

## Pengaruh Hybrid Interlayer Partikel Zinc Pada Friction Stir Spot Welding Material AA1100-AA5052

Lingga Arti Saputra<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Perwira Purbalingga  
Alamat Jl. Letjen S Parman No.53, Kedung Menjangan, Jawa Tengah, 57465, Indonesia

\*E-mail: Linggalampu@gmail.com

### Abstract

Aluminum has advantages and good physics so it is widely used in various industries. FSSW is a method that can be used to joint aluminum, but the problem of hook defects and key hole defects is a separate problem. Hybrid FSSW is a combination of Zinc Particle Interlayer and Refill used to overcome the problem of defects in joints. The results of the FSSW hybrid hardness test have an average hardness value of 98.90HV at SZ. The distribution of FSSW hybrid hardness values has a greater value than conventional FSSW due to the effect of two welding phases. The Hybrid FSSW has the highest shear tensile value of 5.3 kN at a shoulder diameter of 8mm 12s. the two-phase effect and the addition of the bond area due to variations in the diameter of the shoulder are factors that increase the joint capability.

**Key word:** Friction Stir Spot Welding, Hybrid, Zn interlayer, refill, hook defect

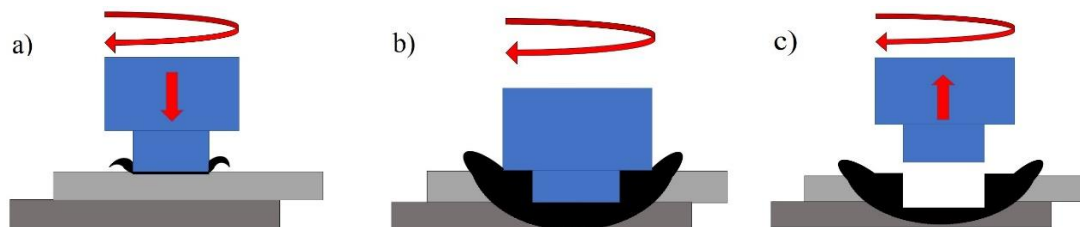
### Abstrak

Alumunium memiliki kelebihan dan sifat yang baik sehingga banyak digunakan di berbagai industry. FSSW merupakan metode yang mampu digunakan untuk menyambung alumunium, namun masalah hook defect dan key hole defect menjadi masalah tersendiri. Hybrid FSSW merupakan perpaduan Intrelayer Partikel Zinc dan Refill digunakan untuk mengatasi masalah defect pada sambungan. Hasil pengujian kekerasan hybrid FSSW memiliki nilai kekerasan rata-rata 98.90HV pada SZ. Distribusi nilai kekerasan hybrid FSSW memiliki nilai yang lebih besar dari pada konvensional FSSW karena efek dua fase pengelasan. Hybrid FSSW memiliki nilai Tarik geser tertinggi 5.3 kN pada diameter shoulder 8mm 12s. Efek dua fase dan penambahan area ikatan akibat variasi diameter shoulder menjadi faktor peningkatan kemampuan sambungan.

**Kata kunci:**FSSW, Hybrid, interlayer Zn, refill, hook defect

### 1. Pendahuluan

Alumunium merupakan material yang banyak diaplikasikan di bidang dirgantara, industri otomotif, dan kapal (1)(2). Alumunium memiliki kelebihan seperti bobot ringan, kekuatan tinggi, tahan korosi, dan mampu didaur ulang (3)(4). *Resistance spot welding (RSF)* merupakan metode yang mampu digunakan untuk menyambung alumunium, namun memiliki kekurangan misalnya; konsumsi energi yang tinggi, arus yang besar, efisiensi produksi yang rendah, dan pencemaran lingkungan (5). *Friction stir spot welding (FSSW)* merupakan teknik penyambungan solid-state yang dikembangkan oleh *Mazda Motor Corporation* dan *Kawasaki Heavy Industries* pada tahun 2003(6)(7). FSSW merupakan teknik yang mampu digunakan untuk menyambung material alumunium(8)(9)(10)(11)(12). Gambar 1. Menunjukkan mekanisme sambungan FSSW.



