

마찰교반용접에서 키홀 리필 기술 동향

윤진영^{*,**} · 강상훈^{*} · 이세현^{**} · 김철희^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}한양대학교 기계공학부

Review of Keyhole Refilling Technology in Friction Stir Welding

Jin Young Yoon^{*,**}, Sanghoon Kang^{*}, Sehun Rhee^{**}, and Cheolhee Kim^{*,†}

^{*}Joining R&D Group, KITECH, Incheon, 21999, Korea

^{**}School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

[†]Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received June 4, 2018 ; Revised June 12, 2018 ; Accepted June 28, 2018)

Abstract

Friction spot welding is a kind of solid state welding process which can prevent welding defects observed in fusion welding processes. Friction stir welding inherently utilizes a rotating tool and a keyhole is formed after retreat of the tool like a welding crater. In this paper, two kinds of keyhole refilling techniques (1-step and 2-step processes) were introduced. 1-step refilling methods employed specially designed welding tools. The pin and shoulder (or sleeve) can be separately driven to stir the base material and refill the keyhole. In the 2-step refilling methods, friction stir and resistance spot processes were suggested as a successive process and optionally filler metal was supplied. Resistance spot process is more economical process than friction stir welding, and the keyhole was refilled without melting by selecting proper parameters.

Key Words : Friction stir welding, Keyhole, Refill, Resistance spot welding

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 처음 제안되었다¹⁾. 알루미늄, 마그네슘 및 구리 합금 등의 연성소재²⁻⁴⁾ 뿐만 아니라, 최근에는 철강 및 티타늄 합금과 같은 고온용 강성소재에 대한 용접공정 연구가 증가하고 있는 추세이다^{5,6)}. 마찰교반용접은 툴을 회전시킨 상태로 소재의 접합 계면에 삽입할 때 발생하는 마찰열을 이용하여 소재를 연화시키고, 연화된 소재는 툴의 회전 방향으로 소성 유동을 일으켜 접합계면과 주변부를 교반하여 접합이 이루어진다. 툴이 삽입된 상태에서 용접선을 따라 이동한 후 툴을 후퇴시키면 마찰교반용접이 되며, 툴을 소재에 삽입 후 이동하지 않고 일정 시간 머무른 뒤 툴을 후퇴하면 마찰교반점용접(Friction

Stir Spot Welding, FSSW)이 된다⁷⁾.

마찰교반용접에 사용되는 툴이 소재와 닿는 면은 솔더(Shoulder)와 핀(Pin)으로 구성된다. 솔더는 핀에 비해 넓은 면적을 가지고 있으며 소재의 표면과 접촉하여 마찰열을 발생시키고 소재의 유동을 원활히 하는 역할을 한다. 핀은 솔더에서 돌출되어있는 형태로 소재의 내부에 삽입되어 접합 계면을 직접 교반하여 접합하는 역할을 수행한다. 툴의 형상적 특징으로 인하여 마찰교반용접, 마찰교반점용접의 마지막 단계인 툴이 소재에서 빠져나올 때 소재에 삽입되어있던 핀이 제거됨으로써 소재내부에 핀이 있던 자리에 키홀(keyhole), 프로브홀(probe hole), 핀홀(pin hole), 익시트홀(exit hole)이라 불리는 빈 공간을 형성하게 된다. 마찰교반용접에서 이러한 키홀이 존재할 경우 기계적 물성을 확보하는 방법들이 많이 제안되었으나, 이와 별도로 용접부 외관상의 문제, 키홀하단부에서의 도장의 불균일성, 집중적

부식가능성에 대한 우려가 있어 키홀을 리필(refill)하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 특수한 형태의 툴을 사용하여 FSSW 단일 공정으로 키홀을 메우는 one-step FSSW 공정과, 용접 후 후공정을 조처하는 two-step FSSW 공정으로 구분하여 리필 마찰교반용접공정의 기술동향을 파악하고자 한다.

