

Magnetno pulzno varjenje – uporaben postopek za spajanje elementov v mehatroniki ali le za teoretične in laboratorijske raziskave?

Janez TUŠEK

Izvleček: V članku so prikazane nekatere osnovne značilnosti magnetnega pulznega varjenja. V prvem delu so podane osnove magnetizma in magnetnega polja. Shematsko je prikazan princip nastanka mehanske sile zaradi učinkovanja električnega in magnetnega polja. V splošnem je predstavljeno in opisano varjenje z magnetnim pulzom, ki ustvari mehansko silo, potrebno za spajanje dveh elementov v trdnem stanju. Opisani in shematsko sta prikazani dve različni napravi za varjenje po navedenem postopku. Prva naprava služi za varjenje ploščatih varjencev, druga pa za okrogle oziroma pretežno za spajanje elementov iz cevi. Podanih je nekaj praktičnih primerov uporabe varjenja z magnetnimi pulzi. Na koncu pa so navedeni osnovni zaključki iz celotnega članka. Postopek je primeren predvsem za spajanje različnih materialov med seboj, kot sta aluminij in jeklo ali pa baker in jeklo in za spajanje različnih predvsem tankih elementov z debelejšimi, kot so na primer tankostenske cevi na debelejšo cev, razni tanjši pokrovi ali čepi za zapiranje ohišij ter odprtih cevi ali spajanje bakrenih pletenic z bakrenimi čevljkami in podobno.

Ključne besede: magnetno pulzno varjenje, varjenje v hladnem, električno polje, magnetno polje, vrtnični tokovi, prekrivni spoj,

■ 1 Uvod

Vedno večja želja in potreba po uporabi čim lažjih in cenenih produktov praktično na vseh področjih človekovega udejstvovanja sili načrtovalce in proizvajalce opreme, strojev in naprav k iskanju novih materialov in novih izdelovalnih tehnologij. Kljub številnim napovedim v preteklosti o razvoju in uporabi novih umetnih materialov, ki bodo nadomestili kovinske, so se te prognoze uresničile le v manjši meri [1]. Kovinski materiali se še vedno zelo široko uporabljajo pri izdelavi

končnih produktov. Razlogov za to je več. V prvi vrsti gre za tradicijo in splošno prepričanje v javnosti, da so produkti iz kovinskih materialov še vedno najbolj kakovostni in najbolj zanesljivi v delovanju. Po drugi strani velja na tem področju močna tradicija v industriji, predvsem pri vseh izdelovalnih tehnologijah. In ne nazadnje gre tudi za tradicijo in zanesljivost pri spajanju kovinskih materialov v trdno zvezo. Prav tehnike spajanja so pri mnogih produktih široke uporabe odločilnega pomena pri tehnologiji izdelave, funkcionalnosti samega produkta in tudi pri celotnih stroških izdelave.

Z optimalno tehnologijo varjenja ali drugimi tehnikami spajanja materialov lahko v mnogih primerih znižamo

izdelovalne stroške in maso izdelka ter povišamo produktivnost izdelave. Prav to odlikuje tudi tehnologijo varjenja z magnetnimi pulzi. Celo več: magnetno pulzno varjenje ima za nekatere primere kar nekaj prednosti pred drugimi postopki spajanja.

Postopek magnetnega pulznega varjenja se še vedno intenzivno razvija, kar dokazujejo številni patenti in najrazličnejše raziskave po svetu. Številni posamezniki in organizacije so v mnogih državah in tudi mednarodno patentno zaščitili posamezne procese, opremo in pripomočke za magnetno pulzno varjenje [2–5].

Poleg varjenja lahko mehansko silo, ki jo dobimo z magnetnim in električnim poljem, uporabimo tudi za

Prof. dr. Janez Tušek, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

preoblikovanje pločevine, precizno rezanje, stiskanje prahu pri praškasti metalurgiji in podobno [6–10].

■ 2 Opis magnetnega pulznega varjenja

Magnetno pulzno varjenje je sicer poznano že precej desetletij. Njegova praktična uporaba pa pridobiva na pomenu šele v zadnjem obdobju. Prve raziskave postopka in procesov, povezanih z magnetnim pulznim varjenjem, segajo v sredino prejšnjega stoletja v Združene države Amerike in v takratno Sovjetsko zvezo [8–12]. Danes se postopek raziskuje v številnih ustanovah po svetu in uporablja v mnogih podjetjih v najrazličnejših praktičnih aplikacijah.

