



อิทธิพลของตัวแปรการกัดต่อรูปร่างเศษกัดและการสึกหรอของคมตัดในการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็ง บนผิวเหล็กกล้า JIS-S50C

EFFECT OF MILLING PROCESS PARAMETER ON CHIP MORPHOLOGY AND CUTTING EDGE WEAR IN FACE MILLING PROCESS OF HARDFACING WELD METAL ON JIS-S50C CARBON STEEL SURFACE

ปราโมทย์ พูนนายม¹ วรญา วัฒนจิตศิริ¹ อรรถกร จันทร์ชนะ¹ สหส มีชะคะ¹ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹
¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการกัดปาดหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C และรายงานผลในรูปของโครงสร้างจุลภาค ลักษณะของเศษการกัด และความหยาบพื้นผิว ผลการทดลองโดยสรุปมีดังต่อไปนี้ ในการกัดผิวหน้าพบเศษการกัดแบบไม่ต่อเนื่อง โลหะเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นทำให้เกิดเศษการกัดที่ยาวและหนากว่าโลหะเชื่อมแบบรองพื้น การสึกหรอของคมตัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวตัดเพิ่มขึ้น การเกิดการสึกหรอสูงสุดของคมตัดมีค่า 850 μm พบได้เมื่อทำการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมแบบไม่รองพื้นในสภาวะเปียก และมีค่าสูงกว่าโลหะฐาน 4 เท่า ความแข็งที่สูงของโลหะเชื่อมแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นให้ค่าการสึกหรอสูงกว่าโลหะเชื่อมแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ยอมรับ 0.2 mm. ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าเกณฑ์และเครื่องมือตัดนี้อาจไม่เหมาะสมในการเลือกใช้ เปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัดในสภาวะเปียกและแห้ง พบว่าการกัดในสภาวะแห้งให้ค่าการสึกหรอต่ำกว่า เนื่องจากสภาวะเปียกทำให้เกิดหยดสารหล่อเย็นที่ปริมาณมากและไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับคมตัดเพื่อลดอุณหภูมิการตัดได้และส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอที่รุนแรงขึ้นได้
คำสำคัญ: การเชื่อมพอกแข็ง การกัดผิวหน้า ความหยาบผิว การสึกหรอ

ABSTRACT

This research aimed to feasibility study of the face-milling performance on the hardfacing weld metal on JIS-S50C carbon steel and reported in term of microstructure, chip characteristic, wear, and surface roughness. The summarized results are as follows. Discontinuous chips were found in all machining conditions. No buffering weld metal produced longer and thicker chip than that of the buffering weld metal. The flank wear of the cutting tool edge was increased when the cutting length of the test specimen was increased. The maximum wear of 850 μm could be found when the no-buffering weld metal in wet condition was investigated and was about 4 times higher than the base metal. High hardness of the no-buffering weld metal produced higher flank wear of the cutting tool edge than that of the buffering weld metal. When compared to wear acceptability criteria 0.2 mm., it seemed not to satisfy for the selection of this current tool material for machining the current weld metal. Comparing the wear of the cutting tool edge in wet and dry condition, it found that the dry condition produced smaller flank wear than that of the wet condition. This was caused by the wet condition that contained larger coolant oil droplets could not penetrate into the chip-tool interface for decreasing the cutting temperature and produces severe wear in the cutting tool.

KEYWORDS: hard-faced welding, face milling, roughness, wear,

Voraya Wattanajitsiri¹ Pramote Poonnayom¹ Attakorn Chanchana¹ Sahath Meechaka¹ and Kittipong Kimapong¹

