



Friction Stir Welding European Qualifications

CU10 – Navrhovanie nástrojov

FSW inžinier



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

10. Definícia spoja

10.1 Odporúčané praktiky pre vývoj FSW nástrojov

10.2 Charakteristiky materiálu nástroja

10.3 Literatúra

Úvod

- Zvárací nástroj je neoddeliteľnou súčasťou pri zváraní FSW metódou
- Zvárací nástroj slúži na splastizovanie a premiešanie zváraného materiálu



Zváračiaci nástroj – požiadavky

Na zváračiaci nástroj sú kladené nasledovné požiadavky:

- ✓ Najjednoduchší možný tvar kvôli zníženiu nákladov
- ✓ Odolnosť voči vysokým teplotám
- ✓ Odolnosť voči opotrebovaniu
- ✓ Vysoká lomová húževnatosť
- ✓ Nízka tepelná rozťažnosť
- ✓ Dobrá opracovateľnosť
- ✓ Nízka cena

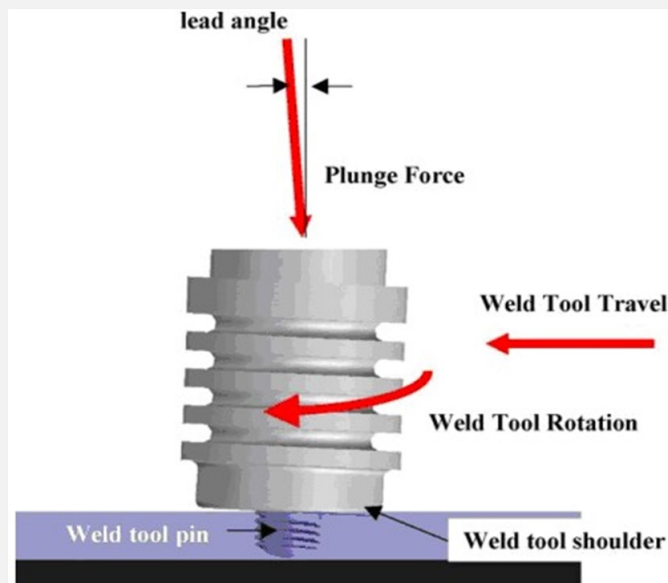
Zvárací nástroj

- Zvárací nástroj je vystavený vysokému namáhaniu a vysokým teplotám, najmä v prípade zvárania materiálov s vysokým bodom tavenia nad 900°C (ocele a zliatiny titánu).
- Komerčné použitie týchto zliatin je limitované cenou a krátkou životnosťou zváracích nástrojov.
- Značný pokrok pri zváraní ocelí s použitím FSW metódy bol dosiahnutý najmä počas posledných dvoch dekád.
- Výroba zváracieho nástroja vyžaduje správnu voľbu materiálu, návrh vhodnej geometrie a tvaru ako aj primerané tepelné spracovanie.

Zvárací nástroj– geometria

Zvárací nástroj možno rozdeliť na dve hlavné časti:

- ✓ rameno zváracieho nástroja
- ✓ a hrot (špičku) zváracieho nástroja



Zvárací nástroj– hlavné funkcie

- Pri kontakte hrotu zváracieho nástroja so zváraným materiálom sa vytvára teplo nutné na splastizovanie zváraného materiálu.
- Rameno nástroja vykonáva prítlačnú a kováciu (pretváraciú) funkciu pre splastizovaný materiál.
- Zvárací nástroj slúži na formovanie zvarového spoja.
- Prvý vývojový návrh v TWI, zameraný na zváranie Al a jeho zliatin, použil nástroj konkávne valcovitého tvaru so závitom.
- Zváracie nástroje sa obvykle vyrábajú z nástrojovej ocele.

