



Peculiarities and Application of Friction Stir Welding

Nikolay FERDINANDOV, Danail GOSPODINOV

Department of Material Science and Technology at the University of Ruse, Ruse, Bulgaria,
e-mail: nferdinandov@uni-ruse.bg; dgospodinov@uni-ruse.bg

Abstract

Friction stir welding is one of the most exciting achievements in the world welding industry in the last thirty years. Friction stir welding is a new welding method but it already had found its way in the welding industry. Owing to its many advantages this welding methods gives new trends in welding technology. Friction stir welding allows a variety of problems typical for fusion welding to be resolved.

The present report familiarize with the peculiarities of friction stir welding. Its advantages and drawbacks are described, and the applications of friction stir welding are outlined. The main welding parameters that influence the welding quality are described. Tools with different configurations for friction stir welding of different materials and thickness are discussed. Some characteristic defects for friction stir welding are indicated, as well as the reasons for their occurrence.

Keywords: Friction stir welding, peculiarities, applications, defects

Особености и приложение на заваряването чрез триене с разбъркване

Николай ФЕРДИНАНДОВ, Данаил ГОСПОДИНОВ

1. Увод

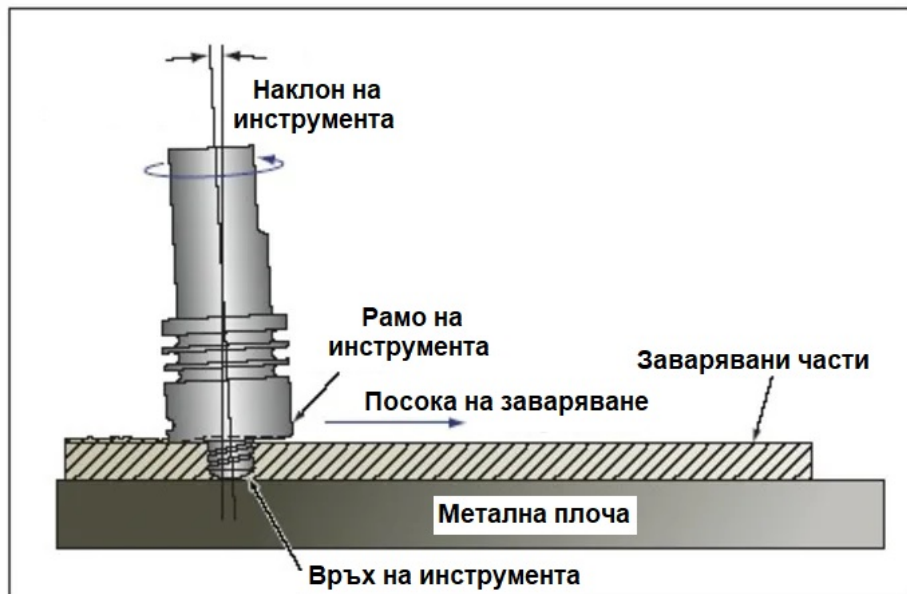
Едно от най-интересните световни постижения в областта на заваряването през последните три десетилетия е разработването и комерсиализирането на един принципно нов метод за заваряване чрез триене с разбъркване/размесване (ЗТР, англ. FSW – Friction Stir Welding). Този метод е патентован през 1991 г. от Британския институт по заваряване (TWI) и днес се развива усилено в цял свят [1, 8]. Той открива напълно нови насоки в заваръчната технология и позволява да се решат редица проблеми характерни за методите на заваряване с разтопяване. Процесът се осъществява в твърдо състояние (без разтопяване), като завареното съединение е с високо качество, получено за по-кратко време с по-малко енергия и вредни за околната среда странични продукти.

Заваряването чрез триене с разбъркване се използва основно за съединяване на материали със сравнително ниски температури на топене и преди всичко на алуминий и алуминиеви сплави [2, 3, 5, 6], но е възможно и използването му за полимери, разнородни цветни метали, стомани и други сплави и метали с висока температура на топене [7, 17, 25, 34].

