

**A6061-T6 鋁合金摩擦攪拌點銲—
製程參數對銲道形貌及拉剪強度之效應**
**Effects of process parameters on morphology and
tensile-shear strength of A6061-T6
Al alloy friction stir spot welds**

劉如真

Ju Jen Liu

黎明技術學院化學工程與材料工程學系
Department of Chemical Engineering and Materials Engineering, Lee-Ming
Institute of Technology

陳俊男

Jinn Nan Chen

臺灣科技大學機械工程系
Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University of
Science and Technology

摘 要

本研究應用摩擦攪拌點銲(friction stir spot welding; FSSW)製程於A6061-T6 鋁合金板材之搭接，並探討在固定擠入速度及攪拌工具條件下，攪拌轉速及工具停留時間(dwell time)等銲接參數對銲件形貌及拉剪破壞性質的影響。

實驗結果顯示，摩擦攪拌點銲製程中，保持時間的增加可有效擴大攪拌區及上下板的接合範圍，因此拉剪破壞強度隨保持時間增加有增大的趨勢。但當保持時間超過 5 s，將因材料性質劣化及上板有效厚度的減少而使拉剪強度降低。此外，拉剪破壞強度隨工具轉速的降低而有增大的趨勢。使用低工具轉速(1250rpm)摩擦攪拌點銲之銲件，雖未形成大攪拌區(stir zone; SZ)，但由於其接合界面特殊的機械互鎖(mechanical interlocking)形態，使其具有較高的拉剪破壞強度及伸長量。因此，更大的攪拌區及上下板接合面積，雖是銲件具有高拉剪破壞強度之必要條件，但上下板接合界面的形態更是關鍵因素。

關鍵詞：摩擦攪拌點銲、A6061-T6、拉剪破壞強度



Abstract

In this study, two overlapped A6061-T6 aluminum sheets were welded by friction stir spot welding (FSSW) using several rotational speeds and dwell time. After that, welding morphologies and tensile-shear fracture properties were discussed.

According to the results, tensile-shear failure load of welds is proportional to rotational speeds. When the welds were applied 1250rpm, although no significant stir zone was formed, superior tensile-shear failure load and elongation were achieved because of the unique bonding interface and mechanical interlocking effect. The result showed that the hook morphology plays a crucial factor during FSSW.

Key Words: Friction stir spot welding, A6061-T6, tensile-shear failure load



1. 前言

摩擦攪拌銲接(friction stir welding; FSW)是英國 TWI (The Welding Institute) 在 1992 年所研發出的一種固態銲接技術 [1-4]。近年來，更由德國 German factory GKSS[5]將其擴充應用於點銲技術稱為摩擦攪拌點銲(friction stir spot welding; FSSW)。Mazda Motor Corporation 首先將此技術應用於汽車工業-2003 RX-8 型汽車後門 [6,7]。

摩擦攪拌點銲過程中，由於攪拌工具(tool)高速轉動並停留一適當時間，對材料摩擦使產生熱量，進而使材料軟化，攪拌工具得以擠入銲件內。由於攪拌的作用，工具停留期間將使上下板逐漸混合(mixing)，因而使原本分離的上下板於界面間產生接合(bonding)。攪拌工具的轉速會影響此銲接製程中熱量的生成及材料塑性變形的程度，一般而言，提高工具轉速將使材料受較激烈的攪拌作用，而形成更大的摩擦熱，升溫也較快[8]，但在過度高溫情況下，工具表面與銲件接觸面之摩擦係數將有明顯變化，不但無助於銲件接合，反而因高溫而使材料機械性質劣化。Arul 等人[9]在對 A6111-T4 摩擦攪拌點銲(FSSW)研究中發現，銲件拉剪強度隨攪拌工具的保持時間增加，然而當保持時間持續拉長後，拉剪強度即降低。Yin 等人[10]在對 AZ31 的 FSSW 研究中發現，適當長度的保持時間對攪拌區(stir zone; SZ)及鍵結的形成是必要的，然而過長的保持時間，雖有利於鍵結形成，卻也同時使上板的有效厚度薄化，而使銲件強度下降。Lathabai 等人[11]在其研究中發現，攪拌工具的擠入深度對銲件的強度有決定性的影響。當擠入深度由板厚度的 85%增至 95%時，拉剪強度有近 200%的增幅，主要因素為較高擠入深度同時也增加了工具

