**Vežba 2.** Zavarljivost sitnozrnih konstrukcionih čelika

* To su potpuno umireni čelici sa sadržajem ugljenika <0,2% i sa dodatim elementima poput Al, Nb, Ti, V čiji zbirni sadržaj ne prelazi 0,2% koji stvaraju nitride čime se ograničava rast zrna u austenitnom području.
* Koriste se cevovodi za visoke pritiske, posude pod pritiskom, drumska vozila, primena na niskim temperaturama
* To su TermoMehanički " TM " valjani čelici debljine manje od 10 mm.
* Na zavarljivost ovih čelika presudno utiče sklonost ka pojavi hladnih prslina.
* Dozvoljena tvrdoća u ZUT-u za E postupka:
* Za rutilnu elektrodu dozvoljena tvrdoća je do 350 HV
* Za bazičnu elektrodu HVmax=400
* Predgrevanjem ili međuprolaznom temperaturom se smanjuje brzina hladjenja i sprečava velika tvrdoća u ZUT‐u. Sama po sebi visoka tvrdoća nije štetna ali kombinovana sa difundovanim vodonikom u ZUT‐u i njegovim  preobražajem u molekularni oblik može dovesti do hladnih prslina.

Zavarljivost se ocenjuje preko formula:

MIZ/IIW: >0,45%

 (predgr.Cekv>0,45%)

Ito&Bessyo:

Pe – opšti pokazatelj zavarljivosti; Cekv-CEV; d-debljina [mm]; H-sadržaj vodonika u šavu [cm3/100g] – najviše 6 cm3/100g

**Vežba 3** Zavarivanje mikrolegiranih Mn-Ni sitnozrnih čelika

* Vrste čelika:

1. Mikrolegirani Mn-Ni ( Ni do 1,7 %) sitnozrni (do -60oC normalizovani, -80oC poboljšani)
2. Čelici legirani niklom (uz mali % C daje žilavi paketasti martenzit):

* 3,5 % Ni (do -100oC)
* 5 % Ni (do -160oC)
* 9 % Ni (do -200oC)

1. Austenitni nerđajući čelici; AISI304) (do -273oC)

**Vežba 4. Nerđajući čelici**

* Nerđajući čelici imaju preko 10.5% hroma
* Obrazovanje površinskog sloja hrom-oksida (Cr2O3)-pasivizacija
* Postoje tri grupe nerđajućih čelika:

**Martenzitni**

* Sadrže i preko 1 % C, 12-14% Cr, do 2% Ni, do 1% Mo...
* Ultra visoke čvrstoće-napona tečenja i preko 1900 MPa
* Najosetljiviji na koroziju od svih nerđajućih čelika.
* Namenjeni za: hirurške instrumente, komponente ventila i pumpi, neki zupčanici, opruge i sl.
* Teško zavarljivi zbog prslina u šavu i ZUT-u- krti martenzit.
* Omogućavanje zavarivanja:

1. Legiranje šava
2. Predgrevanje
3. Izbor dodatnog materijala

Zbog visokog sadržaja C i legirajućih elemenata zakaljivi na vazduhu.

**Feritni**

* Sadrže 0,15-0,25% C i 16-30% Cr.
* Otporni su na kiseline (azotnu iz prehrambenih proizvoda), sumporne gasove...
* Namenjeni su za: izduvne cevi motornih vozila, dekorativne elemente u automobilskoj industriji i građevinarstvu, izmenjivače toplote, delove peći i grejača...
* Osnovni problemi pri zavarivanju su vezani za:

**Rast zrna**: Nastaje na temperaturama iznad 1150oC, gde se javlja rekristalizacija, tj. ukrupnjavanje zrna ferita.Time opada plastičnost (žilavost) čelika.

**Povećanje krtosti:** Javlja se u slučaju zadržavanja na visokim temperaturama.

**Međukristalna korozija:** Nastaje pod uticajem mikrogalvanskih elemenata nastalih između Cr-obogaćenog ferita (katoda, +) I karbida hroma (anoda, -potencijal).

**Austenitni**

Postoje dve klase austenitnih nerđajućih čelika:

Čelici 18-8 (Cr-Ni) koji su otporni na kiseline: pivare, sokare, vinare itd.; za cevovode, ventile i dr.

Čelici 25-20 (Cr-Ni) koji su i vatrootporni primena u nuklearnim reaktorima (zadržavaju mehaničke osobine i preko 1000oC).

* Problemi pri zavarivanju:
* Sklonost ka pojavi vrućih prslina
* Međukristalna korozija
* Krtost šava
* Antikorozivna zaštita ZUT-a

\*Za zavarene konstrukcije u energetici i hemijskoj industriji najviše se primenjuju :

Austenitni čelici : **18Cr‐Ni , 20Cr‐10Ni , 20Cr‐Ni**

Vatrootporni čelici : **20Cr‐12Ni**

Čelik postojan na visokim temperaturama :  **25Cr‐20Ni**.

