดียวกัน ดังนั้นจึงได้มีการเสนอแนะการใช้ ลวดเชื่อมซึ่งมีราคาถูกกว่ามาทดแทนการใช้ลวดอาร์กใน งานพ่นพอก เพื่อลดต้นทุนการผลิตและซ่อมบำรุงของภาค อุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามส่วนประกอบทางเคมีของลวด ทั้งสองประเภทนี้แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งส่วนประกอบที่ ต่างไปเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลที่ สำคัญของผิวเคลือบได้ ดังนั้นงานวิจัยชุดนี้จึงได้จัดทำขึ้น เพื่อเป็นแนวทางตรวจประเมินในการศึกษาความแตกต่าง ของโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบและเพื่อศึกษา ผลกระทบของโครงสร้างต่อสมบัติทางกลของผิวเคลือบ

โดยจะใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ทั้งประเภทลวดเชื่อมและลวดอาร์กเป็นกรณีศึกษา ในเบื้องต้น งานวิจัยนี้จะใช้ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองประเภทเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพการใช้งานสำหรับกรณีที่ต้องการพ่นพอกเพื่อเพิ่มเนื้อแล้วนำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่เสียหายกลับไปใช้ใหม่ เนื่องจากการใช้งานในลักษณะนี้จะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงทนทานของผิวเคลือบเป็นหลัก

### การพ่นเคลือบด้วยการอาร์กไฟฟ้า (EAS)

เทคนิค EAS เป็นสาขาหนึ่งของเทคโนโลยีการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Thermal spraying) มีหลักการทำงานโดยใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อนในการหลอมวัสดุเคลือบ และในขณะเดียวกันใช้แรงดันก๊าซขับเคลื่อนวัสดุที่กำลังหลอมเหลวให้ฉีดออกจากปลายลวดและพ่นไปยังผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ โดยที่ชิ้นงานดังกล่าวต้องผ่านกระบวนการเตรียมผิวด้วยเทคนิคการยิงกริต (Grit blasting) ก่อนเพื่อทำให้ผิวของชิ้นงานหยาบ ช่วยเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเคลือบและชิ้นงานทำให้ผิวเคลือบยึดเกาะได้ดีขึ้น เมื่ออนุภาคของวัสดุเคลือบที่กำลังหลอมเหลวสัมผัสกับผิวชิ้นงานเคลือบนั้นจะเปลี่ยนรูปตามลักษณะพื้นผิวและเกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างเฉียบพลันเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็นอนุภาค Splat ยึดเกาะอยู่บนชิ้นงาน เมื่ออนุภาคทับถมกันหนาขึ้นก็จะกลายเป็นผิวเคลือบ

กระบวนการผลิตที่กล่าวถึงนี้เกิดขึ้นภายในกระบอกปืนพ่นเคลือบ (Figure 1) วัสดุเคลือบในรูปของลวด 2 เส้นจะป้อนผ่านท่อนำลวดเข้ามาภายในตัวปืนและปลายลวดจะสัมผัสผิวกันในบริเวณด้านหน้าถัดจากหัวพ่น (spray nozzle) ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกป้อนผ่านเส้นลวดจนทำให้เกิดการอาร์กขึ้นที่ปลายสัมผัส ซึ่งเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นถึงค่าหนึ่งก็จะให้ความร้อนสูงจนสามารถหลอมเส้นลวดได้ในขณะเดียวกันถ้าอากาศความดันสูงจะอัดเข้ามาจากด้านหลังกระบอกปืน ไหลผ่านเนื้อลวดที่กำลังหลอมเหลวและออกไปทางหัวพ่น ขณะที่ถ้าอากาศแรงดันสูงวิ่งผ่านลวดหลอมเหลวก็จะฉีดเนื้อลวดออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ของโลหะเคลือบเหลว และเป่าพ่นละอองให้กระจายไปตามลำอากาศจนกระทั่งไปตกกระทบลงบนผิวชิ้นงานกลายเป็นผิวเคลือบ (Boyer, 1992) อัตราไหลของลำอากาศและปริมาณการหลอมเหลวของวัสดุเคลือบซึ่งสามารถกำหนดได้โดยปรับที่ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ในการอาร์ก ซึ่งค่าทั้งสองมีผลกระทบต่อค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหลอมเหลว (melting particle size distribution) (Kelkar, 1998 and Watanabe, 1996) ทั้งสิ้น

### เทคนิคการทดลอง

ในการทดลองแบ่งชิ้นงานทดสอบเป็นสองกลุ่มตามวัสดุผิวเคลือบ กลุ่มแรกเป็นชิ้นงานที่พ่นเคลือบด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L GMAW AWS/ASME

