



STUDIJA SLUČAJA

Zavarivanje trenjem

CTC Podgorica

Akronim: WBC-VMnet

Naziv projekta: WBC Virtual Manufacturing Network – Fostering an Integration of the Knowledge Triangle,

Broj projekta: 144684-TEMPUS-2008-RS-JPHES

Pripremio:

Datum: Maj 2012.

Lokacija: Podgorica, Crna Gora



SADRŽAJ

1. Uvod
2. Osnovi postupka FSW
 - 2.1. Princip rada
 - 2.2. Faze procesa FSW
 - 2.3. Metal šava
 - 2.4. Mikrostrukturne karakteristike
 - 2.5. Prednosti i nedostaci postupka FSW
 - 2.6. Materijali koji se mogu zavarivati postupkom FSW
 - 2.7. Vrste zavarenih spojeva
 - 2.8. Tehnološki parametri procesa FSW
 - 2.8.1. Broj obrtaja i translatorska brzina alata
 - 2.8.2. Sile zavarivanja
 - 2.8.3. Dizajniranje alata za zavarivanje postupkom FSW
 - 2.8.4. Ugao nagiba i dubina prodiranja čela alata
3. Integracija i razvoj tehnologije zavarivanja - FSW
 - 3.1. Eksperimentalna istraživanja
 - 3.1.1. Eksperimentalne postavke
 - 3.1.2. Alati za zavarivanje postupkom FSW
 - 3.2. Izvođenje eksperimenta
 - 3.2.1. Mjerenje sila kod procesa FSW
 - 3.2.2. Mjerenje temperature kod procesa FSW
 - 3.3. Mehanička ispitivanja zavarenog spoja
 - 3.3.1. Određivanje zatezne čvrstoće
4. Primjena postupka FSW
 - 4.1. Mašine za zavarivanje
5. Zaključci
6. Literatura

1. UVOD

Posljednjih godina u industrijskoj proizvodnji velika pažnja se posvećuje pronalaženju novih „čistih” tehnologija (postupaka) spajanja istorodnih i raznorodnih materijala i usavršavanju postojećih. Jedan od relativno novih postupaka spajanja materijala deformisanjem je proces FSW - Friction Stir Welding, koji se sve više primjenjuje u zavarivanju aluminijuma i njegovih legura kao i aluminijuma sa raznim čelicima. Postupak FSW može da obezbijedi bolje mehaničke osobine spoja u odnosu na konvencionalne postupke. Za ostvarivanje kvalitetnog spoja potrebna je manja količina energije u odnosu na postupke sa topljenjem materijala, tehnologija je relativno čista i ne zagađuje životnu sredinu.

2. OSNOVI POSTUPKA FSW

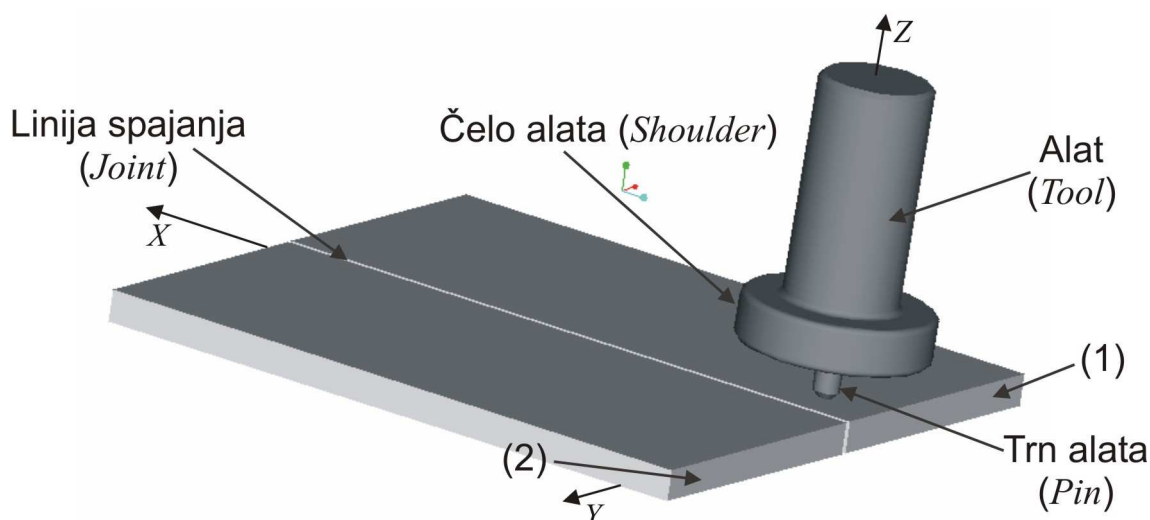
2.1. Princip rada

Devedesetih godina prošlog vijeka razvijen je novi postupak spajanja istorodnih i raznorodnih materijala koji se izvodi u čvrstom stanju bez topljenja materijala poznatiji pod imenom „Zavarivanje trenjem sa miješanjem” (Friction Stir Welding - FSW). Postupak je patentiran od strane „Instituta za zavarivanje” (The Welding Institute - TWI) iz Velike Britanije decembra, 1991. godine, a pronašao ga je Wayne M. Thomas koji je uspješno spojio limove legure aluminijuma [10, 11, 12, 13]. Termini kao što su autogeno zavarivanje trenjem (Autogenous Friction Stir Welding - AFSW) i hibridno zavarivanje trenjem (Hybrid Friction Stir Welding - HFSW) se ponekad koriste, ali je konvencionalno samo ime „Friction Stir Welding - FSW” [14]. Postupak zavarivanja materijala FSW, je veoma brzo, već 1994. godine, dobio svoju komercijalnu primjenu i izazvao veliku pažnju istraživača u praksi.

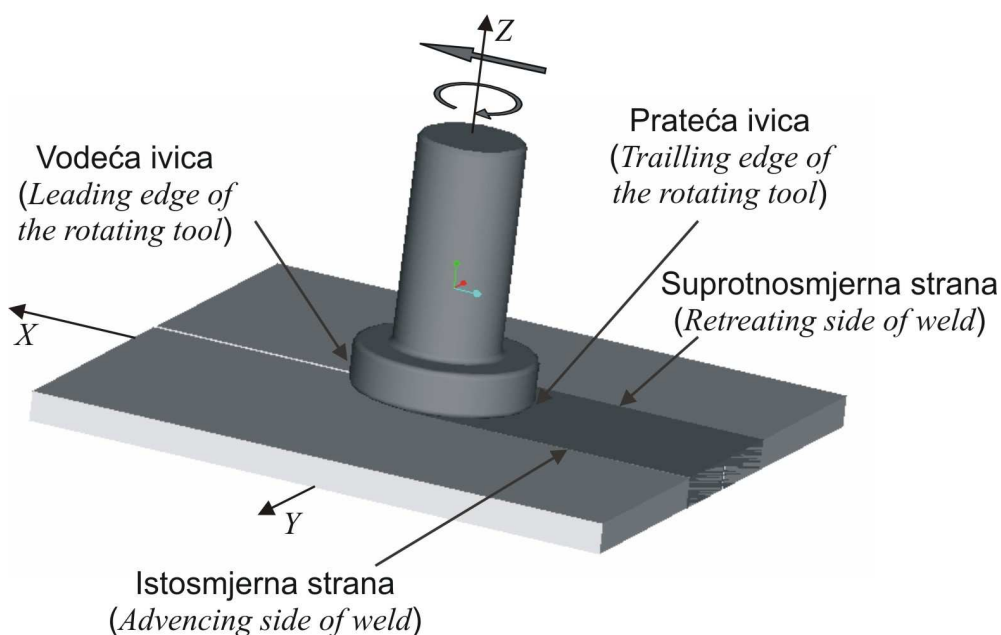
Postupak FSW, se izvodi tako da se na radnom stolu mašine nalaze limovi koje je potrebno spojiti. Limovi moraju biti čvrsto stegnuti za radni sto mašine, koji može horizontalno translatorno da se kreće. Specijalni alat koji se koristi u procesu zavarivanja je cilindričnog oblika i sastoji se iz tijela alata i dva koncentrična dijela koja rotiraju velikom brzinom. Tijelo alata služi da se alat pričvrsti u stezne čeljusti mašine. Dio alata većeg prečnika naziva se čelo alata (shoulder), dok se dio manjeg prečnika naziva trn alata (pin). Oblici čela i trna alata mogu biti različiti. Čelo alata može imati i koncentrično udubljenje u svojoj površini obično polukružnog oblika, dok je trn najčešće koničnog oblika koji može biti profilisan zavojnicom ili raznim drugim žljebovima. Visina trna uglavnom zavisi od debljine lima koji se zavaruje (spaja), ali mora biti nekoliko desetih dijelova milimetra manja od debljine lima.

Postupak FSW, počinje tako što je alat pozicioniran iznad radnog stola mašine, a njegova osa normalna na liniju dodira (spajanja) limova (Slika 2.1). Rotirajući alat prilazi lagano liniji spoja i zariva se u materijal - radne komade (limovi 1 i 2 na Slici 2.1). Tom prilikom u materijalu (radnim komadima) se formira početna rupa, pri čemu počinje da se generiše toplota. Trn alata se zariva u materijal sve dok čelo alata ne napravi kontakt sa gornjom površinom radnih komada. Alat mora da sa dovoljnim pritiskom zadrži materijal unutar zone zavarivanja i da stvori dovoljnu temperaturu da bi se proces FSW nesmetano odvijao. U tom položaju alat zagrijava materijal do blizu tačke topljenja i postaje plastičan. Zahvaljujući obliku trna, zagrijani materijal se kreće oko trna i na taj način se miješa. Zatim počinje horizontalno translatorno uzdužno kretanje radnog stola mašine. U daljem toku odvijanja procesa FSW, trn praktično „klizi” između limova u smjeru zavarivanja, nov materijal se zagrijava, postaje plastičan i neprekidno se miješa. Za to vrijeme iza čela alata se stvara brazda glatkog zagrijanog materijala koji se hladi i očvršćava (Slika 2.2), a

između limova (radnih komada), se formira monolitan spoj, dok se donja ravan formira od podloge na kojoj radni komadi stoje i ona je glatka i ravna. Isključivanjem translatorsnog kretanja radnog stola mašine i izvlačenjem alata iz materijala, završava se proces zavarivanja. Umjesto radnog stola mašine, translatorsno kretanje može da vrši samo alat ili radni sto mašine i alat istovremeno.



Slika 2.1. Prikaz alata i radnih komada (limova) prije početka procesa zavarivanja



Slika 2.2. Prikaz alata i radnih komada (limova) u toku procesa zavarivanja

Dakle, kod procesa spajanja materijala postupkom FSW, vrlo je bitno poznavati generisanu toplotu koja se dobija iz dva glavna izvora: a) toplota generisana od trenja između čela alata i površine radnih komada i b) toplota generisana usled plastične deformacije materijala, nastala od trna alata [7]. Na ovaj način se povećava temperatura do tople plastične obrade kada se vrši mahaničko miješanje i spajanje materijala, a pri tome se omogućava da se alat kreće u longitudinalnom pravcu odnosno duž linije spajanja.

