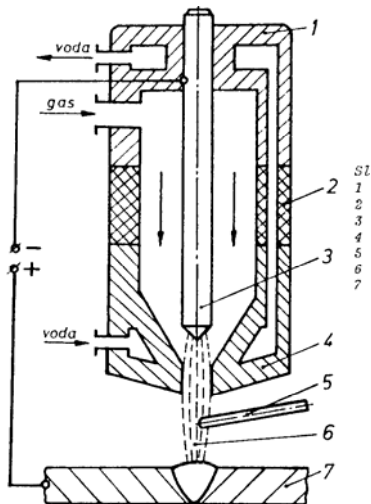


8. SPECIJALNI POSTUPCI ZAVARIVANJA

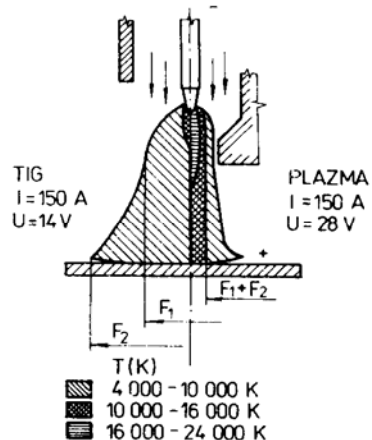
Specijalni postupci zavarivanja mogu da se podele u tri grupe: postupci spajanja topljenjem (plazmom, elektronskim snopom, laserom, električno pod troskom), postupci koji imaju varijante spajanja topljenjem ili spajanja u čvrstom stanju (aluminotermitsko, magnetno elektrolučno) i postupci spajanja u čvrstom stanju (trenjem, indukciono, ultrazvukom, eksplozijom, difuzijom, kovačko i hladnom plastičnom deformacijom).

8.1. ZAVARIVANJE PLAZMOM

Plazma je električno provodljiv, disocirani i visokojonizovani gas, tj. intenziviran električni luk. Plazma luk nastaje u specijalnom plazma gorioniku – plazmatronu, sl. 8.1, koji se u osnovi sastoji od elektrode, mlaznice i izolatora između njih. Za napajanje se koristi jednosmerna struja, pri čemu elektroda ima ulogu katode, a anoda je mlaznica ili radni predmet. Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode, hlađene vodom, i radnog predmeta, i sužava se bakarnom mlaznicom koja se takođe hladi vodom, sl. 8.1. Sužavanje luka je bitna odlika plazma zavarivanja, jer se time postiže bolji raspored i viša temperatura u odnosu na srodni TIG postupak, sl. 8.2. Električni luk se uspostavlja visokonaponskom iskrskom koja sa volframove elektrode kao katode „preskače“ na mlaznicu ili na osnovni materijal. Oko električnog luka je omotač od zaštitnog gasa koji štiti metalnu kupku od oksidacije i stabilizuje električni luk.

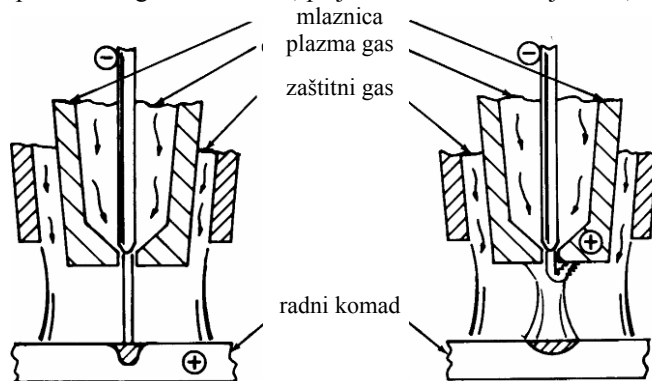


Slika 8.1. Plazmatron: 1–držač elektrode, 2–izolator, 3–W elektroda, 4–Cu mlaznica 5–dodatni metal, 6–plazma, 7–osnovni metal



Slika 8.2. Poređenje uobičajenog (TIG) luka (levo) i suženog (plazma) luka (desno) (F1–širina metala šava, F2–širina ZUT)

U slučaju kada je mlaznica anoda (sl. 8.3b), električno kolo je zatvoreno u plazmatro- nu, a luk plazme se zove **indirektni**. Ako se električno kolo zatvara preko radnog predmeta luk se naziva **direktni** (sl. 8.3a). **Direktnim plazma lukom** prenosi se veća količina toplotne energije na radni predmet nego indirektnim, pa je i dubina uvarivanja veća, sl. 8.3.