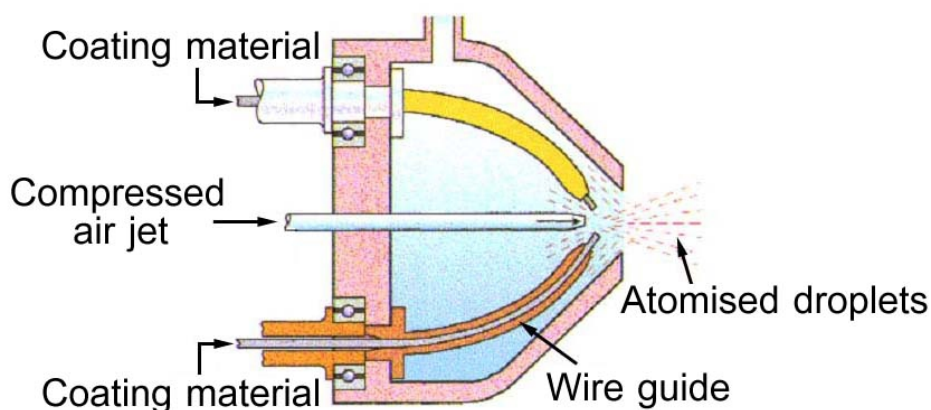


Figure 1. Schematic diagram showing the electric arc spray gun.

**Table 1. Electric arc spray parameter for the coating fabrication. (TAFAs, 1992)**

Atomised air pressure	60 psi
Arc voltage	30 V
Arc current	130 A
Stand-off distance	178 mm.

ER316LSi ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. และกลุ่มที่ สองเป็นชิ้นงานที่พ่นเคลือบด้วยลวดอาร์กเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L (TAFAs 85T) การพ่นเคลือบใช้อุปกรณ์พ่นเคลือบ EAS รุ่น TAFAs 9000 สภาวะในการพ่นเคลือบที่ ให้เปลวไฟสม่ำเสมอแสดงใน Table 1 ซึ่งปรับเปลี่ยนจาก สภาวะมาตรฐานของผู้ผลิตลวดอาร์กและอุปกรณ์พ่นเคลือบ โดยปรับให้ได้เปลวไฟสม่ำเสมอ ชิ้นงานที่ได้จากการพ่นเคลือบจะนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและการสึกหรอ ในห้องปฏิบัติการดังที่จะกล่าวต่อไป

#### การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ลักษณะคล้ายเหรียญ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. หนา 4 มม. พ่นเคลือบด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L บนด้านเรียบข้างหนึ่งของ ชิ้นงานด้วยเทคนิค EAS ให้ได้ความหนาประมาณ 0.5 มม. แล้วตัดแบ่งครึ่งตามขวาง จากนั้นขัดด้วยกระดาษทราย และขัดมันแล้วนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และ EDS รุ่น JEOL 5410 และ JEOL 6301 วัดปริมาณ ความพรุนและปริมาณออกไซด์ด้วยเทคนิค image analysis (Omnimet 4) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พื้นที่ทดสอบ 625×337 ไมครอน ทำการทดสอบชิ้นละ 5 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ย

#### การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบ ด้วยการทดสอบแบบ pull-off

ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 14916 (International standard, 1999) โดยชิ้นงานทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ชนิดแท่งทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. มีความสูง 45 มม. ชิ้นงานเจาะรูด้านข้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เพื่อเป็นรูใส่อุปกรณ์ยึดชิ้นงานขณะทดสอบแรงดึง จากนั้นเตรียมผิวชิ้นงานบริเวณหน้าตัด

ของชิ้นงานด้านตรงข้ามกับด้านที่เจาะรูด้วยเทคนิคการยิงกริต โดยใช้กริตอลูมิเนียมออกไซด์เบอร์ 24 mesh (740 ไมครอน) ความเร็วลม 120 psi (8 บาร์) หัวพ่นตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ระยะห่าง 80 มม. ใช้เวลายิงกริตชิ้นละ 30 วินาที ค่าความหยาบผิวหลังยิงกริตอยู่ในช่วง 4.7-5.3 ไมครอน แล้วพ่นเคลือบด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ด้วยเทคนิค EAS พ่นเคลือบหนาประมาณ 0.5 มม. แล้วติดกาว Scotch -Weld EC-2086 ของบริษัท 3M ซึ่งเป็นกาวชนิดพิเศษสำหรับทดสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบ โดยเฉพาะลงบนผิวเคลือบและชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมอีกชั้น วางชิ้นงานที่ติดกาวแล้วลงในอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน ชันสกรูยึดอุปกรณ์ด้วยแรงบิด 7 นิวตัน-เมตร แล้วนำไปอบที่ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงเอาออกจากอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน นำมาตั้งทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine model 4502 โดยผิวเคลือบจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละประเภทประกอบด้วยชิ้นทดสอบ 5 ชิ้น