2. Изложение

Същността на метода е свързана с използването на специален въртящ се инструмент (трето тяло) състоящ се от две основни части - рамо (цилиндрична част) и връх (работна част). В процеса на работа инструментът навлиза между частите на дълбочина по-малка от дебелината им с $0,2 \pm 0,3 \text{ mm}$, изпълнявайки въртеливо и постъпателно движение. В резултат на силите на триене между инструмента и

заваряваните части, основният метал се нагрява до пластично състояние без обаче да се разтопява, смесва се с помощта на въртящия се инструмент и се измества в свободното пространство зад него [4, 5] Обемът, в който се формира шева е ограничен отгоре от рамото на инструмента. В процеса на работа инструментът е наклонен назад спрямо посоката на заваряване (фигура 1) [35].



Фигура 1. Схема на заваряване чрез триене с разбъркване.

В процеса на работа е необходимо да се създаде и поддържа постоянно налягане на инструмента по посока на оста му, като силата може да достигне 100 kN. Материалът претърпява интензивна пластична деформация при повишена температура в резултат, на което се получават фини и равномерно прекристализирани зърна. [1]

При заваряване частите се поставят върху масивна метална плоча (подложка) изработена най-често от неръждяваща стомана или титан.

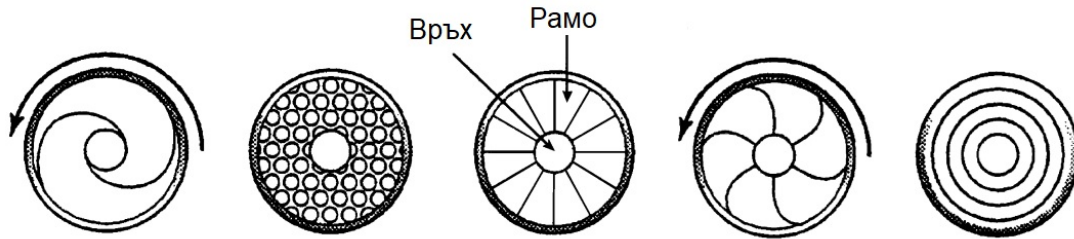
Основните параметри на режима на работа са: скорост на заваряване (20...500 mm/min), честота на въртене на инструмента (150...1400 об/min), сила на притискане на инструмента към заваряваните части (9...80 kN), ъгъл на наклон на инструмента (1...5°). Тези параметри зависят основно от вида и дебелината на заваряваните части [8, 9, 29].

Освен описаните параметри на режима важен фактор за получаването на висококачествени съединения е избора на конструкция на инструмента и материала, от който е изработен той. За изработването му обикновено се използва инструментална топлоустойчива стомана H13/AISI, (SKD61/JIS, 1.2344/X40CrMoV5-1/ISO); SKD11/JIS (X153CrMo12/ISO); SKH57/JIS (HS10-4-3-10/ISO); X38CrMoV5/ISO; P18/ГОСТ или мартензитна неръждаема стомана SUS440C/JIS. Възможно е да се използва композитен инструмент, при който върхът е направен например от кобалтова сплав MP159, а рамото от H13 [10, 12, 15, 16]. При температури на работа по-ниски от 400°C е възможно и използването на конструкционни подобрени стомани с ниска топлоустойчивост като C45/ISO или 42CrMo4/ISO.

Геометрията на инструмента играе решаваща роля в разбъркването, потока на материала, както и в управлението на скоростта на заваряване.

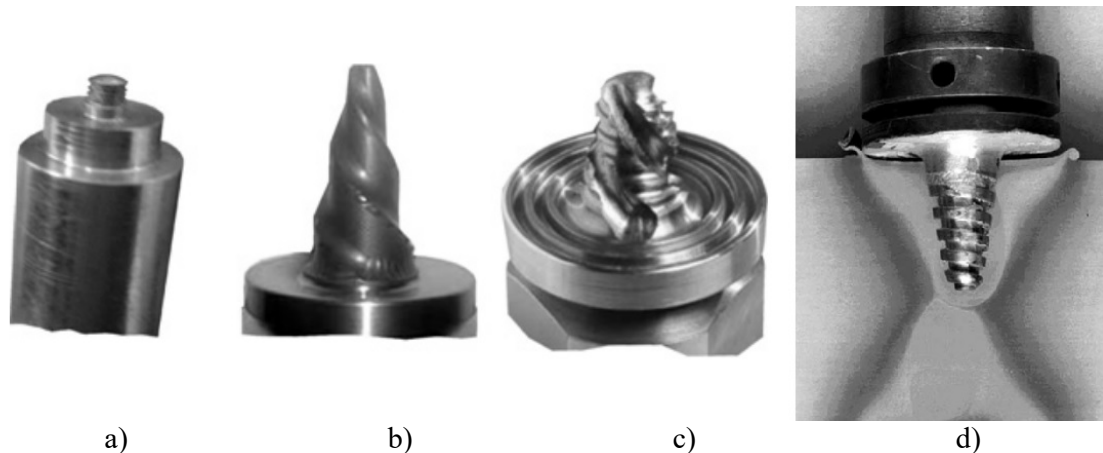
Температурните характеристики на процеса и качеството на горната част на шева до голяма степен зависят от формата и диаметъра на рамото на инструмента (фиг. 2) [1,

11], а качеството на смесване се определя основно от формата на работната му част - върха.



