

BEZPEČNOSTNÉ OPATRENIA PRI MAGNETO PULZNOM ZVÁRANÍ LAHKÝCH ZLIATIN

MIROSLAV SAHUL - MARTIN SAHUL - ZUZANA SZABOVÁ - PAULÍNA ZACKOVÁ

SAFETY PRECAUTIONS DURING MAGNETIC PULSE WELDING OF LIGHT ALLOYS

ABSTRAKT

Príspevok sa zaoberá súčasným stavom v oblasti magneto pulzného zvárania (MPW) ľahkých zliatin. Sú rozpracované základné princípy technológie MPW. Zároveň sú uvedené hlavné parametre zvárania MPW. Detailnejšie je dokumentovaná zvariteľnosť ľahkých zliatin, najmä Mg zliatin a Al zliatin, ako aj kombinácii uvedených kovov s inými kovmi. Navyše sú popísané výhody a nevýhody zvárania MPW. Vzhľadom k tomu, že zariadenia pre zváranie MPW sú charakteristické vysokým napätím je popísaná bezpečnosť pri práci so zariadením na zváranie MPW.

Kľúčové slová: bezpečnosť, bod zrázu, magneto pulzné zváranie, Mg zliatiny, Al zliatiny, kombinované kovy

ABSTRACT

The paper deals with the current state in the field of magnetic pulse welding (MPW) of light alloys. The basic principle of MPW technology is discussed. Furthermore, the main welding parameters of MPW are given. Weldability of light alloys, such as magnesium alloys and aluminium alloys as well as their combinations with other metals is documented more detailed. Advantages and limitations of MPW are also described. As electromagnetic setups are high-voltage setups, the safety guidelines at work with MPW equipment are given.

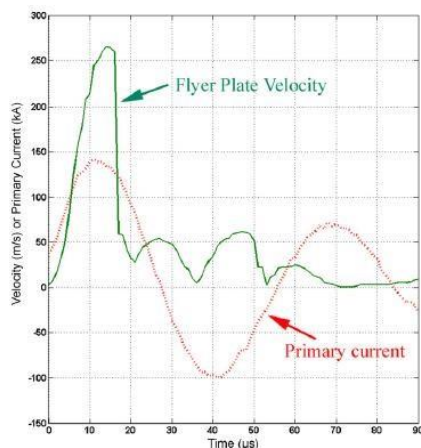
Key words: safety, collision point, magnetic pulse welding, Mg alloys, Al alloys, dissimilar metals

1. Magnetopulzné zváranie (MPW)

Zváranie MPW sa využíva v rôznych aplikáciách v automobilovom priemysle, leteckom priemysle, elektronike a pod. Typickými príkladmi zvarov vyhotovených MPW komory klimatizácií, akumulátory, hriadele, tlakové puzdrá, tlakové nádoby, zariadenia v mikroelektronike ako tenké dosky plošných spojov, rúrky, preplátované spoje a pod. V priebehu silného zrázu dochádza k vzniku zvlneného rozhrania v závislosti od rýchlosti zrázu, geometrie a vlastností zváraného materiálu, avšak rýchlosť zrázu má najväčší vplyv [1].

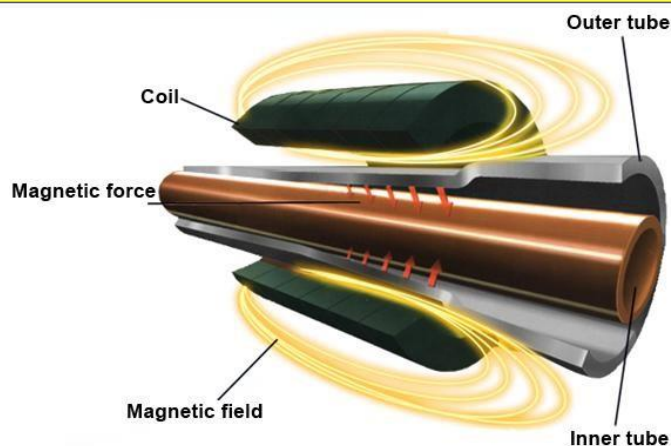
Magnetopulzné zváranie patrí medzi metódy zvárania v pevnom stave a v mnohých aspektoch je podobné zváraniu explóziou [2].