#### การทดสอบการสึกหรอ

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอเป็นชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ชนิดรีดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมตันหน้าตัดกว้าง 25 มม. หนา 4 มม. ตัดให้ยาวท่อนละ 60 มม. ขัดผิวเพื่อปรับระนาบแล้วเตรียมผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค Grit blasting ก่อนพ่นเคลือบ จากนั้นนำไปพ่นเคลือบให้ได้ความหนา 0.8 มม. แล้วขัดออกด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 ให้ได้ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ช่วง 0.15-0.17 ไมครอน ความหนาผิวเคลือบที่เหลือประมาณ 0.5 มม. ทดสอบการสึกหรอด้วย ball on flat sliding wear test ตามมาตรฐาน ASTM C 133-95 (ASTM Standards, 1997) ด้วยเครื่อง Universal micro-tribometer model omega CN 76000 โดยผิวเคลือบจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละประเภทประกอบด้วยชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น สภาวะในการทดสอบแสดงใน Table 2

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

##### ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

Figure 2 ภาคตัดขวางของผิวเคลือบที่ผลิตจาก

**Table 2. Test parameters for the reciprocation ball-on-flat wear test.**

Pin tip radius	3.16mm.
Normal force	25.0 N
Stroke length	10.0 mm.
Oscillating frequency	5.0 Hz.
Test duration	1000 sec.
Ambient temperature	25±3°C
Lubrication	none

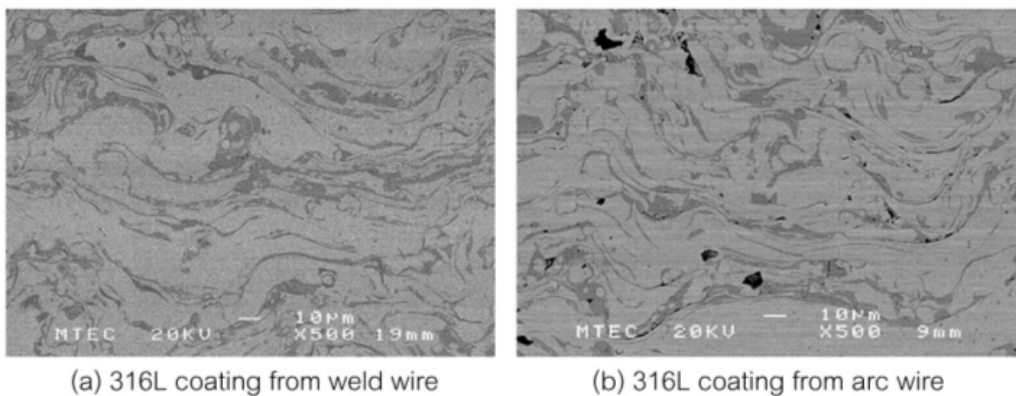
ลวดเชื่อมและลวดอาร์ก ผิวเคลือบทั้งสองชนิดประกอบด้วยชั้น splat หลายชั้นซ้อนกันอยู่ ซึ่งเกิดจากแรงดันก๊าซขับดันลวดที่กำลังหลอมเหลวจากการอาร์กให้ฉีกออกเป็นอนุภาคของวัสดุเคลือบแล้วถูกพ่นไปกระทบชิ้นงาน เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วจึงแข็งตัวเป็น splat ในขณะที่เป็นละอองโลหะเหลวอยู่ในอากาศ โครเมียมและธาตุอื่นๆ ในอนุภาคของวัสดุเคลือบจะทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนจากอากาศที่อัดและบรรยากาศรอบๆ จึงทำให้เห็นเป็นออกไซด์สีเทาอบๆ ขอบของ splat

เมื่อพิจารณาถึงขนาดของ splat ในแต่ละชิ้นงานทดสอบจะพบว่าผิวเคลือบจากลวดเชื่อมมีการกระจายขนาดของ splat มากกว่าผิวเคลือบจากลวดอาร์ก Figure 2 แสดงให้เห็นว่ามี splat จำนวนมากในผิวเคลือบจากลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กมากและมีออกไซด์ที่หนาหยาบล้อมรอบขอบ splat ในทางกลับกันจะพบว่า มีรูพรุนในผิวเคลือบจากลวดอาร์กมากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลวดอาร์กมีความ

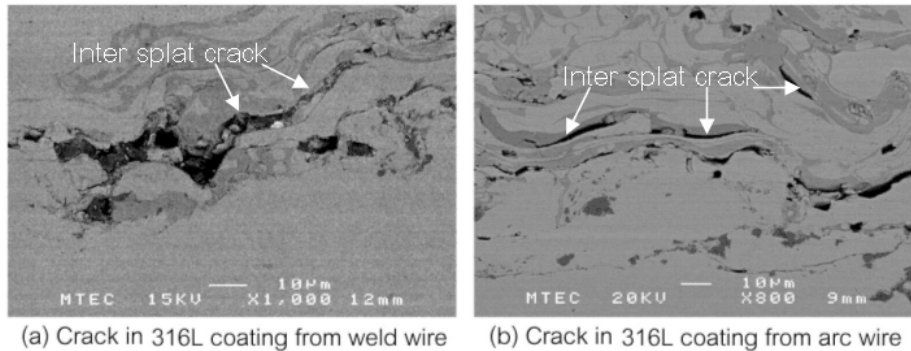
สามารถในการหลอมเหลวต่ำกว่า (lower degree of melting) หรือมีความสามารถในการไหลตัวขณะที่เป็นหยดวัสดุเคลือบต่ำกว่า (lower flowability) ผิวเคลือบจากลวดเชื่อม