**ŠEFLEROV DIJAGRAM I PRIMENA PRAVILA POLUGE**

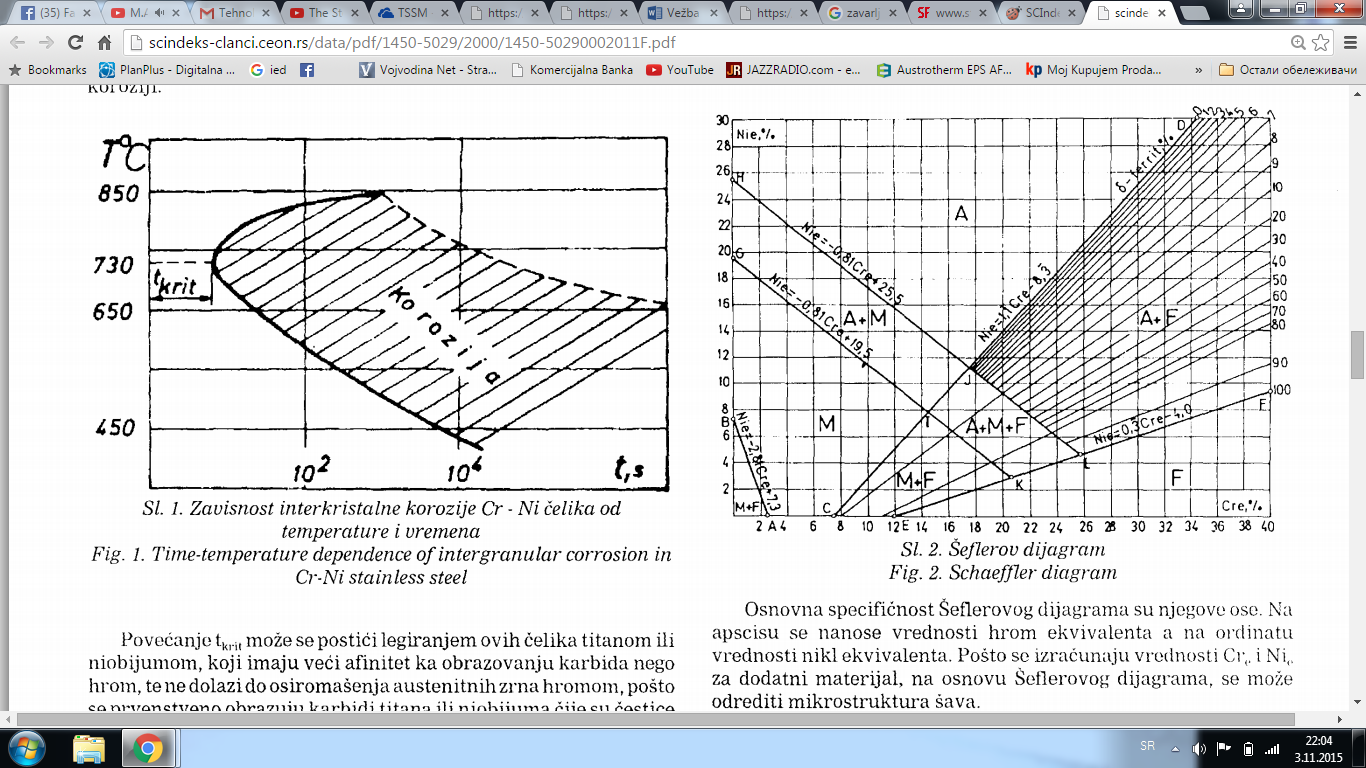
Posebnu pažnju kod zavarivanja nerđajućih čelika treba posvetiti **izboru dodatnog materijala**. Međutim, često se događa da se zbog nemogućnosti nalaženja adekvatnog dodatnog materijala koriste trake isečene iz osnovnog materijala sličnog hemijskog sastava kao dodatni materijal.

Osnovni uslov zavarljivosti ovih čelika je da **sadrzaj δ-ferita u šavu ne pređe granicu od 3 -8 %**.

Da li će ovaj uslov biti zadovoljen, ukoliko se umesto adekvatnog dodatnog materijala koriste trake isečene iz osnovnog materijala, mora se proveriti pravilom poluge u Seflerovom dijagramu.

Struktura šava zavisi od kolicine **α-genih i γ-genih elemenata**, koji ulaze u sastav dodatnog materijala.

**Uticaj α-genih elemenata je izražen ekvivalentom hroma Cr**, tj., količinom hroma koja bi obrazovala istu količinu ferita kao i zbir svih α-genih elemonata. Uticaj γ-genih elemenata je izražen ekvivalentom nikla, Ukoliko se prethodno izračuna hemijski sastav šava, može se pomoću Šeflerovog dijagrama, slika 2, odrediti njegova primarna struktura.



Osnovna specificnost Seflerovog dijagrama su njegove ose. Na apscisu se nanose vrednosti hrom ekvivalenta a na ordinatu vrednosti nikl ekvivalenta. Pošto se izračunaju vrednosti Cr, i Ni (za dodatni materijal, na osnovu Sef1erovog dijagrama, se moze odrediti mikrostruktura šava. U cilju odredivanja hemijskog sastava materijala šava (MŠ), ako je poznat hemijski sastav osnovnog materijala (OM) i dodatnog materijala (DM), koristi se pravilo poluge u Seflerovom dijagramu. Uobicajeno je da se pravilo poluge primenjuje povezivanjem tačke koja odgovara osnovnom materijalu u Seflerovom dijagramu sa tačkom koja odgovara čistom materijalu šava, što predstavlja pribliznu metodu.

