

TOOLS FOR FRICTION STIR WELDING: REVIEW²

Assist. Prof. Nikolay Ferdinandov, PhD

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

Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD

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

Abstract: Friction stir welding is a process of joining solid metal materials with the help of a special rotating tool (third body), without the use of additional material. The method is increasingly used in the field of industrial welding - in aviation, automotive, railway transport, nuclear industry and many others.

The obtaining of quality welded joints by this method depends on a number of factors, the most significant of which are the mode parameters (frequency of tool rotation, welding speed, strength of pressing and tool tilt) and the type of the tool used.

As the tool must have good wear resistance, heat resistance and strength at high temperature, tool steel or martensitic stainless steel are most often used for its production. It is possible composite tools to be used in which the pin is made of cobalt alloy and the shoulder is made of tool steel. The temperature characteristics of the process and the quality of the upper part of the seam largely depend on the shape and the diameter of the tool shoulder and the quality of mixing is determined mainly by the shape of its pin.

This paper examines the features and existing solutions regarding the material, shape, dimensions and construction of the tools used, depending on the type, thickness of the parts and the used parameters of the friction stir welding mode.

Keywords: Friction Stir Welding, Tools, Features.

ВЪВЕДЕНИЕ

Заваряването чрез триене с разбъркване (ЗТР) е изобретено от Британския институт по заваряване (TWI) през 1991 година (Emamian, S. et al, 2016; Kumar, K. et al, 2008). Това е един иновативен метод откриващ напълно нови възможности в заваръчните технологии и позволява да се решат редица проблеми характерни за методите на заваряване с разтопяване (Mandeep, S., Sukhpal, C., 2012).

Заваряването чрез триене с разбъркване е метод за свързване в твърдо състояние и се счита за едно от най-значимите постижения в областта на съединяването на метални материали. Това е „зелена“ технология поради своята енергийна ефективност, екологичност и гъвкавост. В сравнение с конвенционалните методи на заваряване този метод консумира значително по-малко енергия и не използва защитен газ или флюс, което го прави екологичен. Този процес не е свързан с отделянето на вредни газове, шлаки, пръски и силен шум, което подобрява работната среда, като същевременно увеличава производителността (Meilinger, Á., Török, I., 2013). При заваряването не се използва добавъчен материал и може да се свързват различни сплави без притеснение за съвместимост на химичния им състав, което е проблем при заваряването с разтопяване (Elangovan, K. et al, 2008).

Този метод се използва основно за свързване на различни алуминиеви сплави (Mishra, S., Mab, Y., 2005; Prakash, P. et al, 2013; Aissani, M. et al, 2010), но позволява да се заваряват и олово, магнезий, стомана, титан, цинк, медни и композитни материали, много от които се считат за трудно заваряеми (Thomas, W. et al, 2003; Thomas, W. et al, 1999).

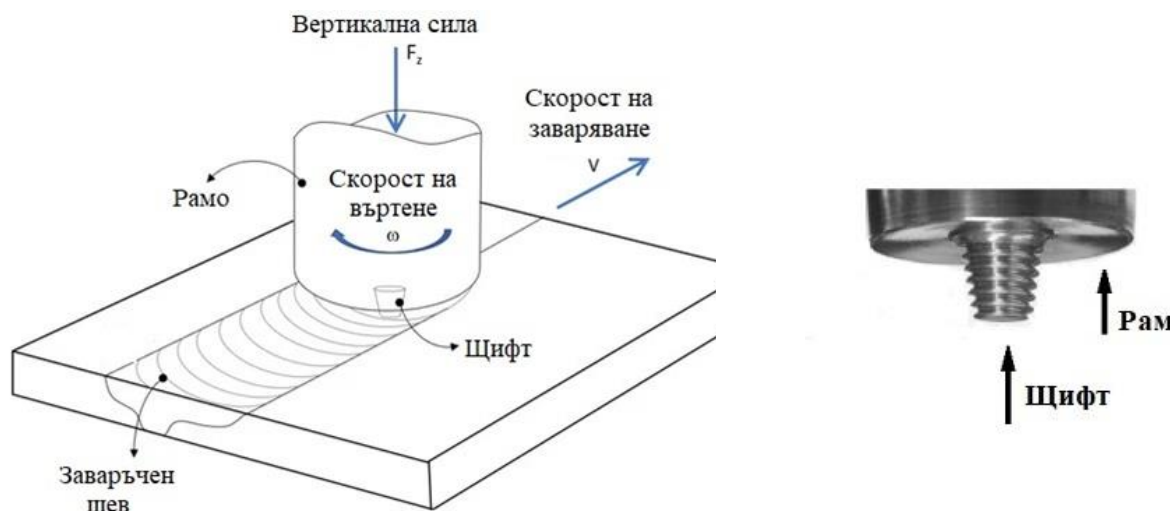
² Докладът е представен на 29 октомври 2021 с оригинално заглавие на български език: ИНСТРУМЕНТИ ЗА ЗАВАРЯВАНЕ ЧРЕЗ ТРИЕНЕ С РАЗБЪРКВАНЕ: ОБЗОР