肩部(shoulder)的擠鍛效應，更能促成銲件接合。研究亦發現，擠入深度和銲件的鍵結面積及拉剪強度有直接的關聯性。圖 1 為摩擦攪拌點銲銲件之銲道組織分佈示意圖。

本文選定圓柱形並車有螺牙凸銷(pin)的攪拌工具，經由變化銲接參數包括工具轉速及保持時間，對 1.6 mm 板厚的 A6061-T6 鋁合金進行 FSSW。藉由銲道之巨觀形貌觀察及後續的拉剪試驗(tensile-shear test)及破裂模式與特徵等分析，以探討製程參數對上下板接合及銲件強度之效應。

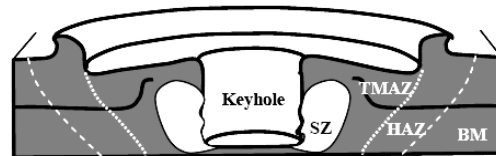


圖 1 摩擦攪拌點銲銲件之銲道組織分佈示意圖

2. 實驗方法

本文中摩擦攪拌點銲(FSSW)的材料為經人工時效處理後的 A6061-T6 鋁合金軋延板材。試片長、寬及厚度分別為 80mm×35mm×1.6mm。點銲搭接尺寸依據 AWS C1.1-2000 規範，搭接長度為 50mm，前後預留 25mm 長度供後續拉剪試驗時平板夾頭夾持用。FSSW 攪拌工具的材料為經熱處理硬化的 SKH9 高速鋼，硬度為 HRC60，肩部直徑及內凹傾角分別為 12 mm 及 13°，凸銷的長度(自肩部下緣至凸銷末端之距離)則為 2.6mm，凸銷的直徑為 4mm。

FSSW 在電腦數值控制中心機(CNC)之位移控制模式下進行，固定搭接板材的夾具為中碳鋼 JIS S45C。

本文使用圓柱螺牙凸銷攪拌工具及擠入速率固定為 1 mm/s，改變銲接參數如轉速



及保持時間等，詳細參數設定如表 1 所示。工具保持時間的計算方式是以攪拌頭碰觸鋁件上表面時開始計算，直至抽離鋁件為止。

經 FSSW 製程銲接後的鋁件以匙孔(keyhole)中心位置為基準，沿縱向(即軋延方向)取其縱切面，經研磨拋光等金相製備後，以 Keller's Reagent 腐蝕試片 3-5 分鐘後，以數位相機及光學顯微鏡(Olympus-BX51M)觀察並記錄銲道組織的分佈情形。

另一方面，經 FSSW 後的鋁件直接進行拉剪試驗，以測試 FSSW 銲件接合強度。拉剪試驗依據 AWS D17.2 /D17.2M 規範，利用 MTS 810 油壓試驗儀在單軸向拉伸試驗模式下進行。拉伸速率設定為 0.15 mm/s，每一銲接條件至少測試三組鋁件，再取實驗數據平均值作為該銲接條件之拉剪強度實驗值。

表 1 摩擦攪拌點銲製程參數

轉速 (rpm)	擠入深度 (mm)	保持時間 (s)
1250	2.8	3
2000		3
2500		3
3000		3
2500	2.8	0
		1
		2
		3
		4
		5
		6

3. 結果與討論

作者在另一實驗中發現，於 FSSW 期間，凸銷上的螺牙，對材料之軸向流動及上下板的交互混合效應扮演重要角色，而材料的塑性流動行為是決定銲道形貌的重要因素。根據金屬材料的塑性流動理論，可歸納出 FSSW 期間造成材料塑性流動的主要因素為：1.壓力(或應力)梯度、2.接觸作用力(traction force)及 3.材料的流動應力(flow stress)，而這些因素都直接受到攪拌工具及銲接參數的影響。在本文中，為瞭解銲接參數包括攪拌工具的轉速、擠入深度及保持時間對鋁件接合形貌及拉剪破壞強度及破壞模式的影響，實驗設計上變化特定銲接參數，而以圓柱螺牙凸銷攪拌工具對板厚 1.6mm 的 A6061-T6 鋁合金進行 FSSW 製程，藉以瞭解銲接製程參數對銲道形貌及拉剪破壞性質之效應。

