



Friction Stir Welding of Polymers: Features and Application

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 (FSW) is a solid-state joining method. It is used mainly for metallic materials, particularly for aluminium alloys, which are difficult to joint by conventional welding methods. Recent studies show that this method can also be used to weld thermoplastic polymers. However, the available information on the subject is quite scarce. The present paper is an overview of the possibilities of FSW, related to welding of polymeric materials, as well as some features of the tools used.

Keywords: Friction stir welding, polymeric materials, tools, application

Заваряване чрез триене с разбъркване на полимери: особености и приложение

Николай ФЕРДИНАНДОВ, Данаил ГОСПОДИНОВ

1. Увод

Поради нуждата от използване на материали с малко тегло и относително ниска цена полимерите намират все по-широко приложение в редица области [4]. Те не корозират и не изгиват, водонепропускливи са, устойчиви са на химически агенти, произвеждат се във всякакви цветове и форми и могат да се армират със стъкло и други вещества, като по този начин се получават много здрави композитни материали.

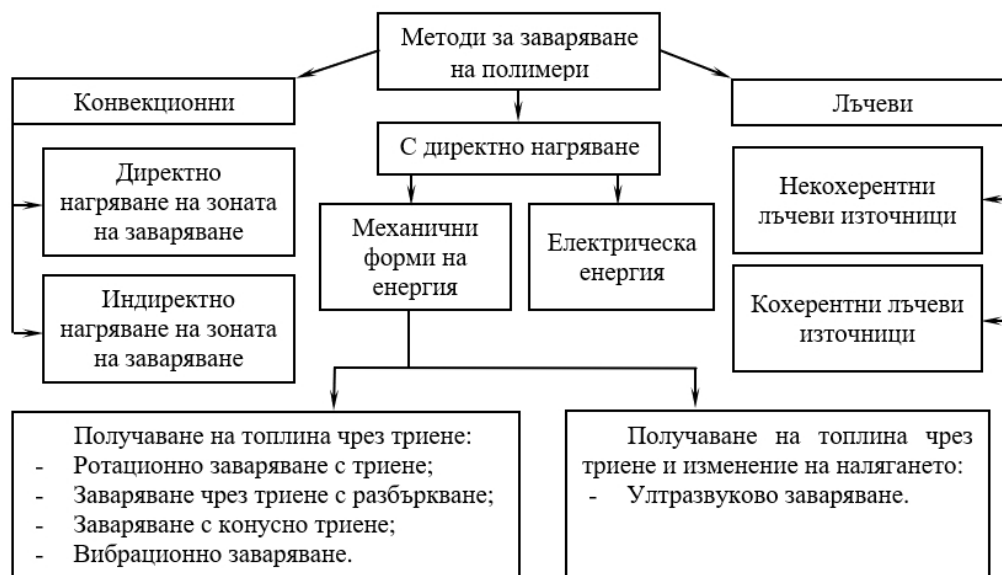
Понастоящем са известни повече от 50 вида полимери, като същевременно се разработват и нови такива. Това налага и нуждата от развитие на методите за обработването им, един от които е заваряването.

От трите основни групи полимери – термопластични, термореактивни и еластомери основно първите са тези, които подлежат на заваряване и от които се изработват заварени конструкции. Причината е в термомеханичното им поведение при загряване – преминават от твърдо в течно състояние и обратно и от еластично в пластично състояние и обратно (промяната може да се извършва многократно). Това прави възможно безпроблемното прилагане на формообразуващите операции под температурата им на термична деструкция, т.е. те могат да се заваряват.

Известни са десетки методи за заваряване на термопластични полимери, като един от бурно развиващите се и с голям потенциал е заваряването чрез триене с разбъркване (ЗТР) (eng. Friction Stir Welding). Въпреки, че първоначално методът е разработен за заваряване на алуминиеви сплави в момента активно се проучва и възможността за използването му, както за други материали като полимери, мед, стомани, титанови сплави и дори за разнородни материали [1, 3, 5, 13, 14], така и за други процеси (Friction Stir Process) [15].

