

**MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOY 1050
WELDED BY FRICTION STIR WELDING³**

Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD

Department of Materials Science and Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082 888 209
E-mail: dgospodinov@uni-ruse.bg

Assist. Prof. Nikolay Ferdinandov, PhD

Department of Materials Science and Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082 888 209
E-mail: nferdinandov@uni-ruse.bg

Assist. Prof. Mariana Ilieva, PhD

Department of Materials Science and Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082 888 308
E-mail: mdilieva@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Rossen Radev, PhD

Department of Materials Science and Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082 888 778
E-mail: rradev@uni-ruse.bg

***Abstract:** Friction stir welding refers to the processes of joining in solid state using a specialized tool (a third body); this tool rotates between the welded parts and moves with some working (traverse) speed. The method gives completely new tendencies in welding technology and allows many of the welding by melting issues to be resolved. This method does not lead to the excretion of harmful gases, slags, metal splashes, and loud noise, and this fact allows the working environment to be safer while increasing productivity.*

The careful consideration of suitable welding parameters plays important role in the making of high-quality weldments. These parameters include tool geometry, tool rotational speed, tool traverse speed, tilt angle, and axial force. The quality, residual stresses and deformations depend on the amount of the heat input, which in turn depends on all listed above welding parameters.

The present study reports results on the mechanical properties of weldments made by friction stir welding. The welded parts were of aluminium alloy 1050A sheets 4 mm thick. The welding tool was with a threaded cylindrical working part. The influence of the main working parameters (rotational speed and traverse speed) on the hardness at the welding area and mechanical characteristics during tensile test was investigated. Recommendations on the choice of welding mode for the particular welding case were made.

***Keywords:** Friction Stir Welding, Mechanical Properties, Aluminium Alloy 1050A.*

ВЪВЕДЕНИЕ

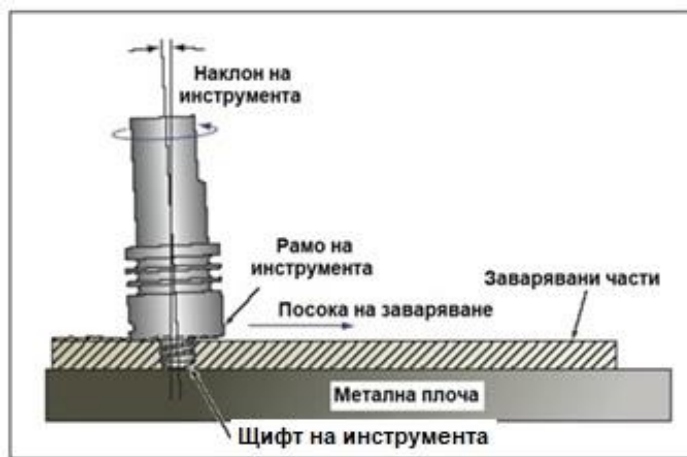
Заваряването чрез триене с разбъркване (Friction Stir Welding), с цифров код 43 съгласно EN ISO 4063:2021, е едно от най-интересните световни постижения в областта на заваряването през последните три десетилетия. Процесът се осъществява в твърдо състояние (без разтопяване), като завареното съединение е с високо качество, получено за по-кратко

³ Докладът е представен на научната конференция на РУ и СУ 2021 с оригинално заглавие на български език: МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА НА ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ ОТ АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 1050

време с по-малко енергия и вредни за околната среда странични продукти (Mishra, R., Ma, Z., 2005; Shinde, G., Gajghateb, S., Dabeerc, P., Seemikeri, C., 2016).

Същността на метода е свързана с използването на специален въртящ се инструмент (Фиг. 1). В процеса на работа инструментът навлиза между частите изпълнявайки въртеливо и постъпателно движение. В резултат на силите на триене между тях, основният метал се нагрява до пластично състояние без обаче да се разтопява и се измества в свободното пространство зад инструмента (Kumbhar, N., Dey, G., Bhanumurthy, K., 2011).

Основните предимства на FSW са: висока якост на завареното съединение; ниска работна температура, което води до по-малки ъглови деформации; по-ниски оперативни разходи; възможност за заваряване на всички съществуващи видове алуминиеви сплави включително и тези, които се класифицират като незаваряеми. Всичко това позволява FSW да се прилага в различни индустрии, като корабно-, вагоно-, автомобилно-, самолето- и ракетостроенето и др.



