การประยุกต์ใช้วิธีทากูชิสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของเครื่องจักรในการผลิต

Application of Taguchi method for friction stir spot welding process between aluminum alloy Al6061-T6 and high strength steel by studying optimization of production machining parameters

อนุศักดิ์ ศิลาชัย[1] และ สุริยา ประสมทอง[2*]

Anusak Silachai[1] and Suriya Prasomthong[2*]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง HSS-590 โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิเพื่อลดจำนวนปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อกระบวนการเชื่อม ในการศึกษาได้กำหนดปัจจัยในการเชื่อม 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบในการเชื่อม ความเร็วเชื่อม และระยะกดลึก จากการทดลองพบว่าปัจจัยในการเชื่อมที่เหมาะสม คือ การปรับความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการเชื่อม 1.50 มิลลิเมตร ให้ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดที่ 3.58 กิโลนิวตัน อัตราส่วน S/N อยู่ที่ 11.07 การทดลองซ้ำยืนยันพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองครั้งแรกด้วยการคำนวณโดยวิธีทากูชิ ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับร้อยละ 95.21 ดังนั้นวิธีการทากูชิสามารถนำมาออกแบบกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: วิธีการทากูชิ การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อะลูมิเนียมผสม เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

Abstract

This research was to investigate the optimum factors of the friction stir welding process between Al6061-T6 aluminum alloy and HSS-590 high strength steel by applying the Taguchi experimental design to reduce the number of factors that have no effect on the welding process. In this study, 3 parameters of welding were examined: welding speed, welding feeds and plunge depth. From the experiment, it was found that the optimum welding factors were

[1] คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

[1] Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

[2] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

[2] Faculty of industrial Technology, Nakhon Phanom University

* Corresponding author. E-mail: Suriya.p@npu.ac.th

Received: December 6, 2020; Revised: February 18, 2021; Accepted: March 15, 2021

Retracted

the welding speed of 1,500 rev/min, the welding feeds of 80 mm/rev and 1.5 mm of plunge depth, the average maximum tensile strength of 3.58 KN and the S/N ratio was 11.07. In the repeated experiment, it was found that the results were close to the first experiment calculated by Taguchi method, which was considered acceptable by estimated model coefficients of 95.21%. Therefore, the Taguchi method can be used to design an efficient friction stir spot welding process between Aluminum alloy Al6061-T6 and high strength steel.

Keywords: Taguchi method, friction stir spot welding, aluminum alloy, high strength steel

บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุที่ถูกใช้สำหรับการผลิตยานยนต์สมัยใหม่สองประเภทหลัก คือ อะลูมิเนียมผสม (aluminum alloy) กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (high strength steel: HSS) โดยที่อะลูมิเนียมผสมที่มีการเริ่มใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์คืออะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Al6061-T6 (Chen, Gholinia, & Prangnell, 2012) เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบากับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง HSS-590 (Bozzi, Helbert-Etter, Baudin, Criqui, & Kerbiguet, 2010) โดยวัสดุทั้งสองถูกนำไปขึ้นรูปให้เป็นรูปร่างชิ้นส่วนยานยนต์ตามที่ต้องการจากนั้นจึงนำมาประกอบรวมกัน (assembly) ด้วยกระบวนการเชื่อมประกอบ (Hovanski, Santella, & Grant, 2007) โดยกระบวนการเชื่อมที่นิยมในอุตสาหกรรมยานยนต์คือกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (resistant spot arc welding: RSW) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (fusion welding: FW) อีกกรรมวิธีหนึ่งที่เหมาะกับกระบวนการเชื่อมต่อโลหะหรืออโลหะชนิดเดียวกัน (similar welding joint) แต่ไม่เหมาะกับกระบวนการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด (dissimilar welding joint) โดยเฉพาะเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงกับอะลูมิเนียมผสม (Khan, Kuntz, Su, Gerlich, North, & Zhou, 2007) เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิการหลอมละลาย (1,560 °C สำหรับเหล็กและ 630 °C สำหรับอะลูมิเนียมผสม) การนำ/การพาความร้อน และการระบายความร้อน ส่งผลให้การเชื่อมต่อวัสดุทั้งสองชนิดด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายเป็นไปได้ยาก อีกทั้งในขั้นตอนการเย็นตัว (solidification) มักเกิดปัญหาการรวมตัวกันของวัสดุเชื่อมทั้งสองชนิด หรือเกิดสารประกอบทางโลหะ (intermetallic compound) ระหว่างเหล็ก-อะลูมิเนียม ($FeAl_2$, Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$/Fe_xAl_x) ที่มีความแข็งสูงทำให้ค่าความเหนียวลดลง (ductile) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือน (shear strength) ของแนวเชื่อมต่ำไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานด้านโครงสร้างทางวิศวกรรม จากปัญหาที่กล่าวมาจึงจำเป็นต้องศึกษากระบวนการเชื่อมที่หลีกเลี่ยงการหลอมละลายของวัสดุเพื่อป้องกันการเกิดการรวมตัวของวัสดุเชื่อมหรือสารประกอบทางโลหะ (intermetallic compound) จากรายงานกระบวนการเชื่อมที่ไม่ส่งผลต่อการหลอมละลายของโลหะเชื่อมที่เริ่มใช้ในอุตสาหกรรมการต่อวัสดุเรียกว่า กระบวนการเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย (non-fusion welding) แบ่งเป็นกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวน (friction stir welding: FSW) และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด (friction stir spot welding: FSSW) ซึ่งกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อเชื่อมต่อวัสดุ

