

## 6. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE

Elektrootporno zavarivanje obuhvata grupu postupaka kod kojih se materijal zagreva toplotom stvorenom električnim otporom, a zavareni spoj nastaje dodatnim dejstvom sile pritiska između elektroda. Električnim otporom se stvara toplota koja se koristi za zagrevanje određene količine materijala na temperaturu zavarivanja, kao i za zagrevanje materijala u okolnoj zoni radi lakšeg plastičnog deformisanja.

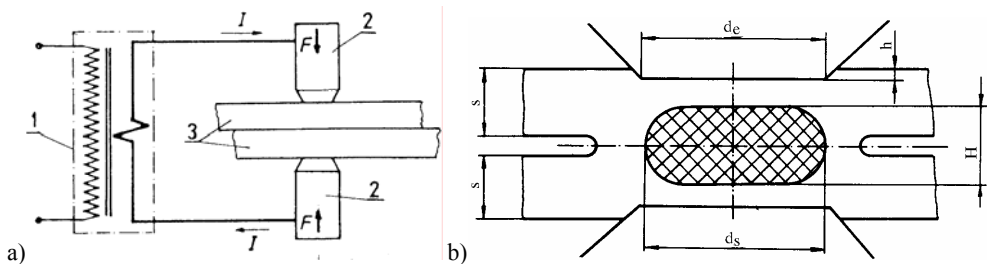
Osnovni postupci elektrootpornog zavarivanja su:

- **tačkasto**, kod koga spojevi nastaju u pojedinim tačkama preklopljenih delova,
- **šavno**, kod koga spoj nastaje preklapanjem niza zavarenih tačaka,
- **bradavičasto**, kod koga spoj nastaje u pojedinim tačkama preklopljenih delova, koje su pre zavarivanja oblikovane kao bradavice,
- **zbijanjem**, kod koga spoj nastaje stalnim pritiskom na dve sučeone površine,
- **varničanjem**, kod koga spoj nastaje varničanjem između dve sučeone površine.

Elektrootporno zavarivanje je našlo široku primenu u industriji, posebno automobilskoj, za spajanje tankih čeličnih limova. Osnovne prednosti elektrootpornog zavarivanja su velika proizvodnost i mogućnost automatizacije i robotizacije, a osnovne mane su ograničenja vezana za geometriju delova koji se zavaruju, i nemogućnost postizanja hermetičnosti spoja kod tačkastog zavarivanja.

### 6.1. ELEKTROOTPORNO TAČKASTO ZAVARIVANJE

Elektrootporno tačkasto zavarivanje je postupak spajanja metala kombinovanim dejstvom toplote, dobijene električnim otporom u zatvorenom strujnom kolu između dva lima (3) pritisnuta elektrodama oblika šipke (2), i sile pritiska  $F$ , sl. 6.1a. Pri tome nastaje spoj (zavarena tačka) kao na sl. 6.1b, gde je  $s$  debljina lima,  $d_s$  prečnik zavarene tačke (sočiva),  $H$  visina tačke,  $d_e$  prečnik elektrode,  $h$  ulegnuće.



Slika 6.1. Šema a) tačkastog zavarivanja; b) tačkasto zavarenog spoja

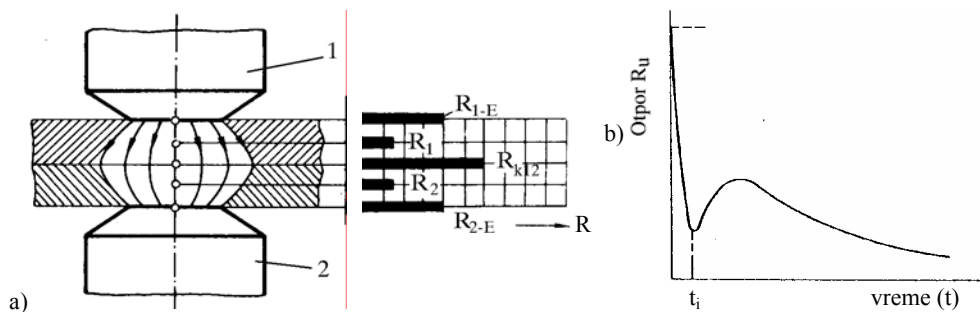
Količina toplote koja nastaje pri zavarivanju električnim otporom određuje se prema Džul–Lencovom zakonu:

$$Q = \int_0^t R(t) \cdot I_z^2(t) \cdot dt \quad (6.1)$$

pri čemu je  $I_z$  struja zavarivanja (A),  $t$  vreme zavarivanja (s),  $R_u$  ukupni omski otpor između elektroda ( $\Omega$ ), koji može da se definiše kao zbir pojedinih otpora:

$$R_u = R_{1-E} + R_1 + R_{k12} + R_2 + R_{2-E} \quad (6.2)$$

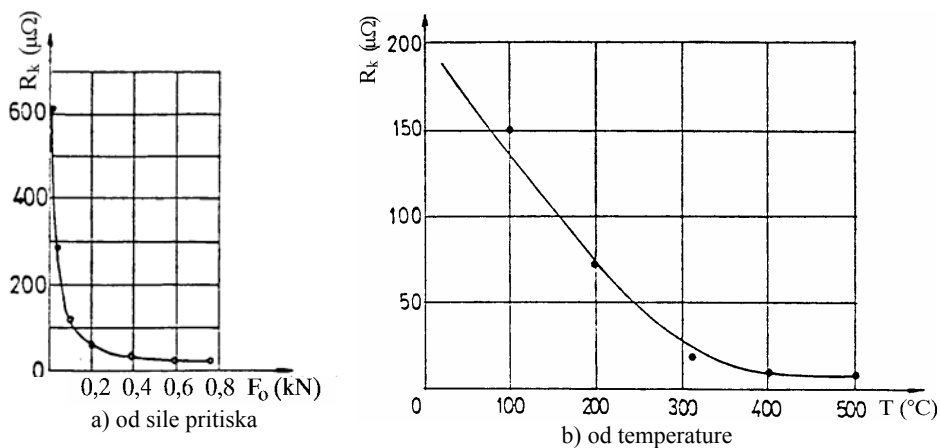
gde su  $R_1$  i  $R_2$  sopstveni otpori materijala, a  $R_{1-E}$  (materijal-gornja elektroda),  $R_{2-E}$  (materijal-donja elektroda) i  $R_{k12}$  (materijal-materijal), kontaktni otpori, sl. 6.2.



Slika 6.2. Električni otpori kod tačkastog zavarivanja a) početne vrednosti; b) zavisnost od vremena

U početku zavarivanja najveći je kontakti otpor  $R_{k12}$ , sl. 6.2a, usled nehomogenosti i hrapavosti dodirnih površina. Kontakt se ostvaruje na mestu dodira, tj. lokalnih ispupčenja, što znači da struja teče samo kroz mali deo preseka, pa se na mestu dodira javlja veliki kontakti otpor. Ako se istovremeno deluje odgovarajućom silom pritiska, površina kontakta se povećava, a kontakti otpor značajno smanjuje, kao što je prikazano za slučaj zavarivanja niskougljeničnog čelika na sl. 6.3a.

Povišenjem temperature kontakti otpor se takođe značajno smanjuje, sl. 6.3b, što je posledica rasta specifičnog otpora sloja metala uz kontakt, smanjenja otpora oksidnog sloja i povećanja broja i površine fizičkih kontakata među elektrodama, i plastične deformacije zagrejanog metala.



Slika 6.3. Zavisnost kontaktnog otpora niskougljeničnog čelika

Kontakti otpori materijal–elektroda  $R_{1-E}$  i  $R_{2-E}$  zadržavaju približno konstantne vrednosti u toku zavarivanja. Ovi kontakti otpori su znatno manji od kontaktnog otpora  $R_{k12}$  jer elektrode dobro provode električnu struju.

Sopstveni otpori materijala  $R_1$  i  $R_2$  se određuju izrazom za otpor provodnika preseka  $S$  ( $\text{mm}^2$ ) i dužine  $l$  (mm):

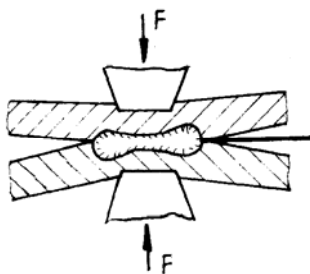
$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (6.3)$$

gde je  $\rho$  specifični električni otpor koji raste sa porastom temperature. To je najvažnija termofizička karakteristika materijala pri elektrootpornom zavarivanju, jer omogućuje da se izvor toplote od pretežno površinskog (u početnoj fazi zavarivanja, koja traje do trenutka vremena  $t_i$ , kada kontakti otpori postaju zanemarljivi, sl. 6.2b) promeni u zapreminski (posle  $t_i$ , sl. 6.2b). Specifični otpor legura je određen njihovim sastavom (veći je nego kod čistih metala) i termomehantičkom obradom, a u manjoj meri i mikrostrukturom.

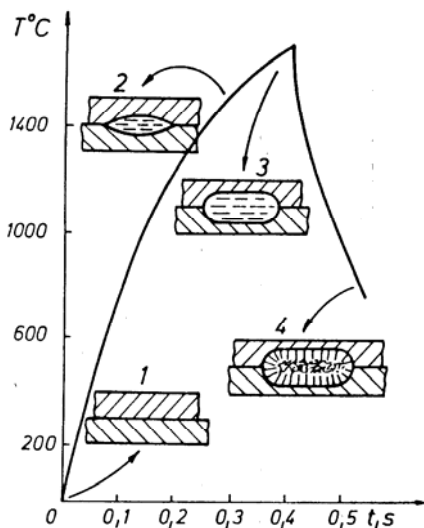
Prema tome, kontakti otpor deluje kratkotrajno i brzo opada do zanemarljive vrednosti, kada je ukupni otpor minimalan (trenutak  $t_i$ , sl. 6.2b), dok se sopstveni otpor povećava do maksimalne vrednosti, posle čega se njegova vrednost smanjuje, sl. 6.2b.

### 6.1.1. Proces spajanja metala tačkastim zavarivanjem

Tačkasto zavarivanje počinje pritiskivanjem komada radi obezbeđenja dobrog kontakta. Pri tome je važno obezbediti dovoljnu silu pritiska, jer će se u suprotnom pojaviti istiskivanje, sl. 6.4. Istiskivanje se uočava na početku procesa pri suviše brzom zagrevanju i nedovoljnoj sili pritiska ili na kraju procesa usled prekomernog zagrevanja. Zagrevanje pri elektrootpornom zavarivanju je kratkotrajno (od mikrosekunde do nekoliko sekundi) i neravnomerno, pri čemu se najviše zagreva središnji deo tačke (jezgro), gde je jačina struje najveća. U početnoj fazi zagrevanja u jezgru počinje obrazovanje krupnih zrna pod dejstvom sile pritiska, tj. zavarivanje bez topljenja. Daljim zagrevanjem jezgro se topi, a njegovim očvršćavanjem se dobija zavarena tačka, sl. 6.5.