Figure 3 แสดงรอยแตกระหว่าง splat ในผิวเคลือบซึ่งพบในผิวเคลือบจากลวดทั้งสองชนิด โดยรอยแตกจะเกิดและโตขยายออกจากออกไซด์ไปตามขอบ splat รอยแตกเหล่านี้เกิดจากการที่ splat เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิพื้นเคลือบลงมาที่อุณหภูมิห้อง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความเค้นในทางดึงในผิวเคลือบ บริเวณที่มีออกไซด์ในปริมาณมากจะมีความเค้นเกิดขึ้นจากการที่ค่าการขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของออกไซด์และ splat ต่างกันมาก จึงเกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน (Takeuchi, 1990) เป็นผลให้มีความเค้นในทางดึงสูงที่บริเวณใกล้ขอบ splat และในชั้นออกไซด์ ถ้าหากความเค้นมีค่าสูงมากพอก็จะสามารถเกิดรอยแตกในออกไซด์ได้ นอกจากนี้ลักษณะของออกไซด์ในผิวเคลือบก็จะส่งผลต่อรูปร่าง (Aspect ratio) ของรอยแตกที่เกิดขึ้น (Figure 3)

ที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงานมีรูพรุนให้เห็นอยู่บ้าง รูพรุนดังกล่าวเกิดจากความหยابผิวสูงที่มากจากการเตรียมผิวก่อนการพ่นเคลือบโดยการยิงกริต ขณะพ่นเคลือบ หยดวัสดุหลอมเหลวที่ตกกระทบบนผิวชิ้นงานอาจจะแข็งตัวก่อนที่จะไหลเข้าไปเติมเต็มในร่องของผิวที่ผ่านการยิงกริตเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนอย่าง



**Figure 2. Micrographs of the cross-section of the coatings from GMAW wire and arc wire, showing shape and size of the splat.**



**Figure 3.** Micrograph of the cross-section of the coatings, showing inter-splat cracks within the coating. The weld wire coating (a) contains clusters of oxide scattering unevenly on the splat boundaries. The resulting crack tends to have high aspect ratio. Whereas the arc wire coating (b), with thin oxides evenly spread out at the splat boundaries, contains cracks of smaller aspect ratio.

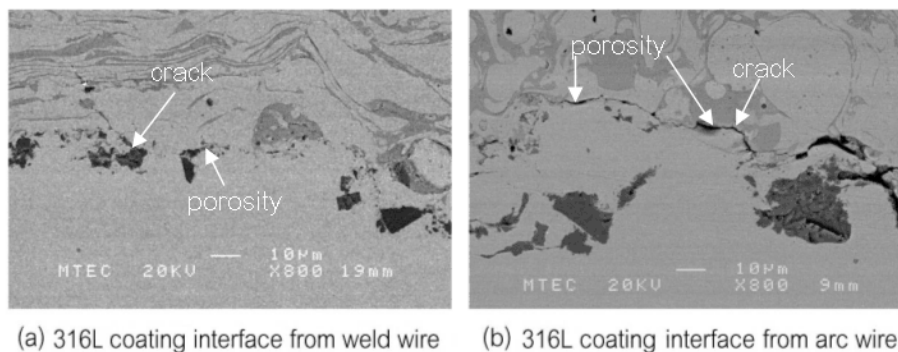
รวดเร็วจาก splat ไปสู่ชั้นงาน เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง การหดตัวเนื่องจากความร้อนของผิวเคลือบและชั้นงานที่ต่างกันมากจะทำให้มีความเค้นเกิดขึ้น ดังนั้น ใน Figure 4 จึงสังเกตเห็นว่าโครงสร้างผิวเคลือบที่ผลิตจากลวดอาร์กมีรอยแตกที่เริ่มต้นขึ้นจากรูพรุนและขยายไปตามรอยต่อระหว่างผิวเคลือบกับชั้นงาน

**ส่วนประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ**

ส่วนประกอบทางเคมีของลวดที่ใช้ในการพ่นเคลือบได้แสดงไว้ใน Table 3 จะเห็นว่าลวดทั้งสองชนิดมีปริมาณแมงกานีสและซิลิกอนที่ต่างกัน หน้าที่ของซิลิกอนในเหล็กกล้าไร้สนิมคือช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลตัว (flow-

ability) และช่วยให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์มีเสถียรภาพที่ดีขึ้นในทางกลับกัน แมงกานีสจะช่วยให้โครงสร้างออสเทนไนต์มีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามลวดทั้งสองชนิดมีปริมาณธาตุแมงกานีสและซิลิกอนต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ ประมาณ 0.7% และ 0.3% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณที่ต่างกันไม่มากนักไม่น่าจะส่งผลกระทบต่อมากพอที่จะทำให้สมบัติของผิวเคลือบจากลวดทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