Retracted

ต่างชนิด โดยวิธีการนี้อาศัยแรงทางกลหมุนกวนวัสดุผสมกันที่ปราศจากการหลอมละลายของโลหะเชื่อม ทำให้วัสดุหมุนกวนเข้ากันในสภาวะของแข็ง (solid state) ซึ่งพบว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงเพียงพอสำหรับการต่อวัสดุต่างชนิด (Feng et al., 2005; Lee, Choi, Yeon, & Jung, 2009; Liyanage, Kilbourne, Gerlich, & North, 2009; Tozaki, Uematsu & Tokaji, 2010)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการเสนอแนวความคิดที่จะทำการศึกษากระบวนการเชื่อมแบบไม่หลอมละลายด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด (friction stir spot welding: FSSW) ในการต่อวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง HSS 590 เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานสำหรับโครงสร้างยานยนต์สมัยใหม่ (Bozzi, Helbert-Etter, Baudin, Criqui, & Kerbiguet, 2010) เพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเชื้อเพลิงอย่างคุ้มค่า โดยการศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด ได้แก่ ความเร็วรอบในการเชื่อม ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกด และความลึกในการกดของหัวกด โดยปัจจัยทั้งสามมักส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Zhang, Yang, Zhang, Zhou, Xu, & Zou, 2011) ดังนั้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตจึงได้นำวิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Bozkurt, & Bilici, 2014; Abbass, Hussein, & Khudhair, 2016) มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อทำการตรวจสอบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของแนวเชื่อม เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต โดยที่วิธีทากูชิจะสามารถออกแบบกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ผลิตและผู้ที่สนใจศึกษากระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดต่อไป

วิธีการศึกษา

1. การทดลองและการทดสอบแรงดึง

การทดลองการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ทำการศึกษาปัจจัยของเครื่องจักรในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบ ความเร็ว และความลึกในการเชื่อมบนเครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC รุ่น Accuway UL-15 ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบ ความเร็วและความลึกของเครื่องมือกวน ในการศึกษาใช้เวลาในการเชื่อมคงที่ 10 วินาที เครื่องมือในการเชื่อมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเชื่อม 4 มิลลิเมตร ยาว 1.20 มิลลิเมตร การทดลองวางชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 เกยบนเหล็กกล้า HSS 590 ที่ระยะเกย 25 มิลลิเมตร ดังแสดงใน (Figure 1) ทำการจับยึดบนอุปกรณ์จับยึดที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด หลังจากกระบวนการเชื่อมทำการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงด้วยระบบไฮโดรลิกรุ่น WAW - 1000D Electro-hydraulic Servo control universal testing machine ใช้ความเร็วในการทดสอบ 150 มิลลิเมตรต่อนาที และนำค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมาทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

Retracted

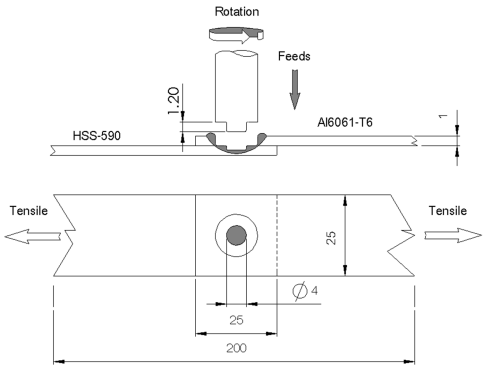

Figure 1 Friction stir spot welding process and tensile test of specimen in the experiment.

2. วัสดุในการทดลองและการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

การทดลองการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดใช้วัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง HSS 590 ตัดแบ่งชิ้นงานขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ดังแสดงใน (Figure 1) ก่อนทำการเชื่อมผิวชิ้นงานทดลองได้ผ่านการขัดผิวด้วยกระดาษทรายละเอียด และล้างทำความสะอาดผิวด้วยแอซีโทนก่อนทำการเชื่อม (Table 1) แสดงส่วนส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุทดลอง การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) รุ่น JEOL scanning electron microscope JSM-5410LV ด้วยเทคนิค EDS-Line scan

3. ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ

ขั้นตอนการทดสอบหาประสิทธิภาพดัง (Figure 2)

3.1 ตัวแปรในการทดลอง

การศึกษาทำการออกแบบการทดลองจำนวนของปัจจัยควบคุม (control factor) และระดับของปัจจัยควบคุม (control factor level) ที่ได้ออกแบบไว้โดยนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกใช้ชนิด orthogonal array การใช้ orthogonal array ซึ่งจะทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีหลายปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำหนดปัจจัยควบคุมหรือตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ใน orthogonal array อย่างเหมาะสม ดังขั้นตอนต่อไปนี้พิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดซึ่งประกอบด้วย 3 ตัวแปร 3 ปัจจัย ดังแสดงใน (Table 2) ส่วนตัวแปรที่ไม่ได้กำหนดวิธีการควบคุมตัวแปรเนื่องจากปัจจัยภายนอกเกิดขึ้นน้อยที่สุด เช่น สภาพอากาศ และผู้ปฏิบัติงาน

