

**อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิด
ระหว่าง SSM7075 กับ SSM356 ด้วยการเชื่อมเสียดทาน**
**Influences of Rotation Speed Mechanical Properties of Dissimilar
Joint between SSM7075 with SSM356 by Friction Welding**

ชัยยุทธ มิ่งงาม^{1*} ศุภชัย ชัยณรงค์² และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี³

^{1,2}อาจารย์ โปรแกรมวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90112

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเร็วรอบที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ เกรด SSM356 ตัวแปรในการเชื่อม ประกอบด้วย ความเร็วรอบ 800, 1,000, 1,200, 1,400 และ 1,600 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะกัดตัด 1.8 มิลลิเมตร เวลาในการเชื่อม 30 วินาที และหมุนตามเข็มนาฬิกา หลังจากการเชื่อมพบว่าความเร็วรอบที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติทางกลแตกต่างกัน โดยที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 122.24 MPa และบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งที่ 140.5 HV โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมถูกแรงเสียดทานจากการหมุนกระทำจนอนุภาคของเฟส $MgZn_2$ และ Mg_2Si เกิดการแตกหักจนทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลง โดยมีขนาดความยาว 2.250 ไมโครเมตร และกว้าง 2.144 ไมโครเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้แรงเสียดทานจากการหมุนยังส่งผลให้อนุภาคของ $MgZn_2$ และ Mg_2Si ผสมรวมด้วยกัน

Abstract

The objective of this research is to study how rotation speeds affect mechanical properties with friction welding between semi-solid metal 7075 aluminum alloys and semi-solid metal 356 aluminum alloys. The factor of interest is rotation speeds, with different conditions at 800, 1,000, 1,200, 1,400, and 1,600 rpm respectively. 1.8 millimeter for burn of length, 30 seconds for welding time and clockwise rotation are set as a control constant condition for the entire experiment. After friction welding, we found that different rotation speeds significantly affected mechanical properties of these alloys. At rotation speed 1,400 rpm, the maximum tensile strength is 122.24 MPa and the maximum hardness in welded zone is 140.5 HV. The microstructure size is 2.250 μm long and 2.144 μm wide. Its size in welded zone is practically small because of friction force. Moreover, this friction force causes the mixture of $MgZn_2$ and Mg_2Si in welded zone.

คำสำคัญ : การเชื่อมเสียดทาน ความเร็วรอบ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด SSM356

Keywords : Friction Welding; Rotation Speed; Semi Solid Metal 7075 Aluminium Alloy; Semi-solid Metal 356 Aluminium Alloy

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ช่วงหลาย ๆ ปีที่ผ่านมา การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการบิน และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ซึ่งค้นพบโดยสถาบันงานเชื่อมประเทศอังกฤษ (The Welding Institute: TWI) (Thomas, 1991) เทคนิคการยึดติดของชิ้นงานด้วยแรงเสียดทานถูกพัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้งานหลาย ๆ รูปแบบ โดยมีทั้งวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding) (Chi-Sung Jeon, 2012) การเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding) (Su, 2003) โดยเฉพาะการเชื่อมเสียดทานมีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นวิธีการเชื่อมใหม่และเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมยานยนต์ การเชื่อมเสียดทานเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่อาศัยการเสียดทานระหว่างผิวหน้ารอยต่อของชิ้นงานสองชิ้นจนเกิดความร้อน ส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัว และให้แรงกด (Pressure) จนเกิดการยึดติดกันของชิ้นงาน (Ahmad Fauzi, 2010) ข้อเด่นของการเชื่อมเสียดทาน ได้แก่ ไม่เติมลวดเชื่อม (Non Filler) ไม่เกิดการหลอมละลายบริเวณเนื้อเชื่อม (Non Melting) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmentally Friendly) และเชื่อมวัสดุต่างชนิดเข้ากันได้ (Dissimilar Joint Materials) (Moarrefzadeh, 2012) อย่างไรก็ตาม วัสดุกลุ่มที่มีน้ำหนักเบา มักจะถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และวัสดุกลุ่มอื่น ๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมที่มีสมบัติทางกลที่ดีและมีน้ำหนักที่เบา อะลูมิเนียม เกรด SSM7075 และ SSM356 ทั้งสองชนิดนี้ มักถูกนำไป

ผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากส่งผลให้ชิ้นส่วนมีน้ำหนักที่เบาและนำไปสู่การลดใช้พลังงาน แต่ชิ้นส่วนเหล่านี้จำเป็นต้องยึดติดด้วยนอตหรือเชื่อมต่อเพื่อประกอบเป็นชิ้นงานและมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุที่แตกต่างกันในแต่ละชิ้นส่วน เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่แข็งแรง และมีราคาถูก แต่สำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกันเป็นเรื่องที่ยาก เพราะสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันของวัสดุทำให้การเชื่อมมีความยุ่งยากและซับซ้อนสูงขึ้น ดังนั้น การเชื่อมเสียดทานจึงมักจะแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

จากเหตุผลข้างต้นที่ได้กล่าวมานั้น จึงนำไปสู่การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมต่างชนิดกันระหว่างอะลูมิเนียม เกรด SSM7075 กับ SSM356 ด้วยการเชื่อมเสียดทาน หลังจากการเชื่อมเสียดทานชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test) ความแข็ง (Hardness Test) และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy) และกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) และวิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลองในลำดับต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 อะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง เกรด SSM7075 และ SSM356

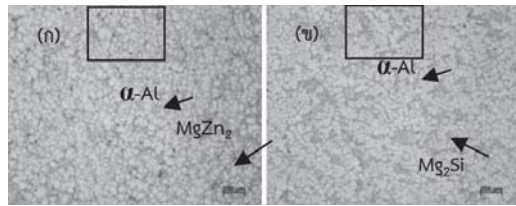
อะลูมิเนียมที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานถูกเตรียมเป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing 11.5$ มิลลิเมตร และขนาดความยาว 50 มิลลิเมตร ทั้งสองเกรด ซึ่งอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง เกรด SSM7075 มีอะลูมิเนียมผสมกับสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก และอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง เกรด SSM356 มีอะลูมิเนียมผสมกับ

ซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลัก โดยวัสดุทั้งสองชนิดมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 และ SSM356

Materials	Si	Fe	Cu	Mn
7075	-	0.46	1.93	-
	Mg	Zn	Ti	Al
	2.50	6.08	-	Bal.
356	Si	Fe	Cu	Mn
	7.74	0.57	0.05	0.06
	Mg	Zn	Ti	Al
	0.32	0.01	0.05	Bal.

ชิ้นงานทดลองขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการหล่อกิ่งของแข็งแบบ GISS (Gas Induce Semi-Solid) (Wannasin, 2008) โดยการพ่นฟองแก๊สผ่านแท่งกราไฟต์ที่มีความพรุน ในขณะที่น้ำโลหะอยู่ในสถานะกิ่งของแข็ง (Semi Solid Status) ส่งผลให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมเป็นแบบก้อนกลม (Globular Structures) ซึ่งอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ประกอบด้วย เฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์หลัก (α -Al) และเฟสยูเทคติก ($MgZn_2$) คล้าย ๆ กัน สำหรับอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM356 ประกอบด้วย เฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์หลัก (α -Al) และเฟสยูเทคติก (Mg_2Si) ดังแสดงในรูปที่ 1



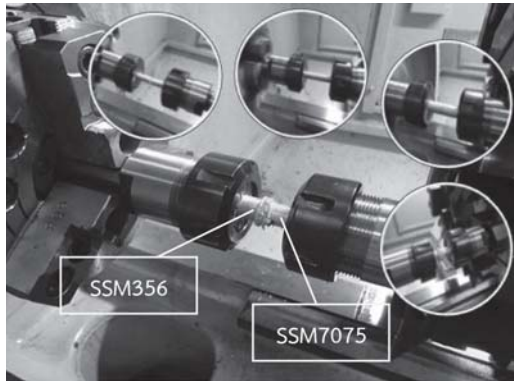
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างมหภาคแบบก้อนกลม (ก) อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 และ (ข) อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM356

2.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับเชื่อม

ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งทั้งสองชนิด ก่อนการเชื่อมเสียดทานถูกนำไปขัดด้วยกระดาษทรายหยาบ เบอร์ 180 กริต บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมเพื่อกำจัดชั้นของฟิล์มออกไซด์ที่เกาะติดผิวหน้ารอยเชื่อม และทำความสะอาดด้วยน้ำยาอะซิโตน (Acetone) เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อกำจัดคราบสกปรกและไขมันที่ยึดติดบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม

2.3 การเชื่อมเสียดทาน

การเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356 จะใช้เครื่องกลึงแบบอัตโนมัติประยุกต์ใช้สำหรับการเชื่อมซึ่งจะทำให้มีความแม่นยำสูงขึ้นในการทดลอง อีกทั้งการควบคุมก็สามารถทำได้สะดวก และสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น เนื่องจากมีการเขียนโปรแกรมควบคุมแบบจีโค้ด (G Code) และเอ็มโค้ด (M Code) การทำงานของเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่าง อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356

การเชื่อมเสียดทานจะมีหลักการสร้างความร้อนคล้าย ๆ กับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อาศัยการเสียดทานระหว่างวัสดุสองชิ้นจนเกิดความร้อนจนนำไปสู่การเชื่อมติดกันของชิ้นงาน ซึ่งการเชื่อมเสียดทานจะสร้างความร้อนจากการล้มน้สัมผัสกันของผิวหน้ารอยต่อของชิ้นงานทั้งสองชิ้น ภายใต้แรงกด (Contact Pressure) และความเร็วในการหมุนเชื่อม (Rotation Speed) จนทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเกิดความร้อนทั้งสองชั้นที่ได้รับจากการหมุน ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้ารอยต่อส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัว (Softening) แล้วเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) แล้วกดอัดด้วยระยะตามตัวแปรที่ตั้งไว้ ส่งผลให้ชิ้นงานทั้งสองชิ้นยึดติดกัน ตัวแปรในการเชื่อมที่สำคัญสำหรับการเชื่อมเสียดทาน ได้แก่ ความเร็วหมุน หัวจับ แรงกด ระยะในการกดอัด (Burn of Length) เวลาในการกดแช่ (Holding Time) อัตราการป้อน (Feed Rate) และตัวแปรอื่น ๆ เช่น ความขรุขระของผิวรอยเชื่อม (Surface Roughness) หรือความสะอาดของผิวงาน (Surface Cleaning) ทิศทางการหมุนเชื่อม (Direction of weld) เป็นต้น

2.4 ตัวแปรสำหรับการเชื่อม

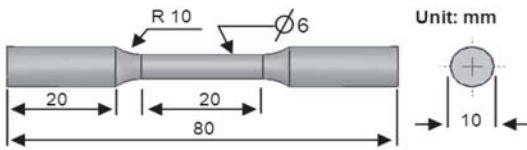
ตัวแปรที่ใช้สำหรับการเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356 ได้จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสม สำหรับการเชื่อม พบว่าความเร็วรอบช่วง 760 ถึง 1,640 รอบต่อนาที ส่งผลให้ชิ้นงานยึดติดกัน คณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ทดลองเชื่อมที่ความเร็วรอบ 5 ระดับ ระยะกดอัด เวลาในการเชื่อม อัตราป้อนสำหรับการเดินเชื่อม และทิศทางของการหมุนเชื่อม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรสำหรับการเชื่อมเสียดทาน

ตัวแปร	ค่าระดับตัวแปร
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	800, 1,000, 1,200, 1,400, 1,600
ระยะกดอัด(มิลลิเมตร)	1.8
เวลาในการเชื่อม(วินาที)	30
อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)	0.2
ทิศทางการหมุน	ตามเข็มนาฬิกา

2.5 การทดสอบสมบัติทางกล

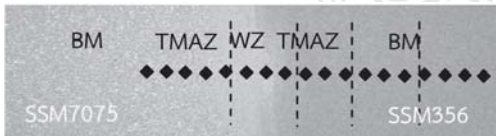
ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานถูกนำมาทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM 370 ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อหาสมบัติทางกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Testomatic รุ่น 50N ดึงภายใต้อุณหภูมิห้อง และดึงด้วยความเร็วที่ 1.97×10^{-2} เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM 370

2.6 การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานทดสอบความแข็งจะถูกตัดกึ่งกลางของแนวเชื่อม (Cross Section) หลังจากนั้นชิ้นงานถูกนำไปทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness) ด้วยเครื่องทดสอบแรงกด ยี่ห้อ Zwick/Roell รุ่น ZHU โดยมีระยะห่างระหว่างจุดกดแต่ละตำแหน่งที่ 0.5 มิลลิเมตร แต่ละชิ้นงานจะกดความแข็ง 13 ตำแหน่ง แรงกด 10HV ด้วยหัวเพชรทรงพีระมิด และเวลาในการกดค้างไว้อยู่ที่ 10 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

