



Friction Stir Welding European Qualifications

# CU1 – Základy FSW metody FSW špecialista a inžinier



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

# 1. Základy FSW metódy

## 1.1 – Úvod do FSW

## 1.1 – Úvod do FSW

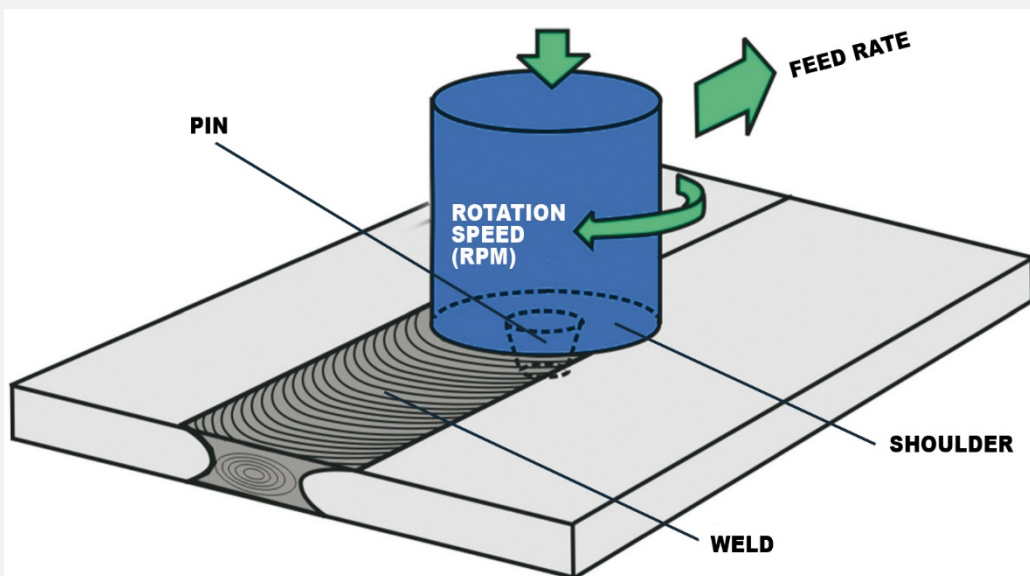
### Trecie zváranie s premiešaním (FSW)

- je metódou spájania materiálu, kde sa dva alebo viac dielcov spojí trecím ohrevom a premiešaním materiálu v splastizovanom stave spôsobenom netaviacim sa rotujúcim nástrojom, ktorý sa posúva pozdĺž zvaru.

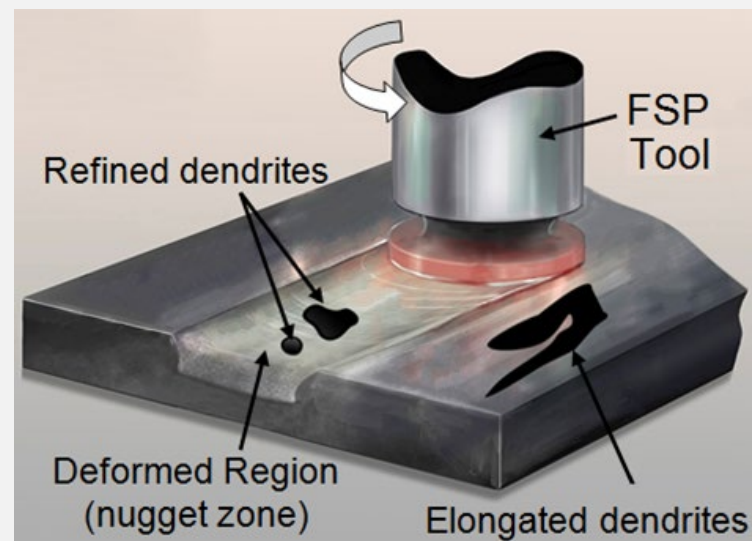
### Spracovanie trením s premiešaním (FSP)

- je jednou z variácií FSW metódy. FSW proces lokálne mení mikroštruktúru a vlastnosti oblasti spoja. Pri spracovaní trením s premiešaním sa FSW proces aplikuje na celý kus materiálu. Nástroj sa zasunie a posúva tam a späť, čím mení vlastnosti materiálu.

## 1.1 - Úvod do FSW

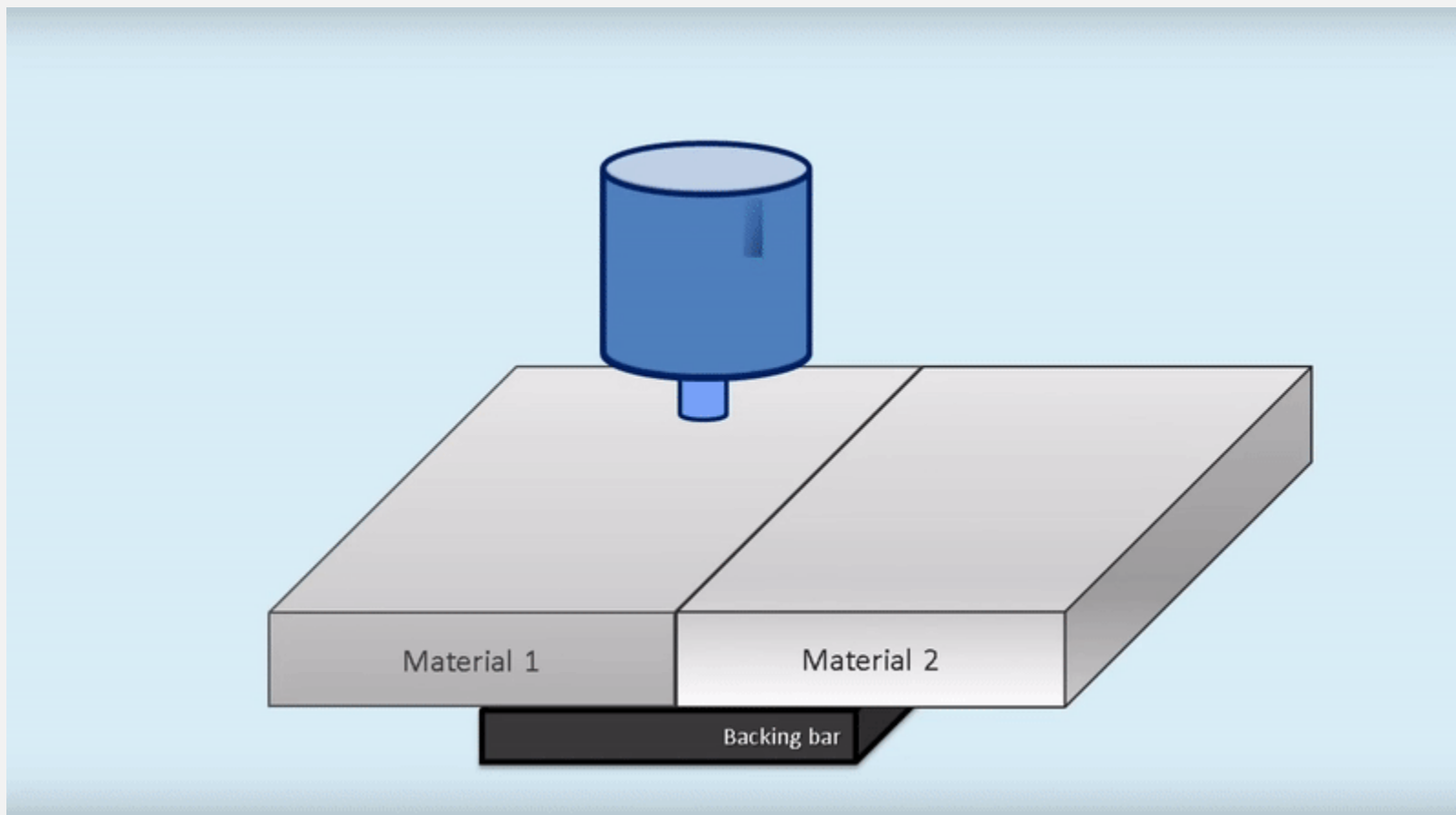


Zváranie trením s premiešaním (FSW)



Spracovanie trením s premiešaním (FSP)

## 1.1 - Úvod do FSW



## 1.1 - Úvod do FSW

### Metalurgické výhody:

- Metóda spájania v tuhom stave,
- Malé deformácie,
- Vysoká rozmerová stabilita a opakovateľnosť,
- Bez straty legujúcich prvkov,
- Vynikajúce mechanické vlastnosti spoja,
- Jemná rekryštalizovaná štruktúra,
- Bez výskytu kryštalizačného praskania.

## 1.1 - Úvod do FSW

### Environmentálne výhody:

- Nevyžaduje ochranný plyn,
- Vyžaduje minimálnu úpravu povrchu,
- Eliminuje straty obrúsením,
- Eliminuje rozpúšťadlá a odmasťovače,
- Úspory na prídavných materiáloch,
- Absencia škodlivých emisií.

## 1.1 - Úvod do FSW

### Energetické výhody:

- Znižuje spotrebu energie v porovnaní so zváraním laserom,
- Minimalizovaná váha spoja vedie k úsporám paliva pri automobilových, lodných a leteckých aplikáciách
- Zníženie váhy má za následok zlepšené využitie materiálu.

## 1.1 - Úvod do FSW

### Nevýhody FSW metódy:

- Počas štádia ponorenia dochádza k značnému opotrebovaniu nástroja
- Rýchlosť zvarovania pri jednoprechodových zvaroch niektorých zliatin je nižšia ako pri niektorých oblúkových metódach
- Zariadenie používané pri FSW metóde je masívne a drahé v dôsledku vysokých zvaracích síl
- Materiály s vysokým bodom tavenia, ako sú ocele a nehrdzavejúce ocele kladú vysoké nároky na zvarací nástroj
- Absencia prídavného materiálu spôsobuje, že túto metódu nemožno jednoducho aplikovať pri vyhovovaní kútových zvarov
- Výskyt výstupnej dierky po aplikácii konvenčnej FSW metódy.

## 1.1 - Úvod do FSW

FSW možno použiť v nasledovných odvetviach:

- Lodiarstvo a morské konštrukcie
- Automobilový priemysel
- Železnice
- Letectvo
- Výrobný priemysel
- Ostatné (energetika, ťažba ropy a plynu, jadrový priemysel, stavebníctvo)

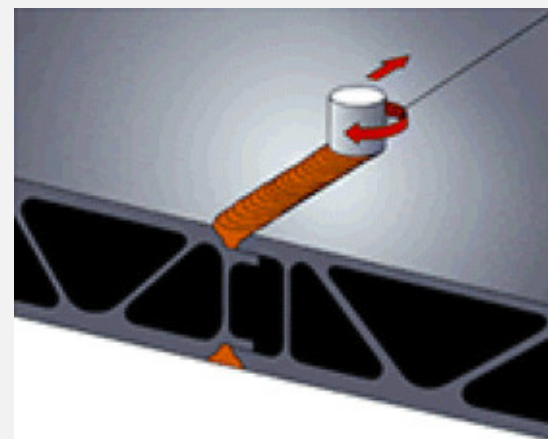
## 1.1 - Úvod do FSW

V železničnom odvetví ju možno využiť najmä pri výrobe panelov pre koľajové vozidlá

## 1.1 - Úvod do FSW



Železnice – automatické zváranie pretláčaných panelov



Zváranie pretlačeného profilu

## 1.1 - Úvod do FSW

Túto metódu možno použiť v **automobilovom priemysle** na:

- kryty,
- nádrže,
- závesy,
- piesty,
- disky kolies,
- prívesy.

