



### PERSPEKTIVA PRIMENE TOPLOTE GENERISANE TRENJEM U OBRADI METALA

Dr Miroslav B. ĐURĐANOVIĆ, red.prof.  
Mašinski fakultet Niš, Aleksandra Medvedeva 14, SCG

#### **Rezime**

*U svim tehnologijama u kojima se koristi, toplota trenjem može da se generiše na dva načina, i to direktno ili indirektno. Sa tog aspekta prikazane su karakteristike i stanje u industrijskoj primeni zavarivanja trenjem i nekih metoda obrade metala. Analiza pokazuje da korišćenje toplote generisane trenjem predstavlja savremen i vrlo efikasan način obrade metala.*

**Ključne reči:** zavarivanje trenjem, FSW, flowdrill

### A PERSPECTIVE OF THE APPLICATION OF THE FRICTION HEAT GENERATED IN METALWORKING

#### **S u m m a r y**

*In all technologies, in which the heat generated by friction has application, this heat can be obtained on two way - direct and indirect. The characteristics and state of the friction welding and some methods of the metal processing are presented. Analysis shown that metalworking with heat generated by friction is advanced and very effective process.*

**Key words:** friction welding, FSW, flowdril

## 1. UVODNA RAZMATRANJA

### 1.1 Direktno i indirektno generisanje toplote

Toplota koja se oslobađa pri trenju koristi se u različitim vidovima obrade metala. Pored zavarivanja cilindričnih međusobno i cilindričnih sa delovima ravnih površina, ona se primenjuje za spajanje limova u različitim položajima, zatim pri obradi plastičnim deformisanjem, za navarivanje i zakivanje.

Fizička suština procesa generisanja se zasniva na transformaciji mehaničke u toplotnu energiju na kontaktu tela koja se relativno kreću a opterećena su nekom silom i ona je ista kod svih oblika njene primene. S druge strane, odgovarajućom analizom tehnologija u kojima se koristi dolazi se do zaključka da, radi ostvarivanja postavljenog cilja, toplota

trenjem se oslobađa na dva karaktersitična načina, i to: direktno ili indirektno.

Direktno generisanje toplote postoji kada njeno delovanje ima zadatak da promeni svojstva materijala *oba tela* frikcionog para i da ih *istovremeno* dovede u stanje pogodno za realizaciju predviđene tehnološke operacije. Toplotni efekti trenja mogu da se iskoriste samo u jednom tehnološkom ciklusu u kome učestvuju istovremeno oba tela.

Takav način generisanja toplote je karakterističan za najveći broj varijanti frikcionog zavarivanja, za navarivanje i zakivanje trenjem. Pri tome je važno da se generiše odgovarajuća količina toplote dok njena raspodela između tela u kontaktu nema značaja. To znači da nema potrebe za ispunjenjem bilo kakvih zahteva u pogledu geometrije kontakta tela ili svojstava njihovih materijala.

Indirektan ili posredan način generisanja, međutim, postoji u svim vidovima termofrikcione obrade i kod dve varijante zavarivanja trenjem. Dejstvo toplote ovde ima zadatak da *izrazito* promeni svojstva materijala *samo jednog* od tela frikcionog para. Svojstva i geometrijske karakteristike drugog tela u kontaktu - treba da ostanu nepromenjene.

“Drugo telo” kod indirektnog načina generisanja u stvari predstavlja specijalan alat koji istovremeno služi da indukuje toplotu i da realizuje predviđenu tehnološku operaciju. Pošto ima specifičnu ulogu, pri čemu toplota takođe mora da se generiše u određenoj količini, sledi zaključak da materijal alata na povišenoj temperaturi mora da ima stabilna mehanička i termofizička svojstva, minimalnu sklonost ka prelaženju sa materijalom u kontaktu i minimalno habanje. Istovremeno, termofizička svojstva i geometrijske karakteristike njegove kontaktne (radne) površine treba da obezbede raspodelu toplotnog fluksa u korist materijala čija se svojstva menjaju.