2.7 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

ชิ้นงานตรวจสอบทางโลหะวิทยาจะถูกขัดด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบ เบอร์ 120, 380, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ และขัดด้วยผ้าสักหลาด โดยใช้ผงขัดอะลูมินาที่ขนาด 5, 3 และ 1 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำไปกัดผิวด้วยกรด Keller's ก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy: OM) และกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356 ในเบื้องต้น พบว่า ความเร็วรอบที่ส่งผลให้ชิ้นงานยึดติดกันอยู่ในช่วง 760 ถึง 1,640 รอบต่อนาที และชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM356 เป็นด้านหมุนส่งผลให้ชิ้นงานยึดติดกันดีกว่าชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 เป็นด้านหมุน คณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดตัวแปรในการทดลองไว้ตามที่ได้แสดงไว้ในตารางสำหรับการทดลอง โดยมีผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

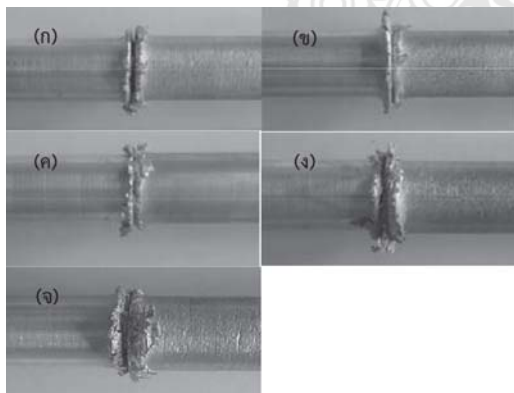
3.1 อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 5 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อม พบว่า ชิ้นงานยึดติดกันได้ดีที่ทุกตัวแปรในการทดลอง เป็นที่น่าสังเกตว่าบริเวณรอยต่อของชิ้นงานจะเกิดครีบ (Flash) ที่แตกต่างกัน โดยความเร็วรอบในการหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดครีบมากกว่าที่ความเร็วรอบจากการหมุนที่ต่ำ ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) ชิ้นงานเกิดครีบน้อยกว่าที่ความเร็วรอบ 1600 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) เนื่องจากความเร็วในการหมุนที่สูงนำไปสู่ความร้อนในขณะที่เชื่อมเสียดทานสูงด้วยเช่นกัน โดยสมการความร้อนในขณะที่เชื่อมเสียดทาน (Heat input) คำนวณได้ดังนี้ (Sawai et al., 2001)

$$qd = P \bullet V_s \tag{1}$$

เมื่อ P คือแรงเสียดทาน (Friction Force) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) และ V_s ความเร็วในการกดอัด (Burn-off speed) มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที (m/s)

จะเห็นได้ว่าแรงเสียดทานที่สูงทำให้เกิดความร้อนที่สูงด้วย ซึ่งการเกิดแรงเสียดทานที่สูงมาจากรอบในการหมุนที่สูงตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น ซึ่งที่ความเร็วรอบ 1,600 รอบต่อนาที มีความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่เชื่อมที่ 10 จุลต่อวินาที ซึ่งความร้อนในขณะที่เชื่อมจะสูงขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น แต่ความเร็วรอบในการหมุนที่สูงเกินไปนำไปสู่การหลุดออกของเนื้อเชื่อมบริเวณรอยต่อ (Interface) เนื่องจากแรงเหวี่ยงจากการหมุนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมเสียดทาน (Yan *et al.*, 2010) ดังแสดงในรูปที่ 5 (จ) ที่ความเร็วรอบ 1600 รอบต่อนาที ทำให้เกิดการหลุดของเนื้อเชื่อมบริเวณรอยต่อ นำไปสู่การเชื่อมติดที่ไม่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามความเร็วหมุนในการเชื่อมที่ต่ำเกินไปทำให้เนื้อของวัสดุไม่เกิดการหลอมละลายนำไปสู่การยึดติดที่ยากของรอยต่อ จะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรที่แตกต่างกันในการทดลองเช่นกัน

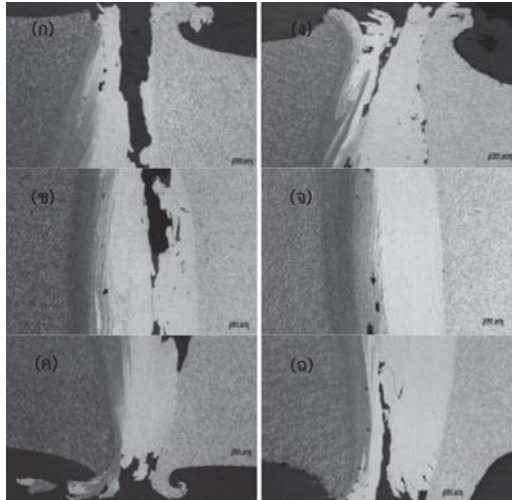


รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทาน (ก) 800 รอบต่อนาที, (ข) 1,000 รอบต่อนาที, (ค) 1,200 รอบต่อนาที, (ง) 1,400 รอบต่อนาที และ (จ) 1,600 รอบต่อนาที