## 1.1 - Úvod do FSW

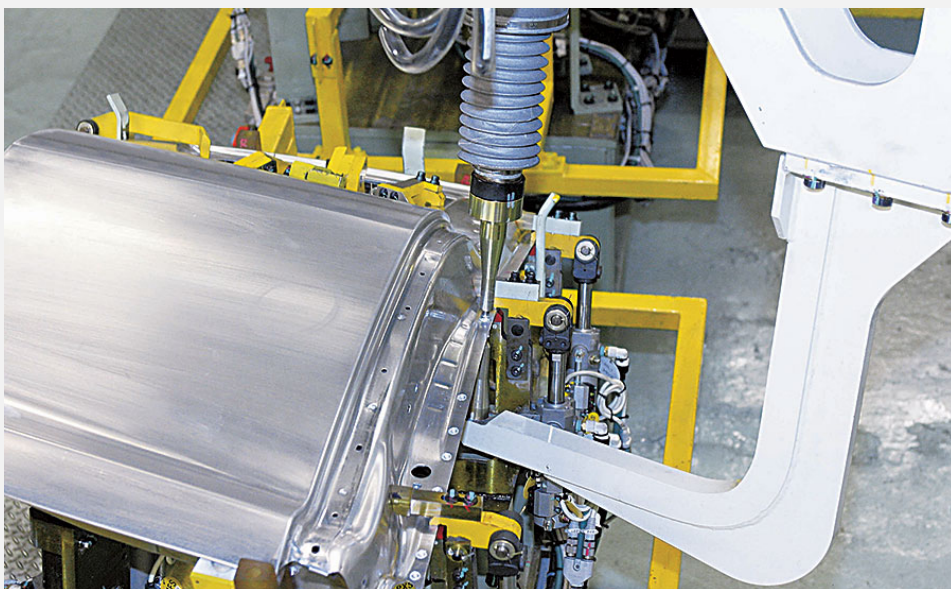


Automobil – výroba diskov kolies.



Robotické FSW panela karosérie

## 1.1 - Úvod do FSW

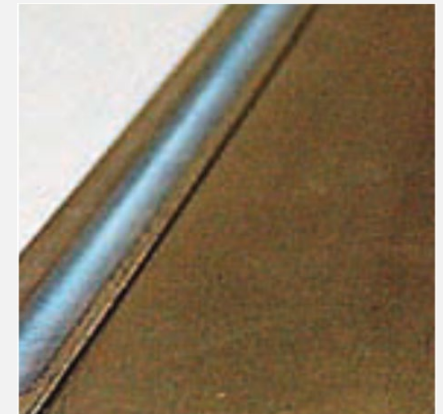


Bodové trecie zváranie s premiešaním



Spájanie nerovnakých kovov

## 1.1 - Úvod do FSW



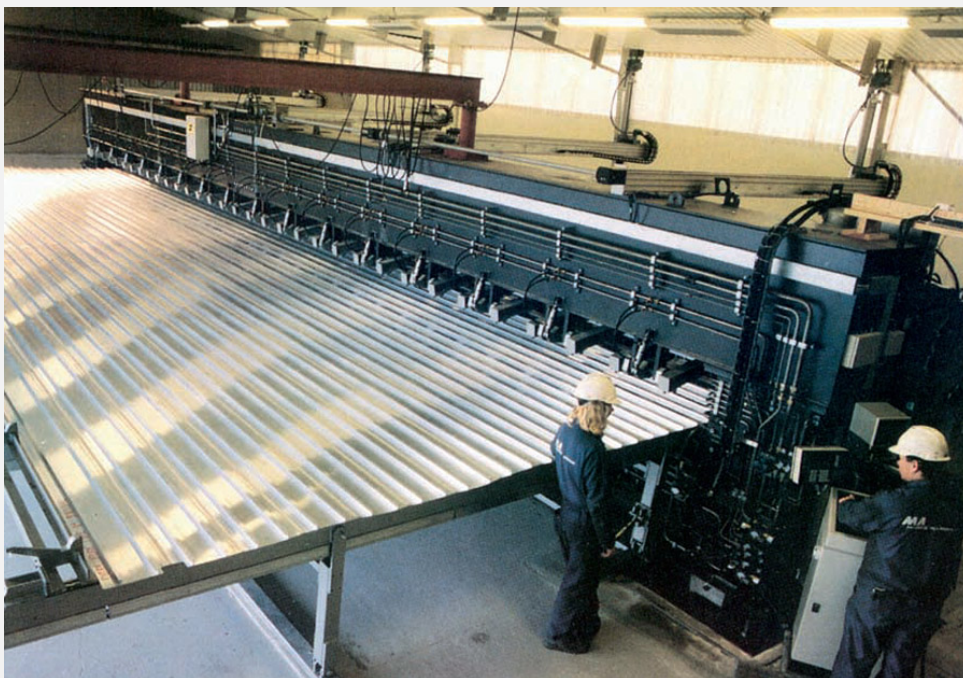
Možné aplikácie FSW v automobilke: kombinovaný spoj medzi dvomi rôznymi hrúbkami, preložený tesniaci zvar a preplátovaný spoj.

## 1.1 - Úvod do FSW

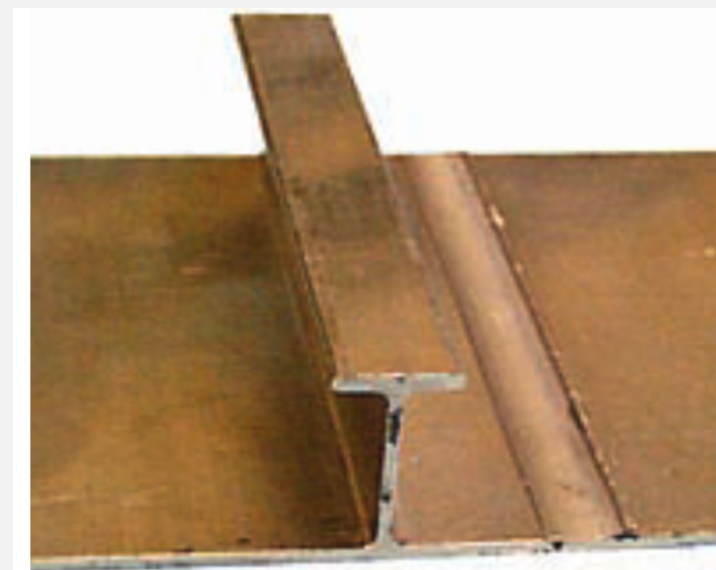
V **lodiarstve** možno túto metódu použiť na:

- Hliníkové panely na hlboké mrazenie na rybárskych lodiach,
- Spájanie pretláčaných výrobkov do panelov pre paluby a priečky,
- Voštinové panely,
- Panely odolné morskej vode.

## 1.1 - Úvod do FSW



Lodiarstvo – veľký FSW panel



Panel zvarený FSW metódou

## 1.1 - Úvod do FSW

V architektúre a stavbárstve možno túto metódu využiť na:

- Podlahy
- Chodníky
- Prechody
- Steny
- Markízy
- Zastrešenia
- Závesné systémy
- Podpery

## 1.1 - Úvod do FSW



Stavba – klenba vyhotovená FSW metódou



Lávka a zastrešenie

## 1.1 - Úvod do FSW

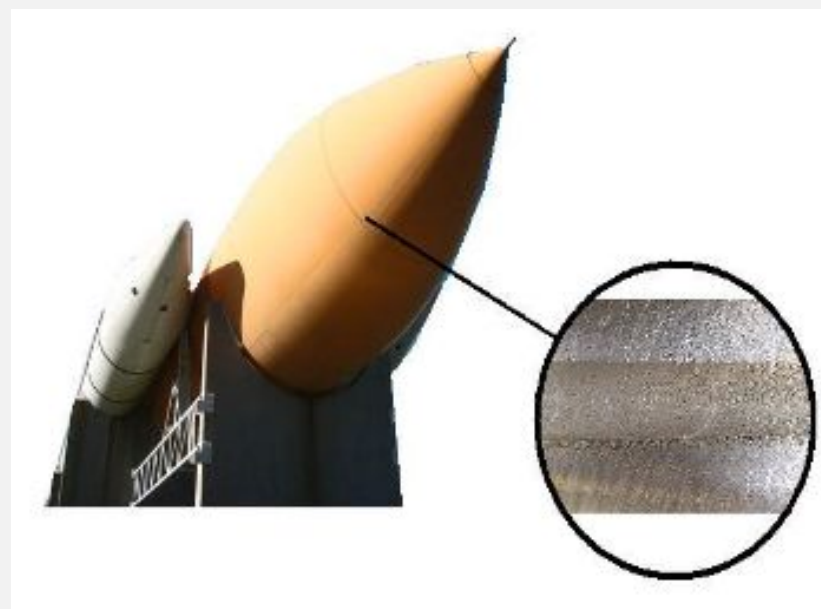
Túto metódu možno v **leteckom priemysle** využiť na:

- Palivové nádrže pre kozmické lode
- Príchytky nakladacích rámp
- Hliníkové panely
- Sendvičové zostavy
- Kryty pristávacieho podvozku
- Trupy lietadiel
- Krídla

## 1.1 - Úvod do FSW



Letecký priemysel – panely lietadla



Palivová nádrž rakety

## 1.1 - Úvod do FSW

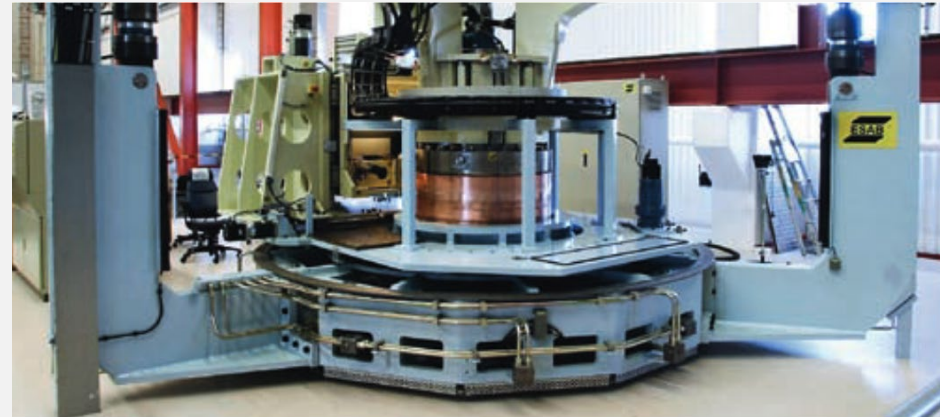
Túto metódu možno použiť tiež na:

- Skrine motorov a reproduktorov
- Chladiče
- Systémy na kúrenie, ventiláciu a klimatizáciu
- Vákuové nádoby
- Sušiacie podnosy – v potravinárstve
- Medené nádrže na jadrový odpad

## 1.1 - Úvod do FSW

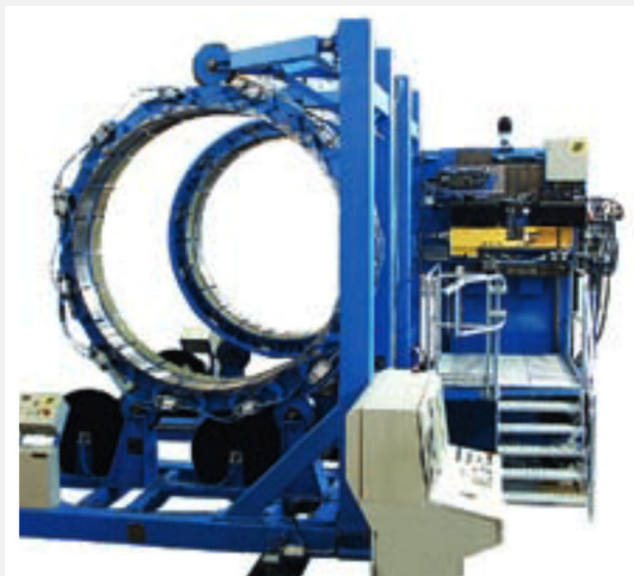


## 1.1 - Úvod do FSW

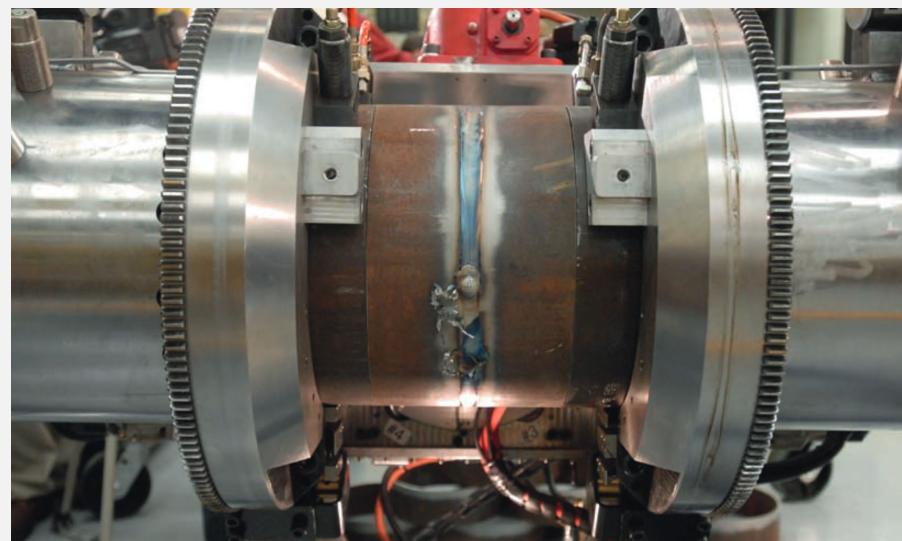


Jadrový priemysel – Medené puzdro s liatinovou vložkou na jadrové palivo zvarené FSW metódou