2.1 Osnove magnetnega polja

Nekatere snovi privlačijo elemente iz železa in njegovih zlitin. Tem materialom pravimo magneti. Okoli magnetov deluje magnetno polje. Ta pojav imenujemo magnetizem. Smer in jakost delovanja magnetnega polja sta odvisni od lastnosti magnetov, njegove usmerjenosti in od velikosti. Magnetno polje ponazorimo z magnetnimi silnicami. Poznamo trajne magnetne in elektromagnetne. Trajni magneti so lahko naravni ali pa umetni, kar pomeni, da moramo za trajni magnet feromagnetni material zavestno namagnetiti. Feromagnetne snovi so predvsem železo, kobalt in nikelj ter njihove zlitine. Poznamo pa tudi magnetne keramične materiale in magnetne materiale iz skupine redkih zemelj. Poleg feromagnetnih snovi so glede magnetizma poznani tudi paramagnetni in diamagnetni materiali, ki jih ni mogoče trajno namagnetiti.

Umetno magnetno polje lahko ustvarimo z električnim poljem. Vsak vodnik, skozi katerega teče električni tok, se obnaša kot magnet. Če magnetno iglo približamo električnemu vodniku, se odkloni od svoje normalne lege. Okrog vsakega električnega vodnika torej deluje magnetno polje. Njegova jakost pada s kvadratom oddaljenosti od vodnika. Smer delovanja magnetnega polja določimo s smerjo prevajanja električnega toka.

Magnetno polje okrog vodnika je vedno zaključeno v sebi. To velja tudi, če vodnik ni raven, ampak ovit v enega ali več ovojov v spiralo oziroma v tuljavo. Magnetno polje zvitega vodnika oziroma tuljave je tem močnejše, čim večji električni tok teče skozi vodnik in čim večje je število ovojov. Pri tuljavi z relativno velikim številom ovojov je magnetno polje v sredini enakomerno, pravimo, da je homogeno [13–15].

To dejstvo, da prevajanje električnega toka skozi vodnik povzroči okoli njega magnetno polje, v vsakdanjem življenju zelo pogosto izkoriščamo v številnih napravah, strojih, krmilnih enotah, regulacijskih sistemih in drugje. Zakonitost, da električno in magnetno polje ustvarita mehansko silo, pa pogosto izrabljamo tudi za prenos bremen, za premikanje raznih elementov in tudi za varjenje.

Mehansko silo, ki jo ustvarita električno in magnetno polje, imenujemo tokovna ali elektromagnetna sila.

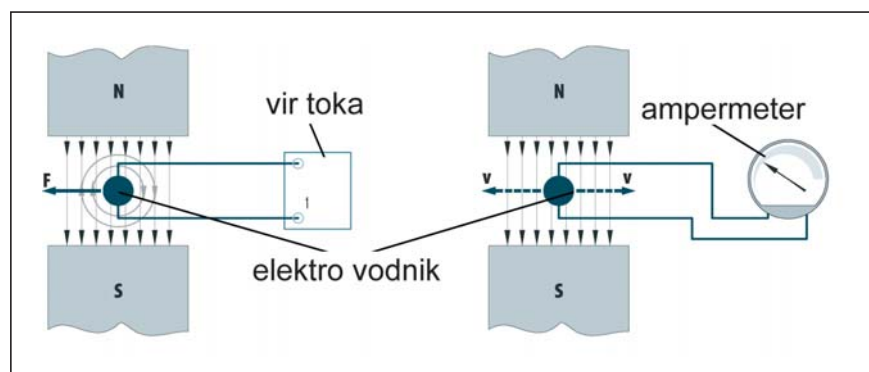
To tokovno oziroma elektromagnetno silo lahko pojasnimo s preprosto skico, ki jo vidimo na *sliki 1* (levo). Na isti sliki (desno) pa je shematsko prikazan tudi obraten pojav, ko z gibanjem električno prevodnega vodnika v magnetnem polju v vodniku ustvarimo električno polje, okoli katerega prav tako deluje magnetno polje.