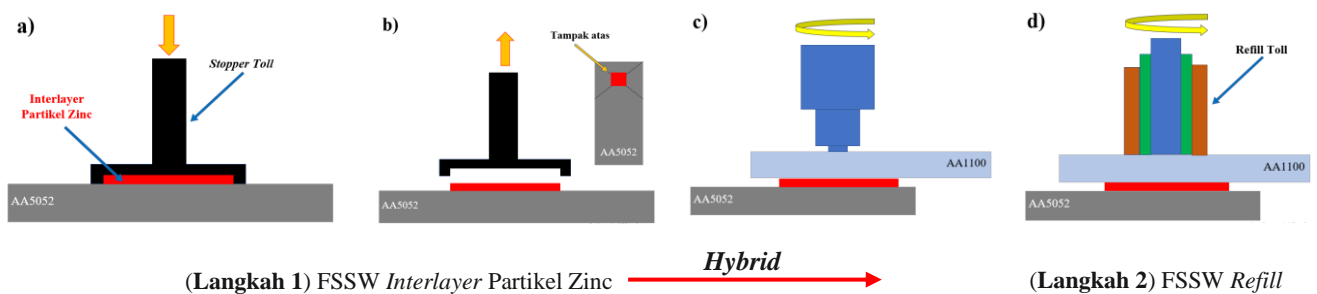
**Gambar 1.** Mekanisme sambungan FSSW. a) *Plugging*, b) *Bonding*, c) *Drawing out*

Masalah FSSW mulai muncul ketika cacat *hook* dan cacat *key hole* mulai terbentuk yang dapat menurunkan kemampuan sambungan. Cacat *hook* merupakan cacat *intrisik* yang terbentuk di daerah transisi antara daerah terikat dan tidak terikat pada material sambungan(16)(17)(18). Cacat *hook* dapat dihilangkan dengan menambahkan *interlayer* diantara permukaan sambungan(19,20)(21)(22)(23)(24). Cacat *key hole* merupakan cacat pada permukaan sambungan

karena sisa dari proses FSSW (25). Cacat *key hole* dapat dihilangkan dengan *refill* pada FSSW(26)(27)(28). Penelitian experimental ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari interlayer partikel Zinc dan *refill (hybrid)* pengelasan FSSW pada kemampuan mekanik material AA5052-1100.

**2. Material dan metode penelitian**

Material yang digunakan aluminium AA5052-AA1100. Spesimen dilakukan pengujian *spiktrometer* dilakukan pembersihan permukaan untuk menghilangkan kotoran dipermukaan. Tabel 1. Menunjukkan hasil pengujian *spiktrometer*. Spesimen memiliki ukuran ketebalan 2 mm, Panjang 125 mm, lebar 40 mm. Alkohol 70% digunakan untuk membersihkan permukaan material sambungan. Parameter penelitian pengelasan dapat dilihat pada table 2. Hybrid FSSW menggunakan perpaduan *interlayer* partikel Zinc dan *refill*. Langkah 1 merupakan proses penempatan interlayer partikel Zinc, Langkah 2 merupakan proses *refill* FSSW. Gambar 2. Menunjukkan proses *hybrid interlayer* partikel Zinc. Pengujian kekerasan menggunakan *micro vikers* dengan beban sebesar 0.3 kg dan *dwel time* selama 10 s sesuai dengan standar ASTM E384. Pengujian kekerasan hanya dilakukan pada Langkah 2. Pengujian tarik geser menggunakan universitas testing machine.



**Gambar 2.** Mekanisme FSSW *hybrid Interlayer* Partikel Zinc. a) Memposisikan Zinc, b) Posisi Zinc, c) FSSW Interlayer partikel Zinc, d) Proses *refill*

**Tabel 1.** Komposisi kimia hasil *spiktrometer*

Wt%	Si	Mg	Zn	Mn	Cu	Cr	Fe	Al
AA5052	0,17	2,47	0,03	0,07	0,03	0,20	0,023	Bal.
AA1100	0,12	0,12	0,20	0,01	0,09	0,01	0,49	Bal.

