

การศึกษาอุณหภูมิและโครงสร้างจุลภาคของกระบวนการเคลือบอลูมิเนียมลงบนเซรามิกด้วย แรงเสียดทาน

A study on microstructure and process temperature of aluminium coating on ceramic by friction surfacing process

ธรรมะสุข มิ่งเมือง¹ และ สุขอังคณา แถลงกันท์²

¹ภาควิชาเครื่องกลและการผลิต, คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระ
เกียรติ จังหวัดสกลนคร 59 หมู่ 1 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000, E-mail:

Dhammasook.m@ku.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น ขอนแก่น

E-mail: sukangkana@kku.ac.th

Dhammasook Mingmuang¹ and Assoc. Prof. Dr. Sukangkana Talangkun²

¹Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kasetsart
University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, Muang Sakon Nakhon 47000

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand

วันรับบทความ วันที่ 24 สิงหาคม 2564

วันแก้ไขบทความ วันที่ 30 กันยายน 2564

วันตอบรับบทความ วันที่ 10 ตุลาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบอลูมิเนียม AA1100 ลงบนแผ่นเซรามิกที่ผลิตจากดินขาวด้วยกระบวนการเคลือบด้วยแรงเสียดทาน โดยทำการเคลือบที่ความเร็วรอบมีค่าเท่ากับ 8000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตามแนวแกนของวัสดุเดิมมีค่าเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อนปรัณภูมิมีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร, อัตราป้อนในแนวระนาบมีค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อนาที และมุมในการเคลือบมีค่าเท่ากับ 11 องศา โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นความประสบความสำเร็จในการเคลือบ โดยไม่เกิดการแตกร้าวระหว่างกระบวนการ ชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมสามารถยึดติดกับแผ่นเซรามิกได้อย่างแข็งแรงไม่เกิดการหลุดลอก ผลจากการศึกษาขนาดและพฤติกรรมของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการเคลือบมีค่าเท่ากับ 170.3 องศาเซลเซียสซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวอยู่ในช่วงอุณหภูมิขึ้นรูปเย็น พฤติกรรมของอุณหภูมิมักจะขึ้นลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ อันเป็นผลจากปรากฏการณ์ติดลื่น จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าหลักฐานแสดงให้เห็นถึงเนื้อของวัสดุเดิมที่ผ่านกระบวนการเลื่อนหลุดและสะสมตัวกันจนกลายเป็นชั้นผิวเคลือบ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นผิวเคลือบพบว่าชั้นผิวเคลือบมีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 1.168 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: การเคลือบด้วยแรงเสียดทาน, อลูมิเนียม, เซรามิก

ABSTRACT

The objective of this article was to study microstructure and process temperature of aluminium AA1100 coating on kaolin substrate by friction surfacing process with 8000 rpm of rotation speed, 0.6 mm/min of axial feed rate, 0.5 mm of primary depth of cut, 3 mm/min of horizontal feed rate and 11 degree of coating angle. It was successfully to coat aluminium AA1100 on ceramic substrate by friction surfacing process. Cracks of ceramic substrate and peeling of aluminium coating layer were not observed. It was founded that coating temperature increased and decreased rapidly and continuously until the end of coating process due to stick-slip phenomenon. The average coating temperature was 170.3 degree Celsius. So, this condition of coating process was classified as cold working process. Furthermore, the evidence of slippage and deposition of aluminium on coating layer was occurred. In addition, the average thickness of coating layer was 1.168 micrometres.

KEYWORDS: friction surfacing process, aluminum, ceramic

1. บทนำ

เทคโนโลยีการเคลือบโลหะลงบนเซรามิกถูกประยุกต์ใช้อย่างมากมายในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังปรากฏในรายงานของ Hong He, et al. (2007) และ B. Mouawad, et al. (2014) รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนทางความร้อนอย่างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ดังปรากฏในรายงานของ Zheng, X. F., et al. (2014)

ด้วยคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี รวมไปถึงจุดหลอมเหลวที่ค่อนข้างสูงของทองแดง ด้วยเหตุนี้แผ่นเซรามิกเคลือบด้วยทองแดง (Direct bond copper: DBC) จึงได้ถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ดังปรากฏในรายงานของ Schulz-Harder, J. (2003), K. Arai, et al. (2019) และ Wang, Y. T., et al. (2020)

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีรายงานถึงการเกิดความเสียหายของแผ่น DBC อันเนื่องมาจากผลของความเค้นร้อนแบบเป็นคาบ (Thermal cyclic load) ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของเซรามิกและเกิดการหลุดลอกของแผ่นทองแดงภายหลังจากการใช้งานไปได้ชั่วเวลาหนึ่ง ดังปรากฏในรายงานของ Dong, G., et al. (2010) และ Camilleri, D., et al. (2012)

นอกจากนี้ Hsueh, C. H., (1985) ได้รายงานถึงกลไกการเกิดความเค้นร้อน (Thermal stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมต่อทองแดงเข้ากับอลูมินา ผลจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างทองแดงและอลูมินา หลังจากการเย็นตัวของวัสดุทั้งสอง การหดตัวของอลูมินาและทองแดงจะเกิดขึ้น แต่การหดตัวจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระเป็นผลสืบเนื่องมาจากบริเวณที่เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างทองแดงและอลูมินา ดังนั้นจึงทำให้มีความเค้นตกค้าง (Residual stress) เกิดขึ้น

เพื่อที่จะลดปริมาณความเค้นร้อนที่เกิดขึ้น การพิจารณาเลือกใช้โลหะที่มีความเค้นที่จุดครากต่ำจึงถูกนำมาพิจารณาในการประยุกต์ใช้ในการเชื่อมต่อโลหะเข้ากับเซรามิก ดังปรากฏในรายงานของ Yamada, T., et al. (1990) และ Suganuma, K. (2013)

ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาแผ่นเซรามิกเคลือบด้วยอลูมิเนียม (Direct bond aluminium: DBA) ขึ้นมา ด้วยสาเหตุจากค่าความเค้นที่จุดครากของอลูมิเนียมที่ต่ำกว่าทองแดง จึงส่งผลให้ค่าความเค้นร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานที่อุณหภูมิสูงของ DBA มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่น DBC ดังปรากฏในรายงานของ Kraft, S. et al., (2012) และ Lei, T.G., et al. (2009)

แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการสร้างพันธะเชื่อมระหว่างโลหะและเซรามิกด้วยกระบวนการบัดกรีที่สถานะของเหลว (Soldering) ค่อนข้างทำได้ยากและค่อนข้างมีความซับซ้อนหลายกระบวนการ เนื่องจากต้องมีการเตรียมชิ้นผิวโลหะบางบนผิวเซรามิก (Metalizing) ก่อนการบัดกรี และได้การเชื่อมต่อที่ไม่ค่อยมีความแข็งแรงมากนัก ดังปรากฏในรายงานของ Lee, S. K., et al. (2007) และ Md Arshad, M. K., et al. (2006)

Mel. M. Schwartz, (1990) ได้รายงานถึงกระบวนการสร้างชั้นผิวเคลือบโลหะบนผิวเซรามิกด้วยกระบวนการเคลือบไอสารทางฟิสิกส์และทางเคมี (Physical/Chemical vapor deposition) โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถสร้างชั้นผิวเคลือบโลหะบนเซรามิกได้ แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวมีต้นทุนอุปกรณ์ที่ค่อนข้างสูง

จากรายงานของ Wang, Y. T., et al. (2020) ได้กล่าวถึงกระบวนการเคลือบที่สถานะของแข็งด้วยวิธีการกดด้วยความร้อน (Hot press bonding) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างพันธะระหว่างโลหะและเซรามิกที่สถานะของแข็ง (Solid state bonding) โดยนำแผ่นฟิล์มโลหะไปทำการให้กดลงบนเซรามิกที่อุณหภูมิสูง กระบวนการแพร่ในสถานะของแข็ง (Diffusion bonding) จะทำให้พันธะระหว่างโลหะและเซรามิกเกิดขึ้น วิธีการดังกล่าวให้การเชื่อมต่อที่ค่อนข้างแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวมีต้นทุนอุปกรณ์และพลังงานที่ค่อนข้างสูงรวมถึงใช้เวลาค่อนข้างนานในการเชื่อมต่อ

จากรายงานข้างต้นแสดงให้เห็นว่า กระบวนการสร้างพันธะระหว่างโลหะและเซรามิกที่สถานะของแข็งจะให้พันธะระหว่างโลหะและเซรามิกที่ค่อนข้างแข็งแรง และจากรายงานของ Noh, M. Z., et al (2008) และ Seli, H., (2010) แสดงให้เห็นถึงกลไกการสร้างพันธะระหว่างโลหะและเซรามิกในสถานะของแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (friction welding) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างพันธะระหว่างโลหะและเซรามิกที่สถานะของแข็ง การเชื่อมต่อที่แข็งแรงและหลักฐานของการแพร่ในสถานะของแข็งระหว่างโลหะและเซรามิกได้ปรากฏขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะและเซรามิก

นอกจากนี้ Gandra, J., et al (2014) ได้รายงานถึงการพัฒนาระบบการเคลือบด้วยแรงเสียดทาน (Friction surfacing) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ต่อยอดมาจากกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน แต่ได้ทำการปรับเปลี่ยนวิธีการป้อนแรงเข้าสู่ชิ้นงานจนสามารถเคลือบผิวโลหะลงบนชิ้นงานเป้าหมายได้ โดยนอกจากข้อดีในเรื่องความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมต่อวัสดุด้วยแรงเสียดทานแล้ว กระบวนการดังกล่าวมีข้อดีคือมีต้นทุนอุปกรณ์ที่ค่อนข้างต่ำและมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้กระบวนการเคลือบด้วยแรงเสียดทานนำมาใช้ในการเคลือบโลหะลงบนเซรามิก

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมอลูมิเนียมลงบนเซรามิกด้วยแรงเสียดทาน

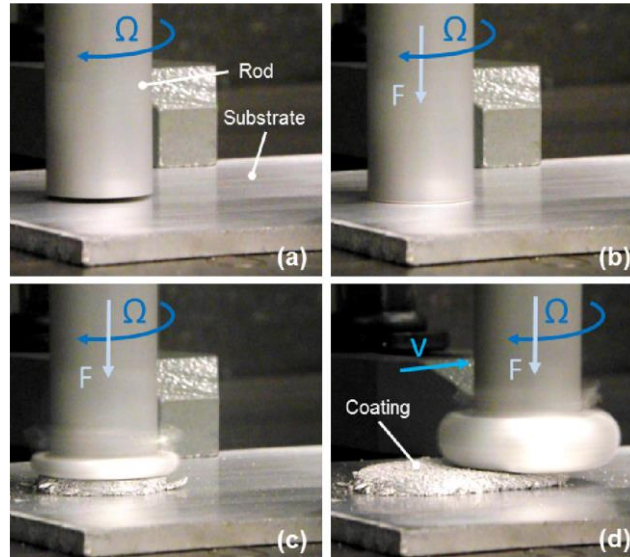
2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบโลหะที่ผ่านการเคลือบลงบนเซรามิกด้วยกระบวนการเคลือบด้วยแรงเสียดทาน

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยแรงเสียดทาน (Friction surfacing)