Zavarivanje materijala je olakšano velikim plastičnim deformacijama u čvrstom stanju, koje uključuje dinamičku rekristalizaciju osnovnog materijala.

Kako se proces zavarivanja FSW odnosi na spajanje dva ili više radnih komada, gdje alat rotira i pomjera se kontinualno duž linije spajanja, pri tome formirajući spoj među radnim komadima, usvojena je sledeća terminologija procesa FSW, data u Tabeli 2.1, a prikazana je na Slici 2.1 i Slici 2.2 [14].

Tabela 2.1. Usvojeni termini i definicije [14, 20]

Termin:	Definicija:
Trn alata (Pin)	Dio alata zariven u materijal za vrijeme zavarivanja.
Čelo alata (Shoulder)	Dio alata koji pritiska površinu radnih komada za vrijeme zavarivanja.
Istosmjerna strana (Advancing side)	Strana zavarivanja gdje je smjer kretanja alata isti kao i smjer rotacije čela alata.
Suprotnosmjerna strana (Retreating side)	Strana zavarivanja gdje je smjer kretanja alata suprotan smjeru rotacije čela alata.
Vodeća ivica (Leading edge)	Vodeća ivica čela alata za vrijeme zavarivanja.
Prateća ivica (Trailing edge)	Prateća ivica čela alata za vrijeme zavarivanja.
Vodeća strana trna (Pin leading face)	Vodeća strana trna alata za vrijeme zavarivanja.
Prateća strana trna (Pin trailing face)	Prateća strana trna alata za vrijeme zavarivanja.
Zona miješanja (Stirred Zone)	Karakteristični oblikovani ovalni region u centru zavarivanja u aluminijumu i mnogim ostalim materijalima, sa sitnozrnim finom mikrostrukturom.
Zona termo-mehaničkog uticaja (Thermo-Mechanically Affected Zone -TMAZ)	Oblast spajanja, gdje je mikrostruktura izmijenjena pomoću kombinovanih efekata toplote i plastične deformacije.
Zona uticaja toplote (Heat Affected Zone - HAZ)	Oblast spajanja gdje je mikrostruktura izmijenjena pomoću toplote.
Ravanska pukotina (Planar flaw)	Prekid u zoni zavarivanja, koji postoji primarno u jednoj ravni.
Zona tečenja (Void)	Zapreminsko tečenje u zoni zavarivanja.
Brzina zavarivanja (Welding speed)	Brzina kretanja alata duž linije spajanja.
Brzina rotacije (Rotation speed)	Ugaona brzina okretanja alata kod procesa zavarivanja.
Rotacija, u smjeru kazaljke na satu (Clockwise rotation)	Rotacija alata gledano odozgo na alat, a odozdo na radni komad.
Ugao nagiba (Tilt angle)	Ugao za koji je osa alata nagnuta od vertikale, u smjeru suprotno od pravca zavarivanja.

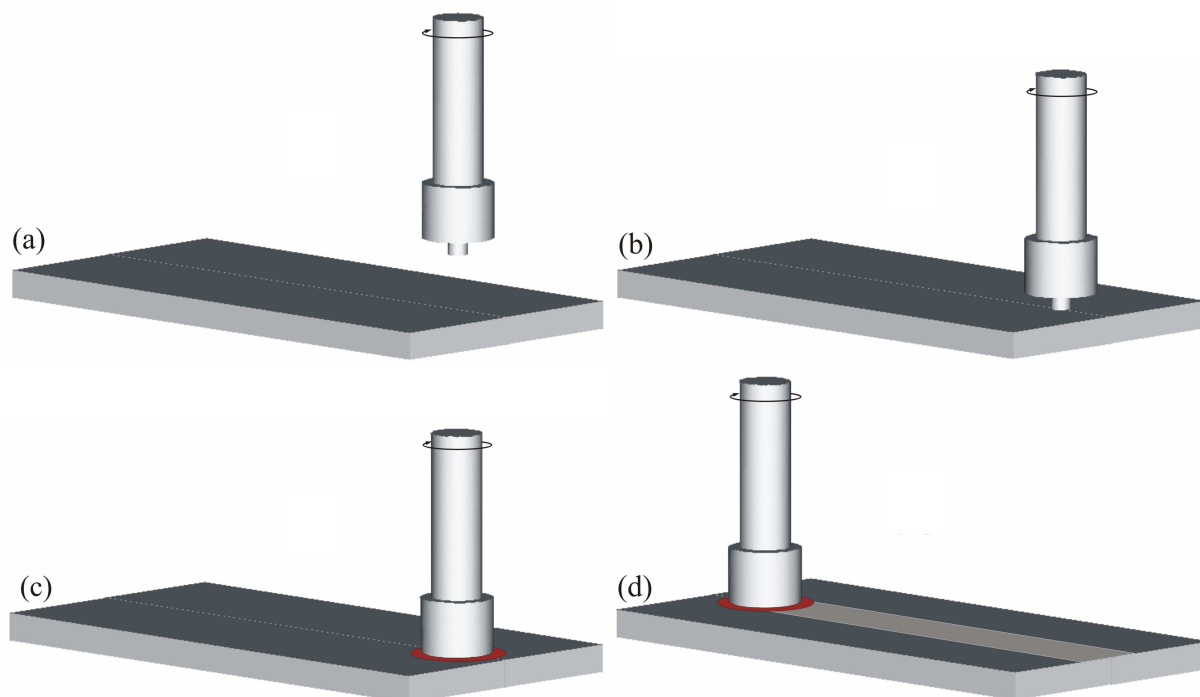
Bočni ugao nagiba (<i>Sideways tilt angle</i>)	Ugao za koji je osa alata nagnuta od vertikale, u smjeru poprečno na pravac zavarivanja.
Dubina prodiranja (<i>Heel plunge depth</i>)	Dubina do koje prodire najniži dio čela alata kada postoji ugao nagiba alata.
Otisak čela alata (<i>Tool shoulder footprint</i>)	Površina čela alata u konaktu sa površinom radnog komada.
Vertikalna sila - Z (<i>Down force - Z</i>)	Sila koja djeluje u aksijalnom pravcu alata.
Uzdužna sila - X (<i>Traversing force - X</i>)	Sila koja djeluje paralelno pravcu zavarivanja.
Bočna sila - Y (<i>Side force - Y</i>)	Sila koja djeluje u pravcu normalnom na X i Z sile.
Bočno pomjeranje (<i>Lateral offset</i>)	Rastojanje ose alata od linije spajanja kod procesa FSW raznorodnih materijala.

2.2. Faze procesa FSW

Proces FSW, moguće je podijeliti na dva karakteristična perioda, na dvije faze, kako je prikazano na Slici 2.3.

Prva faza počinje dodirnom vrha trna alata i radnih komada i traje do kontakta čela alata sa gornjom površinom radnih komada, tj. do prekida aksijalnog kretanja. Taj period se može definisati fazom prodiranja ili utiskivanja. Ova faza se karakteriše konstantnim intenzitetom generisanja toplote trenjem. Količina oslobođene toplote je najmanja na početku, a maksimalna na kraju faze prodiranja. Toplota se oslobađa trenjem između cijele površine trna alata i materijala, a na kraju se u taj proces uključuje i prstenasta površina čela alata. Već u ovoj fazi počinje sljepljivanje materijala limova na frikzione površine alata i njegovo nagomilavanje.

Početak translatornog kretanja alata duž linije spajanja limova označava početak druge faze. Ovaj period se može definisati kao faza formiranja spoja, i on se karakteriše različitim i specifičnim generisanjem toplote od strane radnih površina alata. Toplota se najintenzivnije generiše na frontalnom dijelu frikzione površine trna, jer ona dolazi u dodir sa nezagrijanim materijalom na koji trn nailazi u smjeru svog translatornog kretanja. Na ostalim djelovima površine trna, kao i na površini čela alata, intenzitet generisanja toplote je mnogo manji. Razlog tome jeste što se te površine nalaze u kontaktu sa ranije već zagrijanim i plastičnim materijalom, a u tom slučaju generisanje toplote ima samoregulišući karakter. To znači da se toplota oslobađa samo u količini dovoljnoj da se temperatura zavarivanih djelova održava na 100 °C do 200 °C ispod tačke topljenja slabijeg materijala u spoju. Izložena podjela ciklusa zavarivanja na dvije karakteristične faze omogućava lakšu analizu procesa generisanja toplote, zatim proračun toplotne raspodjele i temperaturnog polja, problema habanja i nagomilavanja materijala na frikcionim površinama alata, itd. Samim tim takav pristup omogućava lakše rješavanje uočenih nedostataka kod procesa FSW. Ova faza se završava prekidom translatornog kretanja. [1, 4, 6, 8, 9, 15, 17].



Slika 2.3. Faze procesa FSW: (a), (b) i (c) - prva faza; (d) - druga faza

2.3. Metal šava

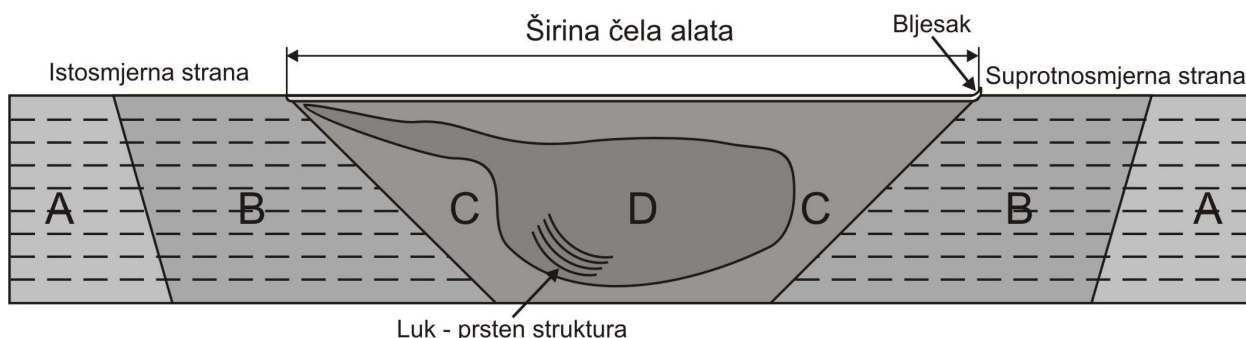
Kod procesa FSW, zavareni spoj (metal šava) je asimetričan, pa su definisane istosmjerna i suprotnosmjerna strana zavarivanja. Istosmjerna strana metala šava je definisana kao strana na kojoj se poklapaju smjerovi vektora ugaone brzine okretanja alata i vektora brzine pravolinijskog kretanja alata. Suprotnosmjerna strana metala šava je definisana kao strana gdje je pravac kretanja suprotan vektoru brzine okretanja alata. Vodeća ivica je prednji dio alata, a prateća ivica je zadnji dio alata. Lice metala šava je gornja površina zavarenih limova koja se formira posle prolaska čela alata, a korijen metala šava je donja površina.