**Tabel 2.** Parameter pengelasan *hybrid interlayer* partikel zinc

Type	FSSW Konvensional	FSSW Hybrid	
Langkah kerja	Hanya 1 langkah	Langkah 1 (Interlayer Partikel Zinc)	Langkah 2 (Refill)
Kecepatan putar (rpm)	1200	1200	1200
Plunge deep (mm)	1,2	1,2	1,2
Ø pin (mm)	2	2	-
Ø shoulder (mm)	6. 8	6. 8	12 Refill Toll
Dwell time (s)	6. 8. 10.12	6. 8. 10. 12	6. 8. 10. 12

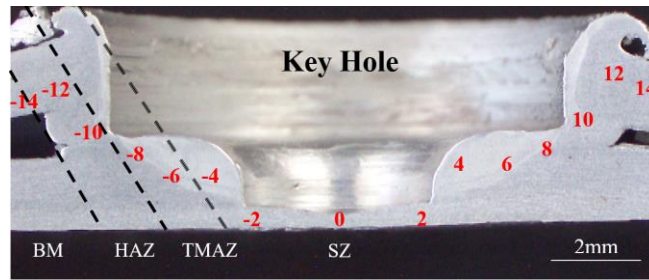
**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1. Pengujian Hasil Kekerasan**

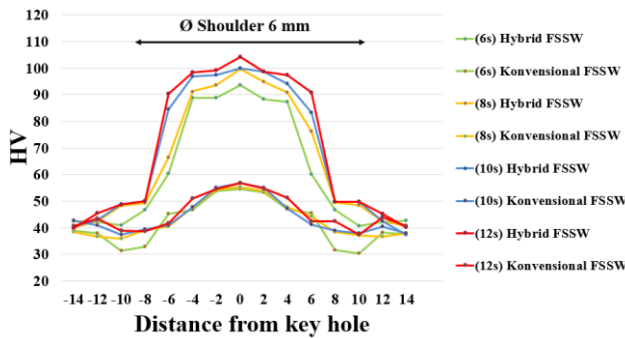
Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui sebaran nilai kekerasan pada *key hole*. Daerah pengujian meliputi *Stir zone (SZ)*, *Theomomechanical Affected Zone (TMAZ)*, *Heat Affected zone (HAZ)*, dan *Base Metal (BM)*. Gambar 3. Menunjukkan pembagian daerah pengujian berdasarkan titik sambungan. Area SZ merupakan titik awal pengujian dengan interval tertentu ke area BM. Pengujian dilakukan dilakukan secara konsisten antara sambungan FSSW konvensional dan FSSW Hybrid. Hasil pengujian menunjukkan kecenderungan distribusi kekerasan berbentuk *w-shape* (29). Nilai kekerasan pada FSSW Hybrid memiliki distribusi yang lebih tinggi dari FSSW konvensional. Peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan oleh proses penambahan interlayer partikel Zinc dan refill. Gambar 4. Menunjukkan hasil dari pengujian pada Ø shoulder 6mm. Nilai kekerasan paling rendah pada daerah HAZ 30.3 HV dan TMAZ 30.1 HV.

Nilai kekerasan secara umum mengalami penurunan pada daerah HAZ dan TMAZ karena adanya penuaan dan terbentuknya presipitat lebih kasar(30)(31). Gambar 5. Menunjukkan distribusi kekerasan pada Ø shoulder 8mm. Daerah SZ merupakan nilai tertinggi 104.7 HV terdapat pada variasi Ø shoulder 8mm dan *dwel time* 12s. Daerah SZ

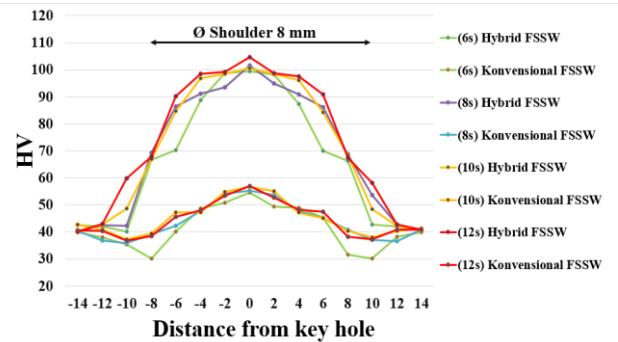
memiliki nilai kekerasan paling tinggi dikarenakan terbentuknya endapan, butiran halus karena suhu tinggi dan pepadatan struktur karena proses mekanis. Tabel 3. Menunjukkan hasil rata-rata hasil keseluruhan variasi pengujian.