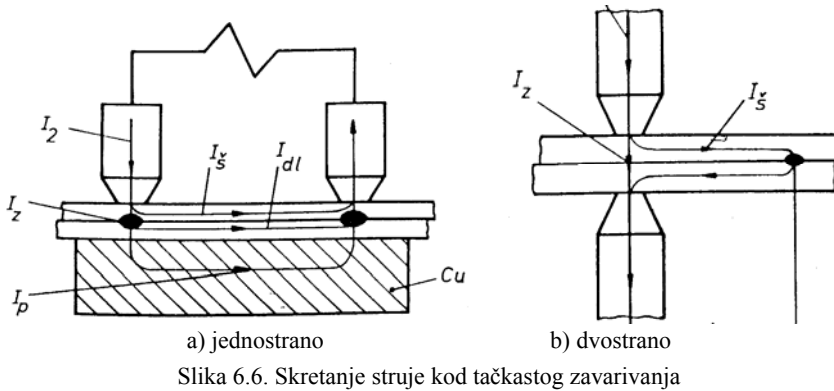
Slika 6.4. Istiskivanje jezgra



Slika 6.5. Promena temperature u jezgru

Ako se struja isključi pre dostizanja temperature topljenja tada u strukturi zavarene tačke nema šupljina i pora, ali nastaju krupno zrno i nemetalni uključci koji smanjuju žilavost spoja. Suprotno tome, tokom topljenja i očvršćavanja jezgra obrazuju se šupljine i pore, što može da se spreči dejstvom sile pritiska. Stoga smanjenje pritiska na elektrodama treba da kasni u odnosu na isključenje struje za vreme  $t_k$ , dovoljno za završetak kristalizacije. Povećanjem debljine komada, hlađenje i kristalizacija se usporavaju, a vreme  $t_k$  se produžava. Kod debljih limova (čelik deblji od 5–6 mm) sila pritiska na elektrodama ne samo da treba da deluje duže, već treba i da se poveća da bi se sprečila pojava šupljina i pora.

Poseban problem kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja predstavlja skretanje struje (šantiranje) zbog prisustva okolnih zavarenih tačaka, sl. 6.6. Ova pojava je izraženija je kod jednostranog zavarivanja, sl. 6.6a, nego kod dvostranog zavarivanja, sl. 6.6b.

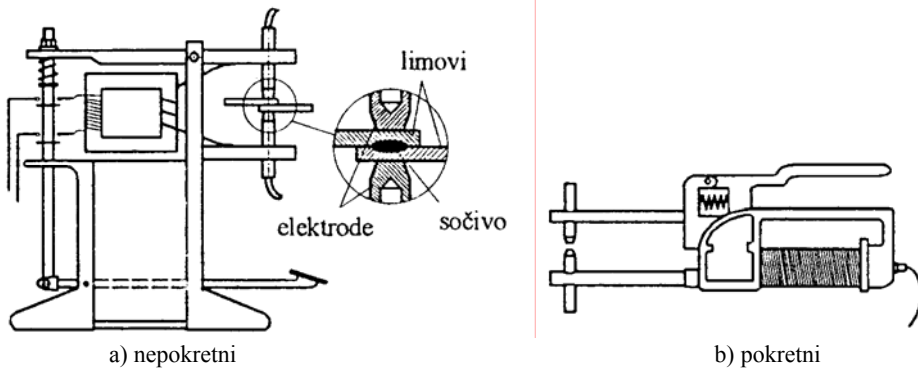


### 6.1.2. Uređaji i elektrode za elektrootporno tačkasto zavarivanje

Uređaji za elektrootporno zavarivanje se sastoje od sledećih delova, sl. 6.7:

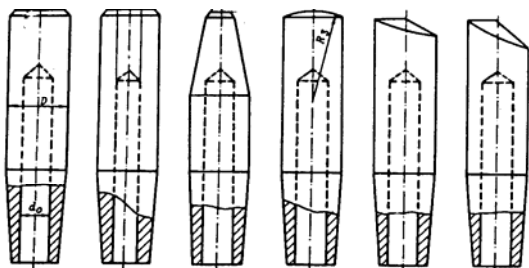
- vremenskog prekidača za uključivanje i isključivanje struje (1);
- elektrode (2) i elemenata za dovođenje struje;
- papuče i mehanizma za davanje sile pritiska (3);
- transformatora velike snage (4) koji smanjuje napon sa 380 ili 220 V na 0,5–10 V.

Sila pritiska može da se zadaje mehanički (nogom, sl. 6.7a, ili rukom, sl.6.7b) ili automatski (hidraulično, električno ili pneumatski). U prvom slučaju pritisak je konstantan, dok u ostalim slučajevima vrednost pritiska u ciklusu zavarivanja može da se menja.



Slika 6.7. Uređaji za elektrootporno tačkasto zavarivanje

Elektrode se prave od legura bakra koje treba da imaju što veću električnu provodnost i što veću otpornost na habanje na povišenim temperaturama. Prvi zahtev najbolje ispunjava čist bakar, ali je njegova tvrdoća, posebno na povišenim temperaturama, nedovoljna. Stoga se za izradu elektroda najčešće koriste legure bakra sa hromom (0,3–1,2% Cr), sa kadmijumom (0,7–1,3% Cd) ili trojna legura Cu-Cr-Zr (0,5–1,4% Cr, 0,02–0,2% Zr), sem za neke specijalne primene gde se koriste volframove legure (najčešće sa bakrom), koje imaju manju provodnost od legura bakra ali znatno veću tvrdoću. Elektrode se u svakom slučaju hlade tekućom vodom da bi im se smanjila radna temperatura i povećao radni vek. Vrh elektrode može da bude različitog oblika, sl. 6.8, a njegov izbor zavisi od problema koji se rešava.