Zvárací nástroj– geometria

Geometria zvaracieho nástroja ovplyvňuje:

- Intenzitu tvorby tepla
- Prítlačnú silu
- Krútiaci moment
- Termodynamické ovplyvnenie zvaraného materiálu

Zvárací nástroj

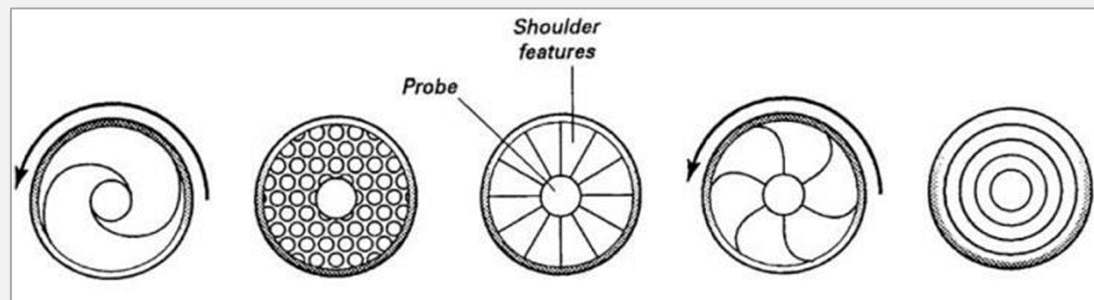
Smer toku splastizovaného materiálu je ovplyvnený jednak geometriou zváracieho nástroja ako aj lineárnym a rotačným pohybom zváracieho nástroja.

Hlavné parametre zváracieho nástroja:

- ✓ Priemer ramena
- ✓ Uhol ramena
- ✓ Geometria hrotu (vrátane tvaru a veľkosti)

Zvárací nástroj – geometria ramena

- Rameno nástroja slúži na tvorbu tepla na povrchu a v blízkosti povrchu zváraného materiálu.
- Pri väčších hrúbkach zváraného materiálu teplo vytvárané ramenom nevykazuje taký vplyv na formovanie kvalitného zvaru ako teplo vytvárané zváracím hrotom.
- Rameno vykonáva kováciu a prítlačnú funkciu a formuje plochu povrchu zvaru.
- Rameno môže mať rôzny tvar:
 - ✓ Ryhy
 - ✓ Drážky
 - ✓ Koncentrické kruhy
 - ✓ Lopatkovité drážky