2. One-step refilling FSSW 공정

용접부의 끝단에 형성된 키홀을 리필하는 방법으로, 1999년도에 R.Jeffrey에 의해 핀과 슬리브를 독립적으로 구동하는 방법이 개발되었다 (Fig. 1)⁸⁾. Fig. 1a에 나타난 바와 같이 전통적인 툴의 형상처럼 핀이 슬리브에서 돌출되어 있는 상태에서 회전한다. 이후 Fig. 1b와 같이 툴을 소재에 삽입하여 용접을 진행한다. 다음 단계 (Fig. 1c)에서는 핀이 슬리브가 정지되어 있는 상태에서 운동을 통해 위쪽으로 이동하여 핀과 슬리브의 높이를 일치시킨다. 마지막 단계 (Fig. 1d)에서는 평평한 툴의 하단부를 이용하여 키홀 주변의 소재를 키홀 내부로 소성유동시켜 키홀을 리필하게 된다.

Y. Uematsu 등에 의하면 해당 방법으로 FSSW에서 키홀을 성공적으로 제거할 수 있었으며 (Fig. 2), 키홀을 리필하여 접합부의 정적하중 및 피로하중이 증가시킬 수 있다고 보고하였다⁹⁾. P. Li 등은 직선 FSW에서 용접부의 끝부분에서 핀을 서서히 후퇴시켜 키홀이 형성되지 않는 직선용접을 구현하였다¹⁰⁾.

2004년도에 C. Schilling 등에 의해 마찰교반용접에 좀 더 특화된 형태로 핀, 슬리브, 클램프로 구성된 툴이 개발되었으며¹¹⁾, 개발된 툴의 예시는 Fig. 3와 같다¹²⁾. 저자는 두 가지 접합방법을 예로 들었는데 핀을 삽입하는 방법과 (Fig. 4) 슬리브를 삽입하는 방

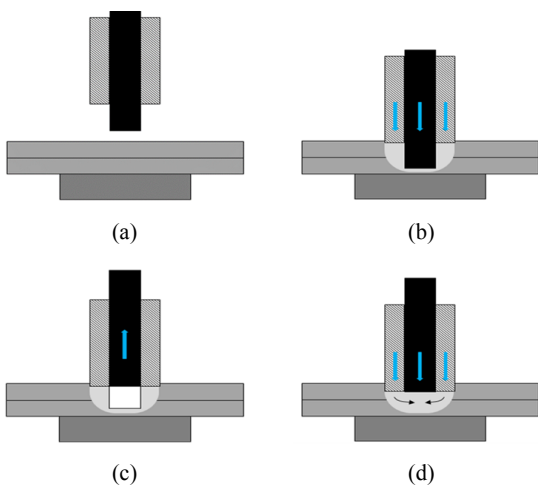


Fig. 1 Schematic illustration of FSSW and refilling process

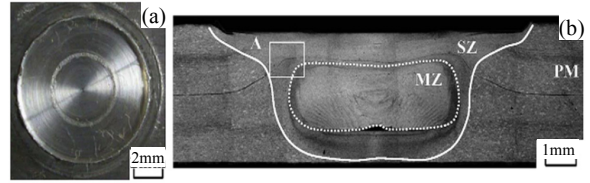


Fig. 2 Macroscopic appearance of FSSW joint with probe hole: (a) top view of weld zone and (b) cross section of weld zone

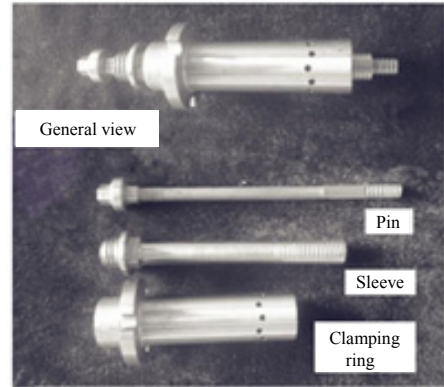


Fig. 3 Modified refill friction stir welding tool¹²⁾

법이다 (Fig. 5). 핀 삽입의 경우 먼저 Fig. 4a와 같이 핀, 슬리브, 클램프의 높이를 일치시킨 상태에서 핀과 슬리브를 회전시킨다. 핀과 슬리브가 회전하는 상태에서 Fig. 4b와 같이 소재에 일정한 가압을 가한 후 Fig. 4c와 같이 핀은 소재에 삽입하고 슬리브는 후퇴하는 방향으로 상대적으로 구동한다. 이때 핀에 의해 밀려난 소재는 슬리브가 후퇴하면서 생긴 공간으로 이동