จากรายงานของ Gandra, J., et al (2014) ได้อธิบายถึงรายละเอียดของกระบวนการเคลือบด้วยแรงเสียดทาน โดยกระบวนการดังกล่าว เป็นกระบวนการเคลือบวัสดุหนึ่งลงบนอีกวัสดุหนึ่งโดยอาศัยการเกิดความร้อนเนื่องจากแรงทางกลและกระบวนการแพร่ในสถานะของแข็ง โดยกระบวนการดังกล่าวได้แบ่งออกเป็นสองส่วนย่อยคือกระบวนการเสียรูปเริ่มต้น (Initial deformation state) และกระบวนการสะสมชั้นผิวเคลือบ (Deposition state) โดยเหมือนทำการหมุนวัสดุเติม (Consumable rod) และกดด้วยความเค้นลงบนแผ่นวัสดุเป้าหมาย (Substrate) ที่ต้องการเคลือบดังแสดงในรูปที่ 1(a) และ 1(b) ความร้อนอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสจะทำให้วัสดุเติมเกิดการเสียรูปและมีคุณสมบัติไหลตัวได้

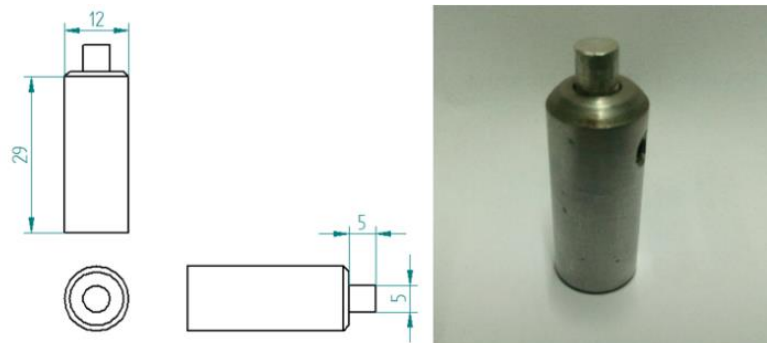
โดยคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่าการไหลตัวแบบพลาสติก (Viscoplasticity) ดังแสดงในรูปที่ 1(c) และเมื่อถึงจุดหนึ่งวัสดุเดิมจะเกิดการหลุดร่อนออกมาจากวัสดุเดิม ผลของความเค้นกดและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดกระบวนการขัดประสานทางกล (Mechanical interlocking) โดยวัสดุเดิมที่สามารถไหลตัวได้จะแทรกตัวไปตามผิวของแผ่นวัสดุเป้าหมายและเกิดกระบวนการแพร่ในสถานะของแข็ง โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกิดการสะสมตัวเป็นชั้นผิวเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 1(d)



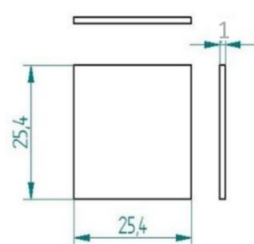
รูปที่ 1 กระบวนการเคลือบอลูมิเนียม AA6082-T6 ลงบน แผ่นอลูมิเนียม AA2024-T3 ด้วยแรงเสียดทาน (a) เริ่มการหมุนวัสดุเดิม (b) วัสดุเดิมสัมผัสกับแผ่นวัสดุเป้าหมาย (c) กระบวนการเสียรูปเริ่มต้น (d) กระบวนการสะสมชั้นผิวเคลือบ ที่มา : Gandra, J., et al (2014)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุเดิมที่ใช้คืออลูมิเนียมบริสุทธิ์ AA1100 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร โดยผ่านการกลึงและจับยึดเข้ากับอุปกรณ์จับยึดดังแสดงในรูปที่ 2 ในขณะที่เซรามิกที่ใช้จะมีความหนา 1 มิลลิเมตรและมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 1 นิ้ว วัสดุที่ใช้ทำเซรามิกเป็นดินขาวที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยคุณสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียมและเซรามิกได้ถูกแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2



รูปที่ 2 อลูมิเนียม AA1100 ที่ผ่านการกลึงและจับยึดเข้ากับอุปกรณ์จับยึด ที่มา : ผู้จัดทำ



รูปที่ 3 แผ่นเซรามิกดินขาวที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเคลือบ ที่มา : ผู้จัดทำ

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุเดิม

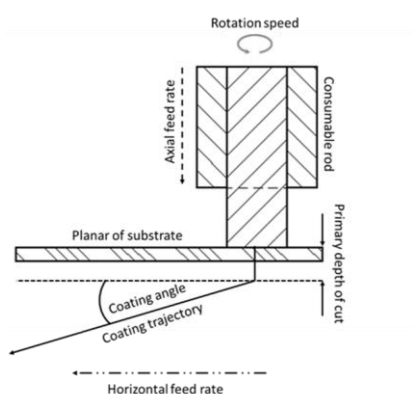
Element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni
%	98.8364	0.1247	0.60723	0.02801	0.13132	0.00044	0.013	0.008	0.16843	0.04281

Element	Sb	Pb	Sn	Na	Ca	Bi	Zr	V	Co	Cd
%	0.01196	0.01427	0.00313	0.00042	0.00062	0.00052	0.001	0.00463	0.00178	0.00069

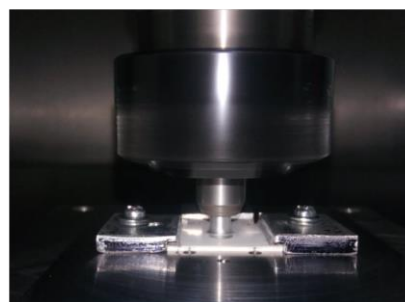
ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของแผ่นเซรามิก

