

FRI-1.317-1-MEMBT-07

## FEATURES OF MATERIAL FLOW IN FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM ALLOYS

**Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD**

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

**Assist. Prof. Nikolay Ferdinandov, PhD**

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

**Daniela Nenova – PhD Student**

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

***Abstract:** Friction stir welding is a modern method for joining materials in the solid state. The method is mainly used for welding aluminum alloys. It uses a rotating tool that creates heat due to friction between it and the parts being welded. As a result, the material is heated to a plastic state without melting and mixed with the help of the tool.*

*The movement of the material flow is crucial for the formation of a quality weld. During the process, the plastic metal moves from the front to the back of the pin, forming a weld. If this flow is not well controlled, defects such as voids, pores or lack of mixing can occur.*

***Keywords:** Friction Stir Welding, Material flow, Zones*

### ВЪВЕДЕНИЕ

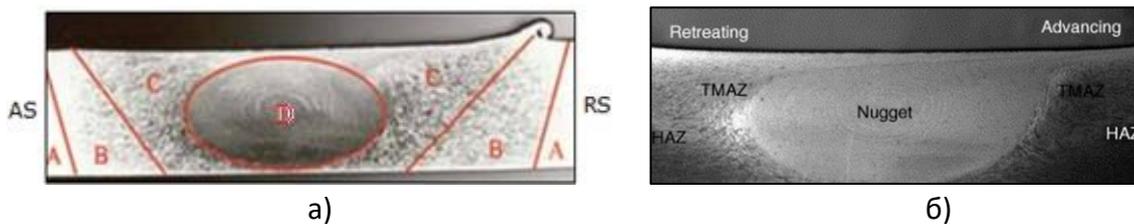
Алуминиевите сплави са най-често заваряваните чрез триене с размесване (ЗТР) материали. Те притежават висока топлопроводимост, добри механични свойства и ниска плътност. Използването на ЗТР осигурява по-добри свойства на завареното съединение – по-малко дефекти, по-малки остатъчни напрежения и по-висока якост в сравнение с традиционните методи за заваряване на алуминиеви сплави – ВИГ и МИГ (Zhao, Y. et al., 2005, Güney, B., 2023).

При въртенето на инструмента се генерира топлина вследствие на триенето между рамото и заваряваните части. В резултат на това основният материал се нагрива до пластично състояние, без да се разтопява (Rabby, Md., 2010, Güney, B., 2023, Chowdhurya S. et al., 2010, Luo, H. et al., 2019, da Silva, A. et al., 2011, Guerra, M. et al., 2003). Вследствие на повишената температура и силите на триене материалът се увелича от инструмента, което води до размесването му в зоната на заваряване и образуване на заваръчен шев.

Движението на материала при ЗТР се определя от няколко ключови фактора: геометрия на инструмента, включително профила на щифта и рамото; сила на притискане; посока и обороти на въртене; скорост на заваряване и ъгъл на наклон на инструмента. Химичният състав, механичните свойства и дебелината на частите също влияят на поведението на материала по време на размесването (Çam, G., & Mistikoglu, S., 2014, Güney, B., 2023, Schmidt, H. et al., 2006, Threadgill, P. et al., 2009, Ramanjaneyulu, K. et al., 2013, Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005). Затова разбирането и управлението на движението на потока на материала е изключително важно за осигуряване на висока якост, хомогенна структура и надеждност на съединението (Luo, H. et al., 2019, Reynolds, A., 2008, Ramanjaneyulu, K. et al., 2013).

## ИЗЛОЖЕНИЕ

ЗТР протича в твърдо състояние като в завареното съединение се получават четири основни зони (Фиг.1): зона на разбъркване – NZ (*англ. nugget zone*) – протича динамична рекристализация, в резултат на която се получава финнозърнеста микроструктура; термо-механична зона – TMAZ (*англ. thermo-mechanically affected zone*) – налице е пластична деформация без рекристализация; зона на термично влияние – HAZ (*англ. heat-affected zone*) – наблюдава се промяна в свойствата и макроструктурата без пластична деформация; основен материал - BM (*англ. base material*) – няма промяна на структурата и свойствата вследствие на заваряването (Ahmed, M. et al., 2023, Kumar, R. et al., 2023, Kang, S. et al., 2014, Çam, G., & Mistikoglu, S., 2014, da Silva, A. et al., 2011, Threadgill, P. et al., 2009, Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005).



