



อิทธิพลกระแสเชื่อมด้านทานจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี

EFFECT OF RESISTANCE SPOT WELDING CURRENT ON LAP JOINTS PROPERTIES

BETWEEN ALUMINUM ALLOY AND ZINC-COATED STEEL

ศักดิ์ชัย จันทศรี^{1*} ไพบูลย์ แยมเพื่อน¹ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมด้านทานจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ กระแสเชื่อมด้านทานจุดที่ทำให้เกิดความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อสูงสุด 2300 นิวตัน ในการทดลองนี้ คือกระแสเชื่อม 95 กิโลแอมป์ เวลากดแช่ 10 รอบ และแรงกด 0.10 เมกะปาสกาล การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเพิ่มขึ้นและเกิดการเพิ่มปริมาณการกระจายตัวของอะลูมิเนียมที่ผิวสัมผัส (Interface) ของรอยต่อ รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่เหนือแผ่นอะลูมิเนียมแสดงค่าความแข็งแรงสูงกว่ารอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอะลูมิเนียมอยู่เหนือแผ่นเหล็ก ความลึกรอยกดและสัดส่วนระหว่างความลึกรอยกดต่อความหนาของแผ่นงานของรอยต่อมีค่าลดลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นในรอยต่อแบบที่ 1 และมีค่าลดลงเมื่อกระแสเชื่อมลดลงในรอยต่อแบบที่ 2 โครงสร้างจุลภาคผิวสัมผัสแสดงการก่อตัวของสารประกอบแบบประสม $FeAl_3$ และส่งผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

คำสำคัญ: การเชื่อมด้านทานจุด วัสดุต่างชนิด รอยต่อเกย ความแข็งแรง

ABSTRACT

This article is aimed to study the effects of resistance spot welding current on AA1100 aluminum alloy and zinc coated steel lap joint properties. The summarized experimental results are as follows. The optimum welding parameters that produced maximum tensile shear strength of 2300 N was a welding current of 95 kA, a holding time of 10 cycles, and a welding pressure of 0.10 MPa. Increasing of welding current, increased the tensile shear strength of the joint and also increased the amount of aluminum dispersion at the joint interface. The lap joint of steel over the aluminum (Type I) showed the higher joint tensile shear strength than a lap joint of aluminum over the steel (Type II). The indentation depth and the proportion of the indentation depth and the plate thickness decreased when the welding current was increased in the type I lap joint and was decreased in the type II lap joint. The interface structure showed the formation of the brittle $FeAl_3$ intermetallic compound that deteriorated the shear strength.

KEYWORDS: resistance spot welding, dissimilar materials, lap joint, strength,

Sakchai Chantasri^{1*} Paiboon Yamphuern¹ and Kittipong Kimapong¹

¹Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

1. บทนำ

การเชื่อมด้านทานจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสผ่านพื้นที่รอยต่อในการหลอมวัสดุและกดให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง กระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ดังเห็นได้จากรถยนต์หนึ่งคันที่มีปริมาณการต่อยึดด้วยการเชื่อมด้านทานจุดของชิ้นส่วนระหว่างวัสดุเดียวกัน วัสดุต่างชนิด หรือวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกัน ในปริมาณมากกว่าหนึ่งพันจุด [1] หนึ่งในข้อดีของการเชื่อมด้านทานจุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมทิก คือ รอยเชื่อมของการเชื่อมด้านทานจุดนั้นเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ ขณะที่รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกเกิดขึ้นด้านนอก ลักษณะเช่นนี้ทำให้รอยเชื่อมมีความง่ายต่อการตกแต่งมากกว่า ขณะเดียวกันในมุมมองของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันที่มุ่งเน้นในการผลิตรถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันอย่างประหยัด เพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสังแวดล้อม อุตสาหกรรมยานยนต์ได้พยายามคิดค้นหาวิธีการในการลดการใช้น้ำมันของรถยนต์ด้วยวิธีการต่างๆ หนึ่งในวิธีการที่มีการใช้งานในปัจจุบัน คือ การทำให้น้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ลดลง ซึ่งทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่มีสัดส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่น เหล็กกล้าผสมค่าความแข็งแรงสูง (High strength low alloy: HSLA) วัสดุประกอบ (Composite materials) หรืออะลูมิเนียมผสม เข้ามาแทนที่ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าที่มีน้ำหนักสูงกว่า [2] วัสดุน้ำหนักเบาที่นิยมนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นในการทดแทนเหล็กในปัจจุบัน คือ อะลูมิเนียม เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีค่าสัดส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักสูงกว่าเหล็กประมาณ 2 เท่า [3]