2. Изложение

Характерно за всички методи за заваряване на полимери е, че се реализират чрез прилагане на топлина и натиск в зоната на контакта. На фигура 1,а е представена обща класификация, а на фигура 1,б класификация на методите за заваряване на пластмаси с директно нагряване, към които спада и заваряването чрез триене с разбъркване.



Фигура 1. Обща класификация (а) и класификация на методите за заваряване на полимери с директно нагряване (б).

По-сериозните изследвания за приложението на ЗТР за заваряване на термопластични полимери започва през 2005 г. и особено след 2009 г [1]. Сега методът успешно се прилага за свързване на различни марки полиетилен (PE), полипропилен (PP), поликарбонат (PC), полиамид (РА6), поливинилхлорид (PVC), акрилонитрил-бутадиен-стирол (ABS), полиметилметакрилат (PMMA), поликапролактан (Nylon 6), полиетилентерефталат (PET), полиетилентерефталат-гликол (PETG), композити с полимерна матрица от вида – 30% PP армиран със стъклени влакна и 20% PP армиран с въглеродни влакна [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11].

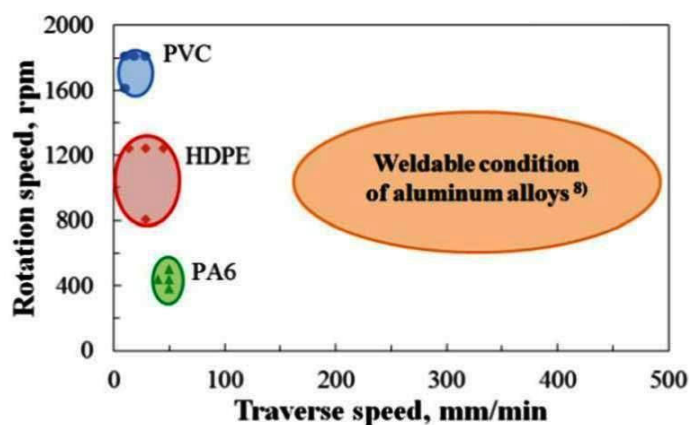
Заваряването на термопластични полимери чрез ЗТР се различава от заваряването на метални материали по това, че процесът не се осъществява изцяло в твърдо състояние. Причината е, че полимерите се състоят от молекули с различни дължини на веригата и някои от по-късите могат да достигнат точката си на втечняване, докато по-дългите вериги може да са все още в твърдо състояние [1, 3, 5]. Освен това за полимерите са характерни ниска топлопроводност и малък коефициент на триене, което изисква използването на режими различни от тези при заваряване на метални материали.

При заваряването на полимери чрез ЗТР основните групи фактори влияещи върху качеството на заварените съединения са характеристиките на заваръчното оборудване, особеностите на използвания инструмент и свойства на заваряваните материали [1].

Характеристиките на заваръчното оборудване определят честотата на въртене на инструмента и скоростта на заваряване, които основно определят количеството генерирана топлина. Това от своя страна влияе върху структурата и свойствата на

получените съединения. Дълбочината на проникване на щифта и ъгълът на наклон определят контактната площ на триене и посоката на движение на пластифицирания материал. Според [1, 7] честотата на въртене на инструмента оказва най-съществено влияние върху качеството и якостта, а ъгъла на наклона на инструмента – най-малко. Използването на висока скорост на въртене повишава работната температура, което води до появата на мехурчета, изплискване на разтопения или пластифициран материал и поява на тунелни дефекти.

Според различни автори при ЗТР на полимери основните параметри на режима варират в границите: скорост на въртене на инструмента – 440...3000 rpm; скорост на заваряване – 8...200 mm/min; ъгъл на наклон на щифта – 0...2°; сила на притискане на инструмента към частите – 700...4000 N [1-11]. На фигурата по-долу са показани подходящи според [7] режими за заваряване на полимерни материали и алуминиеви сплави.