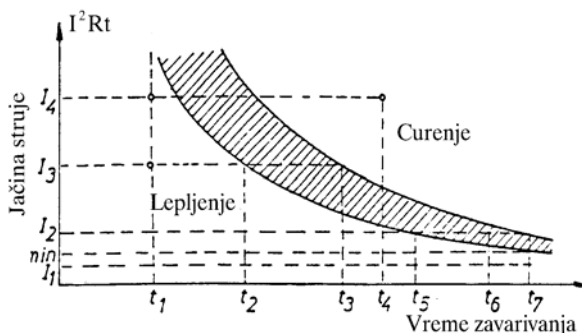


Slika 6.8. Presek elektrode i različiti oblici vrha elektrode

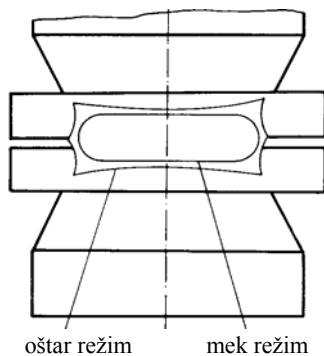
### 6.1.3. Parametri tačkastog zavarivanja

Na kvalitet elektrootporno zavarenih spojeva najviše utiču jačina struje zavarivanja, sila pritiska na elektrode, vreme zavarivanja, dimenzije vrhova elektroda, vreme prianjanja elektroda i vreme održavanja sile pritiska na elektrodama. Osim navedenih parametara pri elektrootpornom zavarivanju treba voditi računa o karakteristikama osnovnog materijala, zahtevima za spoljni izgled zavarenih spojeva, potrebnoj klasi kvaliteta spoja, kvalitetu opreme i uređaja za zavarivanje i njihovoj kontroli.

Jačina struje i vreme zavarivanja su međusobno povezani parametri, a njihov odnos može da se definiše integralnim izrazom za količinu toplote:  $Q = RI_z^2 t_z$ . Kako uvek postoji minimalna jačina struje potrebna za dobijanje zavarenog spoja, vreme zavarivanja ne može da se povećava preko neke vrednosti. Minimalna vrednost jačine struje zavisi od karakteristika osnovnog materijala, debljina limova i stanja njihovih površina, dimenzija vrha elektrode i sile pritiska, kao i temperature metala na mestu gde se površine dodiruju. Vrednosti jačine struje i vremena zavarivanja pri kojima je moguće dobiti zavareni spoj, definisane su šrafiranim delom na sl. 6.9.



Slika 6.9. Zavisnost jačine struje i vremena zavarivanja



Slika 6.10. Različiti oblici sočiva

Zavareni spoj neće nastati ukoliko se odaberu vrednosti jačine struje i vremena zavarivanja koje se na dijagramu nalaze levo od šrafirane oblasti, već će se tada pojaviti efekt „lepljenja“ spojeva. U području koje se nalazi desno od šrafirane oblasti, usled prekomerne toplote, nastaje prskanje, tj. „curenje“ ili izbacivanje rastopljenog metala, što takođe pogoršava kvalitet zavarenog spoja.

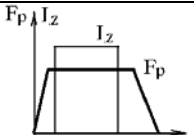
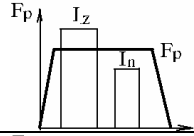
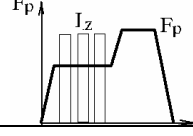
### 6.1.4. Režimi zavarivanja

Za postizanje kvalitetnog tačkasto zavarenog spoja potrebno je definisati optimalni režim zavarivanja, što uključuje i izbor osnovnih parametara zavarivanja: jačine struje  $I_z$ , vremena zavarivanja  $t_z$  i sile pritiska  $F_p$  koja se prenosi preko elektroda. Prema jačini struje i vremenu, režimi zavarivanja mogu da se podele na:

- „oštre“, kod kojih je jačina struje velika, a vreme zavarivanja kratko,
- „meke“ kod kojih je jačine struje mala, a vreme zavarivanja dugo.

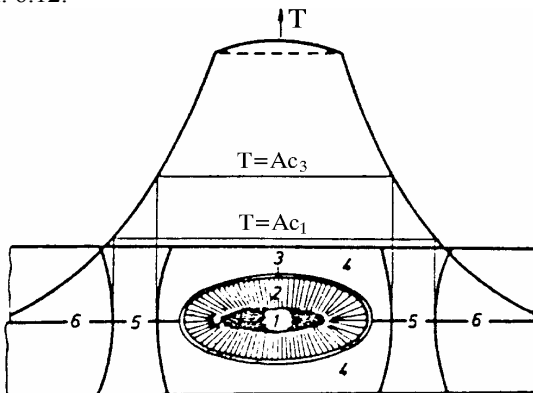
Navedeni režimi odražavaju se na oblik zavarene tačke, koji je u slučaju mekog režima gotovo eliptičan, a u slučaju oštrog režima javljaju se karakteristična ispupčenja po čoškovima, sl. 6.10. Promena jačine struje  $I_z$  i sile pritiska  $F_p$  tokom zavarivanja čine ciklus zavarivanja, tab. 6.1.