¹Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

1. บทนำ

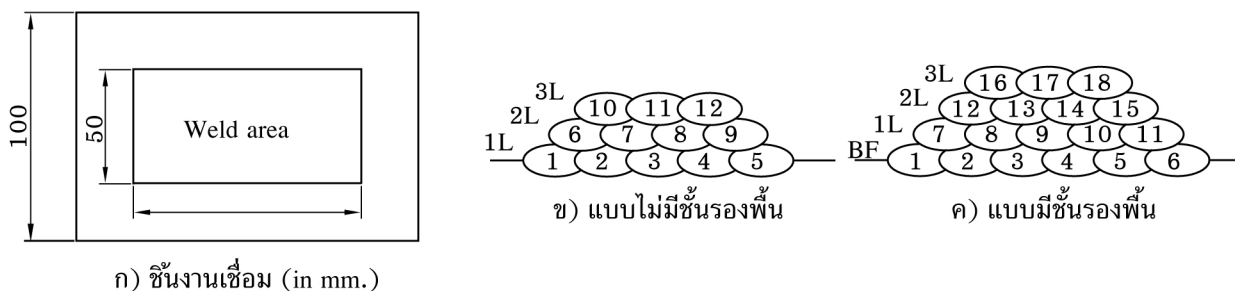
การเชื่อมพอกแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการซ่อมที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกล เช่น ความแข็ง ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตรได้ดี การเชื่อมวิธีนี้สามารถทำให้เกิดโลหะเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงกว่าผิวโลหะฐาน และสามารถทำให้เกิดการเพิ่มอายุการใช้งานชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่เกิดการเสียหายในการปฏิบัติงานได้ [1] อย่างไรก็ตามในการเปลี่ยนชิ้นส่วนที่ผ่านการเชื่อมซ่อมเข้าทดแทนชิ้นส่วนที่พังทลายอาจไม่สามารถทำได้ทันทีเนื่องจากความหยาบของแนวเชื่อมที่ได้มีค่าสูง ด้วยเหตุนี้การปรับปรุงผิวสำเร็จให้มีค่าที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่ต้องพัฒนาและปรับปรุงต่อไป [2]

ที่ผ่านมาทีมงานวิจัยบางส่วนที่มีการรายงานผลของการกัดผิวหน้าแนวเชื่อมเป็นที่น่าสนใจ การกัดผิวหน้าจำนวน 5 ชั้นที่ได้จากการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยไฟฟ้าเชื่อม Hasealloy C บนพื้นผิวเหล็กกล้า 56NiCrMoV7 ที่รายงานผลข้อจำกัดของการตัดเฉือนโลหะเชื่อมที่โครงสร้างจุลภาคเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง เฟสคาร์ไบด์ที่มีความเปราะหักหลุดออกมาและติดไปบนปลายคมตัดและส่งผลทำให้คมตัดมีการสึกหรอเร็วขึ้น [2] หรือการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรกระบวนการตัดเฉือน เช่น ความเร็วตัด (mm/rev) อัตราป้อน (mm/min) ความลึกการตัด (mm) เป็นต้น ที่มีผลต่อรูปร่างเศษกัด แรงกัด การสึกหรอ และความหยาบผิว หรือการกัดผิวหน้าโลหะผสมพิเศษที่ผสมโคบอลต์ที่แสดงให้เห็นว่าแรงตัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกของตัดและอัตราการป้อนเพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้การสึกหรอของคมตัดเพิ่มขึ้น [3] หรือวัสดุประกอบโลหะพื้นหลัก SiCp/Mg ที่ถูกกัดผิวหน้าโดยใช้คมตัดที่เคลือบด้วย TiCN/TiN ที่ทำให้เกิดเศษการกัดแบบกึ่งต่อเนื่องรูปร่างคล้ายฟันเรื้อย การเพิ่มความลึกการกัดสามารถลดการสึกหรอของคมตัดได้ ความหยาบผิวมีค่าประมาณ 0.2-0.3 μm ซึ่งมีค่าที่ยอมรับทางทฤษฎีของผิวหยาบ [4]