U ovom slučaju, dakle, mehanička i termofizička svojstva materijala “drugog tela” i oblik njegove radne površine imaju važnu ulogu i moraju da ispunе odgovarajuće tribološke uslove. Pored toga, u procesu generisanja toplote a samim tim i u celom tehnološkom ciklusu, “drugo telo” može da učestvuje više puta. To su dve karakteristike indirektnog po kojima se ono bitno razlikuje od direktnog generisanja toplote trenjem.

## 1.2 Zajedničke karakteristike procesa

Nezavisno od načina generisanja, proces ima istu fizičku suštinu i on je uvek samoregulišući. To je njegova važna osobina koja se sastoji u tome što se materijal zagreva unutrašnjim toplotnim izvorom pri čemu se temperatura kontaktnih slojeva automatski održava na oko 100-200 K ispod tačke topljenja topljivijeg materijala u spoju.

Odatle slede zajedničke karakteristike svih oblika korišćenja toplotnih efekata trenja, a to su: lokalizovano zagrevanje male zapremine materijala, mali utrošak energije i visoke energetske karakteristike, jednostavan rad i mogućnost potpune automatizacije, usled termodeformacionog procesa koji egzistira na mestu generisanja toplote materijal postaje sitnozrnast i homogen, u njemu nema makro i mikro defekata, on ima visoka i stabilna svojstva, unutrašnji naponi su zanemarljivo mali, nema štetnih pojava po čoveka i okolinu, itd.

Osnovni tehnološki parametri u oba slučaja su isti, a to su relativna brzina, opterećenje i vreme. Oni u najvećoj meri zavise od svojstava materijala

čije karakteristike, radi postizanja cilja, delovanjem toplote treba da se promene.

U radu će detaljnije biti prikazani samo tipični slučajevi korišćenja direktnog i indirektnog generisanja toplote koji već imaju ili mogu da nađu primenu u industriji.

## 2. PRIMENA DIREKTOG GENERISANJA TOPLOTE

Karakteristike direktnog generisanja unapred određuju mogućnost njegove primene. Naime, pošto je oslobađanje toplote lokalizovan i brz proces, materijal kontaktnih slojeva frikcionog para istovremeno vrlo brzo dolazi u stanje pogodno za formiranje monolitnog spoja. Kako kod direktnog generisanja ta pojava postoji uvek, bez izuzetka, ovaj način može da se primeni jedino pri zavarivanju. U drugim vidovima obrade ne može da se koristi. U stvari, osim u slučaju rotirajućim diskom i FSW metodom, frikciono zavarivanje se realizuje isključivo direktnim generisanjem.

### 2.1 Konvencionalno zavarivanje trenjem

Tipičan primer primene direktnog generisanja jeste konvencionalno ili obično zavarivanje trenjem (ZT), slika 1. Na kontaktu delova A i B pritisnutih silom  $F$ , pri čemu jedan rotira dok je drugi nepokretan, generiše se toplota i materijal se zagreva do blizu tačke topljenja. Tada prestaje obrtno kretanje i faza zagrevanja, uzorci se pritisnu povećanom silom  $F'$  (faza prokivanja), zatim se rasterećuju i hlade.



Slika 1. Principijelna šema običnog frikcionog zavarivanja

Pošto se dodatni materijal ne koristi, svojstva spoja zavise od prirode materijala koji se spajaju, uslova i stepena deformisanja, od stanja kontaktnih površina, snage generisanja, količine energije unesene u materijal i drugih faktora. Vrednosti osnovnih parametara se kreću u širokim granicama: za crne metale se preporučuje brzina 1- 2 m/s, za obojene oko 2 m/s a za tvrde metale 4 - 5 m/s; pritisak zagrevanja je 1 do 26 daN/mm<sup>2</sup> dok je pri prokivanju obično do 3 puta veći; vreme zagrevanja je 2 - 40 s a prokivanja najviše 2 s. Svojstva spoja

takođe zavise i od brzine deformisanja; ona treba da se kreće od  $1,2 \cdot 10^{12}$  do  $2,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ .

Pored običnog, analogan tehnološki ciklus postoji još kod 13 varijanti ZT. Sve varijante frikcionog zavarivanja koje karakteriše direktno generisanje toplote trenjem dosta su istražene, njihove mogućnosti su poznate i one imaju odgovarajuću industrijsku primenu. Između njih i običnog zavarivanja nema principijelne razlike, ona postoji samo u konstruktivnim rešenjima pojedinih sklopova i delova mašina. Na taj način se, u stvari, otklanjaju neki od nedostataka konvencionalnog postupka čime se omogućava dobijanje spojeva specifičnih svojstava ili geometrije koji teško ili ne mogu da se dobiju običnim zavarivanjem. O frikcionom zavarivanju, inače, postoji obimna literatura [1-7].

## 2.2 Karakteristike zavarivanja trenjem

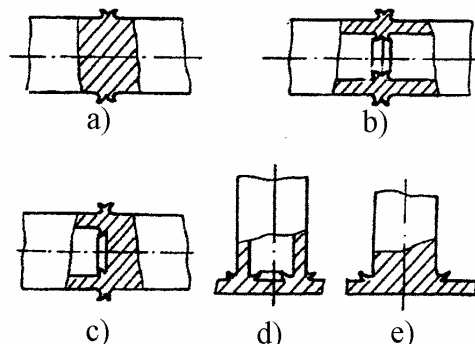
Osim karakteristika zajedničkih za sve oblike korišćenja toplotnih efekata trenja, ZT ima niz prednosti u odnosu na sve druge postupke. Između ostalog, to su: kratko ciklusno vreme i visoka produktivnost, 5-10 puta manji utrošak energije i vrlo visok kvalitet spoja. Korišćenjem optimalnih parametara, svojstva čvrstoće spoja često su iznad istih veličina osnovnog materijala bez vidnog smanjenja svojstava plastičnosti. Broj otkaza je reda veličine  $1:10^6$ , a u manje povoljnim uslovima  $1:10^5$ , što dokazuje visoku pouzdanost procesa.

Mogućnost spajanja materijala sa različitim termofizičkim svojstvima predstavlja najveću prednost FZ. Mnogi od njih isključivo frikcijom se kvalitetno zavaruju (na primer čelik sa legurama Al, legure Cu sa Al, legure Cu sa čelicima, legure Ti sa Al, itd.). Ovom tehnologijom je trenutno moguće zavariti više od 50 materijala, kako metala tako i nemetala, u različitim međusobnim kombinacijama.

ZT je posebno efikasno pri izradi cilindričnih delova stepenastog osnovnog preseka i kod zavarenokovanih, zavareno-presovanih i zavareno-livenih elemenata jer se ostvarivanjem bimetalnih i trimetalnih spojeva pored uštede u materijalu, postiže i vrlo visoka produktivnost. Ova odlika je došla do punog izražaja u velikoserijskoj i masovnoj proizvodnji kakve su izrada reznih alata, motora SUS i motornih vozila, građevinskih mašina, itd. Tu se pokazalo da je ZT jedan od najekonomičnijih vidova zavarivanja uopšte jer se njegovom primenom smanjuju ukupni proizvodni gubici za više od 5 puta.

ZT sa direktnim generisanjem, međutim, može da se primeni samo u slučaju kada je jedan od delova na mestu spajanja cilindričnog oblika punog

ili cevastog preseka i to u kombinaciji sa delovima koji na istom mestu imaju ravne površine, slika 2. [Ovaj nedostatak nemaju orbitalno i oscilatorno zavarivanje ali iz mnogih razloga (cena, dimenzije delova, svojstva materijala, itd.) ona imaju ograničenu primenu.]



Slika 2. Tipovi spojeva dobijenih frikcionim zavarivanjem: a) puni čeon zavareni elementi, b) cevni elementi čeon zavareni, c) puni i cevni elementi čeon zavareni, g) i d) T-spoj delova cevnog i punog preseka sa ravnim elementima

I pored ograničenja, učešće različitih varijanti ZT sa direktnim generisanjem u industriji je sve veće jer čak 50 do 70% delova koji se zavaruju imaju takav oblik, dimenzije i međusobni položaj da je primena ZT ne samo moguća nego i prepo-ručiva. O povećanom interesu za ZT svedoči podatak da se od ukupne količine zavarivanih delova preko 8% realizuje frikcionim zavarivanjem pri čemu njegov udeo neprekidno raste. Izuzetne karakteristike kojima se odlikuje, naročito visoka pouzdanost i ukupna ekonomičnost procesa, omogućavaju da ZT dopunjuje a u nizu slučajeva i da potisne druge vidove zavarivanja.