## 1.1 - Úvod do FSW

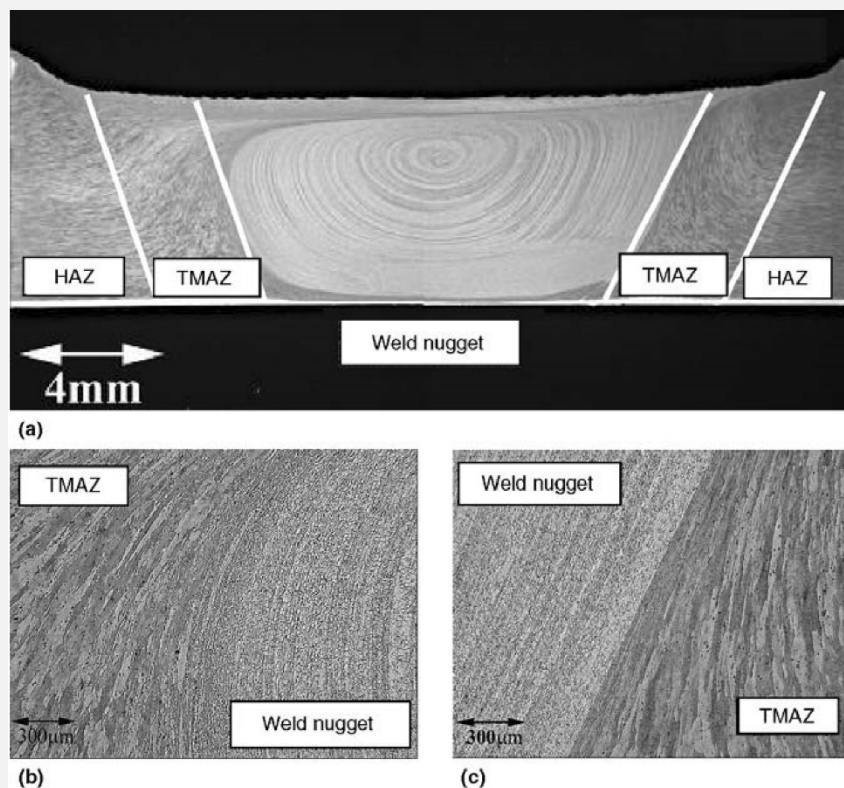


Stroj na obvodové zváranie



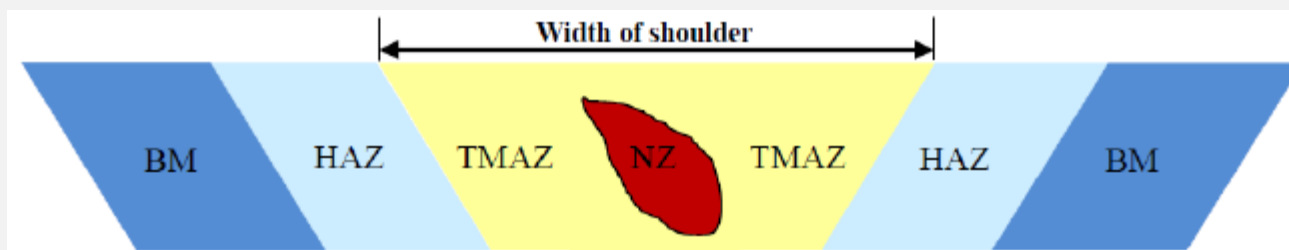
Orbitálne trecie zváranie ocelevej rúry

## 1.1 - Úvod do FSW



(a) Mikrosnímka zobrazujúca rôzne oblasti zvaru hliníkovej zliatiny. (b) Ústupová strana. (c) Postupová strana.

# 1.1 - Úvod do FSW



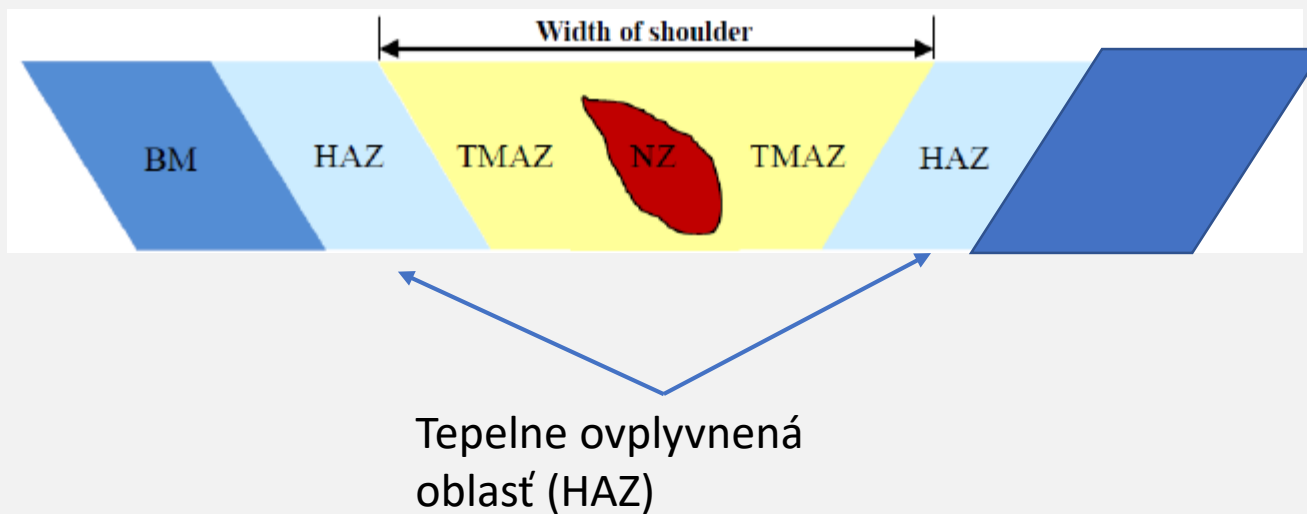
Oblasť základného  
materiálu (BM)

## 1.1 - Úvod do FSW

### Neovplyvnený základný materiál

- Táto oblasť sa nachádza tesne vedľa zvaru, ktorý má tú istú mikroštruktúru a mechanické vlastnosti ako mal pred FSW procesom. Hoci v ňom došlo k určitým tepelným zmenám, no tie nie sú dostatočné na to, aby modifikovali mikroštruktúru a/alebo mechanické vlastnosti zvarového spoja. Rozhranie medzi premiešanou oblasťou a základným materiálom je pomerne rozptýlené a hladké na ústupovej strane nástroja, pričom na postupovej strane je pomerne výrazné.

# 1.1 - Úvod do FSW

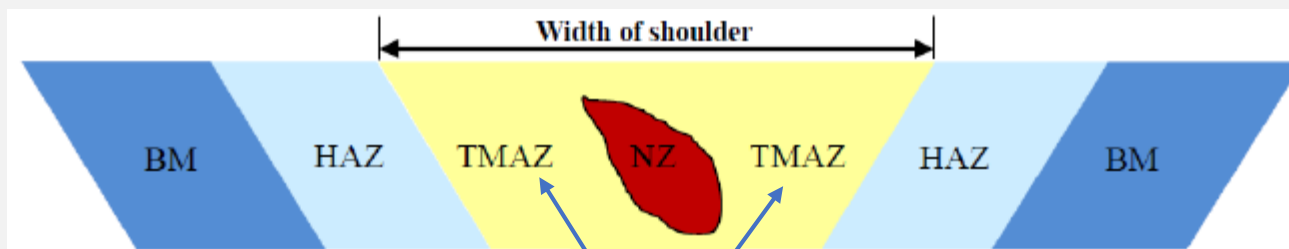


## 1.1 - Úvod do FSW

### Tepelne ovplyvnená oblasť (HAZ)

- Ak sa posunieme smerom ku stredu zvaru, nájdeme tepelne ovplyvnenú oblasť. V tejto oblasti je mikroštruktúra ako aj mechanické vlastnosti ovplyvnené teplom generovaným FSW procesom, pričom tam nedošlo k žiadnej plastickej deformácii.

# 1.1 - Úvod do FSW



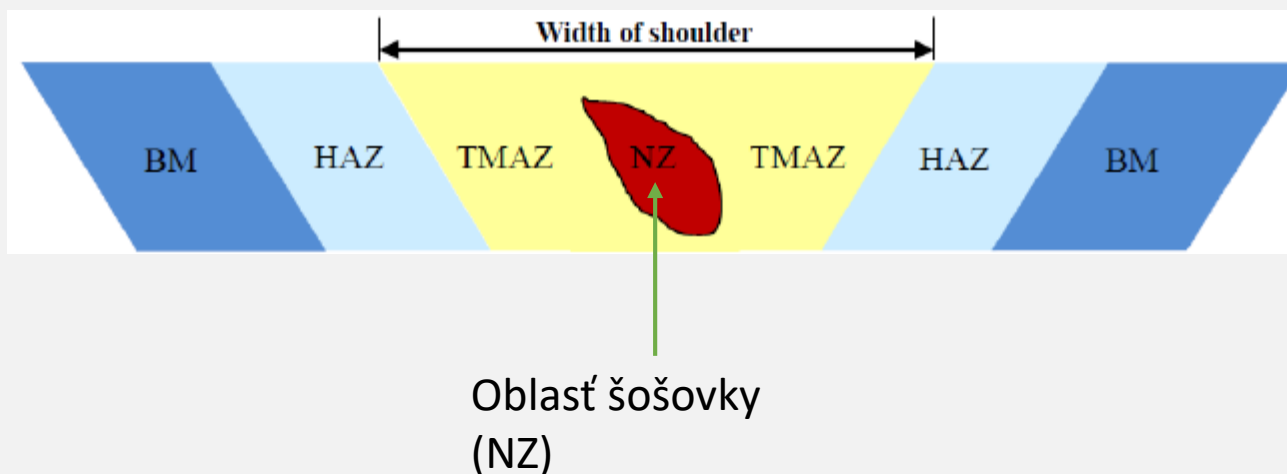
Tepelno-mechanicky ovplyvnená oblasť  
(TMAZ)

## 1.1 - Úvod do FSW

### Termo-mechanicky ovplyvnená oblasť (TMAZ)

- Oblasť, ktorá bola vystavená mechanickej deformácii
- V tejto oblasti je materiál plasticky deformovaný a tento proces je porovnateľný s tvárnením kovového materiálu za tepla
- Často je definovaný ako bez rekryštalizácie. Toto platí najmä pre hliník, ktorý je aj najčastejšie používaným materiálom pre trecie zvarovanie s premiešaním, ale pri iných materiáloch môže dochádzať k rekryštalizácii v tejto oblasti.
- K takým materiálom patrí titán a jeho zliatiny, austenitická nehrdzavejúca oceľ a meď.
- Existuje výrazná hranica medzi zvarovou šošovkou a TMAZ.