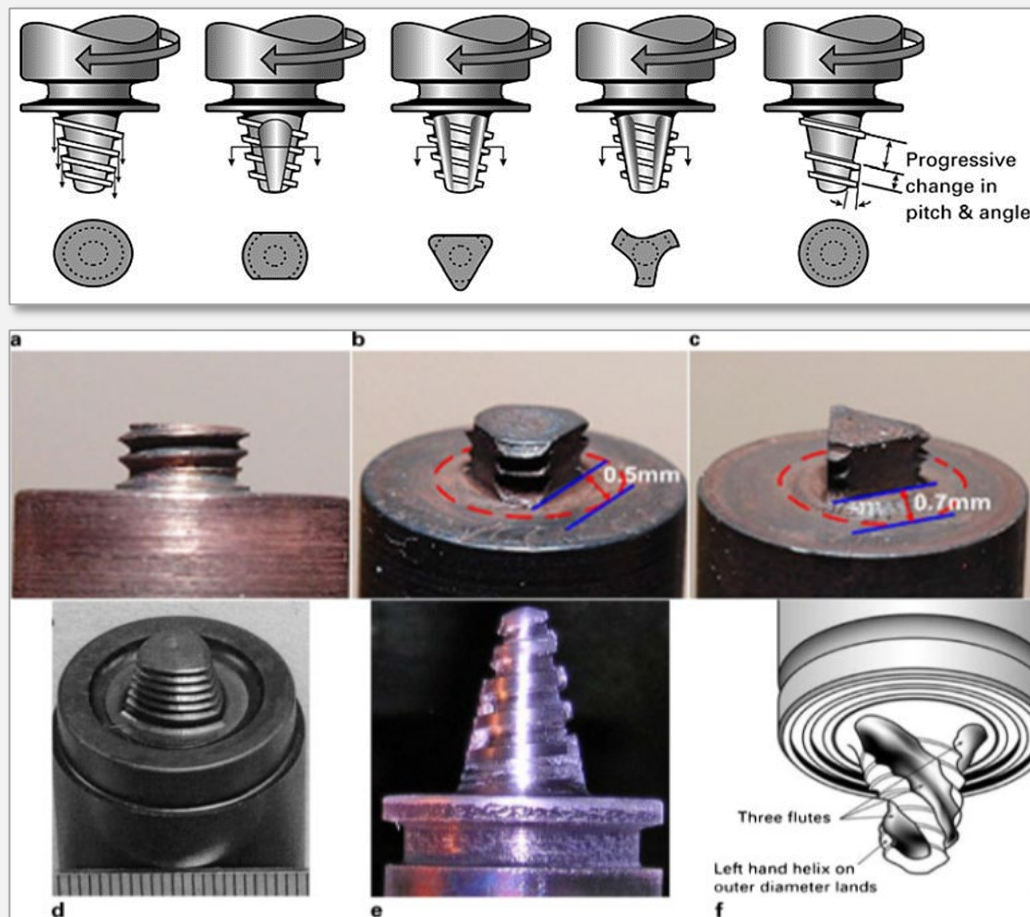
Zvárací nástroj – geometria ramena

- **Priemer** ramena zváracieho nástroja je dôležitý, pretože rameno vytvára a udržuje najviac tepla nutného na splastizovanie zváraného materiálu.
- Experimentálne štúdie ukázali, že najvyššiu pevnosť zvarového spoja možno dosiahnuť pri **optimálnom priemere ramena zváracieho nástroja**.
- **Mikroštruktúru zvarového spoja** možno významne zmeniť výmenou ramena plochého tvaru za rameno konkávneho tvaru.
- Konvexný tvar ramena napomáha **stabilite FSW procesu**. Jeho dôsledkom je zníženie prílačnej sily a hĺbky ponorenia zváracieho nástroja.
- Použitie **konvexného tvaru ramena zváracieho nástroja** preukázalo minimálny výskyt nadmerného výronku v porovnaní s konkávnym tvarom ramena.
- **Konkávny tvar ramena zváracieho nástroja** môže spôsobiť vysoký tepelný gradient a vysokú teplotu povrchu počas zvárania, čo môže viesť ku zhoršeniu kvality zvarového spoja.

Zvárací nástroj – geometria nástroja

- Hrot nástroja:
 - Spôsobuje trenie a deformáciu materiálu vo zvarovom spoji
 - Je tak navrhnutý, aby umožnil ľahký prienik do zváraného materiálu
 - Ovplyvňuje stupeň deformácie a premiešania materiálu
- Geometria hrotu významne ovplyvňuje parametre zvárania ako:
 - ✓ Zváracia rýchlosť
 - ✓ Rýchlosť rotácie nástroja
 - ✓ Prítlačna sila

Zvárací nástroj – geometria hrotu



Zvárací nástroj – geometria hrotu

- Hodnota prítlačnej sily a smer toku materiálu v blízkosti zvaracieho nástroja sú ovplyvňované **orientáciou závitov na povrchu hrotu**.
- Závity a drážky na hrote zvyšujú intenzitu tvorby tepla v dôsledku väčšej plochy rozhrania, zlepšujú tok materiálu a ovplyvňujú osové a priečne sily.
- Experimentálne zvaranie dokázalo, že hrot trojuholníkového tvaru zlepšuje tok materiálu v porovnaní s hrotom valcovitého tvaru.
- Trojuholníkový tvar hrotu sa odporúča používať pri zvaraní **tvrdších materiálov**.

Charakteristiky materiálu zvaracieho nástroja

- Materiál zvaracieho nástroja určeného na zváranie materiálov s vysokou teplotou tavenia musí vykazovať dobré vlastnosti pri teplotách nad 900 °C.
- Okrem nárokov na pevnosť, únavovú odolnosť a ťažnosť pri zvýšených teplotách musí byť zvarací nástroj odolný tiež voči mechanickému a chemickému opotrebeniu.
- Polykryštalický nitrid bóru s kubickou mriežkou (PCBN) a žiaruvzdorné kovy sú najčastejšie používané materiály spĺňajúce nároky na výrobu zvaracieho nástroja.

Odporúčané materiály pre zváracie nástroje

Zliatiny	Hrúbka [mm]	Materiál nástroja
Mg	< 6	Nástrojová oceľ
Al	< 12	Nástrojová oceľ, MP 159
Cu	< 50	Zliatiny Ni, W, PCBN
Ti	< 6	Zliatiny W
Nehrdzavejúca oceľ	< 6	PCBN, zliatiny W
Nízkolegovaná oceľ	< 10	WC, PCBN
Ni	< 6	PCBN

Charakteristiky materiálu nástroja

- Každý materiál zvaracieho nástroja má zadefinovanú maximálnu teplotu pre ktorú môže byť použitý.
- Zmena tvaru nástroja spôsobuje nadmerné opotrebenie zvaracieho nástroja, čo zhoršuje kvalitu zvaru a tým sa zvyšuje aj pravdepodobnosť výskytu chýb.
- Opotrebenie nástroja môže byť spôsobené adhezívnym, abrazívnym a chemickým mechanizmom.
- Zvarací nástroj môže byť opotrebovaný aj mechanizmom interakcie medzi zváraným materiálom a materiálom nástroja.