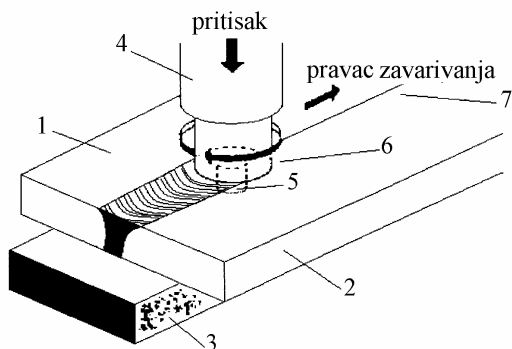
## 3. PRIMENA INDIRECTNOG GENERISANJA TOPLOTE

Posredno generisanje toplote najpre je iskorišćeno za zavarivanje trenjem pomoću rotacionog diska. Ovaj postupak se relativno malo koristi i to za preklopne spojeve limova male debljine i specifičnih svojstava materijala. Daleko veću primenu indirektno generisanje toplote trenjem ima pri zavarivanju FSW metodom i u termofrikcionoj obradi metala.

### 3.1 Friction Stir Welding - frikciono zavarivanje mešanjem

Friction Stir Welding (FSW) predstavlja tipičan primer korišćenja indirektnog načina generisanja toplote. Postupak je patentiran 1991., 1992. je startovala njegoa industrijska primena i realizuje se na sledeći način [8,9,10]. Limovi (1) i (2) su

sučeono pritisnuti i fiksirani za postolje (3) koje može horizontalno translatorno da se kreće, slika 3. Za zavarivanje služi specijalni alat cilindričnog oblika koji se sastoji od tela (4) većeg prečnika i rukavca (5) manjeg prečnika na kome je narezan levi navoj. Prelaz između tela (4) i rukavca (5) je udubljena prstenasta površina, tzv. čelo alata (6).



Slika 3. Princip FSW: 1 i 2-limovi; 3-postolja; 4-telo alata; 5-rukavac; 6-čelo alata; 7-linija dodira limova

Alat se nalazi iznad postolja tako da je njegova podužna osa normalna na liniju dodira limova (7). U tom položaju on dobija rotaciono i translatorno kretanje naniže, rukavac (5) prodire istovremeno kroz oba lima, generiše se toplota, materijal limova se zagreva do blizu tačke topljenja i, zahvaljujući zavojnici, on se neprekidno meša. Kada čelo (6) dodirne površine limova, slobodan kraj rukavca je blizu postolja, kretanje alata naniže se prekida i počinje horizontalno translatorno kretanje postolja. U daljem toku, rukavac zagreva nove slojeve, meša ih, iza njega se stvara brazda plastičnog materijala koji očvršćava i formira monolitan spoj. Čelo alata oblikuje ravnu površinu šava sa gornje strane limova a sa donje strane to isto čini postolja. Procedura se završava prekidanjem rotacionog i translatornog kretanja. Umesto postolja, translatorno kretanje može da vrši alat.

Parametri FSW (aksijalna sila, broj obrtaja i translatorna brzina) zavise od svojstava materijala i debljine limova a njihove optimalne vrednosti se određuju eksperimentalno. Aksijalna sila je najveća pri prodiranju rukavca kroz limove, na kraju te faze se smanjuje i ostaje konstantna do kraja zavarivanja. Broj obrtaja je konstantan i kreće se u širokim granicama - od 100 do 1500 o/min. Translatorska brzina ( $v$ ) je istovremeno i brzina zavarivanja, ona je takođe konstantna i najčešće se određuje iz odnosa  $v/\omega R$ , gde je  $R$ -poluprečnik rukavca i  $\omega$ -njegova ugaona brzina. [Na primer, pri zavarivanju limova debljine 6,4 mm od Al 6061-T6 (USA standard) najbolji rezultati su dobijeni za odnos 0,015. Alat je imao rukavac radijusa 3,25 mm,

rotirao je sa 400 o/min, a translatorska brzina lima je bila 120 mm/s.]