Na licu metala šava se nalaze karakteristični otisci od alata u obliku polukružnih rubova. Razmak između dva ruba odgovara putu koji pređe alat pravolinijskim kretanjem po radnim komadima u smjeru zavarivanja za vrijeme jednog obrta. U zavisnosti od vrste legure i parametara zavarivanja ovi rubovi mogu biti više ili manje uočljivi. Na suprotnosmjernoj strani lica metala šava, formira se ivica od materijala koji je tekao preko osnovnog metala. Ova ivica se često naziva „bljesak” (flash). Pravilnim izborom parametara zavarivanja i dizajna alata „bljesak” može biti minimiziran. Na kraju procesa FSW u metal šavu pojavljuje se otvor - „keyhole”, koji ostaje pošto se alat izvuče iz zavarenih radnih komada. Otvor ima oblik i veličinu koja je približna obliku i veličini trna alata koji se koristi u procesu FSW [5, 6, 15, 17].

2.4. Mikrostrukturne karakteristike

U literaturnim izvorima, postoji više različitih termina koji opisuju mikrostrukturne promjene kod procesa FSW. Asimetrična priroda metala šava i neobičan oblik stepenastog alata, uslovili su da, kao rezultat zavarenog spoja imamo veoma karakterističnu mikrostrukturu. Prvi pokušaji mikrostrukturne podjele zavarenog spoja izvedeni su 1997.

godine samo za legure aluminijuma. Vrlo brzo su se odomaćili nazivi mikrostrukturnih zona, koji su usvojeni konsenzusom i koji obuhvataju i mikrostrukturne podjele ostalih metala. Mikrostrukturna podjela je izvedena na TWI institutu i nju sačinjavaju četiri zone koje su prikazane na Slici 2.4 [6, 17].



Slika 2.4. Struktura zavarenog spoja kod procesa FSW

- A - Zona osnovnog materijala.
- B - Zona uticaja toplote (Heat Affect Zone - HAZ).
- C - Zona termo-mehaničkog uticaja (Thermo-Mechanically Affect Zone - TMAZ).
- D - Zona miješanja (Stirred Zone) ili „grumen” zona (Nugget Zone - NZ).

U zoni osnovnog materijala nema plastičnog deformisanja materijala, niti uticaja toplote, koji može uticati na mehaničke osobine, tako da u zoni osnovnog materijala nema mikrostrukturnih promjena.

Zona uticaja toplote je zajednička za sve procese zavarivanja, pa postoji i kod procesa FSW. Ova zona je izložena toplotnom uticaju, ali se ne deformiše tokom procesa zavarivanja. Tokom procesa zavarivanja, ona prolazi kroz odgovarajući temperaturni ciklus koji dovodi do promjena mehaničkih osobina i mikrostrukture. Veličina zone uticaja toplote direktno zavisi od unijete toplote. Temperature u ovoj zoni su niže od onih u TMAZ zoni, ali još uvijek imaju značajan efekat [6, 17, 18].

U zoni termo-mehaničkog uticaja toplote, materijal je izložen plastičnim deformacijama i temperaturnim uticajima od strane alata koji se javljaju na obje strane zone miješanja. Za razliku od zone miješanja, mikrostruktura se može razlikovati od strukture osnovnog materijala, mada je značajno deformisana, a i temperature su niže, pa je prilikom procesa zavarivanja i odgovarajuća mikrostruktura manje promijenjena. Kod aluminijuma u ovoj zoni izdvajaju se jasno tri oblasti: tzv. (nugget) - „grumen” zona, oblast izvan „grumen” zone i oblast rukavaca iznad „grumen” zone. Oblast izvan „grumen” zone u manjoj mjeri je deformisana i u zavisnosti od legure ne mora da bude rekristalizovana.

Zona miješanja je (tzv. nugget - „grumen” dinamički rekristalizovana zona) zona velike deformacije materijala, koja odgovara otprilike lokaciji trna alata tokom procesa FSW. Zrna u ovoj zoni su grubo promiješana i često reda veličine manje od veličine zrna u zoni osnovnog materijala. Veličina zrna u zavisnosti od vrste legure i uslova zavarivanja, kreće se od 1 μm do 10 μm . Ta oblast se formira odmah ispod čela alata, a širina joj je neznatno veća od prečnika trna alata.

2.5. Prednosti i nedostaci postupka FSW

Postupak FSW, je razvijen sa ciljem da se prevaziđu problemi koji se javljaju pri zavarivanju gdje dolazi do topljenja materijala. Ovi problemi su prevaziđeni posebno kod zavarivanja aluminijuma i njegovih legura. Postupak FSW, se uglavnom koristi za

zavarivanje limova veće debljine, mada se može koristiti i za zavarivanje limova manje debljine. Debljina aluminijumskog lima koji se može zavarivati ovim postupkom zavisi od snage mašine i kreće se od 0.5 mm do 50 mm u jednom prolazu ili jednostranom šavu. U dvostranom šavu moguće je zavarivati i limove do 75 mm debljine. Kako je priroda FSW čvrsto stanje, to odmah vodi do nekoliko prednosti u odnosu na metode zavarivanja topljenjem metala. Hlađenje tečne faze je odmah izbjegnuto. Pitanja kao što su poroznost (šupljikavost), redistribucija rastvora, pucanje očvršćavanjem i pucanje topljenjem nijesu primijećena tokom procesa FSW. U principu postupak FSW je našao svoju primjenu, ima mali broj nedostataka i veoma je tolerantan za varijacije u parametrima i materijalima. Jedna od značajnih prednosti u odnosu na elektrolučne postupke zavarivanja je što nema distorzije odnosno krivljenja lima u toku odvijanja procesa FSW (Slika 2.5).



Slika 2.5. Distorzije limova zavarenih elektrolučno i postupkom FSW [3]

Pored navedenih, postupak FSW posjeduje svojstva koja su vema rijetko prisutna kod drugih postupaka: formiranje zavarenog spoja sa zanemarljivo malim unutrašnjim naponima, dobijanje spojeva koji su otporni na koroziju i pojavu krto g loma, ali sve to kod materijala kod kojih do sada to nije bilo moguće, ili je bilo izuzetno teško i skupo ostvariti. Zbog toga je u ekonomskom pogledu postupak FSW, ubjedljivo najefikasniji, a ekološki je apsolutno čist.

Kao što je već rečeno FSW, spada u grupu postupaka zavarivanja u čvrstom stanju. Dakle ne dolazi do topljenja materijala, tako da šavovi imaju izrazito dobre karakteristike.

Generalno, prednosti postupka FSW su:

- ◆ Mogućnost potpune automatizacije procesa. Lako se proces automatizuje na glodalicama.
- ◆ Dobijanje homogene sitnozrnaste strukture spoja sa visokim mehaničkim i drugim svojstvima.
- ◆ Mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala.
- ◆ Dodatni materijal nije potreban.
- ◆ Dobra mehanička svojstva zavarenog spoja.
- ◆ Poboljšana sigurnost usled odsustva otrovnih gasova ili prskanje od rastopljenog materijala.
- ◆ Nema potrošnog materijala (konvencioni čelični alat može da zavari 1000 metara legure aluminijuma).
- ◆ Niži troškovi postavke i obuke varilaca.
- ◆ Nije potreban sertifikat zavarivača.
- ◆ Nema isparavanja štetnih gasova.
- ◆ Minimalna skupljanja i krivljenja materijala tokom procesa zavarivanja.
- ◆ Nema poroznosti, niti prskanja.
- ◆ Nije potreban zaštitni gas za zavarivanje aluminijuma.

- ◆ Velika ušteda energije.
- ◆ Može da se zavaruje u svim pozicijama (horizontalno, vertikalno, orbitalno, nadglavno itd.) jer nema prosipanja materijala iz šava.
- ◆ Može se koristiti za izvođenje linearnih, nelinearnih, obimnih i trodimenzionalnih zavarenih spojeva.
- ◆ Dobijeni zavareni spoj ne sadrži nemetalne uključke i nečistoće.
- ◆ Jednaka širina metala šava po dužini.
- ◆ Generalno dobar izgled šava i minimalna debljina ispod i iznad zavarenog spoja, čime se smanjuje potreba za skupe obrade posle završenog procesa zavarivanja.

Ipak, proces FSW je povezan sa izvjesnim brojem defekata. Nedovoljna varna temperature, zbog male brzine obrtanja alata ili velike brzine uzdužnog kretanja, što znači da je materijal primio veliku plastičnu deformaciju tokom procesa zavarivanja. Ovo može dovesti do „tunel” efekta duž šava tokom čitavog procesa, a nedostaci se mogu javiti i na površini. Mala temperatura može ograničiti uticaj alata i tako smanjiti kontinuitet veze između materijala sa svake strane šava.

Generalno, nedostaci postupka FSW su:

- ◆ Postojanje rupe na kraju procesa zavarivanja, kada je alat izvučen iz radnog komada.
- ◆ Potrebna velika vertikalna (aksijalna) sila.
- ◆ Potrebno je dobro stegnute ploče lima koje se zavaruju, da tokom procesa ne bi došlo do njihovog razvrtanja.
- ◆ Manje fleksibilna od manuelnih lučnih procesa (problemi sa varijacijama debljine i nelinearni šav)
- ◆ Često sporije uzdužno kretanje od drugih tehnika procesa zavarivanja, (za manje dužine zavarenih spojeva).
- ◆ Ne može se vršiti zavarivanje kod koga se zahtjeva dodavanje materijala.
- ◆ Mora se koristiti osloni ploča.

2.6. Materijali koji se mogu zavarivati postupkom FSW

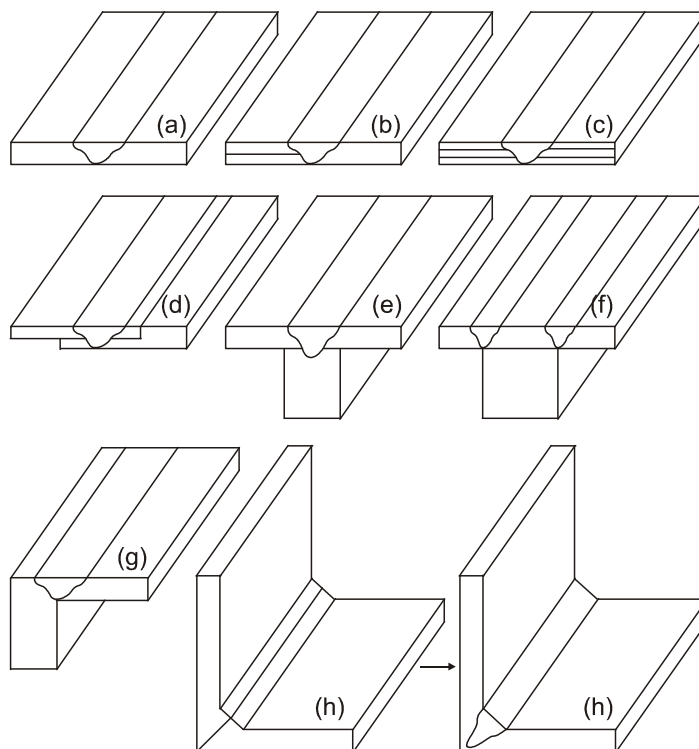
Postupkom FSW uspješno se zavaruje [17]:

- ◆ Aluminijum i njegove legure: serija 1XXX (komercijalno čist aluminijum), serija 2XXX (Al-Cu), serija 3XXX (Al-Mn), serija 4XXX (Al-Si), serija 5XXX (Al-Mg), serija 6XXX (Al-Mg-Si), serija 7XXX (Al-Zn) i serija 8XXX (Al-Li).
- ◆ Bakar i njegove legure.
- ◆ Olovo.
- ◆ Titanijum i njegove legure.
- ◆ Legure Magnezijuma.
- ◆ Cink.
- ◆ Plastika.
- ◆ Niskougljenični čelici.
- ◆ Austenit, martenzit, dupleks čelici.
- ◆ Legure nikla.