Tabela 6.1. Režimi elektrotopnog tačkastog zavarivanja čelika

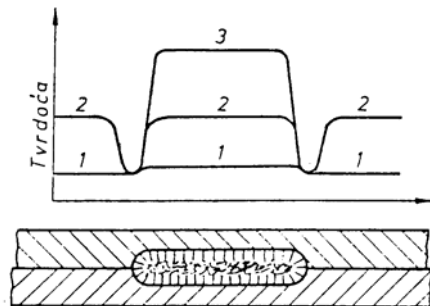
Naziv ciklusa	Šema ciklusa	Područje primene
Jednoimpulсно tačkasto zavarivanje konstantnim pritiskom elektroda.		Zavarivanje niskougleničnih i niskolegiranih čelika debljine najviše do 6 mm.
Dvoimpulсно tačkasto zavarivanje konstantnim pritiskom elektroda (zavarivanje s naknadnom termičkom obradom).		Zavarivanje zakaljivih čelika.
Višeimpulсно tačkasto zavarivanje promenljivim pritiskom elektroda.		Zavarivanje čelika debljine lima veće od 6 mm.

### 6.1.5. Struktura i greške tačkastog spoja

Zavarena tačka ima dve ose simetrije, veliku osu koja se poklapa sa linijom dodira dva lima i malu osu koja se poklapa sa osom elektroda. U centralnoj zoni zavarene tačke je najveće zagrevanje i najbrže hlađenja, a promena temperature je različita u različitim pravcima, čime se objašnjava eliptičnost zavarene tačke. Zbog različite brzine hlađenja u mikrostrukturi zavarenog spoja mogu da se uoče različite zone, sl. 6.11. Zona 1 je ravnoosne strukture, 2 je zona sa orijentisanim dendritima, a 3 je zona normalizacije, koja se nalazi iznad  $A_3$  temperature i ima sitnozrnastu strukturu što povoljno utiče na sve mehaničke osobine. Zona 4 je područje koje odgovara temperaturama  $A_1$  i  $A_3$ . Zona 5 je područje rekristalizacije, a 6 je zona osnovnog materijala koja nije podvrgnuta delovanju termičkog ciklusa zavarivanja. Promena tvrdoće u području zavarenog spoja za tri različita čelika (kriva 1–1–1 austenitni čelici, kriva 2–2–2 hladnovaljani niskouglenični čelici, a krive 1–3–1 i 1–2–1 legirani čelici) su date na sl. 6.12.

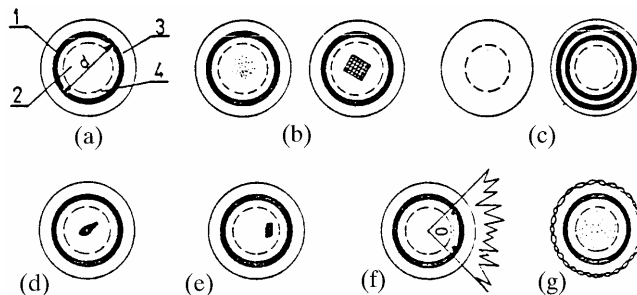


Slika 6.11. Šematski prikaz temperatskog polja kod tačkasto zavarenog spoja



Slika 6.12. Promena tvrdoće u području zavarene tačke

Najčešće greške kod tačkastog elektrootpornog zavarivanja (poroznost, lepljenje, šupljine, prskanje, pregorevanje) su prikazane na sl. 6.13, zajedno sa dobro zavarenom tačkom, u kojoj treba da se vide: 1–tamni prsten, 2–siva srednja zona, 3–spoljni svetli prsten, 4–unutrašnji svetli prsten, sl. 6.13a. Osnovni uzrok nastanka ovih grešaka je pogrešan izbor parametara zavarivanja.



Slika 6.13. Greške kod tačkasto zavarenih spojeva na radiogramu: a) normalna tačka b) poroznost (srednja zona tamna ili kockasta), c) lepljenje (nema jednog ili ima dva tamna prstena), d) i e) šupljina (crne mrlje u središnjoj zoni), f) prskanje, g) pregorela tačka

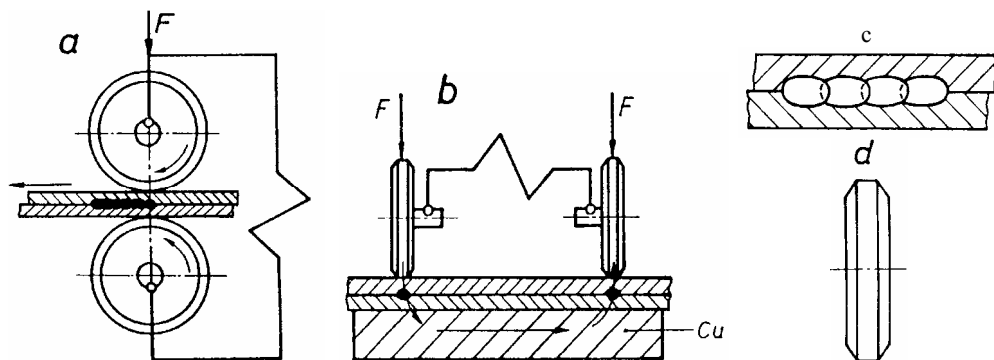
### 6.1.6. Tačkasto zavarivanje pojedinih metala i legura

Elektrootporno tačkasto zavarivanje tankih limova od niskougleničnog i niskolegiranih čelika ne predstavlja poseban problem i u tom slučaju se koristi najjednostavniji režim zavarivanja, tab. 6.1. Zavarivanje čelika sklonih zakaljivanju zahteva komplikovaniji režim zavarivanja sa dva impulsa struje od kojih prvi služi za zavarivanje, a drugi za termičku obradu kojom se zakaljene strukture otpuštaju, tab. 6.1. Zavarivanje visokolegiranih nerđajućih čelika može da bude slabijom strujom ili kraćim vremenom, jer je njihova električna otpornost veća, što je posebno povoljno kod čelika sklonih izlučivanju karbida po granicama zrna.