Pri zváraní MPW sa namiesto trhaviny používa na urýchlenie vrchného plechu magnetické pole. Závislosť rýchlosti urýchľovaného plechu Cu a primárneho prúdu od času pri zváraní MPW Cu s Al je uvedená na obr. 1.



Obr. 1 - Závislosť rýchlosti urýchľovaného plechu a primárneho prúdu od času [3]

MPW využíva magnetické polia generované veľkým výbojovým prúdom (obr. 2). Tento výbojový prúd, ktorý prechádza cievkou, indukuje vo zváraných materiáloch vírivé prúdy. Obidva prúdy generujú silné magnetické polia, ktoré pôsobia opačným smerom. V dôsledku interakcie medzi magnetickými poľami uvedených prúdov dochádza medzi cievkou a materiálom k vzniku veľkej odpudivej sily [1]. Niektoré systémy môžu vybiť až 2 milióny A za menej ako 100 μm.



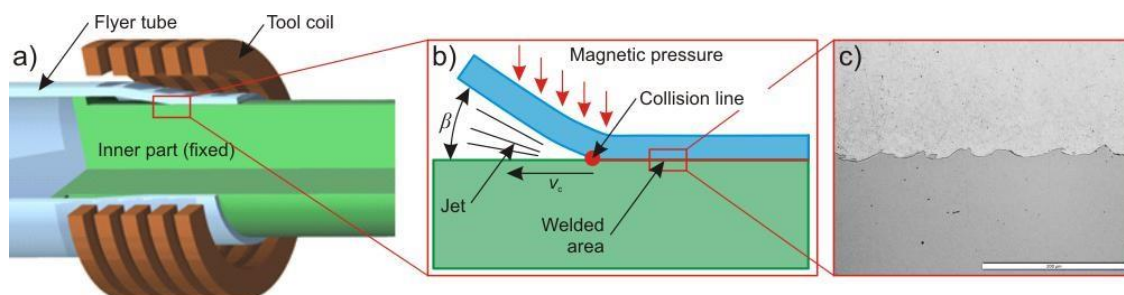
Obr. 2 - Schéma magneto pulzného zvarovania [2]

1.1 Mechanizmus vzniku spoja

Podobne ako pri zvaraní explóziou, dochádza medzi zvaranými materiálmi v dôsledku pôsobenia rázovej vlny k vzniku trysky (tzv. Jet). Trysk (obr. 3) spôsobuje odstránenie povrchových oxidov a nečistôt. Vďaka skutočnosti, že proces prebieha po veľmi krátkej dobe, nedochádza na rozhraní k výraznému nárastu teploty [3].

Medzi hlavné parametre zvarovania MPW patrí veľkosť magnetickej sily, uhol zrázu, rýchlosť bodu zrázu a dištančná vzdialenosť medzi zvaranými materiálmi [4].

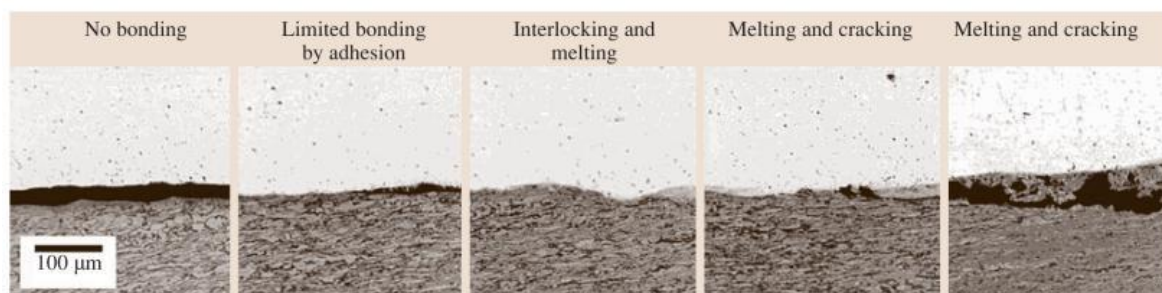
Veľkosť dištančnej medzery závisí od hrúbky urýchľovaného plechu. Obyčajne sa pohybuje v intervale 0,5 ÷ 3 násobok hrúbky urýchľovaného kovu [5].



Obr. - 3 a) Usporiadanie rúrok pri zvaraní pomocou MPW, b) schéma procesu MPW, c) zvlnené rozhranie pri MPW [6]

K zvarovaniu pomocou MPW dochádza v určitom intervale uhlov zrázu. Bolo publikované, že proces zvarovania sa nerealizuje pri nízkych uhloch zrázu okolo 0° a v prípadoch, ak je uhol zrázu vyšší ako 30° [7,8].