ระหว่างการพ่นเคลือบด้วยอาร์กไฟฟ้า ผิวเคลือบจะถูกออกซิไดซ์ในบรรยากาศพ่นเคลือบ โครงสร้างผิวเคลือบที่ผลิตได้ประกอบด้วยสองเฟสหลัก คือเฟสที่มีฮีทาออนเป็นเนื้อหลักของผิวเคลือบและเฟสที่มีฮีทาแฉ่มเป็นออกไซด์ ดังแสดงใน Figure 2 ปริมาณส่วนประกอบทางเคมีของ



**Figure 4.** Micrograph of the cross-section of the coatings, showing porosity and cracks at the coating/substrate interfaces.

**Table 3. Average chemical compositions of the sprayed wires from the quantitative EDX analysis.**

	Chemical composition (Average wt. %)						
	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C
316L Weld wire AWS ER316LSi	63.3	19.4	11.1	2.8	2.0	1.2	< 0.05
316L Arc wire TAF 85T	67.0	17.5	10.6	2.7	1.3	0.9	< 0.05

**Table 4. Average chemical compositions of the arc wire and welding wire sprayed coatings, identifying different phases, from the quantitative EDX analysis.**

	Chemical composition (Average wt. %)						
	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C
316L Weld wire coating AWS ER316LSi	65.9	19.1	11.0	3.0	0.8	0.3	< 0.05
_Light grey	66.9	16.0	12.9	3.2	0.7	0.3	< 0.05
_Dark grey	68.9	22.1	5.3	2.9	0.7	0.1	< 0.05
316L Arc wire coating	69.3	17.6	9.7	2.5	0.6	0.2	< 0.05
_Light grey	70.1	15.8	10.6	2.5	0.8	0.2	< 0.05
_Dark grey	71.3	21.9	4.2	1.9	0.5	0.2	< 0.05

เฟสทั้งสองสามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิค EDX และค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุต่างๆ ได้แสดงไว้ใน Table 4 ซึ่งจะพบว่าผิวเคลือบที่ได้จากลวดทั้งสองชนิดมีปริมาณโครเมียมในเนื้อผิวเคลือบหรือในเฟสที่เทาอ่อนลดลง เนื่องจากโครเมียมจำนวนมากถูกดึงไปใช้ในการสร้างฟิล์มออกไซด์ประกอบของโครเมียมและเหล็ก (Cr-Fe oxide spinels) ส่วนแมงกานีสและซิลิกอนไม่ได้มีส่วนช่วยในการสร้างเฟสออกไซด์มากนัก แต่ปริมาณที่หายไปนั้นเนื่องจากธาตุทั้งสองชนิดมีความดันไอสูง (high vapour pressure) และอุณหภูมิที่ค่าความดันไอลด (low temperature at various pressures) ดังแสดงใน Table 5 ซึ่งจะทำให้ธาตุทั้งสองชนิดมีอัตราการระเหย (vaporization rate) ที่รวดเร็ว จึงทำให้สูญเสียไปในบรรยากาศได้ง่ายในขณะที่พ่นเคลือบ

**ปริมาณความพรุนและออกไซด์ในผิวเคลือบ**

ผลการวัดปริมาณรูพรุนและออกไซด์ในผิวเคลือบ

ได้แสดงไว้ใน Figure 5(a) ปริมาณออกไซด์ในผิวเคลือบทั้งสองมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์กสูงและปริมาณออกซิเจนที่มีในอากาศที่ใช้อัดในขณะพ่นก็มีมาก จึงทำให้ง่ายต่อการสร้างฟิล์มออกไซด์ ผิวเคลือบที่ได้จากลวดเชื่อมมีเปอร์เซ็นต์ของออกไซด์สูงกว่าผิวเคลือบที่ได้จากลวดอาร์กเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของวัสดุเคลือบที่ถูกพ่นออกไปมีขนาดเล็กกว่า ดังนั้นสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจึงมีมากกว่าทำให้ผิวเคลือบที่ได้จากลวดเชื่อมมีเปอร์เซ็นต์ออกไซด์สูงกว่า ดังแสดงใน Figure 2

ความพรุนของผิวเคลือบจากลวดอาร์กสูงกว่าความพรุนของผิวเคลือบจากลวดเชื่อมซึ่งตรงกับที่แสดงใน Figure 2 เนื่องจากผิวเคลือบมีปริมาณซิลิกอนและแมงกานีสที่เป็นส่วนประกอบต่ำกว่า ซึ่งซิลิกอนเป็นธาตุที่ช่วยทำให้การไหลตัวของ splat ดี ในขณะที่แมงกานีสทำให้เฟสออกไซด์เหนียวเหนียวมากขึ้น เมื่อมีปริมาณเฟส