Fizička suština procesa generisanja toplote i formiranja spoja su isti kao kod običnog ZT i sve karakteristike koje ono ima - postoje i kod FSW. Zavareni spoj, dakle, ima sitnozrnastu homogenu strukturu u kojoj nema kontaminanata niti makro i mikro defekata bilo koje vrste, mehanička svojstva su ista ili bolja nego kod osnovnog materijala, unutrašnjih napona u materijalu nema pa nema distorzije limova, itd.

FSW je najpre testirana na Al kao materijalu koji ima veliku primenu ali kod koga se tradicionalnim postupcima teško dobijaju kvalitetni spojevi zbog izražene poroznosti šava i distorzije delova. Obe pojave su veoma štetne, zahtevaju skupu dodatnu obradu kojom ne mogu potpuno da se otklone, a posebno su izražene kod limova.

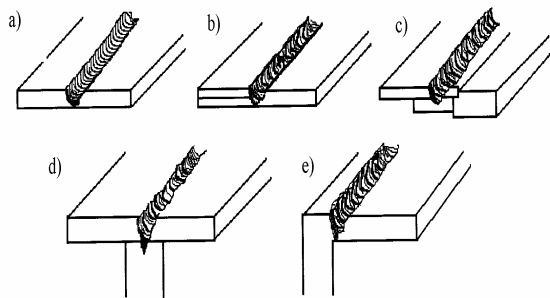
Ispitivanja su pokazala da se primenom FSW pri zavarivanju Al javlja zanemarljivo mala poroznost a distorzija gotovo da ne postoji. Zbog toga je ova metoda dobila najširu primenu najpre kod zavarivanja limova od legura Al ali jednako uspešni rezultati se postižu pri spajanju limova od Cu, Zn, Mg i njihovih legura, zatim kod mnogih vrsta čeličnih limova ali i kod kombinacija nekih metala, kao što je Ti i čelik. Na taj način FSW je potpuno potisnulo iz upotrebe MIG, MAG i druge tradicionalne načine zavarivanja ovih materijala.

FSW metodom mogu se spajati limovi i pločasti delovi praktično u svim položajima, slika 4., u dijapazonu debljina od 1,2 do 75 mm od Al legura i do 25 mm od Ti legura i čelika. Zavarivanje može da se izvodi sa jednim ili sa više alata istovremeno, sa jedne ili sa obe strane limova, pa se u jednom prolazu dobija veći broj spojeva.

Brzina zavarivanja zavisi od svojstava i dimenzija materijala. Na primer kod običnog Al debljine 2 mm iznosi 2 m/min, ali kod visoko kvalitetnih legura ona je 12,7 cm/min. Dužina spoja je ograničena jedino veličinom postolja i za sada se kreće do oko 15 m. Pored visokih mehaničkih svojstava, spoj ima glatku površinu i dodatna mehanička obrada u uglavnom nije potrebna. Istovremeno, kod FSW uopšte nema gubitka materijala. To nije slučaj kod drugih postupaka pa je sa te strane FSW izuzetno ekonomično.

FSW se danas intenzivno koristi u mnogim zemljama (Japan, SAD, Švedska, V.Britanija, Norveška, itd.) u brodogradnji, izradi železničkih vozila, autoindustiji i td. ali i u proizvodnji letilica svih vrsta. Visoka pouzdanost zavarenih spojeva i druge prednosti FSW posebno su došle do izražaja kod izrade rezervoara za gorivo kod Spejs šatla i drugih visoko odgovornih delova letilica. U avio-

industriji je do sada preko 30.000 zakovanih spojeva zamenjeno spojevima izvedenim metodom FSW, sa tendencijom daljeg povećanja.