3.1 工具轉速對摩擦攪拌點銲之效應 工具轉速對摩擦攪拌點銲之效應

3.1.1 銲道形貌

圖 2 所示為四種不同轉速且保持時間及擠入深度分別固定 3 s 及 2.8 mm 製程之鋁件縱斷面 OM 影像。比較 1250 rpm 及 2000 rpm 製程的鋁件，銲道外觀及攪拌區的尺寸出現顯著的差異。在相同的保持時間，2500 rpm 製程的凸銷提供相對於 1250 rpm 製程兩倍的圓周轉動，螺牙可將更多的上板材料引入攪拌區，使攪拌區快速成長且上板近匙孔(keyhole)處的厚度也逐漸減少。而較高轉速(2500 及 3000rpm)的鋁件，其銲道外觀差異不大，僅在較高轉速下，攪拌區有朝下方擴展的趨勢，在 3000 rpm 時，攪拌區幾乎延伸至下板最底



部。FSSW 過程中，縱使高轉速製程可使螺牙有更多機會將上板材料引入攪拌區，然而過高轉速將使材料軟化，降低材料流動之驅動力，因而攪拌區尺寸在較高轉速下並未相對明顯成長。1250rpm 製程中，因攪拌工具對高流動應力的材料產生較明顯擠製效應，引發另一提高銲件強度的機制，即形成倒勾狀的上下板接合界面而產生上下板機械互鎖(mechanical interlocking)效應，如圖 3 所示。

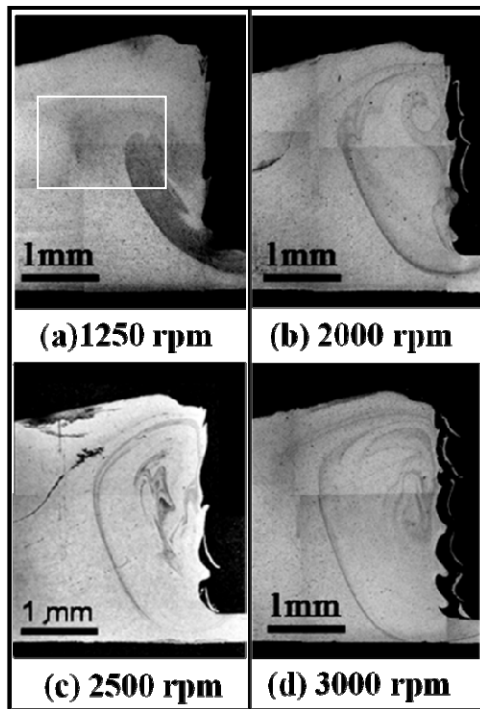


圖 2 不同轉速製程之銲件的縱斷面 OM 影像(保持時間 3s、擠入深度 2.8mm)

3.1.2 拉剪強度

改變 FSSW 製程之轉速，將使材料的溫度分佈及軸向力產生變化，如圖 2 所示，銲道形貌出現明顯差異，包括上下板接合區域、SZ 幾何形狀及 hook 的斜率，皆因轉速變化出現明顯差異，此現象勢必影響銲件拉剪試驗的機械行為。

在拉剪試驗過程，除少數攪拌區很小的銲件直接受剪力破壞外，其餘銲件鮮少是單一模式發生破斷。由於銲件在未接合與接合界面的交界會形成一近似於裂縫尖端的形態，其引發的應力集中效應使得拉剪過程裂縫大多起始於此處，並沿 hook 發展。隨著區域鍵結強度的變化，裂縫的成長受阻，因此包括受力承載面積的大小、材料機械性質及裂縫尖端的受力狀態決定銲件的最終破斷模式。以下是可能出現的三種破壞型態：

- 剪斷破斷(nugget fracture)：發生於窄小銲道接合區之銲件，如圖 4(a)所示。
- 穿板破壞：具有寬大接合區域的銲件，上板材因受拉伸而沿厚度方向發生頸縮破斷。銲件的穿板破壞常發生於受高負載且具高伸長量之銲件，如圖 4(b)所示。
- 界面破壞：裂紋沿界面發展而導致破壞，如圖 4(c)所示。

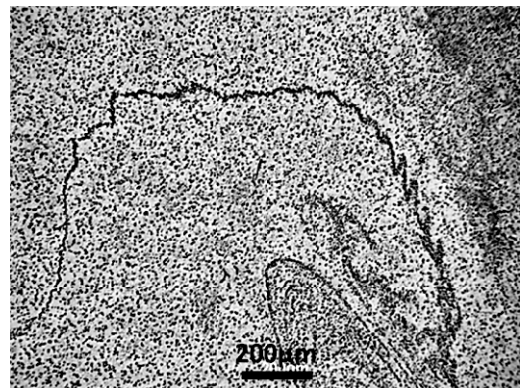


圖 3 1250 rpm 轉速製程之銲件之機械互鎖接合界面型態(圖 2(a)方框處放大 SE 影像)