2.7. Vrste zavarenih spojeva

Postupkom FSW mogu se spajati limovi i pločasti djelovi praktično u svim položajima, u dijapazonu debljina od 0.5 mm do 75 mm od legura aluminijuma i do 25 mm

od legura Ti i čelika. Ovim postupkom najčešće se izrađuju sučeonni i preklopni, a mnogo ređe ugaoni spojevi (šavovi) koji su prikazani na Slici 2.6 [6].



Slika 2.6. Vrste zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW

(a) sučeonni spoj; (b) kombinovani sučeonni i preklopni spoj; (c) višestruki preklopni spoj;
 (d) upušteni preklopni spoj; (e) T spoj dva elementa; (f) T spoj tri elementa;
 (g) ugaoni-sučeonni spoj; (h) ugaoni spoj [6, 8]

Najčešće se sučeonno spajaju radni komadi debljine od 1.2 mm do 50 mm. Zavarivanje može da se izvede jednostrano ili dvostrano. Najoptimalnije je zavarivanje sučeonih spojeva debljine 1.6 mm do 10 mm, a preklopnih, debljine 1.2 mm do 6.4 mm [4]. Zavarivanje može da se izvodi sa jednim ili sa više alata istovremeno, sa jedne ili sa obje strane limova, tako da se u jednom prolazu dobija veći broj spojeva. Pomoću procesa FSW mogu da se realizuju ne samo ravni pravolinijski, već i krivolinijski spojevi različite konfiguracije u različitim položajima, uključujući i tzv. nad glavom. U tom pogledu, praktično nema velikih ograničenja. Pored toga, razvoj tačkastog zavarivanja trenjem FSSW omogućava još širu njegovu primjenu, čak i u uslovima montaže specifičnih djelova. Dužina spoja može da bude ograničena jedino veličinom postolja i za sada se kreće do približno 20 metara. Pored visokih mehaničkih svojstava, zavareni spoj ima glatku površinu i dodatna mehanička obrada u velikom broju slučajeva nije potrebna. Istovremeno, kod postupka FSW, uopšte nema gubitka materijala, što je važna karakteristika i prednost u odnosu na mnoge druge postupake zavarivanja. Sa tog aspekta je postupak FSW izuzetno ekonomičan. Postupak FSW je najprije testiran na aluminijumu kao materijalu koji se u savremenoj industriji veoma mnogo koristi ali kod koga se tradicionalnim postupcima teško dobijaju kvalitetni spojevi zbog izražene pojave poroznosti šava i distorzije djelova. Obje pojave su veoma štetne, zahtijevaju skupu dodatnu obradu kojom ne mogu potpuno da se otklone, a posebno su izražene kod limova [8].

2.8. Tehnološki parametri procesa FSW

Fizička suština generisanja toplote i formiranja spoja kod procesa FSW je dosta slična kao kod običnog zavarivanja trenjem, pa su i osnovni parametri procesa slični, a to su: broj obrtaja alata (ugaona brzina okretanja alata), translatorska brzina alata (brzina zavarivanja) i aksijalna sila. Oni najviše zavise od termofizičkih svojstava materijala i debljine lima, a njihove optimalne vrijednosti se, za sada, određuju isključivo eksperimentalno. Kao parametri procesa, određuju se i odgovarajući geometrijski parametri pojedinih elemenata alata (prečnik trna alata, prečnik čela alata i ugao nagiba trna alata) [8]. Pored ovih parametara značajni su i dubina prodiranja čela alata u materijal, kao i ugao nagiba ose alata [18].

2.8.1. Broj obrtaja i translatorska brzina alata

Postoje dvije brzine kretanja alata koje treba posmatrati kod postupka FSW. Ugaona brzina kojom se okreće alat i translatorska brzina koja određuje brzinu zavarivanja posmatranog materijala odnosno brzina zavarivanja (Slika 2.7). Ova dva parametra imaju veliki značaj kod postupka FSW. Oni moraju biti pravilno odabrani, da bi se obezbijedilo uspješno i efikasno odvijanje procesa FSW [18].

Odnos između brzine zavarivanja i toplotne energije u toku procesa zavarivanja je dosta složen, ali generalno se može reći, da će povećanje ili smanjenje brzine rezultirati hladnijim ili toplijim šavovima. U cilju da se dobije što bolji šav, potrebno je da materijal oko alata bude dovoljno zagrijan da omogući plastični protok materijala i smanji silu koja djeluje na alat. Ako alat nije dovoljno zagrijan, onda je moguće da se javljaju određene praznine ili druge greške koje mogu biti prisutne u zoni miješanja, a u ekstremnim slučajevima može doći i do loma alata. Pretjeran unos toplote može biti štetan za konačan izgled šava, jer može doći do topljenja materijala. Broj obrtaja tokom odvijanja procesa FSW je konstantan i kreće se u širokim granicama od 100 o/min do 2000 o/min, dok je za neke materijale i veći.

Translatorska brzina je istovremeno i brzina zavarivanja i ona zavisi od mehaničkih svojstava i debljine materijala limova.

2.8.2. Sile zavarivanja

Sile koje djeluju na alat tokom procesa FSW su: vertikalna ili aksijalna, uzdužna ili longitudinalna i bočna sila.

Vertikalna sila - F_z je potrebna da održi poziciju alata i materijal ispod površine. Vertikalna (aksijalna) sila kod procesa FSW je u stvari sila kojom alat deluje na materijal. Ona je najveća u početnom periodu prodiranja trna kroz materijal, a zatim se smanjuje, dok čelo alata ne dohvati gornju površinu materijal koji se zavaruje. Tada ponovo počinje da raste dok se ne dostigne određena temperatura kad počinje da opada i zadržava svoju konstantnu vrijednost sve do završetka procesa FSW. Međutim, za razliku od rotacionog zavarivanja trenjem, veličina aksijalne sile kod postupka FSW mnogo je manja, zbog načina generisanja toplote, ona ne zavisi od površine zavarivanih djelova. Ona zavisi od svojstava materijala zavarivanih djelova i geometrijskih karakteristika trna i čela alata i može da se kreće do 200 kN. Kako je komponenta vertikalne sile dominantna kod procesa FSW, ona se često naziva i sila zavarivanja - F_z .

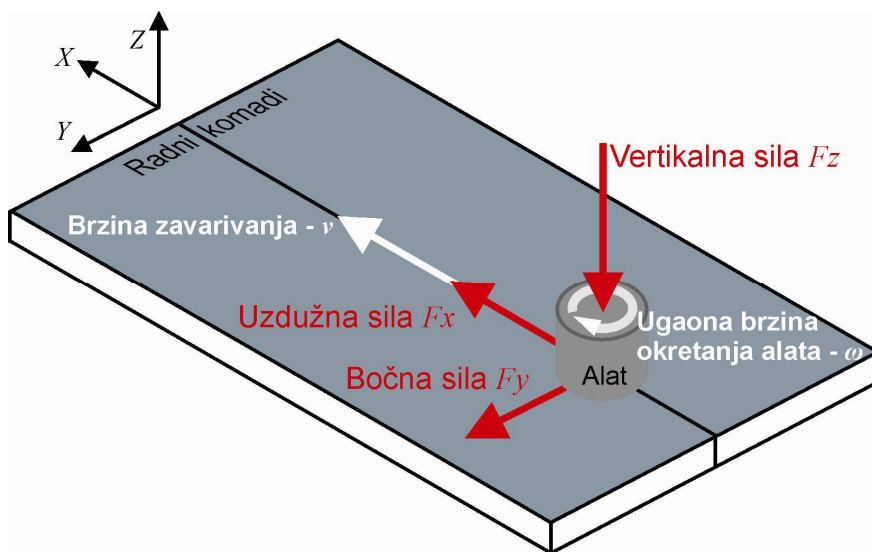
Uzdužna - F_x ili longitudinalna sila djeluje paralelno smjeru kretanja alata, a pozitivan smjer se definiše sa smjerom kretanja alata. Budući da se ova sila javlja kao

posledica otpora materijala kretanju alata, može se očekivati da će ova sila ako se smanji temperatura materijala oko alata biti veća.

Bočna sila - F_y može da djeluje normalno na pravac kretanja alata i pozitivan smjer se definiše ka istosmjernoj strani šava.

U cilju sprečavanja loma alata i smanjivanja pretjeranog habanja alata, proces FSW, treba da bude takav da sila koja djeluje na alat, bude, što je moguće niža i da se nagle promjene izbjegnu. Kako bi se našla najbolja kombinacija parametara zavarivanja postupkom FSW, mora se postignuti kompromis, jer uslovi koji favorizuju niske sile (npr. visok unos toplote, mala brzina zavarivanja) mogu biti nepoželjni sa stanovišta produktivnosti i kvaliteta šava.

Na Slici 2.7 dat je prikaz sila koje djeluju tokom odvijanja procesa FSW.



Slika 2.7. Prikaz sila F_x , F_y i F_z , kao i brzina v i ω

2.8.3. Dizajniranje alata za zavarivanje postupkom FSW

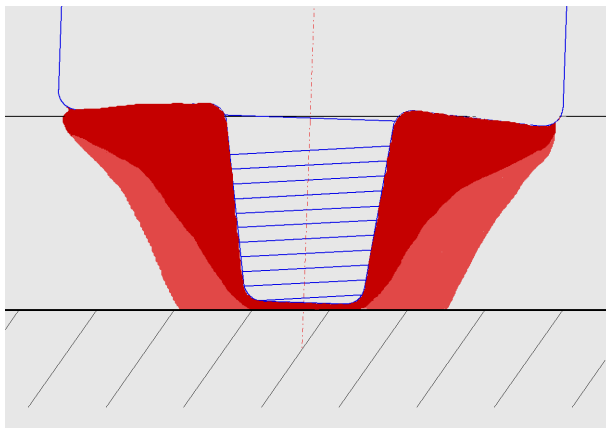
Dizajn alata je kritičan faktor koji može da utiče na poboljšanja, kvalitet šava i maksimalnu brzinu zavarivanja. Poželjno je da materijal koji se koristi za izradu alata posjeduje dovoljnu čvrstoću i tvrdoću na temperaturi zavarivanja. Dalje bi trebalo da ima dobru otpornost na oksidaciju i nisku toplotnu provodljivost da bi se smanjio gubitak toplote i toplotna oštećenja na mašinama [18].