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Loss of ignition
%	54.5	33.9	0.24	0.25	0.65	1.66	1.96	0.02	6.09

4.2 กระบวนการเคลือบจะทำการเคลือบโดยใช้เครื่อง CNC milling machine รุ่น MIKRON HAAS VCE 750 โดยกำหนดให้ความเร็วรอบในการเคลือบ(Rotation speed) มีค่าเท่ากับ 8000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตามแนวแกนของวัสดุเดิม (Axial feed rate) มีค่าเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อนปฐมภูมิ (Primary depth of cut) มีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อนในแนวระนาบ (Horizontal feed rate) มีค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อนาที และมุมในการเคลือบ (Coating angle) มีค่าเท่ากับ 11 องศา โดยทำการเคลือบเป็นระยะทาง 6 มิลลิเมตรจากจุดเริ่มต้น จากรูปที่ 4(a) แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเคลือบ และภาพที่ 4(b) แสดงกระบวนการเคลือบ



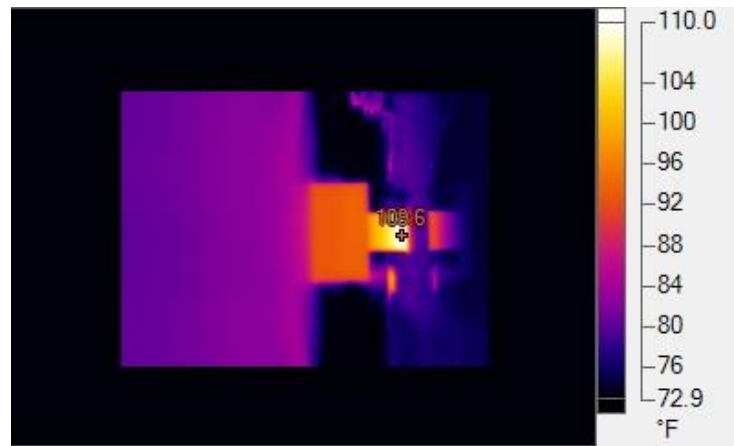
(a)



(b)

รูปที่ 4 (a) ภาพแสดงปัจจัยในการเคลือบ (b) กระบวนการเคลือบอลูมิเนียมลงบนเซรามิกด้วยแรงเสียดทาน

4.3 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบจะทำการตรวจสอบโดยใช้กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด Fluke Ti400 ในการตรวจจับความร้อน และทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม smart view ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การบันทึกภาพอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบ ที่มา : ผู้จัดทำ

4.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชั้นผิวเคลือบตรวจสอบโดยใช้กล้อง Stereo microscope OLYMPUS-SZX9 ในขณะที่การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope) รุ่น FEI, Model: Helios NanoLab G3 CX ในการวิเคราะห์

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบ

จากการตรวจสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมขึ้นลงสลับไปมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มคั้นจนจบกระบวนการ โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในช่วงกระบวนการเสียรูปเริ่มต้นและกระบวนการสะสมชั้นผิวเคลือบดังแสดงในรูปที่ 6 โดยพฤติกรรมของอุณหภูมิดังกล่าวได้เรียกว่าปรากฏการณ์ติดลิ้น (stick-slip Phenomenon) ซึ่งปรากฏในรายงานของ Jiménez, A. E., & Bermúdez, M. D., (2011) โดยความแตกต่างของแรงแรงเสียดทานจลน์ที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างกระบวนการเคลือบจะแสดงผลออกมาในรูปเสียง, อุณหภูมิและความร้อน ซึ่งในที่นี้แสดงให้เห็นถึงความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบ โดยในช่วงที่อุณหภูมิมีพีคที่สูงขึ้นแสดงถึงค่าแรงเสียดทานจลน์ที่สูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิลดลงค่าแรงเสียดทานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจึงลดลงตามไปด้วย

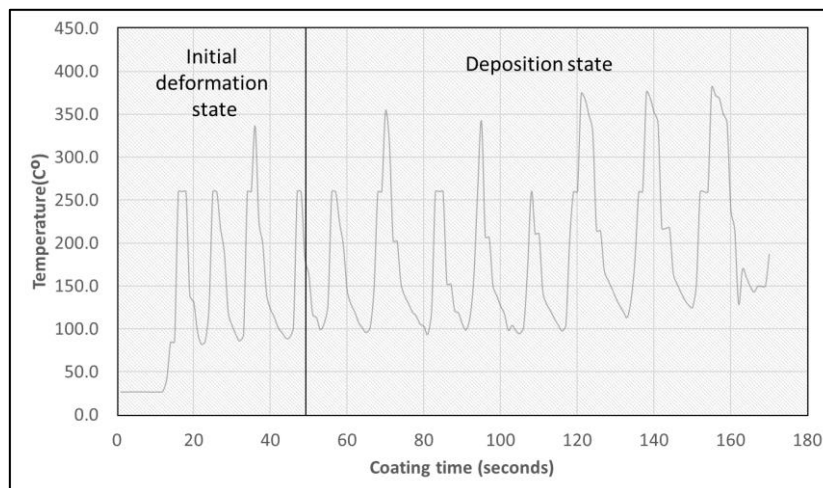
จากรายงานของ Rafi, H. K., et al (2011), Bedford, G. M., et al (2001), Fukakusa, K. (1996) และ Gandra, J., et al (2012) ได้กล่าวถึงผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบทำให้เกิดกระบวนการทางความร้อนเชิงกล (Thermomechanical process) โดยเมื่อวัสดุเดิมได้รับอิทธิพลจากความเค้นเฉือนและความเค้นกดจะทำให้ให้วัสดุบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีพฤติกรรมการไหลตัวแบบพลาสติก โดยพฤติกรรมดังกล่าวจะอยู่ในช่วงการติด (Stick) ของกระบวนการติดลิ้น (Stick-slip phenomenon) ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น