Фиг.1. Общ вид на съединение получено чрез ЗТР

а) характерни зони в завареното съединение: А - основен материал (BM), В - зона на термично влияние (HAZ), С - термо-механична зона (TMAZ), D - зона на разбъркване (NZ); б) напречно сечение на заварено съединение от високояка алуминиева сплав AA7075-T651, получено с помощта на цилиндричен щифт с резба (Threadgill, P. et al., 2009, Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005)

Все по-широкото използване на ЗТР в производството кара много изследователи подробно да проучват движението на потока на материала в зоната на заваряване. Това много често се извършва експериментално чрез вградени маркери, метални пластини, рязко спиране на въртенето и др. За да се получи обаче по-пълна информация са необходими голям брой експерименти, средства и време. Затова към експерименталното изследване се прилагат и математическите модели, базирани на изчислителна динамика на флуидите или метод на крайните елементи, които позволяват прогнозиране на температурни полета и напрежения, както и анализ на траекторията на частиците в заваръчния шев (Wu, T. et al., 2019, Reynolds, A., 2008).

В процеса на ЗТР оборотите на въртене на инструмента оказват съществено влияние върху работната температура, а тя от своя страна върху движението на потока на материала и върху структурата и свойствата на завареното съединение. Изследванията показват, че при постоянна скорост на заваряване с увеличаване на оборотите на въртене на инструмента, температурата в зоната на заваряване се повишава до определена оптимална стойност за съответния материал (Wu, T. et al., 2019, Çam, G., & Mistikoglu, S., 2014, Luo, H. et al., 2019). При последващо нарастване на оборотите, температура допълнително нараства, силата на притискане намалява тъй като материалът става по-пластичен, а от това триенето между инструмента и детайла намалява (Wu, T. et al., 2019). Следователно, не може да се получи постоянно нарастване на температурата в зоната на заваряване с увеличаване на оборотите на въртене, тъй като коефициентът на триене се променя (Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005).

Движението на потока на материала от напредваща страна на шева (AS) към отстъпващата страна на шева (RS) е ограничен отгоре от рамото на инструмента и се движи едновременно надолу и около щифта, а възходящото му движение е в следствие на ограниченията от плочата, намираща се отдолу, както и странично от незасегнатия основен материал (Ramanjaneyulu, K. et al., 2013, Zhao, Y. et al., 2005, Schmidt, H. et al., 2006, Güney,

B., 2023, Luo, H. et al., 2019). След заваряване могат да се наблюдават някои разлики между двете страни на шева (AS и RS), особено по отношение на формата на зоната на разбъркване (NZ) и измерената твърдост (Kosturek, R. et al., 2022). Вида на щифта също оказва силно влияние върху движението на потока на материала. Различните геометрии на щифтовете и профили на рамото имат различни начини на пренос на материал (Zhao, Y. et al., 2005, Ramanjaneyulu, K. et al., 2013). Например за щифтове с резба е необходимо посоката на въртене на инструмента да е противоположна на посоката на резбата т.е. за посока на въртене на инструмента по часовниковата стрелка, резбата трябва да е лява (LHT) и обратно, за противоположна посока на въртене резбата да е дясна (RHT), за да не се получава изплискване на материала, съответно липса на такъв в обема на шева (Rabby, Md., 2010, Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005, Threadgill, P. et al., 2009, Chowdhurya, S. et al., 2010, Güney, B., 2023, Guerra, M. Et al., 2003).