Slika 8.3. a) direktni; b) indirektni luk plazme

Kao plazma gas koriste se Ar, H₂, N₂ i njihove mešavine, ili vazduh. Za izbor gasa ili gasne smeše za plazmu treba imati u vidu atomsku i specifičnu masu, koeficijent toplotne provodljivosti, energiju jonizacije i karakter gasa, tab. 8.1. Posebno je značajna toplotna provodljivost zbog prenosa toplote na radni predmet.

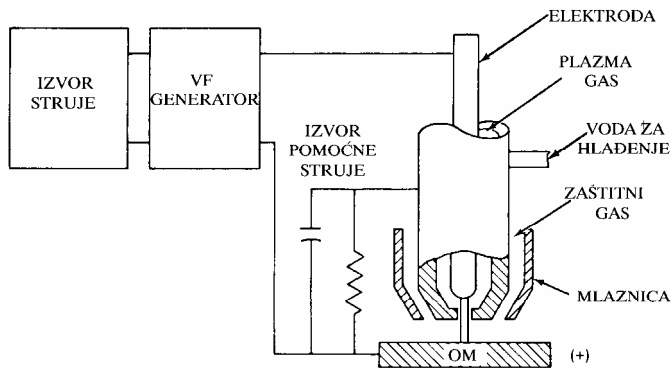
Tabela 8.1. Neke karakteristike plazma gasova

gas	atomska masa	specifična masa (kg/m ³)	toplotna provodljivost	energija jonizacije (eV)	karakter gasa	primena	
						rezanje	zavariv.
Ar	40	1,78	mala	15,7	inertan	+	+
H ₂	2	0,09	velika	15,4	redukujući	+	+
N ₂	28	1,25	srednja	15,8	nitirajući	-	+
He	4	0,18	srednja	24,5	inertan	+	-
vazduh	-	1,293	srednja	-	oksidisući	-	+

Kao plazma gas najčešće se koristi argon (Ar) visoke čistoće (99,95%) jer je jeftiniji od drugih gasova, ne izaziva nikakve metalurške probleme, i ima malu energiju jonizacije, koja omogućava lako i sigurno uspostavljanje električnog luka pri naponima praznog hoda ispod 100 V. Često se koriste smeša gasova, npr. vodonik i azot za zavarivanje bakra, ili argon i vodonik za zavarivanje nerđajućih čelika.

Kao zaštitni gas preporučuje se smeša argona i vodonika (Ar + H₂), sa sadržajem vodonika 5–10%. Dodatak vodonika argonu daje bolju zaštitu istopljenog metala od kiseonika, veći napon električnog luka i manji viskozitet tečnog metala. Ova se kombinacija pokazala uspešnom kod zavarivanja visokolegiranih čelika, bakra, nikla i legura nikla. Pri zavarivanju reaktivnih metala (npr. titana ili legura bakra) pogodnije je da se umesto vodonika koristi helijum.

Za plazma zavarivanje koriste se ispravljači sa strmopadajućom karakteristikom, napona praznog hoda oko 80 V. Uređaj za plazma zavarivanje obično ima dva odvojena izvora: za pomoćni luk i za luk plazme, sl. 8.4. Za zavarivanje u oblasti plazme izvor struje se bitno ne razlikuje od onog koji se koristi kod TIG zavarivanja, sem što ima posebno kolo za pomoćni luk i nešto viši napon praznog hoda.