Фигура 2. Геометрия на рамото на инструмента – поглед отдолу.

Еднородността на микроструктурата на шева се определя от конструкцията на инструмента и най-вече от тази на работната му част. Обикновено се използват инструменти с цилиндрични или конусни върхове, но има и такива със специални канали за насочване и разбъркване (фиг. 3) [1, 3, 4, 10, 11, 16, 23].



Фигура 3. Работна част на инструментите, използвани в ЗТР:

- а) традиционна форма на върха на инструмента;
- б) инструмент с работна част за дълбоко проваряване;
- в) инструмент със специална форма на върха;
- г) инструмент за двустранно заваряване.

Конвенционалните електродъгови методи на заваряване с разтопяване имат редица недостатъци, свързани с: остатъчни напрежения, водещи до деформации на конструкциите; понижена якост на заваръчния шев (10–20%) в сравнение с тази на основния метал; възникване на дефекти (най-често пукнатини) по време на заваряването на редица високояки алуминиеви сплави; висока трудоемкост при многопроходно заваряване и др [32, 33]. Заваряването чрез триене с разбъркване позволява да се решат голяма част от тези проблеми.

Основните предимства на ЗТР, които фундаментално го отличават от традиционните методи на заваряване с разтопяване са свързани с високата якост на завареното съединение, която в сравнение с основния материал може да достигне 100%, заварените съединения, получени така имат якост на умора близка до тази на основния материал - само с 5% по-ниска от нея, малки деформации и отсъствието на дефекти, характерни за заваряването чрез разтопяване (пукнатини, пори, оксидни включвания и

др.). Максималната температура в процеса на заваряване е около 70% от температурата на топене на съответния материал, като за алуминия например не превишава 550°C, което е свързано с по-малки ъглови деформации. Те могат да достигнат стойности до 1/5÷1/7 от стойностите при заваряване с разтопяване. Топловлагането е около 2 пъти по-малко в сравнение с ВИГ заваряването. Липса на необходимост от добавъчни материали, защитни газове и флюси е свързано и с по-ниски оперативни разходи. Общо производственият цикъл намалява с 50-75% в сравнение с традиционните методи за заваряне. Технологиата на ЗТР дава възможност за четирикратно по-бързо свързване на структурните компоненти на корпуса на самолет от автоматизираното занитване и 20 пъти по-бързо от ръчното. Използването на ЗТР позволява да се намалят разходите за заваряване с 60% при производство на ракети "Delta II" и "Delta IV", а времето на производствения цикъл от 23 на 6 дни.

Според ръководството на Airbus използването на ЗТР позволява да се намали теглото на заварените елементи на самолета с 40% и времето на производствения цикъл с 20%. Eclipse 500 докладват, че ЗТР съкращава времето на производствения цикъл с 40% спрямо времето производствен цикъл с нитови връзки. Автоматизираното ЗТР позволява да се спести от 50 до 100 хиляди долара на всеки самолет.

Този метод позволява заваряване на всички съществуващи видове алуминиеви сплави, включително и различни комбинации между тях. Такъв пример е свързване на алуминиеви сплави от сериите 2XXX и 7XXX, които обикновено се класифицират като незаваряеми. Тук влиянието на човешкия фактор е отстранено поради пълната автоматизация на процеса и контрол на параметрите по време на работа. Учените са изчислили, че ако 10% от заварените конструкции в САЩ бъдат изпълнени чрез ЗТР ще намалят емисиите на парникови газове с 200 милиона килограма годишно. Очакваната икономическа полза за индустрията на САЩ от въвеждането на ЗТР ще бъде 4,9 милиарда щатски долара годишно.