**Table 5. Vapour pressures at various temperature of the elements contained in the stainless steel grade 316L. (Boyer, 1985)**

Element	Temperature at pressure 0.01 atm. (°C)	Temperature at pressure 0.1 atm. (°C)	Temperature at pressure 1.0 atm. (°C)	Evaporating temperature (°C)
Fe	2004	2316	2735	3000
Cr	1813	2097	2482	2665
Ni	2025	2321	2732	2730
Mo	3477	4027	4804	5560
Mn	1476	1750	2151	2150
Si	1867	2057	2287	2680

ออสเทนนิติกมากขึ้นใน splat ความสามารถในการแปรรูปจึงสูงขึ้น (higher formability) (Patchett, 1995) อย่างไรก็ตามเนื่องจากปริมาณ Mn ในลวดและผิวเคลือบจากลวดทั้ง 2 ประเภทมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก จึงอาจไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแปรรูปได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงได้นำ Schaeffler diagram เข้ามาช่วยในการตรวจสอบโครงสร้างของผิวเคลือบ ในการพ่นเคลือบด้วยการอาร์กไฟฟ้าจะพบว่าผิวชิ้นงานจะไม่หลอมเข้ามามีผสมกับเนื้อผิวเคลือบจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีจากสาเหตุนี้ แต่ระหว่างการพ่นเคลือบจะพบว่าธาตุแต่ละชนิดจะมีอัตราการสูญเสียจากการระเหยที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ผิวเคลือบที่ได้มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างจากลวดที่ใช้พ่นเคลือบ หลังจากพ่นเคลือบแล้วจึงนำข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของผิวเคลือบ 2 ชนิดมาเปรียบเทียบกัน ใน Schaeffler diagram จะพบว่าผิวเคลือบทั้ง 2 ประเภทมีโครงสร้างอยู่ในช่วงออสเทนไนต์และ 10-20% เฟอร์ไรต์ แต่ผิวเคลือบจากลวดอาร์กจะอยู่ใกล้เส้นรอยต่อระหว่างเฟสออสเทนไนต์ และเฟสออสเทนไนต์+มาร์เทนไซต์มากกว่า ซึ่งหมายความว่าผิวเคลือบจากลวดเชื่อมน่าจะมีความเสถียรของเฟสออสเทนไนต์สูงกว่า ด้วยเหตุนี้เมื่อหยดวัสดุเคลือบจากลวดเชื่อมกระทบกับผิวหน้าชิ้นงานจึงสามารถแปรรูปและแทรกเข้าไปเติมเต็มในบริเวณช่องว่างที่มีขนาดเล็กได้ง่ายกว่า จึงช่วยลดขนาดของรูพรุนได้มากกว่าผิวเคลือบที่ผลิตจากลวดอาร์ก เมื่อรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าก็จะช่วยเพิ่มความต้านทานการรับแรงกระแทกและการแตกหักของผิวเคลือบที่ผลิตจากลวดเชื่อม อย่างไรก็ตามในผิวเคลือบทั้งสองประเภทยังพบรอยแตกที่คาดว่า

อาจเริ่มต้นมาจากรูพรุนขนาดใหญ่และมีรอยแตกระหว่าง splat อยู่ด้วย ซึ่งปริมาณของรอยแตกจะถูกวัดรวมเป็นค่าปริมาณความพรุนในเนื้อผิวเคลือบด้วย ทำให้ปริมาณรูพรุนที่แสดงมีค่าสูงกว่าปริมาณจริงเล็กน้อย

#### ความแข็งของผิวเคลือบ

ความแข็งของผิวเคลือบทดสอบจากภาคตัดขวางของผิวเคลือบโดยใช้ชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค วัดความแข็งด้วยเครื่อง Micro Hardness Tester (MHT 10) หัวกด Vicker แรงกด 100 กรัม พบว่าผิวเคลือบที่ได้จากลวดอาร์กไฟฟ้าให้ค่าความแข็งผิวเคลือบที่สูงกว่าเนื่องจากการฟอร์มตัวเป็นออกไซด์ของเนื้อผิวเคลือบน้อยกว่า ในขณะที่ผิวเคลือบจากลวดเชื่อมมีปริมาณออกไซด์ที่มีความเปราะและยุบตัวง่ายสูง (เป็นออกไซด์ประกอบที่เกิดระหว่างการพ่นเคลือบ มีความแข็งไม่สูงมากและมักจะมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่) จึงมีความแข็งต่ำกว่า

#### การยึดเกาะของผิวเคลือบ

ความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบทั้งสองทดสอบโดยการทดสอบแรงดึง (pull-off test) Figure 5(b) ผิวเคลือบที่ผลิตจากลวดเชื่อมแสดงการยึดเกาะที่ดีกว่าและแข็งแรงกว่าผิวเคลือบจากลวดอาร์กเกือบ 20% ซึ่งเนื่องมาจากรูพรุนที่น้อยกว่าจึงเกิดรอยแตกจากรูพรุนได้น้อยกว่า ลักษณะการขาดของผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากลวดเชื่อม AWS ER316LSi เป็นการขาดแบบ adhesive คือขาดที่ระหว่างผิวเคลือบกับชิ้นงาน (Figure