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of the materials in the experiment.

materials	chemical compositions									mechanical properties		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	S	C	Al	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	% El
Al6061-T6	0.40	-	0.15	0.00	0.81	0.04	-	0.00	Bal.	337	286	13.60
HSS 590	0.90	Bal.	-	1.25	-	1.45	0.05	0.21	-	452	308	28.40

Retracted

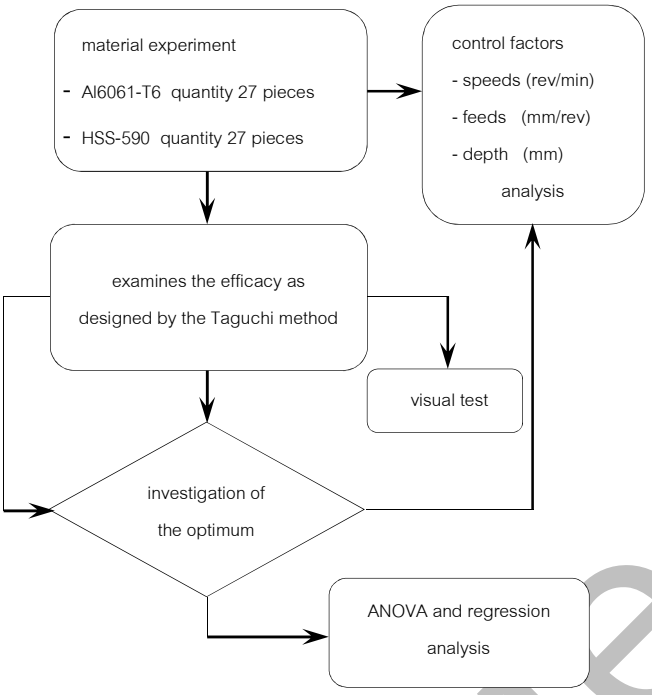

Figure 2 The experimental procedure of the friction stir spot welding process to determine the optimization by Taguchi method.

Table 2 Factors and parameters of the experiment.

experimental factors	experimental levels			tensile (kN)
	1	2	3	
speeds (rev/min)	1,000	1,500	2,000	-
feeds (mm/rev)	80	100	120	-
plunge depth (mm)	1.20	1.50	1.80	-

3.2 วิธีทางทากูชิ

ทากูชิเป็นเทคนิคสำหรับการออกแบบและทำการทดลองจนเป็นกระบวนการค้นหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่ได้จากการนำปัจจัยมาทำการทดลอง วิธีการทากูชิ คือสิ่งที่ต้องการการออกแบบซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายโดยได้ทำการกำหนดสมรรถนะที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิธีทากูชิก็คือ orthogonal array (OA) OA เป็นระบบเมทริกซ์ของจำนวนข้อกำหนดในระดับแถวและคอลัมน์ วิธีการทากูชิคือการใช้อัตราส่วนแบบ signal - to - noise (S/N) จะหาจำนวนของตัวแปรที่มีอยู่ S/N-ratio คือค่าเฉลี่ยที่ใช้วัดของผลกระทบของปัจจัย noise ตาม

Retracted

ลักษณะของสมรรถนะของตัวแปร และจะทำการวัดค่าทั้งสองคือ S/N ของจำนวนตัวแปรในข้อมูลของผลตอบและเพื่อให้เข้าใกล้ค่าเฉลี่ยของผลตอบของเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด (Karna, & Sahai, 2012)

ทากูชิได้เสนอ 8 ขั้นตอนมาตรฐาน ดังนี้

1) จำแนกการดำเนินงานหลัก ซึ่งจะส่งผลกระทบข้างเคียงและโหมดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

2) จำแนกปัจจัย noise ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบ และลักษณะเฉพาะของคุณภาพ