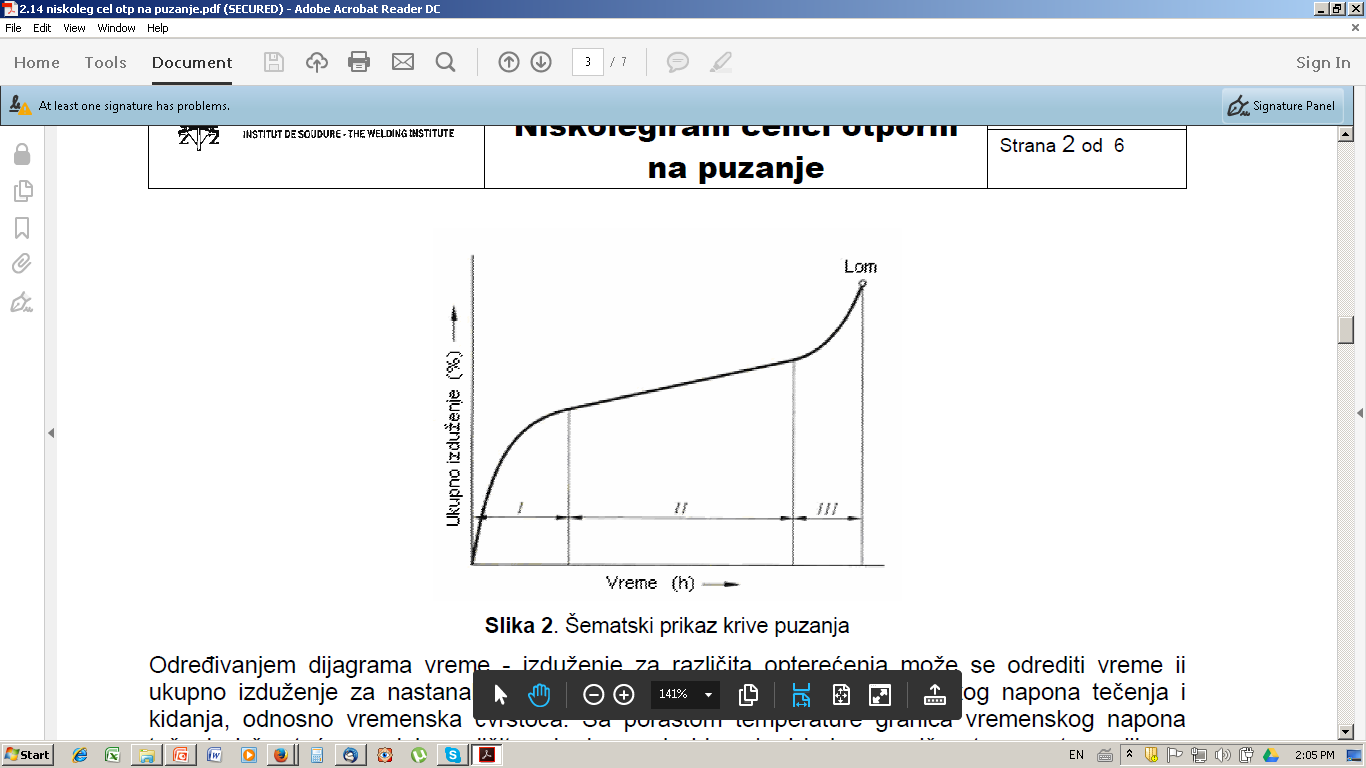
Na osnovu pravila poluge u Seflerovom dijagramu moguće je odrediti sledeće karakteristike zavarenog spoja:

- količinu δ-ferita u zavarenom spoju

- hemijski sastav materijala šava

-stepen iskoriscenja legirajucih elemenata u materijalu šava.

**Vežba 5:** Zavarljivost čelika otpornih na puzanje

Puzanje je proces plast. deformacije na povišenim temperaturama u uslovima vremenskog opterećenja – posledica je lom usled termičkog zamora,