Slika 4. Neke od kombinacija spojeva dobijenih FSW: a) sučeoni; b) kombinovani sučeoni i preklopni; c) jednostruki preklopni; d) dvostruki T spoj; e) ugaoni

Prva istraživanja su rađena na glodalicama te je i konstrukcija mašina za FSW u osnovi slična ovim mašinama. Danas su one visoko automati-zovane i u fabrikama za izradu limova rade u liniji sa presama tako da se odmah dobijaju monolitne ploče širine desetak i više metara.

Nedostatak FSW jeste što se može primeniti samo za pravolinijske spojeve. Međutim, već je razrađena i varjanta orbitalnog FSW, što ovoj metodi otvara još veću perspektivu.

### 3.2 Termofrikciona obrada

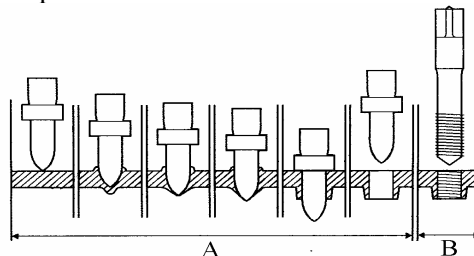
Termofrikciona obrada (TFO) podrazumeva takav vid obrade deformisanjem pri kojoj se svojstva plastičnosti materijala povećavaju isključivo pomoću toplotnih efekata trenja. Ona se takođe bazira na korišćenju indirektnog generisanja toplote i alat osim indukovanja toplote, mora istovremeno da oblikuje zagrejani materijal na unapred definisanu geometrijsku formu i dimenzije. Prema mogućnostima koje pruža, TFO može da ima široku primenu ali se za sada masovno koristi jedino za izradu otvora i navoja na delovi-ma različitog oblika i namene, mnogo manje za izradu priborica na šipkastim i cevnim elementima dok oblikovanje krajeva cevnih profila još uvek nema primenu.

#### 3.2.1 Izrada otvora i navoja

Eksperimentalna istraživanja dobijanja otvora da delovima različitog oblika pomoću toplotnih efekata trenja započela su odavno. Odgovarajuća tehnologija koja je dobila industrijsku primenu, međutim, startovala je tek pre desetak godina pod nazivom "flowdrill" [11,12].

Procedura se izvodi na bušilici, analogano klasičnom bušenju otvora burgijom. Alat, koji ima rotaciono i translatorno kretanje, u kontaktu sa

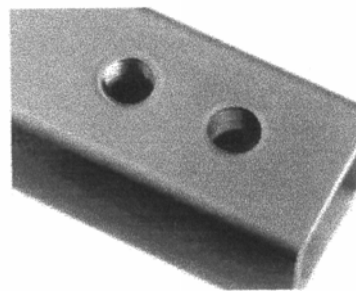
uzorkom generiše toplotu i materijal se zagreva. Pod dejstvom sile plastični materijal biva istiskivan i proces traje sve dok alat ne probije otvor a onda se povratnim hodom vraća u polazni položaj, slika 5 (A). U dobijenom otvoru navoj se formira sledećim korakom (B), ali može takođe da se uradi i u jednom prolazu.



Slika 5. Princip izrade otvora A i navoja B flowdrill-om

Odgovarajućom konstrukcijom alata usmerava se raspodela istisnutog plastičnog materijala i on može da se deponuje samo ispod površine otvora, ili u određenom odnosu sa obe njegove strane. Kontrolisana raspodela istisnutog materijala omogućava korišćenje dobijenih otvora u različite svrhe, kao što je urezivanje navoja, umetanje čaura za ležišta, za pričvršćivanje i povezivanje delova čivijama, zavrtnjima, itd.

Materijal u zoni otvora ima poboljšana mehanička svojstva, površina zida otvora je visokog kvaliteta i naknadna obrada nije potrebna. Primenom flowdrill-a ne prekida se tok vlakana materijala, ona "obilaze" oko otvora i materijal se samo preraspodeljuje. Zbog toga su koncentracija napona i slabljenje odgovarajućih karakteristikam preseka znatno manji u poređenju sa klasičnim bušenjem dok je korisna dužina otvora ili navoja skoro dva puta veća.