Poboljšanja u konstrukciji alata su pokazala velika unapređenja produktivnosti i kvaliteta. Institut za zavarivanje TWI je razvio specijalno konstruisane alate i na taj način povećao debljine ploča koje mogu da se zavaruju. Primjer je spirala (whorl) koja ima zašiljen trn alata gdje se postiže bolji protok materijala. Dodatne konstrukcije alata uključuju Trifluete i Trivex seriju. Trifluete je složen sistem od tri zašiljena trna alata sa zavojnicom, koji poboljšavaju kretanje materijala oko alata, odnosno omogućavaju bolje miješanje materijala. Trivex serija koristi jednostavnije necilindrične trnove alata, koji doprinose smanjenju sila koje djeluju na alat [18].

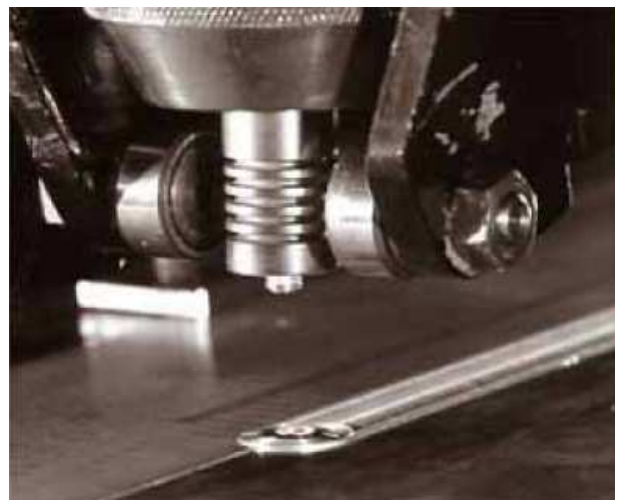
Većina alata imaju konkavan profil čela alata, koji sprečava da materijal koji je izašao usled prodiranja trna alata ostane ispod čela alata. Trifluete serija alata koristi alternativni sistem sa nizom koncentričnih žljebova koji su namijenjeni da proizvedu dodatno kretanje materijala u gornjim slojevima šava [18].

2.8.4. Ugao nagiba i dubina prodiranja čela alata

Dubina prodiranja je definisana kao dubina najniže tačke čela alata ispod površine zavarivanih ploča i utvrđeno je da je ovaj parametar kritičan za obezbjeđivanje kvaliteta šava. Prodiranje ispod površine materijala povećava pritisak ispod alata, a to može dovesti do zakrivljenja ose alata od 20 do 40, kao što je prikazano na Slici 2.8. Dubina prodiranja mora biti pravilno podešena, jer mora da se obezbijedi neophodni silazni pritisak, ali i da se obezbijedi da alat ne prodire previše u materijal koji se zavaruje. Sa druge strane pretjerano prodiranje može da dovede da trn alata prodre kroz radne komade u oslonu ploču, što može dovesti do loma trna alata ili do lošeg kvaliteta šava. Ovaj problem je prevaziđen tako što su konstruisane mašine sa hidrauličnim podešavanjem položaja čela alata, kojima se ostvaruje odgovarajući pritisak na ploče koje se zavaruju. Na ovaj način se kontroliše dubina prodiranja u materijal i sprečava se pojava deformacija ispupčenja ploča u blizini metala šava. Na Institutu za zavarivanje TWI, dizajniran je mehanički sistem upravljanja za kontrolu i održavanje položaja čela alata u odnosu na površinu materijala. Sistem se sastoji od dva valjka koja su postavljena pored alata, a oni obezbjeđuju da alat na prodre previše u materijal i na taj način omogućavaju kvalitetno zavarivanje [2, 18]. Na Slici 2.9 dat je prikaz sistema za kontrolu dubine prodiranja čela alata.



Slika 2.8. Prodiranje čela alata u materijal i ugao nagiba ose alata [18]



Slika 2.9. Sistem za kontrolu dubine prodiranja čela alata u materijal koji se sastoji od dva pomoćna valjka [2]

3. INTEGRACIJA I RAZVOJ TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA - FSW

3.1. Eksperimentalna istraživanja

3.1.1. Eksperimentalne postavke

Kako je za uspješno izvođenje procesa FSW, od velikog značaja poznavanje sile zavarivanja kao i toplote koja se javlja prilikom odvijanja procesa, u eksperimentalnim istraživanjima će se vršiti njihovo mjerenje. Da bi parametri sile i temperature bili u dozvoljenim granicama zavisi od izbora geometrijskih parametara alata, kao i režima zavarivanja (ugaone brzine okretanja alata i brzine zavarivanja). Zbog toga se danas posvećuje velika pažnja pravilnom izboru ovih parametara. Nakon izvršenih mjerenja sile zavarivanja i temperature, potrebno je izvršiti mehanička ispitivanja, kako bi se utvrdio kvalitet zavarenog spoja, kao i defekti koji se javljaju tokom odvijanja procesa FSW.

Za zavarivanje lima legure aluminijuma usvojena je familija alata kod koje su varirani geometrijski parametri. Alat je osno simetričan i sastoji se iz radnog dijela i tijela alata. Tijelo alata služi za njegovo stezanje u čeljustima mašine koja izvodi proces spajanja. Radni dio alata sastoji se od trna prečnika d i čela alata prečnika D . Ostali djelovi alata kao i radne karakteristike mašine usvojeni su tako da zadovolje proces FSW. Usvojena familija alata za proces FSW je data na Slici 3.1.



Slika 3.1. Familija alata za proces FSW: D - prečnik čela alata, d - prečnik trna alata i α - ugao nagiba trna alata

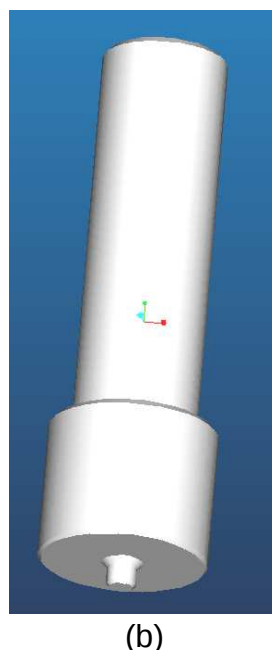
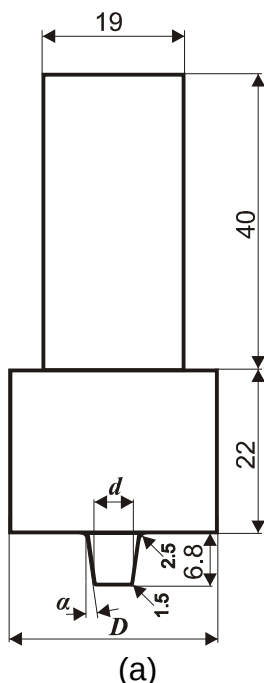
Za izvođenje eksperimenta, procesa spajanja materijala deformisanjem, odnosno zavarivanja postupkom FSW, usvojeno je sledeće:

- ♦ Materijal koji se koristi u eksperimentalnim istraživanjima je legura aluminijuma 6082-T6 (AlSi1MgMn), koja se dosta često zavaruje postupkom FSW, a u industriji ima veliku primjenu.
- ♦ Debljina materijala koji se zavaruje je 7.8 mm.
- ♦ Proces zavarivanja odnosno proces deformisanja materijala se izvodi u čvrstom stanju (bez topljenja materijala).

Istraživanja su koncipirana tako da se izvode u tri faze. U prvoj fazi vrši se zavarivanje radnih komada (limova od legure aluminijuma 6082-T6) i mjerenja komponenti sile zavarivanja (F_x - uzdužne sile, F_y - bočne sile i F_z - vertikalne sile). U drugoj fazi eksperimentalnih istraživanja vršeno je mjerenje temperature zavarivanog materijala na šest mjesta. Treća faza se odnosi na mehanička ispitivanja zavarenog spoja [19].

3.1.2. Alati za zavarivanje postupkom FSW

Familija alata koja se koristi u ekperimentalnim istraživanjima, napravljena je od čelika Č.4751. Nakon mašinske obrade alati su termički obrađeni. Familija alata za proces FSW dizajnirana je u kompjuterskom programu Pro/ENGINEER-u. Na Slici 3.2 (b) dat je dizajniran alat u Pro/ENGINEER-u, za centralne tačke plana. Izrađeni set alata za FSW dat je na Slici 3.3.



Slika 3.2. Alat za FSW: (a) alat sa usvojenim dimenzijama, (b) alat broj 9 dizajniran u Pro/ENGINEER-u, za centralne tačke plana broj 33, 34, 35 i 36.



Slika 3.3. Izrađeni set alata po planu eksperimenta

3.2. Izvođenje eksperimenta

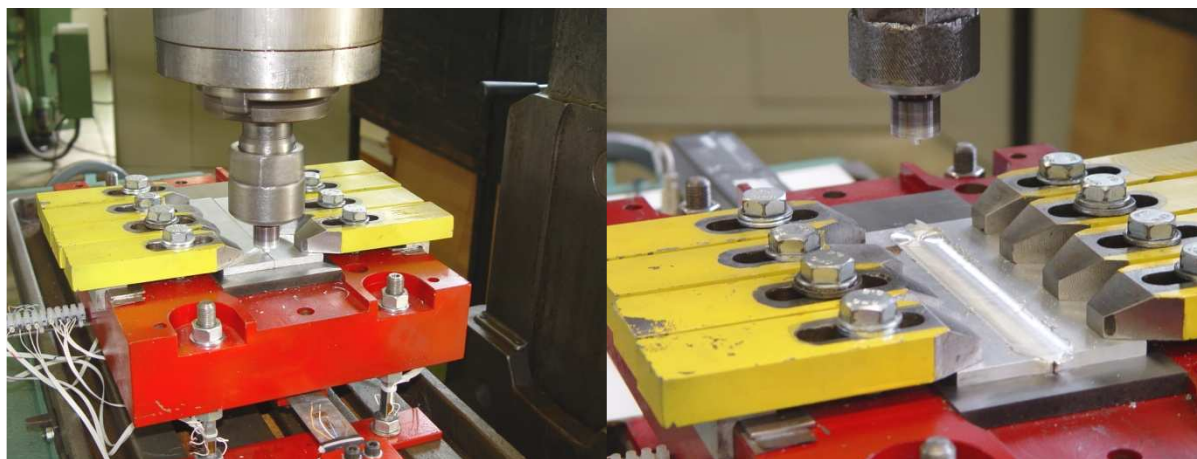
3.2.1. Mjerenje sila kod procesa FSW

Mjerenje sila je izvršeno korišćenjem precizne analogno-digitalne mjerne opreme, povezane u informacioni mjerni sistem.