Заваряването чрез триене с разбъркване намира приложение в авиацията, автомобилостроенето, ж-п транспорта, атомната индустрия и много др.

ИЗЛОЖЕНИЕ

За осъществяване на метода се използва специален инструмент, състоящ се от рамо и щифт. В процеса на работа инструментът навлиза между частите изпълнявайки въртеливо и постъпателно движение, като едновременно с това се притиска в тях с определена сила. В резултат на силите на триене основният метал се нагрява до пластично състояние без обаче да се разтопява (нагрява се до 70-80% от температурата на топене) (Aissani, M. et al, 2010), разбърква се с помощта на въртящия се инструмент и се измества в свободното пространство зад него. Обемът, в който се формира шева е ограничен отгоре от рамото на инструмента. Материалът претърпява интензивна пластична деформация при повишена температура в резултат, на което се получават фини и равномерно прекристализирани зърна (Mishra, S., Mab, Y., 2005; Dickerson, T. et al, 2003). При заваряване инструментът е наклонен назад спрямо посоката на заваряване.

Схема на метода и външен вид на инструмента са показани по-долу (Cabibbo M., Forcellese A., Santecchia E., Paoletti C., Spigarelli S. & Simoncini M., 2020; Meilinger, Á., Török, I., 2013).



Фиг. 1. Схема на метода и външен вид на инструмента

Количеството на влаганата топлина е определяща за качеството на завареното съединение, остатъчните напрежения и деформации. Освен от скоростта на заваряване, честота на въртене на инструмента, силата на притискане на инструмента и ъгъла на наклон на инструмента тя зависи до голяма степен и от конструкцията и материала, от който е направен инструментът.

При заваряването чрез триене с разбъркване материалите, от които се изработват инструментите са много важни, като техният избор е продиктуван основно от ограничаване на износването им. Инструментите трябва да притежават и достатъчна топлоустойчивост, якост при висока температура, добра устойчивост на окисляване и ниска топлопроводност за да се сведат до минимум загубите на топлина (Emamian, S. et al, 2016). Инструменталните стомани са основно използвани за изработване на инструменти за заваряване на алуминиеви сплави, докато за материали с по-висока температура на топене като стомани или титан и сплавите му се използват материали като волфрамов карбид, поликристален кубичен борен нитрид (PCBN) и сплав между волфрам и рений (W-Re). Възможно е да се използват и композитни инструменти, при които щифтът е направен например от кобалтова сплав MP159, а рамото от инструментална стомана H13 (X40CrMoV5-1).

В таблицата по-долу са дадени материалите, от които се изработват инструментите в зависимост от химичния състав на заваряваните части според различни автори.