Фиг. 1.Схема на процеса на заваряване чрез триене с разбъркване

За получаването на висококачествени съединения важен фактор е изборът на подходящи режими на заваряване. Основните параметри са: скорост на заваряване (20...500 mm/min), честота на въртене на инструмента (150...1400 rpm), сила на притискане на инструмента към заваряваните части (9...80 kN), ъгъл на наклон на инструмента (1...5°), конструкция на инструмента и материала, от който е изработен той. Тези параметри зависят основно от вида и дебелината на заваряваните части (Kumar, H., Ramana, V., 2014; Mishra, R., Ma, Z., 2005).

В литературата съществува много информация за използването на FSW за заваряване на алуминиеви сплави. Липсва такава обаче за сплавта 1050. Информацията за влиянието на отделните параметри на режима върху механичните характеристики на получените съединения също е ограничена.

Цел на настоящата работа е установяването на влиянието на параметрите на режима на заваряване върху характеристиките на някои механични свойства на заварени съединения от алуминиева сплав 1050A.

МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Използваният в работата материал е алуминиева сплав EN AW-1050A H24 (EN AW-Al 99,5). В таблица 1 е посочен химичният състав на сплавта според EN 573-3 и химичният състав на използваният в изследването материал, определен посредством Оптично-емисионен спектрален анализ (OESA). Буквено-цифровата комбинация в края на означението (H24) показва, че структурата на избрания материал е получена в резултат на студено пластично деформиране (валцоване), последвано от непълно рекристализационно отгряване. При това материалът притежава повишена твърдост и якостни свойства спрямо тези

получавани след пълно рекристализационно отгряване. В таблица 2 са показани резултатите от изпитването на опън и измерването на твърдостта на материала в състояние на доставка.

Таблица 1. Химичен състав на алуминиева сплав EN AW-1050A

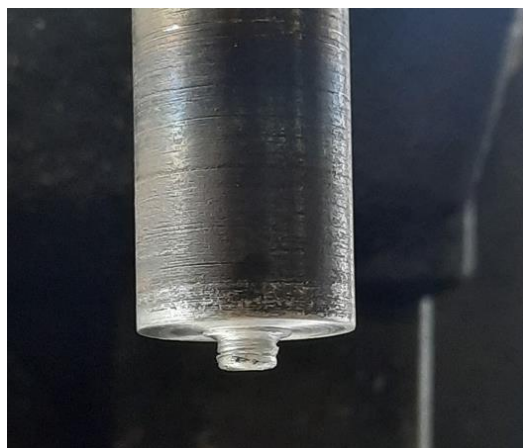
Материал	Химичен състав, [wt%]							
	Si max.	Fe max.	Cu max.	Mn max.	Mg max.	Zn max.	Ti max.	Al min.
EN AW-1050A EN 573-3	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	99.50
1050A използван в изследването	0.08	0.20	0.002	0.001	0.004	0.003	0.01	99.50

Таблица 2. Механични характеристики на EN AW-1050A H24 в състояние на доставка

Граница на провлачане, $R_{p0.2}$	Якост на опън, R_m	Относително удължение, A_5	Твърдост HV3
MPa		%	-
115	126	12	41

Размерите на заваряваните части са 200x80x4 (дължина x ширина x дебелина). След заваряване от тях са изрязани пробни тела за макроструктурен анализ, измерване на твърдост и изпитване на опън.

Използваният инструмент е с диаметър на рамото $\varnothing 22$ mm. Щифтът е цилиндричен с нормална резба М6 и дължина 3.6 mm (Фиг.2.а). В процеса на работа инструментът е наклонен назад спрямо посоката на заваряване на ъгъл 2° . Закрепването и центроването на частите за заваряване се реализира посредством приспособление (Фиг.2.б).