## 1.1 - Úvod do FSW



## 1.1 - Úvod do FSW

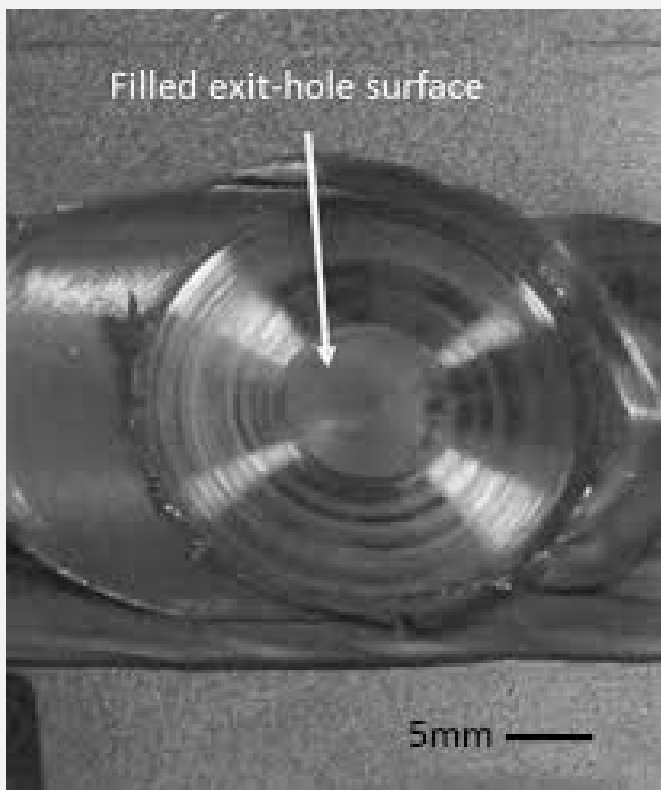
### Oblasť premiešania (SZ) alebo zvarová šošovka

- Oblasť s intenzívnou plastickou deformáciou a trecím ohrevom počas FSW procesu, čo vedie k vzniku rekryštalizovanej jemnozrnnej mikroštruktúry.
- To je oblasť ktorou predtým prešiel hrot nástroja.
- Výraz oblasť premiešania sa často používa pri spracovaní trením s premiešaním, kedy sa spracúvajú veľké objemy materiálu.
- Stredová šošovka obsahuje jemné, rovnoosé zrná a nachádzajú sa tam aj vrstvy s rôznou hrúbkou, ako sú napr. „cibuľové prstence“ (známe tiež ako “metalurgický pás”).
- Tento makroskopicky pozorovateľný, opakovaný vzor na priečnom a pozdĺžnom úseku zvaru je unikátnou charakteristikou vyskytujúcou sa počas FSW a príbuzných metód.
- Výsledkom je, že jemnozrná štruktúra poskytuje vynikajúce mechanické vlastnosti, únavovú pevnosť, zlepšenú tvárnosť a výnimočnú superplasticitu.

## 1.1 - Úvod do FSW



## 1.1 - Úvod do FSW



Vyplnený povrch výstupnej diery

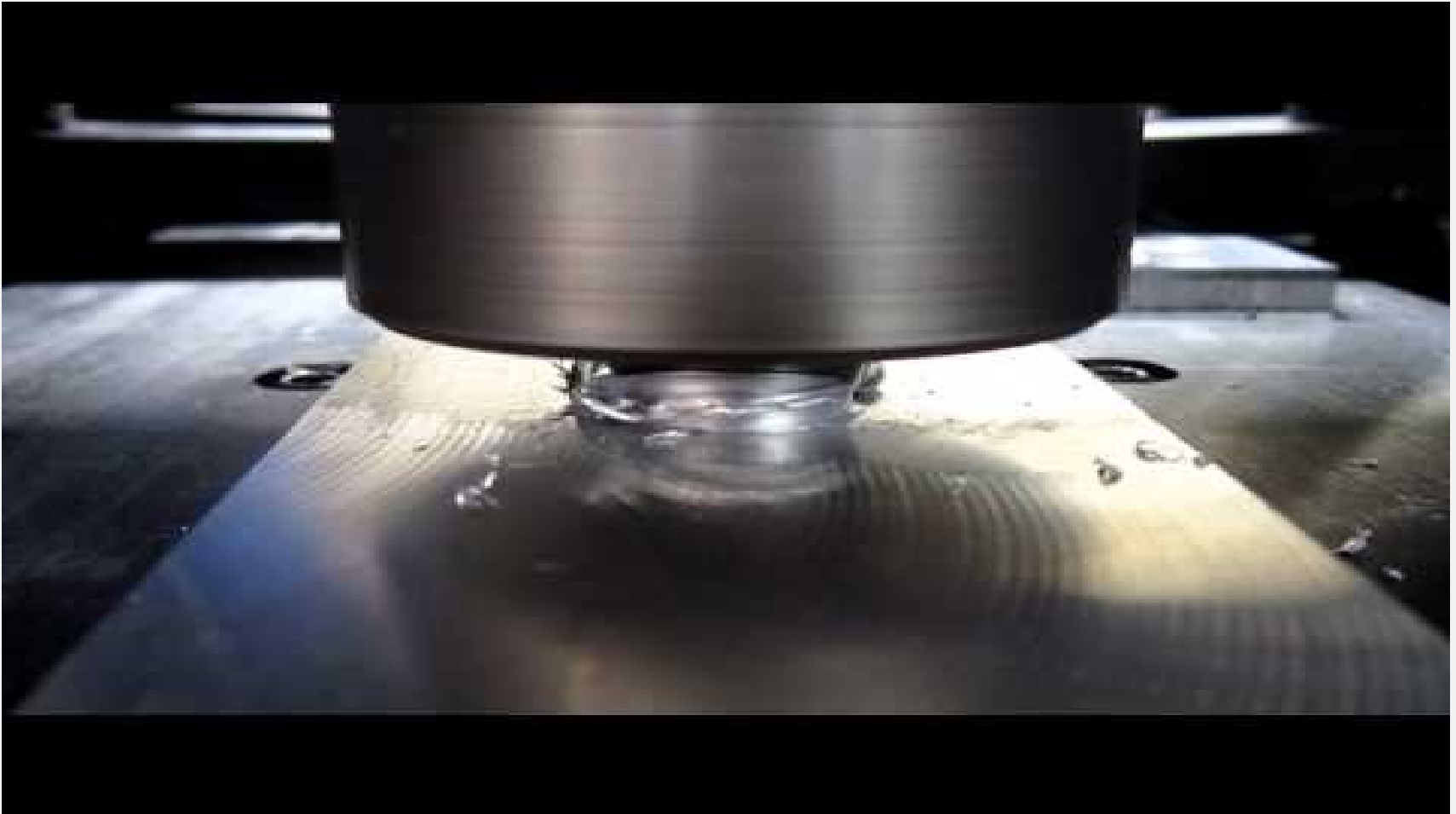


Výstupné diery tandemového FSW

## 1.1 - Úvod do FSW



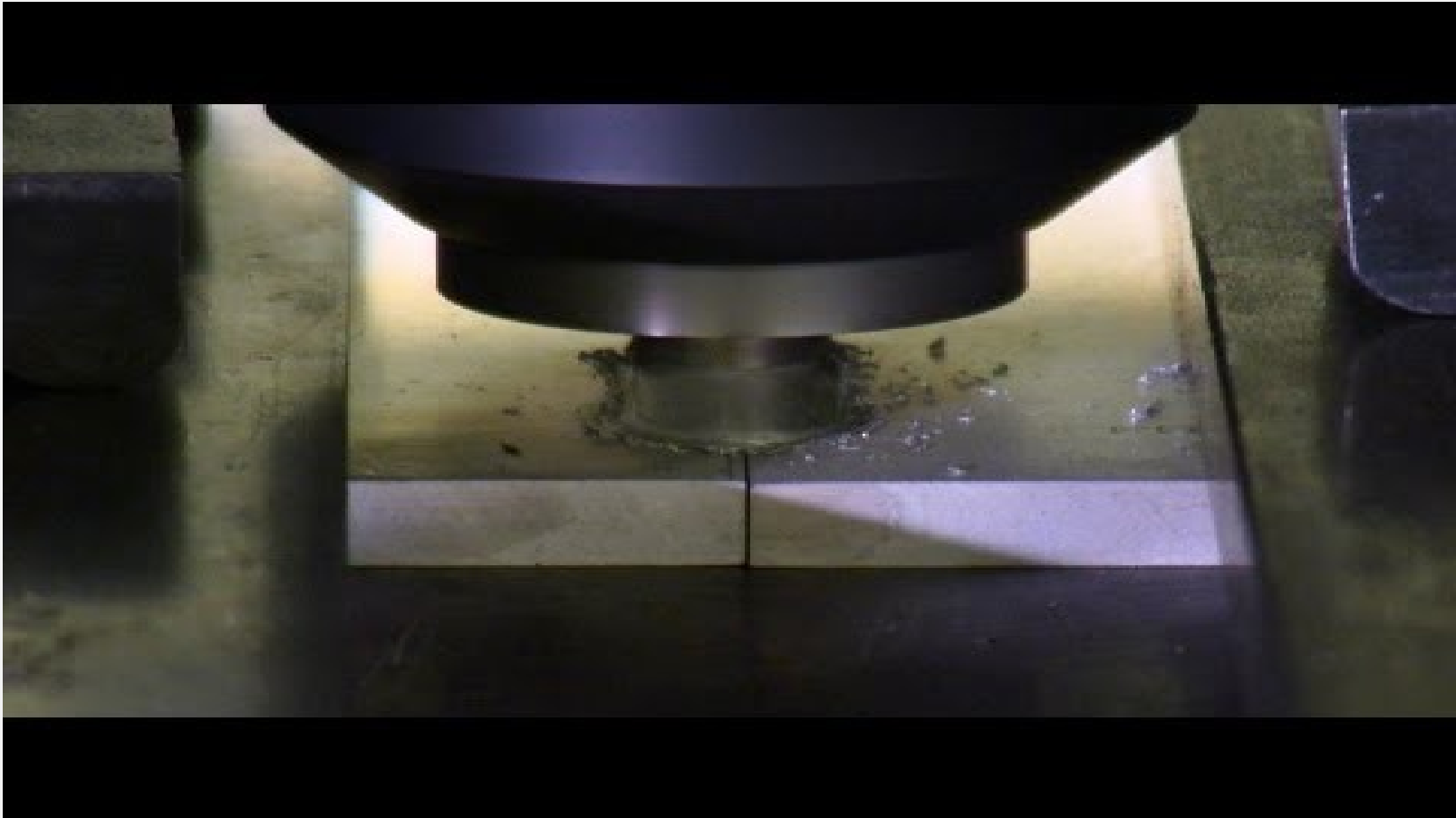
## 1.1 - Úvod do FSW



## 1.1 - Úvod do FSW



## 1.1 - Úvod do FSW

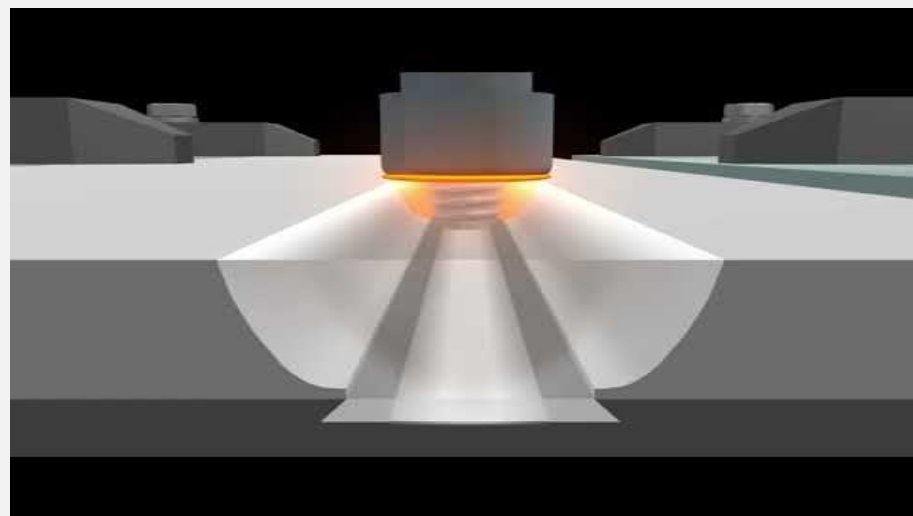
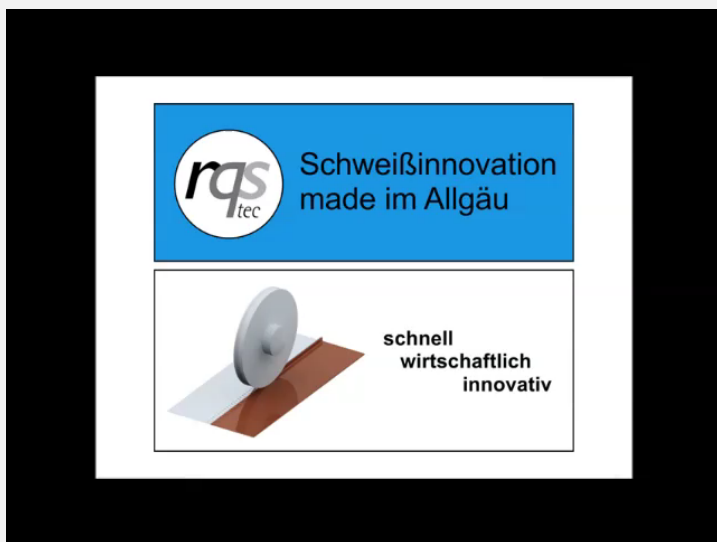