Priemerná rýchlosť dosahuje rádovo 300 m/s, avšak v určitých miestach dosahuje až 1000 m/s. Charakter zvarového rozhrania Al - Ti v závislosti od narastajúcej rýchlosti zrázu je dokumentovaný na obr. 4.



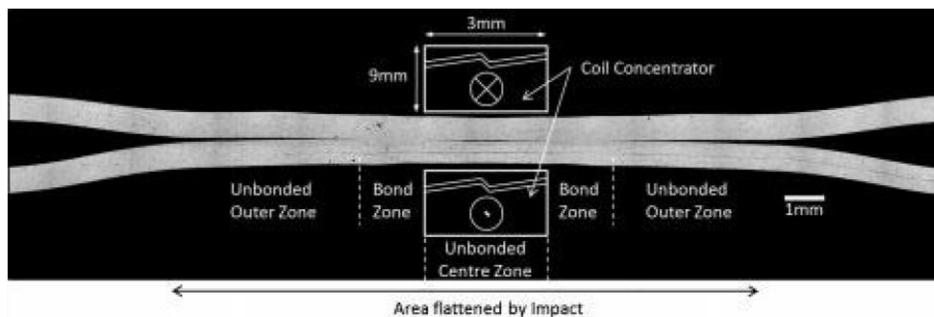
Obr. 4 - Charakter zvarového rozhrania Al - Ti v závislosti od narastajúcej rýchlosti bodu zrázu [2]

Veľkosť minimálneho uhla potrebného pre vznik trysky (Jet) narastá s tvrdosťou urýchľovaného plechu a klesá s nárastom hustoty urýchľovaného plechu a rýchlosti zrázu. Uhol zrázu sa obyčajne nachádza v intervale 8 až 12° [2].

1.2 Zvariteľnosť materiálov pomocou MPW

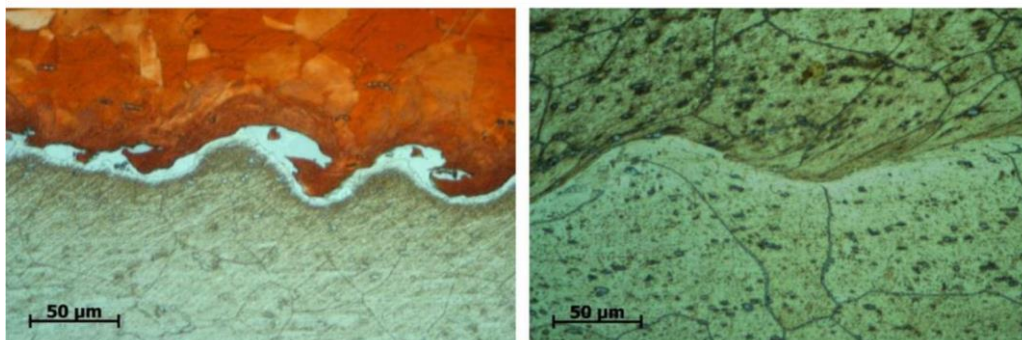
Procesom MPW možno zvärať akýkoľvek elektricky vodivý materiál. Čím má materiál vyššiu elektrickú vodivosť, tým menšia je energia potrebná na vyhotovenie zvaru. Zváranie MPW sa úspešne používa na metalurgické spájanie Al s oceľou. Medzi ďalšie kombinácie materiálov, ktoré možno úspešne zvärať pomocou MPW patria Al - Al, Al - Cu, Al - Mg, Al - Ti, Cu - Cu, Cu - oceľ, Cu - mosadz, Ni - Ti, Ni - Ni, oceľ - oceľ [9].

Berlin a kol. sa zaoberali zváraním MPW horčíkovej zliatiny AZ 31 hrúbky 0,6 mm. Dištančná vzdialenosť plechov z Mg zliatiny AZ 31 bola 1,5 mm. Energia výboja kondenzátora bola z intervalu 9,7 až 12,1 kJ. Pevnosť zvarových spojov narastala so zvyšovaním energie výboja. Autori pozorovali, že v centrálnej časti zvaru nedošlo k vytvoreniu spoja medzi zváranými plechmi (dĺžka zóny ~ 3 mm). Po oboch stranách tejto oblasti boli pozorované zvarené oblasti (~ 1 mm), ktoré boli opäť z oboch strán ohraničené miestami, kde nedošlo k vytvoreniu spojenia medzi zváranými materiálmi (obr. 5). K vytvoreniu zvarového spoja nedošlo v dôsledku veľkého uhla zrázu β [10].