Освен множеството си предимства, този метод притежава и някои недостатъци свързани на първо място с цената на специализираното заваръчно оборудване, чиято стойност започва от 400000€. Производители са: ESAB, IBAG, HAGE Soudermaschinebau GmbH, Crawford Swift и др [28]. Други проблеми са свързани с необходимостта от входни и изходни планки, поради образуването на отвор в края на шева. Чрез ЗТР не могат да се изпълняват заварени съединения, когато за получаването им се изисква добавъчен материал например при ъглово съединение. Трудно, дори невъзможно е заваряването на метали с ниска пластичност, даже и при високи температури, поради загубата на необходимите механични свойства и евентуално деформиране на върха на инструмента. Недостатък е и макар и незначително намаляване на дебелината на метала в областта на шева поради контакта на рамото на инструмента с повърхността на детайлите. Обикновено тази стойност е 0,1 – 0,2mm, но в някои случаи може да повлияе на якостта на съединението [1].

При осъществяването на ЗТР е възможно възникването на някои специфични за този метод дефекти. Отклонението на дължината на работната част на инструмента от номиналната води до разрушаването му, както и повреждане на подложката (при по-дълъг връх) или получаването на непровар (при по-къс връх). Изместването на инструмента встрани от заваръчната междина води до недостатъчно размесване на материала в корена на шева и съответно образуване на непровар в корена. Наличието на разстояние между частите (заваръчна междина) води до недостиг на материал в зоната на заваряване и получаването на канален дефект или изтъняване на шева. При недостатъчно количество топлина въведена в мястото на заваряване (по-малко триене) в шева възникват неплътности (особено при свързване на разнородни материали), които могат да се избегнат с увеличаване на скоростта на въртене на инструмента. При

нарастване или спадане на налягането, което инструмента оказва върху шева се получава непълно запълване. Обикновено този дефект възниква в края при излизане на инструмента от шева. Формата и размерите на инструмента са пряко свързани с качеството на получените съединения. Използването на гладък връх (без резба) води до нарушаване/прекъсване на потока материал и получаване на тунелни дефекти. Неподходящите параметри на режима - скорост на заваряване, честота на въртене, сила на притискане и ъгъл на наклон на инструмента са свързани с възникването на типичните за този метод дефекти – непълности, тунелни дефекти, несплавявания, разтопяване и други [3, 7, 20, 24, 25, 27, 31].

Методът се използва основно за заваряване на алуминий и алуминиеви сплави от типа 6082 (Al-Mg-Si), АМг6 (Al-Mg), 1570С (Al-Mg-Sc), В-1461, В-1469 (Al-Cu-Li), ВМД16 (Mg-Zn-Zr), високояка алуминиева сплав 7075 (Al-Zn-Mg-Cu), композиционни материали на основата на алуминия. Има информация за заваряване на медна сплав (М1, М3) към алуминиева сплав (АД1 и АД32), заваряване на деформируеми магнезиеви сплави ВМД16 (Mg-Zn-Zr) и други. Дебелините на заваряваните части варират от 0,5 до над 100mm, като най-често се прилага за дебелини от 3 до 40mm [11, 19, 21, 26].

Предимствата на метода позволяват той да намери приложение в различни индустрии, като корабно-, вагони-, автомобилно-, самолето- и ракетостроенето и др.

Космическите агенции на практически всички страни по света в една или друга степен са въвели този процес в производството на различни свои продукти. Лидерите в тази област са САЩ, Европейският съюз и Китай. Методът се използва за производството на резервоари за гориво за ракети-носители "Space Shuttle", при производство на ракети "Delta II" и "Delta IV", за заваряване на соваката за Ares I и на ракети от "Falcon 1" до "Falcon 9", за "Boeing C-17 Globemaster III" и „Boeing 747 Large Cargo Freighter“. Покривните панели на самолета "Airbus A400M" също са заварени с помощта на този метод. ЗТР се използва и при самолетите Airbus A350 и Eclipse 500. Така се произвеждат и резервоари за гориво за ракети-носители "Ангара" и при производството на външните панели на крила на самолет Ту-204СМ [11, 22, 30].