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาความเป็นไปได้ในการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวหน้าเหล็กกล้า JIS-S50C โดยใช้ตัวแปรการกัดประกอบด้วย 180 m/min อัตราป้อน 0.2 mm/tooth และระบบการหล่อเย็นแบบแห้งและเปียก ผลการทดลองที่ได้เช่น โครงสร้างจุลภาค รูปร่างเศษกัด การสึกหรอของคมตัด และความหยาบผิวถูกทำการศึกษาและรายงานผล

2. วิธีการทดลอง

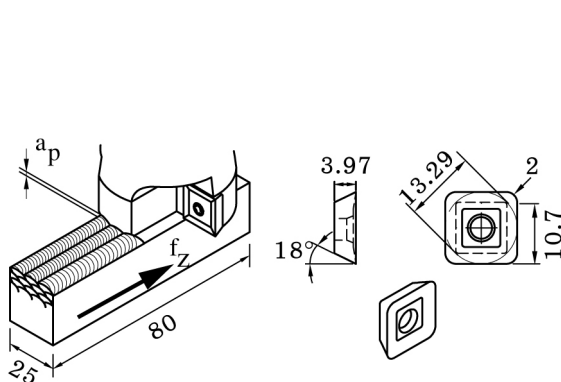
เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ถูกใช้เป็นโลหะฐานในการทดลอง แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนความหนา 20 mm. ถูกตัดด้วยเลื่อยกลที่มีการหล่อเย็นให้มีขนาดกว้าง 100 mm. และยาว 150 mm. ดังรูปที่ 1 (ก). ผิวด้านบนของแผ่นเหล็กกล้าถูกเจียรไนให้มีความเรียบสม่ำเสมอและเป็นการกำจัดผิวดิบจากการรีดร้อนออกไปก่อนการเชื่อม โลหะเชื่อมพอกแข็งถูกเชื่อมบนพื้นผิวของเหล็กกล้าที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น (NBL) และบนพื้นผิวของเหล็กกล้าที่มีการสร้างชั้นรองพื้นบนผิวเหล็กกล้า (BL) ที่พื้นที่การเชื่อมในตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นงานด้วยการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยไฟฟ้าเชื่อม Hasealloy C ดังรูปที่ 1 (ข) และ (ค) อุณหภูมิการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อม (Pre-heat temperature and inter-pass temperature) ถูกควบคุมให้มีค่า 150°C ลวดเชื่อมพอกแข็งและลวดเชื่อมชั้นรองพื้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm. และมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 กระแสเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมโลหะเชื่อมพอกแข็งแนวที่ 1-18 ดังรูปที่ 1 (ข) และ (ค) มีค่าเท่ากับ 150°C



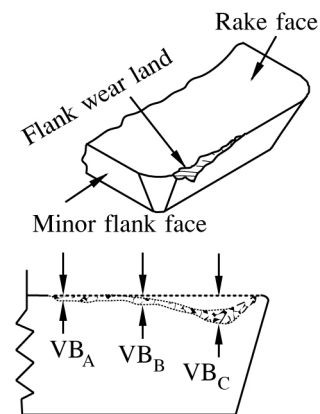
รูปที่ 1 รูปแบบชิ้นงานการเชื่อม

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง

วัสดุทดลอง	ส่วนผสมทางเคมี					
	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C	0.52	0.35	0.99	0.04	0.04	0.2
ลวดรองพื้นหุ้มฟลักซ์	0.07	0.62	1.18	0.01	–	0.01
ลวดพอกแข็งหุ้มฟลักซ์	0.45	0.50	1.15	0.60	–	5.00



(ก) การกัดผิวหน้า (ข) เม็ดมีด
รูปที่ 2 การกัดผิวหน้าโลหะเชื่อม (หน่วย: mm.)