Obr. 5 - Makroštruktúra zvarového spoja Mg zliatiny AZ 31 vyhotoveného MPW [10]

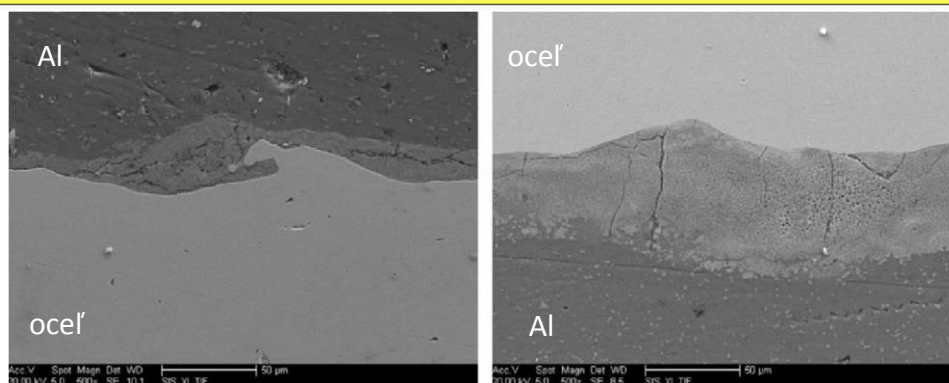
Raelison a kol. sa zaoberali zváraním MPW rúr z hliníkovej zliatiny AW 6060 a zváraním kombinácie AW 6060 s Cu (obr. 6). Pri zváraní kombinácie kovov, bola Al zliatina zvolená ako urýchľovaný kov. Hrúbka urýchľovaného plechu bola 1,5 mm.



Obr. 6 - Zvlnené rozhranie zvarového spoja a) Cu – Al zliatina AW 6060, b) Al zliatina AW 6060 – Al zliatina AW 6060 [1]

Na rozhraní bola v prípade zvarových spojov kombinácie kovov pozorovaná intermetalická fáza. Vplyvom prítomnosti uvedenej vrstvy na rozhraní došlo pri mechanických skúškach k vzniku krehkého lomu. Sila potrebná na pretrhnutie vzorky bola nízka, kvôli prítomnosti intermetalickej fázy na rozhraní AW 6060 - Cu. Pri skúšaní zvarového spoja Al zliatina 6060 – Al zliatina 6060 došlo k vzniku tvárneho lomu [1].

Yu a kol. sa zaoberali zváraním MPW hliníkovej zliatiny AA3003 s nízkouhľikovou oceľou. Zliatina AA3003 bola zvolená ako urýchľovaný plech. Autori pozorovali na rozhraní vznik mikrotrhlín v dôsledku prítomnosti tvrdých a krehkých intermetalických fáz, ktoré pôsobili ako koncentrátor napätí potrebných pre vznik mikrotrhlín (obr. 7).

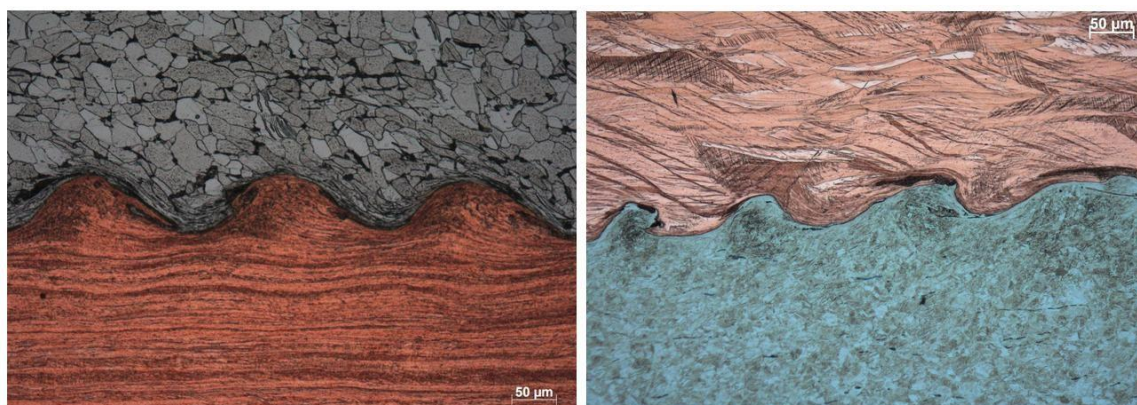


Obr. 7 - Mikroštruktúra zvarového rozhrania [11]