เมื่อถึงจุดหนึ่งที่อุณหภูมิสูงมากพอวัสดุเดิมที่มีคุณสมบัติการไหลตัวแบบพลาสติกจะเกิดการเลื่อนหลุดและเชื่อมต่อกับเซรามิกจนเกิดเป็นชั้นผิวเคลือบ ด้วยเหตุนี้แรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสจะลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบลดลงด้วยเช่นกัน โดยพฤติกรรมดังกล่าวจะอยู่ในช่วงการติด (Slip) ของกระบวนการติดลิ้น (Stick-slip phenomenon) ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบส่วนมากได้ถูกถ่ายเทไปยังชั้นผิวเคลือบ ดังปรากฏในรายงานของ Rafi, H. K., et al (2011) ประกอบกับข้อมูลนิยามมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี ($\lambda = 222 \text{ W/m-K}$) จึงทำให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในขณะเดียวกัน เนื้อวัสดุบางส่วนจะถูกดัน

ไปยังบริเวณขอบของลวดเดิมทำให้เกิดเป็นครีบก้นขึ้นมา และเมื่อเนื้อวัสดุชุดใหม่ถูกความเค้นกดดันเข้ามา กระบวนการเคลื่อนที่ จะเกิดขึ้นซ้ำอีกครั้งอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งจบกระบวนการเคลือบ

ขนาดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบทำให้ทราบคุณสมบัติของวัสดุ โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบข้างต้นส่วนมากจะอยู่ในช่วงจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิขึ้นรูปเย็น (Cold working temperature) หรือช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิตกผลึกใหม่ (Recrystallisation temperature) โดยช่วงอุณหภูมิตกผลึกใหม่ของอลูมิเนียมมีค่าประมาณ 300 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตาม บางช่วงเวลาของกระบวนการเคลือบ อุณหภูมิของกระบวนการได้เพิ่มขึ้นไปถึงอุณหภูมิขึ้นรูปร้อน (Hot working temperature) แต่เป็นเพียงช่วงเวลาไม่นานพอที่จะเกิดกระบวนการตกผลึกใหม่ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการเคลือบมีค่าเท่ากับ 170.3 °C ประกอบกับอลูมิเนียมมีโครงสร้างแบบ FCC จึงมีช่วงการบกพร่องของผลึกแบบสแตคกิ้งฟอลต์ (stacking fault defect) ที่ค่อนข้างกว้างทำให้อลูมิเนียมมีค่าพลังงานสแตคกิ้งฟอลต์ (Stacking fault energy) ที่ค่อนข้างสูง ($\sim 170 \text{ mJ m}^{-2}$) ดังปรากฏในรายงานของ Polmear, I., et al (2017) ทำให้กระบวนการคืนตัวของดิสโลเคชัน (Dislocation recovery) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้โอกาสที่จะเกิดการสะสมพลังงานอันเนื่องมาจากการเสียรูปของวัสดุ (Internal strained energy) เกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นอลูมิเนียมจึงมีโอกาสเกิดการตกผลึกใหม่จากการเสียรูปได้ค่อนข้างยาก แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่อัตราการเสียรูป (Strain rate) มีค่าสูงมากพอจนเกิดปรากฏการณ์เสียรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรง (Severe plastic deformation) ดังปรากฏในรายงานของ Sakai, T., et al (2014) อลูมิเนียมจะมีโอกาสเกิดการตกผลึกใหม่ได้เช่นกัน

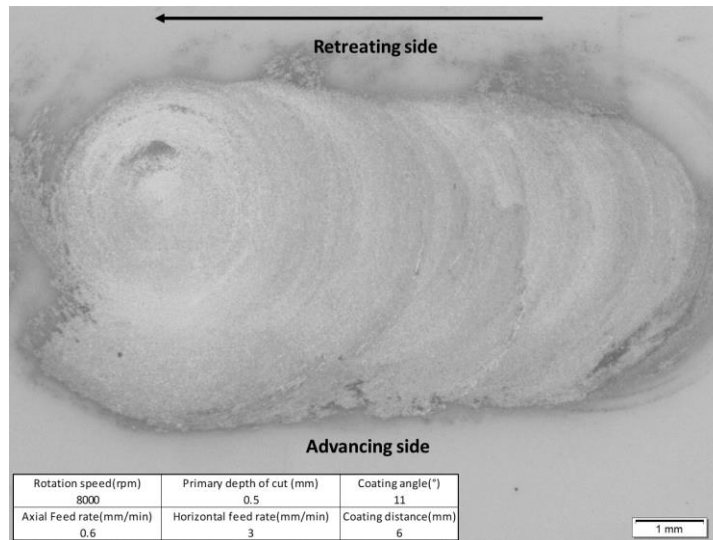
ผลของกระบวนการขึ้นรูปเย็นจะทำให้ค่าความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation densities) ของอลูมิเนียมที่ชั้นผิวเคลือบมีค่าสูงกว่าอลูมิเนียมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเคลือบและส่งผลต่อเนื่องให้ค่าความแข็งแรงของชั้นผิวเคลือบมีความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิเนียมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเคลือบด้วยเช่นกัน ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวของอลูมิเนียมส่งผลต่อระดับของความเค้นร้อนที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่น่าขึ้นงานไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุลดลงดังปรากฏในรายงานของ Kovács-Csetényi, E. (1964) ดังนั้นการลดความหนาแน่นของดิสโลเคชันลงด้วยกระบวนการอบคลายตัว (Anneal) หรือการปรับระดับของปัจจัยให้เกิดปรากฏการณ์เสียรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรง เพื่อให้เกิดกระบวนการตกผลึกใหม่ จึงเป็นเรื่องที่ควรพิจารณา