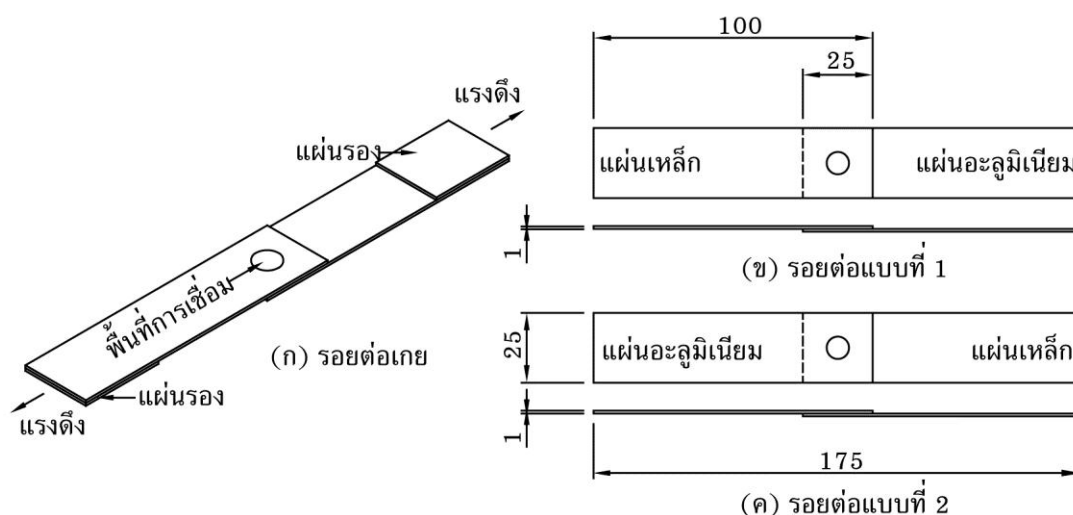
ที่ผ่านมาได้มีการรายงานผลการเชื่อมด้านทานจุดรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก เช่น การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด A5052 เข้ากับแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่พบความแข็งแรงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัวแบบไม่ต่อเนื่องที่ผิวสัมผัส (Interface) ของรอยต่อ [2] หรือรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA5182-O และเหล็กกล้า SAE 1008 ที่ใช้แผ่นสอระหว่างรอยต่อ พบพื้นที่การหลอมละลายแบ่งออกเป็นสองส่วน นักเกณฑ้านของแผ่นเหล็กมีรูปร่างปกติเหมือนดังการเชื่อมทั่วไป และด้านอะลูมิเนียมมีรูปร่างวงรีครึ่งใบประกอบด้วยแถบบางตามผิวสัมผัสของรอยต่อ ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าที่สามารถเทียบเคียงได้กับระดับความแข็งแรงของรอยที่ยึดด้วยริเวท (Rivet) [4] หรือรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้ารีดเย็น SPCC ที่มีผลการทดลองพบความหนาของชั้นการเกิดปฏิกิริยานี้มีความบางและมีขนาดที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่กึ่งกลางของแนวเชื่อม ชั้นการเกิดปฏิกิริยาส่งผลต่อการลดค่าความแข็งแรงรอยต่อในกรณีที่มีความหนามากกว่า 1.5 มิลลิเมตร [5] หรือรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้ารีดเย็น SPCC รอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม A5052 ที่ทำการเชื่อมด้านทานจุดที่มีแผ่นครอบด้านบนรอยเชื่อมที่พบการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ค่าความหนาของสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัวขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเพิ่มขึ้น สารประกอบกึ่งโลหะไม่มีผลต่อรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียม A5052 เหล็กกล้าไร้สนิม 304 [6]

อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้านทานจุดรอยต่อระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีความยากลำบากในการเชื่อมเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีประสิทธิภาพสูง ด้วยเหตุนี้หากมีการศึกษากระบวนการเชื่อมด้านทานจุดเพื่อหาตัวแปรการเชื่อมที่ให้สมบัติของรอยต่อดีที่สุด อาจสามารถทำให้เกิดฐานข้อมูลในการประยุกต์ใช้การเชื่อมด้านทานจุดในงานอุตสาหกรรมต่อไปได้

2. วิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในทดลอง อะลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD แผ่นโลหะที่ได้จากการรีดร้อนทั้งสองมีความหนา 1.0 มิลลิเมตร ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 แผ่นโลหะถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 25.0 มิลลิเมตร และ

