

고주파스핀들을 이용한 박판 알루미늄합금소재 (Al5052-H32)의 마찰교반접합에 의한 용접성 평가

주영환*, 박영찬*, 이용문*, 김광호**, 강명창*,**,#

*부산대학교 융합학부, **하이브리드 인터페이스기반 미래소재 글로벌프론티어연구단

The Weldability of a Thin Friction Stir Welded Plate of Al5052-H32 using High Frequency Spindle

Young-Hwan Joo*, Young-Chan Park*, Yong-Moon Lee*, Kwang-Ho Kim**
Myung Chang Kang*,**,#

*Graduate School of Convergence Science, Pusan National Univ.,

**Global Frontier R&D Center for Hybrid Interface Materials

(Received 6 December 2016; received in revised form 24 January 2017; accepted 9 February 2017)

ABSTRACT

Recently, smaller and lighter products have become of interest in industry applications that increasingly demand thin plate joints of thickness 1.0 mm or less using friction stir welding. In this study, high frequency spindles that run at 3,500–6,500 rpm are introduced for thin friction stir-welded plates. Weldability tests are performed for the butt-joint method of Al5052-H32 alloy of 1.0 mm thickness under 3,500–6,500 rpm spindle revolution with 250–400 mm/min feed speed. An optical microscope was used to analyze the bid structure of the welded zone and stir zone. The tensile-strength and hardness of the welded zone were then measured.

Key Words : Micro-Friction Stir Welding(마이크로 마찰교반용접), High Frequency Spindle(고주파스핀들), Al 5052 alloy(알루미늄합금), Weldability(용접성), Thin Plate(박판)

1. 서 론

산업계에서는 환경보호와 에너지 절감에 대한 요구가 국내외적으로 높아짐에 따라 경량화에 대한 기술개발이 활발하게 진행되고 있다. 경량합금 중 내식성, 연신율, 가공성이 우수하고 재활용성이 좋은 알루미늄 합금이 주목받고 있다. 이에 따라

알루미늄의 접합 한계성을 해결할 수 있는 마찰교반접합(Friction Stir Welding :FSW) 공정 또한 적용분야가 매우 넓어지고 있다.^[1-2]

한편 제품의 소형화 및 경량화 됨에 따라 각 산업분야에 마찰교반접합을 이용한 두께 1 mm이하의 박판접합의 수요가 점차적으로 증가하고 있다. 박판의 특성상 큰 열변형과 고정법 그리고 접합장치의 높은 강성을 필요로 하는 어려움이 있다. D. M. Rodrigues^[3] 등은 Al6016-T4 합금의 두

Corresponding Author : kangmc@Pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-7395, Fax: +82-51-510-7396

께 1 mm를 이용해 공구의 숄더(Shoulder)가 형상을 가지는 것과 형상이 없는 두 가지 공구를 이용하여 공구회전속도 1120 ~ 1800 rpm의 조건에서 접합 공구의 숄더 형상에 따른 미세구조를 관찰하였다. Yuri Hovanski^[4] 등은 알루미늄의 맞춤형 블랭킹(Tailor-welded blanks)에 마찰교반접합을 통하여 1100 ~ 1950 rpm으로 1.2 ~ 3.3 mm의 두께소재에 대한 용접성을 고찰하였다. 기존 대부분의 연구에서는 공구회전속도를 3000 rpm 이하로 연구가 진행되었으며, 3000 rpm 이상의 마찰교반접합 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서, 본 논문에서는 3000 rpm 이상을 가지는 고강성의 고주파스핀들과 두께 1 mm 이하의 박판을 효과적으로 고정할 수 있는 진공척을 설계 및 제작하여, 박판용 마찰교반접합장치를 개발하였다. 그리고 용접성 평가를 위해 접합비드면을 관찰하였고, 접합조건에 따른 인장강도와 경도값 그리고 접합부 미세조직을 비교 분석하였다.