2.2 Prikaz opreme in opis principa magnetnega pulznega varjenja

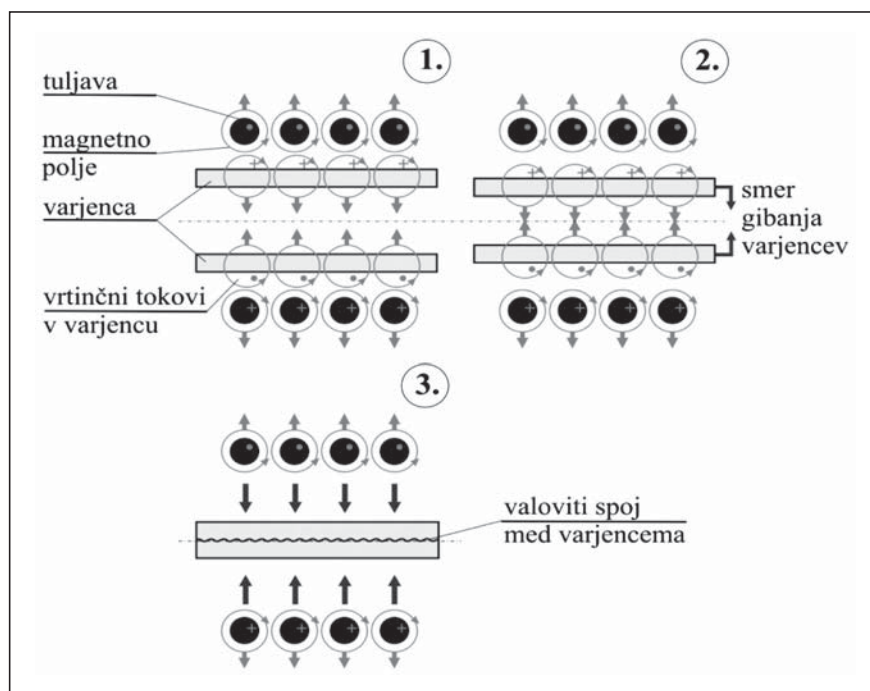
Magnetno pulzno varjenje spada v skupino varjenja z mehansko silo brez taljenja. Spoj nastane zaradi velike specifične sile enega varjenca proti drugemu. Princip nastajanja spoja je skoraj enak principom pri eksplozijskem varjenju in delno pri varjenju z ultrazvokom. V vseh treh primerih nastane spoj v trdnem stanju. Predvsem pri eksplozijskem varjenju in magnetnem pulznem varjenju pride v točki spajanja do ogromnih lokalnih tlakov, do lokalnega trenja in popolne porušitve materialov v omejenem območju [16, 17].

2.2.1 Oprema za varjenje z magnetnimi pulzi

Za varjenje z magnetnim pulzom moramo uporabiti namensko opremo. Poseben vir toka, ki zagotovi močan utripni tok, steče skozi tuljavo in povzroči visoko gostoto magnetnega pulza. Magnetno polje v varjenjih povzroči vrtilne tokove, ki ovirajo prodiranje magnetnega polja skozi varjenca. Kot rezultat magnetnega in električnega polja nastane elektrodinamična sila. Ta premakne en varjenec od tuljave proti drugemu varjencu z visokim pospeškom in z visoko hitrostjo. Shematsko je naprava za varjenje ploščatih varjenčev prikazana na *sliki 2*, za varjenje okroglih varjenčev pa na *sliki 3*. Pomembno je, da varjenca ležita drug proti drugemu nekoliko pod kotom, kar pomeni, da se varjenje začne v eni točki in se nato nadaljuje linearno [18, 19]. Nagib enega varjenca proti drugemu naj bi bil skoraj enak kot pri eksplozijskem varjenju. Tudi



Slika 1. Osnovni shematski prikaz nastanka tokovne (mehanske) sile z učinkovanjem električnega in magnetnega polja (levo) in prikaz nastanka električnega toka z magnetnim poljem in z mehansko energijo (desno). F – smer delovanja mehanske sile, v – smer gibanja vodnika.



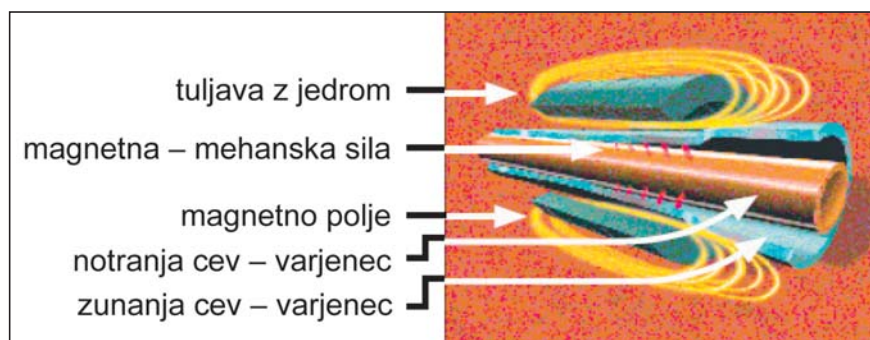
Slika 2. Shematski prikaz naprave za magnetno pulzno varjenje ploščatih varjencev; 1 – situacija pred varjenjem, 2 – situacija med varjenjem, 3 – zvarjena varjenca po varjenju [18]

sami procesi ob začetku varjenja in pri nastajanju vara so v veliki meri podobni eksplozijskemu varjenju.