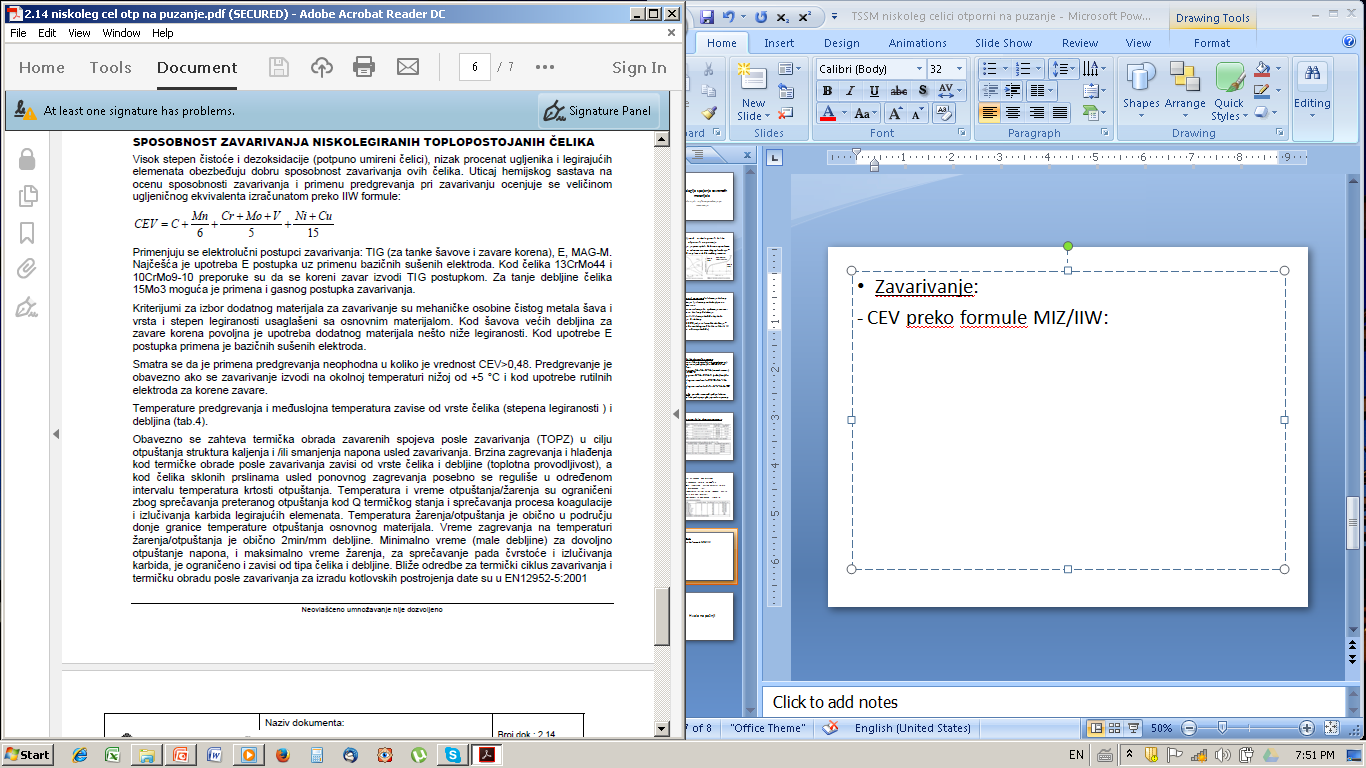
Vpuz je velika

Vpuz je velika

Vpuz je mala i konstanatna

* Otpornost na puzanje-otežavanje kretanja dislokacija, tj.stvaranja mikrošupljina na granicama zrna:
* **Mn** izaziva rastvarajuće ojačavanje osnove i otežava se kretanje dislokacija
* **Cr, Mo, V, W** stvaraju karbide koji koče kretanje dislokacija
* Iznad 600oC javlja se termička oksidacija – upotreba visokolegiranih čelika sa Mo, V, W (takođe obrazuju karbide)

Vrste čelika otpornih na puzanje:

* *Nelegirani Mn sitnozrni čelici (normalizovani) i mikrolegirani (poboljšani) do 350-400oC-već obrađeni*
* **Niskolegirani Mn, Mo i Cr-Mo (normalizovani) do 450-500oC**
* 16Mo3; Cr-Mo4-5; CrMo9-10; 11CrMo9-10 za ravne proizvode
* 15Mo3; 13CrMo4-4; 10CrMo9-10; 14MoV6-3 za bešavne cevi
* **Niskolegirani Cr-Mo i Cr-Mo-V (poboljšani) do 550oC**
* Visokolegirani martenzitni 9-12%Cr-Mo-V do 600oC
* Visokolegirani austenitni Cr-Ni, Cr-Ni-Mo do 900oC
* Visokolegirani otporni na kovarinu, do 1000oC
* Upotreba: posude i cevovodi pod pritiskom i energetska postrojenja gde je prisutno puzanje
* **Zavarivanje:**
* CEV preko formule MIZ/IIW: 
* Postupci: najčešće REL/E, TIG, MAG
* Bazične sušene elektrode
* Predgrevanje za CEV>0,48 i ako je temp.ispod +5oC

Vežba 6:ZAVARLJIVOST LIVENIH GVOŽĐA

Livena gvožđa su legure železa i 2,11-6,67% ugljenika (najčešće 3 - 4 %)

“Višak” ugljenika se javlja u obliku grafita (siva) ili cementita (bela livena gvožđa)

Prednosti u odnosu na čelike: bolja livljivost, niža cena (niža Ttoplj.), dobra obradivost rezanjem.

Nedostaci u odnosu na čelike: niža plastičnost, duktilnost i otpornost na udarce.