# 1.1 - Úvod do FSW

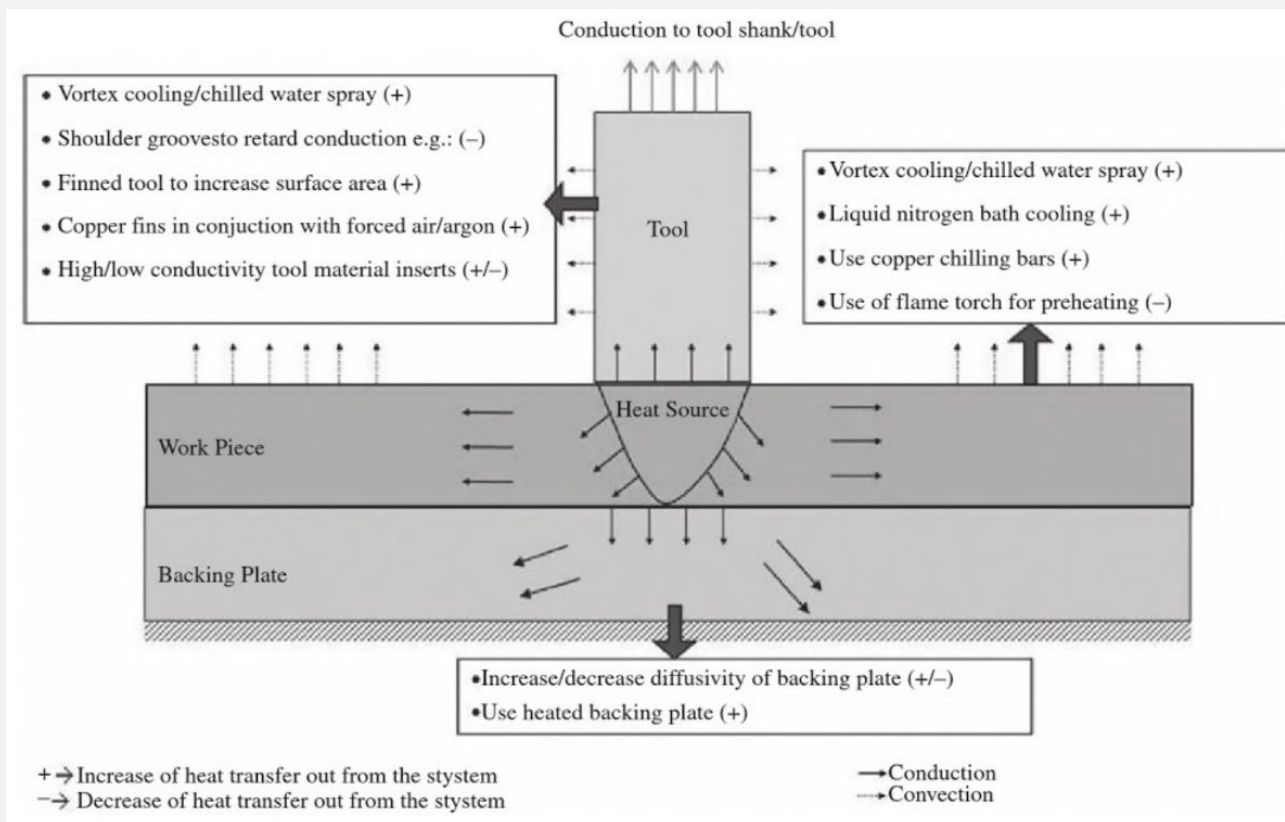
Vyvinuté na základe trecieho zvarovania s premiešaním



Trecie roztláčacie zvarovanie (nem. Reibquetschschweißen)    Trecie miešacie spojovanie



## 1.1 - Úvod do FSW



Metódy riadenia tepla, ktoré možno použiť pri metóde trecieho zvarovania s premiešaním. Šípky označujú prenos tepla.

## 1.1 - Úvod do FSW



# 1. Základy FSW metódy

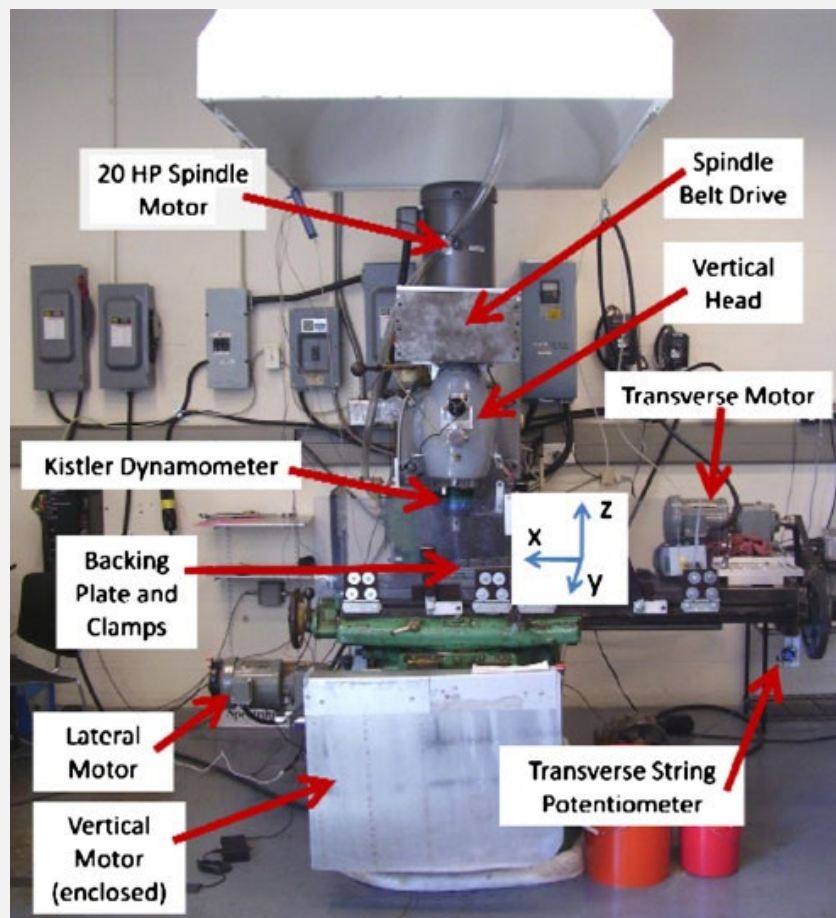
## 1.2 – Zváracie zariadenie

## 1.2 – Zváracie zariadenie

K základným súčastiam systému patria:

- hriadeľ,
- motory,
- mechanizmus motorového pohonu,
- FSW nástroj.

## 1.1 - Úvod do FSW



Príklad konfigurácie FSW systému

## 1.2 – Zváracie zariadenie

K ďalším systémom, ktoré možno zahrnúť ku stroju patrí :

- CNC riadenie,
- Výrobné monitorovanie,
- Monitorovanie teploty zvaru,
- Sledovanie spoja,
- Plynová ochrana,
- Strojné upínanie,
- Systém získavania údajov,
- Výškové snímanie.

## 1.2 - Zváracie zariadenie

Konvenčné obrábacie stroje:

- Nízke počiatkové náklady
- Flexibilitu možno zlepšiť použitím prídavných motorov (dodatočné stupne slobody - DOF)
- Tuhosť stroja – potrebuje spevnenie
- Vyžaduje sa riešenie pre riadenie sily na prevenciu poškodenia zariadenia, zabezpečenie bezpečnosti obsluhy a dosahovanie vysokej kvality zvarov

Frézka upravená pre FSW metódu



## 1.2 - Zváracie zariadenie

### Robotické FSW stroje:

- Vysoká reprodukovateľnosť a pružnosť
- Pomerne nízke náklady
- Zváranie po 3D trajektóriách
- Automatizácia procesu
  
- Nízka presnosť, ktorá sa zhoršuje ak sú vystavené vysokému zaťaženiu
- Pomerne nízka tuhosť a priemerná únosnosť

### Robot s kĺbovým ramenom



## 1.2 - Zváracie zariadenie

### Robotické FSW stroje

- Podporujú vyššie záťaže
- Podstatne vyššia tuhosť ako pri robotoch s kĺbovým ramenom
- Zváranie po 3D trajektóriách
- Automatizácia procesu
  
- Ich cena je podstatne vyššia a ich pracovný dosah je podstatne menší ako pri robotoch s kĺbovým ramenom

### Paralelne-kinematický robot

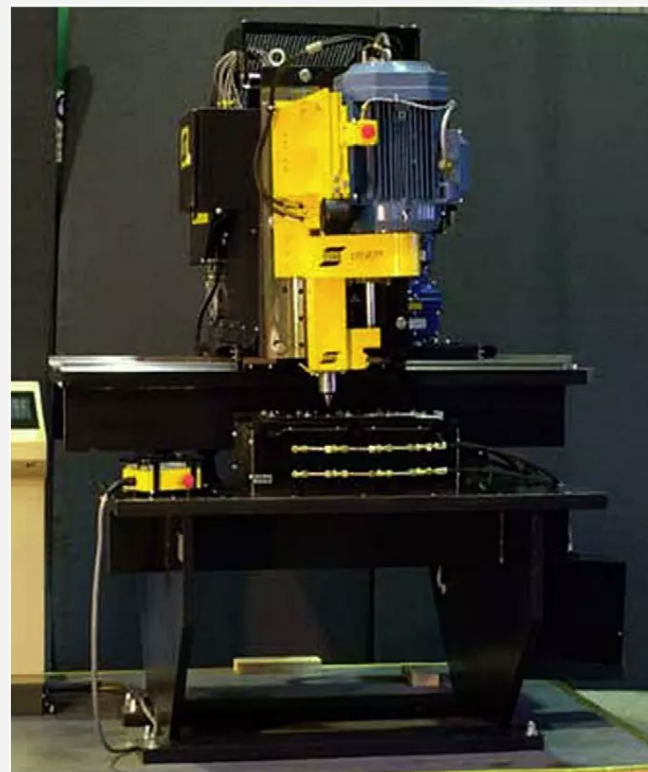


## 1.2 - Zváracie zariadenie

### Jednouúčelové FSW stroje:

- Vysoká únosnosť, tuhosť, presnosť a dostupnosť
- Možné rôzne konfigurácie, čím sa zvyšuje úroveň flexibility
- Jednouúčelové FSW stroje sú najrobustnejšie a konštrukčne najtuhšie stroje (na zváranie materiálov s vysokým bodom tavenia)
- Dost' drahé a ich cena narastá so zvyšovaním flexibility