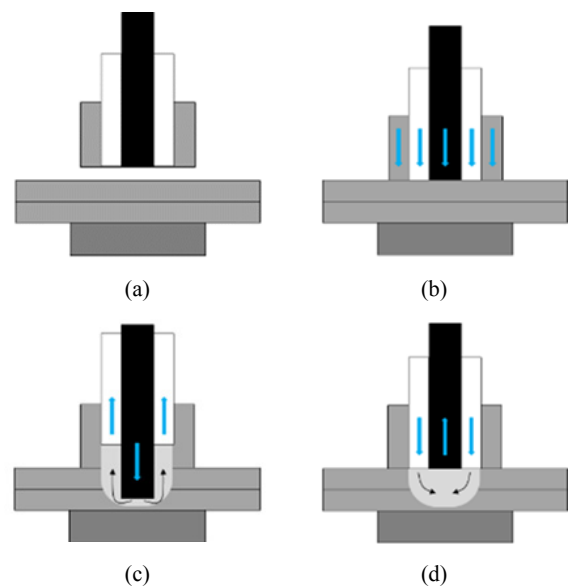


Fig. 4 Modified refilling FSSW (pin insert type)

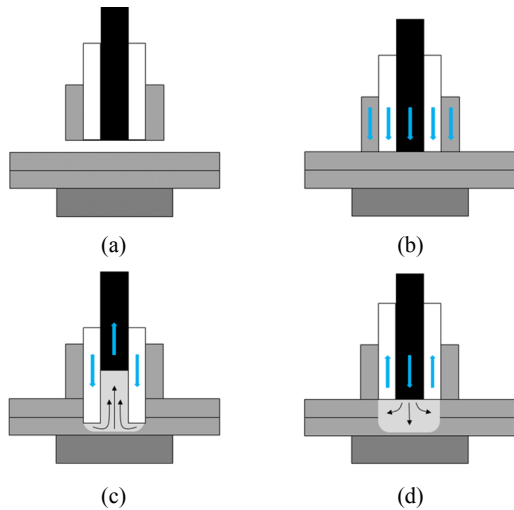


Fig. 5 Modified refilling FSSW (sleeve insert type)

하게 된다. 일정 시간 후 Fig. 4d와 같이 핀은 후퇴하고 슬리브는 전진하여 핀이 후퇴하면서 생긴 키홀을 리필하는 방식이다. 슬리브 삽입방식은 핀 삽입방식과 반대로 Fig. 5c와 같이 슬리브를 먼저 삽입하고 핀을 후퇴한 후 마지막 단계에서 슬리브와 핀의 구동을 반대방향으로 전환하여 Fig. 5d와 같이 슬리브의 후퇴로 생긴 키홀을 리필하는 방법이다.

이러한 독립적 구동방식은 기존 핀/슬더 구동방식에 비해서 클램프의 존재로 인하여 용접부 주변에 형성되는 버를 최소화할 수 있다. 다양한 연구자들에 의해 성공적인 키홀의 리필이 보고되었으나¹³⁻¹⁷, 이러한 구동 방식은 핀, 슬리브, 클램프가 독립적으로 구동 가능한 특수한 장비를 사용해야 하며, 툴의 형상이 복잡하여 전통적인 툴에 비하여 가격이 비싸다는 단점을 가지고 있다. 또한 최근 연구동향인 고강도, 고용점 소재에 적용하기 위해서는 WC-Co, PCBN, Si₃N₄와 같은 소재를 사용해야 하지만¹⁸⁻²⁰, 위에 언급된 소재들은 높은 강도와 경도로 인하여 복잡한 툴의 형상으로 가공이 어렵다.

3. Two-step refilling FSSW 공정

마찰교반용접공정에서 발생한 키홀을 후공정을 통해 리필하는 다단계공정은 후공정에 마찰교반공정을 이용하는 방법과 저항점용접 등 다른 용접공정을 이용하는 방법 등으로 다시 세분될 수 있다.