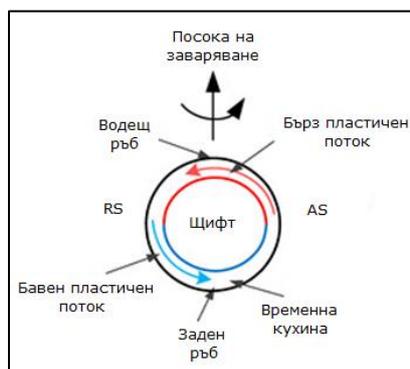
На базата на множество експериментални изследвания, както и на приложени различни числени модели е установено наличието на три характерни зони при движението на материалния поток, а именно:

- Ротационна зона – зоната най-близо до щифта, която се състои от фини зърна. Тази област е приблизително три пъти по-широка от разстоянието, което щифта изминава за едно завъртане;

- Преходна зона – зоната от материала, който се увеличава от въртящия се щифт около ротационната зона. Тя е приблизително два пъти по-широка в отстъпващата страна, отколкото в напредващата. Смята се, че материалът в тази зона се върти, но скоростта му намалява от вътрешния ръб на преходната зона до външния в хоризонтално направление;

- Зона на деформация – слой, обграждащ преходната зона. Това съответства на TMAZ, обграждаща NZ в напречно сечение (Guerra, M. et al., 2003, Çam, G., & Mistikoglu, S., 2014, da Silva, A. et al., 2011, Schmidt, H. et al., 2006, Kang, S. et al., 2014).

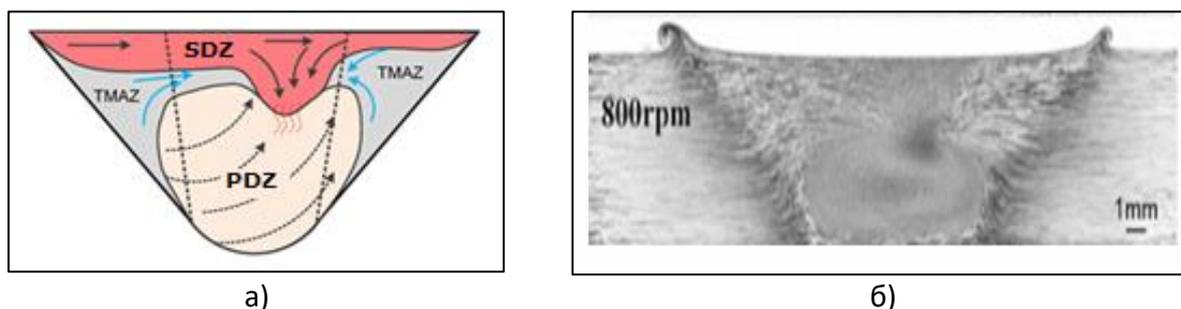
Reynolds, A., 2008, Luo, H. et al., 2019, Guerra, M. et al., 2003, Güney, B., 2023, Ramanjaneyulu, K. et al., 2013, Wu, T. et al., 2019, Çam, G., & Mistikoglu, S., 2014, Schmidt, H. et al., 2006, Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005, Threadgill, P. et al., 2009, Çevik, B. et al., 2016 описват механизма на движение на пластичния материал по следния начин: По време на процеса на заваряване в близост до повърхността, непосредствено под рамото (около една трета от височината на шева), материал от отстъпващата страна се увеличава през централната линия на шева и се насочва хоризонтално към напредващата страна т.е. металът се движи по посока на въртене на рамото. Потокът на движение на материала в горната една трета от шева е доминиран от рамото и има различен модел в сравнение с този в долните две трети, заемани от щифта. Материалът от напредващата страна на шева навлиза в ротационната зона, която едновременно се върти и придвижва напред, като увеличава материала от отстъпващата страна под натисковото действие на рамото. Този силно деформиран метал се екструдира (спирално) надолу под действието на щифта, прави няколко завъртания около него и след това се придвижва нагоре в посока на напредващата страна зад инструмента. В резултат на това в долната част на напредващата страна се образува временна кухня (Фиг.2), която при правилно избрани параметри на режима и в зависимост от формата на върха на щифта, се запълва от увлечения метал на отстъпващата страна. Когато материалът от отстъпващата към напредващата страна не може да запълни кухнята зад инструмента навреме, лесно се образуват дефекти, най-често прекъснати кухни или тунели.



Фиг.2. Схема на движението на материала около щифта (Luo, H. et al., 2019)

Във вертикална посока материалният поток се състои от три области (Фиг. 3): SDZ (*англ. shoulder-driven zone*) - област, в която материала се движи по посока на въртене на инструмента под действие на рамото; PDZ (*англ. pin-driven zone*) - област, в която материала се задвижва от щифта; област на преход между предните две области, където материалът има хаотично поведение (Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005, Kosturek, R. et al., 2022, Wu, T. et al., 2019, Schmidt, H. et al., 2006, Güney, B., 2023).