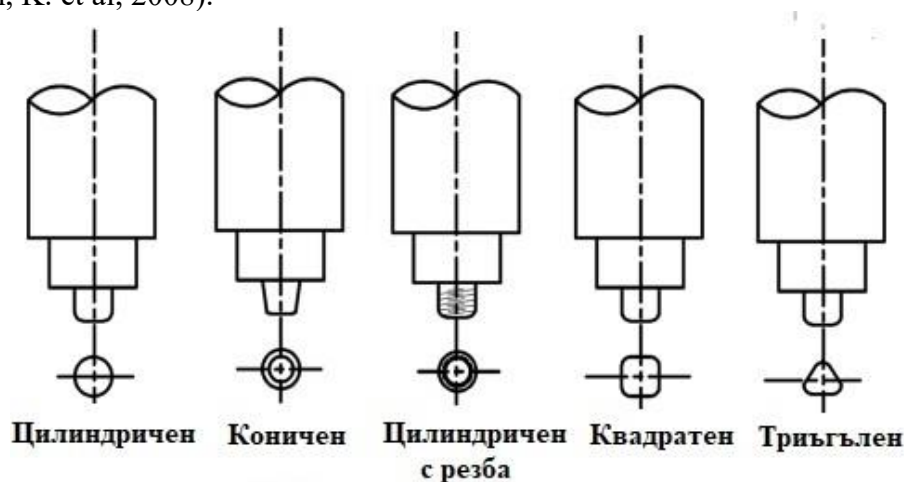
Таблица 1. Материали на инструментите за ЗТР в зависимост от химичния състав на заваряваните части

Материал на заваряваните части	Материал на инструмента	Автор, година
AA 5754	Стомана С 45	Verbitchi, V. et al, 2019
AA 1200 към Cu 99 ET	Инструментална стомана H13 (X40CrMoV5-1)	
AA 5754 към Cu 99 ET	Синтерован волфрамов карбид	
AA 6082 към Cu 99 ET	Синтерован волфрамов карбид	
AA6061	Инструментална стомана H13 (X40CrMoV5-1)	Emamian, S. et al, 2016
Cu	Инструментална стомана, спечена сплав на базата на волфрам.	Mishra, S. et al, 2005
AZ31	Инструментална стомана H13 (X40CrMoV5-1)	Rai, R. et al, 2011
AZ31B	Инструментални стомани	
AA 7075	Инструментална стомана H13 (X40CrMoV5-1), кобалтова сплав MP159, високовъглеродна стомана	
AA 6061		
AA 7020		
Ti-6Al-4V		
304L SS	Сплави на основата на W	
Нисковъглеродна стомана	WC-13% Co	
AA 2024	Инструментални стомани	
Алуминиеви сплави	Инструментални стомани, Co-WC	
Магнезиеви сплави	Инструментални стомани, WC	
Медни сплави	Сплави на основата на Ni и W, PCBN, инструментални стомани	
Титаниеви сплави	W-сплави	Meilinger, A. et al, 2013
Неръждаващи стомани	Стомани с покритие от PCBN (поликристален кубичен борен нитрид), сплави на основата на W	
Нисколегирани стомани	WC композит, PCBN	
Никелови сплави	Стомани с покритие от PCBN (поликристален кубичен борен нитрид)	
AA 6061	Високовъглеродни стомани	Elangovan, K. et al, 2008
AA2024 AA7075	Стомана 42CD4 (42CrMo4)	Aissani, M. et al, 2010

Геометрията на инструмента играе решаваща роля върху разбъркването, потока на материала и скоростта на заваряване. Температурните характеристики на процеса и качеството на горната част на шева до голяма степен зависят от формата и диаметъра на рамото на инструмента, а качеството на смесването се определя главно от формата и размерите на щифта.

В повечето изследователски работи обаче геометрията на инструмента не се отчита поради различни причини. Голяма част от формата на инструмента се основава на интуитивни концепции (Mishra, S., Mab, Y., 2005). Въпреки това някои автори дават връзка между дебелината на частите и размерите на инструментите (Craçanel, M. et al, 2020), макар че в различните литературни източници тези данни са доста противоречиви.

Най-често използваните форми на щифта схематично са показани по-долу (Фиг. 2). Тя в голяма степен определя ефективността на смесване и качеството на шева (липса на дефицит на метал). Освен това оказва влияние и върху механичните характеристики и твърдост на шева (Elangovan, K. et al, 2008).