3.2 อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 200 เท่า ที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก, ข และ ค) ซึ่งพบช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ (Macro Voids) บริเวณแนวกลางแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ช่องว่างที่พบจะขนานแนวรอยต่อจากขอบชิ้นงานด้านบนสู่ด้านล่าง ชิ้นงาน คล้าย ๆ กัน บริเวณขอบชิ้นงานทั้งสองด้านพบช่องว่างเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก และ ค) ซึ่งสาเหตุมาจากบริเวณรอยต่อเกิดความร้อนที่ต่ำนำไปสู่การหลอมละลายที่ยาก ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวยึดติดกันได้ยากตามไปด้วย (Boonseng, *et al.*, 2014) ในขณะเดียวกันการเพิ่มความเร็วรอบในการเชื่อมเสียดทานส่งผลให้ชิ้นงานยึดติดดีขึ้น ช่องว่างมีปริมาณที่น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 6 (ง, จ และ ฉ) ที่ความเร็วรอบ 1,600 รอบต่อนาที โดยบริเวณแนวกลางแนวเชื่อมพบช่องว่างที่มีขนาดเล็ก (Micro Voids) บริเวณรอยต่อยึดประสานเข้ากันได้ดีขึ้น ในทำนองเดียวกันบริเวณขอบชิ้นงานด้านบนสู่ด้านล่างชิ้นงานจุดบกพร่องจากการเชื่อมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เป็นที่น่าสังเกตว่าโครงสร้างก้อนกลม (Globular Structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมของวัสดุเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแบบละเอียด (Fine Structure) ในบริเวณแนวเชื่อม เนื่องจากแรงเสียดทานทำให้ยูเทคติกเฟสทั้ง $MgZn_2$ และ Mg_2Si เกิดการแตกหักและความเร็วจากการหมุนลากเนื้อวัสดุให้ไหลเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตาม อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งเกรด SSM356 จะมีบริเวณแนวเชื่อมที่กว้างกว่าอะลูมิเนียมหล่อ

กึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 เนื่องจากมีความแข็งน้อยกว่า ทำให้เกิดความร้อนได้ง่ายและนำไปสู่การหลอมละลายที่ดีกว่าด้วย

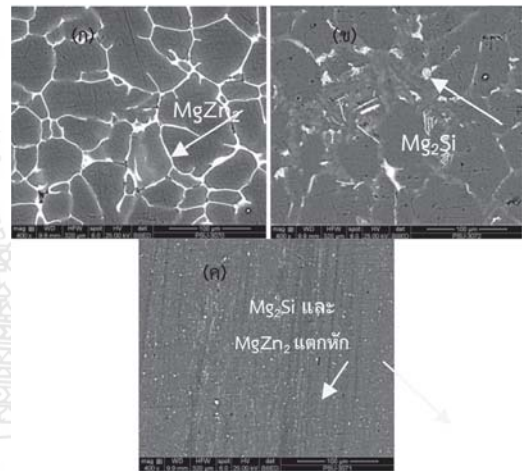


รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานที่ความเร็วรอบ 800 และ 1,600 รอบต่อนาที

3.3 อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่ออนุภาค

หลังการเชื่อมเสียดทาน บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการแตกหักของอนุภาคส่งผลให้มีขนาดที่เล็กลง โดยอนุภาคเดิม ($MgZn_2$) ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 มีรูปทรงแบบแผ่นยาว (Plate-like Shape) ขนาดความยาว 43.158 ไมโครเมตร และกว้าง 7.650 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) และอนุภาคเดิม (Mg_2Si) ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM356 มีรูปทรงแบบแท่ง (Rod Shape) ขนาดความยาว 7.746 ไมโครเมตร และกว้าง 2.843 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) การเชื่อมเสียดทานส่งผลให้อนุภาคมีขนาดที่เล็กลงในบริเวณเนื้อเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมทำให้อนุภาคอ่อนนุ่มและแรงที่เกิดจากการหมุนทำให้