圖 5 為銲件拉剪強度和攪拌工具轉速的關係。由圖發現，1250 rpm 低轉速製程



比高轉速製程的鋁件具更高的拉剪破壞強度。圖 6 為鋁件經拉剪試驗破斷後的下板上視影像。轉速在 2000 rpm 以上製程之鋁件，最後拉斷的破斷都是先沿上下板接合界面分離最後再沿厚度方向景縮，如圖 4(b)所示；1250 rpm 製程之鋁件呈現剪斷破裂模式(圖 4(c))，此製程的鋁件其攪拌區及接合區域不大，因此發生剪斷破壞的原因若非是窄小的攪拌區及接合區域，就是鋁件上下板接合強度高於原材料強度。

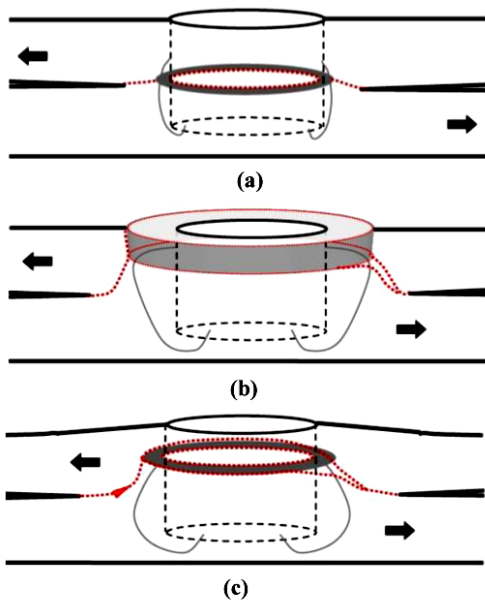


圖 4 鋁件拉剪試驗的破壞模式

如圖 2 所示，雖然 1250 rpm 製程的攪拌區及接合寬度不比 2500 rpm 製程的鋁件大，最後卻有更高的拉剪破壞強度，顯示影響鋁件拉剪破壞強度之因素，除攪拌區及接合區域的大小之外，上下板接合界面的形態更是關鍵。實驗結果發現此類具機械互鎖效應接合界面的鋁件，即使攪拌區及接合面積不大，仍具相當高的破斷強度，顯示接合界面形貌對鋁件的強度的重要程度可見一般。

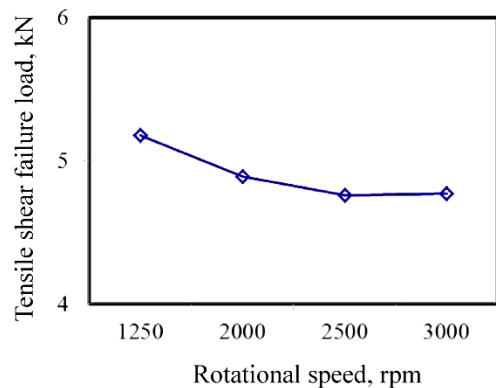


圖 5 不同轉速製程鋁件之拉剪破壞負載

3.2 保持時間對摩擦攪拌點鋁之效應

3.2.1 鋁道形貌

當拉長 FSSW 期間的保持時間，材料即有足夠時間產生塑性流動以促使攪拌區成長。圖 7 為四種不同保持時間製程的鋁件縱斷面影像，由圖顯示攪拌區隨保持時間增加而增大，尤其當保持時間為 0-3 s 階段，其增幅十分明顯。接近凸銷周圍的上板材料在保持階段逐漸進入攪拌區，導致上板有效厚度縮減的趨勢十分明顯，但比較 3 及 6 s 保持時間的製程，上板材料厚度減小的情況不甚明顯，顯示在拉長保持時間後，上板材料軸向運動似乎有趨緩趨勢，其原因乃增加保持時間將使鋁道溫度升高，而高溫將降材料與凸銷的摩擦效應，亦即螺牙軸向輸送效應將隨溫度的上升而衰退(猶如螺牙輸送液體的傳送效應較輸送固體不明顯)。