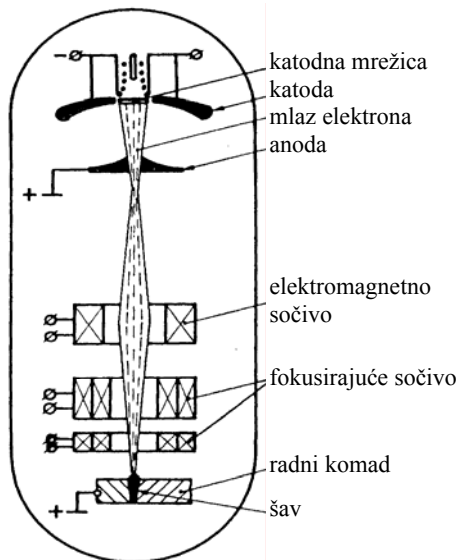


Slika 8.4. Uređaj za plazma zavarivanje

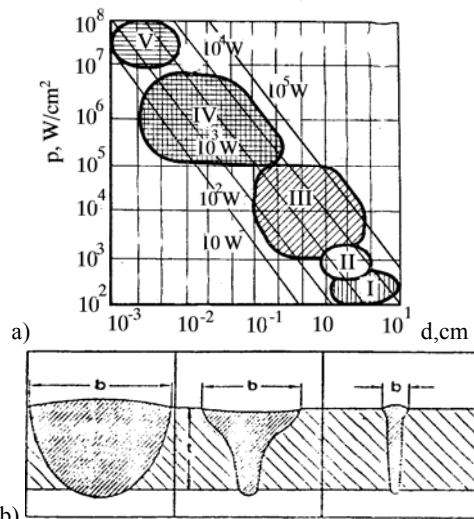
8.2. ZAVARIVANJE ELEKTRONSKIM SNO POM

Elektronski snop se dobija pomoću elektronskog topa, koji se sastoji od volframske katode, rešetke i anode, sl. 8.5. Elektroni se emituju sa katode, ubrzavaju i formiraju snop pomoću električnog polja, najčešće u visoko vakuumskom okruženju. Snop se sužava i usmerava na osnovni metal, prolazeći kroz polja koja obrazuju elektromagnetni kalemi. Bombardovanjem osnovnog metala strujom elektrona velike brzine, pri čemu se kinetička energija elektrona pretvara u toplotnu energiju, nastaje zavareni spoj. Ovakav mehanizam obrazovanja zavarenog spoja omogućava izrazito velike dubine uvarivanja.

Zavarivanje elektronskim snopom spada u postupke zavarivanja velikom gustinom snage koji su prikazani na sl. 8.6a (laser-V, elektronski snop-IV, plazma-III), zajedno sa konvencionalnim postupcima (gasno-I i TIG-II), radi poređenja. Osim znatno većih gustina snage, postupci zavarivanja kao što je elektronski snop su prepoznatljiviji po maloj širini zone zagrevanja, sl. 8.6a, odnosno maloj širini šava, sl. 8.6b.



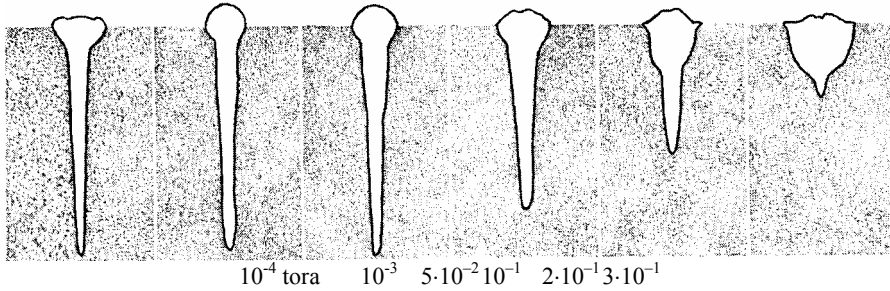
Slika 8.5. Zavarivanje elektronskim snopom



TIG plazma elektronski snop,
 $t/b = 0,5-1$, $t/b = 1-2$, $t/b = 5-25$

Slika 8.6. Poređenje oblika šava

Elektronski top se nalazi u visokom vakuumu da bi se zaštitile njegove komponente, posebno katoda, od oksidacije i kratkog spoja usled isparavanja. Vakuum takođe smanjuje rasipanje elektrona pri sudarima sa molekulima vazduha, pa se njegovim smanjenjem smanjuje dubina uvarivanja, a povećava širina šava, sl. 8.7.



