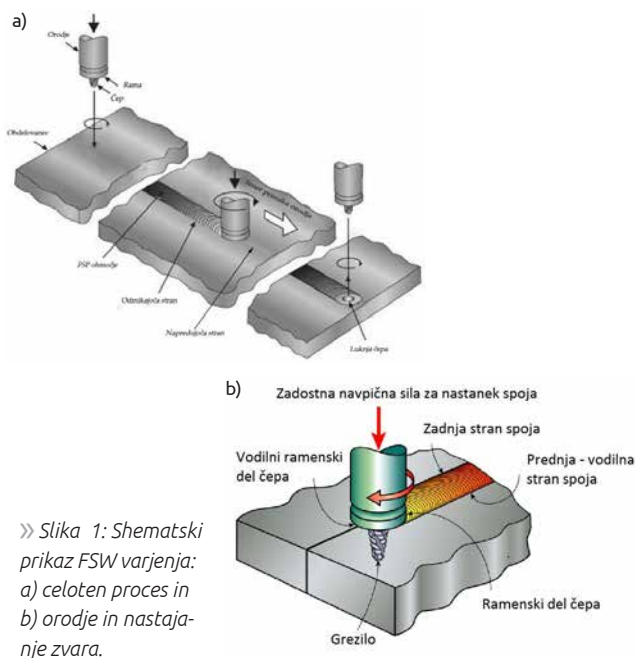


## » Varjenje s trenjem in mešanjem (FSW varjenje)

doc. dr. Damjan Klobčar

Friction stir welding (FSW) (angleško) v prevodu pomeni varjenje s trenjem in mešanjem. Postopek varjenja s trenjem in mešanjem je termomehanski postopek spajanja, kjer se rotirajoči mešalni čep s konstantno hitrostjo pomika po reži med dvema varjencema (Slika 1). Zaradi trenja med materialom in ramo orodja se ustvarja toplota.

Ta spoj močno ogreje, material se omehča (postane viskozen), grezilo (mešalni čep) orodja pa ustvarja mešanje materiala, dodatno ogreva zvarno mesto in ustvarja zvarni spoj. Pri tem se v segretem in zmehčanem materialu ustvarja dodaten pritisk, ki ga omejujejo orodje (rama in čep), okoliški hladnejši material in podpora. Poleg linijskega varjenja s trenjem je poznanih še več variant postopka med bolj razširjenimi je točkovno varjenje s trenjem in mešanjem (FSSW) in mikro varjenje s trenjem in mešanjem ( $\mu$ FSW), postopek pa je uporaben tudi za drobljenje kristalnih zrn (Friction stir processing – FSP), s katerim lahko v materialu dosežemo superplastične lastnosti.



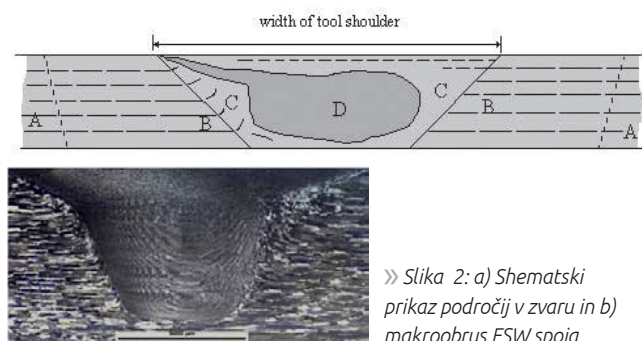
» Slika 1: Shematski prikaz FSW varjenja: a) celoten proces in b) orodje in nastajanje zvara.

### Nastanek zvarnega spoja

Med FSW/P pride do sproščanja torne toplote in intenzivne plastične deformacije, kar se odraža na pojavu rekristalizacije znotraj

območja mešanja (OM). Znotraj OM lahko pride tudi do raztapljanja precipitativ ali do njihove rasti. Glede na značilnosti nastale mikrostrukture po FSW/P ločimo v lokalno obdelanem področju štiri različna območja (Slika 2):

- A - nespremenjeno območje (osnovni material);
- B - toplotno vplivno območje (TVO);
- C - termo-mehansko vplivno območje (TMVO);
- D - območje mešanja (OM).