Fig. 6에 1차 용접공정이 끝난 후 형성된 키홀을 핀이 없는 툴로 한 번 더 교반하여 키홀을 리필하는 방법의 모식도를 나타내었다²¹. 이 방법은 하나의 마찰교반용접 시스템에서 툴만 교체하여 키홀을 리필할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 one-step refilling FSSW 공정에 비해 압흔 및 버의 발생이 증가되고 공정시간이 길

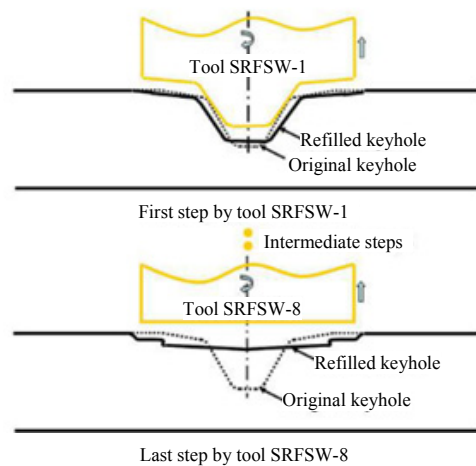


Fig. 6 Two-step refilling FSSW using additional FSSW²¹⁾

어지는 단점을 가지고 있다. 이 공정을 수정하여 Fig. 7과 같이 후공정 중 삽입금속을 추가로 공급하여 키홀을 리필하는 방법이 제안되었다^{22,23}. 제살용접을 수행하는 Fig. 6의 공정에 비하여 삽입금속이 제공되기 때문에 압흔 및 버의 발생이 감소된다는 장점이 있으나 공정시간이 길어지는 단점이 남아있다.

후공정으로 마찰교반용접보다 속도가 빠르고, 경제적인 공정을 검토하기 위하여 저항점용접을 이용한 리필공정이 최근에 제안되었다²⁴. Fig. 8과 같이 용접 후 형성된 키홀에 저항점용접전원을 이용하여 가압과 통전을 가하는 방법으로써, 통전에 의해 발생하는 저항열로 소재를 연화시킨 상태에서 가압을 가하면 키홀 주변 소재가 키홀 내부를 채우게 된다. 5083-O재를 대상으로 시험평가하였을 때 성공적인 키홀 리필이 가능함을 Fig.