3) จำแนกเป้าหมายของการดำเนินงานจนได้ค่าที่ดีที่สุด

4) จำแนกปัจจัยควบคุมและระดับต่างๆ

5) เลือกการทดลองแบบเมทริกซ์แบบ orthogonal array

6) ดำเนินการทดลองแบบเมทริกซ์

7) วิเคราะห์ข้อมูล ทำนายผลในระดับที่คาดหวังและสมรรถนะกระบวนการที่ดีที่สุด

8) ดำเนินการทดลองเพื่อพิสูจน์หาความจริงและวางแผนการดำเนินงานในอนาคต

3.3 การคำนวณ

หลังจากทำการเลือกข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยในการคำนวณอัตราส่วน S/N โดยที่อัตราส่วน S/N-ratio เป็นความเข้าใจทางคุณภาพที่มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบสำหรับการเปลี่ยนแปลงโดยค่าตัวแปรของกระบวนการในสมรรถนะของกระบวนการหรือผลผลิตที่ได้จากการประเมิน ดังนั้นข้อกำหนดในการปรับของการวัดเรียกว่า signal - to - noise อัตราส่วน S/N ซึ่งเป็นการเข้ารวมกันระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการวัดค่าของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ด้วยการออกแบบ robust ซึ่งคุณลักษณะของอัตราส่วน S/N-ratio สำหรับการศึกษานี้เลือกเป้าหมายของการทดลองสำหรับสมการแบบ larger-is-better ดังแสดงในสมการที่ (1) เนื่องจากผลลัพธ์คือความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อม (Tutar, Aydin, Yuce, Yavuz, & Bayram, 2014) โดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดนี้มีทั้งหมด 3 ปัจจัย 3 ระดับ ปัจจัยการทดลองแสดงดัง (Table 2) ใช้ orthogonal array (OAs) แบบ L-9 (3^3) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อยืนยันผลการทดลอง ดังนั้นจึงทำการทดลองเท่ากับ 27 run ซึ่งการจัดลำดับแบบ orthogonal array (OAs) แบบ L-9 (3^3) ที่ใช้ในการศึกษาและผลการทดลอง ดัง (Table 3)

$$S/N_s = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \quad (1)$$

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด

เมื่อทำการทดลองเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดและนำไปทำการตรวจสอบค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานตามสภาวะที่ได้ทำการออกแบบโดยวิธีทากูชิทั้ง 9 การทดลองแล้วพบว่าการทดลองที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ การทดลองที่ 4 โดยปัจจัยที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ได้แก่ ความเร็วรอบการกวนที่ 1,500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการเชื่อมที่ 1.50 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดชิ้นงานทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 3.58 ส่วนค่าความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมต่ำสุดของการทดลองอยู่ที่การทดลองที่ 1 ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมเฉลี่ยเท่ากับ

Retracted

2.38 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วรอบการกวน 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการเชื่อมที่ 1.20 มิลลิเมตร ส่วนลำดับการทดลองอื่นของแต่ละปัจจัยแสดงดัง (Table 3) จากผลการทดลองซ้ำใน (Table 3) ผลลัพธ์จากการทดลองซ้ำมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองเดิมซึ่งจากการสังเกตมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยของกระบวนการ โดยผลต่างของผลลัพธ์จากการทดลองซ้ำอาจเกิดจากการควบคุมกระบวนการทดลองและผู้ปฏิบัติงานจึงส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่คงที่แต่ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะการตั้งค่าเครื่องมือในการเชื่อมอาจมีการคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม และผลจากการทดสอบแรงดึงอยู่ในช่วง 2.38-3.58 กิโลนิวตัน และอัตราส่วน S/N-ratio ของค่าแรงดึงสูงสุดอยู่ระหว่าง 7.52-11.07 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-ratio ที่ 9.01

Table 3 L-9 (3^3) orthogonal array (OAs) and the results from the 3 replications of experiments.

run	speeds (rev/min)	feeds (mm/rev)	depth (mm)	Ex- 1 (kN)	Ex- 2 (kN)	Ex- 3 (kN)	S/N ratios	mean
1	1,000	80	1.20	2.40	2.35	2.38	7.52	2.38
2	1,000	100	1.50	2.50	2.65	2.60	8.24	2.58
3	1,000	120	1.80	2.50	2.31	2.48	7.70	2.43
4	1,500	80	1.50	3.58	3.60	3.55	11.07	3.58
5	1,500	100	1.80	2.92	2.85	2.95	9.27	2.91
6	1,500	120	1.20	3.13	3.15	3.25	10.04	3.18
7	2,000	80	1.80	2.56	2.61	2.58	8.24	2.58
8	2,000	100	1.20	2.76	2.68	2.71	8.68	2.72
9	2,000	120	1.50	3.48	3.02	3.41	10.33	3.30
						average =	9.01	

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-ratio เฉลี่ยของค่ารับแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อม ถ้าค่า S/N-ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามาก หมายความว่าปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาดี โดยได้ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย S/N-ratio ของค่ารับแรงดึงสูงสุดแนวเชื่อมดังแสดงใน (Table 4)

Retracted

Table 4 Analysis of factors influenced the S/N-ratio of average tensile strength of the weld.

factors	average of S/N-ratio			max	min	max-min	% main effect
	level-1	level-2	level-3				
speeds (rev/min)	7.82	10.23	9.08	10.23	7.82	2.41	53.32
feeds (mm/rev)	8.94	8.73	9.36	9.36	8.73	0.63	13.94
plunge depth (mm)	8.75	9.88	8.40	9.88	8.40	1.48	32.74

จากการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยดังแสดงใน (Table 4) ค่า S/N-ratio ถูกนำมาหาระดับของปัจจัยจากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูงสุด (max) และปัจจัยที่มีค่าต่ำสุด (min) จากนั้นทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (% main effect) ของแต่ละปัจจัยพบว่าความเร็วรอบของตัวกวน (speeds) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-ratio เฉลี่ยของค่ารับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดมากสุดคิดเป็นร้อยละ 53.32 รองลงมาคือความลึก (depth) ในการกดเชื่อมมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.74 และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมต่ำสุดคือความเร็วในการเชื่อม (feeds) มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.94 จากผลใน (Table 4) สามารถสร้างกราฟผลตอบสนองของ S/N-ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับของปัจจัยใน (Figure 3) แสดงให้เห็นว่าระดับปัจจัยของ speeds และ depth มีผลต่อค่า S/N-ratio ของค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมากแต่เมื่อเปรียบเทียบกับระดับของปัจจัย feeds มีผลต่อค่า S/N-ratio ของค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมต่ำมากเมื่อเทียบกับทั้งสองปัจจัย โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมสูงสุดชิ้นงานเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง HSS-590 ควรกำหนด speeds ระดับที่ 2 คือ 1,500 รอบต่อนาที feeds ระดับที่ 1 คือ 80 มิลลิเมตรต่อนาที และ depth ระดับที่ 2 คือ 1.50 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ (α =0.05) ผลการทดลองประสิทธิภาพของอัตราส่วน S/N-ratio ดังแสดงใน (Table 5) ค่า p-value ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์สำหรับอัตราส่วน S/N-ratio ของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัยที่ 1 speeds (1,000 และ 1,500 รอบต่อนาที) ผลลัพธ์การประมาณค่าหุ่นจำลองสัมประสิทธิ์ S/N-ratio ซึ่งมีค่า p-value ที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่ามีผลต่อค่า S/N-ratio (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยที่ 2 feeds (80 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที) ผลลัพธ์การประมาณค่าหุ่นจำลองสัมประสิทธิ์ S/N ซึ่งมีค่า p-value เกินระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สรุปว่าไม่มีผลต่อค่า S/N-ratio และปัจจัยที่ 3 (depth 1.50 มิลลิเมตร) พบว่ามีค่า p-value ที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่ามีผลต่อค่า S/N (มีนัยสำคัญ) แต่เมื่อความลึกในการเชื่อมลดลงผลลัพธ์การประมาณค่าหุ่นจำลองสัมประสิทธิ์ S/N-ratio ซึ่งมีค่า p-value เกินระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สรุปว่าไม่มีผลต่อค่า S/N-ratio

Retracted

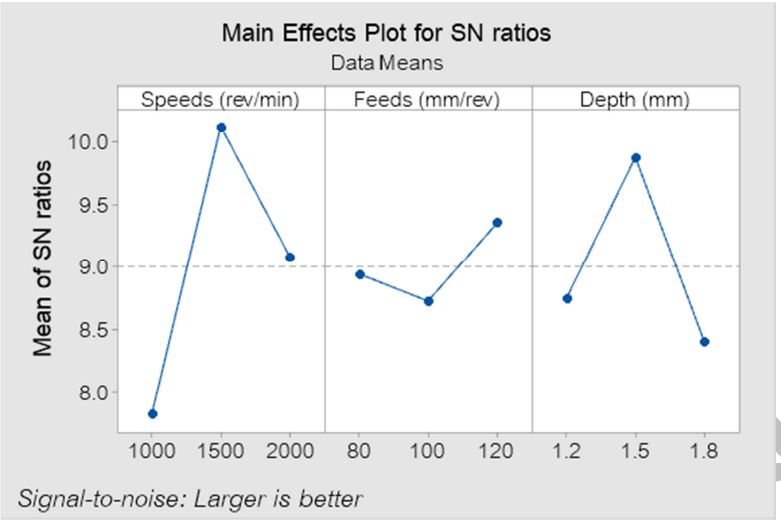

Figure 3 Effects of 3 factors on S/N-ratios of tensile strength.

Table 5 Estimated model coefficients for S/N-ratios.

term	coefficients	SE coefficients	T	P
constant	9.01	0.09	99.45	0.00
speeds (1000)	-1.19	0.13	-9.30	0.01
speeds (1500)	1.12	0.13	8.71	0.01
feeds (m 80)	-0.06	0.13	-0.50	0.67
feeds (m 100)	-0.28	0.13	-2.19	0.16
plunge depth (m 1.2)	-0.26	0.13	-2.06	0.18
plunge depth (m 1.5)	0.87	0.13	6.79	0.02
S=0.2717 R-Sq=98.80% R-Sq(adj)=95.21%				

Table 6 Analysis of variance for S/N-ratios.

sources	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
speeds (rev/min)	2	8.01	8.01	4.00	54.23	0.02
feeds (mm/rev)	2	0.61	0.61	0.30	4.11	0.20
plunge depth (mm)	2	3.58	3.58	1.79	24.25	0.04
residual error	2	0.15	0.15	0.07		
total	8	12.34				

Retracted

จาก (Table 6) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า S/N ซึ่งมีค่า p-value ที่ไม่เกิน 0.05 คือ ปัจจัยที่ 1 (speeds) และปัจจัยที่ 3 (depth) ส่งผลต่อค่า S/N (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยที่ 2 (feeds) ไม่ส่งผลต่อค่า S/N (ไม่มีนัยสำคัญ) โดยปัจจัยที่ 1 คือ speeds มีค่า p-value เท่ากับ 0.02 และปัจจัยที่ 3 คือ depth มีค่า p-value เท่ากับ 0.04 มีระดับนัยสำคัญที่ไม่เกิน 0.05 สรุปว่ามีผลต่อค่ารูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ย (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยอื่นมีค่าเกินระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่าไม่มีผลต่อค่ารูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ย (ไม่มีนัยสำคัญ) และการปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับร้อยละ 95.21 ส่วนสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับอัตราส่วน S/N การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงดึงสูงสุด ดังสมการที่ (2)

$$S/N = 9.01 - 1.19(S1000) + 1.12(S1500) - 0.06(F80) - 0.28(F100) - 0.26(D1.2) + 0.87(D1.5) \quad (2)$$

2. การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี และลักษณะการพังทลายของแนวเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

จากการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดด้วยวิธีทากูชิในหัวหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดในการเชื่อม คือ การทดลองที่ 4 ได้แก่ speeds ระดับที่ 2 คือ 1500 รอบต่อนาที feeds ระดับที่ 1 คือ 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และ depth ระดับที่ 2 คือ 1.5 มิลลิเมตร ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ 3.58 กิโลนิวตัน และปัจจัยการทดลองที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด คือ การทดลองที่ 1 ได้แก่ speeds 1000 รอบต่อนาที feeds 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และ depth 1.20 มิลลิเมตร ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ 2.38 กิโลนิวตัน จากนั้นนำชิ้นงานทั้งสองมาทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS-line scan แสดงดัง (Figure 4) การตรวจสอบทำการลากเส้นตรงผ่านจากด้านอะลูมิเนียมเข้าสู่ฝั่งเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ความยาวในการลากผ่าน 477 ไมโครเมตร ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีพบปริมาณการกระจายตัวของอะลูมิเนียมเข้าสู่เหล็กสูงสังเกตได้จาก (Figure 4a) โดยเส้น line scan ของอะลูมิเนียมมีความชันลาดเอียงเข้าสู่เหล็ก ในลักษณะเดียวกันปริมาณการกระจายตัวของเหล็กคล้ายกับลักษณะของอะลูมิเนียม แสดงให้เห็นว่าบริเวณชั้นรอยต่อ (interface layer) มีการกวนผสมเข้ากันระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามปัจจัยการเชื่อมที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด คือ speeds 1,000 รอบต่อนาที feeds 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และ 1.20 มิลลิเมตร ดังแสดงใน (Figure 4b) จากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมหลักจากการสังเกตไม่พบอะลูมิเนียมบริเวณฝั่งเหล็ก สาเหตุอาจเกิดจากปัจจัยในการเชื่อมต่ำเกินไปส่งผลให้อะลูมิเนียมไม่สามารถไหลตัวผสมกันระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมบริเวณชั้นรอยต่อได้ซึ่งทำให้ไม่เกิดการยึดเกาะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมลดลง

Retracted

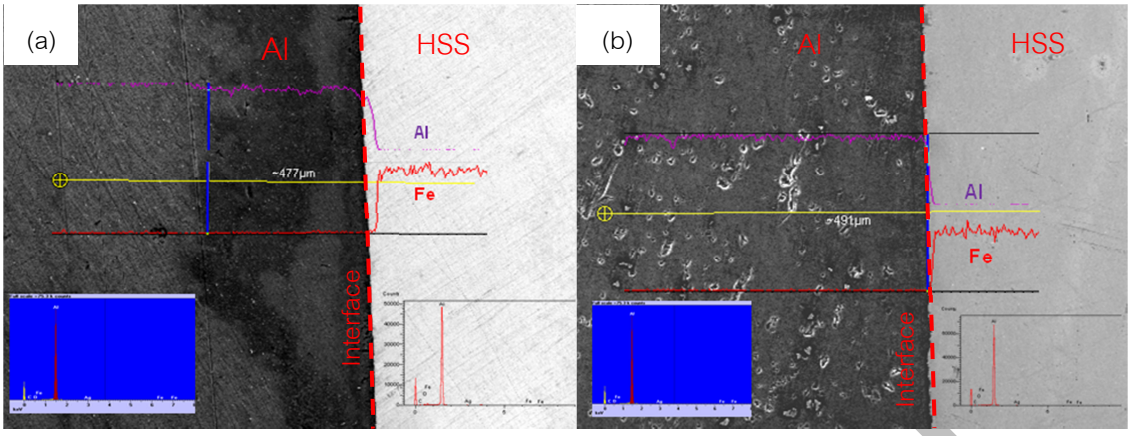

Figure 4 The results of chemical analysis techniques EDS-line scan (a) speeds 1,500 rev/min, feeds 80 mm/rev and 1.5 mm, (b) speeds 1,000 rev/min, feeds 80 mm/rev and 1.2 mm.