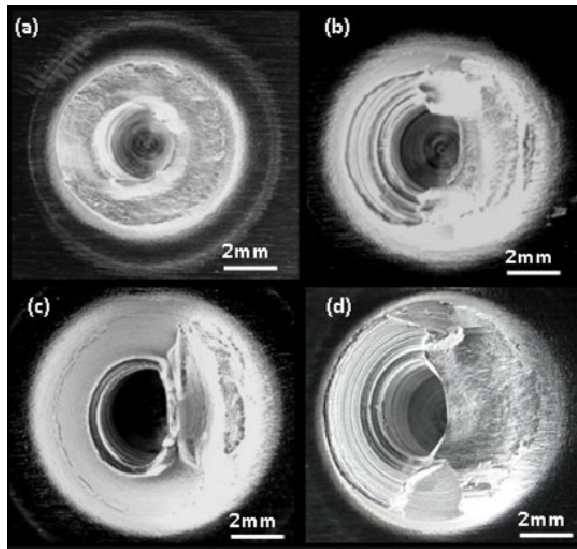


圖 6 不同轉速製程銲件之拉剪破壞斷面形貌(下板材)：(a) 1250 rpm, (b) 2000 rpm, (c) 2500 rpm, (d) 3000 rpm

3.2.2 拉剪強度

FSSW 之銲件的破裂型式與接合區域面積有關，較大接合面積的銲件，在拉剪試驗過程，銲件較難直接以剪斷或拉斷破壞，其破壞常起始於裂縫而沿界面發展；相對而言，較小接合面積的銲件，在拉剪試驗過程，因可承載剪力的面積較小，因而常以剪斷方式而破壞。而當 FSSW 的保持時間過常時，上板的有效厚度減少，當銲件在拉剪試驗中受到較高的負載階段時，常因厚度方向的承載面積不足以抵抗正向拉力而被拉斷。由圖 8 得知，隨著 FSSW 製程的保持時間增加時，銲件的拉剪強度隨之提高，然而，當保持時間達 6 s，相較於 5 s 銲件，其拉剪強度出現下降趨勢，因此，過長的保持時間，不僅無助於提升銲件的抗剪強度，並且浪費工時及能源，更有造成鋁合金性質在高溫過程中劣化的可能性，不得不加以重視之。

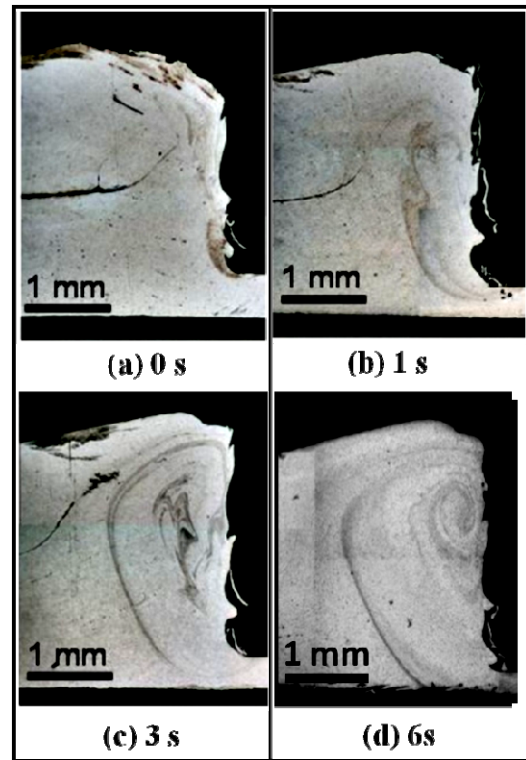


圖 7 不同停留時間製程之銲件縱斷面影像

由於攪拌區的形成與材料的塑性流動有關，加長保持時間通常可使攪拌區明顯成長，並且在攪拌區成長過程中，將使上下板接合界面向上並朝向攪拌區外側移動，而減少鄰近匙孔處的上板有效厚度，如圖 7 所示。在拉剪試驗後，觀察不同保持時間銲件的破斷模式，如圖 9 所示，保持時間 0 s 的銲件，因接合區域相對小，在較低負載下受剪切而破壞(參考圖 4(a))。1 s 保持時間製程的銲件，在低負載過程主裂縫沿接合界面及環向發展，最後因承受剪力的面積不足以支撐負載而被剪切破壞(參考圖 4(c))。保持時間 3 s 以上製程的銲件，其上板有效厚度相對於較短保持時間製程之銲件較小，因而拉剪試驗開始時，主裂縫沿接合界面及環向發展，但當負載提高時，因承受正向拉力的面積不足以支撐負載而沿厚度方向被拉斷(參考圖 4(b))。