ยาว 100.0 มิลลิเมตร และนำมาต่อเกล็ดรูปที่ 1 (ก) กำหนดให้แผ่นโลหะด้านบนวางต่อเกล็ดบนแผ่นโลหะด้านล่าง 25.0 มิลลิเมตร รอยต่อในการทดลองนี้แบ่งออกเป็นสองแบบ คือรอยต่อแบบที่ 1 ที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางบนแผ่นอะลูมิเนียม และรอยต่อแบบที่ 2 ที่กำหนดให้แผ่นอะลูมิเนียมวางบนแผ่นเหล็กดังรูปที่ 1 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ก่อนการทำการเชื่อม พื้นผิวของโลหะถูกทำการขัดแห้งด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 และทำความสะอาดด้วยอะซิโตนก่อนนำไปทำการยึดแน่นในอุปกรณ์การจับยึดที่ทำมาจากวัสดุฉนวนต่อไป



รูปที่ 1 รูปร่างของรอยต่อเกล็ด (หน่วย: มิลลิเมตร)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุ (%น้ำหนัก)

วัสดุ	Al	Fe	C	Si	Mn	Cu	P	S	Zn
AA1100	สมดุล	-	-	0.095	0.050	0.150	0.006	0.014	-
SGACD	-	สมดุล	0.050	-	-	-	-	0.240	0.095

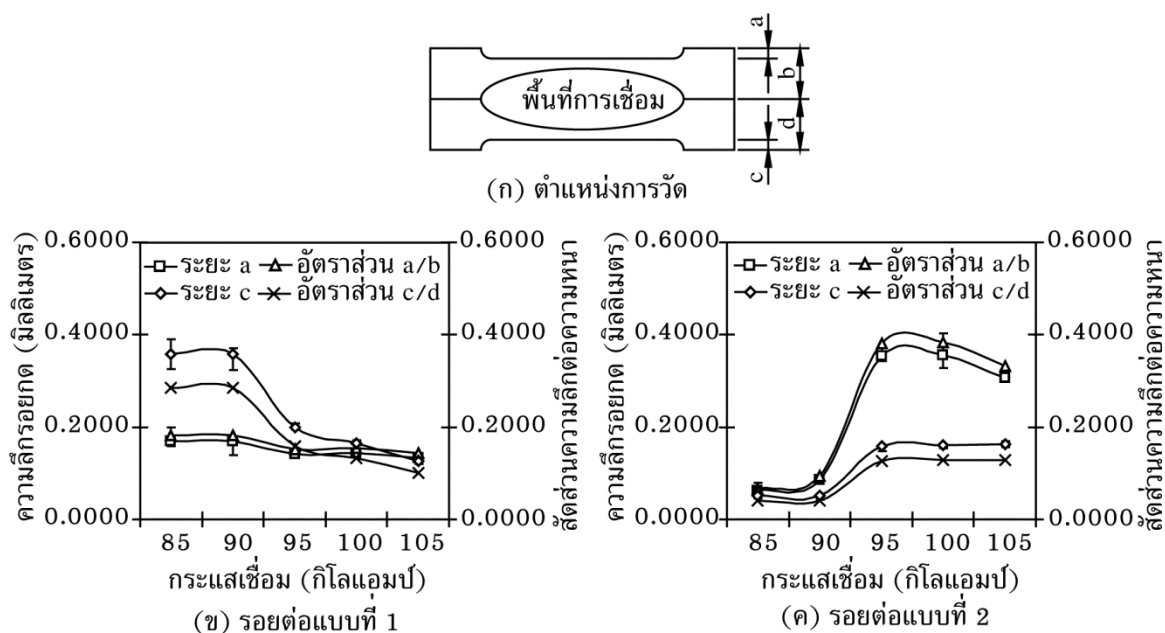
อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมทำมาจากทองแดงบริสุทธิ์ที่มีรูปร่างแบบชนิด A ตามข้อกำหนดสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทาน โดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาของชิ้นทดสอบมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร [7] ตัวแปรการเชื่อมด้านทานจุดประกายด้วยกระแสเชื่อม 85-105 กิโลแอมป์ เวลาการเชื่อม 10 ไซเคิล (Cycle) และแรงกด 0.1 เมกะปาสกาล (MPa) ในการทดลองนี้อิเล็กโทรดด้านล่างถูกยึดแน่นกับที่ไม่มีการเคลื่อนไหว ขณะที่อิเล็กโทรดด้านบนถูกกดลงไปบนแผ่นโลหะด้านบน และกดลงสู่อิเล็กโทรดด้านล่าง ขณะที่ทำการเชื่อมทดลอง

ชิ้นทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) เพื่อหาค่าแรงเฉือนสูงสุด (Shear load) และการยึดตัว (Replacement) สูงสุดของรอยต่อ ในการรักษาระนาบพื้นที่แนวเชื่อมเพื่อให้อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการดึงและลดแรงคดในชิ้นงานขณะการทดสอบความแข็งแรงเฉือน แผ่นรอง (Supporter) ถูกใส่เข้าไปใน