Gambar 3. Area pengujian kekerasan



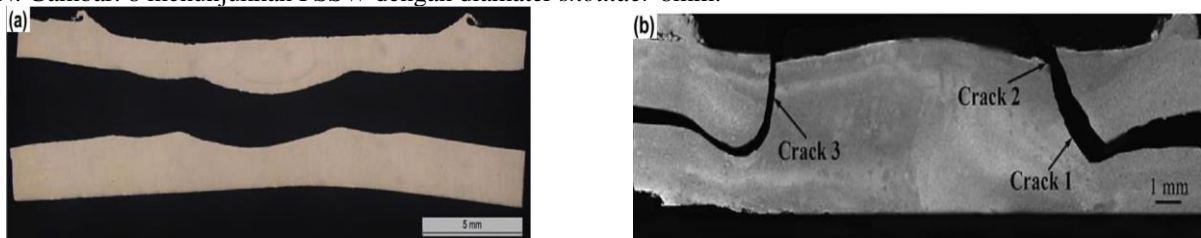
Gambar 4. Pengujian kekerasan Ø shoulder 6mm



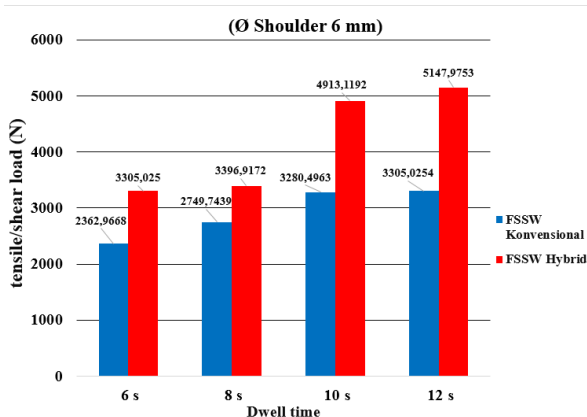
Gambar 5. Pengujian kekerasan Ø shoulder 8mm

### 3.2. Pengujian Tarik Geser

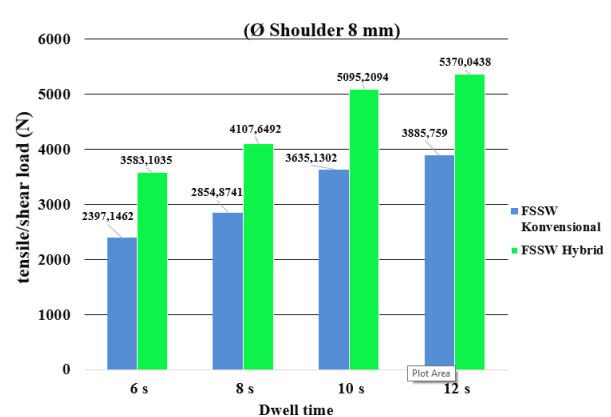
Hasil pengujian menunjukkan hasil yang berbeda pada setiap variasi. Gambar. 7 menunjukkan hasil uji tarik geser FSSW diameter *shoulder* 6 mm. FSSW hybrid pada diameter *shoulder* 6mm menunjukkan nilai tertinggi pada *dwell time* 12 s sebesar 5.1 kN. Nilai terendah pada *dwell time* 6 s sebesar 2.3 kN. Gambar. 7 menunjukkan FSSW konvensional dengan nilai tertinggi pada *dwell time* 12 s dengan nilai 3.3 kN dan nilai terendah pada *dwell time* 6 s dengan nilai 2.3 kN. Gambar. 8 menunjukkan FSSW dengan diameter *shoulder* 8mm.



Gambar 6. Mode kegagalan pengujian tarik geser sambungan FSSW; a) yaitu IF mode(32), dan b)CF mode(30)



Gambar 7. Hasil uji tarik geser FSSW Ø shoulder 6 mm



Gambar 8. Hasil uji tarik geser FSSW Ø shoulder 8 mm

Hasil uji tarik Gambar 7. Memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil uji tarik pada gambar 8. FSSW hybrid pada *dwell time* memiliki nilai tertinggi dengan nilai 5.3 kN dan nilai terendah 3.5 kN. Nilai kekerasan pada gambar. 8 pada FSSW konvensional tertinggi pada *dwell time* 12 dengan nilai 3.3 kN dan nilai terendah 2.3 kN. Faktor utama dalam kegagalan uji Tarik geser sambungan dalam pengelasan dipengaruhi oleh beberapa hal, misalnya karakteristik terbentuknya *hook defect* dan ketebalan efektif pada variasi sambungan(33). Mode kegagalan dalam sambungan FSSW secara umum dibagi menjadi dua, yaitu *interfacial failure mode (IF mode)* (32) dan *circumferential mode (CF mode)* (32). Hasil pengujian Tarik geser dalam penelitian ini memiliki karakteristik kegagalan *circumferential mode (CF mode)*. Mode kegagalan yang terbentuk karena adanya proses *brazing* oleh *interlayer* partikel zinc dan mekanisme *refill*. Penelitian tentang penggunaan *interlayer* pada sambungan FSSW telah banyak dilakukan. kemampuan sambungan terhadap uji Tarik geser banyak memberikan variasi. Table 4. Menunjukkan rangkuman sambungan FSSW dengan *interlayer* Zinc dengan berbagai variasi