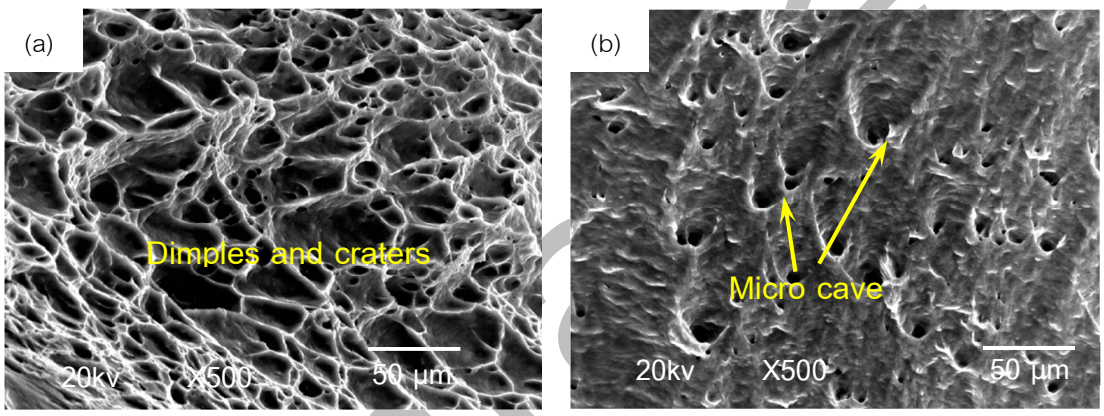

Figure 5 The investigation fracture of friction stir spot welding (a) speeds 1,500 rev/min, feeds 80 mm/rev and 1.5 mm, (b) speeds 1,000 rev/min, feeds 80 mm/rev and 1.2 mm.

จากนั้นทำการเปรียบเทียบแนวการพังทลายหรือการฉีกขาดของแนวเชื่อมทั้งสองปัจจัยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงใน (Figure 5) รอยฉีกขาดของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแรงดึงฝั่งอะลูมิเนียม (Figure 5a) แสดงรอยฉีกขาดชิ้นงานเชื่อมที่ให้ค่ารับแรงดึงสูงสุดที่ปัจจัยในการเชื่อม speeds 1,500 รอบต่อนาที feeds 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และ 1.50 มิลลิเมตร ให้ค่าแรงดึง 3.58 กิโลนิวตัน เมื่อสังเกตจากภาพถ่ายกำลังขยายสูงพบลักษณะการฉีกขาดแบบเหนียว เนื่องจากพื้นผิวที่แตกหักประกอบด้วยรอยฉีกและลักษณะหลุมลึก (dimples and craters) และยังสามารถมองเห็นโพรงทรงกลมขนาดเล็กบนผิววัสดุที่เกิดการเสียหาย ซึ่งลักษณะความเสียหายเหล่านี้

Retracted

บ่งชี้ว่าเกิดการเสียหายแบบเหนียวของแนวเชื่อม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Yu, Chen, Zhang, Pan, & Yang (2020) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูง แต่เมื่อปรับปัจจัยในการเชื่อมเป็น speeds 1,000 รอบต่อนาที feeds 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และ 1.20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นปัจจัยที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดสำหรับการทดลองนี้พบลักษณะการฉีกขาดของแนวเชื่อมแบบหลุมเหล็ก (micro cave) ผสมกับการขาดแบบผิวเรียบ ซึ่งรอยฉีกขาดลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดความเสียหายแบบเปราะ หรือไม่เกิดการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดส่งผลความต้านทานแรงดึงแนวเชื่อมต่ำ ดังแสดงใน (Figure 5b)

สรุป

การศึกษาการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่ดีที่สุดในกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม Al6061-T6 กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง HSS-590 โดยใช้วิธีการทากูชินั้นผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ปัจจัยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดที่เหมาะสม คือ ลำดับการทดลองที่ 4 การปรับ speeds 1,500 รอบต่อนาที ที่ feeds 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และ depth 1.50 มิลลิเมตร ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 3.58 กิโลนิวตัน อัตราส่วน S/N อยู่ที่ 11.07 และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.58 เพราะให้ค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดในการทดลองซ้ำการทดลองรวมทั้งยืนยันพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองครั้งแรกด้วยการคำนวณโดยวิธีทากูชิ ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้กล่าวคือในครั้งแรกการทดลองได้กำหนดค่าปัจจัยเบื้องต้นได้แก่ การปรับ speeds 1,500 รอบต่อนาที ที่ feeds 80 มิลลิเมตรต่อรอบ และ depth 1.50 มิลลิเมตร ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 3.58 กิโลนิวตัน การทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 3.60 กิโลนิวตัน และ 3.55 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดลองมีค่าลดลงอาจเกิดจากการปรับแต่งปัจจัยในการทดลองทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันแต่ไม่มีความแตกต่างกันมากนักถือว่ายอมรับได้ ดังนั้นวิธีการทากูชิสามารถนำมาออกแบบกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดอะลูมิเนียมผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสภาวะดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจากกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

2. การวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลักของแต่ละปัจจัยพบว่าความเร็วรอบของตัวกวน (speeds) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-ratio เฉลี่ยของค่ารับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดมากสุดคิดเป็นร้อยละ 53.32 รองลงมาคือความลึก (depth) ในการกดเชื่อมมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.74 และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมต่ำสุดคือความเร็วในการเชื่อม (feeds) มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.94

3. ปัจจัยในกระบวนการผลิตของเครื่องจักรส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงอย่างชัดเจน กล่าวคือ ถ้าความเร็วรอบในการเชื่อม และความลึกในการเชื่อมสูงหรือต่ำมากเกินไปมักส่งผลต่อส่วนผสมทางเคมี และมักนำไปสู่ความล้มเหลวในการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด

Retracted

4. ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของปัจจัยเป็นหลักซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ซึ่งนำมาวิเคราะห์และพิจารณาเลือกเป็นผลตอบเดียวในกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด ผลลัพธ์ที่ได้แสดงจำนวนปัจจัยทั้งสามมีผลกระทบและความสำคัญต่อกระบวนการ กล่าวคือ speed ที่สูงกว่าที่กล่าวถึงในงานวิจัยจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด depth และ feeds ต่ำหรือสูงขึ้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงแนวเชื่อม เพราะฉะนั้นปัจจัยทั้งสามได้กำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดจะช่วยให้กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดมีประสิทธิภาพและให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุด ส่วนสภาพแวดล้อมในการทำงานและผู้ปฏิบัติงานก็ถือว่าเป็นปัจจัยในกระบวนการผลิต

ข้อเสนอแนะ

การนำเอาวิธีการทากูชิมาช่วยในการออกแบบการทดลองเป็นวิธีการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาค่าที่ดีมี่สุดที่ต้องการเข้าใกล้ค่าตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้อย่างเหมาะสม การปรับบางค่าตามเงื่อนไขของข้อกำหนดและการตัดสินใจเพื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการทดลอง การออกแบบทากูชิเป็นเครื่องมือที่สำคัญและให้คำแนะนำอย่างง่ายและเป็นวิธีที่เป็นระบบจนสามารถนำไปสู่สมรรถนะที่ดีมีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนและคุณภาพของกระบวนการผลิตสูงขึ้น

จากการศึกษาของผู้วิจัยพบว่าวิธีทากูชิเป็นการควบคุมคุณภาพอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิต และควบคุมการผลิตตลอดจนสามารถลดต้นทุนในกระบวนการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณภาพงานที่ได้สามารถยืนยันผลแต่ละการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยวิธีทากูชิ และสามารถพิสูจน์หาผลลัพธ์ได้คือค่าที่ดีที่สุดต่อกระบวนการผลิตโดยเฉพาะกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกวนแบบจุดที่สามารถควบคุมปัจจัยการเชื่อมได้อย่างแม่นยำแต่ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีการเตรียมการและวางแผนการดำเนินงานอย่างเป็นระบบว่าจะเลือกใช้เครื่องมือตรวจสอบชนิดใดให้เหมาะสมกับงานที่ทำการศึกษาทดลองเพื่อความถูกต้องเหมาะสม ซึ่งเหตุผลที่กล่าวมานี้มีความจำเป็นต่อกระบวนการผลิต

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ที่ให้ทุนสนับสนุนการจัดทำงานวิจัยเรื่อง อิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล และส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดสำหรับการต่อวัสดุต่างชนิด ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

Abbass, M. K., Hussein, S. K., & Khudhair, A. A. (2016). Optimization of mechanical properties of friction stir spot welded joints for dissimilar aluminum alloys (AA2024-T3 and AA 5754-H114). *Arabian Journal for Science and Engineering, 41*(11), 4563-4572.

Bozkurt, Y., & Bilici, M. K. (2014). Taguchi optimization of process parameters in friction stir spot welding of AA5754 and AA2024 alloys. *Advanced Materials Research, 1016*, 161-166.

Retracted

Bozzi, S., Helbert-Etter, A. L., Baudin, T., Criqui, B., & Kerbiguet, J. G. (2010). Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds. *Materials Science and Engineering: A, 527*(16-17), 4505-4509.

Chen, Y. C., Gholinia, A., & Prangnell, P. B. (2012). Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: a novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet. *Materials Chemistry and Physics, 134*(1), 459-463.

Feng, Z., Santella, M. L., David, S. A., Steel, R. J., Packer, S. M., Pan, T., & Bhatnagar, R. S. (2005). Friction stir spot welding of advanced high-strength steels – A feasibility study. *SAE Technical paper*, 2005-01-1248.

Hovanski, Y., Santella, M. L., & Grant, G. J. (2007). Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel. *Scripta Materialia, 57*(9), 873-876.

Khan, M. I., Kuntz, M. L., Su, P., Gerlich, A., North, T., & Zhou, Y. (2007). Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study. *Science and Technology of Welding and Joining, 12*(2), 175-182.

Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences, 1*(1), 1-7.

Lee, C. Y., Choi, D. H., Yeon, Y. M., & Jung, S. B. (2009). Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al–Mg alloy by formation of IMCs. *Science and Technology of Welding and Joining, 14*(3), 216-220.

Liyanage, T., Kilbourne, J., Gerlich, A. P., & North, T. H. (2009). Joint formation in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining, 14*(6), 500-508.

Tozaki, Y., Uematsu, Y., & Tokaji, K. (2010). A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. *Journal of Materials Processing Technology, 210*(6-7), 844-851.

Tutar, M., Aydin, H., Yuce, C., Yavuz, N., & Bayram, A. (2014). The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. *Materials & Design, 63*, 789-797.

Yu, G., Chen, X., Zhang, B., Pan, K., & Yang, L. (2020). Tensile-shear mechanical behaviors of friction stir spot weld and adhesive hybrid joint : experimental and numerical study. *Metals, 10*(8), 1028.

Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., & Zou, B. (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials & Design, 32*(8-9), 4461-4470.

Retracted