ตำแหน่งตอนปลายของชิ้นงานซึ่งเป็นตำแหน่งการจับยึดขึ้นทดสอบดังรูปที่ 1 (ก) การทดสอบกำหนดให้อัตราการเกิดความเร็วเท่ากับ 25.0 มิลลิเมตร ต่อนาที

ชิ้นงานทุกสภาวะการเชื่อมถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยต่อเพื่อศึกษาค่าความลึกของรอยกัด ความสัมพันธ์ของความลึกรอยกัดและความหนาของแผ่นรอยต่อ และโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ ชิ้นงานถูกตัดขวางตำแหน่งกึ่งกลางรอยเชื่อม (ทิศทางขนานกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด) ถูกนำไปหล่อชิ้นงานช่วยขัดเตรียมผิวชิ้นงาน ถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-1500 ในสภาวะเปียก และถูกขัดมันบนผ้าสักกะหลาดด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมครอน ชิ้นงานที่ผ่านการขัดมันที่มีผิวหน้าคล้ายกระจกเงา (Mirror-like surface) ถูกกัดผิวหน้าด้วยสารละลายไนตรัล 5% เฉพาะด้านหลัก ขณะที่ด้านอะลูมิเนียมไม่ได้ทำการกัดด้วยสารละลายใดๆ พื้นผิวที่ผ่านการกัดกรดถูกนำไปทำการตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพกำลังขยายต่ำเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่ต่อพ่วงกับเครื่องวัดการกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry: EDS) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และส่วนผสมทางเคมีของรอยต่อตามลำดับ

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

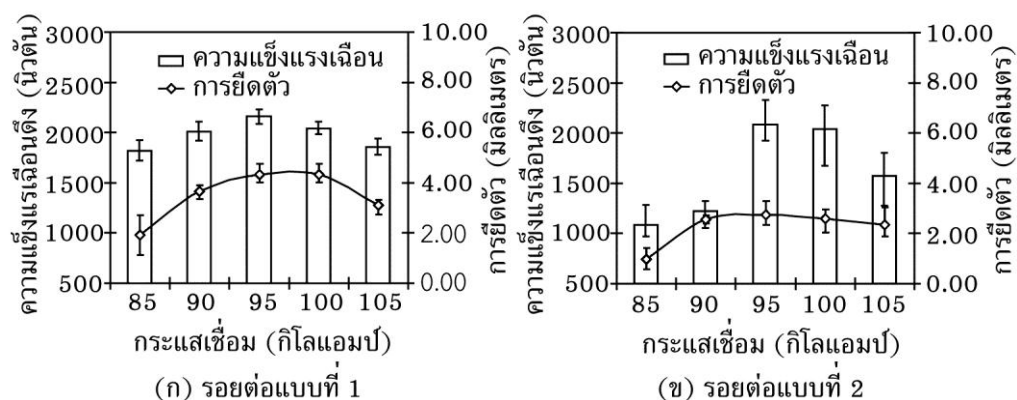


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและความลึกรอยกัดเชื่อม

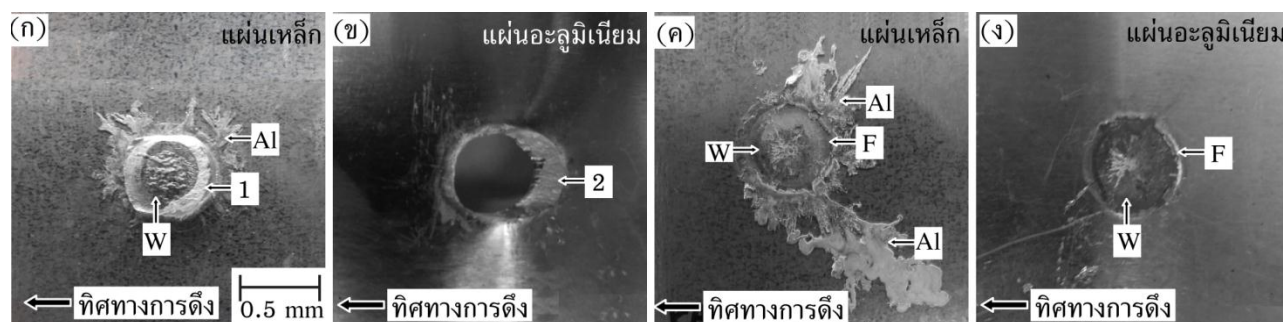
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความลึกรอยกัด และสัดส่วนระหว่างรอยกัดต่อความหนาของแผ่นงาน รอยต่อเชื่อมซึ่งเป็นการตรวจสอบอ้างอิงตาม JIS Z3139 [8] อักษร a ในรูปที่ 2 (ก) คือความลึกรอยกัดในแผ่นรอยต่อเชื่อมด้านบน อักษร b คือความหนาแผ่นรอยต่อเชื่อมด้านบน อักษร c คือความลึกรอยกัดในแผ่นรอยต่อเชื่อมด้านล่าง และอักษร d คือความหนาแผ่นรอยต่อเชื่อมด้านล่าง ตามลำดับ ผลการตรวจสอบพบว่าการเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้เกิดการลดความลึกรอยกัดของรอยต่อแบบที่ 1 และเกิดการเพิ่มความลึกรอยกัดของรอยต่อแบบที่ 2 นอกจากนี้กระแสที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สัดส่วนระหว่างความลึกรอยกัดต่อ