а



б

Фиг.2. Инструмент за заваряване (а) и приспособление (б) за фиксиране и притискане на частите

Режимите за заваряване включват избор на подходящо съчетаване между геометрията и размерите на работната част на инструмента, честота на въртене и скоростта на заваряване. В специализираната литература съществува голямо разнообразие от режими като изменението на споменатите параметри е в широк интервал. При заваряване на алуминиеви сплави честотата на въртене обикновено се изменя в интервала 400 до 2000 rpm, а скоростта на заваряване от 30 до 1000 mm/min. Въпреки, че в литературата съществува информация за голямо разнообразие от заварявани материали, препоръчвани режими за използваната в изследването алуминиева сплав EN AW-1050A H24 не бяха открити. Поради тази причина

изследването обхваща голям диапазон от честоти на въртене и скорости на заваряване. За определяне на комплексното влияние на двата параметъра е използвана зависимост, даващ връзката между тях и имаща вида $K=w/v$, rev/mm (w – честота на въртене; v – скорост на заваряване). В работата са показани резултати демонстриращи възможността за получаване на качествени заварени съединения (без наличие на дефекти) посредством заваряване с разбъркване в диапазона на изменение на K от 1.3 до 6.7 rev/mm.

Разпределението на твърдостта в отделните зони на получените заварени съединения е установено посредством измерване по метода на Викерс с натоварване 3 kg. Измерването е извършено в права линия, в средата на напречното сечение на пробните тела. Разстоянието между отпечатъците е 1 mm, като е съобразено с техните размери и изискванията на ISO 6507-1:2018.

За изпитване на опън са изготвени по три броя образци от всеки режим. Те са с ширина в работната си част 20 mm и начална дължина (gage length) $l_0=80$ mm.

РЕЗУЛТАТИ

Параметрите на използваните в работата режими са посочени в таблица 3. За реализиране на голямо изменение на K са използвани комбинации от две честоти на въртене (400 и 1000 rpm) и три скорости на заваряване (150, 300 и 630 mm/min).

Таблица 3. Параметри на режимите на заваряване

Режим	Честота на въртене на инструмента rpm	Скорост на заваряване mm/min	K rev/mm
1	400	300	1.3
2	1000	630	1.6
3	400	150	2.7
4	1000	300	3.3
5	1000	150	6.7

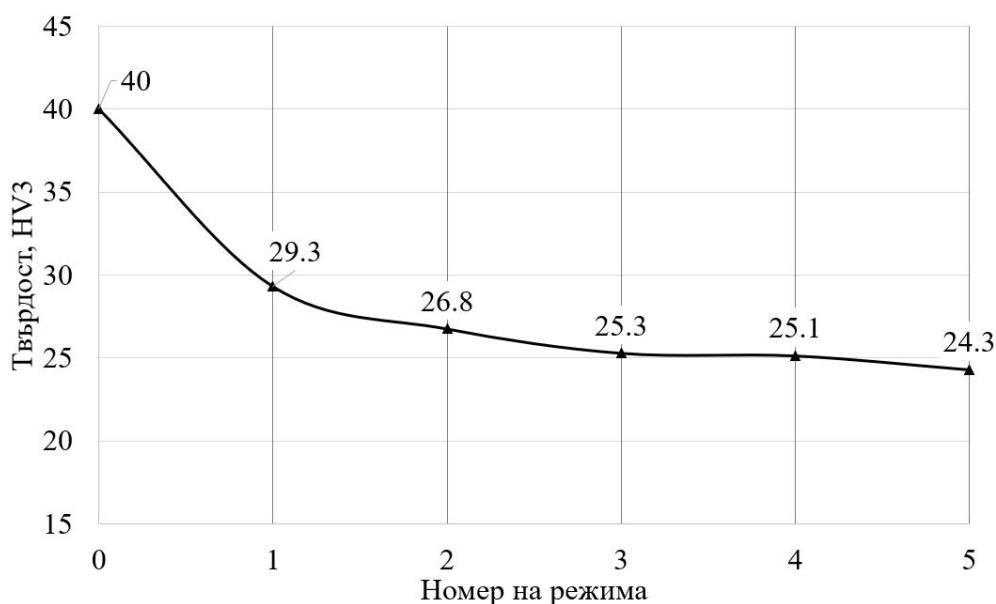
На фигури 3 и 4 са показани резултатите от измерването на твърдостта след заваряване в зоната на шева. Измерването е извършено в средата на напречното сечение на заваряваните части.

От фигура 3 се вижда разпределението на твърдостта при отдалечаване от линията на заваряване за режимите с най-малка и най-голяма стойност на K . Видно е, че намаляването на стойността на K води до нарастване на регистрираните твърдости и ограничаване на зоната, в която те се различават от твърдостта при доставка. Това се дължи на максималната температура, при която се реализира процеса на заваряване и на разпределението на температурното поле в материала около инструмента. При използване на режими с по-голяма стойност на K процесът на заваряване протича при по-висока температура, поради което и регистрираните твърдости са по-ниски.



Фиг.3. Разпределение на твърдостта в заварените съединения при стойности на $K=1.3$ и $K=6.7$

Предвид факта, че в състояние на доставка измерената твърдост е 40 HV3 и измерените минимални стойности при различните стойности на K (посочени на Фиг.4) може да се предположи, че температурният интервал, при който се реализира процеса на свързване съвпада с температурния интервал, в който се реализират процесите на рекристализация.

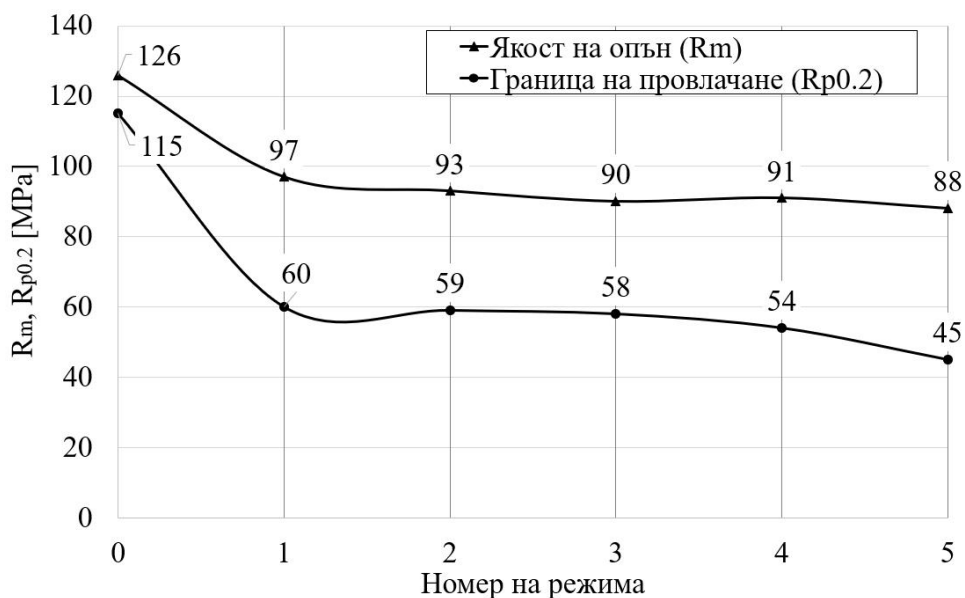


Фиг.4. Средна твърдост в зоната на заваряване за изследваните в работата режими

Регистрираното намаляване на твърдостта е свързано с нагряването в процеса на заваряване до температури по-високи от тази, при която е проведена непълната рекристализация в състояние на доставка. Плавното намаляване на средната минимална стойност на твърдостта показва, че въпреки шесткратното нарастване на K изменението на температурата е в тесен интервал. Трябва да се отбележи и факта, че минималната твърдост характерна за този материал след пълно рекристализационно отгряване (по литературни източници около 20 HV3) при разглежданите тук режими не се достига. При анализа на резултатите трябва да се има предвид и краткото време за престой на материала при максималната температура на процеса (от порядъка на 1 sec). Въпреки че температурата е основният фактор определящ промените в структурата при рекристализация, поради

дифузионната природа на протичащите структурни промени нарастването на времето спомага за по-пълното им протичане.

Резултатите от изпитването на опън на заварените съединения (Фиг.5) потвърждават резултатите от измерването на твърдостта. От фигурата се вижда, че нарастването на K води до закономерно намаляване на якостните свойства на заварените съединения. При режим 1 ($K=1.3$) намаляването на характеристиките на механичните свойства е с 23% за якостта на материала и с 48% за границата на провлачане. Тези стойности нарастват при увеличаване на K и при $K=6.7$ достигат до 30% за якостта и до 61% за границата на провлачане.