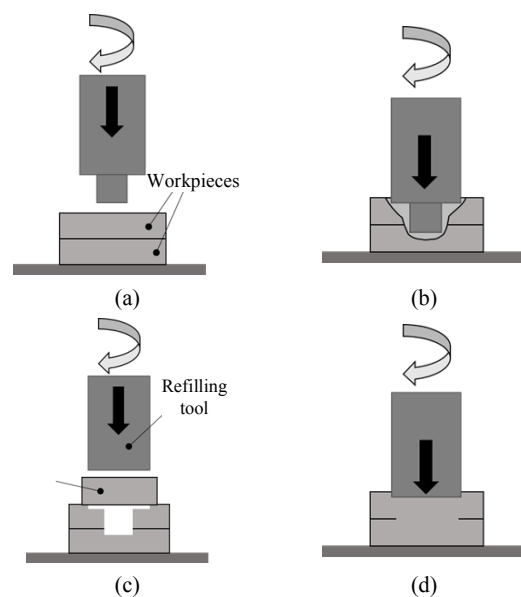


Fig. 7 Two-step refilling FSSW using a filler plate²²⁾

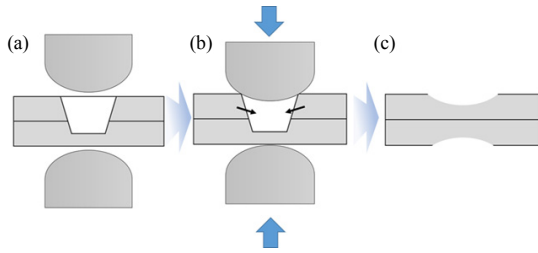


Fig. 8 two-step refilling FSSW using additional resistance spot welding²⁴⁾

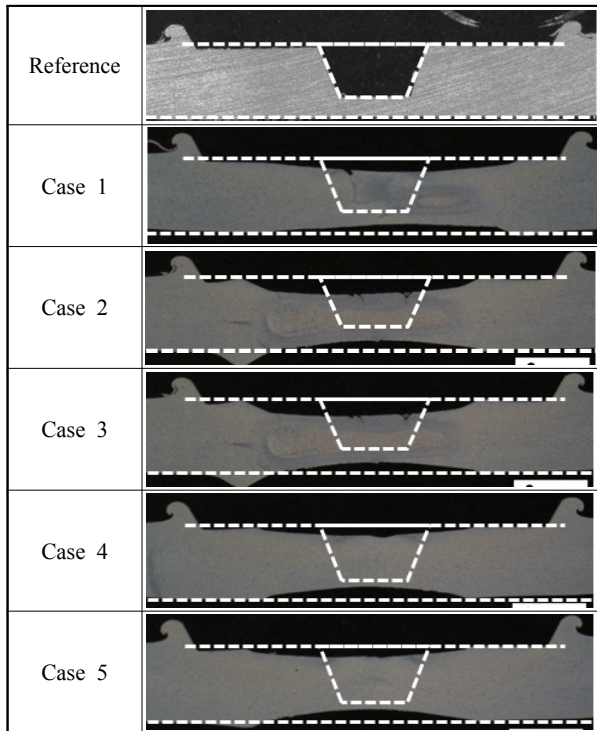


Fig. 9 Cross-sections of refilled welds using resistance spot process. Resistance spot parameters (pressure, current, time) (1) 400 kgf, 20 kA, 167 ms, twice; (2) 400 kgf, 20 kA, 500 ms; (3) 400 kgf, 25 kA, 167 ms; (4) 400 kgf, 20 kA, 333 ms; (5) 500 kgf, 20 kA, 333 ms

9의 단면을 통하여 확인할 수 있다. 1, 3번 조건의 경우 keyhole 내부에 용융된 흔적이 보였으나 2, 4, 5번의 조건에서는 키홀 내부에 용융된 흔적이 관찰되지 않았다. 용융이 발생되지 않았다고 추정되는 2, 4, 5번 조건의 평균 통전시간은 388 ms로 FSW를 사용하는 것보다는 훨씬 빠르게 리필이 가능하다.

4. 결 론

본 논문에서는 마찰교반용접의 용접부에 발생하게 되는 키홀을 리필하기 위한 기술을 소개하였다. one-step FSSW 공정으로 특수한 툴을 채택하여 마찰교반용접과

키홀의 리필을 하나의 공정에서 구현하는 기법들과, two-step FSSW 공정으로 마찰교반용접과 저항점용접을 부가공정을 채택하여 리필을 구현하는 기법을 소개하였다. 아직 알루미늄 합금에 대해 one-step FSSW 공정이 적용되는 단계이지만, 향후 다양한 공정을 통해 키홀 리필이 가능해 질 것으로 사료된다.

ORCID: Jin Yong Yoon: <http://orcid.org/0000-0001-6362-3086>
 ORCID: Sanghoon Kang: <http://orcid.org/0000-0002-2566-4570>
 ORCID: Sehun Rhee: <http://orcid.org/0000-0002-0039-5650>
 ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>

References

1. W. Thomas, E. Nicholas, J. C. Needham, M. Murch, P. Templesmith and C. Dawes, Friction stir welding, *International patent application*, PCT/GB92102203, (1991)
2. P. Threadgill, A. Leonard, H. Shercliff and P. Withers, Friction stir welding of aluminium alloys, *International Materials Reviews*, 54(2) (2009), 49-93
<https://doi.org/10.1179/174328009X411136>
3. W. Xunhong and W. Kuaishe, Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering, A*, 431(1-2) (2006), 114-117
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.128>
4. W.-B. Lee and S.-B. Jung, The joint properties of copper by friction stir welding, *Materials Letters*, 58(6) (2004), 1041-1046
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.08.014>
5. W.-B. Lee, C.-Y. Lee, W.-S. Chang, Y.-M. Yeon and S.-B. Jung, Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium, *Materials Letters*, 59(26) (2005), 3315-3318
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.05.064>
6. W. Thomas, P. Threadgill and E. Nicholas, Feasibility of friction stir welding steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(6) (1999), 365-372
<https://doi.org/10.1179/136217199101538012>
7. X. W. Yang, T. Fu and W. Y. Li, Friction stir spot welding, A Review on joint macro- and microstructure, property, and process modelling, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 (2014), 11
<https://doi.org/10.1155/2014/697170>
8. R. J. Ding and P. A. Oelgoetz, Auto-adjustable pin tool for friction stir welding, *US patent*, US005893507A, 1999
9. Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, T. Kurita and S. Murata, Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al - Mg - Si alloy, *International Journal of Fatigue*, 30(10-11) (2008), 1956-1966
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.006>
10. P. Li, Z. Xu, C. Yu, H. Lu, J. Yao and G. Chen, Me-