ความหนาของแผ่นงานลดลงในรอยต่อแบบที่ 1 และเพิ่มขึ้นในรอยต่อแบบที่ 2 ในรอยต่อแบบที่ 1 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 85 และ 90 กิโลแอมป์ มีค่าสูงกว่า 0.3 มิลลิเมตร (30% ของความหนาแผ่นโลหะ) และอาจเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เนื่องจากผิวหน้ารอยต่อที่มีรอยกดลึกมากอาจต้องทำการซ่อมแซมพื้นผิวและทำให้เกิดการเสียเวลาในการซ่อมแซมได้ ผลการทดลองที่แสดงค่ามากกว่า 0.3 มิลลิเมตร นี้สามารถพบได้เช่นเดียวกันเมื่อทำการเชื่อมรอยต่อแบบที่ 2 ที่กระแสเชื่อม 95-105 กิโลแอมป์ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนระหว่างรอยกดต่อความหนาของแผ่นงานรอยต่อแบบที่ 1 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 95-105 กิโลแอมป์ มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารอยต่อแบบที่ 2

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความแข็งแรงเฉือน และการยึดตัวของรอยต่อเกย เมื่อใช้แผ่นเหล็กที่มีความแข็งแรงกว่าวางอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมที่อ่อนกว่า หรือรอยต่อแบบที่ 1 ความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อแบบที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 85-90 กิโลแอมป์ ดังรูปที่ 3 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 90-105 กิโลแอมป์ ความแข็งแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและแสดงค่าสูงสุดเท่ากับ 2300 นิวตัน เมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 95 กิโลแอมป์ ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อแบบที่ 2 มีค่าต่ำกว่ารอยต่อแบบที่ 1 ดังรูปที่ 3 (ข) การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อแบบที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อแบบที่ 1 การเพิ่มความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกยเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นนี้เป็นลักษณะเดียวกันกับรอยต่อเกยหลายๆ แบบ เช่น รอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม AA5052 และเหล็กกล้าคาร์บอน SPCC หรือเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [9] หรือรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี-โครไมด์ [10] หรือรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม 6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [11] หรือรอยต่อเกยเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี [12] หรือรอยต่อเหล็กกล้าไมโครโครมิไดซ์ (Microchromidized steel) [13] เนื่องจากการเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ค่าความร้อนที่ให้แก่โลหะเชื่อม (Heat input) มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้โลหะรอบๆ รอยต่อมีความสามารถในการรวมตัวกันเพิ่มขึ้น



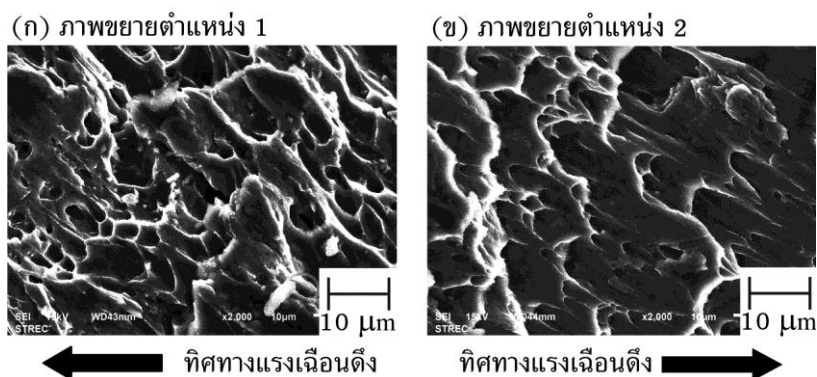
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความแข็งแรงเฉือน และ การยึดตัวของรอยต่อเกย