Slika 8.7. Uticaj vakuuma na oblik šava

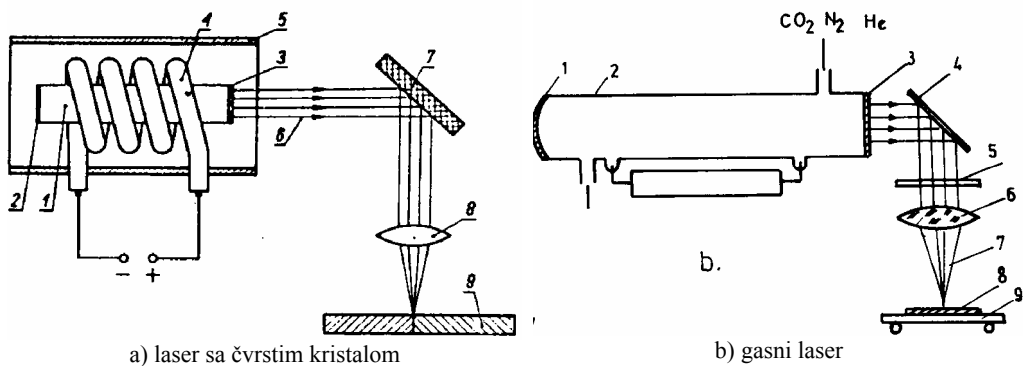
Elektronskim snopom može da se zavari bilo koji metal koji može da se zavari elektro-lučno. Glavne prednosti zavarivanja elektronskim snopom su:

- mogućnost izrade dubljih i užih šavova sa manjim unosima toplote;
- povoljna kontrola penetracije i drugih dimenzija šavova;
- visoka čistoća okoline za zavarivanje (vakuumirana komora);
- veća brzina zavarivanja.

Primenom elektronskog snopa znatno se smanjuje deformacija šava, pa je moguće zavarivanje u blizini elemenata osetljivih na toplotu. Ovaj postupak omogućava i spajanje različitih elemenata koje je nemoguće zavariti drugim postupcima, a skretanjem snopa elektromagnetnim sočivom mogu da se zavare i nepristupačni spojevi. Mane zavarivanja elektronskim snopom u vakuumu su visoka cena opreme i pripreme preciznih spojeva i pribora (zazor spoja mora biti jako mali zbog dimenzija snopa), kao i prostorna ograničenja vakuumske komore. Zavarivanje elektronskim snopom van komore nema ovo poslednje ograničenje, ali su zato radne daljine i dubina uvarivanja znatno manje, sl. 8.7.

8.3. ZAVARIVANJE LASEROM

Toplota potrebna za zavarivanje laserom se dobija delovanjem svetlosnog zraka, usmerenog i koncentrisanog na veoma malu površinu, sl. 8.8, što proizvodi gustinu snage veću od svih ostalih postupaka zavarivanja. Laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) je ustvari generator svetlosnog zraka, sl. 8.8, koji se sastoji od laserske šipke (1) sa nepropustljivim ogledalom (debeli sloj srebra) sa jedne strane (2) i delimično propustljivim ogledalom (tanki sloj srebra) sa druge strane (3), impulsne lampe (4) i reflektujućeg cilindra (5). Na šipku (obično kristal Al_2O_3 sa primesama Cr) deluje impuls svetlosti iz lampe (ksenon ili neon), stimulišući atome Cr da pređu na viši energetska nivo, koji se potom vraćaju na niži energetska nivo uz emisiju fotona. Ova stimulacija traje dok se ne postigne zasićenje kada je više atoma Cr na višem nego na nižem energetska nivou. Time se postiže efekt stvaranja velikog broja fotona koji se kreću duž ose kristala, odbijaju od nepropusnog ogledala i postižu intenzitet dovoljan da se stvori laserski zrak koji prolazi kroz delimično propusno ogledalo. Emitovanu svetlost usmerava ogledalo (7), a fokusira optičko sočivo (8), tako da ona deluje praktično u tački (9), uslovljavajući brzo i efikasno topljenje osnovnog materijala.



a) laser sa čvrstim kristalom

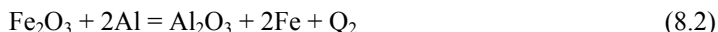
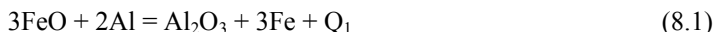
b) gasni laser