Точковото ЗТР е патентовано от Mazda през 2003 г. Процесът се използва за производство на каросерията на автомобила Mazda RX - 8. От 2003 г. са произведени над 100 хиляди автомобила, вратите на които са направени чрез точково ЗТР. В продължение на три години от 2003 година Ford Motor Co (САЩ) произвежда няколко хиляди автомобила Ford GT, използвайки ЗТР за заваряване на централното отделение на автомобила. В Швеция по този начин се заваряват контейнери от мед с дебелина 50 mm за изхвърляне на ядрени отпадъци. В корабостроенето методът се използва за заваряване на палубни надстройки и прегради, в железопътния и метро транспорта за каросерии, рамки и талиги на влакове, в електрическата промишленост за корпуси на електродвигатели, токови проводници, параболични антени, силови шини, в строителната индустрия за алуминиеви мостове, алуминиеви тръбопроводи, топлообменници и климатици, в хранително-вкусовата промишленост за контейнери за бира, вино, мляко и др. [13, 14].

Изводи

1. Методът на заваряване чрез триене с разбъркване се осъществява в твърдо състояние при сравнително ниски температури и позволява да се решат редица проблеми свързани с методите на заваряване чрез разтопяване.
2. Основните параметри на режима на работа са скорост на заваряване, честота на въртене на инструмента, сила на притискане на инструмента към заваряваните части, ъгъл на наклон на инструмента, формата и размерите му както и материала,

- от който е направен той. Тези параметри се определят основно от вида и дебелината на заваряваните части.
3. За метода са характерни редица предимства: високата якост и качество на завареното съединение, малко топлоулагане, малки деформации и отсъствието на дефекти, по-ниски оперативни разходи и време за производство, липса на вредни за околната среда странични продукти.
 4. Използването на метода е свързано и с някои ограничения: висока цена на оборудването, необходимост от използване на входни и изходни планки, невъзможност за заваряване на метали с ниска пластичност, намаляване на дебелината на метала в областта на шева, възникване на канални дефекти, непровари в корена, несплавявания, отвори в края на шева и други.
 5. Заваряването чрез триене с разбъркване се използва основно за съединяване на материали със сравнително ниски температури на топене, като по този начин могат да се заваряват всички съществуващи видове алуминиеви сплави, включително и различни комбинации между тях.
 6. Поради редицата си предимства методът намира все по-широко приложение при производството на кораби, вагони, автомобили, самолети, ракети много други.

Благодарности

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

Литература

1. Mishra R.S., Z.Y. Ma. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*, R 50, 2005, pp 1–78.
2. Cavaliere P. Friction stir welding of Al alloys: analysis of processing parameters affecting mechanical behavior. 2nd International Through-life Engineering Services Conference, *Procedia CIRP* 11, 2013, pp 139 – 144.
3. Sadeesh P., M. K. Venkatesh, V. Rajkumar, P. Avinash, N. Arivazhagan, K. R. Devendranath, S. Narayanan. Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals. 7th International conference on materials for advanced technology. *Procedia Engineering* 75, 2014, pp 145 – 149.
4. Sidhu M. S., C. S. Sukhpal. Friction Stir Welding – Process and its Variables: A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. Vol. 2, Issue 12, December 2012, pp 275-279.
5. Kumbhar N.T., G. K. Dey, K. Bhanumurthy. Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. *Barc Newsletter*. Issue 321. July - Aug. 2011, pp 11-17.
6. Prakash P., S. K. Jha, S. P. La. 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, pp 2304-2309.
7. Lambiase F., H. A. Derazkola, A. Simchi. Friction StirWelding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers - State of the Art. *Materials* 2020, 13, 2291, pp 44.
8. Kumar H.M., V. V. Ramana. An Overview of Friction Stir Welding (FSW): A New Perspective. *International Journal of Engineering And Science*. Vol. 4, Issue 6, June 2014, pp 01-04.
9. Verbitchi V., R. Cojocar, B. Lia-Nicoleta. Technical Characteristics of the Equipment for Friction Stir Welding (FSW), Depending on the Base Metals. *Advanced Materials Research*. Vol. 1153, 2018, pp 7-15.