**Table 4.** Rangkuman data uji Tarik geser sambungan FSSW *interlayer* Zinc dengan berbagai variasi

Material	Variasi	Sheet thickness (mm)	Maksimum load (kN)	Refs.
AZ31-AZ80	Pin berbentuk Silinder (M4 thread)	2,4	1,8; 3,9	(19)
AZ31-AZ31	Pin berbentuk Silinder (M4 thread)	2,4	2,4; 4,1	(19)
AZ31-AZ80	Pin berbentuk Silinder (M4 thread)	2,4	1,9; 3,9	(19)
AZ31-AZ31	Pin dengan ulir +0,04; 0,08; 0,12; 0,16 mm	2,4	2,7; 4,2; 4,6; 5,2; 4,1	(34)
AZ31-AZ31	Tanpa pin ( <i>plunge depth</i> 1,0; 1,5; 2,0 mm)	2,4	4,5; 5,5; 3,8	(23)
AZ31-AZ31	<i>Shoulder cekung dan cembung (plunge depth</i> 1,0 mm)	2,4	6,6; 6,4	(23)
AA1100-AA1100	<i>Dwell time</i> 20; 50 detik + Zinc <i>interlayer particles</i>	1,6	3,1; 3,8	(21)
AA1100-AA1100	<i>Dwell time</i> 2; 8 detik + Zinc <i>interlayer</i>	2,8	2,5; 5,4	(35)
AA1100-SS400	$\emptyset$ <i>shoulder</i> 12; 18 + <i>interlayer</i> elektroplating Zn	3 dan 1	2,5; 3,8	(22)
AA5083-H112- brass	<i>Plunge depth</i> 0,3mm, <i>dwell time</i> 20 detik; 1200 rpm	1,5	4,4	(36)
Cu-AA1060	<i>Probe length</i> 1,3; 1,6; 1,8 mm	2	6,6; 6,5; 6,2	(37)
AA6061-T6- Cu	Kecepatan putar 1600; 2000; 2500 rpm	1,5-1	<i>Crack; crack</i> ; 3,2	(38)
AA2024-T3- Cu	FSSW dengan pematrian	1,6	40. 30	(39)
DP2024-T3 – AA6061	<i>Dwell time</i> 10 detik, kecepatan putar 1300 rpm	2	4,4	(40)
Cu-Al	a) <i>plunge depth</i> 1,5; 2,5; 0,05 mm, lembaran Zn 0,5mm, b) Zn 0,0 5mm	2	a)2,8; 3,4; 3,6. b)4,1	(41)

#### 4. Kesimpulan

FSSW hybrid dan FSSW konvensional memiliki perbedaan hasil pengujian. Pengujian kekerasan yang dilakukan menunjukkan FSSW hybrid memiliki kecenderungan nilai kekerasan yang lebih besar pada SZ pada area transisi SZ dan TMAZ. Proses FSSW hybrid memiliki nilai rata-rata tertinggi 98.90 HV di SZ pada diameter *shoulder* 8mm. pengujian Tarik geser yang pada FSSW hybrid memiliki nilai tertinggi 5.3 kN pada diameter *shoulder* 8mm. Secara keseluruhan penggunaan hybrid FSSW memiliki pengaruh yang signifikan pada hasil sambungan. Saran dalam penelitian ini dengan menggunakan *interlayer* Zn dengan model pasta atau lapisan yang penempatannya lebih konsisten dalam spesimen sambungan.

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui program Penelitian Dosen Pemula tahun pelaksanaan 2021 dengan nomor kontrak 067/E4.1/AK.04.PT/2022.