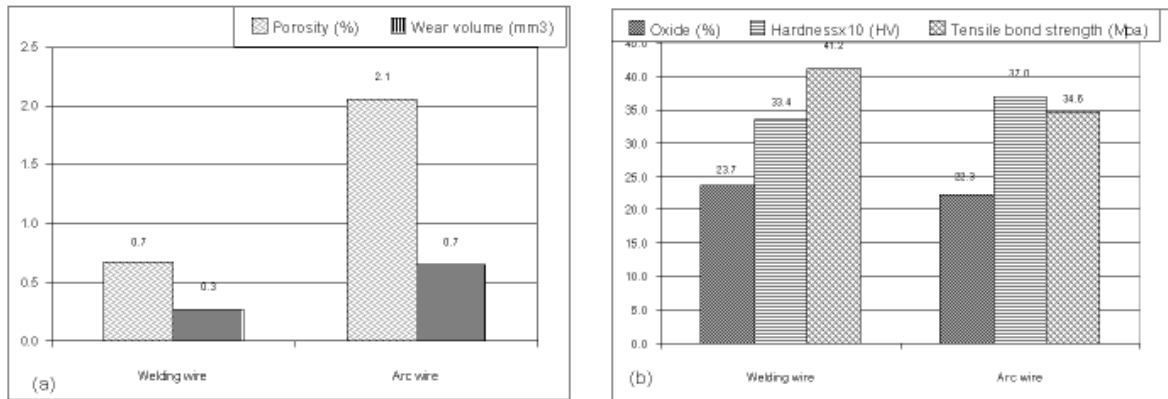


Figure 5. Graphs showing average values of physical and mechanical properties of the 316L coatings produced from the welding wire and from the arc wire.

6) ส่วนผิวเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากลวดอาร์ก ขาดแบบ cohesive คือ ขาดในเนื้อผิวเคลือบ เนื่องจากมีออกไซด์ระหว่าง splat ในเนื้อผิวเคลือบมากกว่า

**สมบัติด้านความต้านทานการสึกหรอ**

การทดสอบการสึกหรอทำโดยใช้การทดสอบแบบ reciprocating ball-on-flat sliding wear ในสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่น สภาวะในการทดสอบได้แสดงไว้ใน Table 2 อัตราการสึกหรอคำนวณเป็นปริมาณการสึกหรอ (wear volume) ตามมาตรฐาน ASTM C 133-95 จากผลการทดสอบพบว่าผิวเคลือบจากการพ่นเคลือบด้วยลวดอาร์กมีปริมาณการสึกหรอสูงกว่าผิวเคลือบจากลวดเชื่อมถึงแม้

ว่าความแข็งจะสูงกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากผิวเคลือบจากลวดอาร์กมีความพรุนที่รอยต่อระหว่าง splat สูง และมีแรงยึดเกาะของผิวเคลือบที่ต่ำกว่า Figure 7 แสดงผิวหน้าของผิวเคลือบจากลวดอาร์กหลังการทดสอบการสึกหรอ จะเห็นว่ามีความพรุนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่เทียบเท่ากับขนาดของ splat และมีลักษณะค่อนข้างกลม ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเป็นหลุมที่เกิดจากการหลุดของ splat ทั้งชั้น การสึกหรอจากการเสียดสีทำให้ splat เสี่ยงและหลุดจากผิวหน้าของผิวเคลือบออกมาทั้ง splat เนื่องจากมีค่าการยึดเกาะระหว่าง splat ต่ำ เพราะรูพรุนสูง จึงทำให้มีปริมาณการสึกหรอที่สูงกว่าผิวเคลือบจากลวดเชื่อมที่มีการหลุดของ splat น้อยกว่า ด้วยเหตุนี้ปริมาณออกไซด์

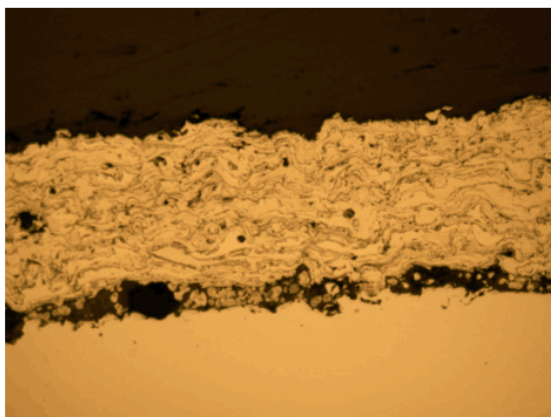


Figure 6. Optical micrograph showing the coating detachment at the coating/substrate interface after the pull-off testing.