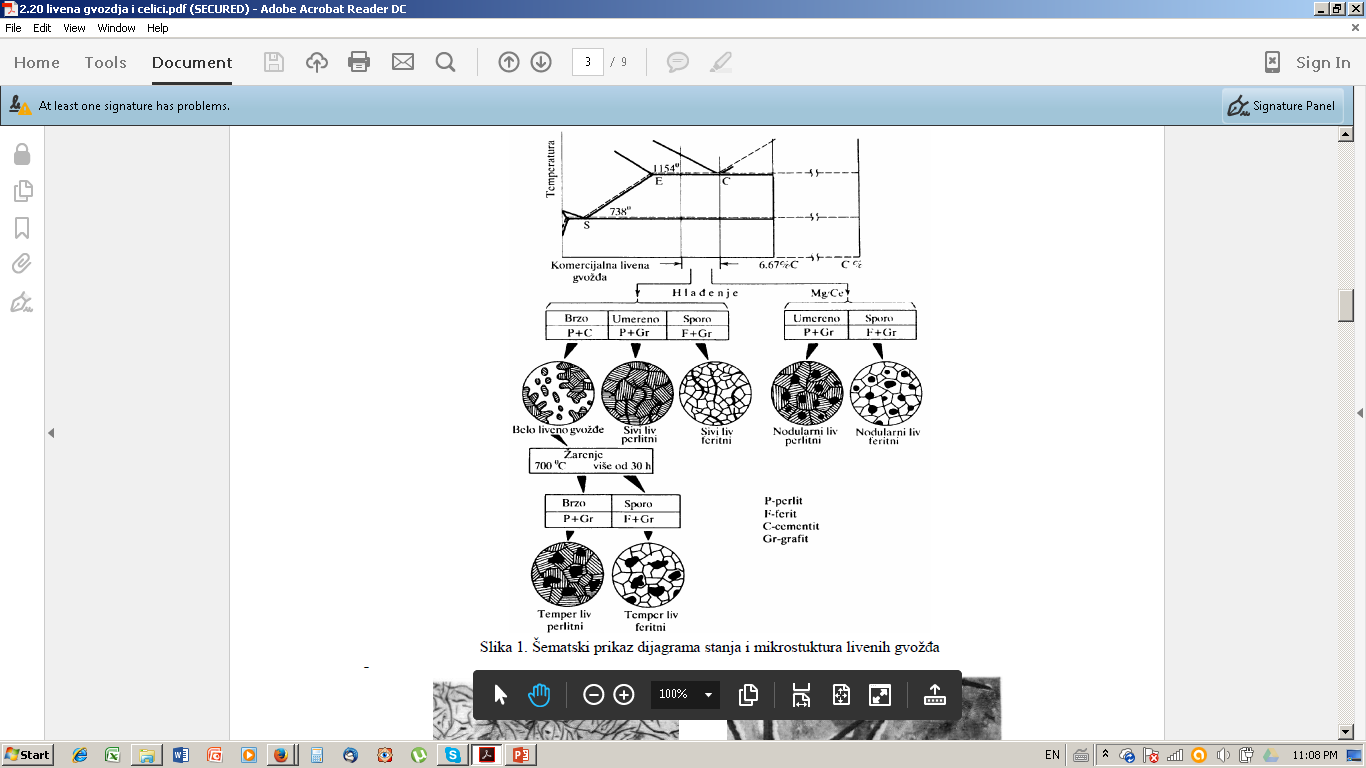
Uticaj hem.sastava i brzine hlađenja na strukturu livenih gvožđa:

* Elementi koji pomažu stvaranje grafita: C, Si, Ni, Cu, Al
* Elementi koji pomažu stvaranje cementita: Mn, S, Cr, W
* Brzina hlađenja: najveća-perlit/cementit (belo liv.gvožđe); srednja-perlit/grafit; mala-ferit/grafit (siva livena gvožđa)

Sumpor: stvaranje pora, sulfidni eutektikum FeS po granicama zrna smanjuje meh.osobine, Mn izaziva stvaranje MnS nemetalnih uključaka

Fosfor: povećava livkost, u većim % se stvara eutektikum po gramicama zrna što smanjuje meh.osob

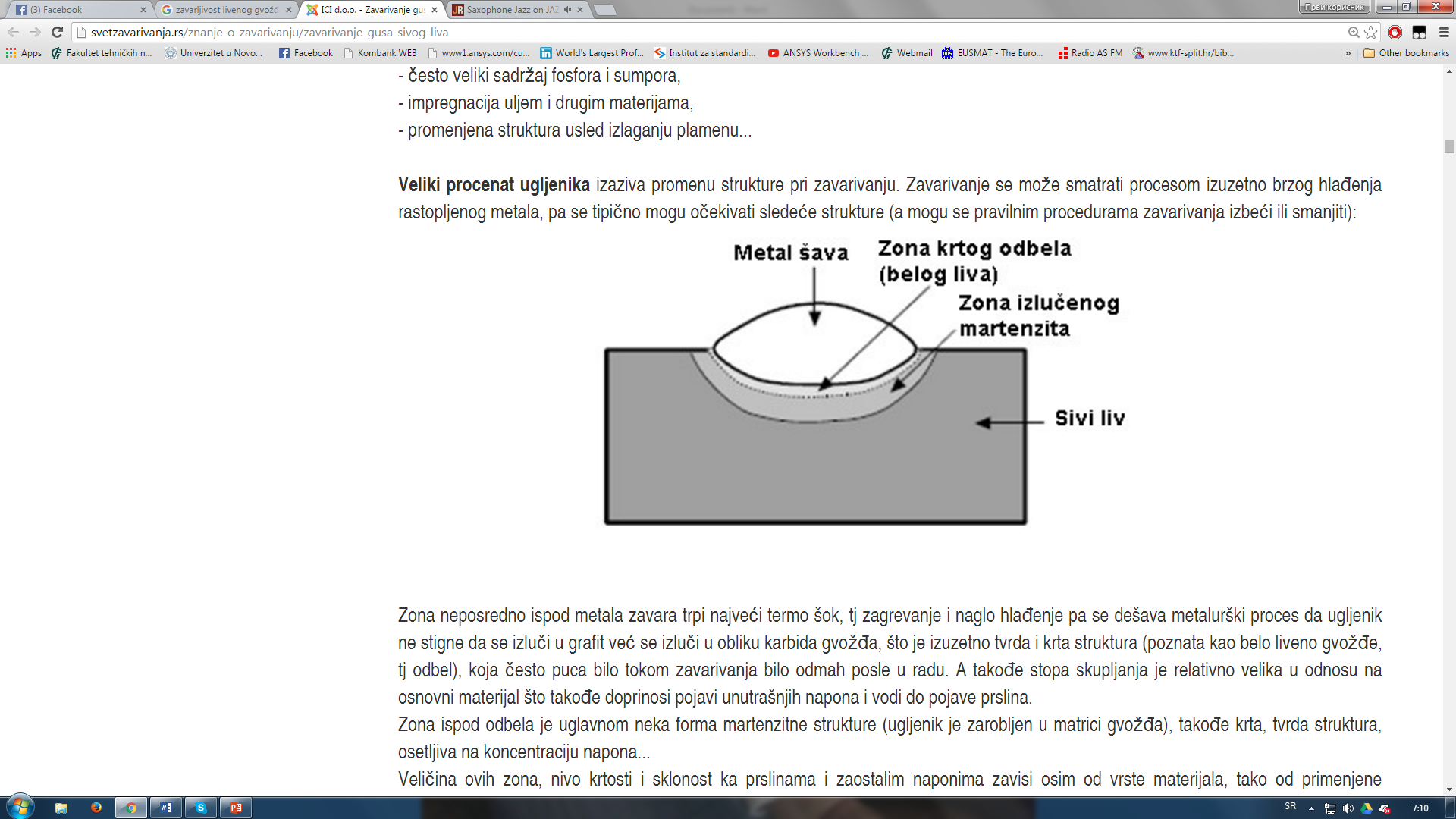
Uticaj poprečnog preseka: što je veći, brzina hlađenja je manja