Charakteristiky materiálu nástroja

- V prípade ak je nástroj vyrobený z PCBN materiálu, pri nízkych otáčkach nástroja dochádza k adhezívnemu opotrebeniu, pričom pri vysokých otáčkach nástroja je pozorované abrazívne opotrebenie.
- Oxidácia môže spôsobiť zmenu odolnosti materiálu proti opotrebeniu.
- Reaktivitu nástroja možno potlačiť použitím ochranného plynu privádzaného do oblasti zvaracieho procesu.
- Napätia vytvorené pri prvom kontakte nástroja so zváraným materiálom môžu spôsobiť zlomenie nástroja.
- Na prevenciu takéhoto porušenia je účinné najmä zníženie rýchlosti prieniku hrotu do zváraného materiálu.

Charakteristiky materiálu nástroja

Najpoužívanéjšie materiály na výrobu zvaracieho nástroja možno rozdeliť do nasledovných skupín :

- ✓ PCBN, PCBN-WRe materiály
- ✓ Žiaruvzdorné kovy
- ✓ Ľahké zliatiny
- ✓ Nástrojové ocele

Charakteristiky materiálu nástroja

Nástroje vyrobené z PCBN materiálu sa používajú na zváranie zliatín s vysokou teplotou tavenia:

- Austenitická nehrdzavejúca oceľ
- Duplexná nehrdzavejúca oceľ
- Super martensitická nehrdzavejúca oceľ
- Zliatiny Ni
- Nástrojové ocele

Charakteristiky materiálu nástroja

- Bola vyvinutá nová trieda PCBN materiálu využívajúceho WRe ako pojivo.
- Nástrojové ocele triedy PCBN-WRe poskytujú výrazne zlepšenú húževnatosť v porovnaní so samotným PCBN materiálom.
- Austenitické nehrdzavejúce ocele obvykle vykazujú najvyššiu mieru opotrebenia zvaracieho nástroja.
- Zvaracie parametre hrajú významnú rolu pri miere opotrebenia zvaracích nástrojov.
- Pre nástroj vyrobený z PCBN materialu platí pravidlo, že teplota zvaracieho nástroja by nemala prevýšiť 900°C.

Charakteristiky materiálu nástroja



Evolúcia návrhov PCBN nástroja:

- (a) Prvotný beztvary návrh
- (b) Kónický odstupňovaný hrot
- (c) Konvexné špirálové rameno a kónický odstupňovaný hrot

Charakteristiky materiálu nástroja

- Po opotrebení funkčních částí zvaracieho nástroja vyrobeného z PCBN-WRe materialu možno tieto opotrebené časti niekoľkokrát profilovo opracovať, čoho výsledkom je predĺžená životnosť zvaracieho nástroja.
- Vysoké napätia vytvárané pri prieniku nástroja, spolu s únavou materiálu pri ohybovom namáhaní počas zvarania sú primárnou príčinou zlomenia zvaracieho nástroja.
- Na potlačenie tendencie ku zlomeniu sa odporúča vyvrtáť predbežne dierku v mieste predpokladaného prieniku zvaracieho nástroja.
- Najlepšie výsledky s pevnostnými vlastnosťami PCBN materiálu sa dosahujú pri zvaraných hrúbkach do 8 mm. Pri hrúbkach nad 8 mm sa dosahujú lepšie výsledky pri použití zvaracieho nástroja vyrobeného z PCBN-WRe materiálu.

Nástroje zo žiaruvzdorných kovov

- Wolfrámovo-réniová zliatina sa stala populárnym žiaruvzdorným materiálom používaným pri výrobe zvaracích nástrojov určených na zváranie ocelí.
- Prídavok rénia významne zvyšuje pevnosť materiálu pri vysokých teplotách.
- Réniun zmenšilo deformáciu hrotu počas jeho prieniku a taktiež potlačilo opotrebenie hrotu nástroja.
- Napriek všetkému je miera opotrebenia hrotu stále vysoká. Preto sa prednostne volí jednoduchý tvar zvaracieho nástroja.