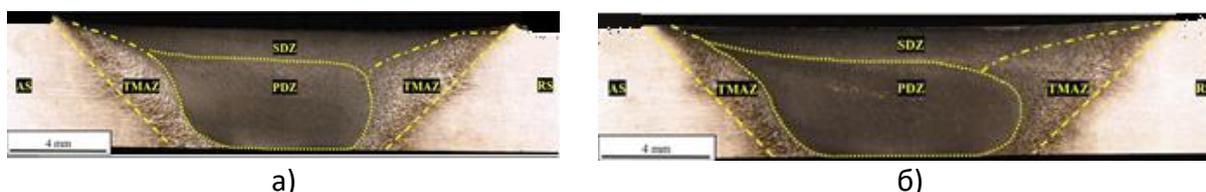
Неподходящите обороти на въртене на инструмента и скорост на заваряване водят до разлики в температурата между горната и долната част на заваръчния шев, съответно до различни дефекти. В по-голямата си част материала, който се движи в долните две трети на шева попада зад инструмента и образува ядро с финнозърнеста микроструктура (NZ), обградено от пластично деформираната зона (TMAZ).



Фиг. 3 Схема на движението на потока и формираната макроструктура на съединение получено чрез ЗТР

а) навлизане на материал от термо-механичната зона към ротационната зона в следствие на висока скорост на въртене на инструмента; б) макрошлиф на заваръчен шев от сплав AA2524-T351 (Wu, T. et al., 2019, Çam, G., & Mistikoglu, S., 2014)

Увеличаването на оборотите на въртене води до подобряване на разбъркването, като част от материала от зоната TMAZ може да се изтегли към ротационната зона (Фиг.3). Това предизвиква движение на зоната на ядрото в посока горната част на AS (Фиг. 1б и Фиг. 4). Увлечането на материал от TMAZ прави страната RS почти два пъти по-широка от AS (Фиг. 4б), което донякъде обяснява различните свойства на двете страни на шева.



Фиг.4. Влияние на оборотите на въртене на инструмента върху зоните на заваръчния шев: а) при ниски обороти на въртене; б) при високи обороти на въртене (Kosturek, R. et al., 2022)

От изключително важно значение е да се познава разпределението на температурата в процеса на ЗТР. Големината ѝ в и около зоната на разбъркване пряко влияе върху микроструктурата и механичните характеристики на шева. Измерването ѝ обаче е много трудно поради интензивната пластична деформация, причинена от въртенето и преместването на инструмента (Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005). Въпреки това благодарение на различни математически модели и натурни експерименти са извършени измервания, които отчитат температура между 400° и 550° C, в зависимост от алуминиевата сплав. Тя е най-висока в центъра на NZ и намалява в хоризонтална и вертикална посока. Температурата на материала при рамото е винаги по-висока от тази при щифта (Çam, G., & Mistikoglu, S., 2014, Luo, H. et al., 2019, Threadgill, P. et al., 2009, Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005, Wu, T. et al., 2019). За алуминиева сплав AA7075-T651 Mishra, R.S., & Ma, Z.Y., 2005 докладва за температура над 480°C в горния ръб на зоната на разбъркване и 400°C в края ѝ. Чрез симулационен анализ Wu, T. et al., 2019 и Luo, H. et al., 2019 установяват, че температурата от напредващата страна е с около 19 - 20° C по-висока от тази на отстъпващата страна близо до заваръчния шев.

## ИЗВОДИ

1. За разлика от процесите на заваряване чрез стопяване, при ЗТР се наблюдава сложно съчетание от сили на триене, усукване, срязване и натиск, които оказват съществено влияние върху структурата и механичните характеристики на завареното съединение.
2. Формата и размера на характерните зони в завареното съединение зависят както от параметрите на режима на работа, така и от вида, размерите и посоката на въртене на инструмента.
3. Максималните работни температури при ЗТР на алуминиеви сплави обикновено са между 400 и 550°C, в зависимост от вида на сплавта.
4. Установено е, че температурата на материала под рамото е винаги по-висока от тази на материала около щифта, а средната температура на напредващата страна е с около 20°C по-висока от тази на отстъпващата страна в процеса на заваряване.
5. Механичните свойства и липсата на дефекти на заварените съединения получени чрез ЗТР зависят от правилния избор и съчетание на инструмент и режими на работа, определящи температурата и разбъркването.