Osnovni princip delovanja naprave za varjenje z magnetno silo je mogoče pojasniti s *sliko 2* in *sliko 3*. Na *sliki 2.1* vidimo začetno stanje pred varjenjem. V tem trenutku spustimo skozi navitje visokojakostni utripni tok, ki ga zagotovi kondenzatorski vir. Okoli tuljave deluje magnetno polje, ki v varjencih ustvari vrtilne tokove in ti ponovno svoje lastno magnetno polje. Obe magnetni polji pa povzročita mehansko silo. Na *sliki 2.2* je prikazan premik varjencev med varjenjem od tuljave proti drugemu varjencu. Na *sliki 2.3* vidimo izdelan zvarni spoj, ki je na-

stal v trdnem stanju. Linija spoja je valovita, kar je razvidno tudi s *slike*. Podobno napravo za magnetno pulzno varjenje cevastih varjencev vidimo shematsko prikazano na *sliki 3*. Razlika je samo v obliki tuljave in v obliki njenega jedra. Princip varjenja in vrsta uporabljene energije pa sta popolnoma enaka. Običajno na ta način spajamo dve tankostenski cevi s prekrvnim ali celo skladovnim spojem. Postopek je najbolj primeren za zvarjanje cevi iz različnih materialov, ki se s taljenjem slabo varijo.

Iz prikazanega sledi ugotovitev, da morajo biti tuljave za ustvarjanje magnetne mehanske sile, ki jo potrebujemo za varjenje, prilagojene obliki varjencev, ki jih spajamo.



Slika 3. Shematski prikaz naprave za magnetno pulzno varjenje cevi in drugih okroglih profilov [18]

2.2.2 Osnovni principi procesov pri varjenju z magnetno pulzno silo

Procesi, ki potekajo med varjenjem z magnetno pulzno silo, so izjemno zapleteni in še dokaj neraziskani. To je tipičen fizikalni problem, ker energija in material učinkujeta izjemno intenzivno. Med varjenjem uporabljamo energijo v različnih oblikah. Kot osnovi vir uporabljamo električni tok, ta ustvari magnetno polje in ta mehansko silo, ki učinkuje na material. Pogosto pa v procesu pri obravnavanem postopku spajanja nastopata dva materiala z zelo različnimi fizikalnimi in metalurškimi lastnostmi. Prav te lastnosti dveh različnih materialov pogosto zapletejo izbiro optimalnih parametrov varjenja.

Nekatere procese pa lahko popišemo z znanimi matematičnimi zapisi.

Vrtilne tokove I v A, v varjencu in tlak p v N/mm² lahko popišemo z enačbama (1) in (2)

$$\nabla \times I = -\kappa \cdot \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) \quad (1)$$

kjer je κ električna prevodnost v $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, B je gostota magnetnega polja v Vs/m² in t čas v s.

$$p = \frac{(B_0^2 - B_1^2)}{2\mu} = \left(\frac{B_0^2}{2\mu} \right) \cdot (1 - e^{(-2\kappa/\delta)}) \quad (2)$$

kjer je B_0 v Vs/m² gostota magnetnega fluksa v prvem varjencu in B_1 v Vs/m² gostota magnetnega fluksa v drugem varjencu, μ je relativna magnetna permeabilnost. To je snovna konstanta, ki opisuje vedenje snovi v magnetnem polju.

$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu}}$, kjer sta κ in μ že poznana in je ω kotna frekvenca spreminjanja magnetnega polja v s⁻¹.

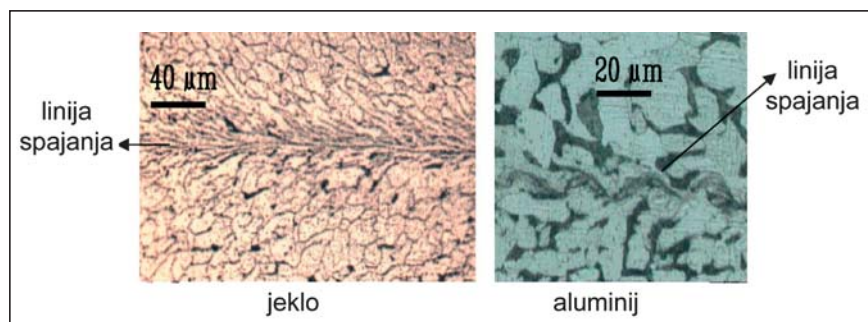
Toplotno energijo, ki se ustvari zaradi pretoka vrtilnih tokov, popišemo z enačbo (3)