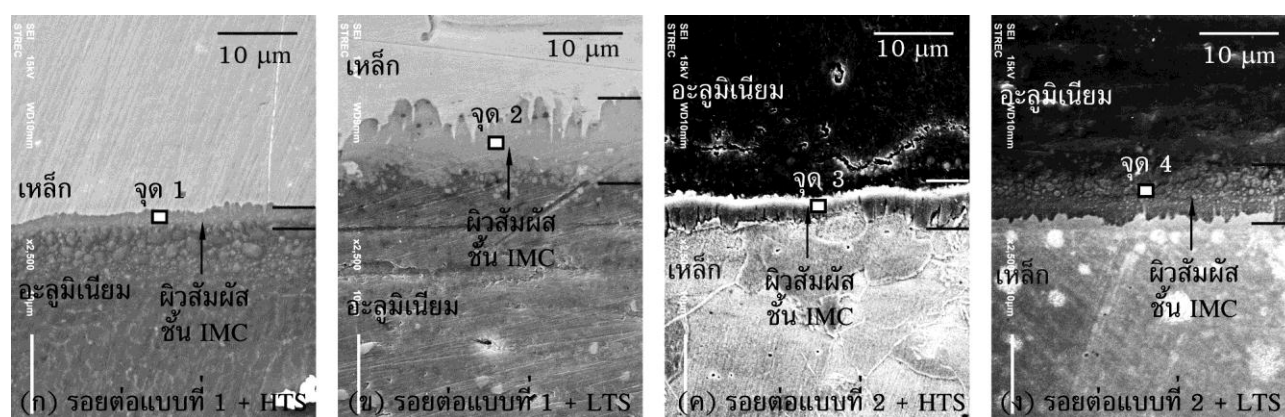
รูปที่ 4 พื้นผิวการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงที่มีทิศทางการให้แรงจากขวาไปซ้าย: (ก) ด้านหลังของรอยต่อแบบที่ 1 (ข) ด้านอะลูมิเนียมของรอยต่อแบบที่ 1 (ค) ด้านหลังของรอยต่อแบบที่ 2 (ง) ด้านอะลูมิเนียมของรอยต่อแบบที่ 2 (W=พื้นที่การเชื่อม F=แนวพังทลาย Al=อะลูมิเนียม หมายเลข 1 และ 2 คือตำแหน่งการตรวจสอบผิวการพังทลาย)

ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อทั้งสองแบบดังรูปที่ 3 สามารถแบ่งแยกรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบออกเป็น 2 แบบดังรูปที่ 4 เมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 95 กิโลแอมป์ซึ่งเป็นรอยต่อที่แสดงค่าความแข็งแรงเนื่องสูงสุด การพังทลายเกิดขึ้นรอบพื้นที่การเชื่อมเป็นวงกลมดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า การพังทลายแบบถูกดึงออกตรงก้นนั้กเกท (Nugget pulled-out fracture) ที่ด้านอะลูมิเนียมของรอยต่อทั้งสอง การพังทลายแบบนี้พบได้ในการทดสอบความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อเชื่อมการเชื่อมด้านทานจุดที่แสดงค่าความแข็งแรงเนื่องสูง [4] นอกจากนั้นพบการกระจายตัวของอะลูมิเนียมที่บริเวณรอบพื้นที่การเชื่อมดังรูปที่ 4 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อที่มีความแข็งแรงเนื่องต่ำที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 105 กิโลแอมป์ดังรูปที่ 4 (ค) และ (ง) การพังทลายเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมและเหล็กซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของโลหะเชื่อม การพังทลายที่ผิวสัมผัสเกิดขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมมีค่าประมาณ 85 และ 90 กิโลแอมป์ หรือมากกว่า 105 กิโลแอมป์ ถูกใช้ในการเชื่อมรอยต่อเชื่อมบนพื้นผิวรอยต่อพบอะลูมิเนียมเกิดการกระจายตัวออกจากพื้นที่การเชื่อมบนแผ่นเหล็กอะลูมิเนียมที่กระจายตัวออกจากพื้นที่การเชื่อมนี้เป็นสาเหตุทำให้ความลึกรอยกดของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2 และเป็นสาเหตุทำให้พื้นที่รับแรงด้านแผ่นอะลูมิเนียมของรอยต่อลดลงส่งผลทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงเนื่องลดลงได้

เมื่อทำการตรวจสอบผิวการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงที่แสดงค่าความแข็งแรงเนื่องสูงสุดที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 95 กิโลแอมป์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยายสูงที่ตำแหน่งที่ 1 ของด้านแผ่นหลังของรอยต่อแบบที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ของด้านแผ่นอะลูมิเนียมของรอยต่อแบบที่ 1 ในรูปที่ 4 และแสดงภาพถ่ายในรูปที่ 5 พบว่าผิวการพังทลายมีรูปร่างเป็นหลุมลึก (Dimple pattern) ซึ่งบ่งชี้พฤติกรรมความเหนียว (Ductile behavior) ของรอยต่อเชื่อมและเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อที่ผ่านการทดสอบแสดงความแข็งแรงเนื่องสูง [14]