10. Rai R., A. De, H. K. D. H. Bhadeshia, T. DebRoy. Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining*. Vol 16, 2011, pp 325-342.
11. FSW Handbook for Specialists & Engineers. Project E+ 2017-1-SK01-KA202-035415. pp 162
12. Shinde G., S. Gajghate, P.S. Dabeer, C.Y. Seemikeri. Low Cost Friction Stir Welding: A Review. *Materials Today: Proceedings* 4, 2017, pp 8901–8910.
13. www.esab.com
14. *Technical Handbook, Friction Stir Welding, ESAB*
15. 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.
16. 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.
17. Gojocar R., Botila N. Botila N., R. Gojocar. Possibilities to apply friction stir lap welding to some couples of aluminium – copper dissimilar materials. *Welding & Material Testing*. №3, 2020, pp 3-8.
18. Muravyev V.I., P.V. Bakhmatov, K.A. Melkostupov. On the issue of using friction stir welding (FSW) technology for welding of high duty aluminum alloys. *Science notes* №2, 2010, pp 110-125.
19. СИЗОВА О.В., А.В. Колубаев, Е.А. Колубаев, А.А. Заикина, В.Е. Рубцов. Разрушение стыковых соединений алюминиево-магниевого сплава, выполненных способом сварки трением с перемешиванием. *Обработка металлов. Материаловедение*. № 3 (64), 2014, с. 14-20.
20. Ovchinnikov V.V., A.M. Drits. Technological peculiarities of friction welding with Al-Mg aluminum alloys stir. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, № 3, 2019, pp 7-20.
21. Шачнев С. Ю., В.А. Пашенко, И.Д. Махин, А.В. Базескин, А.Д. Дубовицкий. Отработка технологии сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов 1570С, АМг6 большой толщины для использования в перспективных разработках РКК «Энергия». *Космическая техника и технологии*, № 4(15), 2016, с. 24-30.
22. Сергеева Е. В. Сварка трением с перемешиванием в авиакосмической промышленности (Обзор). *Автоматическая сварка*, №5, 2013, с. 58-62.
23. Mandeep S. S., Chatha S. S., Friction Stir Welding – Process and its Variables: A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. Vol. 2, Issue 12, December 2012, pp 275-279.
24. Ашихин Д. С., И. В. Беркутов, К. А. Степанова, А. В. Федоров, Е. А. Алифиренко, А. Б. Спирков, Ю. О. Яковлев. Анализ Факторов, определяющих качество сварных стыковых алюминиевых соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием. *Сварочное производство*, № 5, 2019, с. 37-42.
25. Чуларис А. А., Р. А. Рзаев, М. Х. Сундетов. Сварка трением с перемешиванием алюминиевого и медного сплавов. *Сварочное производство*, № 1, 2019, с. 10-23.
26. Величко О. В., С. Ю. Иванов, В. А. Кархин, В. А. Лопота, И. Д. Махин. Сварка трением с перемешиванием Al-Mg-Sc сплава с большой толщины. *Сварочное производство*, № 8, 2015, с. 19-23.
27. Лукин В. И., Е. Н. Иода, М. Д. Пантелеев, А. А. Скупов, В. В. Овчинников. Сварка трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469. *Сварочное производство*, № 7, 2015, с. 21-25.

28. Люшинский А. В., А. А. Баранов. Некоторые особенности оборудования и технологии сварки трением с перемешиванием. Сварочное производство, № 10, 2016, с. 51-54.
29. Хохлатова Л. Б., Н. И. Колобнев, В. В. Овчинников. Свойства и структура соединений листов сплавов 1424 и В-1461, выполненных сваркой трением с перемешиванием. Сварочное производство, № 4, 2017, с. 22-26.
30. Штрикман М. М., А. П. Корневич, А. В. Пинский, Ю. Н. Тодин, П. А. Васильев. Сварка трением с перемешиванием при изготовлении оробранных панелей планера самолета. Сварочное производство, № 5, 2017, с. 24-29.
31. Волкова Е. Ф., В. А. Дуюнова, Е. Н. Иода, М. Д. Пантелеев. Особенности свариваемости нового деформируемого магниевго сплава ВМД16. Сварочное производство, № 6, 2017, с. 3-11.
32. Лукин В. И., С. Я. Бецофен, М. Д. Пантелеев, М. И. Долгова. Влияние термомодеформационного цикла сварки трением с перемешиванием на формирование структуры сварного соединения сплава В-1469. Сварочное производство, № 7, 2017, с. 17-22.
33. Лукин В. И., Е. А. Лукина, Е. Н. Иода, А. В. Шаров, В. И. Кулик. Сварка трением с перемешиванием пресованной панели высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469. Сварочное производство, № 11, 2017, с. 31-36.
34. Феофанов А. Н., В. В. Овчинников, А. М. Губин. Сварка трением с перемешиванием стыковых соединений упрочненных оксидными частицами композиционных материалов на алюминиевой основе. Сварочное производство, № 12, 2019, с. 23-30.
35. <https://www.techbriefs.com/>