$$Q = \frac{I^2}{\kappa} \quad (3)$$

Iz enačbe 1 lahko sklepamo, da je jakost vrtničnih tokov odvisna od prevodnosti varjenca in od gostote magnetnega pretoka. Čim večja je prevodnost varjencev in čim višjo gostoto magnetnega pretoka uporabimo, tem večji vrtnični tokovi nastopijo. Podobna ugotovitev sledi iz enačbe 2. Magnetna sila oziroma tlak se povečuje z jakostjo magnetnega pretoka in z zmanjševanjem permeabilnosti. Ogrevanje varjencev z joulsko toploto se povečuje z večanjem jakosti električnega toka in z zmanjševanjem električne prevodnosti, kar je popisano z enačbo (3) [19].

Mikrostruktura materiala se v točki spajanja popolnoma poruši. V okolici spoja se zgostijo in zagostijo številne dislokacije z različno usmerjenostjo in različno lego. Lokalni tlak v točki spajanja na začetku varjenja povzroči celo izbrizg dela materiala iz spodnjega varjenca. Na ta način začne nastajati valoviti spoj. Takoj po izbrizgu, v začetku varjenja, zgornji material prehití ta izbrizg in ga pokrije. To je prva perioda spoja. Nekaj materiala pa se iz spoja lahko tudi izbrizga, kar je po varjenju mogoče opaziti na spoju. Z izbrizgom pa lahko iz površine obeh varjencev odstranimo nečistoče. Z nadaljevanjem se opisani proces periodično nadaljuje.

Najpogostejše varimo skladove ali prekrivne zvarne spoje. Varjenci so lahko v obliki pločevine, cevi ipd. Običajno varimo skupaj dva varjenca. Eden je lahko fiksni, drugi pa gibljiv, običajno pa sta gibljiva oba. Osnova



Slika 4. Prikaz makroobrusov zvarnih spojev iz jekla (levo) in aluminija (desno), izdelanih z magnetnim pulznim varjenjem [18]

je, da varjenca stisnemo skupaj z zelo visoko hitrostjo, ta znaša tudi do 10^3 m/s. Pomembno je, da sta varjenca drug proti drugemu nagnjena za kot γ , ki naj ima vrednost okoli 30° .

Za nastajanje spoja so zelo pomembne fizikalno-metalurške lastnosti materialov, ki jih varimo. Za uspešen nastanek spoja morajo biti izpolnjeni naslednji pogoji: hitrost varjenja mora ustrezati lastnostim materialov in neenačbama 4 in 5 ter enačbi 6:

$$v \geq 1,14 \frac{\sin \gamma}{\gamma} \sqrt{\frac{H_v}{\rho}} = v_{\min} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \quad (4)$$

$$v \geq 1,96 \cdot v_{\min} \cdot \sin \quad (5)$$

$$v = C \cdot \sin \quad (6)$$

kjer je γ kot med varjencema, ρ v g/cm³ gostota materiala, ki ga varimo, in C v cm/s hitrost zvoka v vakuumu.

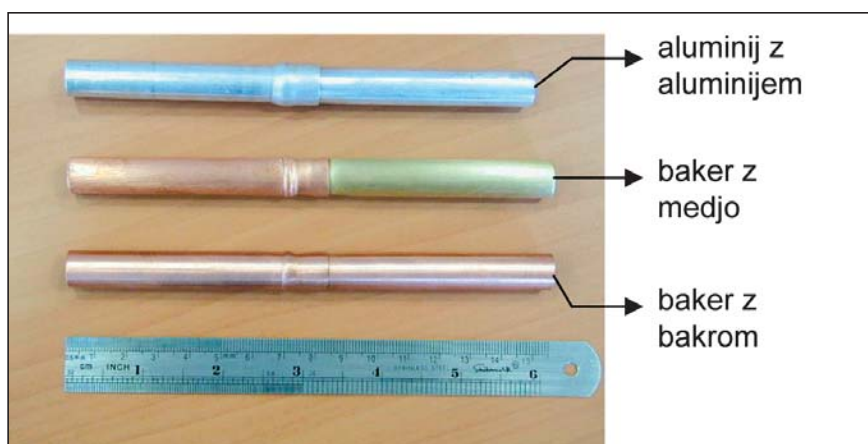
Iz zgornjih matematičnih zapisov sledi, da je potrebno za vsak mate-

rial izbrati pravi kot in ustrezno silo stiskanja. Pri varjenju barvnih kovin z nizko temperaturo tališča pride v točki spajanja do tališča materiala. To pomeni, da se tvorijo nove zlitine ali spojine ali pa le nove kristalne strukture. Na *sliki 4* sta prikazani dve mikrostrukturi spojev, izdelanih z magnetnim pulznim varjenjem. Na levi je prikazan spoj iz dveh jeklenih varjencev in na desni iz dveh aluminijastih varjencev.