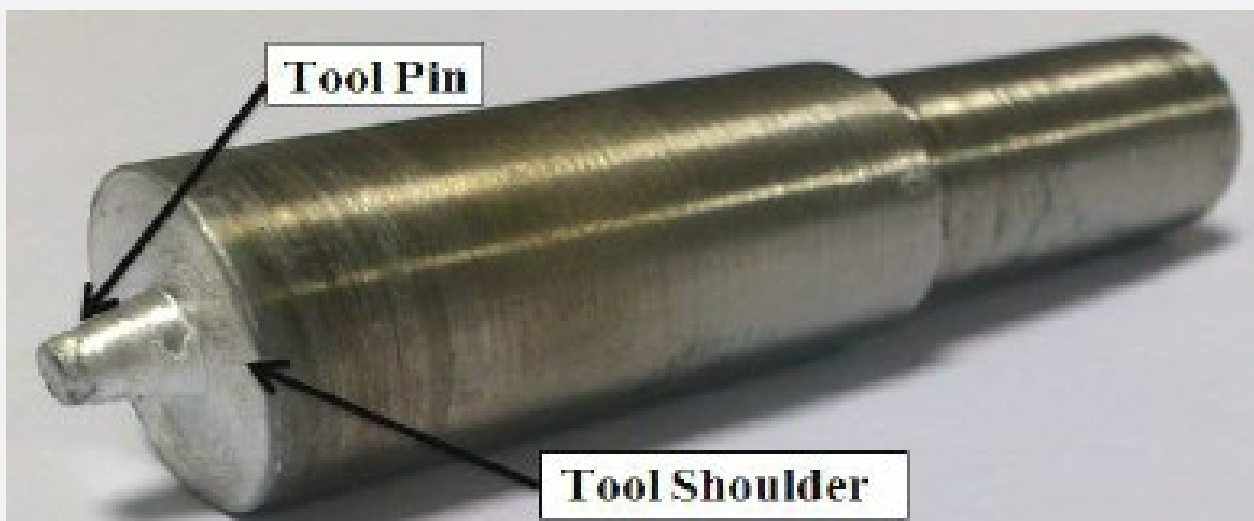
### Jednouúčelový FSW stroj



## 1.2 - Zváracie zariadenie

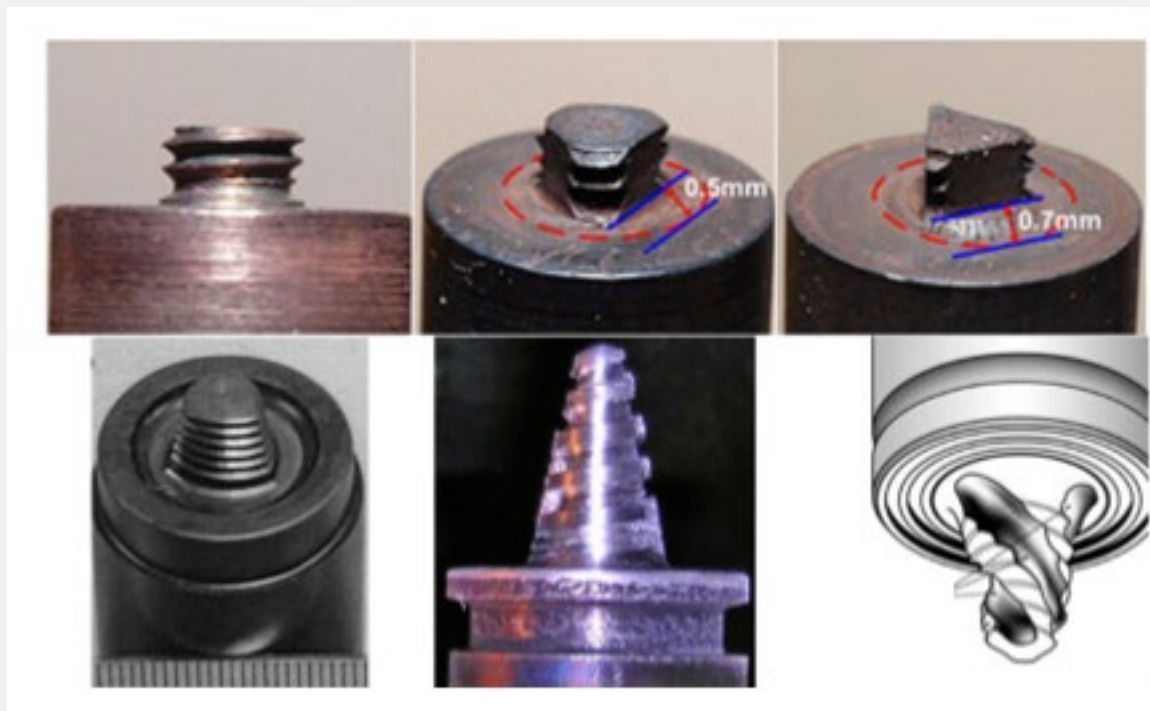
	Frézka	FSW stroj	Paralelný robot	Kĺbový robot
Flexibilita	Nízka	Nízka/stredná	Vysoká	Vysoká
Cena	Stredná	Vysoká	Vysoká	Nízka
Tuhosť	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Nízka
Pracovný dosah	Stredný	Stredný	Nízky	Vysoký
Čas nastavenia	Nízky	Vysoký	Stredný	Stredný
Počet programovateľných volieb	Nízky	Stredný	Vysoký	Vysoký
Kapacita na výrobu zložitých zvarov	Nízka	Stredná	Vysoká	Vysoká
Typ riadenia	Pohybové	Pohybové/silové	Pohybové	Pohybové

## 1.2 - Zváracie zariadenie



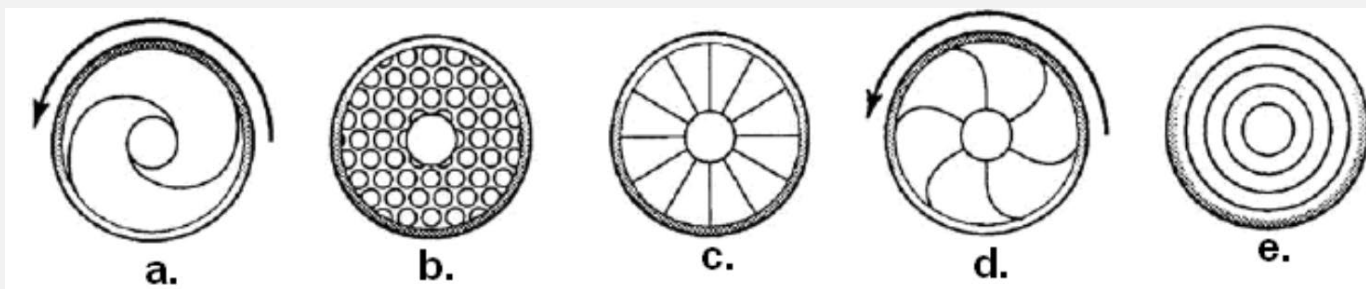
Príklad geometrie nástroja

## 1.2 - Zváracie zariadenie



Rôzne typy geometrie hrotu

## 1.2 - Zváracie zariadenie



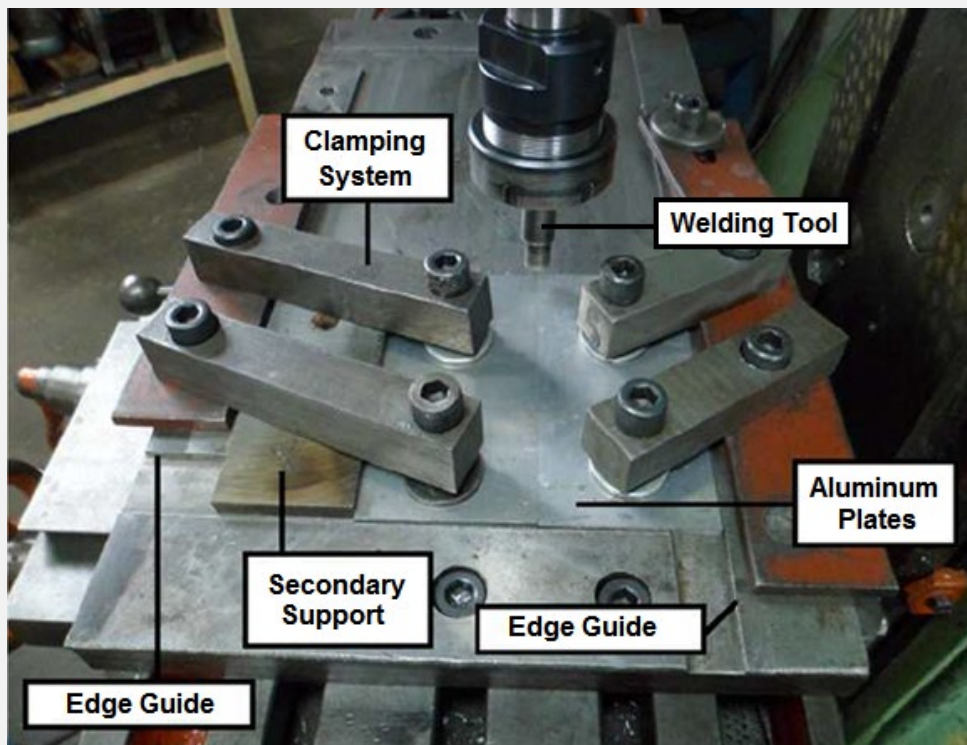
Rôzne typy ramena (hore) a príklad konvexného a špirálového ramena (dole)

## 1.2 - Zváracie zariadenie

Bežné upínacie systémy zahŕňajú:

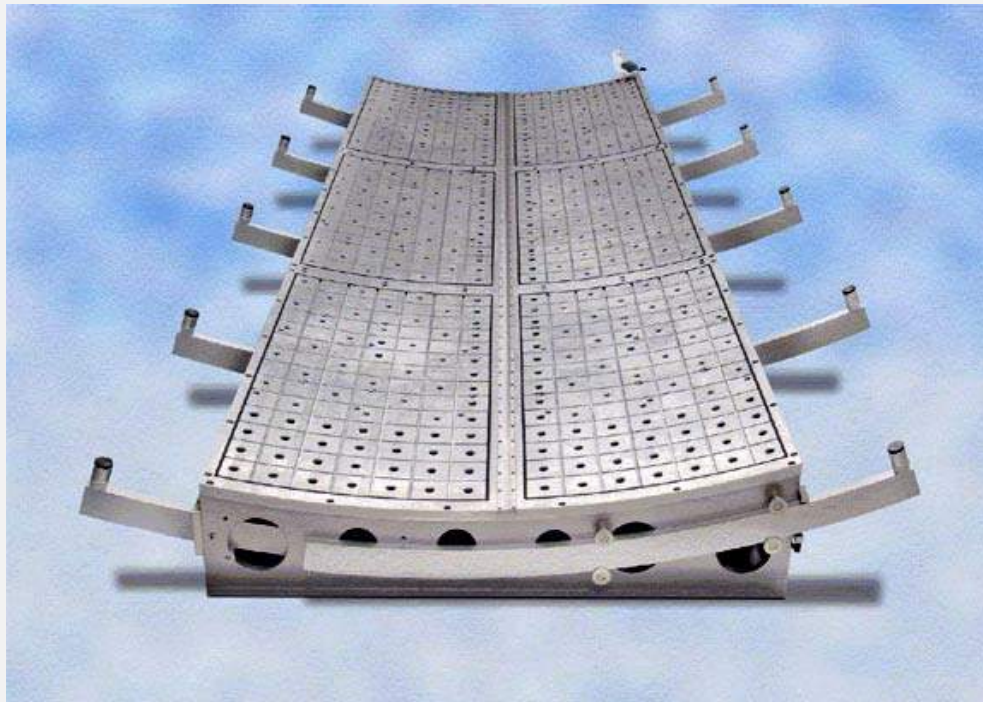
- Upínacie čeľuste,
- Hydraulické a pneumatické systémy,
- Vákuové upínacie systémy.

## 1.2 - Zváracie zariadenie



Upínací systém

## 1.2 - Zváracie zariadenie



Vákuový upínací systém

## 1.2 - Zváracie zariadenie

### Chladením zdokonalené FSW:

- Vodné
- S kvapalným CO<sub>2</sub>
- S kvapalným dusíkom
  
- Oceľ, titán, nehrdzavejúca oceľ a vysokoteplotné zliatiny sa zvárajú FSW metódou s chladivom ochladzovanými nástrojmi

### Ohrev:

- FSW s elektrickým ohrevom
- FSW s podporou lasera
- FSW s podporou oblúka
- FSW s podporou ultrazvuku
  
- Ohrev môže minimalizovať opotrebovanie nástroja (najmä pri ponáraní) a zvýšiť rýchlosť posuvu nástroja

## 1.2 - Zváracie zariadenie

K hlavným súčastiam FSW stroja patrí:

- Zváracia hlava a jej motor,
  - Vodiace koľaje a ich súčasti,
  - Hydraulické jednotky.
- 
- Plány údržby a kontroly ako aj úplná dokumentácia majú zabezpečiť dlhodobú a bezproblémovú prevádzku zariadenia

# 1. Základy FSW metódy

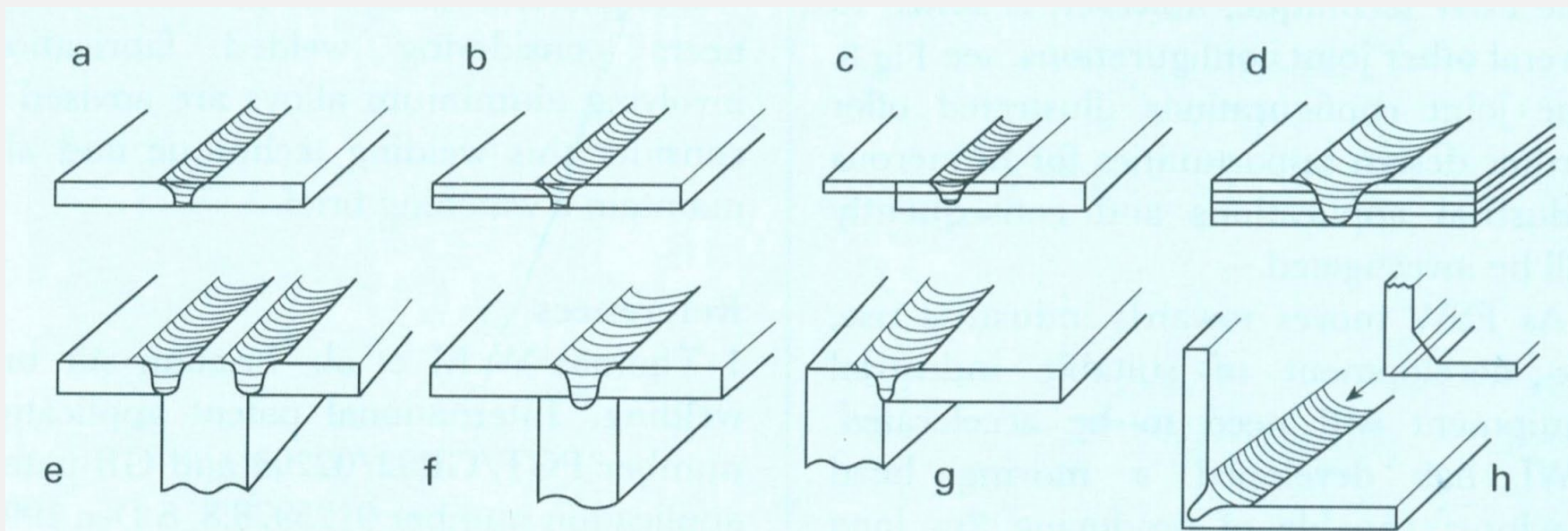
## 1.3 – Zváracie metódy

## 1.3 – Zváracie metódy

Implikácie návrhu pri FSW:

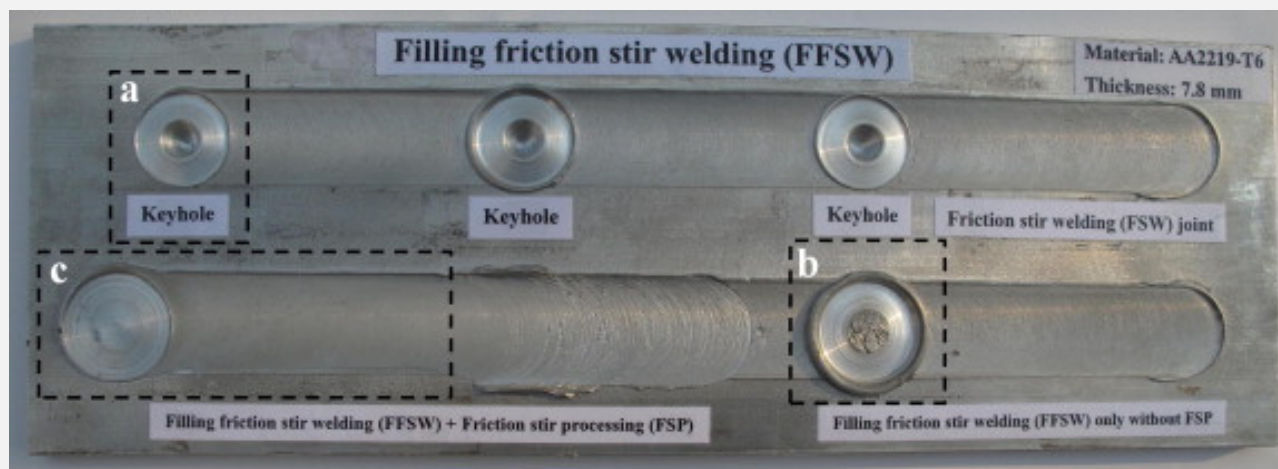
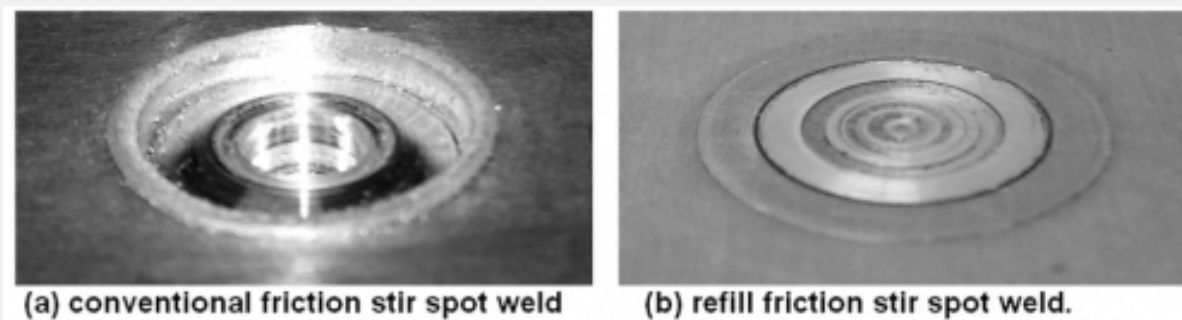
- Mechanické obmedzenia
- Obmedzenia upnutia
- Obmedzenia návrhu spoja
- Obmedzenia kľúčovej dierky
- Obmedzenia obrobku a hrúbky základného materiálu
- Materiál

## 1.3 – Zváracie metódy



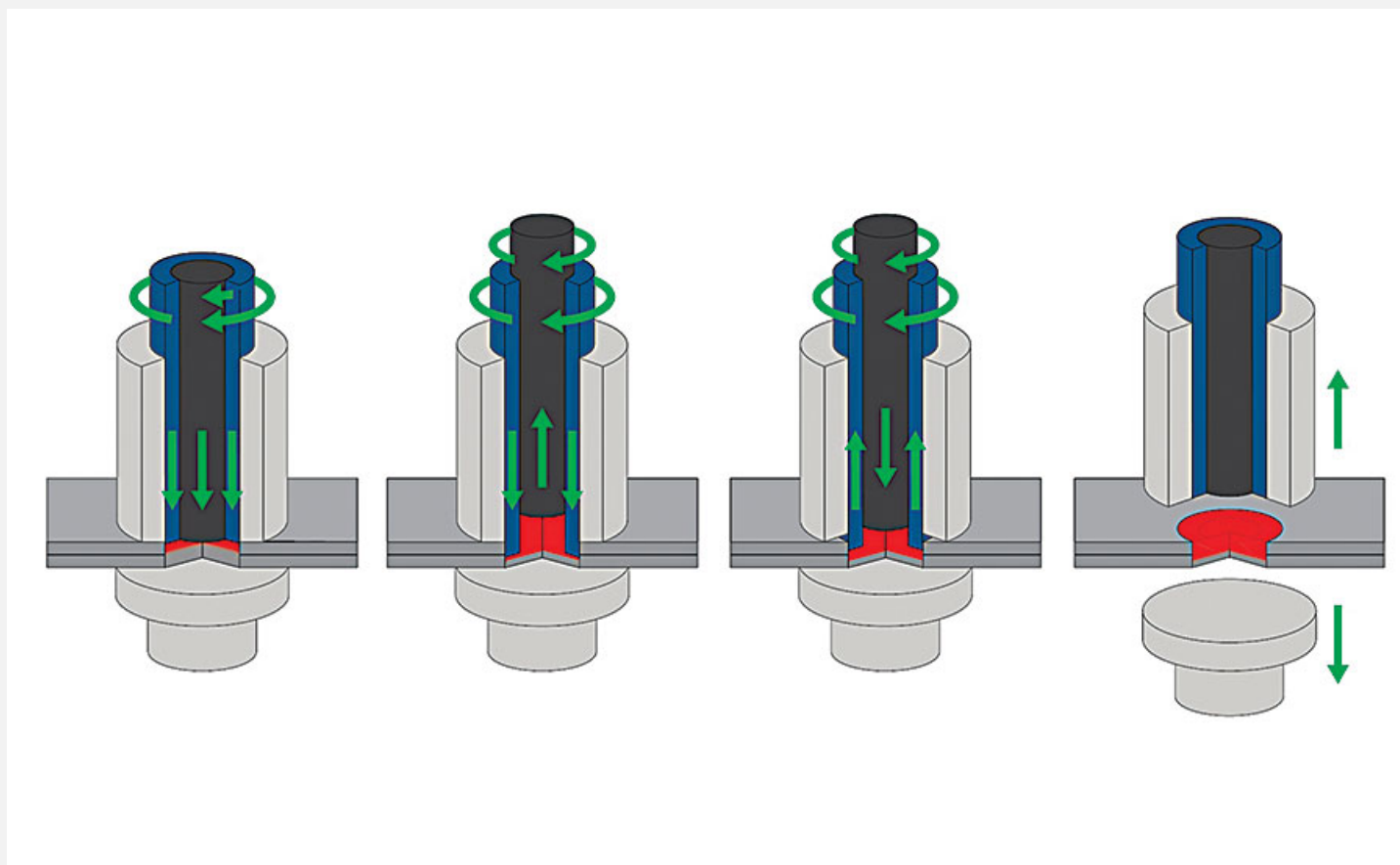
Možné konfigurácie spoja: (a) rovný tupý ; (b) a (c) preplátovaný spoj; (d) viacnásobný preplátovaný spoj; (e) tupý T spoj; (f) preplátovaný T spoj; (g) rohový tupý; (h) kútový spoj

## 1.3 - Zváracie metódy



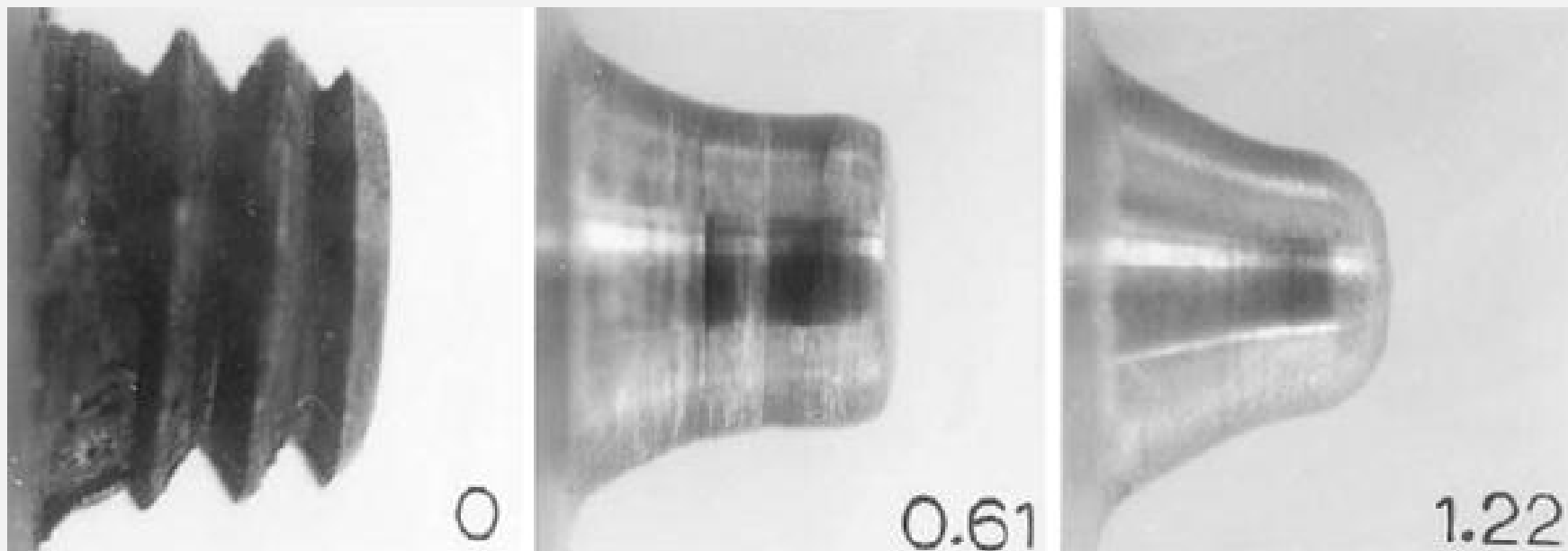
Vyplnenie kľúčovej dierky

## 1.3 - Zváracie metódy



Vypíňacia FSW metóda

## 1.3 - Zváracie metódy



Opotrebovanie nástroja (číslo na obrázku zodpovedá strate hrúbky hrotu)