» Slika 2: a) Shematski prikaz področij v zvaru in b) makroobrus FSW spoja.

### Termo-mehansko vplivno območje (TMVO) - C

TMVO je prehodno območje, ki se nahaja med OM in TVO. TMVO je med FSW podvrženo povišani temperaturi in deformaciji. Deformirana razpotegnjena kristalna zrna so razporejena okoli OM. V TMVO lahko pri dovolj visokih temperaturah poteka dinamična poprava s podzrni znotraj deformiranih kristalnih zrn z velikokotnimi mejami. Statična rekristalizacija običajno ne poteče zaradi premajhne deformacije. V TMVO lahko v toplotno-utrdvalnih aluminijevih zlitinah nastane raztapljanje.

### Toplotno vplivno območje (TVO) - B

TVO ni deformirano, vendar zaradi povišane temperature v njem potečejo nekatere mikrostrukturne spremembe. TVO obdrži enako obliko kristalnih zrn, kot jo ima osnovni material, povišana temperatura pa vpliva na raztapljanje ali rast precipitativ.

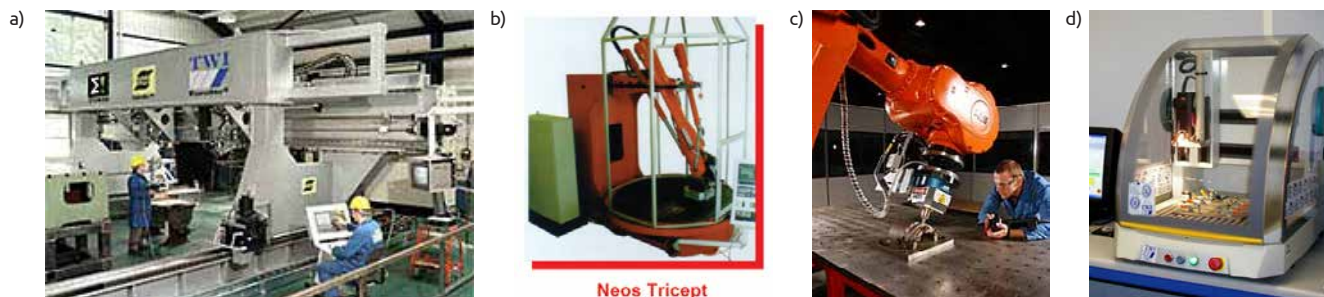
**Območje mešanja (OM) =** dinamično rekristalizirano območje

Zaradi torne toplote in intenzivne deformacije med FSW/P nastane v središču obdelovanega področja rekristalizirana,



doc. dr. Damjan Klobčar • Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo





» Slika 5: Primeri strojev za FSW varjenje: a) namenski portalni stroj, b) Tricept robot, c) industrijski robot in d) stroj za mikro FSW varjenje, izdelan iz naprave za mikro CNC frezalnega stroja [7].

MATERIAL	NAJVIŠJA DELOVNA TEMPERATURA [°C]
H-13	540
Ferro-TiC SK	590
MP-159	590
Stellite 6B	870
Ferro-TiC HT-6A	980
MAR-M-246	1040
Mo-TZM	1315
Renij	1980
Volfram	1980

» Tabela 1: Materiali orodij za FSW varjenje [6].

## Tipični primeri uporabe in težave

S postopkom FSW lahko varimo vse vrste aluminijevih zlitin (2000 Al-Cu, 5000 Al-Mg, 6000 Al-Mg-Si, 7000 Al-Zn, 8000 Al-Li, ter 1000 Al, 3000 Al-Mn, 4000 Al-Si, ulitke), Cu in Cu-zlitine, Ti in Ti-zlitine, svinec, Mg, polimere, jekla (ogljikova, konstrukcijska, nerjaveča, nikljeve zlitine). Glavna prednost postopka je zmožnost spajanja različnih materialov med seboj. Tu je potrebno paziti na položaj varjencev, smer rotacije orodja, položaj potovanja orodja,



» Slika 6: Primeri uporabe FSW varjenja (po vrsti): paneli za stene in pode vlakov, rezervoar nosilne rakete, vrata vozila Mazda RX8, aluminijasta platišča, varjenje jekla z aluminijem – nosilec motorja Honda Accord, primeri različnih spojev, izmenjevalec toplote, varjenje aluminijastih panelov, ohišje računalnika iMAC.

obliko orodja in varilne parametre, da je spajanje sploh mogoče.