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดการสึกหรอ

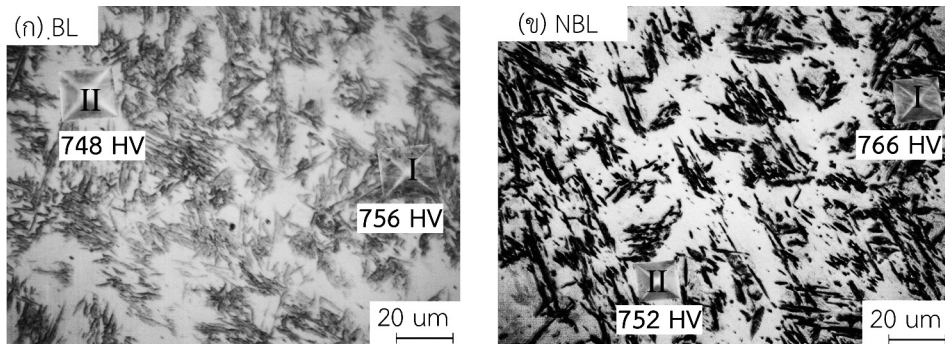
แนวเชื่อมพอกแข็งถูกนำมาทำการตัดขึ้นรูปให้มีขนาดยาว 80 mm. กว้าง 25 mm. ดังรูปที่ 2 (ก) การกัดผิวหน้าพอกแข็งทำที่ชั้นที่ 3 ของโลหะพอกแข็งโดยใช้เม็ดมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ (ISO class P40) ซึ่งเคลือบผิวด้วย $\text{TiN} + \text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีขนาดดังรูปที่ 2 (ข) ตัวแปรการกัดประกอบด้วย ความเร็วตัด (V_c) 180 mm/min อัตราการป้อน (F_z) 0.2 mm/tooth ความลึกของการตัด (Depth of cut, a_p) 0.25 mm. การหล่อเย็นแบบแห้งและเปียก ในการกัดหนึ่งรอบทำการกัดที่พื้นที่กว้าง 25 mm. ยาว 80 mm. และลึก 0.25 mm. ในการทดลองนี้ทำการกัดผิวหน้ารวมทั้งหมด 8 รอบ ที่ความลึกการตัดรวม 2.00 mm. หลังจากทำการกัดปาดหน้าเม็ดมีดถูกถอดออกมาเพื่อทำการวัดการสึกหรอของคมตัดดังรูปที่ 3 ความหยาบผิวของแนวการกัดแต่ละแนวถูกทำการศึกษาที่ตำแหน่งหัว กลาง และท้ายของชิ้นทดสอบ [5] เศษการกัดที่ได้จากการกัดถูกเก็บรวบรวมและวิเคราะห์รูปร่างด้วยกล้องถ่ายภาพสเตอริโอตามมาตรฐาน ISO8688-1:1989 (E) [4, 6].

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

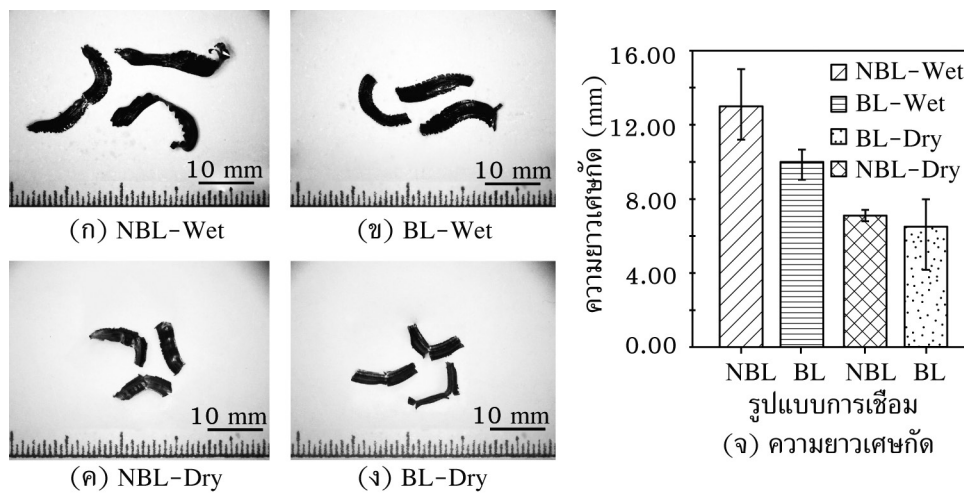
โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 ของแนวเชื่อม BL และ NBL ประกอบด้วยเฟสสีขาวและสีเข้มดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) เฟสสีขาวมีลักษณะคล้ายเข็มและการจัดเรียงไม่เป็นระเบียบบนพื้นหลักสีขาว ความแข็งไมโครวิกเกอร์ของโลหะพอกแข็งชั้นที่ 3 ของ NBL มีค่าสูงกว่า BL (NBL=786 HV and BL=756 HV) เนื่องจากปริมาณโครเมียม แมงกานีส และโมลิบดีนัมของ NBL สูงกว่า BL (NBL=0.57C-0.39Si-4.80Cr-1.15Mn-0.63Mo in wt%, BL= 0.53C-0.37Su-4.3Cr-0.96Mn-0.49Mo in wt%)