#### Daftar Pustaka

- Shrivastava A, Kronos M, Pfefferkorn FE. Comparison of energy consumption and environmental impact of friction stir welding and gas metal arc welding for aluminum. CIRP J Manuf Sci Technol. 2015;9:159–68.
- Piccini JM, Svoboda HG. Tool geometry optimization in friction stir spot welding of Al-steel joints. J Manuf Process. 2017;26:142–54.
- Zhang B, Chen X, Pan K, Yang C. J-integral based correlation evaluation between microstructure and mechanical strength for FSSW joints made of automotive aluminum alloys. J Manuf Process. 2019;44(January):62–71.
- Chen YC, Feng JC, Liu HJ. Precipitate evolution in friction stir welding of 2219-T6 aluminum alloys. Mater Charact. 2008;60(6):476–81.

5. Zhang Z, Yang X, Zhang J, Zhou G, Xu X, Zou B. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Mater Des.* 2011;32(8–9):4461–70.
6. Nandan R, Debroy T, Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction-stir welding – Process , weldment structure and properties. 2008;53:980–1023.
7. Bozkurt Y, Bilici MK. Application of Taguchi approach to optimize of FSSW parameters on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloys. *Mater Des.* 2013;51:513–21.
8. Ma Y, Yang B, Hu S, Shan H, Geng P, Li Y. Journal of Materials Science & Technology Combined strengthening mechanism of solid-state bonding and mechanical interlocking in friction self-piercing riveted AA7075-T6 aluminum alloy joints. *J Mater Sci Technol.* 2022;105:109–21.
9. Zou Y, Li W, Xu Y, Yang X, Chu Q, Shen Z. Materials Characterization Detailed characterizations of microstructure evolution , corrosion behavior and mechanical properties of refill friction stir spot welded 2219 aluminum alloy. *Mater Charact.* 2022;183(September 2021):111594.
10. Guven G, Jabbar I. On the fatigue and fracture behavior of keyhole- free friction stir spot welded joints in an aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology.* 2021;11:40–9.
11. Ilman MN. Heliyon Microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded AA5052-H112 aluminum alloy. *Heliyon.* 2021;7(August 2020):e06009.
12. Suryanarayanan R, Sridhar VG. Materials Today : Proceedings Influence of welding parameters on the weld properties in Friction stir spot welding of aluminium alloys of varying thicknesses. *Mater Today Proc.* 2021;46:8525–31.
13. Piccini JM, Svoboda HG. Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding ( FSSW ) of dissimilar aluminum alloys. *Procedia Materials Science* [Internet]. 2015;8:868–77. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.147>
14. Xie GM, Cui HB, Luo ZA, Yu W, Ma J, Wang GD. Journal of Materials Science & Technology Effect of Rotation Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded DP780 Steel. 2016;32:326–32.
15. Sun Y, Morisada Y, Fujii H, Tsuji N. Materials Characterization Ultra fine grained structure and improved mechanical properties of low temperature friction stir spot welded 6061-T6 Al alloys. *Mater Charact.* 2018;135(August 2017):124–33.
16. Cao JY, Wang M, Kong L, Guo LJ. Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-T6. *J Mater Process Technol.* 2016;230:254–62.
17. Geyer M, Vidal V, Pottier T, Boher C, Rézai-Aria F. Investigations on the material flow and the role of the resulting hooks on the mechanical behaviour of dissimilar friction stir welded Al2024-T3 to Ti-6Al-4V overlap joints. *J Mater Process Technol.* 2021;292(July 2020).
18. Li W, Li J, Zhang Z, Gao D, Wang W, Dong C. Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect. *Mater Des.* 2014;62:247–54.
19. Xu RZ, Ni DR, Yang Q, Liu CZ, Ma ZY. Influencing mechanism of Zn interlayer addition on hook defects of friction stir spot welded Mg – Al – Zn alloy joints. *Mater Des.* 2015;69:163–9.
20. Xu RZ, Ni DR, Yang Q, Liu CZ, Ma ZY. Influence of Zn interlayer addition on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31 Mg alloy. *J Mater Sci.* 2015;4160–73.
21. Arti Saputra L, Muhayat N, Triyono T. Effect of Zn Interlayer Particles on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Spot Welding Aluminum Alloy. *MATEC Web of Conferences.* 2018;218:1–6.
22. LINGGA ARTI SAPUTRA, NOTA ALI SUKARNO SZ. Pengaruh Interlayer Elektroplating Zinc pada Kekuatan Mekanik Friction Stir Spot Welding Aa1100-Ss400. *semesta teknika.* 2021;24(2):93–101.
23. Xu RZ, Ni DR, Yang Q, Liu CZ, Ma ZY. Pinless Friction Stir Spot Welding of Mg – 3Al – 1Zn Alloy with Zn Interlayer. *J Mater Sci Technol.* 2016;32:76–88.