Tipično se postopek FSW uporablja za varjenje v ladjedelništvu in pomorski industriji, avtomobilski industriji, transportni industriji (ladjedelnštvo, železnice, avtomobilska industrija), vesoljski in letalski industrija. Najbolj značilni izdelki so paneli za pode, stranice in strope, cisterne, kontejnerji, rezervoarji, vagoni, platišča, izmenjevalci toplote, ohišja telefonov in monitorjev, ... (Slika 6).

Postopek FSW varjenja ima naslednje prednosti. Dodajni material in zaščitni plin pri varjenju nista potrebna. Mogoče je spajanje različnih materialov med seboj. Varjenci se minimalno deformirajo. Spoje običajno ni potrebno več obdelovati. Priprava zvarnih robov je enostavna in cenena, saj so sprejemljivi tudi robovi odrezani z žago in tanjše oksidne plasti. Pri varjenju ni iskrenja, dimnih plinov in sevanja. Zvari imajo ponovljivo kakovost in dosegajo dobre mehanske lastnosti. Varjenje je mogoče v različnih legah. Orodja zdržijo veliko metrov zvarov (1 km var Al 6000).

Med slabosti varjenja FSW lahko štejemo potrebo po togem vpetju varjencev zaradi velikih sil pri varjenju. Pri varjenju je potrebna podpora pod varom. Na koncu vara je izstopna odprtina. Hitrosti varjenja so manjše kot na primer pri laserskem varjenju. Težje se varijo materiali, ki imajo različne debeline.

## Napake

Napake v zvarnih spojih so popisane v standardu ISO 6520 [8]. Tipične napake, ki se pri FSW varjenju pojavijo so: nepopolna prevaritev, prevelika penetracija zvara (koren), srh na temenu zvara, linearno neujemanje, vbočeno teme vara, neenakomerna širina zvara, neustrezna hrapavost površine zvara, podolgovata votlina in razpoke v zvaru (Slika 7).

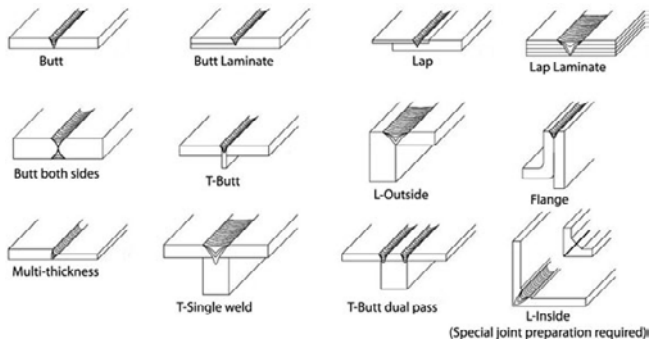
## Priprava zvarnega spoja (ujemanje, čiščenje)

Pri FSW varjenju lahko varimo sočelne zvarne spoje, prekrivne zvarne spoje, spoj T (z enim ali dvema zvaroma), vogelne spoje

Designation of Imperfection	Remarks	Testing and examination in Clause 4*	Acceptance levels in Clause 4*	Reference number in ISO 6520-1
Surface Imperfections				
Incomplete root penetration		ME	Not permitted	4021
Excess penetration		VT, ME	$h \leq 3 \text{ mm}$	504
Toe Rash		VT, ME	*	*
Linear misalignment		VT, ME	$h \leq 0.2t$ max. 2 mm	507
Underfill		VT, ME	$h \leq 0.1t$ max. 0.5 mm	*
Irregular width	Excessive variation in width of the weld	VT	*	513
Irregular surface	Excessive surface roughness	VT	*	514
Internal Imperfections				
Elongated cavity (see Note 7)		ME	$l \leq 0.05t$ max. 0.5 mm	2105
Hooking		ME	*	*

» Slika 7: Primeri napak v zvarnih spojih pri FSW varjenju [8].