รูปที่ 6 พฤติกรรมของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลือบโลหะลงบนเซรามิกด้วยแรงเสียดทาน ที่มา : ผู้จัดทำ

5.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชั้นผิวเคลือบ

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นรูปแบบของการกระจายตัว (Advancing side) และการหมุนวนซ้ำ (Retreating side) ซึ่งเป็นผลจากการไหลตัวของวัสดุเติมระหว่างทำการเคลือบ ดังปรากฏในรายงานของ Sakihama, H., et al (2003) และ Rafi, H. K., et al (2011) โดยวัสดุเติมที่มีคุณสมบัติการไหลตัวแบบพลาสติกเมื่อหลุดร่อนออกจากลวดเติมแล้วบางส่วนหมุนวนซ้ำไปมาจะกระจุกตัวอยู่ฝั่งเดียว ในขณะที่วัสดุเติมที่หลุดร่อนบางส่วนจะกระจายตัวเต็มพื้นที่ของชั้นผิวเคลือบ โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในฝั่งหมุนวนซ้ำจะต่ำกว่าฝั่งกระจายตัวเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างจุลภาคของของชั้นผิวเคลือบทั้งสองฝั่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของชั้นผิวเคลือบ ที่มา : ผู้จัดทำ

รูปที่ 7 แสดงให้เห็นโครงสร้างมหภาคของชั้นผิวเคลือบ โดยชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมสามารถยึดติดแน่นกับแผ่นเซรามิกได้เป็นอย่างดี ไม่ปรากฏการหลุดลอกของชั้นผิวเคลือบ ในขณะที่ทำการเคลือบไม่ปรากฏการแตกร้าวขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบ

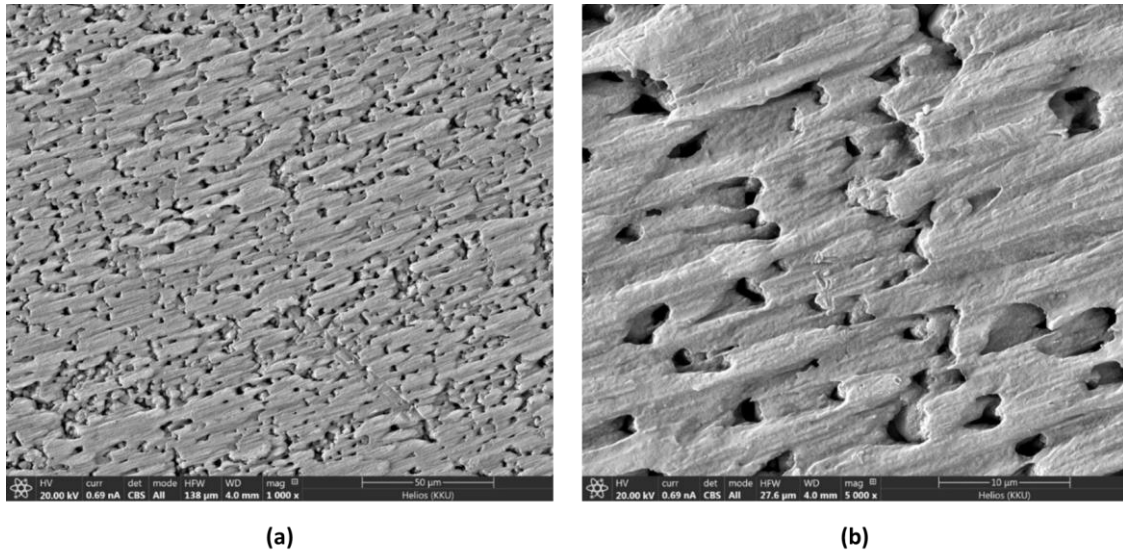
5.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบ

จากรูปที่ 8(a) และ 8(b) แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบลงบนแผ่นเซรามิกด้วยแรงเสียดทาน โดยทำการบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) โดยทำการบันทึกที่กำลังขยาย 1000X และ 5000X จากรูปแสดงให้เห็นถึงเนื้อวัสดุเติมที่ถูกกระทำด้วยความเค้นกดและความเค้นเฉือนจนมีพฤติกรรมการไหลตัวแบบพลาสติกที่ผ่านการหลุดร่อนและเชื่อมต่อกับเซรามิกซ้อนทับกันอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นชั้นผิวเคลือบ

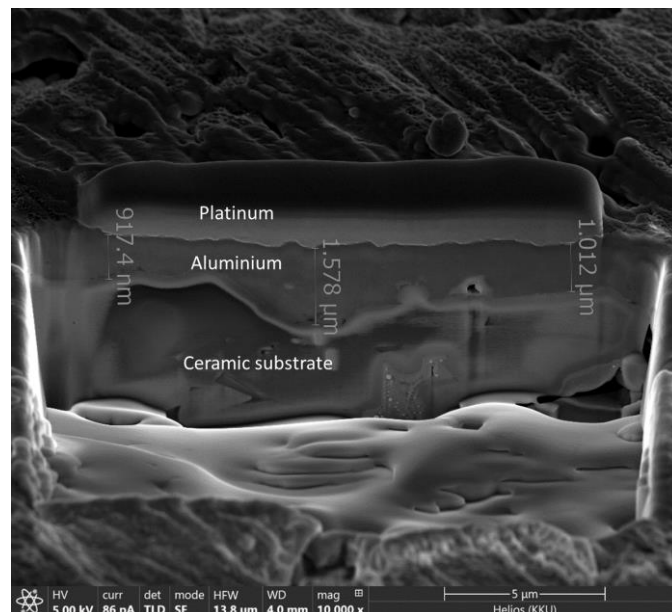
จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเซรามิกและชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียม ซึ่งผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยเทคนิคโฟกัสไอออนบีม(Focused Ion Beam : FIB) และทำการบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) กำลังขยาย 10000x ชั้นผิวของวัสดุอ้างอิง(Platinum) และ เซรามิก(Ceramic substrate) โดยจากภาพแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมและเซรามิกที่มีความแนบชิดกัน จากรายงานของ Uday, M. B., et al (2016) และ Fauzi, M. A., et al (2010) ได้กล่าวถึงกระบวนการเชื่อมต่ออลูมิเนียมเข้ากับเซรามิกด้วยแรงเสียดทานเป็นการเชื่อมต่อในสถานะของแข็ง โดยอาศัยกลไกการแพร่ในสถานะของแข็ง