# 1. Základy FSW metódy

## 1.4 – Základné materiály

## 1.4 – Základné materiály

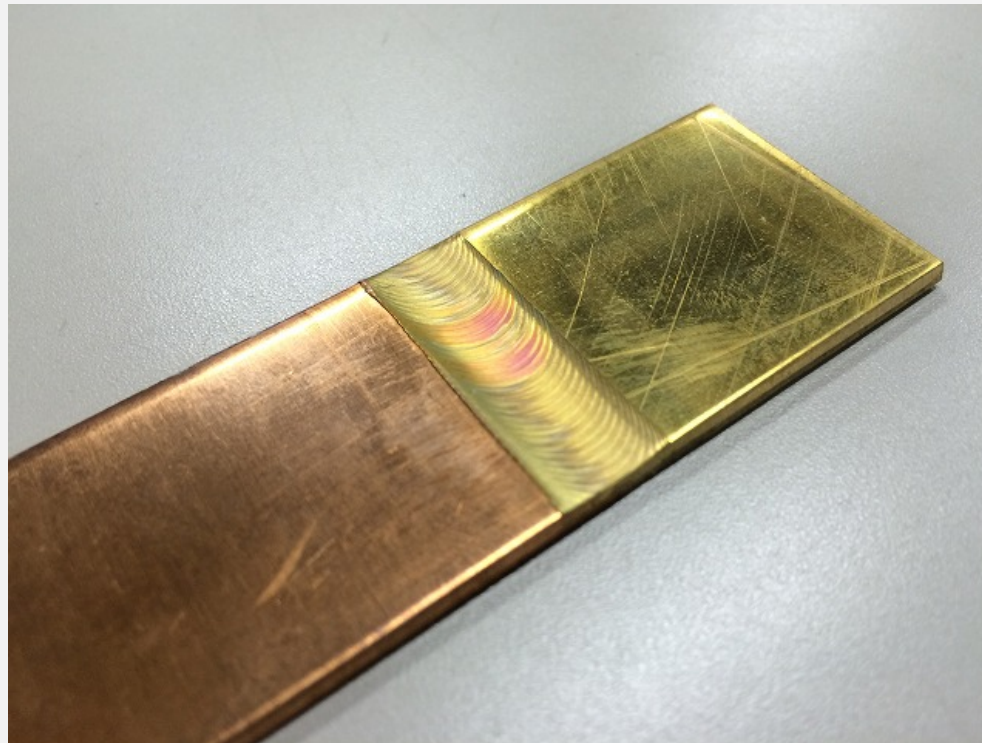
- FSW metódu možno použiť na spájanie materiálov ako je hliník, meď, horčík, oceľ, termoplasty a titán.
- Umožňuje taktiež zváranie nerovnorodých materiálov.
- Zváranie materiálov s vysokou teplotou tavenia je náročnejšie, pretože materiál zváracieho nástroja pracuje vo veľmi drsných pracovných podmienkach.

## 1.4 - Základné materiály

- Tuhosť a zvládanie síl sú hlavnými faktormi FSW stroja, ktoré limitujú hrúbku obrobku. Hrúbka materiálu ma byť v rozmedzí od 0,8 mm do 65 mm.

Materiál	Hrúbka, mm	Materiál nástroja
Hliníkové zliatiny	<12	Nástrojová oceľ, WC-Co
	<26	MP159
Horčíkové zliatiny	<6	Nástrojová oceľ, WC
Meď a jej zliatiny	<50	Niklové zliatiny, PCBN, zliatiny volfrámu
	<11	Nástrojová oceľ
Titánové zliatiny	<6	Zliatiny volfrámu
Nehrdzavejúce ocele	<6	PCBN, zliatiny volfrámu
Nízkolegovaná oceľ	<10	WC, PCBN
Niklové zliatiny	<6	PCBN

## 1.4 - Základné materiály



Nerovnorodé kovy

## 1.4 - Základné materiály

- FSW metódu možno použiť na spájanie materiálov ako je hliník, meď, horčík, oceľ, termoplasty a titán.
- Umožňuje taktiež zváranie nerovnorodých materiálov.
- Zváranie materiálov s vysokou teplotou tavenia je náročnejšie, pretože materiál zváracieho nástroja pracuje vo veľmi drsných pracovných podmienkach.

## 1.4 - Základné materiály



## 1.4 - Základné materiály

Tepelne spracované materiály majú nasledovné vlastnosti:

- Profil tvrdosti závisí najmä na rozpúšťaní a/alebo zhrubnutí spevňujúcich precipitátov.
- Teploty dosahované počas zvárania spôsobujú rozpúšťanie a rast precipitátov, čo potom znižuje aj tvrdosť oblasti zvaru.
- Zníženie tvrdosti v oblasti zvaru je bežné pri FSW umelo starnúcich hliníkových zliatinách série 6xxx.
- Teplota dosahovaná počas FSW má výrazný vplyv na prestarnutie a na znižovanie hustoty dislokácií, následne znižujúcej lokálnu tvrdosť. Minimálnu tvrdosť možno pozotovať v oblasti TMAZ (termo-mechanicky ovplyvnená zóna) – dochádza k strate predĺžených zrn a procesom starnutia.
- Ústupová strana vykazuje miernejšiu zmenu mikroštruktúry ako postupová strana.
- Hliníkové zliatiny série 2xxx prirodzene starnú pri izbovej teplote, čo vedie ku zvýšeniu tvrdosti a zodpovedajúcemu zlepšeniu mechanických vlastností (k najvýraznejšiemu vplyvu dochádza počas prvého týždňa starnutia).

## 1.4 - Základné materiály

### Tepelne nespracované materiály majú nasledovné vlastnosti:

- Pri týchto materiáloch nebola pozorovaná zmäknutá oblasť.
- Tepelne spracované a nespracované materiály:
- Zníženie pevnosti a ťažnosti v porovnaní s nezvareným základným materiálom.
- Rôzne oblasti majú rozličnú odolnosť proti deformácii v dôsledku rozdielov vo veľkosti zrna ako aj veľkosti a rozložení precipitátov.

## 1.4 - Základné materiály

### Zliatiny medi:

- Vykazujú vyšší rozptyl tepla po obrobnku spôsobený ich vyššou tepelnou rozptylnosťou (vodivosťou), vyžadujúcou vyšší tepelný príkon – zistilo sa, že prijateľné teploty pre úspešný FSW spoj sa vyžadujú v rozmedzí od 460 do 530 °C.
- Oblasť šošovky vykazuje jemne rekryštalizované zrná, oblasť TMAZ má zdeformované veľké zrná a HAZ (TOO) je charakterizovaná rovnoosými zrnami, väčšími ako sú v základnom materiáli (BM).
- Ťahová pevnosť FSW spoja čistej medi je mierne nižšia ako v základnom materiáli – k porušeniu dochádza v blízkosti HAZ (TOO).

## 1.4 - Základné materiály

### Horčíkové zliatiny:

- Výskyt tekutých fáz a tvorba komplexnej mikroštruktúry vo zvaroch je spôsobená špičkovými teplotami v rozmedzí od 370 °C až do 500 °C.
- Všeobecne FSW spoje horčíkových zliatin vykazujú vyššiu tvrdosť ako má ZM v dôsledku zjemnenej štruktúry zrna.
- Nižšia teplota šošovky dosahovaná počas zvárania má tendenciu zabezpečovať najlepšie mechanické vlastnosti.
- FSW spoje liatej horčíkovej zliatiny vykazujú zlepšenie mechanických vlastností v porovnaní so základným materiálom, avšak pri tvárnených horčíkových zliatinách bol zistený skôr pokles týchto vlastností.
- K porušeniu spojov väčšinou dochádza v oblasti základného materiálu.

## 1.4 - Základné materiály

### Oceľ:

- Vysoká teplota počas zvárania ( $>1000$  °C). Obvykle je tvrdosť centrálnej oblasti omnoho vyššia ako tvrdosť základného materiálu.
- FSW spoje ocele dosahujú vyššiu medzu klzu a maximálnu ťahovú pevnosť (UTS) v porovnaní so základným materiálom.

## 1.4 - Základné materiály

### Titánové zliatiny:

- Alotropická fázová premena spolu s deformáciou a plynulým ochladením spôsobujú komplexnú mikroštruktúru zvaru.
- Veľmi úzka tepelno-mechanicky ovplyvnená oblasť (TMAZ) s približnou šírkou 30  $\mu\text{m}$  alebo úplná absencia TMAZ – vyskytuje sa iba TOO a oblasť premiešania.
- Medza klzu a UTS vykazujú takmer 100% účinnosť spoja.

# Literatúra

Slide:

[4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Friction\\_stir\\_processing](https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_processing)

[4] [http://www.uqac.ca/ceeuqac/index/csfm\\_english](http://www.uqac.ca/ceeuqac/index/csfm_english)

[5] <https://www.youtube.com/watch?v=ZpGfjg6BI5o>

[12] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[12] Cam, G., & Mistikoglu, S. (2014). Recent developments in friction stir welding of Al-alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1936-1953.

[14] [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2008/ip\\_4.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2008/ip_4.html)

[14] <https://phys.org/news/2014-06-lighter-cars-robotic-welding-method.html>

[15] <https://www.assemblymag.com/articles/93337-friction-stir-spot-welding>

[15] <http://www.ftech.co.jp/en/development/>

[16] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[18] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[20] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[20] <https://www.productionfrictionstirwelding.com/architecture-and-construction-products>

# Literatúra

Slide:

[22] <http://www.gatwicktechnologies.com/applications/body-panels>

[25] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[26] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[27] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, and Processing, ASM International, 2007

[28] [30] [32] [34] Dawood, Hasan & Mohammed, Kahtan & Rahmat, Azmi & Basheer, Uday. (2015). Microstructural Characterizations and Mechanical Properties in Technique of Dissimilar (Al-Cu) Sheet. JOURNAL OF APPLIED SCIENCE AND AGRICULTURE. 10. 149-158.

[37] Behmand, S. A., Mirsalehi, S. E., Omidvar, H., & Safarkhanian, M. A. (2015). Filling exit holes of friction stir welding lap joints using consumable pin tools. Science and Technology of Welding and Joining, 20(4), 330-336.

[37] [https://www.researchgate.net/figure/Tandem-twin-stirTM-lead-and-follow-exit-holes\\_fig4\\_228600743](https://www.researchgate.net/figure/Tandem-twin-stirTM-lead-and-follow-exit-holes_fig4_228600743)

[43] Rajiv S. Mishra (Author), Harpreet Sidhar, of 2XXX Aluminum Alloys including Al-Li Alloys, Butterworth-Heinemann, 2016

[38] Longhurst, W. R., Strauss, A. M., Cook, G. E., & Fleming, P. A. (2010). Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(9-12), 905-913.

[47] <http://www.bil-ibs.be/en/friction-stir-welding>

# Literatúra

Slide:

[50] [https://www.asiamachinery.net/supplier/product\\_details.asp?ProID=13282&SupID=7312](https://www.asiamachinery.net/supplier/product_details.asp?ProID=13282&SupID=7312)

[51] Mendes, N., Neto, P., Loureiro, A., & Moreira, A. P. (2016). Machines and control systems for friction stir welding: a review. *Materials & Design*, 90, 256-265.

[52] <http://www.directindustry.com/prod/esab/product-18224-981963.html>

[53] [40] Mendes, N., Neto, P., Loureiro, A., & Moreira, A. P. (2016). Machines and control systems for friction stir welding: a review. *Materials & Design*, 90, 256-265.

[54] Maria Asli Sicilan and S. Senthil Kumar "Analysis of Surface Quality of Joints using Image Processing Techniques"  
"International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, Travancore Engineering College, Kollam, Kerala, India. 03/2014

[55] <http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2011/tools.html>

[56] Pasha, A., Reddy, R., Laxminarayana, P., & Khan, I. A. (2014). INFLUENCE OF PROCESS AND TOOL PARAMETERS ON FRICTION STIR WELDING—OVER VIEW. *Int J App Eng Technol*, 4(3), 54-69.

[58] Pastor, A., & Svoboda, H. G. (2013). Time-evolution of heat affected zone (HAZ) of friction stir welds of AA7075-T651.

# Literatúra

Slide:

[59] [https://www.aerospace-technology.com/contractors/sub\\_contract/horst/attachment/horst3/](https://www.aerospace-technology.com/contractors/sub_contract/horst/attachment/horst3/)

[65] Han, B., Huang, Y., Lv, S., Wan, L., Feng, J., & Fu, G. (2013). AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding. *Materials & Design*, 51, 25-33.

[65] <https://uwaterloo.ca/centre-advanced-materials-joining/laboratory-facilities-and-equipment/production-equipment/friction-stir-welding-equipment>

[66] <https://www.assemblymag.com/articles/93337-friction-stir-spot-welding>

[67] Wang, D., Xiao, B. L., Ni, D. R., & Ma, Z. Y. (2014). Friction stir welding of discontinuously reinforced aluminum matrix composites: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27(5), 816-824.

[70] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, and Processing, ASM International, 2007

[71] <https://www.kikukawa.com/en/technology/friction-stir-welding/>