Zavarivanje obojenih metala i legura zahteva povećanje sile pritiska posle isključivanja struje, kao u slučaju čeličnih limova veće debljine, da bi se izbegla pojava šupljina i pora u zavarenoj tački. Legure Al-Cu tipa durala, koje se ne zavaraju konvencionalnim postupcima topljenjem, mogu da se zavare elektrootporno.

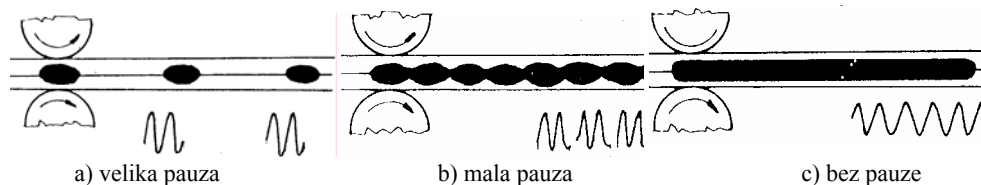
## 6.2. ELEKTROOTPORNO ŠAVNO ZAVARIVANJE

Elektrootporno šavno zavarivanje je postupak spajanja metala kombinovanim dejstvom toplote dobijene električnim otporom između dva lima pritisnuta elektrodama oblika diska i sile pritiska, sl. 6.14. Pri tome nastaje spoj (šav) koji može da se shvati kao niz tačaka, po pravilu delimično prekrivenih, koje obrazuju neprekidan šav, sl. 6.14c. Za dobijanje neprekidnog i nepropusnog šava korak tačaka (rastojanje između centara dve susedne tačke) treba da bude  $a > 0,5 \cdot d_m$ . Bitna razlika šavnog zavarivanja u odnosu na tačkasto zavarivanje je oblik elektrode (disk umesto šipke – sl. 6.14d) i njeno obrtanje oko sopstvene ose, sl. 6.14a. Osim toga, kod šavnog zavarivanja je neophodno relativno kretanje elektroda i osnovnog materijala u pravcu obrazovanja šava, sl. 6.14a. Šavno zavarivanje može da se izvodi dvostrano, sl. 6.14a, ili jednostrano, sl. 6.14b, u slučaju da nisu pristupačne obe strane.



Slika 6.14. Šema šavnog zavarivanja a) dvostrano; b) jednostrano; c) presek šava d) elektroda

Uslovi zagrevanja pri šavnom i tačkastom zavarivanju imaju dosta zajedničkog, kao što je uticaj intervala vremena u kome je uključena struja i sile pritiska na karakteristike zavarenog spoja, dok su razlike posledica kretanja komada u odnosu na elektrodu. Otpor pokretnog kontakta je veći od otpora nepokretnog kontakta, što dovodi do intenzivnog izdvanja toplote kod pokretnog kontakta, a pri neprekidnom zavarivanju do pregrevanja; površina komada se topi, a na elektrodu se nalepljuju čestice zavarenog materijala. Zbog oštećenja komada i brzog trošenja elektroda neprekidno šavno zavarivanje se retko primenjuje. Pauze kod prekidnog zavarivanja poboljšavaju hlađenje elektroda i smanjuju njihovo pregrevanje. Na sl. 6.15 je prikazan uticaj načina propuštanja struje na oblik šava, gde se vidi da se smanjivanjem pauze pri propuštanju struje dobija veći preklop tačaka, odnosno neprekidni spoj ako pauze nema. Osnovni režimi šavnog zavarivanja ugljeničnih i legiranih čelika različite debljine i legura aluminijuma su definisani u tab. 6.2.



Slika 6.15. Uticaj načina propuštanja struje na oblik šava

Tabela 6.2. Režimi elektrootpornog šavnog zavarivanja

Naziv ciklusa	Šema ciklusa	Područje primene
Prekidno (impulsno) uključivanje struje pri neprekidnom obrtanju elektroda		Zavarivanje niskougleničnih i nerđajućih čelika debljine lima do 3 mm
Neprekidno uključena struja pri neprekidnom obrtanju elektroda		Zavarivanje manje odgovornih konstrukcija od niskougleničnih čelika debljine lima do 1 mm
Uključivanje struje pri nepokretnim elektrodama. Obrtanje elektroda pri isključenoj struji		Zavarivanje aluminijumskih legura debljine lima do 3 mm



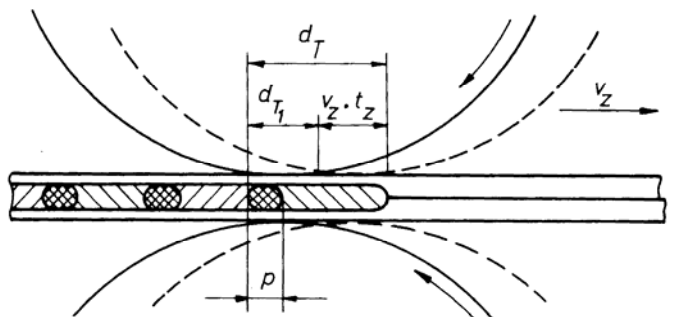
Uređaji za šavno zavarivanje su slični uređajima za tačkasto zavarivanje, s tim da imaju veću snagu zbog izraženije pojave skretanja struje i da treba da obezbede kretanje (obrtnje) elektroda. Materijal elektroda je praktično isti kao kod tačkastog zavarivanja.