จากภาพที่ 9 ได้แสดงให้เห็นถึงขอบเขตความหนาของชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมอย่างชัดเจน โดยค่าความหนาของเซรามิกมีผลกับความหนาของชั้นผิวเคลือบ ซึ่งสังเกตได้จากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมกับวัสดุอ้างอิงค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ ในขณะที่พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมกับเซรามิกค่อนข้างมีความแปรปรวนซึ่งเป็นผลจากความหนาของเซรามิกก่อนการเคลือบ

จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นผิวเคลือบค่อนข้างมีความบาง โดยค่าความหนาของชั้นผิวเคลือบที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1.012 ไมโครเมตร, 1.578 ไมโครเมตร และ 917.4 นาโนเมตร โดยค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นผิวเคลือบมีความหนาเท่ากับ 1.168 ไมโครเมตร ซึ่งชั้นผิวเคลือบที่มีความบางจะช่วยสนับสนุนให้นำไฟฟ้าและถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 8 (a) โครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบที่กำลังขยาย 1000X (b) โครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบที่กำลังขยาย 5000X ที่มา : ผู้จัดทำ



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาของชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมที่กำลังขยาย 10000x ที่มา : ผู้จัดทำ

6. สรุปผลการวิจัย

6.1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้กระบวนการเคลือบด้วยแรงเสียดทานในการเคลือบอลูมิเนียม AA1100 เคลือบลงบนแผ่นเซรามิกดินขาวเผา โดยทำการเคลือบที่ความเร็วรอบ (Rotation speed) มีค่าเท่ากับ 8000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตามแนวแกนของวัสดุเดิม (Axial feed rate) มีค่าเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะป้อนปฐมภูมิ (Primary depth of cut) มีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อนในแนวระนาบ (Horizontal feed rate) มีค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อนาที และมุมในการเคลือบ (Coating angle) มีค่าเท่ากับ 11 องศา โดยผลที่ได้คือชั้นผิวเคลือบอลูมิเนียมสามารถยึดติดกับแผ่นเซรามิกได้อย่างแข็งแรงไม่หลุดลอกออกจากกัน และสามารถควบคุมกระบวนการให้เซรามิกไม่เกิดการแตกร้าวระหว่างกระบวนการเคลือบ

6.2 จากผลการตรวจสอบระดับและพฤติกรรมของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบพบว่า พฤติกรรมของอุณหภูมิมีลักษณะขึ้นลงอย่างรวดเร็วอันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ติดสลิป (Stick-slip Phenomenon) นอกจากนี้ ณ เงื่อนไขในการทดลองที่กล่าวมาในข้างต้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการเคลือบมีค่าเท่ากับ 170.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเคลือบอยู่ในช่วงอุณหภูมิขึ้นรูปเย็น ซึ่งผลจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้ชั้นผิวเคลือบมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของวัสดุเดิมก่อนการเคลือบ

6.3 จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชั้นผิวเคลือบมีหลักฐานแสดงให้เห็นถึงรูปแบบของการกระจายตัว (Advancing side) และการหมุนวนซ้ำ (Retreating side) บนชั้นผิวเคลือบ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะของชั้นผิวเคลือบที่ได้จากกระบวนการเคลือบด้วยแรงเสียดทาน

6.4 จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวเคลือบ มีหลักฐานแสดงให้เห็นถึงเนื้อของวัสดุเดิมที่ผ่านกระบวนการเลื่อนหลุดและสะสมตัวกันจนกลายเป็นชั้นผิวเคลือบ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความหนาของชั้นผิวเคลือบ พบว่าชั้นผิวเคลือบมีความหนาเฉลี่ยเพียง 1.168 ไมโครเมตร ซึ่งชั้นผิวเคลือบที่มีความบางจะช่วยสนับสนุนให้นำไฟฟ้าและถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 เพื่อที่จะลดโอกาสที่จะเกิดความเค้นตกค้างเนื่องจากความร้อนและเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของชั้นผิวเคลือบ กระบวนการตกผลึกใหม่ของชั้นผิวเคลือบเป็นประเด็นหนึ่งที่ควรมองมาพิจารณา โดยกระบวนการตกผลึกใหม่สามารถทำได้ 2 วิธี คือเพิ่มกระบวนการทางความร้อนภายหลังกระบวนการเคลือบโดย นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วไปทำการอบคลายตัว (Anneal) เพื่อลดความหนาแน่นของดิสโลเคชันบนชั้นผิวเคลือบลง และวิธีที่สองคือการปรับระดับปัจจัยในการเคลือบให้เกิดกระบวนการเสียรูปอย่างรุนแรง ซึ่งนำไปสู่การเกิดกระบวนการตกผลึกใหม่ระหว่างการเคลือบ

7.2 การปรับปรุงกระบวนการจับยึดให้สามารถจับยึดชิ้นงานได้ครั้งละเป็นจำนวนมากเป็นประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจพิจารณา

8. เอกสารอ้างอิง

- Arai, K., Nishimoto, S., Romanjek, K., Komasaki, M., Nagatomo, Y., & Kuromitsu, Y. (2019). Development of High-Durability Substrates for Thermoelectric Modules. *Journal of Electronic Materials*, 48(4), 1976-1980.
- Bedford, G. M., Vitanov, V. I., & Voutchkov, I. I. (2001). On the thermo-mechanical events during friction surfacing of high-speed steels. *Surface and Coatings Technology*, 141(1), 34-39.