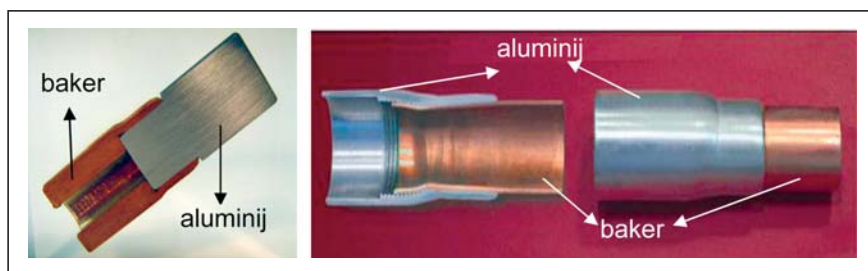
Pri natančni analizi makroobrusa spoja (*slika 4*) opazimo, da linija spajanja ni popolnoma ravna, ampak poteka valovito z neko periodiko. Parametri valov na liniji spajanja so odvisni od velikosti zrn materiala, ki ga varimo, in od varilnih parametrov. Pri varjenju aluminija znaša perioda nihanja valov spoja okoli $20 \mu\text{m}$ in amplituda okoli $10 \mu\text{m}$. Pri varjenju jekel pa je amplituda linije spoja mnogo nižja in perioda mnogo večja. V obeh primerih vidimo deformacijo zrn okoli linije spajanja. Pri podrobni analizi tega območja bi dejansko lahko ugotovili procese in zakonitosti, kot smo jih napisali zgoraj. Prizadeto območje okoli linije spajanja je široko okoli $20 \mu\text{m}$ in je odvisno od vrste materiala, velikosti kota med varjencema, zlasti pa od velikosti sile stiskanja. Na njeno velikost pa vplivata velikost tuljave in jakost električnega toka, ki se pretaka skozi tuljavo, kar smo zgoraj že zapisali in popisali tudi z enačbami.

■ 3 Možnosti uporabe magnetnega pulznega varjenja

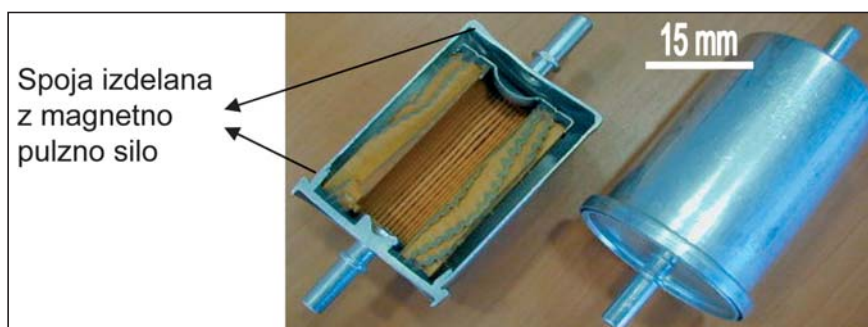
Raziskave varjenja z magnetnimi pulzi potekajo na številnih inštitutih, univerzah in drugih institucijah po svetu [1–18]. Uporaba tega postopka



Slika 5. Prekrivno spojene cevi iz enakih in različnih materialov, varjene z magnetno pulzno silo [25]



Slika 6. Prikaz spojev med aluminijem in bakrom [20 (levo), 23 (desno)]



Slika 7. Primer uporabe magnetnega pulznega varjenja za izdelavo ohišij filtrov za gorivo za motorje z notranjim zgorevanjem [22]

se je v zadnjem obdobju razširila na številne aplikacije. Najpogosteje se uporablja za spajanje mehatronskih elementov, za zapiranje raznih manjših ohišij, za zvarjanje različnih cevi med seboj, za ohišja raznih senzorjev, za zvarjanje avtomobilskih vrat iz različnih materialov in druge. Na sliki 5 so prikazane med seboj zvarjene cevi s prekrivnim spojem in iz različnih materialov. To so najpogostejše polizdelki, ki jih nato uporabimo za predelavo v druge produkte.