Slika 6. Otvori dobijeni flowdrill-om

Flowdrill se koristi za izradu otvora i navoja na limovima, cevima i na profilisanim elementima različitog oblika, slika 6. Osnovni parametri su broj obrtaja i korak alata; oni zavise od svojstava materijala i analogni su parametrima klasičnog bušenja otvora. (Na primer, pri izradi otvora za navoj M24 kod čeličnih limova debljine 12 mm broj obrtaja je 500-800 o/min, dok je pri urezivanju

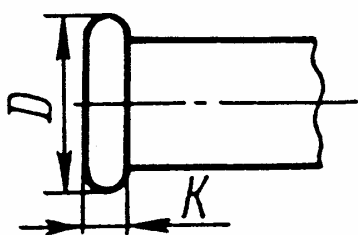
navoja 100 o/min sa korakom alata 0,1-0,15 mm/min). Za sada se ovom metodom može dobiti otvor prečnika do 50 mm na limu debljine 12,5 mm od konstruktivnog i nerđajućeg čelika, legura Al, Cu, mesinga.

Osim za alat, za korišćenje flowdill-a nisu potrebna posebna ulaganja jer se obrada izvodi na običnoj bušilici odgovarajuće snage motora. Rad je ekološki potpuno čist (ne koriste se sredstva za hlađenje i podmazivanje), nema strugotine i gubitka materijala pa je ova tehnologija pokazala velike ekonomske efekte. Ona je došla do punog izražaja u izradi metalnih konstrukcija različite namene, u građevinarstvu, mašinstvu, brodogradnji, itd.

### 3.2.2 Plastična obrada krajeva šipkastih delova

TFO krajeva šipkastih delova ima za cilj dobijanje venaca određenih dimenzija i izvodi se na mašinama za ZT. To je bila prva tehnologija koja je ubrzo iza frikcionog zavarivanja dobila industrijsku primenu a u kojoj se koriste toplotni efekti trenja.

Tehnološki ciklus je analogan ZT ali, umesto prokivanjem, on se završava razdvajanjem delova i, za razliku od ZT, prema potrebi ceo može više puta da se ponovi. Osnovni parametri procesa su isti kao u fazi zagrevanja kod ZT a obrada se izvodi pomoću specijalnog alata. Prečnik (D) i debljina venca (K), zavise od dimenzija i svojstava materijala uzoraka i kreće se do  $D \approx 1,4d$  odnosno  $K \approx 0,35d$ , slika 7. Istim postupkom se dobijaju i spoljašnji venci na cevastim elementima pri čemu se na odgovarajući način sprečava formiranje unutrašnjeg prstena [1,2,13].



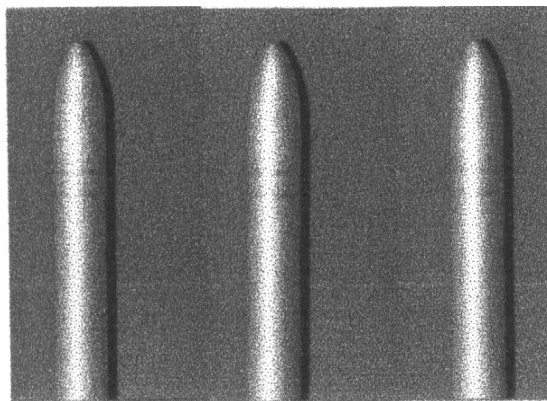
Slika 7. Venac

Ova tehnologija ima primenu u različitim granama industrije (proizvodnja poljoprivrednih, građevinskih mašina, itd) i na različitim materijalima. Odgovarajućim alatima postižu se visoke tolerancije dimenzija i oblika pa se obrada rezanjem može potpuno izostaviti, što daje odgovarajuće ekonomske efekte. Međutim, ograničavajući faktor jeste veličina aksijalne sile: ona direktno raste sa prečnikom venca.

### 3.2.3 Oblikovanje krajeva cevi

Termofrikcionom obradom na krajevima cevi mogu se dobiti potpuno ili delimično zatvorena dna različitog oblika polusferno, parabolično, itd. U ovom slučaju, međutim, postupak je nešto složeniji jer pored triboloških, treba ispuniti i odgovarajuće energetske i tehnološke uslove [13,14].