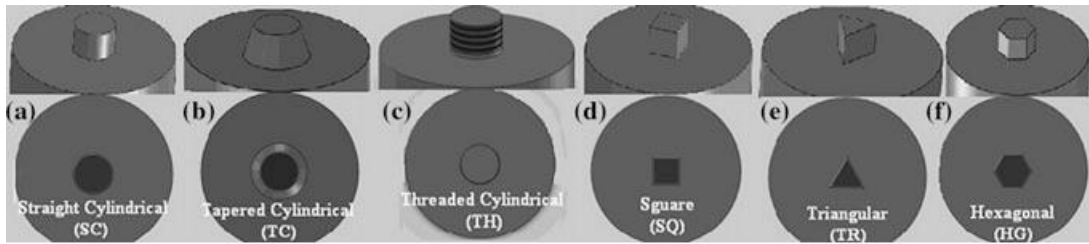


Фигура 2. Подходящи режими на работа при заваряване на полимерни материали и алуминиеви сплави чрез FSW

Използвания при ЗТР инструмент и по-конкретно неговите геометрични размери и форма влияят съществено върху количеството генерирана топлина. За разлика обаче от конвенционалните инструменти за заваряване на алуминиеви сплави, където около 75% от топлината се генерира от рамото и само 25% от щифта, при полимерите поради ниската им топлопроводност, топлината генерирана от рамото се отдава главно върху повърхността на заваряваните части и затруднено по дебелина. Поради това щифтът е основно отговорен както за количеството генерирана топлина така и за материалния поток (движението на пластифицирания материал) по време на ЗТР [10].

Често използвани форми на щифта са показани на фигура 2, като според [1, 2] най-добри резултати се получават при тези с триъгълна и квадратна форма с резба.

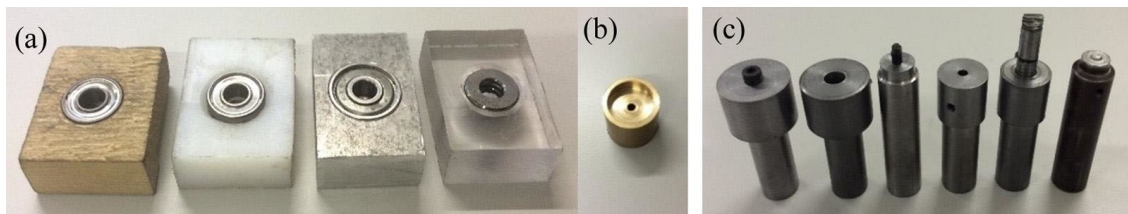
Тук могат да бъдат използвани както конвенционални инструменти за заваряване на метални материали (не са за предпочитане), така и специализирани за полимерни материали с неподвижно рамо, което се нагрява предварително до температури от порядъка на 50...140°C [2, 4, 10, 17]. Някои автори смятат, че по-добри резултати се получават при подгряване на плочата, върху която се поставят частите, а не на самия инструмент [7]. Поради ниската топлопроводност на полимерите, генерираната топлина по време на заваряване се концентрира в шева, което води до образуването на зона от полуразтопен материал около щифта. Размерът на разтопената зона се увеличава при нарастване на скоростта на въртене, което води до по-добро разбъркване и подобряване на качеството.



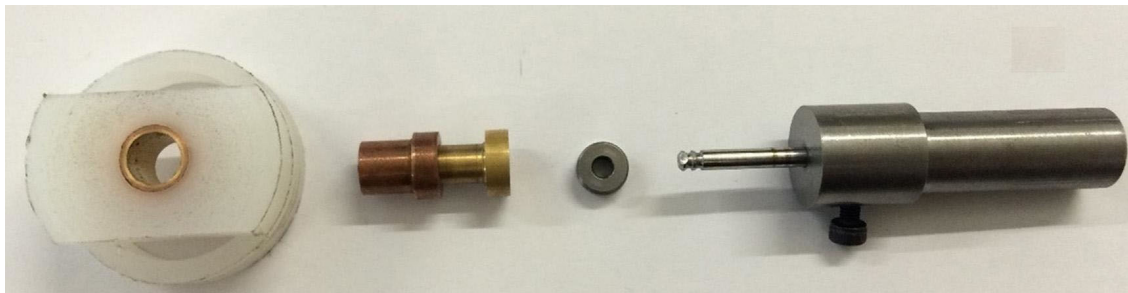
Фигура 3. Форма на щифтовете използвани при инструментите за заваряване на полимери

Използването на инструменти с неподвижно рамо в сравнение с въртящото се (конвенционален инструмент) позволява да се получат заварени съединения с по-добри механични свойства и по-добър външен вид [2, 4]. Неподвижното рамо ограничава изплискването на материала. Високата температура на рамото и голямата честота на въртене на инструмента водят до разтопяване на заваряваните материали и по-бавното им охлаждане, което се явява важен фактор за получаване на качествено съединение. За да се компенсира по-малкото количество генерирана топлина при използване на неподвижно рамо, честотата на въртене на инструмента трябва да се увеличи.

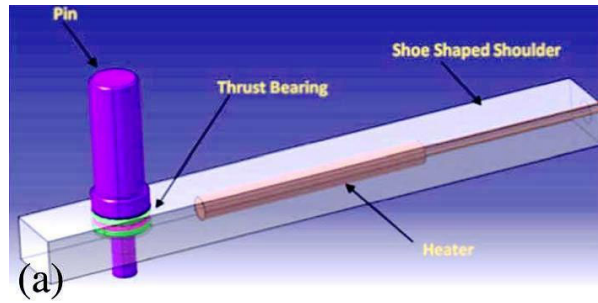
На фигурите по-долу са представени различни инструменти за заваряване на полимерни материали според [2, 3, 7].



Фигура 4. Инструменти за заваряване на полимерни материали с неподвижно рамо от дърво, тефлон, алуминий и поликарбонат (а), с неподвижно рамо от месинг (б) и с въртящо се рамо (с)



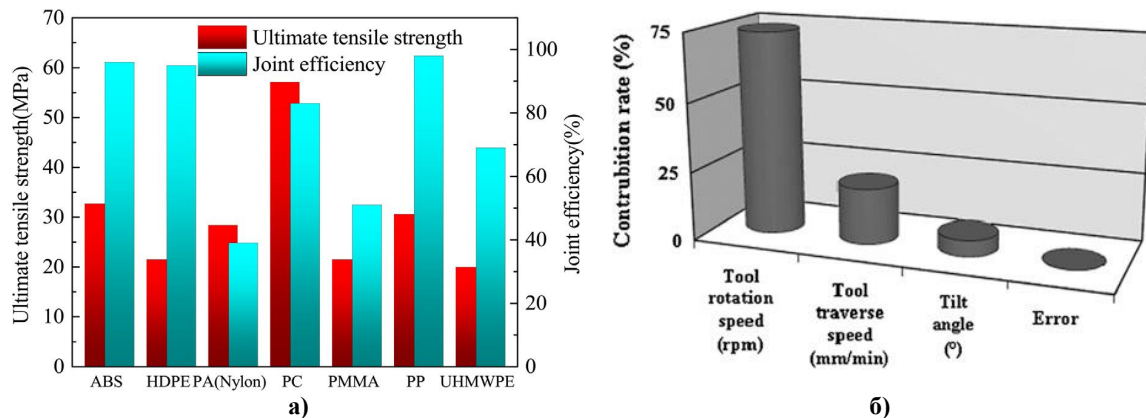
Фигура 5. Инструмент за заваряване на полимерни материали с неподвижно рамо от тефлон



Фигура 6. Инструмент за заваряване на полимерни материали с „горещо“ неподвижно рамо

Поради нееднакия си строеж полимерите имат различно механично поведение при изменение на температурата. То варира между поведение на крехко твърдо тяло и на стопилка. Деформационната им способност силно зависи от температурата (много повече отколкото при металите) и от времето. Като критерии за механичното им поведение се използва основно якостта на опън [1, 3, 8].

Якостта на опън на заварени съединения от полимерни материали и същата сравнена с якостта на опън на основния материал според [1] са дадени на фигура 7а, а на фигура 7б е показано процентното влияние на параметрите на режима върху якостта им [11]. Вижда се, че заварените съединения са с по-ниски механични характеристики от тези на основния материал и достигат стойности от порядъка на 72...97% от тях [2, 5, 6, 7, 16]. Основната причина е неподходящата температура на процеса (ниска или висока), а оттам и неподходящата скорост на охлаждане. Въпреки това в [3] е представено сравнение между якостта на опън на заварени съединения от полипропилен (PP) изпълнени чрез конвенционални методи и чрез FSW. Резултатите ясно показват, че механичните свойства, постигнати след FSW са по-високи от тези получени с други методи.

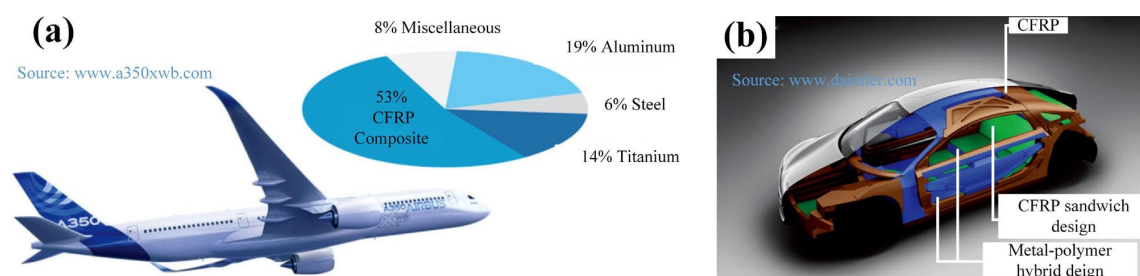


Фигура 7. Якост на опън на заварени чрез ЗТР съединения (червен цвят) сравнена с якостта на основния материал (син цвят) от различни полимерни материали (а) и процентно влияние на параметрите на режима върху якостта на опън

При заваряването на полимерни материали чрез ЗТР се срещат някои дефекти като изплискване, тунелни дефекти, непровари, липса на запълване (дефицит на материал), липса на свързване между шева и основния материал, пори, неплътности и други. Възможните причини за това могат да бъдат: неподходяща сила на притискане; неподходяща дълбочина на проникване на щифта; неподходяща температура на нагряване на частите; по-малък диаметър на рамото; недостатъчен материален поток;

неподходящ инструмент; неподходяща скорост на заваряване; по-голяма заваръчна междина или производствени грешки [1, 2].

Глобалните тенденции по отношение на изискванията за емисиите на CO₂ и цената на газа принуждават производителите в областите на автомобилостроенето, самолетостроенето и други да произвеждат по-леки, по-безопасни и екологично чисти превозни средства. Използването на леки материали (алуминий, магнезий и полимери) може значително да намали емисиите на парникови газове. Например в Boeing 787 Dream и Airbus A350 XWB са вложени повече от 50 процента композити, като останалата част са леки метали. Делът на материалите в Airbus A350XWB е показан на фигура 8. Освен това Mercedes-Benz F125 предлага нова концепция за разработка през 2025 г., за която ще се използват хибридни материали на базата полимер-метал [1].



Фигура 8. Потенциално приложение на FSW за полимери, композити и метални материали при Airbus A350XWB (a) и mercedes-Benz F125 (б)