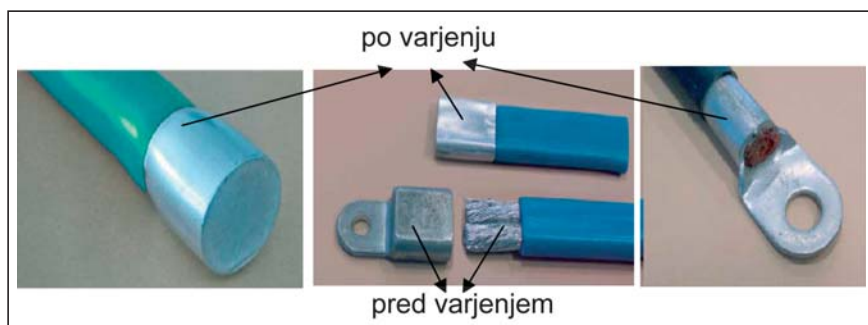
Na sliki 6 pa so spoji, izdelani iz bakra in aluminija.

Ti dve kovini imata zelo različne kemično-metalurške lastnosti. Razlikujeta se v kristalni strukturi, velikosti in obliki kristalne rešetke, v temperaturi tališča, toplotnem raztezu in še v številnih drugih lastnostih. Vse te

razlike otežujejo spajanje aluminija in bakra s taljenjem po klasičnih postopkih varjenja. Z novjšimi postopki varjenja s taljenjem, kot je elektronski snop, pa prej omenjena materiala lahko zvarimo.

Na sliki 7 vidimo konkreten izdelek, spojen z magnetnim pulznim varjenjem. Prikazan je zunanji videz filtra za tekoče gorivo za motorje z notranjim zgorevanjem in delen presek ohišja takšnega filtra. Ohišje filtra je kratka tankostenska cev, v kateri je filter. Ta cev je z obeh koncev zaprta s pokrovom. Varjenje med ohišjem in obema pokrovoma je bilo izvedeno v hladnem, z magnetno pulzno silo. Spoj je izdelan brez deformacij in skoraj brez zaostalih napetosti.

Naj bo: Spoja, izdelana z magnetno pulzno silo.



Slika 8. Primeri spojev med bakreno pletenico in bakrenim čveljčkom, izdelanih z magnetnim pulznim varjenjem [20]

Na sliki 8 vidimo nekaj primerov električnih kablov, ki so privarjeni na bakreni čveljček za prenos električnega toka. Tudi v tem primeru je bilo za spajanje uporabljeno magnetno pulzno varjenje.

Poleg navedenih in slikovno prikazanih bi lahko navedli še kar nekaj primerov. Naj na tem mestu omenim le še možnost spajanja z obravnavanim postopkom, na primer vrat za avtomobile, izdelanih iz jekla in aluminija. Magnetno pulzno silo lahko uporabimo za spajanje in preoblikovanje pločevine pri izdelavi vrat. Z uporabo te tehnologije lahko prihranimo tudi do 35 % pri masi enih vrat za srednje velik osebni avto [24].

4 Zaključne ugotovitve

Na koncu članka lahko zapišemo nekaj bistvenih ugotovitev. Postopek je primeren za medsebojno zvarjanje različnih zelo slabo varivih materialov. Zvarjamo lahko različno debele materiale v hladnem, brez taljenja. Postopek ima kar nekaj zelo ugodnih lastnosti.

Slaba lastnost postopka je, da je zanj potrebna zelo draga oprema in da mora biti v večini primerov oblika tuljave prilagajena obliki varjencev.

V članku so prikazane nekatere uporabne aplikacije tega postopka v praksi, toda kljub temu lahko zapišemo, da marsikateri raziskovalec na varilskem področju ta postopek zavrača kot neuporaben in premalo zanesljiv [26]. Kot razlog navajajo drago opremo, prilagoditev oblike tuljav obliki varjencev, potrebno visoko magnetno poljsko jakost, ki vpliva na okolico, relativno nizko produktivnost postopka.

Literatura

- [1] J. Triglav: Revolucija materialov, Življenje in tehnika, vol. 45 (1994), september, p. 24–34; prevod: National Geographic.
- [2] <http://www.freepatentsonline.com/7364062.html>; Magnetic pulse welding of steel prop-shafts, United States Patent