2. 박판용 마찰교반접합 공정

마찰교반접합은 Fig. 1에서처럼 공구가 회전하여 소재에 프로브(Probe)가 삽입되면 공구와 소재 사이에 마찰열로 인해 소재가 연화된다. 프로브는 소재표면에 직접 삽입되어 회전, 교반작용을 하고 숄더 소재표면과 마찰열을 발생시키고 손실될 수 있는 연화된 소재와 열을 지키는 역할은 한다.^[5]

마찰교반접합장치는 X, Y, Z축과 공구 틸팅각(Tilting angle)을 가능하게 하는 C축으로 구성되어 있다. 틸팅각은 TWI(The Welding Institute) 특허에 의해서 1~5°범위에서 사용되며 공구의 숄더는 오목(Concave)형상으로 제작하여 사용된다. 박판접합에서의 틸팅각에 따른 박판 소재 손실을 알아보기 위해서 Fig. 2로부터 연관성을 조사하였다. 두께의 손실은 틸팅각이 클수록 숄더의 삽입 깊이가 깊어지고 이로 인해 접합부의 두께가 작아짐을 알 수 있다.^[6] 그러므로 소재의 손실을 줄이기 위해 박판에 대한 마찰교반접합에 있어 틸팅각을 0°로 하고 공구의 숄더가 볼록(Convex)형상인 공구를 통해 접합두께가 손실을 줄일 것으로 기대된다.

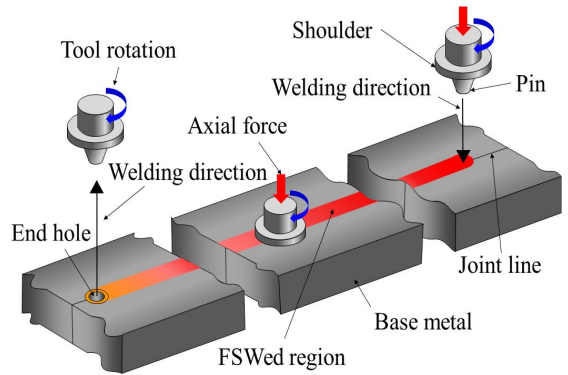


Fig. 1 Schematic diagram of FSW process^[5]

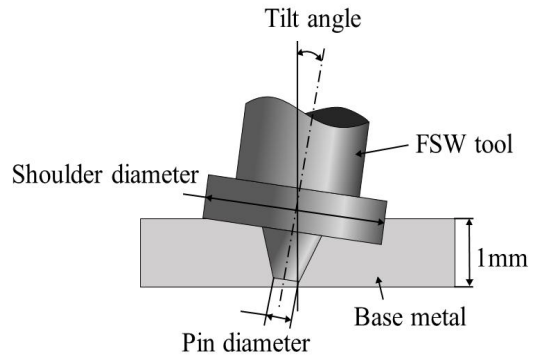


Fig. 2 Effect of tool's tilting angle at FSW process

3. 실험장치 및 방법

3.1 박판용 마찰교반접합장치 구성

본 실험에서 공구회전속도를 높여 접합부하를 줄이고 입열량을 높이기 위해 3000 rpm 이상의 고속회용 고주파스핀들을 채용하여 Fig. 3과 같이 설계하였다. 그리고 동력손실을 최소화하기 위해 빌트인방식을 채택하였다. 마찰교반접합의 특성상 공구를 통해 전달되는 열을 고려하여 고주파스핀들의 하우징에 냉각자켓을 설치하여 냉각수가 20°C로 순환하게 하였다.^[7-8] Fig. 4는 박판용접에서 주축부와 이송부의 충분한 강성을 고려한 장비이

며, 박판의 마찰교반접합의 소재의 셋팅효율을 높이기 위해 5 mm으로 $\phi 2$ 홀을 가공하고 최대진공 2/20bar의 진공펌프를 사용하여 흡입통로를 통해 진공 흡입력을 발생시킴으로써 소재를 간단하게 지그에 고정시킬 수 있도록 하였다. 공구는 열충격에 강한 소재로 열간금형강 STD61(HRC60)을 Fig. 5와 같이 제작하여 사용하였다.^[9]