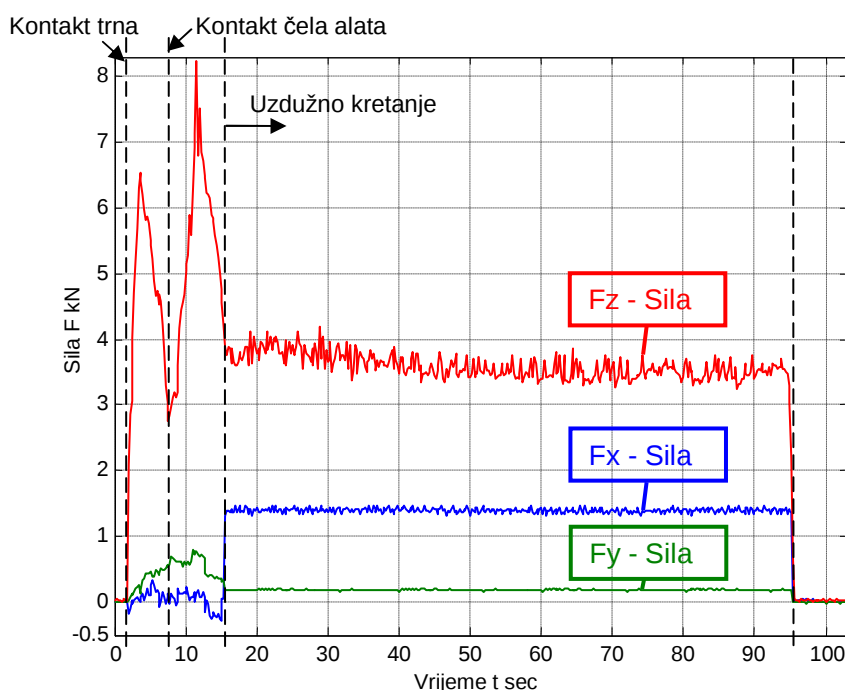
Izvođenje procesa u odnosu na kretanje alata se može podijeliti u tri etape. U prvoj etapi rotirajući alat brzim hodom dolazi do linije spajanja, nakon čega se alat sa svojim trnom ukopava u materijal. Kada je čelo alata dohvatilo radni komad, započinje proces zavarivanja trenjem, odnosno proces deformisanja materijala u čvrstom stanju. Druga

etapa počinje puštanjem u rad uzdužnog kretanja radnog stola glodalice, gdje u stvari počinje spajanje materijala radnih komada. Dužina zavarenog spoja iznosi 166 mm. Treća etapa počinje kada se započne izvlačenje alata iz radnog komada, gdje se i završava proces FSW. U tom trenutku se zaustavlja i proces mjerenja sa informacionim mjernim sistemom. Dijagrami dobijeni na ovaj način su u funkciji napona struje (V) i vremena (s), iz kojih se na osnovu poznatih relacija i vrijednosti baždarenja mjerne opreme dobijaju dijagrami sila (N) u funkciji vremena (s). Zavarivanje radnih komada je vršeno u jednom prolazu.

Na Slici 3.4 prikazan je početak procesa FSW kada je alat prišao liniji spajanja, dok je na Slici 3.5 prikazan završetak procesa FSW kada je alat izašao iz materijala zavarenih radnih komada. Sa slike se jasno vidi otisak od alata i zavareni spoj dobijen postupkom FSW, kao i rupa „keyhole” koju ostavlja otisak trna alata. Na Slici 3.6 su dati dobijeni dijagrami komponenti sila u funkciji vremena procesa FSW u centralnoj tački plana [19].

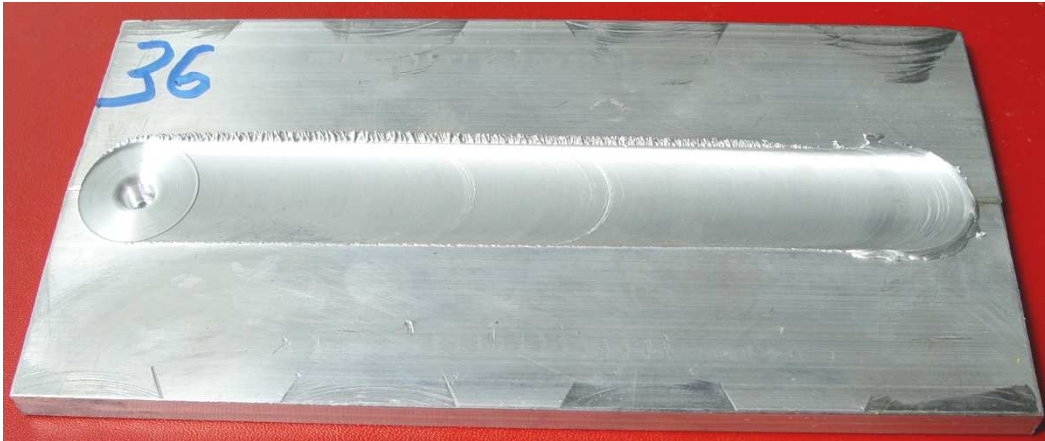


Slika 3.4. Prikaz početka procesa FSW Slika 3.5. Prikaz završetka procesa FSW



Slika 3.6. Dijagram sila dobijen korišćenjem otporničkih davača (mjernih traka), u centralnoj tački plana [19]

Na Slici 3.7 je dat prikaz zavarenih radnih komada sa gornje strane, odnosno strane sa koje se vrši zavarivanje.



Slika 3.7. Izgled zavarenog spoja sa gornje strane zavarenih radnih komada, u centralnoj tački plana

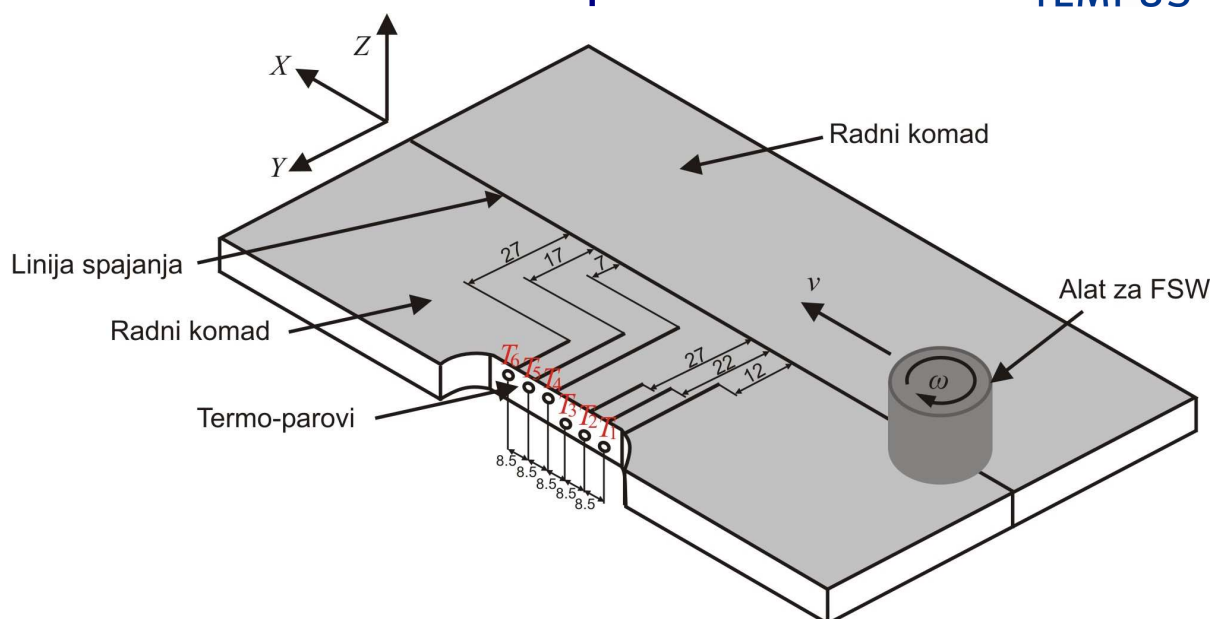
Izgled vara sa donje strane zavarenih radnih komada zavisi od oslone ploče. Pošto je oslona ploča kaljena i fino brušena zavareni spoj će imati glatku površinu, tako da se pod dodiranjem ruke ne može osjetiti spoj radnih komada. Izgled zavarenog spoja sa donje strane radnih komada je dat na Slici 3.8.



Slika 3.8. Izgled zavarenog spoja sa donje strane zavarenih radnih komada, u centralnoj tački plana

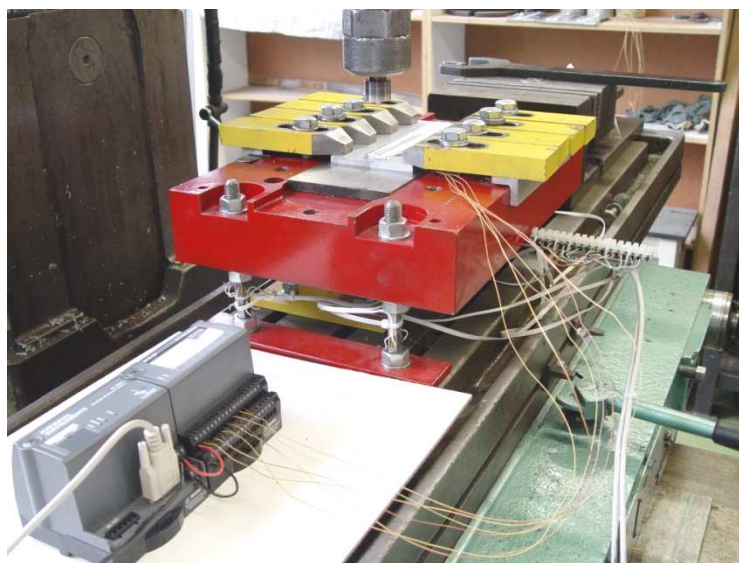
3.2.2. Mjerenje temperature kod procesa FSW

U okviru druge faze eksperimentalnih istraživanja izvršeno je mjerenje temperature kod procesa FSW legure aluminijuma 6082-T6, pomoću precizne analognog-digitalne mjerne opreme povezane u informacijski mjerni sistem. Šema postavljanja termo-parova u odnosu na liniju spajanja data je na Slici 3.9.



Slika 3.9. Šema mjernih pozicija temperature u radnom komadu koji se zavaruje

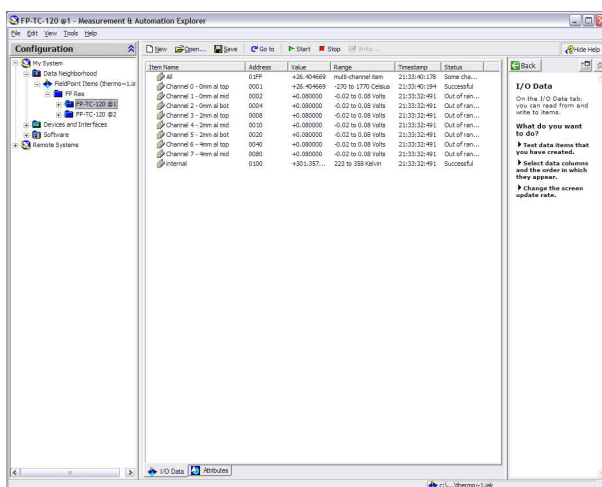
Ovaj raspored termo-parova nam omogućava da izmjerimo temperaturu u svim mikrostrukturnim zonama i da imamo potpunu sliku generisanja i distribucije toplote kroz materijal. Na Slici 3.10 prikazani su zavareni radni komadi sa postavljenim termo-parovima, koji su povezani u informacijski sistem za mjerenje temperature.