Nekoliko faktora uslovljava zavarljivost livenih gvožđa:  
- %C i oblik i veličina grafita kao i vrsta metalne osnove,  
- Izuzetno niska žilavost i otpornost na zatezanje i savijanje,  
- često veliki sadržaj fosfora i sumpora,  
- impregnacija uljem i drugim materijama,  
- promena struktura usled izlaganju plamenu...

**Veliki % C**

* Izaziva promenu strukture
* Dolazi do brzog hlađenja rastopljenog metala pa se dobijaju strukture sa slike



Zona neposredno ispod metala zavara trpi najveći termo šok, tj zagrevanje i naglo hlađenje pa se dešava metalurški proces da ugljenik ne stigne da se izluči u grafit već se izluči u obliku karbida gvožđa, što je izuzetno tvrda i krta struktura (poznata kao belo liveno gvožđe, tj odbel), koja često puca bilo tokom zavarivanja bilo odmah posle u radu. A takođe procenat skupljanja je relativno veliki u odnosu na osnovni materijal što takođe doprinosi pojavi unutrašnjih napona i vodi do pojave prslina.  
Zona ispod odbela je uglavnom neka forma martenzitne strukture (ugljenik je zarobljen u rešetki železa), takođe krta, tvrda struktura, osetljiva na koncentraciju napona...  
Veličina ovih zona, nivo krtosti i sklonost ka prslinama i zaostalim naponima zavisi osim od vrste materijala, tako od primenjene procedure zavarivanja, što će reći, pravilnom procedurom se opasnost od ovih struktura može smanjiti i izbeći.  
Treba dodati da ponekad deo ugljenika može oksidirati i postati CO2 gas koji počinje da „kuva“ metal zavara, i koji nekad prouzrokuje poroznost u metalu šava.

REŠENJE: kompletno predgrevanje dela (toplo zavarivanje) ili vrlo malo zagrevanje (kontrolisano hladno zavarivanje).

**Veliki sadržaj fosfora** izaziva stvaranje tvrdih metalnih jedinjenja sa gvožđem i ugljenikom stvarajući tvrde i krte strukture tipa belog liva. U slučaju ulaska u metal šava, mogu izazvati pojavu toplih prslina. Jedan od primera za ovakvu strukturu su ploče šporeta smederevca.  
  
Delovi motora i kućišta mogu da **popiju ulje ili pokupili razne nečistoće**, .

REŠENJE treba preduzeti mere da se izvuče deo nečistoća na površinu ili da se sagore grejanjem (uz recimo prethodnim premazivanjem parafinom) ili najčešće korišćeno, tehnikom zavarivanja, tako da se prihvati kao sasvim normalno poroznost u prvom sloju, pa onda obrusiti recimo 70-80 tog prvog sloja, pa ponoviti proceduru nekoliko puta, dok prvi sloj ne postane besporozan.   
  
U slučaju da je deo bio izložen **plamenu, vreloj pari itd. tj. velikim temperaturama**, struktura mu je sigurno promenjena a mehanizam te promene se karikirano može opisati:

1. dolazi do oksidacije grafita i metalne osnove, slabljenja materijala i čak pucanje.
2. ugljenik iz perlitne osnove, usled temperature migrira ka grafitu, taloži se i pravi velika, ogromna grafitna zrna koja dodatno slabe osnovu, a sa odlaskom ugljenika iz perlita, ostaju feritna zrna koja se pod dejstvom toplote takođe ukrupnjavaju, pa dolazi do totalne promene strukture, od perlitno grafitne u feritno grafitnu sa ogromnim lamelama grafita i ogromnim feritnim zrnima i još sva podložna oksidaciji. Mehanička svojstva ovog materijala su izuzetno loša a zbog ogromnih lamela grafita, gotovo je nemoguće vezivanje metala zavara za osnovni materijal. U nekim slučajevima, zavarivanje je nemoguće.