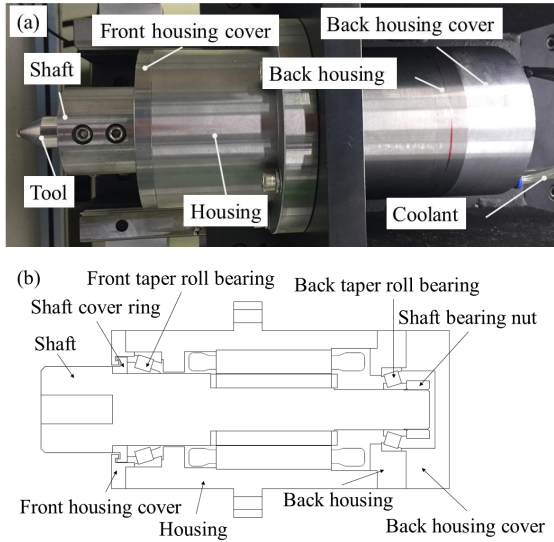


Fig. 3 Schematic image of high frequency spindle for thin FSW process (a) photo of high frequency and (b) Drawings of high frequency spindle^[9]

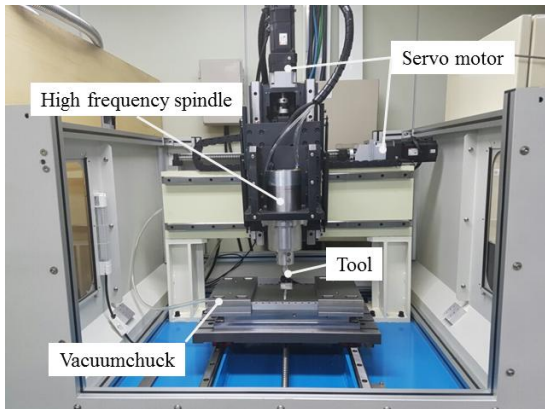


Fig. 4 Photo of μ -friction stir welding machine^[9]

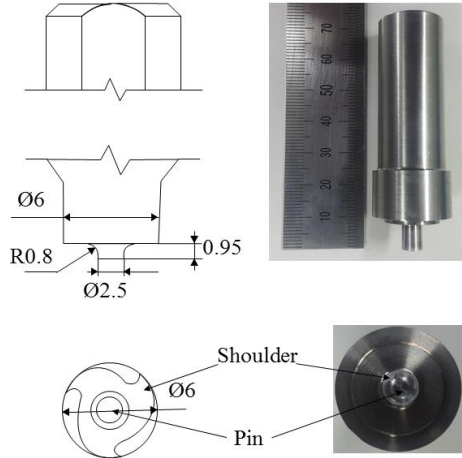


Fig. 5 Geometry shape and photo of FSW tool

3.2 FSW 실험방법 및 특성 분석방법

맞대기용접시의 접합부 균일도를 고려하여, 밀링가공을 통해 100 mm x 300 mm x 1 mm 크기로 절단하였다. AI5052-H32 합금의 화학적 성분 및 기계적 성질은 각각 Table 1, Table 2와 같다. 접합조건은 Table 3과 같이 공구회전속도 3500 ~ 6500 rpm과 접합속도 250 ~ 400 mm/min에서 실험을 진행하였다. 용접성의 평가방법은 비드면의 아크(Arc)와 버(Burr)의 형태, 회전피치, 크랙 등을

Table 1 Chemical compositions of AI5052-H32

Mg	Si	Cr	Mn	Cu	Zn	Fe	Al
2.6	0.25	0.25	0.1	0.1	0.1	0.4	Bal.

Table 2 Mechanical characteristics of AI5052-H32

Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
230	195	12

Table 3 Experimental conditions in FSW process

Parameter	Conditions
Rotating speed(rpm)	3500, 4500, 5500, 6500
Welding speed(mm/min)	250, 300, 350, 400

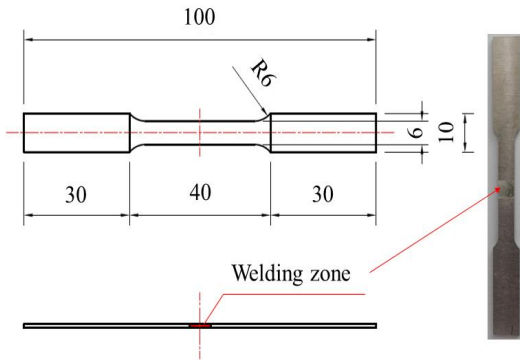


Fig. 6 Drawing and actual photo of specimen for UTM(Ultra tensile-strength measurement) test