Najväčšia mikrotvrdosť bola pozorovaná na rozhraní medzi Al zliatinou AA3003 a nízkouhlíkovou oceľou. Je to spôsobené plastickou deformáciou materiálu na rozhraní, ktorá prispieva k deformačnému spevneniu a zjemneniu zrna v uvedenej oblasti. Na rozhraní bola navyše dokumentovaná prítomnosť intermetallickej fázy FeAl_3 a $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ [11].

Kore a kol. sa zaoberali zvarovaním MPW hliníkovej zliatiny s Mg zliatinou. Vplyvom vzniku trysku v dôsledku vysokej rýchlosti zrázu došlo k odstráneniu oxidickej vrstvy prítomnej na povrchu zvarovaných kovov a tvorbe zvarov bez prítomnosti defektov. Zvarové spoje vyhotovené pri vhodných parametroch zvarovania dosahovali vyššiu pevnosť oproti základnému kovu [12].

Manogaran a kol. sa zaoberali bodovým magnetopulzným zvarovaním (MPSW) hliníka AA1199 hrúbky 0,5 mm s oceľou hrúbky 1,5 mm. Dištančná vzdialenosť použitá pri zvarovaní bola 1,5 mm. Pri použití energie výboja vyššej ako 4,5 kJ nedošlo k zvarovaniu, pretože rýchlosť urýchľovaného plechu bola v bode zrázu príliš vysoká na vznik trysku. Pri použití energie výboja nižšej ako 2,5 kJ, nebola dosiahnutá rýchlosť dostatočná na tvorbu vysokoenergetického zrázu a uhol zrázu bol nízky pre vznik trysku. Pri použití energie výboja 3,4 kJ bolo pozorované zvlnené rozhranie zvarových spojov. Na rozhraní pozorovali prítomnosť intermetalických fáz Fe_2Al_5 a FeAl_3 , hrúbky 2 – 5 µm [13]. Zvarové spoje vyhotovené medzi kombináciami materiálov Cu – oceľ a Cu – nehrdzavejúca oceľ sú uvedené na obr. 8. Porovnanie zvarov vyhotovených MPW a GMAW je dokumentované na obr. 9.



Obr. 8 - Zvarové spoje vyhotovené medzi a) Cu – oceľ, b) Cu – nehrdzavejúca oceľ [14]

1.3 Výhody zvarovania MPW:

Hlavnými výhodami zvarovania MPW sú:

- vysoká rýchlosť zvarovania (klasický pulz trvá od 10 do 100 µs, takže jedinou časovou limitáciou je upínanie materiálov a odoberanie hotových zvarov),
- vysoká opakovateľnosť,
- proces vhodný pre hromadnú výrobu,
- nepožíva sa prídavný materiál,
- Jedná sa o tzv. „zelený“ proces. Nedochádza k vzniku splodín, výparov a žiarenia.
- Čistý proces, nie je potrebné čistenie pred ani po procese zvarovania.
- Zvarový spoj má dobré mechanické vlastnosti. Pevnosť zvaru je vyššia ako pevnosť základného kovu.
- Vysoká presnosť (presnosť je možné jednoducho nastaviť pomocou magnetického poľa).
- V oblasti zvaru nedochádza k vzniku korózie [15].



Obr. 9 - Porovnanie zvarov vyhotovených MPW a GMAW [16]



Obr. 10 - Súčiastky vyhotovené zváraním MPW [15]

1.4 Nedostatky procesu MPW

- MPW je obmedzené na výrobu rúr a preplátovaných spojov (je možné aplikovať proces MPW na zváranie rúr priemeru $\varnothing$ 127 mm).
- Vzhľadom ku konštrukcii celého systému, nie je možné vyhotoviť tupé zvarové spoje.
- Možno zvärať iba elektricky vodivé materiály.
- Hrúbka plechu, ktorý možno zvärať je limitovaná do 6 mm pre zváranie Al a 1 - 2 mm v prípade zvárania ocelí [9].