**Zavarivanje obloženom elektrodom**

* Koristi se elektroda sa oblogom na bazi Ni i Cu
* Ne grade karbide sa C
* Zavar ne rastvara ili delimično rastvara C iz OM
* Unos toplote je manji (jer su obloge uglavnom bazično-grafitne tj grafit koji odlično provodi struju omogućava zavarivanje niskim amperažama)
* elektrode uglavnom namenjene za rad na minus polu (tada je uvarivanje, tj mešanje sa osnovnim materijalom manje (za razliku od TIG-a gde je uvarivanje najvece na minus polu) što je praćeno malim unosom toplote)  
  - u poslednje vreme, mnogi proizvođači su osvojili proizvodnju elektroda koje rade na plus polu

**Zavarivanje TIG-om**

Uglavnom se ne primenjuje kao reparaturni postupak

Razlozi:

* argon za razliku od obloge elektrode ne vrši nikakvo čišćenje kontaminiranog liva.
* Unos toplote je veliki zbog sporog vođenja.
* Nema dezoksidatora, pa postoji problem pri višeslojnom zavarivanju.
* Teško je naći odgovarajuće žice, a i kada se nađu nisu ništa jeftinije od elektroda.
* Potrošnja argona dodatno poskupljuje proces.
* TIG-om mogu raditi samo vešti (skupi) majstori, a REL-om može raditi skoro svaki bravar ili priučeni varioc.

Kada je u pitanju popravka gasnih pora, sitnih defekata u proizvodnji, TIG pronalazi svoje mesto.

**MIG/MAG zavarivanje livenog gvožđa**

Primena:

* na „čistom“ materijalu,
* za nodularni liv
* za zavarivanju livenog gvožđa za drugi materijal (npr čelik)
* za navarivanja.

Moguća je primena i punjenih žica. I žice punog preseka i punjene žice su uglavnom na bazi feronikla.

## Zavarivanje prema unosu toplote

Razlikujemo:  
- Zavarivanje na toplo,  
- Zavarivanje na polu toplo,  
- Hladno zavarivanje

**Toplo zavarivanje, istorodnim dodatnim materijalom**

Primena:

* U livnicama
* Reparatura pojedinih skupih delova (npr glava motora lokomotiva, građevinskih mašina, ...).

Kod onih koji su ovladali ovim postupkom, rezultat je bio potpuno uspešna sanacija. Bila je to uobičajena tehnika dok se nije razvilo tzv hladno zavarivanje.  
Preskup i komplikovan postupak.

**Zavarivanje na hladno, raznorodnim dodatnim materijalom**

Najčešće se koriste obložene elektrodama na bazi nikla i feronikla a ponekad i na bazi bakra ili nikl+bakar. Obloge su takve da daju:

* mali unos toplote,
* bore se sa nečistoćama,
* zaptivaju pore u sivom livu, a daju blag prelaz tj. malo mešanje sa osnovnim materijalom i relativno mekanu ZUT.

Prednosti:

* izostanak reakcije sa ugljenikom,
* mehaničke osobine koje su iste ili veće od onih kod sivog liva, a sigurno mnogo veće plastičnosti

Zavarivanje se vrši na hladno, bez predgrevanja, ili sa predgrevanjem do 200-300C.

**REL zavarivanje sivog liva**

Elektrode na bazi Ni i NiFe mogu da rade na svim REL / E aparatima

**POSTUPAK**:

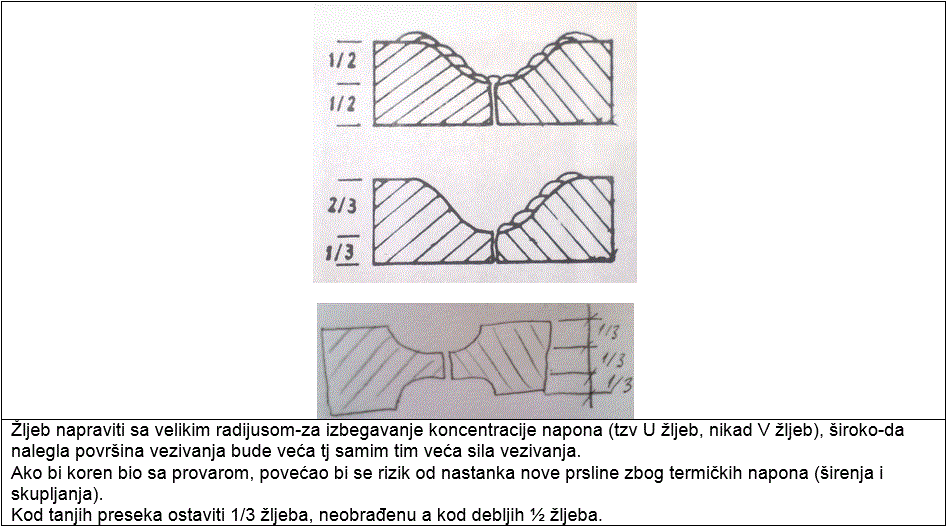
1. Indetifikacija livenog gvožđa

Ponekad je teško proceniti od čega je deo. Postoje razne preporuke, prema varnici, prema ostatku grafita na rukama posle turpijanja... Ili recimo TIG om prineti luk na malu ivicu ili ćošak, pa potom probati turpijom. Ako se teško turpija, verovatno je liveno gvožđe. Ili to isto, naneti kratku gusenicu bazičnom elektrodom ili CO2 žicom.