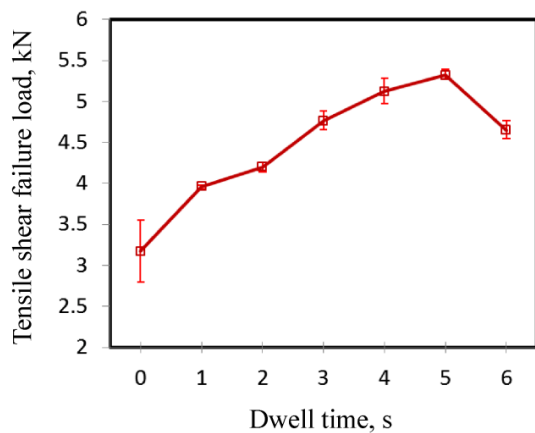


圖 8 不同停留時間製程銲件之拉剪破壞負載

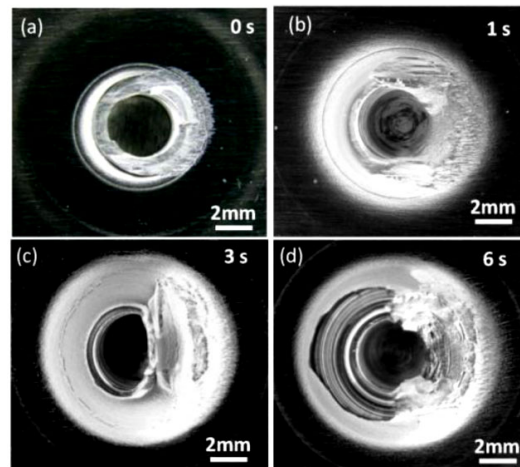


圖 9 不同停留時間製程銲件之拉剪破壞斷面形貌(下板材)

5. 結論

1. 銲件拉剪破壞強度隨攪拌工具轉速降低而有增大的趨勢。高轉速製程銲件的拉剪破壞模式傾向於穿板破壞，而低轉速製程銲件則是傾向於剪斷破壞。
2. 低轉速條件下，銲件雖不具有大的攪拌區，但因上下板接合界面具有特殊的機械互鎖(mechanical interlocking) 形貌，因此相較於高轉速，其具有較高的拉剪破壞強度及伸長量。由此得知，較大的攪拌區及上下板接合面積，雖是銲件具有高拉剪破壞強度之必要條件，但上下板接合界面的形態更是影響銲件接合強度的關鍵因素。
3. 摩擦攪拌點銲製程中，保持時間的增加可有效擴大攪拌區及上下板的接合範圍，因此拉剪破壞強度隨保持時間增加有增大的趨勢。但當保持時間超過 5 s，將因材料性質劣化及上板有效厚度的減少而使拉剪強度降低。

參考文獻

1. W. M. Thomas and E. D. Nicholas, "Friction stir welding for the transportation industries," *Materials and Design*, Vol. 18, No. 4/6, pp. 269-273, 1997.
2. R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan, "Development of grain structure during friction stir welding," *Sripta Materialia*, Vol. 51, pp. 243-248, 2004.
3. W. Deqing and L. Shuhadr, "Study of friction stir welding of aluminum," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 1689-1693, 2004.
4. R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering: R*, Vol. R50, pp. 1-78, 2005.
5. C. Schilling, J. Dos Santos, "Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding," US Patent Application 2002/0179682.



6. 日本川崎重工業:
<http://www.khi.co.jp/robot/>.
7. D. A. Wang and S. C. Lee, “Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, pp. 291–297, 2007.
8. S. Bozzi, A. L. Helbert-Ettera, T. Baudin, V. Klosek, J. G. Kerbiguet, and, B. Criqui, “Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminum welds,” *Journal of Materials Processing Technology*, 210, pp. 1429–1435, 2010.
9. S.G. Arul, S.F. Miller, G.H. Kruger, T.Y. Pan, P.K. Mallick and A.J. Shih, “Experimental study of joint performance in spot friction welding of 6111-T4 aluminium alloy,” *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 13, No. 7, pp. 629-937, 2008.
10. Y.H. Yin, N. Sun, T.H. North, and S.S. Hu, “Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds,” *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, pp. 2062–2070, 2010.
11. S. Lathabai, M. J. Painter, G. M. D. Cantin, and V. K. Tyagi, “Friction spot joining of an extruded Al–Mg–Si alloy,” *Scripta Materialia*, 55, pp.902, 2006.