- chanical properties and microstructure analysis of re-filling friction stir welding on 2219 aluminum alloy, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 25(3) (2012), 225-234
11. C. Schilling and J. Dos Santos, Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding, *US patent*, US06722556B2, 2004
 12. Z. Li, S. Ji, Y. Ma, P. Chai, Y. Yue and S. Gao, Fracture mechanism of refill friction stir spot-welded 2024-T4 aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5-8) (2016), 1925-1932 <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8276-7>
 13. T. Rosendo, B. Parra, M. a. D. Tier, A. a. M. Da Silva, J. F. Dos Santos, T. R. Strohaecker and N. G. Alcântara, Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy, *Materials & Design*, 32(3) (2011), 1094-1100 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.017>
 14. Z. Shen, X. Yang, Z. Zhang, L. Cui and T. Li, Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints, *Materials & Design*, 44 (2013), 476-486 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.026>
 15. M. D. Tier, T. S. Rosendo, J. F. Dos Santos, N. Huber, J. A. Mazzaferro, C. P. Mazzaferro and T. R. Strohaecker, The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6) (2013), 997-1005 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.009>
 16. Z. Shen, Y. Chen, J. S. C. Hou, X. Yang and A. P. Gerlich, Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy, *Science and Technology of Welding and Joining*, 20(1) (2014), 48-57 <https://doi.org/10.1179/1362171814Y.0000000253>
 17. T. Rosendo, M. Tier, J. Mazzaferro, C. Mazzaferro, T. R. Strohaecker and J. F. Dos Santos, Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under Lap shear tensile loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38(12) (2015), 1443-1455 <https://doi.org/10.1111/ffe.12312>
 18. Y. Zhang, Y. S. Sato, H. Kokawa, S. H. C. Park and S. Hirano, Stir zone microstructure of commercial purity titanium friction stir welded using pcBN tool, *Materials Science and Engineering, A*, 488(1-2) (2008), 25-30 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.062>
 19. H. Liu, J. Feng, H. Fujii and K. Nogi, Wear characteristics of a WC - Co tool in friction stir welding of AC4A+ 30 vol% SiCp composite, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(14) (2005), 1635-1639 <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.026>
 20. K.-J. Lee, S.-H. Kim, H.-G. Park and I.-H. Oh, Development of the tool for friction stir welding of high temperature materials, *Journal of KWJS*, 29(5) (2011), 54-57
 21. L. Zhou, D. Liu, K. Nakata, T. Tsumura, H. Fujii, K. Ikeuchi, Y. Michishita, Y. Fujiya and M. Morimoto, New technique of self-refilling friction stir welding to repair keyhole, *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(8) (2013), 649-655 <https://doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000058>
 22. S. Venukumar, S. G. Yalagi, S. Muthukumar and S. V. Kailas, Static shear strength and fatigue life of refill friction stir spot welded AA 6061-T6 sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(3) (2013), 214-223 <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000181>
 23. S. Venukumar, S. Yalagi and S. Muthukumar, Comparison of microstructure and mechanical properties of conventional and refilled friction stir spot welds in AA 6061-T6 using filler plate, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(10) (2013), 2833-2842 [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62804-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62804-6)
 24. J. Yoon, M. Kang and C. Kim, Repair method and system for pin hole of friction stir welding, *Korean patent*, 10-2016-0075299, (2016)