2. Bezpečnosť pri práci so zariadením na zváranie MPW

Bezpečnostné opatrenia sú pri práci so zariadením na MPW veľmi dôležité, pretože zariadenia pre zváranie MPW sú charakteristické vysokým napätím. Najväčšie smrteľné nebezpečenstvo existuje pre samotné ľudské telo, ktoré môže pôsobiť ako vodivá dráha, najmä pri prechode cez ľudské srdce. Na zariadení môžu byť prítomné rôzne ostré hrany a časti, ako napr. kovové vložky, kovové plechy, skrutky, ktoré môžu v prípade neopatrnosti spôsobiť smrteľný úraz. V dôsledku reflexu môže dôjsť ku kontaktu s ďalšími elektricky vodivými časťami a spôsobeniu fatálnych následkov.

V nasledujúcej časti sú popísané niektoré dôležité bezpečnostné opatrenia, ktoré pomôžu pri ochrane pred nebezpečenstvom, prípadne môžu zabrániť poruche zariadenia:

- Nikdy nepracujte sám. V prípade pohotovosti bude veľmi dôležitá prítomnosť ďalšej osoby.
- Noste topánky, alebo tenisky s gumenou podrážkou. Elektricky izolovaná podlaha je najlepšou voľbou pre prácu so zariadením pre MPW. Akceptovateľnou môže byť aj použitie gumenej karimatky za účelom izolácie podlahy. Žiadny koberec, akejkoľvek hrúbky nebude slúžiť ako izolátor.
- Pri práci s vysokonapäťovým zariadením majte jednu ruku schovanú vo vrecku.
- Nasadte si chrániče uší a ochranné okuliare.
- Nenoste retiazky a iné kovové predmety, ktoré by mohli prísť do kontaktu s obvodom a viesť elektrický prúd.
- Buďte v bezpečnej vzdialenosti od zariadenia pre MPW, najlepšie za ochrannou stenou. Z dôvodu ochrany pred elektromagnetickým poľom [17].

3. Zariadenia na zváranie MPW

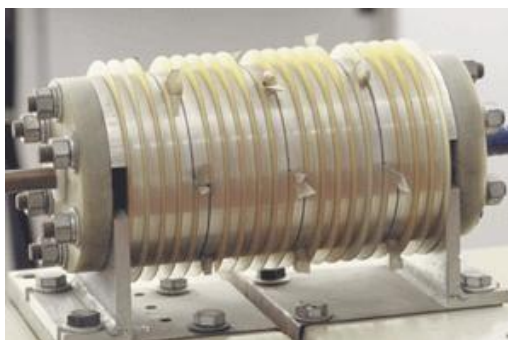
Systémy od spoločnosti Bmax sú skonštruované zo špeciálnych kondenzátorov schopných nahromadiť dostatočné množstvo energie a vybiť ju v priebehu niekoľko μ s až ms. Jadrom celého systému je základná jednotka, v ktorej je inštalovaných niekoľko kondenzátorov. Systém obsahuje generátor pulzov, ktorý je spojený s kontrolnou jednotkou a pracovnou stanicou, kde dochádza k produkcii zvarov (buď manuálne, alebo automaticky v závislosti od požiadaviek).



Obr. 11 - Systémy pre zváranie MPW od firmy Bmax [15]

Cievky pre zváranie majú životnosť od 30 000 do 100 000 cyklov. V závislosti od geometrie zváraných materiálov je možné použiť cievky rôznej geometrie (obr. 12):

- ploché cievky,
- cievky s viacerými závitmi,
- cievky s jedným závitom,
- ploské cievky,
- cievky rôznych tvarov [15].