อนุภาคเกิดการแตกหัก โดยมีขนาดความยาว 2.250 ไมโครเมตร และกว้าง 2.144 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 (ค) อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้จะกระจายทั่วบริเวณของแนวเชื่อม

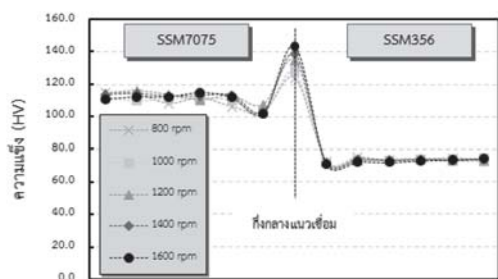


รูปที่ 7 แสดงอนุภาคของชิ้นงาน (ก) อนุภาคพื้นฐานของ SSM7075 (ข) อนุภาคพื้นฐานของ SSM356 และ (ค) อนุภาคบริเวณเนื้อเชื่อม

3.4 อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความแข็ง

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานจะวัดทั้งหมด 13 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระยะห่างระหว่างจุด 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งผลการทดสอบความแข็ง พบว่า บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ มีความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 140.5 HV เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกที่แตกหักจนมีอนุภาคขนาดเล็ก เป็นสาเหตุให้เนื้อเชื่อมมีความแข็งที่เพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าบริเวณอิทธิพลที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (TMAZ) มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลง

ของความร้อนในระหว่างการเชื่อมและทำให้โครงสร้างบริเวณนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สมบูรณ์ จนไปเป็นโครงสร้างแบบหยาบ (Rajamani et al., 2014) โดยผลการทดสอบความแข็งในทุกการทดลองมีผลไปในทำนองเดียวกันซึ่งความแข็งเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 อยู่ที่ 115.5 HV และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM356 อยู่ที่ 78.9 HV ตามลำดับ



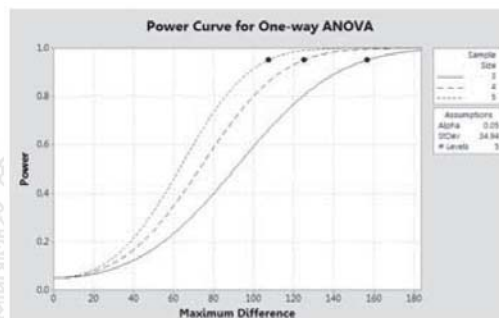
รูปที่ 8 ความแข็งชิ้นงานเชื่อมต่างชนิดกันของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ เกรด SSM356 ด้วยการเชื่อมเสียดทาน

อย่างไรก็ตาม ความเร็วรอบที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะให้ค่าความแข็งสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยที่ความเร็วรอบ 1,600 รอบต่อนาที บริเวณเนื้อเชื่อมให้ค่าความแข็งที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ตัวแปรอื่น ๆ เนื่องจากเกิดความร้อนในระหว่างการเชื่อมสูงสุด นำไปสู่การเพิ่มของความแข็งของชิ้นงาน

3.5 อิทธิพลของความเร็วยรอบที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง

การทดลองเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356 คณะผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบแรงดึงมาออกแบบการทดลองแบบ One-way ANOVA

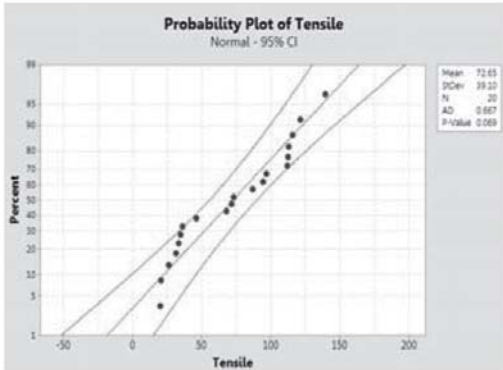
มีปัจจัย 1 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ ซึ่งมีทั้งหมด 5 ระดับ โดยทำการหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมที่กำลังของการทดสอบ 0.95 ขนาดของผลกระทบที่สนใจ 125 MPa และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34.94 จึงทำให้ได้ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม คือ 4 ในการทำการทดลองครั้งนี้ดังแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมของการทดลอง

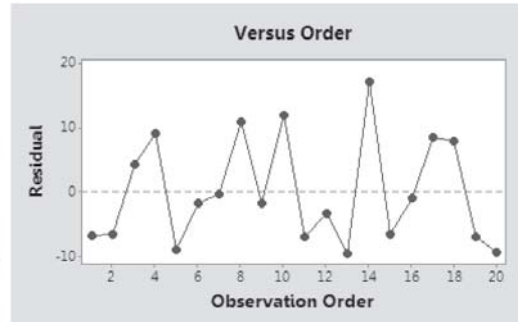
นำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ One-way ANOVA ไปทำการทดลอง โดยทำการทดลองทั้งหมด 4 ซ้ำ และนำค่าความแข็งแรงดึงมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ ซึ่งต้องนำข้อมูลมาตรวจสอบความถูกต้อง เงื่อนไขของการใช้ One-way ANOVA ได้แก่ ความเป็นปกติ (Normality) ความเป็นอิสระ (Independence) และความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance)

จากการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability) เพื่อพิจารณาค่า p-value เปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่ 0.05 ผลการวิเคราะห์จากกราฟการกระจายตัวแบบปกติของค่าความแข็งแรงดึงได้ค่า p-value เท่ากับ 0.069 ทำให้ไม่มีหลักฐานเพียงพอที่สรุปสนับสนุนได้ว่าข้อมูลไม่มีการกระจายตัวแบบปกติ แสดงในรูปที่ 10

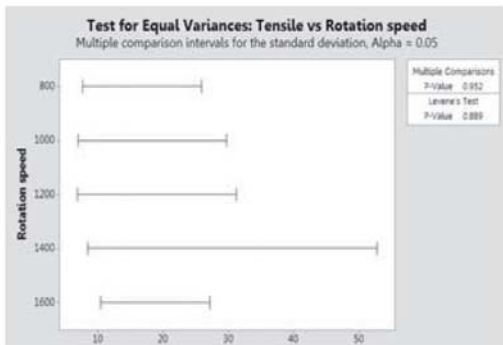


รูปที่ 10 แสดงลักษณะการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล

แสดงในรูปที่ 12 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการใช้ One-way ANOVA นั้นมีความเหมาะสม



รูปที่ 12 แสดงความเป็นอิสระของข้อมูล



รูปที่ 11 แสดงความเท่ากันของความแปรปรวน

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปัจจัยความเร็วรอบ มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-sq เท่ากับ 95.56% หมายความว่า ความผันแปรต่าง ๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่าง ๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 95.56% ส่วนที่เหลือประมาณ 4.44% เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable)

จากรูปที่ 11 เป็นการทดสอบค่าความแปรปรวนของส่วนตกค้าง ซึ่งแสดงช่วงความเชื่อมั่น เปรียบเทียบความแปรปรวนระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับความเร็ว โดยมีทั้งหมด 5 ระดับพบว่า ไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะสรุปว่าค่าความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงของทุกระดับการทดลองนั้นแตกต่างกันเพราะ เมื่อพิจารณาค่า p-value เปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่ 0.05 ซึ่งมีค่ามากกว่า จึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนเท่ากันหรือมีค่าคงที่ของทุกระดับการทดลอง ส่วนความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่า ไม่ปรากฏหลักฐานว่าค่าของส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือแนวโน้มใด ๆ ดัง

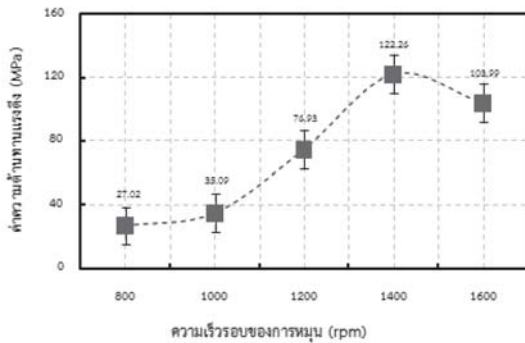
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	p-value
Rotation speed	4	27757	6939.13	80.62	<0.0001
Error	15	1291	86.07		
Total	19	29048			

R-sq 95.56 R-sq (adj) = 94.37%

จากรูปที่ 13 วิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่าง

อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356 พบว่า ความเร็วรอบที่แตกต่างกันนำไปสู่ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างเช่น ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ 27.02 MPa เมื่อความเร็วรอบในการเชื่อมเสียดทานเพิ่มขึ้นจึงมีแนวโน้มที่จะได้ค่าความแข็งแรงดึงสูงตามไปด้วย โดยที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ค่าความแข็งแรงดึงอยู่ที่ 122.24 MPa ซึ่งเป็นค่าสูงสุด เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยุโรปส่งผลต่อการเกิดความร้อนในระหว่างการเชื่อมซึ่งนำไปสู่การยึดติดที่ดีของชิ้นงานและลดจุดบกพร่องจากการเชื่อมได้