### 6.2.1. Parametri zavarivanja

Osnovni parametri šavnog zavarivanja su sila pritiska, jačina i vreme dejstva struje, prečnik i korak tačaka i brzina zavarivanja. Sila pritiska, jačina i vreme dejstva struje su povezani na sličan način kao kod tačkastog zavarivanja. Korak tačaka zavisi od debljine materijala i režima zavarivanja. Prekomerno prekrivanje tačaka ( $a < 0,5 \cdot d_m$ ) je nepoželjno jer smanjuje čvrstoću spoja. Prečnik pojedinih tačaka zavisi od debljine materijala, profila radnog dela elektroda i režima zavarivanja.

Pri prekidnom zavarivanju ukupno vreme ciklusa je određeno količnikom koraka tačaka i brzine zavarivanja,  $t = a/v_z$ . Količnik vremena zavarivanja i ukupnog vremena ciklusa  $t_z/t$  se bira u zavisnosti od osobina osnovnog materijala i obično iznosi 0,3–0,7. Struja velike jačine s malim pauzama ( $t_z/t \approx 1$ ) izaziva pregrevanje komada i elektroda.

Veličina preklapa  $p$  može da se odredi na osnovu izraza  $p = d_{T1} \cdot v_z \cdot t_p$ , gde je  $d_{T1}$  prečnik tačke koja bi se dobila da nema relativnog kretanja elektroda i limova brzinom  $v_z$ , sl. 6.16, a  $t_p$  je razlika ukupnog vremena ciklusa  $t$  i vremena zavarivanja  $t_z$ . Prečnik tačke koja se stvarno dobija očigledno je  $d_T = d_{T1} + v_z \cdot t_z$ , sl. 6.16. Ako se zada preklap  $p$ , brzina zavarivanja  $v_z$  može da se odredi na osnovu prethodnih izraza.

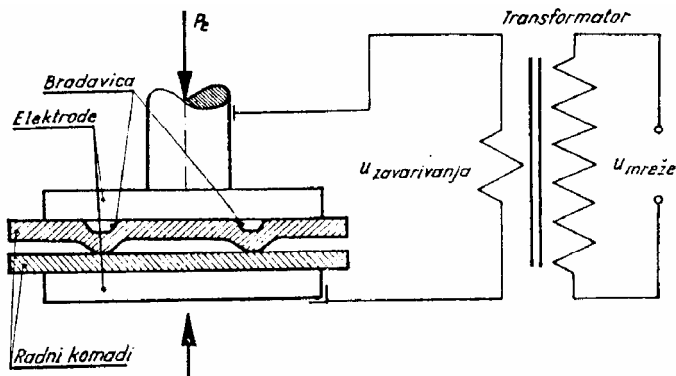


Slika 6.16. Šema preklapanja tačaka kod šavnog zavarivanja

### 6.3. ELEKTROTOPNO BRADAVIČASTO ZAVARIVANJE

Elektrootporno bradavičasto zavarivanje je u osnovi isto kao tačkasto zavarivanje s tim da se na jednom od limova koji se zavaruju prethodno naprave ispupčenja (bradavice) koje naležu na drugi lim i time određuju put struji u zatvorenom strujnom kolu, sl. 6.18. Nastajanje zavarene tačke je analogno tačkastom zavarivanju, sl. 6.19.

Prednost bradavičastog zavarivanja u odnosu na tačkasto je u tome što u jednom prolazu nastaje onoliko tačaka koliko je bradavica pripremljeno na limu, tj. u većoj proizvodnosti. Osim toga, elektrode traju znatno duže jer nisu opterećene kao kod tačkastog ili šavnog zavarivanja. Mana bradavičastog zavarivanja je potreba za velikom snagom i silom pritiska, što komplikuje i poskupljuje uređaj za zavarivanje.



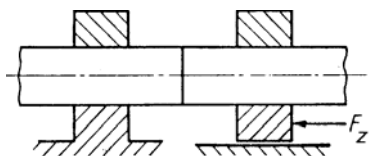
Slika 6.18. Šema bradavičastog zavarivanja



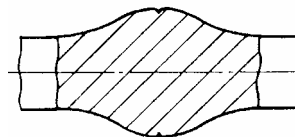
Slika 6.19. Faze nastanka bradavičastog spoja

#### 6.4. ELEKTROOTPORNO SUČEONO ZAVARIVANJE ZBIJANJEM

Pri sučeonom elektrotopornom zavarivanju zbijanjem delovi koji se zavaruju stežu se u čeljusti mašine tako da im se čeone površine priljube, sl. 6.20. Uključivanjem struje, usled kontaktnog otpora osnovni materijal se zagreva na mestima dodira do temperature koja je dovoljno visoka da se uz dodatni pritisak podužnom silom  $F_z$  ostvari spoj, sl. 6.21, ali je niža od temperature topljenja, pa spoj nastaje u čvrstom stanju. Ovaj postupak zavarivanja je primenljiv kod materijala koji imaju dobru plastičnost kao što su niskouglenični čelik, aluminijum i bakar. Pri tome poprečni presek treba da bude što jednostavniji, a njegova površina u odnosu na dužinu predmeta što veća. Sučeono zavarivanje zbijanjem se najčešće koristi za spajanje čeličnih šipki prečnika 3–10 mm.