Nástroje zo žiaruvzdorných kovov

- Rameno a hrot vyrobené zo žiaruvzdorného materiálu typu WRe sú hladké a bez závitovej špirály.
- K žiaruvzdorným materiálom sa pridalo malé množstvo karbidu hafnia (HfC)
- Ďalšie experimenty sa robili s materiálmi ako: WC-Co, W-La, La_2O_3 , Si_3N_4
- Hoci kvalita zvarových spojov vyhotovených nástrojmi z uvedených materiálov bola prijateľná, životnosť nástrojov a vysoké náklady väčšinou obmedzili ich aplikáciu len na výskumné účely.

Nástroje z ľahkých zliatin

- Ako materiál nástrojov používaných na zváranie ocelí sa osvedčili aj zliatiny na báze Ni a Co.
- Nástroj vyrobený zo zliatiny na báze Co sa používa na zváranie vysokouhlíkových ocelí, pričom vykazuje dobrú odolnosť proti opotrebeniu.
- Zváracie nástroje z ľahkých zliatin sa vyrábajú podobne ako nástroje zo žiaruvzdorných kovov.
- Hrot zváracieho nástroja má tvar zrezaného kužeľa.

Nástroje z nástrojových ocelí

- Materiály ako sú zliatiny Al a Mg ako aj kompozity s Al matricou sa bežne zvárajú zváracím nástrojom vyhotoveným z nástrojovej ocele.
- Zvárací nástroj vyrobený z nástrojovej ocele sa používa na zváranie kompozitných materiálov.
- Opotrebenie zváracieho nástroja pri zváraní kovových matric kompozitov je väčšie v porovnaní s mäkkými zliatinami v dôsledku prítomnosti tvrdých abrazívnych častíc v kompozitných materiáloch.
- Experimenty ukázali, že zvárací nástroj ktorý zváral kompozity s Al matricou bol počas zvárania opotrebovaný a nadobudol nový optimalizovaný tvar a potom došlo k značnému zníženiu miery jeho opotrebenia.
- Tento nový tvar závisí na parametroch procesu a obvykle môže znížiť opotrebenie až na mieru ako v prípade pôvodného tvaru nástroja, za predpokladu, že sa zachová celistvosť vyhotovovaných zvarových spojov.