기준으로 관찰하였다. 인장시험은 ASTM E8 규격에 의하여 Fig. 6과 같이 시험편을 제작하여 평가하였고, 마이크로 비커스 경도기(MMT-X, Matszawa)를 이용하여 경도값을 측정하였다. 접합부의 미세구조는 연삭과 폴리싱 과정을 거친 후 에칭하여 광학현미경(KH8700, Hirox)을 통해 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 접합 비드면 관찰

접합길이 100 mm를 기준으로 장비 제작 중 테스트를 통한 선행실험과 전문가의 기술문의를 통해 접합가능범위의 평가기준을 선정하였고, Table 4는 접합가능범위 결과이다. Fig. 7은 공구회전속도 3500 rpm과 6500 rpm, 접합속도 250mm/min과 400 mm/min의 비드면을 나타내고 있다. Fig. 7(a) ~ (b)는 공구회전속도 3500 rpm인 경우에 불규칙한 아크와 버의 발생이 적은 것으로 보아 입열량이 적음을 알 수 있다. Fig. 7(c) ~ (d)에서는 6500 rpm에서 비교적 높은 공구회전속도의 효과로 인해 아크가 일정하게 나타난다. Fig. 7(c)의 경우 실험조건 중 가장 높은 입열량을 가지는 조건으로 많은 양의 버가 생성되는 것에 반해 Fig. 7(d)는 접합속도가 빨라지면서 버가 많이 감소함을 알 수 있다.

4.2 인장강도 특성

Fig. 7은 접합속도 250 mm/min의 조건에서 공구회전속도에 따른 인장강도로 공구회전속도가 빠를수록 인장강도가 떨어짐을 보였다. 또한 공구회전속도 3000 rpm 이하의 Al5052-H32에 대한 인장강도 특성과 같은 경향을 보였다.^[10] Fig. 8은 접합속도 400 mm/min에서 공구회전속도에 따른 인장강도 특성으로, 공구회전속도 6500 rpm 조건을 제외한 모든 공구회전속도에서 접합속도 250 mm/min의 조건 보다 인장강도가 떨어졌다. 특히, 공구회전속도 6500 rpm에서 250 mm/min조건에서 122 MPa의 인장강도를 가지나 250 mm/min조건에서 122 MPa의 인장강도를 가지나 400 mm/min조건에서는 133 MPa로 인장강도가 상승함을 보였고, 이러한 결과는 접합속도가 빨라짐에 따라 입열량이 줄어 인장강도가 증가함을 알 수 있다.^[9]

4.3 접합부 경도값 특성

공구회전속도에 따른 경도 값을 변화를 관찰하기 위해 접합속도 400 mm/min일 때 3500 ~ 6500 rpm의 조건의 경도 값을 측정한 결과는 Fig. 9와 같고, 공구회전속도와 상관없이 거의 비슷한 값을

Table 4 Proper FSWed conditions through bead state

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)					
	250	300	350	400	600	800
6500	○	○	○	○	○	○
5500	○	○	○	○	○	○
4500	○	○	○	○	○	X
3500	○	○	○	○	X	X

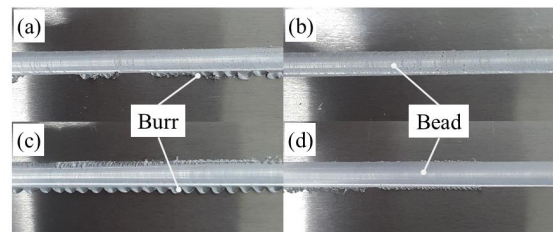


Fig. 7 Bead state with (a) 3500rpm, 250 mm/min (b) 3500rpm, 400mm/min (c) 6500rpm, 250mm/min and (d) 6500rpm, 400mm/min