24. Alaeibehmand S, Ranjbarnodeh E, Mirsalehi SE. Materials Characterization Joining mechanism in pinless FSSW of aluminum-steel with or without Zn and brass interlayers. *Mater Charact.* 2021;180(July):111400.
25. Ikumapayi OM, Akinlabi ET. Recent advances in keyhole defects repairs via refilling friction stir spot welding. *Mater Today Proc.* 2019;18:2201–8.
26. Fu B, Shen J, Suhuddin UFHR, Chen T, dos Santos JF, Klusemann B, et al. Improved mechanical properties of cast Mg alloy welds via texture weakening by differential rotation refill friction stir spot welding. *Scr Mater.* 2021;203:114113.
27. Tier MD, Rosendo TS, Dos Santos JF, Huber N, Mazzaferro JA, Mazzaferro CP, et al. The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds. *J Mater Process Technol.* 2013;213(6):997–1005.
28. Uematsu Y, Tokaji K, Tozaki Y, Kurita T, Murata S. International Journal of Fatigue Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al – Mg – Si alloy. 2008;30:1956–66.
29. Hongfeng W, Dunwen Z, Shengrong L, Jiafei P, Weiwei S. Performance analysis of friction stir welded lightweight aluminum alloy sheet. *Journal of Engineering and Technological Sciences.* 2020;52(6):821–36.
30. Venukumar S, Yalagi S, Muthukumaran S. 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 (English Edition)* [Internet]. 2013;23(10):2833–42. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62804-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62804-6)
31. Chowdhury SH, Chen DL, Bhole SD, Cao X, Wanjara P. Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A.* 2012;556:500–9.
32. Klobčar D, Tušek J, Smolej A, Simončič S. Parametric study of FSSW of aluminium alloy 5754 using a pinless tool. *Welding in the World.* 2015;59(2):269–81.
33. Farmanbar N, Mousavizade SM, Ezatpour HR. Achieving special mechanical properties with considering dwell time of AA5052 sheets welded by a simple novel friction stir spot welding. *Marine Structures.* 2019;65(September 2018):197–214.
34. Xu RZ, Ni DR, Yang Q, Liu CZ, Ma ZY. Influence of Zn interlayer addition on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31 Mg alloy. *J Mater Sci.* 2015;50:4160–4173.
35. Lingga Arti Saputra. PENGARUH INTERLAYER ZN PADA KEKUATAN MEKANIK SAMBUNGAN FRICTION STIR SPOT WELDING MATERIAL ALUMUNIUN PADUAN. *Perwira Journal of Science and Engineering (PJSE).* 2021;1(1):1–6.
36. Shahrabadi A, Ezatpour H, Paidar M. Protrusion friction stir spot welding of dissimilar joints of 6061 aluminum alloy/Copper sheets with Zn interlayer. *Mater Lett* [Internet]. 2022;328(September):133107. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133107>
37. Paidar M, Mohanavel V, Ojo OO, Mehrez S, Rajkumar S, Ravichandran M. Dieless Friction Stir Extrusion-Brazing (DFSE-B) of AA2024-T3 aluminum alloy to Copper with Zn interlayer. *Results Phys.* 2021;24:104101.
38. Liu H, Zuo Y, Ji S, Dong J, Zhao H. Friction stir solid–liquid spot welding of Cu to Al assisted by Zn interlayer. *Journal of Materials Research and Technology* [Internet]. 2022;18:85–95. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.067>
39. Paidar M, K. M. Nasution M, Mehrez S, Bokov D, Ramalingam VV, Zain AM. The feasibility of friction stir spot extrusion-brazing of AA5083-H112 aluminum alloy to brass sheets with Zn interlayer. *Mater Lett* [Internet]. 2022;308(PA):131084. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131084>
40. Alaeibehmand S, Mirsalehi SE, Ranjbarnodeh E. Pinless FSSW of DP600/Zn/AA6061 dissimilar joints. *Journal of Materials Research and Technology.* 2021;15:996–1006.
41. Boucherit A, Avettand-Fènoël MN, Taillard R. Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu. *Mater Des* [Internet]. 2017;124:87–99. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.063>