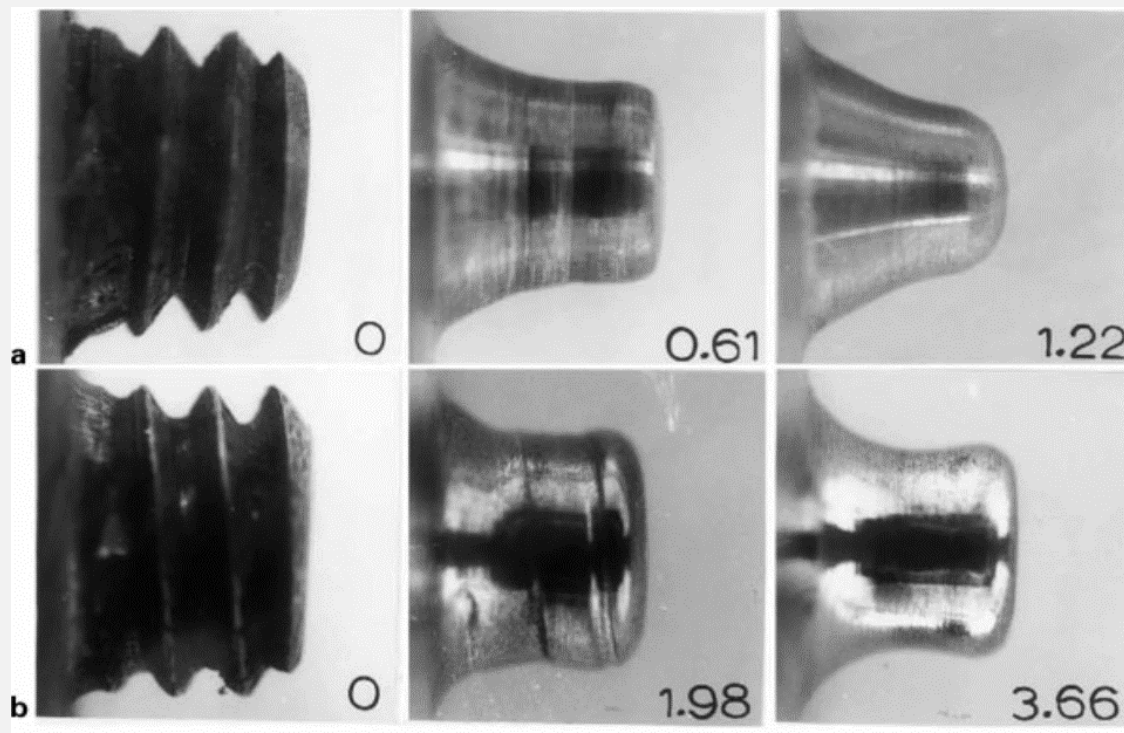
Nástroje z nástrojových ocelí

- Celkové opotrebenie zvaracieho nástroja sa zvyšuje so zvyšovaním rýchlosti jeho rotácie, pričom pri nižších rýchlostiach zvarania sa opotrebenie znižuje.
- Správne nastavenie parametrov zvarania spôsobí menšie opotrebenie zvaracieho nástroja.
- Niektoré výskumy ukázali, že upravovanie geometrie hrotu zvaracích nástrojov špirálovým závitom nie je potrebné.
- Vysoká tvrdosť, nízky koeficient tepelnej rozťažnosti a vysoká tepelná vodivosť robia Si_3N_4 materiál vhodným pre výrobu zvaracieho nástroja.
- Povlieknutie zvaracieho nástroja inertným materiálom ako je diamant alebo TiC vedie k ďalšiemu zvýšeniu odolnosti voči opotrebeniu pri vysokých teplotách.

Opotrebenie, deformácia a zlyhanie zväracieho nástroja

- Zvärací nástroj sa počas zvärania opotrebuje (rotácia a premiešanie materiálu).
- Zvärací nástroj sa môže plasticky zdeformovať v dôsledku zníženia medze pevnosti pri zvýšených teplotách a zaťažení.
- Ak sú zaťaženia vyššie ako je únosnosť nástroja môže dôjsť k jeho porušeniu.
- K hlavným mechanizmom opotrebenia patrí adhezívne, abrazívne a chemické opotrebenie.

Opotrebenie, deformácia a porušenie zväracieho nástroja



Evolúcia tvaru nástroja v dôsledku opotrebenia pri FSW kompozitu s kovovou matricou typu Al 6061z20 vol.-%Al2O3

Opotrebenie, deformácia a porušenie zvaracieho nástroja

Experimentálne bolo dokázané že:

- Po počiatočnom opotrebení závitú na hrote tvrdým zvaraným materiálom sa miera opotrebenia výrazne znížila a napriek tomu hladký hrot umožnil vyhotovenie kvalitných zvarových spojov.
- Vysokopevné materiály ako: PCBN a W sa volia kvôli zníženiu plastickej deformácie zvaracieho nástroja.
- Vysoká lomová húževnatosť zvaracieho nástroja je nutnosťou kvôli zníženiu pravdepodobnosti výskytu rýchleho krehkého lomu.

Opotrebenie, deformácia a porušenie zvaracieho nástroja

Pri porovnaní hrotu a ramena zvaracieho nástroja sa zistilo, že opotrebenie a deformácie v hrotovej časti nástroja sa vyskytuje z nasledovných dôvodov:

- Hrot zvaracieho nástroja je ponáraný do zváraného materiálu, kde musí znášať vyšší odpor proti svojmu pohybu v porovnaní s ramenom, ktoré je ponorené do zváraného materiálu len čiastočne.
- Hrot zvaracieho nástroja má podstatne nižšiu únosnosť ako rameno nástroja.
- Vysoké zaťaženia kombinované s krutovým momentom a ohybovými napätiami vedú k vyšším zaťaženiám pôsobiacim na hrot v porovnaní s ramenom zvaracieho nástroja.