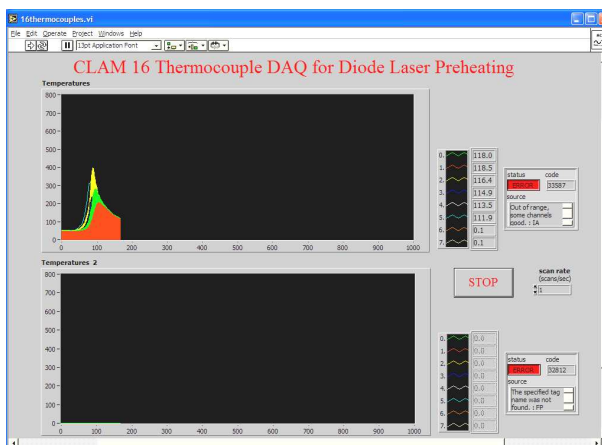
Slika 3.10. Prikaz mjerenja temperature kod procesa FSW

Radni program koji se koristi prilikom mjerenja temperature je softver „Measurement & Automation Explorer version 3.1.0.3021“, čiji je interfejs prikazan na Slici 3.11. U ovom softveru je napravljen fajl „thermocouples16.iak“, koji je prilagođen korišćenom mjernom modulu FP-1000 i podešeni su parametri kao što su broj kanala koji se koriste (u našem slučaju šest), kao i izbor jedinica u kojima će se vršiti mjerenje temperature (u našem slučaju stepeni Celzijusove skale). Za akviziciju podataka koristi se program napravljen pomoću LabVIEW softvera „16thermocouples.vi“, u kojem su izmjerene temperature u svim tačkama eksperimentalnog plana i dobijene vrijednosti u grafičkom i „data“ obliku

[21]. Na Slici 3.12 date su dobijene vrijednosti temperature za centralnu tačku eksperimentalnog plana broj 36.



Slika 3.11. Softver Measurement & Automation Explorer



Slika 3.12. Eksperimentalno dobijena promjena temperature u funkciji vremena, u centralnoj tački plana broj 36

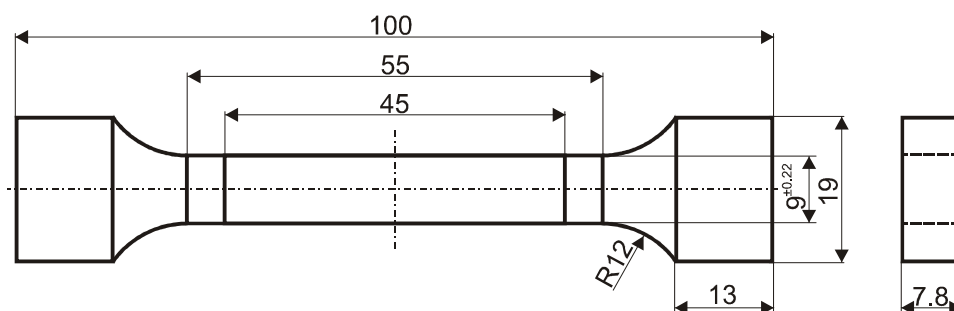
3.3. Mehanička ispitivanja zavarenog spoja

Spoj zavaren primjenom postupka FSW kao kompleksna i heterogena struktura, predstavlja kritično mjesto u zavarenom radnom komadu, odnosno kada je u pitanju industrijska primjena u zavarenoj konstrukciji. Zbog toga se u najvećem broju slučajeva, sigurnost zavarenog spoja odnosno zavarene konstrukcije procjenjuje na osnovu mahančkih osobina zavarenog spoja.

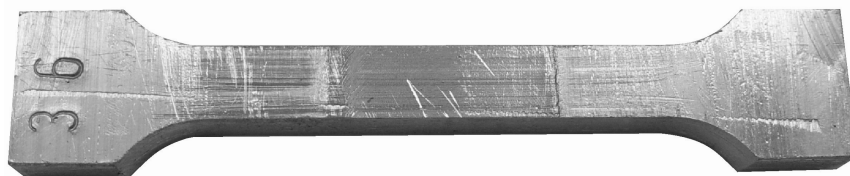
3.3.1. Određivanje zatezne čvrstoće

Prilikom ispitivanja zatezanjem korišćene su standardne mašine i epruvete. Za ispitivanje zatezanjem korišćen je standard MEST EN 10002-1:2008 [16], a ispitivanje se izvodi na sobnoj temperaturi. Mašina - kidalica koja se koristi prilikom ispitivanja je sa modulima od 200 kN, 500 kN i 1000 kN. Na osnovu standarda MEST EN 10002-1:2008 usvojen je oblik i dimenzije epruvete za ispitivanje zatezanjem [19].

Na Slici 3.13 je dat šematski prikaz epruvete sa dimenzijama, a na Slici 3.14 i Slici 3.15 uzorci epruvete u centralnoj tački plana, u y i x pravcu.



Slika 3.13. Epruveta za ispitivanje zatezanjem urađena po standardu MEST EN 10002-1:2008 [16]

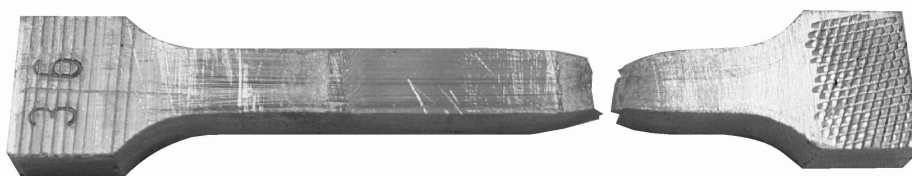


Slika 3.14. Uzorak (epruveta), y - pravac normalan na pravac zavarivanja



Slika 3.15. Uzorak (epruveta), x - pravac koji se poklapa sa pravcem zavarivanja

Prilikom ispitivanja zatezanjem uzoraka iz zavarenih radnih komada, korišćena je mala brzina deformisanja 1.5 mm/min. Na Slici 3.16 dat je prikaz istegnute epruvete isječene iz y - pravca za centralnu tačku plana, dok je na Slici 3.17 dat prikaz istegnute epruvete isječene iz x - pravca za centralnu tačku plana.



Slika 3.16. Istegnuta epruveta, isječena iz y - pravca



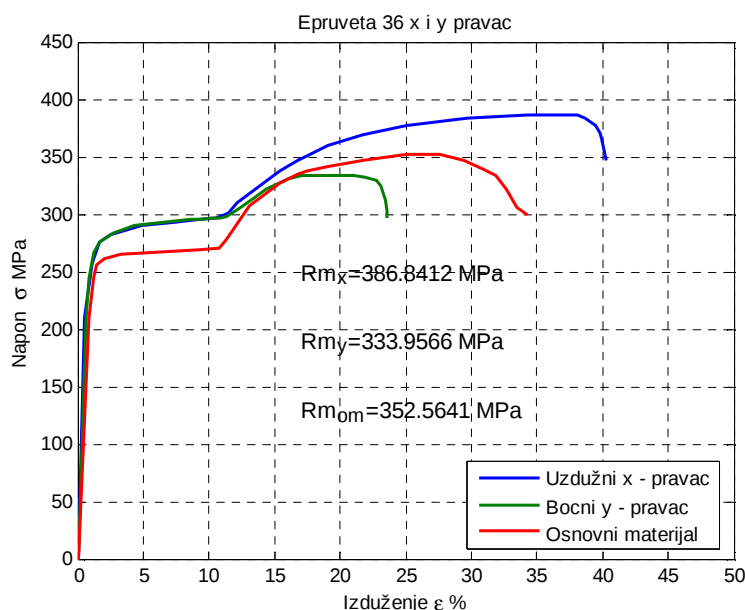
Slika 3.17. Istegnuta epruveta, isječena iz x - pravca

Na Slici 3.18 dat je prikaz istraživačkog mjesta za ispitivanje epruveta istezanjem.



Slika 3.18. Ispitivanje epruveta zatezanjem

Na Slici 3.19 dati su dijagrami istezanja u centralnoj tački plana za epruvete uzete iz x i y pravca, sa vrijednostima zatezne čvrstoće R_{mx} i R_{my} , kao i dijagram istezanja osnovnog materijala.

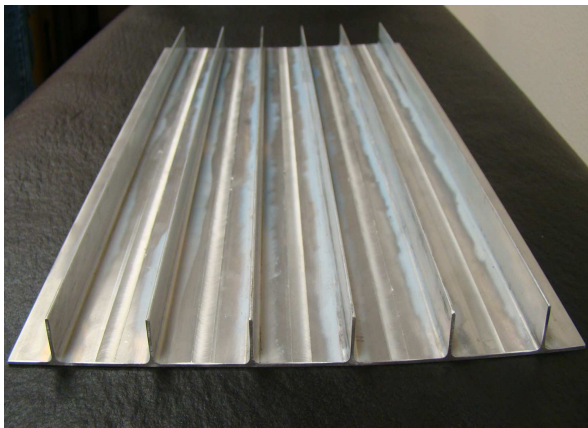


Slika 3.19. Dijagram istezanja za centralnu tačku plana

4. PRIMJENA POSTUPKA FSW

Primjena zavarivanja postupkom FSW u industriji počela je najprije u fabrici „SAPA“ u Švedskoj i to za izradu jednostavnih platformi od aluminijuma kod brodskih uređaja za zamrzavanje ribe. Kasnije je u ovoj fabrici razvijena čitava serija automatizovanih mašina za proces FSW. Brodogradnja je dakle prvi sektor u kome je postupak FSW dobio svoju punu primjenu. U ovoj industrijskoj grani postupak FSW se koristi u izgradnji paluba (Slika 4.1), bokova broda, podova, pregrada, konstrukcije broda, jarbola, čamaca za jedrenje itd., zaključno sa platformama za slijetanje helikoptera na brodovima. Posljednjih godina postupak FSW, se intenzivno koristi u proizvodnji željezničkih vagona, vagona cistijerni, putničkih vagona, tramvaja, teretnih vagona, tijela kontejnera, itd. Pri izradi vozova nove generacije postupak FSW se koristi pri zavarivanju: noseće konstrukcije, stranica voza,

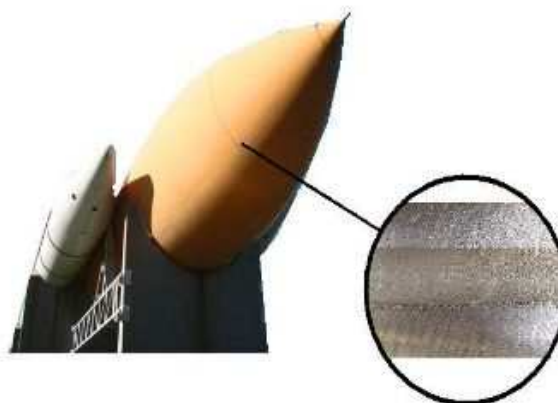
krovova, podova (Slika 4.2) i mnogih drugih elementa koji se izrađuju od legura aluminijuma. Umjesto tradicionalnih postupaka zavarivanja, sada se u željezničkoj industriji koristi isključivo postupak FSW [4, 8, 17].