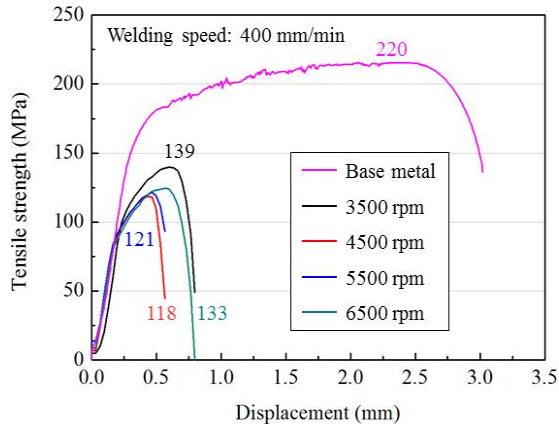
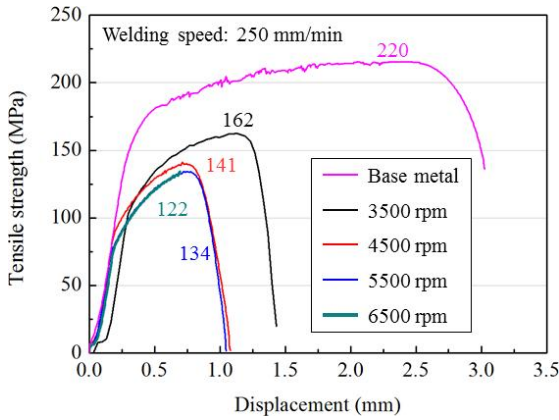


Fig. 8 Tensile strength according to welding speed 250 mm/min, 400 mm/min

가지는 경향을 보였다. 또한 모재에 비해 접합부는 경도 값이 낮으며, 특히 교반부에 비해 열영향부에서 급격히 낮은 특성을 보였다.

4.4 접합부 미세조직 관찰

접합속도 400 mm/min에서, 입열량이 가장 낮은 3500 rpm과 가장 높은 6500 rpm에서의 미세구조를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)에서는 입열량이 적어 직접적으로 입열되는 부분만 교반부가 얇고 좁게 형성되어 있고, Fig. 10(b)는 입열량의 증가로 교반부가 프로브를 중심으로 넓게 형성되어 있다. 공구회전속도가 높아질수록 입열량의 증가로 소재의 연성이 높아져 공구원심력에 의해 버로 이탈되는 소재가 많아져 접합부가 얇아진다.^[9,11]

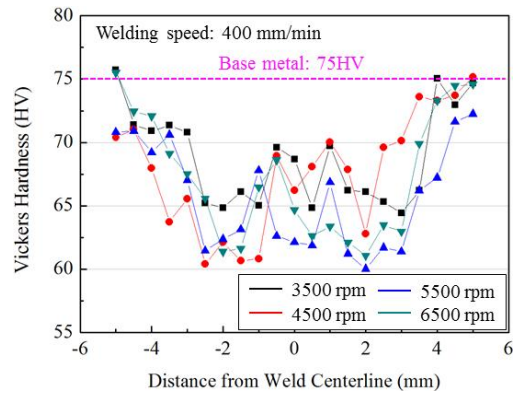


Fig. 9 Micro-hardness according to tool speed

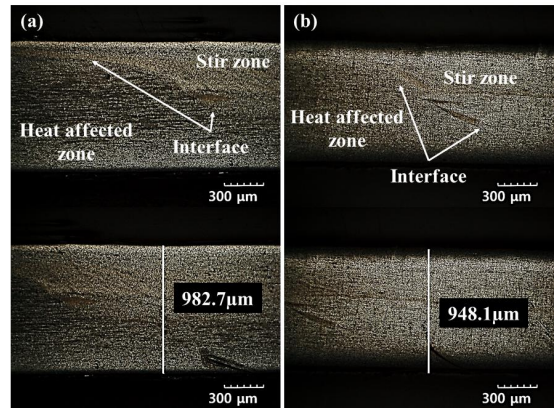


Fig. 10 Micro structure of welding zone observed by optical microscope (a) 3500rpm, 400mm/min and (b) 6500rpm, 400mm/min

5. 결론

본 연구에서는 고주파스핀들이 장착된 마찰교반접합장치를 이용하여 1 mm박판의 Al 5052-H32 합금소재의 맞대기 접합시 용접성을 평가하여 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

1. 고속 스핀들과 테이퍼베어링에 의한 고강성 구조 그리고 진공 척을 사용하여, 1mm두께의 알루미늄소재를 접합속도 250 mm/min에서 800 mm/min 그리고 공구회전속도 3500rpm에서 6500rpm까지 접합이 용이함을 알 수 있었다. 이러한 조건들로부터 고속 마찰교반접합에 의한 접합

속도 향상효과를 얻을 수 있었다.