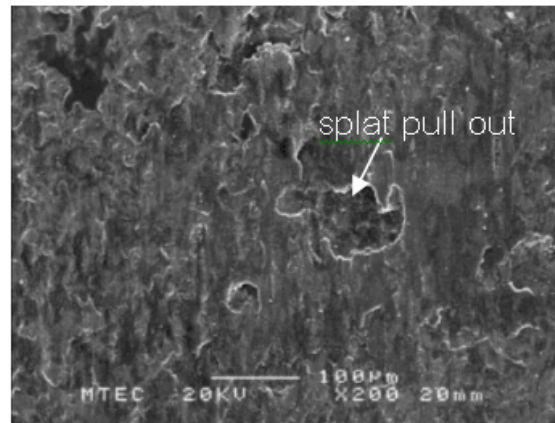


Figure 7. Wear surface of the arc wire coating showing splat pull out.

ปริมาณรูพรุนระหว่าง splat และค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบล้วนแต่มีส่วนในการกำหนดพฤติกรรม การสึกหรอของผิวเคลือบทั้งสิ้น

### สรุป

ผิวเคลือบที่ได้จากลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L และที่ได้จากลวดอาร์กไนเกรดเดียวกันมีโครงสร้างทางจุลภาคที่ต่างกันเล็กน้อย โดยเฉพาะด้านปริมาณรูพรุน ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่องค์ประกอบทางเคมีของลวด 2 ประเภทต่างกันทำให้ความสามารถในการไหลแทรกซึมเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างของอนุภาคที่หลอมและกึ่งหลอมขณะพ่นเคลือบก่อนที่จะแข็งตัวต่างกัน โครงสร้างผิวเคลือบทั้ง 2 ประเภทมีรอยแตกขนาดเล็กระบายตัวอยู่ในผิวซึ่งเป็นผลมาจากรูพรุนและออกไซด์ที่อยู่ในผิวเคลือบ ทั้งปริมาณรอยแตกและรูพรุนเหล่านี้ก็จะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบมีค่าลดลง ในด้านการทดสอบการสึกหรอพบว่าผิวเคลือบที่ผลิตจากลวดเชื่อมมีความต้านทานการสึกหรอแบบเลื่อนไถลที่ต่ำกว่าผิวเคลือบจากลวดอาร์กถึงแม้ว่าจะมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่าเล็กน้อย ความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำกว่านี้เกิดจากโครงสร้างผิวเคลือบที่มีความหนาแน่นสูงกว่า อย่างไรก็ตามผิวเคลือบจากลวดเชื่อมก็มีข้อดีดีกว่าผิวเคลือบจากลวดอาร์กตรงที่มีการกระจายขนาดของ splat ที่สูงกว่าทำให้มีปริมาณออกไซด์สูงกว่าซึ่งอาจทำให้ผิวเคลือบไม่สามารถรับแรงกระทำที่ความเค้นสูง เช่น แรงกระแทก ได้ดีเท่าผิวเคลือบที่ผลิตจากลวดอาร์ก

เทคนิคการทดสอบสมบัติพื้นฐานที่แสดงไว้ในบทความชุดนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการทดสอบเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุสิ้นเปลืองในการพ่น

เคลือบด้วยอาร์กไฟฟ้า และเป็นการเสนอทางเลือกที่ประหยัดกว่าให้กับภาคอุตสาหกรรม

### เอกสารอ้างอิง

- Boyer, H.E. and Gall, T.L. (Eds.) 1985. Metals Handbook: Desk Edition, American Society for Metals: 1.54. Friction and Wear Testing-Source Book: Selected References from ASTM Standards and ASM Handbooks 1997. ASM International: 153-160.
- Boyer, H.E. and Gall, T.L. (Eds.), 1992. Thermal Spray Coatings, Metals Handbook: Desk Edition, American Society for Metals, USA, p. 29.29 International standard, 1999. ISO 14916 Thermal spraying-Determination of tensile adhesive strength, Switzerland
- Kelkar, M., Hussary, N., Schein, J. and Heberlein, J., 1998. Optical diagnostics and modeling of gas and deplet flow in wire arc spraying, Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21<sup>st</sup> Century, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, ASM International: 329-334.
- Liu, X., 2001. Arc Spraying in China, J. Thermal Spray Technology, 10(1): 40-43.
- Patchett, B.M. 1995. The Metals Blue Book: Welding Filler Metals, CASTI Publishing Inc. and American Welding Society: 77-81.
- Takeuchi, S., Ito, M. and Takeda, K. 1990. Modelling of residual stress in plasma-sprayed coatings: Effect of substrate temperature, Surf. Coat. Technol., 43-44: 426-435.
- Watanabe, T., Wang, X., Heberlein, J. and Pfender, E., 1996. Thermal Spray: Industrial Applications, Proceedings of the 9<sup>th</sup> National Thermal Spray Conference, ASM International: 577-583.