Slika 4.1. Zavarivanje palube broda Slika 4.2. Proizvodnja poda željezničkih

Dobre karakteristike i visoka pouzdanost zavarenih spojeva dobijenih postupkom FSW došle su do izražaja u izradi velikog broja različitih djelova u avio i svemirskoj industriji. Kod Spejs Šatla spojevi spoljašnjih rezervoara za gorivo od nedavno se rade isključivo postupkom FSW. Ovo omogućuje da se ovi rezervoari rade od specijalnih legura Al-Li 2195, čime se njihova masa smanjila za više od tri tone. U avio industriji preko 40.000 zakivaka zamijenjeno je spojevima izvedenim postupkom FSW, sa tendencijom daljeg rasta. Kada su u pitanju visoko odgovorni spojevi, obično se koristi postupak FSW. Kako je postupak FSW visoko produktivan, vrijeme izrade rezervoara za gorivo kod Delta programa u fabrikama Boing je skraćeno sa 23 na 6 dana, a ukupni troškovi su smanjeni za 60% [8].

Primjeri primjene postupka FSW, u avio i svemirskoj industriji dati su na Slici 4.3 i Slici 4.4.



Slika 4.3. Zavarivanje trupa aviona Slika 4.4. Zavarivanje rezervoara rakete
 korišćenjem postupka FSW [17] korišćenjem postupka FSW [17]

Zavarivanje postupkom FSW, koristi se i u nekoliko vodećih svjetskih automobilskih kompanija. Cilj je da se proizvedu vozila manje težine, čime se povećava njihova nosivost i smanjuje potrošnja goriva, pa se i smanjuje zagađenje životne sredine. Ovaj postupak zavarivanja se koristi pri izradi: motora i šasija, felni, veze sa hidrauličnim cijevima, karoserija, tijela kamiona, cistijerni za gorivo, prikolica, autobusa i vozila za prevoz na aerodromima, okvira motocikala i bicikala, pri popravci automobila izrađenih od aluminijuma. Primjena u automobilskoj industriji je i kod proizvodnje bandaža. U firmi Hydro Aluminium (Norveška) zavaruje se tijelo bandaža izrađeno valjanjem, i glavčina, izrađena livenjem ili kovanjem. Na ovaj način smanjena je masa bandaža. U firmi Shoma Aluminium & Rubber (Japan) zavarene su vulkanizirane cijevi prečnika od 20 mm do 30 mm. Ove cijevi se koriste kod izrade amortizera za putničke automobile [4].

Zavarivanja postupkom FSW, koristi se i pri proizvodnji: kućišta elektromotora, rashladnih ploča, kuhinjske opreme, bijele tehnike, benzinskih rezervoara i plinskih boca, namještaja itd.

Primjenom postupka FSW, jednako dobri rezultati dobijeni su i pri spajanju limova od Cu, Zn, Mg i njihovih legura, zatim kod mnogih vrsta čeličnih limova ali i kod kombinacija različitih metala, kao što je Ti i čelik, kao i kod pojedinih kompozitnih materijala na bazi metalne matrice. Aluminijum, bakar, ugljenični i nisko legirani čelici i mnogi drugi metali zavaruju se postupkom u normalnim spoljašnjim uslovima. Ali kod zavarivanja čelika sa velikim sadržajem legirajućih elemenata, preporučuje se upotreba nekog od zaštitnih gasova u cilju sprečavanja štetnog uticaja spoljašnje atmosfere. Limovi od nisko ugljeničnog čelika i čelika sa 12% hroma debljine od 3 mm do 12 mm, mogu se uspješno zavarivati samo sa jedne strane. Limove debljine veće od 25 mm treba zavarivati dvostrano [8].

4.1. Mašine za zavarivanje

Mašine za zavarivanje postupkom FSW, najviše su razvijene u skandinavskim zemljama i u Japanu. Najveći broj patenata iz oblasti konstruktivnih izvedbi mašina ima u Japanu. Mašina za duge šavove razvijena od „ESAB” (Švedska) (Slika 4.5), koristi se u „Marine Aluunim Werft” (Norveška), za zavarivanje brodskih panela i za željezničke vagone. Ova mašina se koristi i za: teške profile, H-nosače, T-nosače i platforme; izrađuju se paneli dužine 6 m x 16 m i visine do 155 mm. Kod izrade nosača dužina je bez ograničenja, visina do 300 mm i širina do 400 mm. Materijali koji se zavaruju su Al legure, debljine od 1.6 mm do 15 mm. Legura aluminijuma (AA6082-T6) debljine 5 mm, zavaruje se brzinom od 0.7 m/min do 1.0 m/min. Mašina je u cjelini automatizovana [2, 4]. „ESAB” proizvodi i mašine manjeg radnog prostora, od 1 m do 2 m (Slika 4.6). Posljednjih godina u TWI institutu izrađen je prototip mašine za zavarivanje sa radnim prostorom 3.3 m x 4.0 m x 1.5 m i brzinom zavarivanja od 1.7 m/min [4, 17].



Slika 4.5. Mašina za zavarivanje postupkom FSW,
za duge šavove proizvedena u „ESAB”-u



Slika 4.6. Manja mašina za zavarivanje postupkom FSW
proizvedena u „ESAB”-u

5. ZAKLJUČCI

U studiji slučaja je prezentiran novi metod spajanja legure aluminijuma, koji se izvodi u čvrstom stanju bez topljenja materijala poznatiji pod imenom Zavarivanje trenjem sa miješanjem (*Friction Stir Welding - FSW*). Ovaj postupak je vrlo aktuelan u svijetu, a u savremenoj industriji ima veliku primjenu. Zbog svojih karakteristika, primjenjuje se skoro u svim granama industrije (automobilskoj, željezničkoj, svemirskoj, brodogradnji). Postupak FSW je moguće automatizovati, što dovodi do povećanja produktivnost i smanjenja troškova proizvodnje. Postupak FSW je ekološki čist proces, bez zagađivanja životne sredine, što u poslednje vrijeme predstavlja dodatni motiv za njegovo unapređenje i veću primjenu u industriji. Ovim postupkom se dobija izuzetno kvalitetan spoj, dobrih mehaničkih karakteristika. Zbog svoje sposobnosti zavarivanja raznorodnih materijala ima izuzetno značajnu primjenu zbog sve izraženije potrebe za novim materijalima i njihovim spajanjem. Sa obzirom na sve veću primjenu, koristi se ovaj niskoenergetski postupak kod koga se koristi čista mehanička energija, u odnosu na druge visokoenergetske postupke koji su po svojoj prirodi štetni po okolinu. Zbog energetske efikasnosti, ostvaruju se značajne uštede unergije na globalnom nivou. Kako je proces nedovoljno istražen pojavljuje se potreba za istraživanjem tehnoloških parametara, prvenstveno za legure raznih materijala koje se ne mogu spajati konvencionalnim postupcima zavarivanja.

6. LITERATURA

- [1] Jata K., Mahoney M., Mishra R., Lienert T.: Friction Stir Welding and Processing III, TMS 2005. 0-87339-584-0.
- [2] Kallee S., Nicholas E., Thomas W.: Friction Stir Welding - Invention, Innovations and Applications. in INALCO 2001 - 8th International Conference on Joints in Aluminium. March 2001. Munich, Germany.
- [3] Dong P., Lu F., Hong J., Cao Z.: Coupled Thermomechanical Analysis of Friction Stir Welding Process Using Simplified Models. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6 (5), 2001, pp.281- 287.
- [4] Runčev D.: Friction Welding of Aluminium and Aluminium Alloys. Zavarivanje i zavarene konstrukcije (1/2002), str. 11 - 14.
- [5] Reynolds A.: Visualization of Material Flow in Autogenous Friction Stir Welds. Science and Technology of Welding and Joining, vol.5, no.2, 2000, pp. 120 - 124.
- [6] Mishra S. R., Mahoney W. M.: Friction Stir Welding and Processing. ASM International, 2007.
- [7] Song M., Kovacevic R.: Numerical and Experimental Study of the Heat Transfer Process in Friction Stir Welding. Journal Engineering Manufacture. Vol. 217 Part B.
- [8] Stamenković D., Đurđanović M., Mitić D.: Zavarivanje postupkom "FSW". Zavarivanje i zavarene konstrukcije (2/2006), str. 59-66.
- [9] Thomas W., Nicholas E., Needham J., Murch M., Temple-Smith P., Dawes C.: Patent - Friction Stir Butt Welding, International Patent No. PCT/GB92/02203, Editor. 1995: GB Patent No. 9125978.8 (1991), US Patent No. 5.460.317.
- [10] Thomas M. W.: et al 1991 Friction Stir Butt Welding international Patent Application No PCT/GB92/02203. Thomas M. W. et al 1995 Friction Stir Butt Welding GP Patent Application No 9125978.8. Thomas M. W. et al 1995 Friction Stir Butt Welding UP Patent 5.460 317.
- [11] Thomas W., Dolby R.: Friction Stir Welding Developments. in 6th International Conference on Trends in Welding Research. April 2002. Georgia, USA.
- [12] Thomas W., Threadgill P., Nicholas E.: Feasibility of Friction Stir Welding Steel, Science and Technology of Welding and Joining, 1999, Vol. 4, No 6, pp. 365-372.
- [13] Thomas M. W., Andrews E. R.: High Performance Tools For Friction Stir Welding. International Patent Application, WO 99/52669.
- [14] Threadgill L. P.: Terminology in Friction Stir Welding. Friction Stir Welding Licensees Association. April 2002.
- [15] Totten E. G., MacKenzie D. S.: Handbook of Aluminum. Volume 2, Alloy Production and Materials Manufacturing, 2003. str. 579-601.
- [16] Standard: MEST EN 10002-1:2008. Metalni materijali - Ispitivanje zatezanjem - Dio 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi.
- [17] Website TWI: <http://twi.co.uk/>. Friction Stir Welding - Superior Weld Quality.
- [18] Website Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding/.
- [19] Vukčević M., Plančak M., Janjić M., Šibalić N.: Research and Analysis of Friction Stir Welding Parameters on Aluminium Alloys (6082-T6). Journal for Technology of Plasticity, Vol. 34 (2009), Number 1-2.
- [20] Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: Zavarivanje trenjem (FSW) - suština procesa, terminologija i pregled istraživanja. Tehnika. Beograd 2/2008.
- [21] Janjić M., Vukčević M., Šibalić N.: Temperature Measurement in FSW Process. 7th International scientific conference on production engineering. RIM 2009. Cairo.