- 7364062, 2008.
- [3] <http://www.patentstorm.us/patents/6779550/claims.htm>; Magnetic pulse welder pressure canister – US Patent 6779550, 2004.
- [4] <http://brevets-patents.ic.gc.ca/op-ic-ipo/cpd/eng/patent/2421004/summary.html>; Apparatus for securing a yoke to a tube using magnetic pulse welding techniques, Canadian Patents Database, 2002.
- [5] <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=1987005245>; V. A. Chudakov, Device for centring cylindrical parts during magnetic pulse welding, PCT/SU1986/000021- European Patent Office, 1987.
- [6] <http://www.pstproducts.com/>.
- [7] F. M. Song, X. Zhang, Z. R. Wang and L. Z. Yu: A study of tube electromagnetic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 151, 1-3, 2004, 372–375
- [8] I. V. Belyy, S. M. Fertik, L. T. Khimenko: *Electromagnetic Metal Forming Handbook. A Translation of The Russian Book: Spravochnik po Magnitno-impul'snoy Obrabotke Metallov*. Translated By M. M. Altynova, Material Science and Engineering Dept., Ohio State University, 1996.
- [9] E. S. Karakozov: *Magnitno-impul'snija svarka metallov*, Metallurgija, Moskva 1979.
- [10] <http://www.dana.com/technology/innovative/default.shtm#magpulse>.
- [11] H. P. Furth: Production and use of high transient magnetic fields. *Review Science Instruments*, vol. 27, 195–219, 1956.
- [12] A. Weber: Magnetic pulse Technology Attracts New Users, *Assembly* vol. 36 (2002) august.
- [13] H. Steingroever: *Magnetisieren, Entmagnetisieren und Kalibrieren von Permanent – Magnet-systemen*. Magnet – Physik, dr. Steingroever nGmbH, Köln, 1988.
- [14] H. Steingroever: *Magnetische Messungen mit dem Fluxmeter*. Magnet – Physik, dr. Steingroever nGmbH, Köln, 1988.
- [15] C. P. Kumar, A. Pramanik: Analytical Estimation of Magnetic Field and Arc Velocities in a Walkie Edgar Spark Gap Device. *IEEE, Transactions on Magnetic*, vol. 31, 1, 1995.
- [16] M. Koschling, M. Veehmayer, D. Raabe: Production of Steel-Light Metal Compounds with Explosive Metal Cladding; *Proceeding of the 3 International Conference »High Speed Forming« Dortmund, 2008*, p. 23–32.
- [17] http://books.google.com/books?id=GFXJi6vb6AcC&pg=PA607&lpg=PA607&dq=Principle+of+Explosion+Welding&source=bl&ots=5XXU6bAsz1&sig=QcvDC4wxAFLx4TVuAWLh5xb4WeQ&hl=en&ei=AYqnSpnnEMGOsAbHlazuCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1#v=onepage&q=&f=false.
- [18] V. Shribman: Take advantage of the new magnetic pulse welding process. *Svetsaren*, vol. 56, (2001), 2–3, p. 14–16.
- [19] T. Aizawa, M. Kashani, K. Okagawa: Application of Magnetic Pulse Welding for Aluminium Alloys and SPCC Steel Sheet Joints, *Welding Journal*, vol. 86 (2007) May, p. 119s–124s.
- [20] http://www.bil-ibs.be/FR/Recherche/Recherche_2008_SOUDIMMA.htm.
- [21] V. Shribman: Magnetic Pulse Welding for Dissimilar and Similar Materials, *Proceedings of the 3 International Conference »High Speed Forming 2008«*, Dortmund, 2008, p. 13–22.
- [22] V. Shribman: Solid State Welding by Magnetic Pulse, Pulsar Ltd. Magnetic Pulse Solutions, P. O. Box 421 Yavne 81103, Israel.
- [23] <http://www.morasco.com/products.html>.
- [24] http://weldingmag.com/ar/wdf_78452/.
- [25] www.indiamart.com/company/1059373/products.html.
- [26] R. Maeriches: *The Liburdi Group of Companies Canada: Ustne konsultacije na sejmu »Schweißen und Schneiden«*, Essen, 2009.

Magnetic pulse welding; useful technique for joining of elements in mechatronics or just for theoretical and laboratorial research?

Abstract: Article surveys some basic characteristics of magnetic pulse welding. The first part presents the basics of magnetism and magnetic field. The principle of mechanical force is schematically shown as a result of the electrical and magnetic field. The magnetic pulse welding is presented in general, with the creation of mechanical force, which is needed for joining of two elements in hard state. Two apparatus for magnetic pulse welding are schematically shown and described. The first is used for welding of sheet parts and the second for joining of round parts i.e. mainly joining of pipes. A few practical examples of welding with the magnetic pulse are presented. At the end of the paper main conclusions are presented. This welding technique is especially suitable for joining of different materials together, like aluminium to steel or copper to steel and for joining of thin elements to thicker one, like for instance thin walled pipes to thicker pipe, different thinner covers or studs for closing of housing and pipe openings, or for joining of copper wicker with copper shoes and similar.

Keywords: magnetic pulse welding, welding in cold, electrical field, magnetic field, eddy currents, overlap joint,