



Influence of Friction Stir Welding Modes on the Mechanical Properties of Polyethylene Joints

Danail GOSPODINOV, Nikolay FERDINANDOV

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

Abstract

Friction stir welding (FSW) is a relatively new method where heat is generated by the friction between the welded parts and a special tool, and the heat generated does not exceed the melting temperature of the welded parts. Although the method is mainly used for welding metals, it has recently been applied to polymers as well. The aim of the study is to investigate the influence of the parameters of the welding mode and the shape of the tool on the mechanical properties of welded polyethylene (PE) joints. Tool with a stationary shoulder and a triangular pin shape was used.

Keywords: Friction stir welding, polymeric materials, mechanical properties, polyethylene

Влияние на режимите на заваряване чрез триене с разбъркване върху механичните свойства на съединения от полиетилен

Данаил ГОСПОДИНОВ, Николай ФЕРДИНАНДОВ

1. Увод

Използването на полимерни материали в космическата, автомобилната и електронната промишленост през последните години е все по осезаемо най-вече поради високата им специфична якост (съотношение на якост към тегло), корозионна устойчивост и възможност за получаване на детайли с различна форма. [1,2,3,4,5,6]. Производството на по-големи и сложни конструкции обаче от такива материали изисква и прилагането на различни начини за свързване като лепене, механично свързване и заваряване [7]. Развитието на тези технологии е едно от големите предизвикателства към инженерите работещи в тази област.

Заваряването чрез триене с разбъркване (ЗТР) (Friction Stir Welding) е един от най-иновативните методи създаден през последните години. Той се използва основно за заваряване на алуминиеви сплави, но поради своите предимства: осъществява се основно в твърдо състояние, прилага се за детайли с различни дебелини, характеризира се с малки напрежения и деформации, използва се за материали, които се заваряват много трудно или невъзможно чрез конвенционалните електродръгови методи [8,9] представлява сериозен интерес и по отношение на приложението му за заваряване на полимерни материали. Според [10] при заваряването на полипропилен например механичните характеристики на получените съединения са по-високи след използване на ЗТР отколкото след други методи.

При този метод получаването на заварени съединения с високи механични характеристики зависи от вида на използвания инструмент и режимите на работа. Според някои автори [11] традиционните инструменти (използвани за метални материали) не са подходящи за заваряване на полимери. Основни причини за това са лошата

топлопроводност и ниската температура на топене на тези материали. Поради това понастоящем много активно се работи по създаването на нови видове инструменти, като най-подходящи на този етап са тези с горещо неподвижно рамо, което се нагрява до температури 80...140°C [12]. От основните параметри на режима на работа най-съществено влияние оказват скоростта на въртене на инструмента и скоростта на заваряване, докато ъгъла на наклон на инструмента влияе значително по-малко [1]. Влиянието на режимите на работа върху якостта на опън на заварени съединения от полиетилен е представено в [13]. Според авторите оптимална стойност на механичните характеристики на заварените съединения (около 75% от тази на основния материал) е налице само при определено съчетание на тези параметри на режима.

По тази причина избора на подходящо съчетание между режими на работа и инструмент е определящо за качеството на получените заварени съединения от полимерни материали.

Цел на настоящата работа е да се определят параметрите на режима на работа за използвания инструмент, осигуряващи най-добри механични свойства на заварени чрез триене с разбъркване съединения от полиетилен.

2. Методика

За реализиране на целта на работата в изследването е използван полиетилен PE 1000 UHMWPE (ultra-high molecular weight polyethylene) с дебелина 10 mm. Причините за избор на този материал са свързани с широкото му използване (най-голям относителен дял от всички полимерни материали). Основните предимства на този материал, обуславящи широкото му приложение са свързани с: много голяма удароустойчивост; много висока устойчивост на износване и разрушаване; отлична химическа устойчивост; самосмазващ се материал с добри приплъзващи качества; отлични електроизолационни свойства; безшумно опериране и редуциране на вибрациите; лесен за обработване; с нисък коефициент на триене. Най-често използваните методи за получаване на неразглобяеми съединения от PE са заваряване посредством: горещ газ; инфрачервена светлина; ултразвук; лазер; горещ елемент и др.

Механичните свойства на материала в състояние на доставка, определени при изпитване на опън, са: $R_{p0.2} = 14$ МПа; $R_m = 27$ МПа; $A = 850$ %.

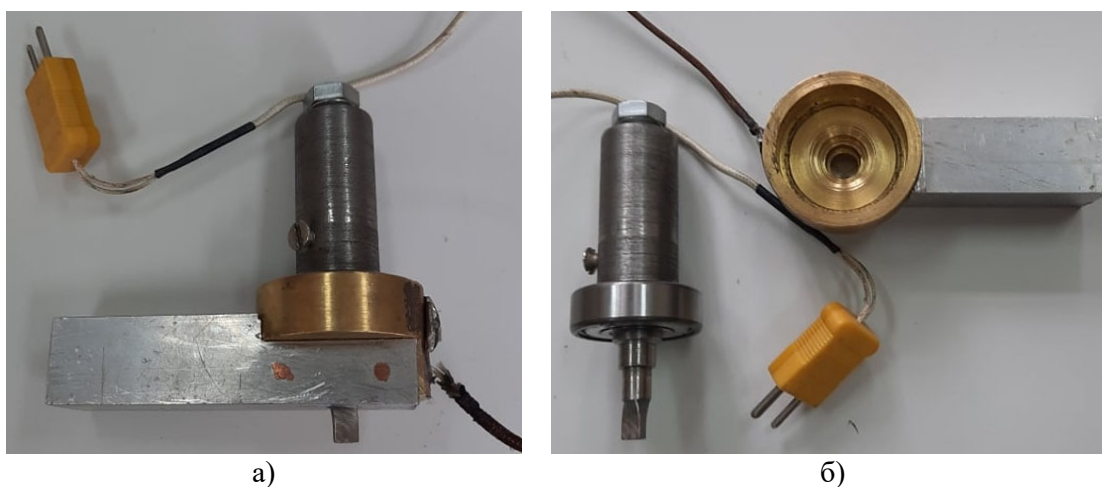
Заваряваните части са с размери 200x80x10mm. За тяхното неподвижно установяване е използвано приспособление, показано на фигура 1. То се състои от подложна плоча с дебелина 10 mm, върху която посредством фиксиращи устройства са закрепени частите за заваряване. Фиксаторите имат и предназначение да предотвратяват въртенето на неподвижното рамо. След заваряване от съединенията са изрязани механично пробни тела за изпитване на опън.

За разлика от заваряването чрез триене с разбъркване на метални материали, където основно се използват инструменти с въртящи се щифт и рамо, при заваряване на полимерни материали, по-добри резултати се получават при използване на инструменти с „горещо“ неподвижно рамо. Особеностите при използване на неподвижното рамо в сравнение с въртящото се (конвенционален инструмент) са свързани с необходимостта от предварителното му нагряване за получаване на заварени съединения с по-добри механични свойства и по-добър външен вид. Неподвижното рамо ограничава изплискването на материала. Високата му температура и специалната му форма водят до по-бавно охлаждане на разтопения материал, което се явява важна предпоставка за получаване на качествено съединение с високи механични свойства. За да се компенсира по-малкото количество генерирана топлина при използване на неподвижно рамо, честотата на въртене на щифта трябва да се увеличи.



Фигура 1. Приспособление за челно заваряване чрез триене с разбъркване на полиетилен с дебелина 10 mm

Заваряването в настоящото изследване е извършено посредством съставен инструмент с неподвижно рамо, показан на фигура 2. Инструментът се състои от подвижен щифт, който се върти с избраната за конкретния режим честота. В случая е използван щифт с триъгълна форма и дължина 9 mm. Той е поместен в държач, който служи за присъединяване към машината и регулиране на излаза му. Неподвижното рамо също се състои от две части, изработени от различни материали. Основната му част (изработена от бронз) служи за водене на щифта посредством радиално-аксиален лагер. Към тази част е монтиран термоелемент, служещ за непрекъснат контрол на температурата му. Към него неподвижно е прикрепена втора част, служеща за предотвратяване на излизането на разтопения полимер от заваръчната вана и за контролирано охлаждане на заваръчния шев. Тази част на инструмента е изработена от квадратна алуминиева тръба с размери 20x20 mm и дебелина 1.5 mm.



Фигура 2. Инструмент за заваряване на полимери с неподвижно рамо

В работата са изследвани осем режима, като при всички е използвана честота на въртене на инструмента 1000 rpm, а скоростта на заваряване се изменя в границите от 12.5 до 40 mm/min (таблица 1).

За всички режими (с изключение на режим 1) преди започване на заваряването рамото на инструмента е подгрявано до температури в диапазона 50...100°C. Нагряването е преустановено след влизане в контакт на инструмента със заварявания материал. Отчетената за всеки режим температура (табл.1) е следствие на генерираната от въртенето на щифта топлина.

Изпитването на опън е проведено съгласно общите изисквания на БДС EN ISO 527-1:2012 - Пластмаси. Определяне на свойствата при опън. Част 1: Общи принципи (ISO 527-1:2012) и специфичните изисквания на БДС EN 12814-2:2003 Изпитване на заварени съединения на термопластични полуготови продукти. Част 2: Изпитване на опън.

Показаните резултати са получени като осреднени стойности от изпитването на три броя образци от всеки режим. Те са с призматична форма, като широчината им е 20 mm, а началната изчислителна дължина $L_0 = 65$ mm.

3. Резултати

Резултатите по отношение на използваните режими на работа и температурата отчетена на инструмента са показани в таблица 1. От таблицата е видно, че температурата при различните режими се изменя в интервала от 50 до 135°C. Разликата в температурите при режим 1 и 2, въпреки еднаквите им параметри на работа, се дължи на предварителното подгряване на инструмента при режим 2 до температура 90 °C. Прави впечатление отчетената температура при режим 3 и режим 8, която показва близки стойности, въпреки двукратното нарастване на скоростта на заваряване. Това най-вероятно се дължи на ниската топлопроводност на заварявания материал. Поради това скоростта на заваряване има второстепенно значение, тъй като затрудненото топлопренасяне води до локализирането на температурното поле в сравнително малък обем. Поради факта, че инструмента е предварително подгрят и поради затрудненото топлопредаване се очаква разлика в температурата по дебелина на заварявания материал. Разликата ще бъде толкова по-голяма, колкото по-висока е температурата на предварително подгряване, по-голяма е скоростта на заваряване и дебелината на заваряваните части и по-ниска е честотата на въртене на щифта. Така създаденият температурен градиент ще доведе до протичане на процеса на свързване при различни температури, което от своя страна ще рефлектира върху свойствата на завареното съединение.

Таблица 1. Връзка между режимите на работа и температурата на инструмента

| Режим | Скорост на заваряване | Честота на въртене на инструмента | Температура |
|-------|-----------------------|-----------------------------------|-------------|
| | mm/min | | °C |
| 1 | 25 | 1000 | 50 |
| 2 | 25 | | 90 |
| 3 | 20 | | 100 |
| 4 | 12.5 | | 110 |
| 5 | 12.5 | | 125 |
| 6 | 12.5 | | 135 |
| 7 | 32 | | 105 |
| 8 | 40 | | 100 |

При еднакви други условия за режимите 3 и 8 и двукратно нарастване на скоростта на заваряване би следвало да се очаква по-голям температурен градиент т.е свързването на материала в зоните близки до подложната плоча да протича при по-ниски температури за режим 8. По тази причина някои автори препоръчват и подгряване на подложката.

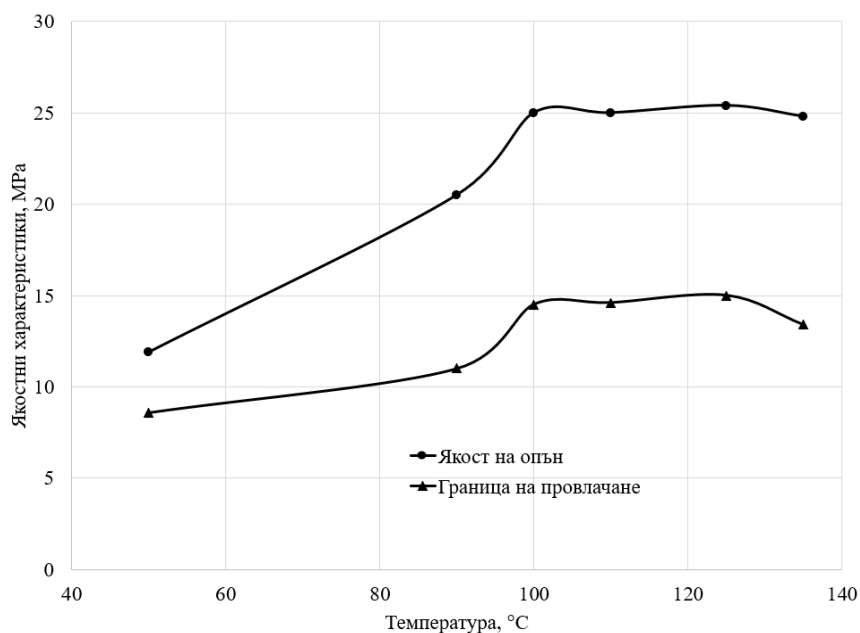
Предварителното проучване на литературните източници показва, че задоволителни механични свойства се наблюдават при температури на заваряване над 100 °С. Резултатите от таблица 1 показват, че задоволителни механични свойства би следвало да се очакват при режими от 3 до 8.

Таблица 2. Механични свойства на заварените съединения

| Режим | Граница на провлачане | Якост на опън | Вид на разрушаването | К RmW/RmBM* |
|-------|-----------------------|---------------|----------------------|----------------|
| | МПа | МПа | | |
| 1 | 8.6 | 11.9 | крехко | 0.44 |
| 2 | 11 | 20.5 | крехко | 0.76 |
| 3 | 14.5 | 25 | крехко | 0.93 |
| 4 | 14.6 | 25 | пластично | 0.93 |
| 5 | 15 | 25.4 | пластично | 0.94 |
| 6 | 13.4 | 24.8 | пластично | 0.92 |
| 7 | - | 22 | крехко | 0.81 |
| 8 | 12 | 17 | крехко | 0.63 |

*Rm_{BM} – якост на опън на основния материал;

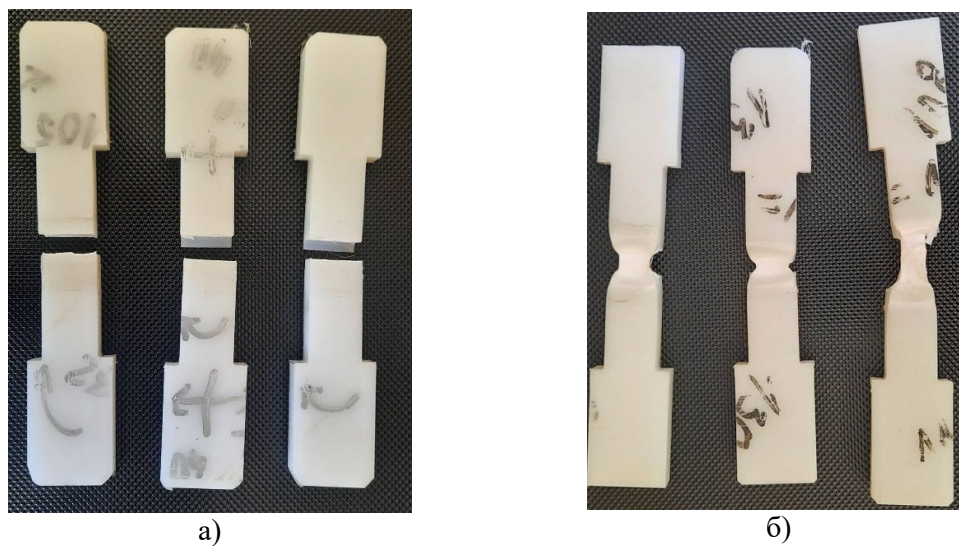
*Rm_W – якост на опън на завареното съединение.



Фигура 3. Механични свойства на получените съединения, в зависимост от температурата на заваряване

Резултатите от проведените механични изпитвания са дадени в таблица 2. На фигура 3 те са графично интерпретирани, като режими 7 и 8 не са включени. Оценката на механичните свойства на заварените съединения е направена на база якостта на опън, като за целта е въведен коефициент $K=Rm_{BM}/Rm_W$. Според БДС EN 12814-8:2003

„Изпитване на заварени съединения на термопластични полуготови продукти. Част 8: Изисквания“ стойностите на този коефициент се изменят в граници $0.7 \div 0.9$ за различните полимерни материали. За полиетилен тази стойност може да достигнат 1.0, което означава, че разрушаването би настъпило извън зоната на заваряване, тоест ще е налице равнояко заварено съединение. В случая стойностите на „K“ варират в границите $0.44 \div 0.94$ като само в два от случаите те са по-ниски от 0.7 (таблица 2). Това показва, че използваните режими съчетани с конкретния инструмент и температура на предварително подгриване на рамото са подходящо подбрани.



**Фигура 4. Пробни тела след изпитване на опън:
а – крехко разрушаване; б – пластично разрушаване.**

От таблица 2 и фигура 4а става ясно, че при пет от осемте режима разрушаването е крехко. Следва да се отбележи, че в тези случаи то винаги настъпва на границата на шева, от страната на излизане на инструмента. Подобни резултати за мястото на разрушаване се представят и от други автори. Причината за крехкото разрушаване е свързана най-вероятно от една страна с по-ниската температура на заваряване и от друга с повишената скорост на охлаждане, поради по-високата скорост на заваряване (режими 7 и 8). Механичните характеристики на пробните тела разрушени пластично (таблица 2 и фиг.4.б) също са по-ниски от тези на основния материал. В тези случаи разрушаването е в заваръчния шев, като започва от долната част на шева, където е регистрирано наличието на непровар (фигура 4б). Като причини за наличието му могат да бъдат посочени ниската температура в долния край на шева поради контакта със студената подложна плоча и неподходящата (по-малка) дължина на щифта.

4. Изводи

- Заваряването чрез триене с разбъркване е съвременен метод подходящ за заваряване, както на метални, така и на термопластични полимерни материали;
- Поради специфичните физико-термични свойства на полимерите инструментите и режимите за тяхното заваряване по използвания метод се различават съществено от тези за метални материали;

- Най-високи характеристики на механичните свойства на получените съединения са налице при режими осигуряващи заваряване в температурния интервал 110÷135°C;
- Използваната дължина на щифта води до получаване на непровар. Той се явява концентратор, водещ до понижаване на механичните свойства;
- Повишаването на температурата на заваряване над 110° е свързано с преход от крехко към пластично разрушаване.
- При скорости на заваряване над 20 mm/min, се наблюдава намаляване на механичните свойства. Това най-вероятно се дължи на неравномерното разпределение на температурата по дебелина и повишената скорост на охлаждане в зоната на заваряване.

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. Strand S. Effects of friction stir welding on polymer microstructure. Brigham Young University, 2004.
3. Barmouz M, P. Shahi, P. Asadi. Friction stir welding/processing of polymeric materials. *Adv Frict Stir Weld Process*, 2014:601–70.
4. Bilici M., A. Yüklер, M. Kurtulmus. The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. *Materials & Design*, 2011, 32:4074–9.
5. 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.
6. Eslamia S., T. Ramosa, P. J. Tavaresa, 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.
7. Pramanik A., A. Basak, Y. Dong, P. Sarker, M. Uddin, G. Littlefair. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys: a review. *Compos Part A-APPL S*, 2017, 101:1–29.
8. 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.
9. Hirasawa S., et al. Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *J Mater Process Technol.* 2010, 210:1455–63.
10. Kiss Z, T. Czigány. Applicability of friction stir welding in polymeric materials. *Period Polytech. Mech. Eng.* 2007;51:15.
11. Scialpi A., et al. Vibblade: friction stir welding for plastics. *Welding International*, 2009. 23, pp 846-855.
12. 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.
13. Saeedy S., M. Givi. Investigation of the effects of critical process parameters of friction stir welding of polyethylene. *Proc Inst Mech Eng, Part B: J Eng Manuf* 2011, 225(8):1305–10.