Slika 8.8. Šematski prikaz laserskog zavarivanja

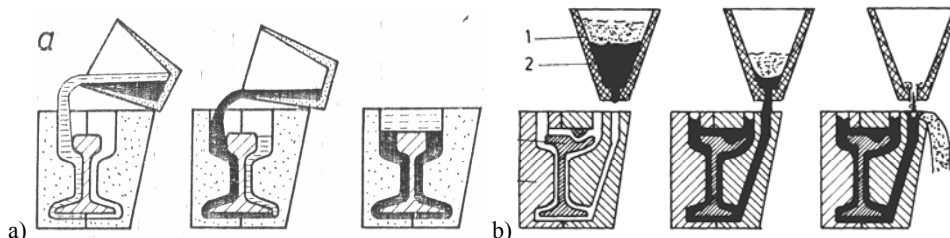
Zavareni spoj dobijen laserom ima veliku dubinu uvarivanja i malu širinu šava, pa dodatni materijal po pravilu nije potreban. Kvalitet spoja je dobar, jer nema metalurških problema (ZUT je veoma mali), a zaostali naponi i deformacije spoja su minimalni. Primena ovog postupka je još uvek mala zbog visoke cene opreme i relativno male raspoložive snage, ali se poslednjih godina lasersko zavarivanje sve više koristi, posebno posle uvođenja u praksu jeftinijih gasnih lasera, kao što su CO₂ laseri, koji imaju snagu i preko 15 kW.

8.5. ALUMINOTERMITSKO ZAVARIVANJE

Kod aluminotermitskog zavarivanja koristi se toplota dobijena hemijskom reakcijom smeše oksida železa i aluminijuma u zrnju (**aluminotermiti**). Kada se ova smeša (*termit*, po čemu je postupak dobio ime) zagreje na 1150°C, započinje burna reakcija kojom se oslobađa velika količina toplote:

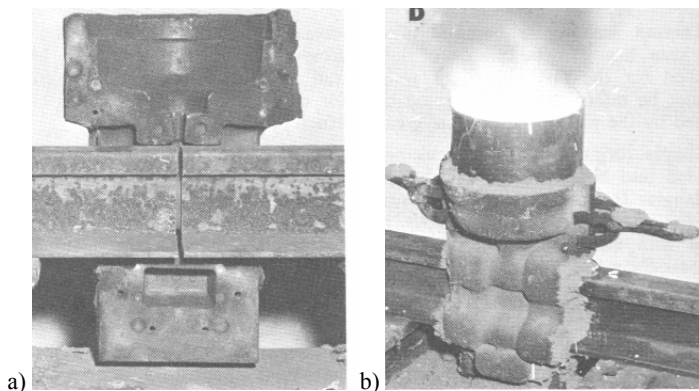


Temperatura u loncu (pozicija 1, sl. 8.12) dostiže do 3000°C, što je dovoljno za topljenje čelika i oksida aluminijuma, koji pliva na površini jer ima znatno manju gustinu. Postoje dve varijante ovog postupka, zavarivanje pritiskom, sl. 8.12a, i zavarivanje topljenjem sl. 8.12b. U prvom slučaju u kalup se prvo sipa tečna troska, koja kvasi osnovni metal i sprečava njegovo spajanje sa dodatnim metalom, koji služi samo kao izvor toplote. Kada se osnovni metal dovoljno zagreje, dodatnim pritiskom se obrazuje spoj. U drugom slučaju se u kalup sipa prvo rastopljeni metal, koji topi ivice osnovnog metala i sa njim obrazuje spoj, dok troska pliva odozgo i usporava hlađenje.



Slika 8.12. Aluminotermitsko zavarivanje: a) pritiskom b) topljenjem

Osnovna prednost aluminotermitskog zavarivanja je brzina rada i jednostavnost primene. U praksi se ovaj postupak pokazao idealnim za spajanje šina, sl. 8.13. U tom slučaju termitu se dodaje potrebna količina ugljenika i mangana, da bi se postigla tražena tvrdoća. Osim za zavarivanje čelika, ovaj postupak može da se koristi za reparaturno zavarivanje sivog liva, uz dodatak ferosilicijuma u smešu. Termitne smeše postoje još i kod Cu, Ni, Cr i Mn, ali primenu je našao samo termit bakra za zavarivanje električnih kontakata.



Slika 8.13. Aluminotermitsko zavarivanje: šina a) priprema b) proces