รูปที่ 5 (ก) ถึง (ง) แสดงเศษที่ได้จากการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อม NBL และ BL แบบเปียก (Wet) และแบบแห้ง (Dry) เศษการกัดถูกตรวจสอบความยาวและความหนาถูกเก็บวิเคราะห์ที่ความลึกการกัด 2 mm. จากผิวหน้าโลหะเชื่อม ในการตรวจสอบพบว่าเศษการตัดมีรูปร่างไม่ต่อเนื่อง ขาดเป็นช่วง และมีรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย (Saw-tooth) ในทุกสภาวะการตัด [7] และไม่มีเศษการตัดแบบต่อเนื่อง ความหนาและความยาวของเศษการตัดในสภาวะแบบเปียกมีค่าสูงกว่าในสภาวะแห้ง ดังรูปที่ 5 (จ) นอกจากนั้น

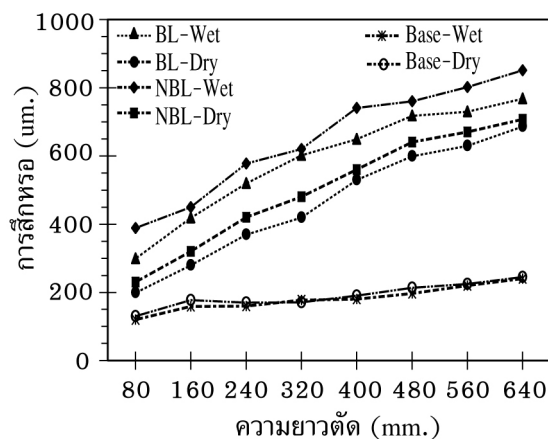
เมื่อทำการเปรียบเทียบโลหะเชื่อม NBL กับ BL พบว่าความแข็งที่สูงกว่าของโลหะเชื่อม NBL แสดงค่าความหนาและความยาวของเศษการกัดที่มีค่ามากกว่า



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ (NBL=ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น BL=มีการสร้างชั้นรองพื้น)