2. 인장강도는 접합속도 250 ~ 400 mm/min에서 고속 공구회전속도인 3500 ~ 6500 rpm인 경우에 모재보다도 작은 3000 rpm의 조건과 같은 경향성을 얻었고, 특히 접합속도 400 mm/min의 조건에서 6500 rpm은 250 mm/min의 인장강도 보다 9.2% 상승함을 보였다.

3. 경도값은 공구회전속도의 증가에 대체로 일정한 값을 가진다. 또한 미세조직 관찰을 통해 고속 공구회전속도에서는 입열량의 증가로 교반부의 체적이 넓게 형성되어 있음을 알 수 있었고, 이는 고속 공구회전속도 조건에서는 빠른 접합속도로 접합 시 공구회전속도 3000 rpm이하의 접합조건과 비슷한 인장강도를 가짐을 알 수 있다.

후 기

“이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-글로벌프론티어사업 (재)하이브리드 인터페이스기반 미래소재연구단의 지원을 받아 수행됨” 그리고 본 논문의 박영찬 공동저자는 제 1저자와 동등한 기여를 하였으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Noh, J. S., Kim, J. H., Go, G. H. and Kang, M. C., “New technology Trends on Friction Stir Welding Based on Milling Process in terms of Tools, Machine and Applied Parts,” Journal of KSMPE, Vol. 12, No. 6, pp. 37-44, 2013.
2. Lee, D. Y., Park, K. D. and Kang, D. M., “A Study on the Finite Element Analysis in Friction Stir Welding of Al Alloy,” Journal of KSMPE, Vol. 14, No. 5, pp. 81-87, 2015.
3. Rodrigues, D. M., Loureiro, A., Leitao, C., Leal, R. M., Chaparro, B. M. and Vilaça, P., “Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds,” MATER DESIGN, Vol. 30, No. 6, pp. 1913-1921, 2009.
4. Yuri, H., Piyush, U., John, C., Tom, L., Blair, C., Mark, E., Ayoub, S., Dustin, M., Brandon, L. and Susan, H. W., “High-Speed Friction-Stir Welding to Enable Aluminum Tailor-Welded Blanks,” JOM, Vol. 67, No. 5, pp. 1045-1053, 2015.
5. Yoon, T. J., Kang, M. C., Jung, B. H. and Kang, C. Y., “Effect of Welding Condition and Tool Shape on Defect Formation of Extruded AA6005 with Non-uniform Thickness using Load-Controlled Friction Stir Welding Technique,” Journal of KSMPE, Vol. 12, No. 6, pp. 45-51, 2013.
6. Edward, F. S., Edward, G. C., Christopher, B. S., Michael, R. Z., Nicola, J. F. and Frank, E. P., “Effect of Compliance and Travel Angle on Friction Stir Welding With Gaps,” J MANUF SCI E-T ASME, Vol. 132, No. 4, pp. 101-109, 2010.
7. Kim, S. H., Kim, B. H. and Jin, Y. G., “A study on the Error Separation Method in Rotation Accuracy Measurement of High Precision Spindle Unit,” Journal of KSMPE, Vol. 13, No. 1, pp. 78-84, 2014.
8. Jong-Do Kim, Kwang-heui Kim, Moon-Chul Yoon, “Decision-Making Method of Priority Welding Process,” Journal of KSMPE, Vol. 15, No. 5, pp. 39-47, 2016.
9. Joo, Y. H., “Weldability evaluation of 15052-H32 alloy and manufacturing of micro friction stir welding machine,” A Thesis for a Master, Pusan National University, Republic of Korea, 2017.
10. Sattari, S., Bisadi, H. and Sajed, M., “Mechanical Properties and Temperature Distributions of Thin Friction Stir Welded Sheets of AA5083,” International Journal of Mechanics and Applications, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2012.
11. Kumbhara, N.T., Sahoob, S.K., Samajdarb, I., Deya, G.K., Bhanumurthy K., “Microstructure and microtextural studies of friction stir welded aluminium alloy 5052,” Materials & Design, Vol. 32, No. 3, pp. 1657-1666, 2011.