รูปที่ 5 ภาพขยายผิวการพังทลายของรอยต่อแบบที่ 1 ที่เชื่อมด้วยกระแส 95 กิโลแอมป์



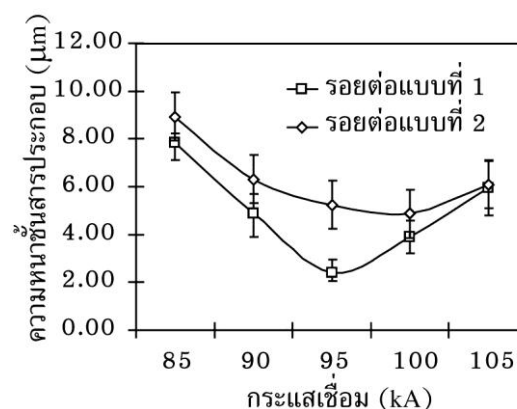
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ที่แสดงความแข็งแรงแรงเค้นดึงสูงสุดและต่ำสุด (HTS=ความแข็งแรงแรงเค้นดึงสูงสุด และ LTS=ความแข็งแรงแรงเค้นดึงต่ำสุด)

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคผิวสัมผัส (Interface structure) ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ที่แสดงความแข็งแรงแรงเค้นดึงสูงสุดและต่ำสุด ภายในโลหะเชื่อมบริเวณผิวสัมผัสไม่สามารถตรวจสอบพบก่อนนักเกทของพื้นที่การเชื่อมดังเกิดกับการเชื่อมรอยต่อของโลหะชนิดเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงขนาดนักเกทการเชื่อมด้านทานจุดนี้เป็นตัวบ่งบอกให้ทราบถึงความแข็งแรงแรงเค้นดึงของรอยต่อ เนื่องจากการเพิ่มขนาดนักเกทเป็นการเพิ่มขนาดพื้นที่การเชื่อมของรอยต่อโลหะชนิดเดียวกัน และส่งผลทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ [12, 13, 15-17] ในการตรวจสอบรอยต่อของอะลูมิเนียมและเหล็กพบการก่อตัวของเฟสใหม่ขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อในพื้นที่การเชื่อมดังรูปที่ 6 (ก) ถึง (ง) รูปร่างของเฟสที่ก่อตัวขึ้นมีรูปร่างคล้ายลิ้น (Tongue-like) และมีความหนาแน่นสูงสม่ำเสมอ เนื่องจากการตรวจสอบเฉพาะที่บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่การเชื่อม ความหนาแน่นสูงสม่ำเสมอที่เกิดขึ้นนี้อาจมีความสม่ำเสมอลดลง เมื่อทำการตรวจสอบที่ตำแหน่งอื่นๆ ที่ไม่ใช่กึ่งกลางของพื้นที่การเชื่อม เนื่องจากการทดลองเชื่อมรอยต่อของอะลูมิเนียมและเหล็กที่ผ่านมาพบว่า เฟสใหม่ที่ก่อตัวขึ้นมักมีความหนาแน่นสูงเพิ่มมากขึ้น เมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเคลื่อนที่จากด้านนอกสู่กึ่งกลางของพื้นที่การเชื่อม [2, 5, 9] เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างผิวสัมผัสพบว่าความหนาแน่นของเฟสก่อตัวใหม่มีค่าแตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อมดังรูปที่ 7 กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้

ความหนาของเฟสก่อตัวใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลทำให้ความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อเพิ่มขึ้นได้ [11] เมื่อทำการตรวจสอบ ส่วนผสมทางเคมีของเฟสที่ก่อตัวใหม่บริเวณสัมผัสของรอยต่อในรูปที่ 6 (ก) ถึง (ง) พบว่าเป็นเฟสของสารประกอบกึ่งโลหะ FeAl_3 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2 สารประกอบกึ่งโลหะชนิดนี้เป็นสารประกอบที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมสูง (Al-rich) ซึ่งเป็น สารประกอบกึ่งโลหะที่มีความแข็งแรงและเปราะ ความหนาของชั้นสารประกอบเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนและเวลาในการทำปฏิกิริยา ระหว่างโลหะทั้งสองมีค่ามากพอ ด้วยเหตุนี้ความหนาที่เปลี่ยนแปลง เมื่อกระแสเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลทำให้อะลูมิเนียม เกิดการรวมตัวกับเหล็กในเฟสที่ก่อตัวเพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความแข็งแรงเหนือนเกิดการเปลี่ยนแปลงไปดังผลการ ทดลองที่กล่าวมาข้างต้น [18, 19]