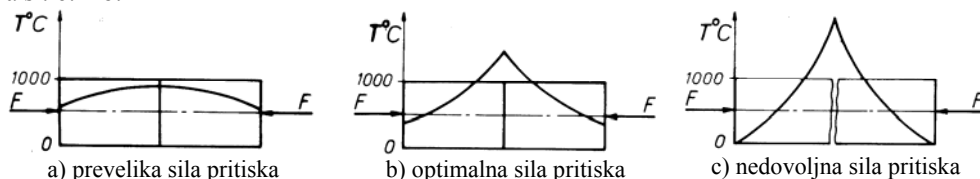


Slika 6.20. Šema zavarivanja zbijanjem



Slika 6.21. Izgled spoja dobijenog zbijanjem

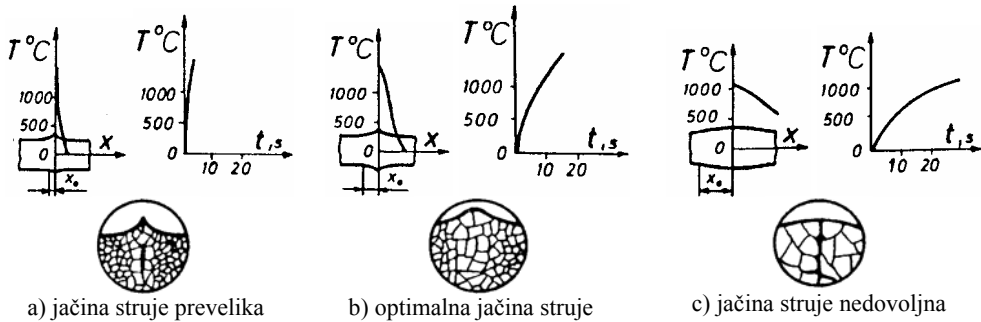
Osnovi parametri postupka su podužna sila (pritisak) i jačina struje, koje pri zavarivanju čelika treba izabrati u odgovarajućem opsegu. Suviše velika sila pritiska smanjuje kontaktni otpor, pa je zagrevanje nedovoljno, sl. 6.22a, a suviše mala sila pritiska, usled prevelikog kontaktnog otpora, uslovljava lokalno pregrevanje, sl. 6.22c, i istiskivanje rastopljenog metala van spoja. Optimalna vrednost sile pritiska i odgovarajuća raspodela temperature je prikazana na sl. 6.22b.



Slika 6.22. Uticaj sile pritiska na raspodelu temperature pri sučeonom zavarivanju

Pri suviše jakoj ili suviše slaboj struji podužna raspodela temperature je nepovoljna jer je u prvom slučaju usled brze promene temperature oblast plastične deformacije (označena sa  $x_0$ , sl. 6.23) suviše mala, a raspodela veličine metalnog zrna neravnomerna, sl. 6.23a, dok je u drugom slučaju zbog spore promene temperature oblast plastične deformacije prevelika, a zrno suviše krupno, sl. 6.23c. Optimalna brzina zagrevanja, raspodela temperature i veličine zrna je prikazana na sl. 6.23b, kao i odgovarajuća veličina plastične deformacije, koja treba da bude 30–50% prečnika šipke.

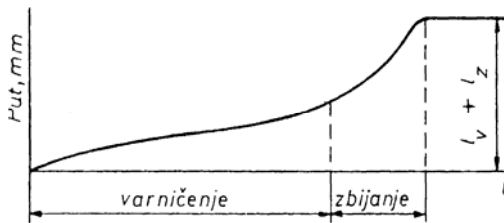
Izbor parametara pri zavarivanju obojenih metala i legura je znatno jednostavniji i svodi se na uslov da se kontaktna površina zagreje do temperature topljenja.



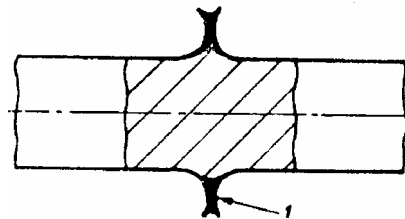
Slika 6.23. Uticaj brzine zagrevanja na oblik i strukturu spoja

## 6.5. ELEKTROTOPNO SUČEONO ZAVARIVANJE VARNIČENJEM

Kao i kod sučeonog zavarivanja zbijanjem, kod zavarivanja varničenjem delovi koji se zavaruju stežu se u čeljusti mašine i pomeraju jedan prema drugom, ali se strujno kolo uspostavlja preko električnog luka kada su delovi na nekom rastojanju, i tek onda se njihove čeonice priljube. Pri tome se kontakt uspostavlja samo u pojedinim, isturenim tačkama (zbog neravnina čeonih površina), a gustina struje dostiže velike vrednosti uslovljavajući topljenje i isparavanje materijala, koji se pod uticajem okolnih elektromagnetnih sila izbacuje iz spoja, zajedno sa nečistoćama i oksidima. Ovaj proces izgleda kao varničenje, po čemu je postupak dobio ime. Tek kada se dostigne dovoljno zagrevanje po dužini osnovnog materijala i rastapanje čeonih površina, silom pritiska se ostvaruje spoj uz naglo ubrzanje pomeranja delova i ukupno skraćivanje zavarenih predmeta  $l_v + l_z$ , sl. 6.24. Pri tome se oko spoja obrazuje karakterističan venac, oznaka 1 na sl. 6.25, koji se otklanja mašinskom obradom.



Slika 6.24. Osnovno pomeranje pri zavarivanju varničenjem



Slika 6.25. Izgled spoja sa vencem

Postupak zavarivanja varničenjem je po pravilu pogodan za materijale koji ne mogu da se zavaruju zbijanjem. Ovaj postupak može da se primeni na prstenaste i druge poprečne preseke složenijeg oblika nego što je bio slučaj kod zavarivanja zbijanjem. Postoje i druge, komplikovanije varijante sučeonog zavarivanja varničenjem, kao što je zavarivanje sa predgrevanjem, čime se sprečava zakaljenje kod čelika sa više ugljenika i legiranih čelika.