## Благодарности

Изследването е реализирано с финансова подкрепа по проект 2025-МТФ-01, към фонд „Научни изследвания“ на РУ „Ангел Кънчев“.

## REFERENCES

- Ahmed M., El-Sayed Seleman M., Fydrych D. & Çam G. (2023). Friction Stir Welding of Aluminum in the Aerospace Industry: The Current Progress and State-of-the-Art Review. *Materials*, 16, 2023, 1-33.
- Çam, G., & Mistikoglu, S. (2014). Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 23(6), 2014, 1936–1953.

Çevik B., Özçatalbaş Y., Gülenç B. (2016). Friction Stir Welding of 7075-T651 Aluminium Alloy. *Practical Metallography*, 53, January 2016, 6 -23.

Chowdhury S., Chena D., Bholea S., Caob X. (2010). Effect of pin tool thread orientation on fatigue strength of friction stir welded AZ31B-H24 Mg butt joints. *Procedia Engineering*, 2, 2010, 825–833.

da Silva A., Arruti E., Janeiro G., Aldanondo E., Alvarez P., Echeverria A. (2011). Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds. *Materials and Design*, 32, 2011, 2021–2027.

Dickerson T., Shercliff H. & Schmidt H. (2003). A weld marker technique for flow visualization in friction stir welding. 4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, Utah, USA, 14-16 May, 2003, 1-12.

Guerra, M., Schmidt, C., McClure, J.C., Murr, L., & Nunes, A. (2003). Flow patterns during friction stir welding. *Materials Characterization* 49, 2003, 95–101.

Güney, B. (2023). Investigation of the Effect of Mixing Direction on the Quality of Friction Stir Welding. 3<sup>rd</sup> International Conference on Innovative Academic Studies, September 26-28, 2023, Konya, Turkey, 136-142.

Kang S.W., Jang B.S. & Kim J.W. (2014). A study on heat-flow analysis of friction stir welding on a rotation affected zone. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28, 9, 2014, 3873-3883.

Kosturek, R., Torzewski, J., Wachowski, M., & Śnieżek, L. (2022). Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded AA7075-T651 Aluminum Alloy Butt Joints. *Materials*, 15, 2022, 5950, 1-15.

Kumar R., Bhadauria S., Sharma V., Kumar M. (2023). Effect on microstructure and mechanical properties of single pass friction stir welded aluminium alloy AA-7075-T651 joint. *Materials Today: Proceedings*, 80, 2023, 40–47.

Luo H., Wu T., Wang P., Zhao F., Wang H. & Li Y. (2019). Numerical Simulation of Material Flow and Analysis of Welding Characteristics in Friction Stir Welding Process. *Metals* 9, 2019, 1-20.

Mishra, R.S., & Ma, Z.Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R* 50, 2005, 1–78.

Rabby, Md. (2010). Quantification of the Effect of Tool Geometric Features on Aspects of Friction Stir Welding. Tuskegee University, 2010.

Ramanjaneyulu, K., Madhusudhan, G., Venugopal Rao, A., & Markandeya, R. (2013). Structure-Property Correlation of AA2014 Friction Stir Welds: Role of Tool Pin Profile. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013.

Reynolds A. (2008). Flow visualization and simulation in FSW. *Scripta Materialia* ,58, 2008, 338–342.

Schmidt H., Dickerson T., Hattel J. (2006). Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3. *Acta Materialia*, 54, 2006, 1199–1209.

Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., & Withers, P. J. (2009) Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, vol.54, no.2, March 2009, 49-93.

Wu T., Zhao F., Luo H., Wang H. & Li Y. (2019). Temperature Monitoring and Material Flow Characteristics of Friction Stir Welded 2A14-t6 Aerospace Aluminum Alloy. *Materials*, 12, 2019, 1-19.

Zhao Y., Lin S., Wu L., Qu F. (2005). The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy. *Materials Letters*, 59, 2005, 2948–2952.