รูปที่ 5 ลักษณะของเศษการกัด



รูปที่ 6 การสึกหรอของคมตัด

รูปที่ 6 แสดงการสึกหรอของคมตัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวตัดเพิ่มขึ้น ค่าการสึกหรอสูงสุด 850 μm พบได้เมื่อทำการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อม NBL ในสภาวะเปียก และมีค่าประมาณ 4 เท่าของการสึกหรอของคมตัดเมื่อทำการกัดผิวหน้าโลหะฐาน การเปรียบเทียบโลหะเชื่อม NBL และ BL ที่แสดงค่าความแข็งที่แตกต่างกันพบว่า โลหะเชื่อม NBL ที่มีความแข็งมากกว่าทำให้เกิดการสึกหรอของคมตัดมากกว่า ผลการทดลองที่ได้คล้ายกับการกัดเหล็กหล่อเกรด ASTM Grade 2 และ 3 ที่แสดงว่าวัสดุที่มีความอ่อนตัวกว่าทำให้เกิดการสึกหรอของคมตัดที่มากกว่า [7] นอกจากนี้ในการทดลองอื่นๆ พบว่าอนุภาคที่แข็งของสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound) หรือโครงสร้างคาร์ไบด์ละเอียดในอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม AS [8] หรือเหล็กกล้าผสม [9] สามารถเพิ่มการสึกหรอของคมตัดได้ วัสดุที่มีความแข็งต่ำทำให้เกิดแรงตัดต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าวัสดุที่มีความแข็งสูง และส่งผลให้อายุการใช้งานของคมตัดเพิ่มขึ้นได้เมื่อใช้งานที่อัตราป้อนและความลึกของการตัดต่ำ [10] เมื่อเปรียบเทียบกับ ISO8688-1:1989 (E) พบว่าการสึกหรอของคมตัดที่มากอาจเป็นตัวแปรสำคัญที่ไม่สามารถเลือกคมตัดของวัสดุชนิดนั้นมาทำการตัดเฉือนโลหะเชื่อมพอกแข็งได้ เนื่องจากการสึกหรอของคมตัดมีค่ามากกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ค่าประมาณ 200 μm อย่างไรก็ตามการพัฒนาเพื่อหาชนิดวัสดุคมตัดที่เหมาะสมสำหรับโลหะเชื่อมพอกแข็งนี้ควรมีการพัฒนาต่อไป

การเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัดในสภาวะแห้งและเปียก พบว่าสภาวะแห้งทำให้เกิดการสึกหรอของคมตัดน้อยกว่าสภาวะเปียก การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากในสภาวะการเปียกประกอบด้วยหยดสารหล่อเย็นในปริมาณสูงแต่ไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ผิวสัมผัสระหว่างคมตัดและชิ้นงานได้ ทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดการระบายความร้อนที่เพียงพอเพื่อให้อุณหภูมิลดลงมาได้ และทำให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น [11] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคมตัดและการสึกหรอของคมตัดในการตัดเฉือนโลหะ A356 พบว่าการสึกหรอของคมตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความหนาของเศษการตัดลดลง [12] ความสัมพันธ์นี้เป็นหนึ่งในเหตุผลที่ในสภาวะแห้งทำให้เกิดเศษการตัดโลหะเชื่อม BL ที่มีความหนา เมื่อพิจารณาการตัดเฉือนโลหะเชื่อมพอกแข็งอื่นๆ พบว่าสารหล่อเย็นในปริมาณจำกัดเท่านั้นที่จำเป็นในการตัดเฉือนเพื่อให้อายุการใช้งานของคมตัดเพิ่มขึ้นและทำให้ผิวการตัดเฉือนมีความหยาบผิวต่ำที่สุด ในบางงานวิจัยได้แสดงการหาปริมาณสารหล่อเย็นที่เหมาะสมในการตัดเฉือน เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการตัดเฉือนแบบแห้งแล้ว การตัดเฉือนในสภาวะการใช้สารหล่อเย็นต่ำสุด (Minimum quantity lubricant: MQL) สามารถทำให้เพิ่มอายุการใช้งานของคมตัดได้ เนื่องจากไอของสารหล่อเย็นที่มีขนาดเล็กนั้นที่พ่นเข้าสู่ผิวสัมผัสของคมตัดและวัสดุสามารถละลายความร้อนได้ดี และทำให้เกิดการปรับปรุงสภาวะการหล่อเย็นระหว่างคมตัดและเศษการตัด และทำให้เกิดการปรับปรุงสภาวะการสึกหรอ [13] การสึกหรอของคมตัดหลังจากการกัดที่ความยาวตัด 200 mm. ส่งผลให้มีผลทำให้เพิ่มความหยาบผิวดังรูปที่ 7 การวัดความหยาบผิวได้ยืนยันการเกิดการสึกหรอสูงและไม่ทำให้เกิดผิวสำเร็จที่ละเอียด ความละเอียดสูงของผิวการกัดพบได้ที่ผิวกัดโลหะเชื่อม BL เนื่องจากความแข็งที่ต่ำกว่า และทำให้การสึกหรอของคมตัดลดลง ความละเอียดของผิวที่สูงขึ้นนี้มีผลการทดลองที่ได้คล้ายกับผิวการตัดเฉือนอินโคเนล 718 ที่แสดงการเพิ่มความละเอียดของผิวเพิ่มขึ้นได้เมื่อใช้สภาวะการตัดแบบแห้ง [14]