- Camilleri, D. (2012). Thermo-mechanical behaviour of DBC substrate assemblies subject to soldering fabrication processes. *Soldering & surface mount technology*.
- Dong, G., Chen, X., Zhang, X., Ngo, K. D., & Lu, G. Q. (2010). Thermal fatigue behaviour of Al₂O₃-DBC substrates under high temperature cyclic loading. *Soldering & surface mount technology*.
- Fukakusa, K. (1996). On the characteristics of the rotational contact plane—a fundamental study of friction surfacing. *Welding International*, 10(7), 524-529.
- Gandra, J., Miranda, R. M., & Vilaça, P. (2012). Performance analysis of friction surfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(8), 1676-1686.
- Gandra, J., Krohn, H., Miranda, R. M., Vilaça, P., Quintino, L., & Dos Santos, J. F. (2014). Friction surfacing—A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(5), 1062-1093.
- He, H., Fu, R., Wang, D., Song, X., & Jing, M. (2007). A new method for preparation of direct bonding copper substrate on Al₂O₃. *Materials Letters*, 61(19-20), 4131-4133.
- Hsueh, C. H., & Evans, A. G. (1985). Residual stresses in meta/ceramic bonded strips. *Journal of the American Ceramic Society*, 68(5), 241-248.
- Jiménez, A. E., & Bermúdez, M. D. (2011). Friction and wear. In *Tribology for Engineers* (pp. 33-63). Woodhead Publishing.
- Kovács-Csetényi, E. (1964). Electrical resistivity change in cold-worked tungsten wires during recovery and recrystallization. *Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 18(1), 11-18.
- Kraft, S., Schletz, A., & Maerz, M. (2012, March). Reliability of silver sintering on DBC and DBA substrates for power electronic applications. In *2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Lee, S. K., Lee, J. H., & Kim, Y. H. (2007). Nucleation and growth of zinc particles on an aluminum substrate in a zincate process. *Journal of electronic materials*, 36(11), 1442-1447.
- Lei, T. G., Calata, J. N., Ngo, K. D., & Lu, G. Q. (2009). Effects of large-temperature cycling range on direct bond aluminum substrate. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 9(4), 563-568.
- Md Arshad, M. K., Ahmad, I., Jalar, A., Omar, G., & Hashim, U. (2006). The effects of multiple zincation process on aluminum bond pad surface for electroless nickel immersion gold deposition.
- Mouawad, B., Thollin, B., Buttay, C., Dupont, L., Bley, V., Fabregue, D., ... & Crebier, J. C. (2014). Direct copper bonding for power interconnects: Design, manufacturing, and test. *IEEE transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 5(1), 143-150.
- Noh, M. Z., Hussain, L. B., & Ahmad, Z. A. (2008). Alumina–mild steel friction welded at lower rotational speed. *Journal of materials processing technology*, 204(1-3), 279-283.
- Polmear, I., StJohn, D., Nie, J. F., & Qian, M. (2017). *Light alloys: metallurgy of the light metals*. Butterworth-Heinemann.
- Rafi, H. K., Balasubramaniam, K., Phanikumar, G., & Rao, K. P. (2011). Thermal profiling using infrared thermography in friction surfacing. *Metallurgical and Materials transactions A*, 42(11), 3425-3429.

- Sakai, T., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Miura, H., & Jonas, J. J. (2014). Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. *Progress in materials science*, 60, 130-207.
- Sakihama, H., Tokisue, H., & Katoh, K. (2003). Mechanical properties of friction surfaced 5052 aluminum alloy. *Materials Transactions*, 44(12), 2688-2694.
- Schwartz, M. M. (1990). *Ceramic joining*. Materials Park, Ohio: Asm International.
- Seli, H., Noh, M. Z., Ismail, A. I. M., Rachman, E., & Ahmad, Z. A. (2010). Characterization and thermal modelling of friction welded alumina-mild steel with the use of Al 1100 interlayer. *Journal of Alloys and Compounds*, 506(2), 703-709.
- Suganuma, K. (2013). *Handbook of Advanced Ceramics: Chapter 10.1. Joining Ceramics and Metals*. Elsevier Inc. Chapters.
- Wang, Y. T., Cheng, Y. H., Lin, C. C., & Lin, K. L. (2020). Direct bonding of aluminum to alumina using a nickel interlayer for power electronics applications. *Results in Materials*, 6, 100093.
- Yamada, T., Yokoi, K., & Kohno, A. (1990). Effect of residual stress on the strength of alumina-steel joint with Al-Si interlayer. *Journal of materials science*, 25(4), 2188-2192.
- Zheng, X. F., Liu, C. X., Boukhanouf, R., Yan, Y. Y., & Li, W. Z. (2014). Experimental study of a domestic thermoelectric cogeneration system. *Applied thermal engineering*, 62(1), 69-79.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ธรรมะสุข มิ่งเมือง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต
คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสกลนคร 59 หมู่ 1 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000,
หมายเลขโทรศัพท์ 088581097 E-mail: Dhammasook.m@ku.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ กรรมวิธีการผลิต โลหะวิทยา การเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด