



S. Balos, L. Sidjanin, B. Sabo, V. Grabulov

TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA POLIMETILMETAKRILATA (PMMA)

POLYMETHYLMETHACRYLATE (PMMA) WELDING TECHNOLOGY

Stručni rad / Professional paper

UDK / UDC: 621.791.46/48

Rad primljen / Paper received:

03.12.2010.

Ključne reči: Polimetilmetakrilat, tačkasto zavarivanje trenjem, mikrotalasno zavarivanje, toplotno spajanje, ultrazvučno zavarivanje, smicajna čvrstoća.

Izvod

Polimetilmetakrilat (PMMA), zbog svojih karakteristika, pre svega transparentnosti i relativno male gustine, predstavlja danas vrlo atraktivan materijal u inženjerstvu. Zbog toga, istražuju se nove mogućnosti spajanja ovog materijala u cilju dobijanja kompleksnijih i većih radnih predmeta.

U ovom radu su prikazane tehnike zavarivanja i spajanja, koje imaju potencijal za primenu u proizvodnji: ultrazvučno zavarivanje, toplotno spajanje, mikrotalasno zavarivanje i tačkasto zavarivanje trenjem. Takođe, prikazani su i uporedne vrednosti smicajne čvrstoće, jednog od dominantnih pokazatelja kvaliteta zavarenog spoja.

Na osnovu prikazanih rezultata, najveću smicajnu čvrstoću ima tačkasto zavarivanje trenjem, sledi mikrotalasno zavarivanje, dok najmanju nosivost zavarenog spoja imaju toplotno spajanje i ultrazvučno zavarivanje. Pored toga, na osnovu specifičnosti pojedinih tehnika zavarivanja, može da se konstatuje da je tačkasto zavarivanje trenjem pogodnije za veće radne predmete, dok je veličina radnog predmeta kod mikrotalasnog zavarivanja ograničena veličinom mikrotalasne komore.

Adresa autora / Author's address:

Sebastian Balos, Leposava Šidjanin, Bela Sabo, Fakultet tehničkih nauka, 21000 Novi Sad, Trg D. Obradovića 6, Srbija.

Vencislav Grabulov, Institut IMS, 11000 Beograd, Bul. V. Mišića 43, Srbija.

Keywords: Polymethylmethacrylate, friction spot welding, microwave welding, thermal bonding, ultrasound welding, shear strength.

Abstract

Polymethylmethacrylate (PMMA) has attractive features, primarily its transparency and low density, which make it a very promising engineering material. Therefore, a novel bonding and welding techniques are being developed, to enable obtaining more complex and larger products.

In this paper, perspective bonding and welding processes are presented: ultrasound welding, thermal bonding, microwave welding and friction spot welding. Furthermore, shear strengths of joints obtained by different techniques are shown. Shear strength of joints is commonly used to evaluate the quality of joints.

The highest shear strength has friction spot welding, followed by microwave welding. The lowest shear strengths were obtained with thermal bonding and ultrasound welding. Specific characteristics of each joining technique determine their usefulness: friction spot welding is more suited to welding large pieces, while the work piece dimensions weldable by microwave welding is limited by microwave chamber size.

UVOD

Polimetilmetakrilat (PMMA) je termoplastični polimer koji se karakteriše pre svega visokom transparentnošću i estetskim izgledom, što mu je obezbedilo široku upotrebu. PMMA propušta čak 92 % vidljive svetlosti, što je više nego obično staklo, a uz to, ima specifičnu masu od svega 1,19 g/cm³, što je upola u odnosu na obično staklo (2,203 g/cm³). Druga velika prednost, u odnosu na obično staklo, je da pri lomu ne dolazi do stvaranja sitnih oštih komada koji mogu da izazovu posekotine - ne prska kao staklo. Takođe, lakše se oblikuje zagrevanjem na svega 100 oC. Osim toga, poseduje interesantne optičke karakteristike: propušta ultraviolettne zrake (za zaustavljanje UV svetlosti, koriste se posebni filteri u obliku prevlake), kao i infracrvene zrake, a postoje i posebne vrste polimera na bazi PMMA koje zaustavljaju vidljivu svetlost a propuštaju samo određene talasne dužine infra –

crvenih (IC) zraka. Zbog toga, predviđa se da će PMMA biti vrlo atraktivan materijal za masovnu upotrebu u okviru građevinske i naročito automobilske industrije, kao zamena za staklo ili polikarbonat (PC) koji se trenutno koristi, a čija je cena viša [1].

Sa širom upotrebom PMMA, dolazi i potreba za izradom većih i kompleksnijih proizvoda, što neminovno dovodi do otvaranja potrebe za primenom tehnologije spajanja, naročito zavarivanja. PMMA je vrlo pogodan tip polimera, jer se može zavarivati različitim tehnologijama, a uz to, visoka transparentnost omogućava proučavanje zavarenog spoja bez razaranja [2, 3]. Još jedna interesantna primena PMMA koja zahteva izradu kompleksnih uređaja mikroskopskih veličina su mikro – elektro – mehanički – sistemi (MEMS – Micro Electro Mechanical Systems), koji obezbeđuju povezivanje digitalne elektronike (mikročipova) sa mehaničkim sistemima u jednom



integriranom čipsetu [4, 5]. U poslednjoj deceniji, postoji težnja za unapredjenjem i prilagodjavanjem postojećih metoda zavarivanja s jedne strane, a s druge strane, za razbijanjem potpuno novih tehnika zavarivanja [2].

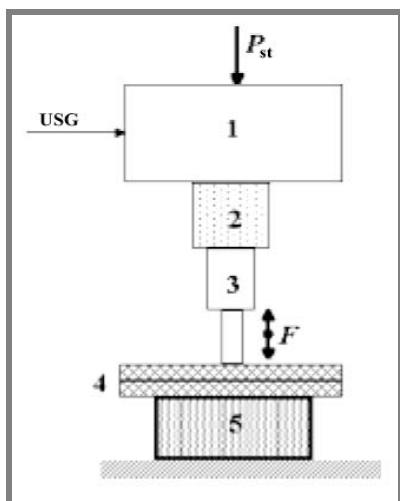
U ovom radu, prikazan je pregled različitih tehnologija zavarivanja PMMA, koje su uspešno primenjive i na polimere generalno. Takođe, dati su rezultati nosivosti zavarenog spoja PMMA različitim tehnikama zavarivanja.

TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA PMMA

Tehnologije zavarivanja koje se danas manje koriste, a imaju potencijal za primenu u proizvodnji: ultrazvučno zavarivanje, toplotno spajanje, mikrotalasno zavarivanje i tačkasto zavarivanje trenjem.

Ultrazvučno zavarivanje

Ultrazvučno zavarivanje je proces koji podrazumeva generisanje toplote uz upotrebu mehaničkih vibracija ultrazvučne frekvencije i male amplitude. Frekvencija mehaničkih vibracija je u dijapazonu od 15 do 70 kHz, u zavisnosti od vrste polimera koji se zavaruje. Pored toga, potrebna je i određena pritisna sila, tako da do zavarivanja ultrazvukom dolazi do spajanja materijala samo na kontaktnim tačkama. Iz tog razloga, na univerzalni uređaj za ultrazvučno zavarivanje, potrebno je postaviti odgovarajući alat koji odgovara radnom predmetu. Funkcionalna šema tipičnog uređaja za ultrazvučno zavarivanje prikazana je na slici 1 [6, 7].



Slika 1: Funkcionalna šema uređaja za ultrazvučno zavarivanje [6]

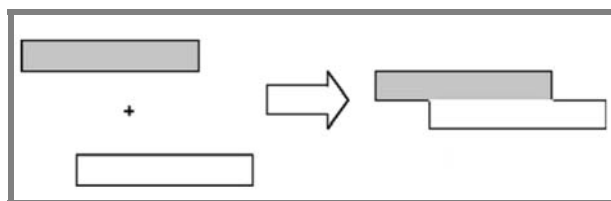
Toplotno spajanje

Toplotno spajanje podrazumeva zagrevanje polimera do temperature bliske temperaturi ostaklavanja, koja uz određeni pritisak u određenom trajanju dovodi do spajanja, slika 2. Tada polimer prelazi u viskozno stanje ili se topi, pri čemu dolazi do poprečnog povezivanja polimernih lanaca. Samo zagrevanje se izvodi na konstantnoj temperaturi, tako da se izbegne pojava toplotnih napona i deformacija. Čvrstoća zavarenog spoja zavisi od trajanja i pritiska, gde se

Na slici 1, sa USG je označen generator ultrazvuka koji pretvara električnu struju iz mreže u signal frekvencije 20 - 50 kHz. Brojem 1 je označen konvertor, koji ultrazvučne vibracije dobijene u ultrazvučnom generatoru pretvara u mehaničke vibracije. Oznaka 2 je buster ili transformator vibracija, kojim se povećava ili smanjuje amplituda oscilovanja, a 3 je sonotroda koja prenosi vibracije na radni predmet, dok je alat koji odgovara radnom predmetu koji se zavaruje, označen sa 4. Sa 5 je označen radni sto. Na ceo sklop deluje statički pritisak P_{st} i sila F .

Osnovni parametri za zavarivanje PMMA su: amplituda $A=10 - 40 \mu m$, frekvencija $f \sim 20 \text{ kHz}$, trajanje zavarivanja $t=5 - 7 \text{ s}$, statički pritisak $P=10 - 15 \text{ MPa}$. Jedna od osnovnih karakteristika ultrazvučnog zavarivanja je dobijanje kvalitetnih zavarenih spojeva na nižim temperaturama u odnosu na druge tehnologije zavarivanja.

Zbog relativno male toplotne provodljivosti polimera, temperatura na kontaktnim površinama koje se spajaju, raste brže i više u odnosu na temperaturu u unutrašnjosti materijala. U nekim slučajevima, ovom metodom je moguće zavariti polimere i ispod njihove temperature topljenja, što obezbeđuje spajanje različitih vrsta polimera i polimera čija je temperatura degradacije niža od temperature topljenja. Ova metoda takođe obezbeđuje spajanje na većim udaljenostima od mesta dejstva mehaničkih vibracija, čime se dobija zadovoljavajuć kvalitet zavarenih spojeva vrlo kompleksne konfiguracije [6, 8].



Slika 2: Princip toplotnog spajanja, uz prirustvo povišene temperature i pritiska [12]

slične vrednosti čvrstoće mogu dobiti uz primenu većeg pritiska i kraćeg trajanja ili manjeg pritiska i dužeg trajanja. Uobičajeni parametri toplotnog spajanja PMMA za ploče debljine oko 1,5 mm su sledeći: temperatura $T=95 - 105 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura stakla PMMA je $106 \text{ }^\circ\text{C}$), pritisak $p=4 - 6 \text{ MPa}$ i trajanje 4-15 min.

Ova tehnologija spajanja polimera je relativno jednostavna što to je njena najveća prednost, međutim, primenjiva je uglavnom kod uzoraka manje debljine. Pri tome su čvrstoće spojeva nešto niže.



Ovaj nedostatak se može izbjeći kombinovanjem sa drugim tehnikama, kao što je zavarivanje laserom, što je između ostalog omogućeno upravo jednostavnošću ove metode [9-11].

Mikrotalasno zavarivanje

Mikrotalasno zavarivanje se postiže kombinacijom mikrotalasnog zračenja frekvencije 2,45 GHz i pritiska. Između dva dela izrađena od polimera (obično PMMA, UHMWP, ABS, PC), postavlja se tanak sloj (približno 50 nm) provodnog polimera (polianilin) ili metala (hrom ili zlato). Toplota se generiše unutar samog materijala, zbog atomskih/molekularnih vibracija. Šematski prikaz mikrotalasnog zavarivanja dat je na slici 3.

U poređenju sa drugim tehnologijama zavarivanja, mikrotalasno zavarivanje nudi značajne uštede u utrošenoj energiji i trajanju, tako da su ujedno i troškovi smanjeni. Moguće je postići relativno visoku čvrstoću zavarenog spoja i formiranje trodimenzionalnih zavarenih spojeva vrlo kompleksne konfiguracije. Uz to, temperature koje se generišu nisu previsoke, tako da je moguće spajati i polimere sa relativno niskim temperaturama ostakljavanja i topljenja. Kao nedostatak može da se navede povećanje mase zavarenih proizvoda zbog prisustva međusloja [2,13-15].

Tačkasto zavarivanje trenjem

Kod tačkastog zavarivanja trenjem, toplota potrebna za spajanje dobija se trenjem dvodelnog alata (cilindar i klip) o polimer. Šematski prikaz tačkastog zavarivanja trenjem prikazan je na slici 4.

Nakon postizanja dovoljno visoke temperature kada dolazi do omekšavanja ili topljenja polimera, cilindar se uranja u polimer, a klip se podiže, izvlačeći određenu količinu polimera (slika 4B). Kada se postigne dovoljno velika dubina (do susedne ploče koja se zavaruje), cilindar se izvlači, a klip spušta, vraćajući istopljeni

polimer u formirani otvor (slika 4C). Nakon toga, alat se odvajaju od polimernih ploča koje se zavaruju, slika 4D.

Raspon ključnih parametara tačkastog zavarivanja trenjem su: brzina obrtanja $n = 500 - 2000 \text{ min}^{-1}$, trajanje zavarivanja $t = 5,5 - 12 \text{ s}$, pritisak $p = 3 \text{ bar}$ i dubina prodiranja cilindra 3,5 - 4 mm za debljinu uzorka od 3 mm.

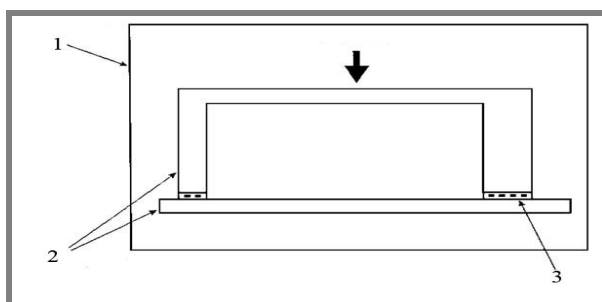
Unos toplote u zavareni spoj je relativno mali, tako da su unutrašnji naponi i deformacije relativno mali.

S druge strane, ostvaruju se relativno visoke vrednosti čvrstoće zavarenog spoja, jer uz pravilan izbor parametara zavarivanja dolazi do kvalitetnog mešanja materijala koji se spajaju. Ovom metodom se mogu spajati i različite vrste polimera. Međutim, problem predstavlja činjenica da ova metoda nije u potpunosti zauzela svoje mesto u proizvodnji, tako da uređaji za zavarivanje još uvek nisu dovoljno usavršeni [17 - 21].

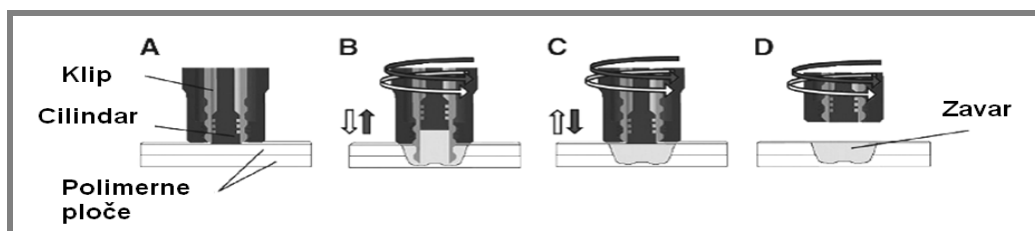
SMICAJNA ČVRSTOĆA ZAVARENIH SPOJEVA

Smicajna čvrstoća zavarenih spojeva predstavlja jednu od dominantnih karakteristika koje određuju kvalitet zavarenog spoja PMMA i zbog toga se u ovom radu i navodi. Smicajne čvrstoće zavarenih spojeva PMMA, koji su dobijeni različitim tehnologijama zavarivanja (ultrazvučno zavarivanje, toplotno spajanje, mikrotalasno zavarivanje i tačkasto zavarivanje trenjem), prikazani su na slici 5 [9, 13, 22]. Na osnovu rezultata Souze [22], koji je primenio ultrazvučno zavarivanje vrlo kratkog trajanja i sa niskim pritiskom, smicajna čvrstoća PMMA iznosi 1,1 MPa sa sledećim parametrima: pritisak 0,095 MPa, u trajanju 0,15 s.

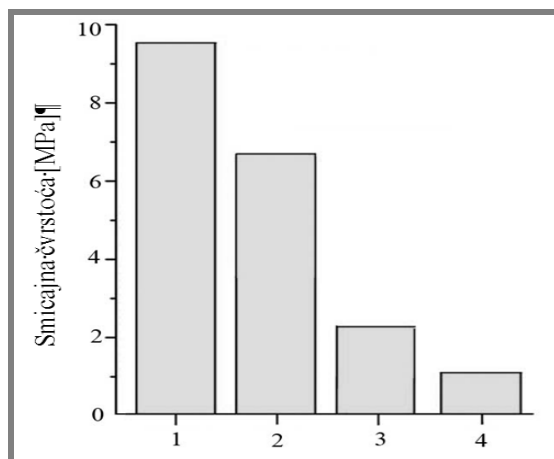
Sood [9] je termalnim spajanjem postigao nešto veću smicajnu čvrstoću od 2,35 MPa, pri zagrevanju na 105°C, pritisku 6 MPa i trajanju 120 s, dok je Yussuf i ostali autori [13] mikrotalasnim zavarivanjem dobili značajno veću vrednost od 6,8 MPa uz trajanje procesa od 15 s i snagom 300 W.



Slika 3 Šema mikrotalasnog zavarivanja: 1 – mikrotalasna komora, 2 – komponente koje se zavaruju, 3 - sloj provodnog materijala (polimera ili metala) [16]



Slika 4 Tačkasto zavarivanje trenjem [19]



Slika 5 Smicajna čvrstoća spojeva dobijenih različitim tehnologijama: 1 - tačkasto zavarivanje trenjem, 2 - mikrotalasno zavarivanje, 3 - toplotno spajanje, 4 - ultrazvučno zavarivanje [19]

ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata zavarivanja PMMA, može da se konstatuje:

- najveća smicajna čvrstoća zavarenih spojeva se dobija kod tačkastog zavarivanja trenjem, a sledi mikrotalasno zavarivanje,
- u zavisnosti od oblika, dimenzija i posebnih zahteva koji se stavljaju pred zavareni radni predmet, određene tehnologije zavarivanja imaju prednosti
- za radne predmete većih dimenzija, tačkasto zavarivanje je optimalno,
- za radne predmete kod kojih se zahteva postizanje hermetičnosti, optimalna tehnologija je mikrotalasno zavarivanje, ali je ova tehnologija ograničena veličinom mikrotalasne komore.
- najjednostavnija i najjeftinija tehnologija je termalno spajanje, zbog čega ima široke mogućnosti kombinovanja sa drugim tehnologijama zavarivanja i
- za zavarivanje raznorodnih materijala, pre svega polimera i metala, ultrazvučno zavarivanje predstavlja optimalnu tehnologiju, mada su smicajne čvrstoće zavarenih spojeva niže u odnosu na druge tehnologije zavarivanja i spajanja. Stoga, ova metoda je upotrebljiva za manje odgovorne spojeve.

LITERATURA

- [1] Baloš, S., Uticaj mikrotalasnog zračenja na mehaničke karakteristike PMMA biopolimera, magistarska teza, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [2] Amancio Filho ST, dos Santos JF. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: recent developments and trends. *Polym Eng Sci* 2009;49:1461–76.
- [3] Troughton MJ. *Handbook of plastics joining: a practical guide* 2nd ed. New York: William Andrew Publishers; 2008.
- [4] G. Sanders and A. Manz, Chip-based Microsystems for genomics analysis, *Trends in Analytical Chemistry*, 19, 364-378 (2000).
- [5] PolyMethylMethAcrylate delivery system for bone morphogenetic protein, United States Patent 4526909 (<http://www.freepatentsonline.com/4526909.html>)
- [6] Gutnik, V.G., Gorbach, V.G., Dashkov, A.V., Some Characteristics of Ultrasonic Welding of Polymers, *Fibre Chemistry* Vol.34, No.6, 2002,
- [7] Obradović, R., Vilotić, D., Prikaz tehnologije i opreme za ultrazvučno zavarivanje termoplastičnih komponenta, IX Međunarodna naučna – stručna konferencija MMA 2006, 27-28.
- [8] Zhang, Z., Wang, X., Luo, Y., Hea, S., Wang, L., Thermal assisted ultrasonic bonding method for poly(methyl methacrylate) (PMMA) microfluidic devices, *Talanta* 81 (2010) 1331–1338
- [9] Sood V. An experimental study on thermal bonding effects of PMMA based microdevices using hot embossing MSc thesis. University of Texas, Arlington; 2007.;
- [10] [Mizuno, J., Farrens, S., Ishida, H., Dragoi, V., Shinohara, H., Suzuki, T., Ishizuka, M., Glinsner, T., Shoji, S., Cycloolefin polymer direct bonding using low temperature plasma activation bonding MEMS, NANO and Smart Systems, 24-27:346-349 (2005).
- [11] [Lai, J., Chen, X., Wang, X., Yi, X., Liu, S., Laser bonding and packaging of plastic microfluidic chips. In *Electronic Packaging Technology 101 (ICEPT)*, Institute of Microsystems, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, R. China, 28
- [12] [Nimai, C. Nayak, C. Y. Yue, Y. C., Lam, Y. L., Thermal bonding of PMMA: effect of polymer molecular weight, *Microsystems Technology* (2010) 16:487–491
- [13] [Yussuf AA, Sbarski I, Hayes JP, Tran N, Solomon M. Rapid microwave welding of two polymethylmethacrylates substrates. *ANTEC* 2004:1256–60.;
- [14] D. Grewell, A. Benatar, and J.B. Park, *Plastics and Composites Welding Handbook*, Carl Hanser, Munich (2003).;
- [15] P.K.D.V. Yarlagadda and C.C. Tan, *J. Mater. Process. Technol.*, 74, 199 (1998).; C. Ageorges and L. Ye, *Fusion Bonding of Polymer Composites*, Springer, London (2002).
- [16] Wise, R. J., Froment, I. D., Microwave welding of thermoplastics, *Journal of materials science* 36 (2001) 5935 – 5954
- [17] Schiling C, dos Santos JF. Method and device for linking at least two adjoining work pieces by frictionwelding. *International Patent Publication*; 2005.WO/2001/036144.
- [20] R. Talvar, D. Bolser, R. Lederich, and J. Baumann, in *Proceedings of the 2nd International Symposium on FSW*, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000).
- [21] M.R. Johnsen, *Weld. J.*, 35 (February 1999).; T.W. Nelson, C.D. Sorensen, C. Johns, S. Strand, and J. Christensen, in *Proceedings of the 2nd International Symposium on FSW*, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000).
- [22] Souza J M. Study and mechcal evaluation of ultrasonic joints of polycarbonate and poly (methyl methacrylate), magistarska teza, Polytechnic School of University of São Paulo; 2005