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกัดปาดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C และทำการศึกษา โครงสร้างจุลภาค ลักษณะของเศษการกัด การสึกหรอ และความหยาบผิว ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

4.1 ในการกัดผิวหน้าพบเศษการกัดแบบไม่ต่อเนื่อง โลหะเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นทำให้เกิดเศษการกัดที่ยาวและหนากว่าโลหะเชื่อมแบบรองพื้น

4.2 การสึกหรอของคมตัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวตัดเพิ่มขึ้น การเกิดการสึกหรอสูงสุดมีค่า 850 μm พบได้เมื่อทำการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมแบบไม่รองพื้นในสภาวะเปียก และมีค่าสูงกว่าโลหะฐาน 4 เท่า

4.3 ความแข็งที่สูงของโลหะเชื่อมแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นให้ค่าการสึกหรอสูงกว่าโลหะเชื่อมแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ยอมรับ 0.2 mm. ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าเกณฑ์และเครื่องมือตัดนี้อาจไม่เหมาะสมในการเลือกใช้

4.4 การเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัดในสภาวะเปียกและแห้ง พบว่าการกัดในสภาวะแห้งให้ค่าการสึกหรอต่ำกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้วยทุนวิจัยประจำปี 2558 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang, K., Yu, S., Li, Y. and Li, C. (2008). Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy. *Applied Surface Science* 254, 5023–5027.
- [2] El Mansori, M. and Nouari, M. (2007). Dry machinability of nickel-based weld-hardfacing layers for hot tooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 1715–1727.
- [3] Aykut, Ş., Bağcı, E., Kentli, V. and Yazıcıoğlu, O. (2007). Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool. *Materials & Design* 28, 1880–1888.
- [4] Pedersen, W. and Ramulu, M. (2006). Facing SiCp/Mg metal matrix composites with carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology* 172, 417–423.
- [5] Liao, Y.S., Lin, H.M. and Chen, Y. C. (2007) Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 1667–1676.
- [6] Gu, J., Barber, G., Tung, S. and Gu, R.J. (1999). Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. *Wear* 225–229, 273–284.
- [7] Carvalho, M.V., Montenegro, D.M. and Gomes, J.O. (2013). An analysis of the machinability of ASTM grades 2 and 3 austempered ductile iron. *Journal of Materials Processing Technology* 213, 560–573.
- [8] Akyüz, B. (2014) Influence of aluminum content on machinability of AS series cast magnesium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 24, 3452–3458.
- [9] Ren, X.J., Yang, Q.X., James, R.D. and Wang, L. (2004). Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling. *Journal of Materials Processing Technology* 147, 38–44.
- [10] Chincharikar, S. and Choudhury, S.K. (2013). Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 38, 124–133.
- [11] Rahman, M., Kumar, A.S., Salam, M.U. and Ling, M.S. (2002). Effect of Chilled Air on Machining Performance in End Milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21, 9.
- [12] Kishawy, H.A., Dumitrescu, M., Ng, E.G., and Elbestawi, M.A. (2005) Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45, 219–227.
- [13] Liu, Z., An, Q., Xu, J., Chen, M. and Han, S. (2013). Wear performance of (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) coating and (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions. *Wear* 305, 249–259.
- [14] Devillez, A. Le Coz, G., Dominiak, S., and Dudzinski, D. (2011). Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology* 211, 1590–1598.