Фиг. 2. Най-често използвани форми на щифтовете

Разработени са и по-сложни форми, чрез които се цели промяна в потока на материала и съответно смесването, както и намаляване на натоварването на щифта (Aissani, M. et al, 2010).

По отношение дължината му, то там повечето автори са на мнението, че тя трябва да бъде с 0,2 до 0,4 mm по-малка от дебелината на основния метал (Meilinger, Á., Török, I., 2013; Elangovan, K. et al, 2008), макар че има информация и за разлика от 1 mm (Aissani, M. et al, 2010).

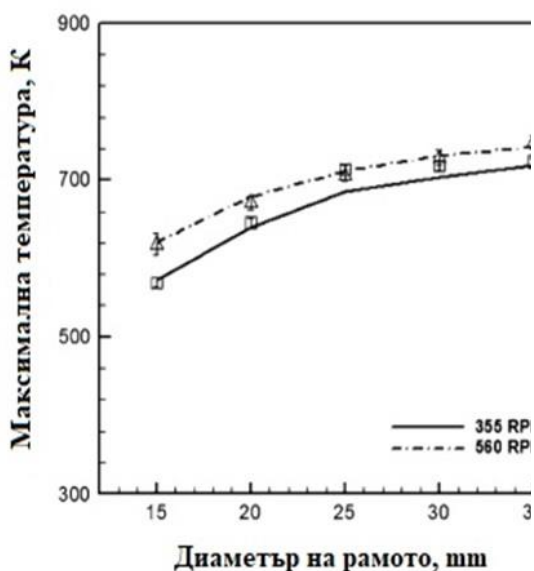
Диаметърът на щифта варира в доста широки граници, като някои автори го обвързват с дебелината на заваряваните части, докато други с диаметъра на рамото на инструмента. Във всички случаи той трябва да притежава достатъчна якост, така че в процеса на работа да не се огъне или счупи.

Диаметърът и формата на рамото са определящи за количеството топлина отделяща се вследствие на триенето при въртенето на инструмента. Рамото на инструмента произвежда по-голямата част от топлината при заваряването на по-тънки части, докато определящ за нагриването при по-дебелите части е щифта. По-големият диаметър на рамото изисква и по-голяма сила на притискане (Meilinger, Á., Török, I., 2013).

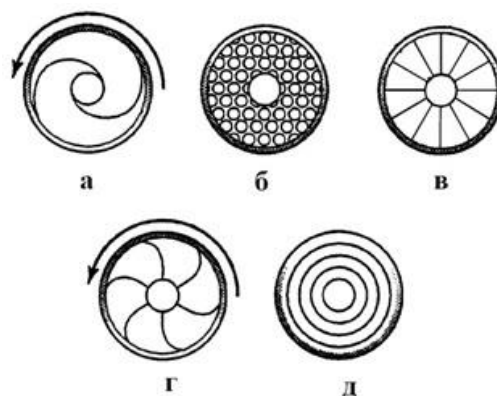
Фигура 3 показва връзката между диаметъра на рамото и максималната температура при различна скорост на въртене на инструмента при заваряване на алуминий.

Освен диаметъра, формата на рамото също е много важна (Meilinger, Á., Török, I., 2013). На фигура 4 са показани различни по форма рамена.

В таблица 2 са представени размери на инструментите в зависимост от вида и дебелината на частите.



Фиг. 3. Връзка между диаметра на рамото и максималната температура при заваряване на алуминий



Фиг. 4. Форми на рамото на инструмента: а – завита; б – набраздена; в – на ивици; г – вдлъбната; д – концентрична.

Таблица 2. Размери и форма на инструментите в зависимост от вида и дебелината на заваряваните части