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของเฟสที่ก่อตัวขึ้นในรูปที่ 6 (%อะตอม)

ธาตุ	Al	Fe	O	เฟส
จุด 1	73.61	26.12	0.27	FeAl_3
จุด 2	77.01	22.75	0.24	FeAl_3
จุด 3	74.64	24.15	0.21	FeAl_3
จุด 4	77.65	22.09	0.26	FeAl_3



รูปที่ 7 ความหนาของชั้นสารประกอบกึ่งโลหะของ รอยต่อทั้งสองแบบ

4. สรุปผลการทดลอง

รอยต่อกระระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD สองแบบถูกทำการเชื่อมด้านทานจุดโดย การใช้กระแสเชื่อมต่างๆ และทำการศึกษสมบัติต่างๆ ของรอยต่อ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

- 4.1 กระแสเชื่อมด้านทานจุดที่ทำให้เกิดความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อสูงสุดประมาณ 2300 N คือกระแสเชื่อม 95 กิโลแอมป์ เวลาถดแซ่ 10 รอบ และแรงกด 0.10 เมกะปาสกาล
- 4.2 การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อเพิ่มขึ้น และเกิดการเพิ่มปริมาณการกระจายตัวของ อะลูมิเนียมที่ผิวสัมผัสของรอยต่อ
- 4.3 รอยต่อเกณฑ์กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่เหนือแผ่นอะลูมิเนียมแสดงค่าความแข็งแรงเหนือนสูงกว่ารอยต่อเกณฑ์กำหนดให้ แผ่นอะลูมิเนียมอยู่เหนือแผ่นเหล็ก
- 4.4 ความลึกรอยกดและสัดส่วนระหว่างความลึกรอยกดต่อความหนาของแผ่นงานของรอยต่อมีค่าลดลงเมื่อกระแสเชื่อม เพิ่มขึ้นในรอยต่อแบบที่ 1 และมีค่าลดลงเมื่อกระแสเชื่อมลดลงในรอยต่อแบบที่ 2
- 4.5 โครงสร้างจุลภาคผิวสัมผัสแสดงการก่อตัวของสารประกอบแบบเปราะ FeAl_3 และส่งผลทำให้ความแข็งแรงเหนือนของ รอยต่อลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบพระคุณ คุณทิวพร กาหลง สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเทคนิค

เอกสารอ้างอิง

- [1] Vural, M. *et al.* Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 176, pp. 127-132.
- [2] Qiu, R. *et al.* Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding. *Materials Characterization*, 2010, 61, pp. 684-688.
- [3] Askeland, D. and Phulle, P. *Science and Engineering of Materials*. Singapore: Cengage Learning, 2016.
- [4] Sun, X. *et al.* Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Materials – From Process to Performance – Part I: Experimental Study. *Welding Journal*, 2004, 84, pp. 188-195.
- [5] Qiu, R. *et al.* Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, pp. 4189-4193.
- [6] Qiu, R. *et al.* The influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint welded by resistance spot welding. *Materials Characterization*, 2009, 60, pp. 156-159.
- [7] American Society for Metals. *ASM Handbook Volume 6 Welding Brazing and Soldering*. USA: ASM International, 2000.
- [8] Japanese Industrial Standard. JIS Z3139 (1978). *Method of Macro Test for Section of Spot Welded Joint*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1997.
- [9] Qiu, R. *et al.* Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels. *Materials & Design*, 2009, 30, pp. 3686-3689.
- [10] Aslanlar, S. *et al.* Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding. *Materials & Design*, 2007, 28 pp.2-7.
- [11] Bozzi, S. *et al.* Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527, pp. 4505-4509.
- [12] Luo, Y. *et al.* Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. *Materials & Design*, 2009, 30, pp. 2547-2555.
- [13] Aslanlar, S. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Materials & Design*, 2006, 27, pp. 125-131.
- [14] Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [15] Han, L. *et al.* A correlation study of mechanical strength of resistance spot welding of AA5754 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211, pp. 513-521.
- [16] Han, L. *et al.* Effect of governing metal thickness and stack orientation on weld quality and mechanical behaviour of resistance spot welding of AA5754 aluminium. *Materials & Design*, 2011, 32, pp. 2107-2114.
- [17] Zhao, D. *et al.* An effective quality assessment method for small scale resistance spot welding based on process parameters. *NDT & E International*, 2013, 55, pp. 36-41.
- [18] Kobayashi, S. and Yakou, T. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 338, pp.44-53.

- [19] Kimapong, K. and Watanabe, T. Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding. *Materials Transactions*, 2005, 46, pp. 835-841.