รูปที่ 13 แสดงผลค่าความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทานของวัสดุต่างชนิดกัน ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356

เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm มีค่าความแข็งแรงดึงลดลงนั้น เพราะสาเหตุมาจากความเร็วรอบที่มากเกินไปทำให้เกิดการสูญเสียค่าความร้อนในระหว่างการเชื่อมและนำไปสู่การเกิดช่องว่าง

4. สรุป

อิทธิพลของความเร็วยุโรปจากการหมุนส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานต่างวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM7075 กับ SSM356 อย่างชัดเจนซึ่งสมบัติทางกลที่ดีขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการเชื่อม โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.1 โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการแตกหักจนเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบก้อนกลมเป็นโครงสร้างแบบละเอียด ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่แตกหักหลังจากการเชื่อม อยู่ที่ความยาว 2.250 ไมโครเมตร และกว้าง 2.144 ไมโครเมตร และกระจายอยู่ที่บริเวณเนื้อเชื่อม

4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด อยู่ที่ 122.24 MPa ซึ่งได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที และในทางตรงกันข้ามค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที มีค่าอยู่ที่ 27.02 MPa

4.3 บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 140.5 HV ซึ่งสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ และบริเวณอิทธิพลที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีค่าความแข็งที่ต่ำสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองวิจัยจากโปรแกรมวิทยาศาตร์คณิศร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และได้รับการสนับสนุนเครื่องมือในการตรวจสอบสมบัติทางกลจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตลอดจนศูนย์

เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการตรวจสอบทาง โลหะวิทยา ซึ่งทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple smith, C.J. Dawes, U.S. 1991. **Patent PCT/GB, 92102203.**
- Chi-Sung Jeon, Sung-Tae Hong, Yong-Jai Kwon, Hoon-Hwe Cho, Heung Nam Han. 2012. **Material properties of friction stir spot welded joints of dissimilar aluminum alloys.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 22. pp. 605-613.
- J.Q. Su, T.W. Nelson, R. Mishra, M. Mahoney. 2003. **Microstructural investigation friction stir welded 7050-T651 aluminum.** ActaMaterialia. Vol. 51. pp. 713-729.
- M.N, Ahmad Fauzi, M.B. Uday, H. Zuhailawati, A.B. Ismail. 2010. **Microstructure and Mechanical Properties of Alumina-6061 aluminium alloy joined by friction welding.** Materials and Design. Vol. 31. pp. 670-676.
- A. Moarrefzadeh. 2012. **Study of Heat Affected Zone (HAZ) in Friction welding process.** Journal of Mechanical Engineering. Vol. 1. pp. 11-17.
- J. Wannasin, S. Junudom, T. Rattanochaikul, M.C. Flemings. 2008. **Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Process for Aluminum Die Casting Applications.** Solid State Phenom. Vol. 141. pp. 97-102.
- Y.B Yan, Z.W Zhang, W Shen, J.H Wang, L.K Zhang, B.A.Chin. 2010. **Microstructure and properties of magnesium AZ31B–aluminum 7075 explosively welded composite plate.** Materials Science and Engineering: A. Vol. 527(9). pp. 2241-2245.
- T. Sawai. 2001. **Evaluation of Joint Strength of 6061 Aluminum Alloy Joint Welded Under Inertia Type Friction Welding by Heat Input and Burn-Off Length.** Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference Stavanger, Norway, June 17-22.
- K. Boonseng, C. Meengam, S. Chainarong, P. Muangjunburee. 2014. **Microstructure and Hardness of Friction Welded SSM 356 Aluminium Alloy.** Advanced Materials Research. Vol. 887-888. pp. 1273-1279.
- K. Sandeep, K. Rajesh, S.K. Yogesh. 2012. **To study the mechanical behavior of friction welding of aluminum alloy and mild steel,** The International Journal of Robotics Research Vol. 1(3). pp. 43-50.

G.P. Rajamani, M.S. Shunmugam, K.P. Rao.
1992. **Friction welding of high-
strength steel offers a joint with**

good properties and a minimal HAZ.
Welding Research Supplement. pp. 225-
230.