Opotrebenie, deformácia a porušenie zvaracieho nástroja

- Kompozitné nástroje vyrobené z tvrdšieho materiálu odolávajúcemu opotrebeniu (PCBN, WC) použitého pre hrot a pomerne mäkkší materiál (zliatina W-Re) použitý pre rameno zvaracieho nástroja môžu byť riešením problémov týkajúcich sa životnosti nástroja a nákladov na jeho výrobu.
- V prípade zvarania preplátovaných spojov z tvrdšieho a mäkkšieho materiálu sa zvarací nástroj umiestňuje do mäkkšieho materiálu.
- Tým sa predíde dotyku zvaracieho nástroja s tvrdším materiálom, aby sa tak zmenšilo opotrebenie zvaracieho nástroja.
- Ďalší výskum v oblasti opotrebenia vedie k experimentom zameraným na zvaranie pri nižších rýchlostiach zvarania, predhrev zvaraného materiálu a použitie ochrannej atmosféry.

Náklady na nástroj

- Celkové náklady sú pri zváraní Al zliatin podstatne nižšie v porovnaní so zváraním ocelí. Je to dané najmä cenou materiálu ako aj vyššou cenou spracovania.
- Na zváranie tvrdších materiálov sa často používa PCBN materiál.
- Náklady na výrobu zváracieho nástroja z PCBN materiálu sú vysoké.
- Zváracie nástroje vyrobené z W-RE a W-La zliatin sú pomerne lacnejšie ako nástroje vyrobené z PCBN materiálu, ale čo sa týka opotrebenia tieto vykazujú vyššie opotrebenie v dôsledku ich nižšej pevnosti a tvrdosti pri zvýšených teplotách.
- Kvôli spomenutým dôvodom je nutné investovať do výskumu zameraného na vývoj cenovo prístupnejších a spoľahlivejších materiálov nástroja.

Záver

- FSW nástroj je vystavený vysokému namáhaniu pri vysokých teplotách najmä pri zváraní tvrdých zliatin ako sú ocele a zliatiny titánu.
- Výroba zváracieho nástroja vyžaduje správnu voľbu materiálu potrebného na jeho vyhotovenie ako aj návrh vhodnej geometrie tvaru nástroja.
- Zvárací nástroj musí spĺňať nasledovné požiadavky: čím jednoduchší tvar, aby sa znížili výrobné náklady, odolnosť voči vysokým teplotám a opotrebeniu, vysoká lomová húževnatosť, nízka tepelná rozťažnosť, dobrá opracovateľnosť a nízka cena.
- Zvárací nástroj sa skladá z dvoch častí – ramena a hrotu.
- Rameno nástroja vykonáva prítlačnú a kovaciu funkciu pre splastizovaný materiál.

Záver

- Hrot nástroja spôsobuje trenie a deformovanie materiálu v línii zvarového spoja.
- Okrem požiadaviek na pevnosť, únavovú odolnosť a húževnatosť pri zvýšených teplotách musí byť materiál zvaracieho nástroja odolný aj voči mechanickému a chemickému opotrebeniu.
- Nástrojová oceľ sa používa na výrobu zvaracieho nástroja vhodného na zváranie Al a Mg zliatin.
- Najbežnejšie materiály používané na vyhotovenie zvaracích nástrojov na zváranie ocelí sú: PCBN, WC, WRe a zliatiny na báze Ni a Co.
- Vysokopevné materiály ako: PCBN a W sa volia kvôli zníženiu plastickej deformácie zvaracieho nástroja.

Záver

- Kompozitné nástroje vyrobené z tvrdších materiálov odolných voči opotrebeniu (PCBN, WC) použitých pre hrot a pomerne mäkkší materiál (zliatina W-Re) použitý pre rameno zvaracieho nástroja môže byť riešením určitých problémov týkajúcich sa životnosti nástroja a zníženia výrobných nákladov na nástroj.
- Ďalší výskum v oblasti opotrebenia vedie k experimentom zameraným na zváranie pri nižších rýchlostiach, predhrev zváraného materiálu ako aj použitie ochrannej atmosféry.
- Celkové náklady sú pri zváraní Al zliatin podstatne nižšie v porovnaní so zváraním ocelí. Je to dané najmä cenou materiálu ako aj vyššou cenou spracovania.
- Kvôli spomenutým dôvodom je nutné investovať do výskumu zameraného na vývoj cenovo prístupnejších a spoľahlivejších materiálov nástroja.



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



Friction Stir Welding European Qualifications

Ďakujem za Vašu pozornosť!