(Slika 8). Pomembno je da je na spodnji strani pod orodjem vedno opora, ki prepreči odtekanje materiala. Spajamo lahko v vseh legah (vodoravno, navpično, nadglavno), varimo pa lahko tudi orbitalno.



» Slika 8: Primeri zvarnih spojev za FSW varjenje.

### Zdravje in varstvo pri delu

Pri varjenju s trenjem in mešanjem je potrebno paziti na mehanske poškodbe, ki so posledica težkih izdelkov (padec na dele telesa), in če zaradi visokih vrtilnih hitrosti odleti določen del iz prijemal (potrebna ustrežna mehanska zaščita). Dodatno nevarnost predstavljajo opeklene in ureznine pri rokovanju z vročimi in ostrimi izdelki

(ostanek zvara). Pri varjenju se pojavlja tudi hrup, zato je potrebno upoštevati varnostna priporočila glede izpostavljenosti hrupu.

### Literatura:

- [1] Smolej A, Klobčar D, Skaza B, Nagode A, Slaček E, Dragojevič V, Smolej S (2014) Superplasticity of the rolled and friction stir processed Al-4.5 Mg-0.35Sc-0.15Zr alloy. *Materials Science and Engineering: A* 590:239-245. doi:10.1016/j.msea.2013.10.027
- [2] Bhadeshia HKDH, DebRoy T (2009) Critical assessment: friction stir welding of steels. *Science and Technology of Welding & Joining* 14 (3):193-196. doi:10.1179/136217109x421300
- [3] DebRoy T, Bhadeshia HKDH (2010) Friction stir welding of dissimilar alloys – a perspective. *Science and Technology of Welding & Joining* 15 (4):266-270. doi:10.1179/174329310x12726496072400
- [4] Arbegast W.J. and Hartley P.J. June 1 – 5, 1998, p. 541, *Proceedings of the Fifth International Conference on Trends in Welding Research*, Pine Mountain, GA, USA
- [5] Zhang YN, Cao X, Larose S, Wanjara P (2012) Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly* 51 (3):250-261. doi:10.1179/1879139512y.0000000015
- [6] Rai R, De A, Bhadeshia HKDH, DebRoy T (2011) Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding & Joining* 16 (4):325-342. doi:10.1179/1362171811y.0000000023
- [7] Proizvajalci opreme za FSW varjenje: <http://www.twi-global.com/capabilities/intellectual-property-licensing/friction-stir-welding/equipment/>, dostopano dne: 28.7.15
- [8] ISO 6520, Nepopolnosti, testiranje in pregledovanje zvarnih spojev

## » Naprava za čiščenje in poliranje varov ter označevanje nerjavčega jekla

Podjetje Air Liquide je predstavilo napravo Weldline Opticlean. Naprava omogoča čiščenje in poliranje zvarov ter označevanje. Pri čiščenju na orodje nanese čistilno raztopino in izberete blazinico ali krtačo, ki omogoča boljši dostop v kote.

Na enak način lahko izvajate tudi poliranje, s tem da čistilno sredstvo zamenjate z polirno tekočino. Po poliranju ostane var sijoč. Naprava omogoča tudi označevanje na osnovi klišeja. Z uporabo naprave za čiščenje in poliranje povečate produktivnost, saj odpravite potrebo po namakanju, odpade pa tudi prekinjanje delovnega



procesa. Hitrost čiščenja povečate z višjim nastavljenim tokom ter z grafitnim nastavkom. Tak način čiščenja je ekološko bolj sprejemljiv, saj pri uporabi nevtralne raztopine ni potrebno uporabljati mask in rokavic, čiščenje se lahko opravlja v zaprtih prostorih, saj se ne pojavljajo strupeni hlapi. Po čiščenju pasivacija zvarov ni potrebna, vari pa so brez madežev.

» [www.weldline-alw.com](http://www.weldline-alw.com)

## FastMig X

Pripravite se na najboljše varjenje vašega življenja



Nastavite, kopirajte in prilagodite varilne parametre z rešitvijo ARC Mobile Control



VIRS d.o.o.

Industrijska ulica 4B  
SI - 9220 Lendava  
T: +386 2 574 24 45  
E: [info@virs.si](mailto:info@virs.si)  
[www.virs.si](http://www.virs.si)