Изводи

- Въпреки че заваряването чрез триене с разбъркване на полимерни материали е една изключително предизвикателна инженерна област, понастоящем само ограничен брой изследователи работят в нея.
- Методът ЗТР търпи значителен растеж през последното десетилетие като дава възможност за заваряване различни съвременни материали като полимери, полимер-метали и композити.
- Основните проблеми при заваряването на полимерни материали чрез ЗТР са свързани с ниската им топлопроводност и малък коефициент на триене, което изисква използването на режими силно различаващи се от тези при металните материали.
- При ЗТР на полимерни материали се използват основно инструменти със стационарно горещо рамо, като в сравнение с конвенционалните осигуряват по-високо качество и механични характеристики на заварените съединения.
- Якостта на опън на получените съединения във всички случаи е по-ниска от тази на заваряваните части, като основно влияние върху нея оказват формата и геометричните размери на инструмента, както и скоростта му на въртене.
- Като цяло използването на ЗТР за свързване на полимерни материали е надежден и ефективен метод, макар че е необходимо да бъдат решени и немалко проблеми.

Благодарности

Изследването е реализирано с финансова подкрепа по проект 2022-МТФ-01, към фонд „Научни изследвания“ на РУ „Ангел Кънчев“.

Литература

1. Huang Y., X. Meng, Y. Xie, L. Wan, Z. Lv, J. Cao, J. Feng. Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites. *Composites: Part A* 105, 2018, pp 235–257.
2. Simoes F., D.M. Rodrigues. Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers: Literature review, experimental results and empirical analysis. *Materials and Design* 59, 2014, pp 344–351.
3. Eslami S., T. Ramos, P. J. Tavares, P.M.G.P. Moreira. Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers. *Journal of Manufacturing Processes* 20, 2015, pp 15–23.
4. Eslamia S., T. Ramosa, P. J. Tavares, P. M. G. P. Moreiraa. Effect of friction stir welding parameters with newly developed tool for lap joint of dissimilar polymers. *Procedia Engineering* 114, 2015, pp 199 – 207.
5. Eslami S. Friction Stir Welding of Polymers: an innovative technological approach. Submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Engineering Faculty of the University of Porto, 2019, pp 87.
6. Kiss Z., T. Czigány. Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene. *eXPRESS Polymer Letters*, Vol.6, No.1, 2012, 54–62.
7. Eslami S., P. J. Tavares, P. M. G. P. Moreira. Friction stir welding tooling for polymers: review and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, pp13.
8. Mendes N., A. Loureiro, C. Martins, P. Neto, J.N. Pires. Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds. *Materials and Design* 58, 2014, pp 457–464.
9. Patel A. R., C. G. Dalwadi, H. G. Rana. A Review: Dissimilar Material Joining of Metal to Polymer using Friction Stir Welding (FSW). *International Journal of Science Technology & Engineering*, Volume 2, Issue 10, 2016, pp 702-706.
10. Lambiasi F., H. A. Derazkola, A. Simchi. Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding. *Processes of Polymers—State of the Art. Materials* 13, 2020, pp 44.
11. Zafar A., M. Awang, S. R. Khan. Friction Stir Welding of Polymers: An Overview. *2nd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering*, 207, pp 19-36.
12. Czigány T., Z. Kiss. Friction Stir Welding of Fiber Reinforced Polymer Composites. *18TH International Conference on Composite Materials*, 2011.
13. Zaekova R. Methods for Friction Stir Welding. Imperfections in Friction Stir Welding (Review. Part 2). *International Journal “NDT Days”*, Volume IV, Issue 3, 2021, pp 163-169.
14. Dimitrova L. Standardization of the Friction Stir Welding (FSW) Process. *International Journal “NDT Days”*, Volume IV, Issue 3, 2021, pp 155-162.
15. Kondoff Ch., V. Dykova, R. Dimitrova, Y. Hadjitodorov, R. Zaekova. A Layer Formation on 6061 Aluminum Alloy after FSP. *International Journal “NDT Days”*, Volume IV, Issue 3, 2021, pp 178-186.
16. Ahmadi H., M. Arab, A. Ghasemi. Optimization of process parameters for friction stir lap welding of carbon fibre reinforced thermo-plastic composites by Taguchi method. *J Mech Sci Technol*, 2014, 28:279–284.
17. Nelson T., C.D. Sorenson, C.J. Johns. Friction stir welding of polymeric materials. *US Patent* 6,811,632, 2004.