Фиг.5 Механични характеристики на заварените съединения при изпитване на опън

Предвид факта, че при всички изследвани режими се получават качествени заварени съединения (без наличие на най-често срещаните при заваряване чрез триене дефекти свързани с нарушаване на непрекъснатостта на метала) може да се заключи, че при необходимост от получаване на заварени съединения с най-високи якостни характеристики трябва да се използват режими с минимална стойност на K . Друго предимство на използването на режими с малки стойности на K е няколкократно нарастване (около 4 пъти) на производителността.

ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ ЗА ПРАКТИКАТА

1. Съчетаването на подходящи режими с размерите и формата на рамото и щифта на предложения в работата инструмент води до получаване на качествени заварени съединения (без наличие на дефекти от типа на непълтности) от алуминиева сплав AW1050A.

2. Нарастването на отношението на честотата на въртене към скоростта на заваряване води до намаляване на твърдостта в зоната на заваряване. Най-значимо намаляване се наблюдава при изменение на K от 1.3 до 1.6, след което зависимостта е близка до линейна.

3. При всички използвани режими се наблюдава силно понижаване на якостните характеристики, като това се дължи на процеси на рекристализация, протичащи в нагретия метал. Колкото е по-висока стойността на K , толкова по-ниски са стойностите на регистрираните характеристики.

4. За получаване на съединения с максимални стойности на якостните характеристики се препоръчва работа с възможно най-ниските стойности на K . Поради възможността за използване на големи скорости на заваряване при такива режими производителността ще бъде най-висока.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследването е реализирано с финансова подкрепа по проект 2021-МТФ-01, към фонд „Научни изследвания“ на РУ „Ангел Кънчев“.

REFERENCES

Botila N., R. Gojocar, V. Verbitchi, C. Ciuca. Friction stir processing in multiple passes of cast aluminium alloy EN AW 5083 (AlMg4.5Mn0.7). *Welding & Material Testing*. №3, 2019, pp 3-7.

Botila N., R. Gojocar, V. Verbitchi, C. Ciuca. Friction stir processing in multiple passes of cast aluminum alloy EN AW 4047 (AlSi12). *Welding & Material Testing*. №2, 2019, pp 13-17.

Cavaliere, P. (2013). Friction stir welding of Al alloys: analysis of processing parameters affecting mechanical behavior. *Procedia CIRP* 11, 2013, 139 – 144.

FSW Handbook for Specialists & Engineers. (2017). Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415. pp 162.

Gojocar, R., Botila, N. (2020). Possibilities to apply friction stir lap welding to some couples of aluminium – copper dissimilar materials. *Welding & Material Testing*. №3, 2020, pp 3-8.

Kumar, M., Ramana, V. (2014). An Overview of Friction Stir Welding (FSW): A New Perspective. *International Journal of Engineering And Science*, Vol.4, Issue 6, June 2014, 01-04.

Kumbhar, T., Dey, K., Bhanumurthy, K. (2011). Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. Research article, issue 321, July - Aug. 2011, 11-17.

Lambiase, F., Derazkola, H., Simchi, A. (2020). Friction StirWelding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers - State of the Art. *Materials* 2020, 13, 2291, pp 44.

Mandeep S., Sukhpal, C. (2012). Friction Stir Welding – Process and its Variables: A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 2, Issue 12, December 2012, 275-279.

Mishraa, S., Mab, Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R* 50, 2005, 1–78.

Prashant, P., Sanjay, J., Shree, L. (2013). A study of process parameters of Friction Stir Welded AA 6061 Aluminum Alloy. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 6, June 2013, 2304-2309.

Rai, R., De, A., Bhadeshia, H., DebRoy, T. (2011). Review: friction stir welding tools. *Science and technology of welding and joining*, vol.16, No 4, 2011, 325-342.

Sadeesh, P., Venkatesh, M., Rajkumar, V., Avinash, P., Arivazhagan, N., Devendranath, K., Narayanan, S. (2014). Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals. *Procedia Engineering* 75, 2014, 145 – 149.

Shinde, G., Gajghateb, S., Dabeerc, P., Seemikeri, C. (2016). Low Cost Friction Stir Welding: A Review. *Materials Today: Proceedings* 4, 2017, 8901–8910.