Вид и дебелина на материала	Форма на щифта на инструмента	Диаметър на рамото, mm	Диаметър на щифта, mm	Дължина на щифта, mm	Автор, година
Алуминиева сплав, 5mm	Цилиндричен, Цилиндричен с резба, Триъгълен	15	6	4,7	Rai, R. et al, 2011
AA7020-T6 / 4mm	Цилиндричен, Триъгълна пирамида	13	5	3,2	
Ti / 3mm	Цилиндричен	18	5	2,85	
Ti / 2mm	-	15	6	2	
Ti-6Al-4V / 2mm	-	11	6/4	1,8	
AA6061 / 6mm	-	18	6	5,7	Elangovan, K. et al, 2008
AA2024 / 1,6mm	-	20	6	1,2	Aissani, M. et al, 2010
AA7075 / 5mm	Модифицирана	35	5	4	
AA6061 / 6mm	Цилиндричен с резба	18	6	5,5 / 5,7	Prashant, P. et al, 2013
AA6061 / 9 mm	Цилиндричен с резба	24	8	8	Emamian, S. et al, 2016
AA7020 / 4,4mm	Цилиндричен и коничен	10/15/20	3...8	4,2	Kumar, K. et al, 2008

Връзката между геометричните размери на елементите на инструмента и дебелината на заваряваните части според (Cracanel, M. et al, 2020) е дадена по-долу:

- Диаметър на рамото – 9,5 mm + дебелината на частите;
- Диаметър на щифта – 3,0 mm + дебелината на частите;
- Дължина на щифта – дебелина на материала – 0,3 mm.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заваряването чрез триене с разбъркване е метод за свързване в твърдо състояние и се счита за едно от най-значимите постижения в областта на съединяването на метални материали. За получаване на качествено заварено съединение освен скоростта на заваряване, честота на въртене, силата на притискане и ъгъла на наклон на инструмента от особена важност е и конструкцията и материала, от който е направен той. Макар, че формата и размерите на инструмента влияят съществено върху температурните характеристики на процеса в литературата няма еднозначност по отношение на размерите на отделните му елементи (рамо и щифт), връзката между тях, параметрите на режима, химичния състав и дебелината на заваряваните части. При немалка част от инструментите, формата им е резултат от интуитивното решение на конструктора.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

REFERENCES

- Aissani, M., Gachi, S., Boubenider, F., Benkedda, Y. (2010). Design and Optimization of Friction Stir Welding Tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 25, 2010, 1199–1205.
- Cabibbo M., Forcellese A., Santecchia E., Paoletti C., Spigarelli S. & Simoncini M. (2020) New Approaches to Friction Stir Welding of Aluminum Light-Alloys, *Metals* 2020, 10(2), 233; URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/233/htm>
- Cracanel, M., Nitu, E., Iordache, D. (2020). Friction Stir Welding of Steel Structures – A Brief Review. *Key Engineering Materials*, Vol 890, 2020, 105-119.
- Dickerson, T., Shi, Q., Shercliff, H. (2003). Heat Flow into Friction Stir Welding Tools. 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003, 1-11.
- Elangovan, K., Balasubramanian, V., Valliappan, M. (2008). Effect of Tool Pin Profile and Tool Rotational Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6061 Aluminium Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 23, 2008, 251–260.
- Emamian, S., Awang, M., Hussai, P., Meyghani B., Zafar, A. (2016). Influences of Tool Pin Profile on the Friction Stir Welding of AA6061. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, No. 20, October 2016, 12258-12261.
- Kumar, K., Kailas, S., Srivatsan, T. (2008). Influence of Tool Geometry in Friction Stir Welding. *Materials and Manufacturing Processes*, 23, 2008, 188–194.
- 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.
- Meilinger, Á., Török, I. (2013). The Importance of Friction Stir Welding Tool. *Production Processes and Systems*, vol. 6. (2013) No. 1., 25-34.
- Mishra, S., Mab, Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R* 50, 2005, 1–78.

Prakash, P., Kumar, S., Lal, S. (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.

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.

Thomas, W., Threadgill, P., Nicholas, E. (1999). Feasibility of friction stir welding steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4, No. 6, 1999, 365-372.

Thomas, W., Staines, D., Norris, I., Frias, R. (2003). Friction Stir Welding Tools and Developments. *Welding in the World*, Vol. 47, No. 11/12, 2003, 10-17.

Verbitchi, V., Cojocaru, R., Botila, L. (2019). Technical Characteristics of the Equipment for Friction Stir Welding (FSW), Depending on the Base Metals. (2019). *Advanced Materials Research*, Vol. 1153, 2019, 7-15.