Alat i ovde indukuje toplotu i oblikuje zagrejani materijal ali, imajući u vidu geometrijske karakteristike cevi i konačni cilj obrade, njegova radna površina ima specifičnu konfiguraciju. Ona se sastoji od više jednakih segmenata izrađenih u formi ivica koje pri rotaciji opisuju spoljašnju površinu tela koje se dobija na kraju obrade. Na taj način kontakt radne površine alata sa zidom cevi neprekidno se ostvaruje po liniji čime se obezbeđuje adekvatno generisanje toplote i ispunjavaju energetske i konstruktivni uslovi procesa.



Slika 8. Parabolično dno dobijeno termofrikcionom obradom

Na slici 8. su prikazani krajevi cevi sa zatvorenim dnom paraboličnog oblika dobijeni termofrikcionom obradom [14]. Osnovni parametri procesa - relativna brzina, aksijalna sila i vreme - zavise od svojstava materijala cevi i njihove vrednosti se određuju eksperimentalno. Postupak je testiran na cevima od različitih legura Al i različitih dimenzija.

## 4. ZAKLJUČAK

1. Predložena podela tehnologija prema načinu generisanja toplote trenjem, omogućava da se uoče razlike, sličnosti i zajedničke karakteristike, kao i da se ocene mogućnosti, pravci istraživanja i perspektiva njihove primene.

2. Korišćenje toplote generisane trenjem u svim vidovima obrade metala ima višestruke prednosti u poređenju sa tradicionalnim postupcima iste namene.

3. Pojava i razvoj novih metoda obrade metala zasnovanih na istim principima, ukazuju na pove-

ćan interes za korišćenjem toplotnih efekata trenja u industriji.

## 5. LITERATURA

- [1] Сварка трением; Справочник, Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987.
- [2] Вилл И. В.: Сварка металлов трением, Машиностроение, Ленинград, 1970.
- [3] Н. В. Мельникова: Современное состояние сварки трением (обзор). Часть II; Сварочное производство, Но 8, 1989., ст. 2-5
- [4] Э. С. Каракозов, Р. И. Мустафаев, Н. В. Мельникова: Современное состояние сварки трением (обзор). Часть III; Сварочное производство, Но 9, 1989., ст. 1-4
- [5] Э. С. Каракозов, В. И. Егоров, В. И. Дьяченко, Е. Т. Путеев: Перспективные технологии сварки трением; Сварочное производство, Но 10, 1991., ст. 2-3
- [6] Frikciono zavarivanje - istraživanje i analiza uticajnih parametara sa primenom, Institut Mašinskog fakulteta u Nišu, Niš, 1988.
- [7] Welding Handbook, Seventh Edition, Volume 3, Chapter 7: Friction Welding, Miami Florida, American Welding Society, 1980.
- [8] Dawes, C.J.; and Thomas, W.M.: Friction Stir Process Welds Aluminium Alloys, Welding Journal, pp. 41-45, March 1996.
- [9] Howard B. Cary: Modern Welding Technology, Fifth edition, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- [10] Lee, J.A. Carter, R.W. and Ding J.: Friction Stir Welding for Aluminium Metal Matrix Composites (MMC's); (MCFC Center Director's Discretionary Fund Final Report, Project No. 98-09); Marshall Space Flight Center, NASA, Alabama, December 1999.
- [11] Flowdrill B.V.: FLOWDRILL, Holland, 1993.
- [12] British Steel Tubes and Pipes "SHS Joining: Flowdrill & Hollobolt", 1997.
- [13] Đurđanović M.: Istraživanje procesa oblikovanja krajeva cevnih profila trenjem, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš, Niš, 1990.
- [14] Đurđanović M. : Eksperimentalno oblikovanje zatvorenog paraboličnog dna na kraju cilindrične cevi trenjem, Sedma jugoslovenska konferencija o tribologiji sa međunarodnim učešćem YUTRIB 01., Beograd 2001., Zbornik radova st. 3-19 do 3-21