Obr. 12 – Cievka na zváranie MPW [8]

PodĎakovanie:

Príspevok vznikol s podporou projektov grantovej agentúry VEGA Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR a Slovenskej Akadémie Vied, projekt č. 1/2594/12 (Výskum metalurgického spájania a ďalších technologických procesov spracovania horčíkových a iných ľahkých zliatin progresívnymi a ekologicky vhodnými technológiami) a projekt č. 1/1035/12.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] Raoelison, R. N., Racine, D., Zhang, Z., Buiron, N., Marceau, D., Rach, M.: Magnetic Pulse Welding: Interface of Al/Cu Joint and Investigation of Intermetallic Formation Effect on the Weld Features. In Journal of Manufacturing Processes 16 (2014), s. 427 – 434.
- [2] Grote, K. H., Antonsson, E. K.: Springer Handbook of Mechanical Engineering. New York: Springer Science & Business Media, 2009. 1580 s. ISBN 978-3-540-49131-6.
- [3] Zhang, Y., Babu, S. S., Prothe, C., Blakely, M., Kwasegroch, J., LaHa, M., Daehn, G. S.: Application of High Velocity Impact Welding at Varied Different Length Scales. In Journal of Materials Processing Technology 211 (2011), s. 944 952.
- [4] Shribman, D.: Magnetic Pulse Welding of Automotive HVAC Parts. Dostupné na: <http://www.magpulse.co.in/pdf/1.welding/applications/7.others/MPW%20for%20HVAC.pdf>
- [5] Verstraete, J., De Waele, W., Faes, K.: Magnetic Pulse Welding: Lessons to be Learned from Explosive Welding. Dostupné na: http://www.scad.ugent.be/journal/2011/SCAD_2011_2_3_458.pdf
- [6] Magnetic Pulse Welding: Targeted Manipulation of Weld Seam Formation. Dostupné na: http://www.spp1640.tudarmstadt.de/spp_1640/arbeitsgruppen_spp1640/stoffschluss_spp1640/a1_spp1640/index.en.jsp
- [7] Prasath Manogaran, A., Manoharan, P., Priem, D., Marya, S., Racineux, G.: Magnetic Pulse Spot Welding of Bimetals. In Journal of Materials Processing Technology 214 (2014), s. 1236–1244.

- [8] Spitz, B.-T., Shribman, V.: Magnetic Pulse Welding for Tubular Applications: Discovering New Technology for Welding Conductive Materials. Dostupné na: <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/magnetic-pulsewelding-for-tubular-applications-discovering-new-technology-for-welding-conductive-materials>
- [9] Jassim, A. K.: Magnetic Pulse Welding Technology. Dostupné na: <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aid=50347>
- [10] Berlin, A., Nguyen, T. C., Worswick, M. J., Zhou, Y.: Metallurgical Analysis of Magnetic Pulse Welds of AZ31 Magnesium Alloy. In Science and Technology of Welding and Joining 2011, Vol. 16, No. 8, s. 728 -734.
- [11] Yu, H., Xu, Zh., Fan, Zhao, Zh., Li, Ch.: Mechanical Property and Microstructure of Aluminum Alloy-Steel Tubes Joint by Magnetic Pulse Welding. In Materials Science & Engineering A 561 (2013) 259–265
- [12] S. Kore, J. Imbert, Y. Zhou, M. Worswick: Electromagnetic pulse welding of magnesium to aluminium sheets. In *Welding and Joining of Magnesium Alloys, 2010, Pages 367-379*
- [13] Arun Prasath Manogaran, Prabu Manoharan, Didier Priem, Surendar Marya, Guillaume Racineux: Magnetic pulse spot welding of bimetals. In Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 1236–1244
- [14] K. Faes: Electromagnetic pulse welding of sheet materials <http://www.bil-ibs.be/en/onderzoeksproject/electromagneticpulse-welding-sheet-materials>
- [15] Magnetic Pulse Welding. Dostupné na: <http://www.bmax.com/technology/magnetic-pulse-welding/>
- [16] Faes, K.: SOUDIMMA: Electromagnetic Pulse Welding. Dostupné na: <http://www.bil-ibs.be/en/onderzoeksproject/soudimma-electromagnetic-pulse-welding>
- [17] Liming, L.: Welding and Joining of Magnesium Alloys. Woodhead Publishing Limited, 2010. 389 s. ISBN 978-184569-692-4

ADRESY AUTOROV

Miroslav SAHUL, Ing. PhD., Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave, Paulínska 16, 917 24 Trnava, miroslav.sahul@stuba.sk

Martin SAHUL Ing. PhD., Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave, Paulínska 16, 917 24 Trnava, martin.sahul@stuba.sk

Paulína ZACKOVÁ Ing., Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave, Paulínska 16, 917 24 Trnava, paulina.zackova@stuba.sk

Zuzana SZABOVÁ Ing. PhD., Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave, Paulínska 16, 917 24 Trnava, zuzana.szabova@stuba.sk

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.