1. Izbor postupka zavarivanja

Preporučeni postupak je E. Već je objašnjeno da su suštinski sastojci za uspešno zavarivanje sivog liva u oblozi. Svi metali (čelik, nikl, feronikl, bakar...) su „gušći“ tj. daju strukturu koja je neporozna i kompaktnija od sivog liva koji je po prirodi mikroporozan i u sebi sadrži razne nečistoće koje pogoršavaju zavarljivost, tako da se u oblogama elektroda nalaze sastojci za uspešno zavarivanje. Elektrode su tako konstruisane da daju minimalni unos toplote a time se smanjuju ili izbegavaju štetne strukture u ZUT-u. Elektrode mogu raditi na bilo kom REL aparatu uključujući AC trafoe.  
Oko 80% svih zavarivanja sivog liva danas je REL postupkom.

1. **Priprema žljeba:**



1. Tretiranje krajeva prsline:

Zabušivanjem otvora (nežno, sa malim unosom toplote za izbegavanje stvaranja novih mikroprslina), blokiranje prsline mostovima (20-40 mm ukupne dužine)... Ako se desi da jedan most pukne, proveriti kuda se prslina dalje širi i gde joj je kraj, pa napraviti novi most. Neki rade obe stvari, i mostove i zabušivanje otvora.

1. Grejanje:

Ako se odlući za hladno zavarivanje, sa međuprolazima od oko 60C, na samom početku je poželjno grejanjem na 100C odstraniti vlagu, a po potrebi i više da se spali ulje iz površinskih pora sivog liva.

1. Izbor elektrode

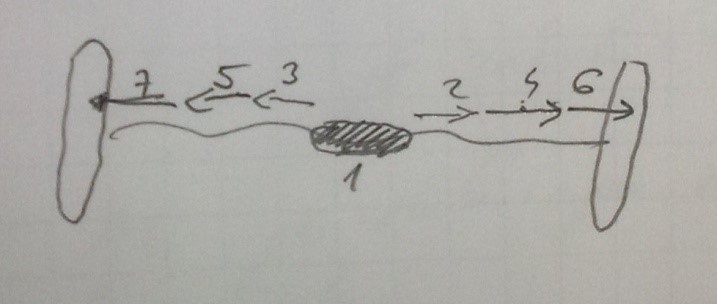
Koristiti samo proverene dobre elektrode, u skladu sa konkretnim problemom i tehnološkim postupkom. Najčešće se zbog malog unosa toplote, kao prvi sloj koristi prečnik 2.5 mm sa što je moguće manjom strujom. Preporuka je početi sa 60A na srednje debelim zidovima. Polaritet prema preporuci proizvođača

1. Pripoji i fiksiranje u stegama i alatima:

Pošto žljeb nije napravljen celim presekom već je ostalo malo za naleganje, lako je sklopiti u celinu deo od nekoliko parčića (ako je slučaj takav). Raznim stegama se može fiksirati ceo komad.

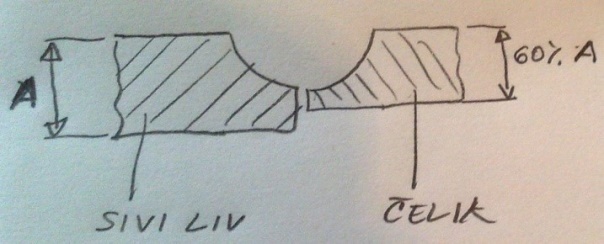
**Izvođenje zavarivanja:**

* Pošto je prslina locirana, oćišćena, žljeb napravljen, zabušeni otvori i/ili napravljeni mostovi, izvršeno fixiranje i pripajanje, može se pristupiti zavarivanju.  
    
  Jedno od rešenja, koje je decenijama opšteprihvaćeni u praksi je tzv „UTP preporuka“ (UTP = Universal Tief Punkt, je proizvođač elektroda iz Nemačke).  
  Radi se na sledeći način, kada u pitanju hladno zavarivanje (i kada je prslina u pitanju):
* Prvi zavar se polaže na sredinu prsline
* elektroda 2.5 mm
* najniža a zadovoljavajuća amperaža (zbog što manjeg unosa toplote).
* Elektroda se vodi vertikalno ili sa malim uglom u odnosu na vertikalu.
* Dužina gusenice max 10 x jezgro elektrode, najčešće oko 15 mm.
* Polaže se tanak sloj, maximalne širine 2 x jezgro elektrode (ako je elektroda 2.5 mm, znači težiti da širina gusenice bude oko 5-6 mm).
* Luk što kraći. Pravilno ugasiti luk, npr popuniti završni krater pa vratiti prema nazad
* Skinuti šljaku i iskovati pažljivo.   
  Staviti goli dlan na komad, i narednu gusenicu naneti tek kada dlan može da dodiruje mesto zavarivanja. Temperatura dlana je oko 36C i recimo da je temperatura na kojoj dlan može da dira metal bez problema oko 60C. Znači, sačekati da se mesto zavarivanja ohladi na 60C.



Redosled polaganja zavara, počevši od sredine ka krajevima.

Ostale gusenice, naneti isto tako kratke (max 10 x jezgro elektrode), ali ih polagati od sredine tj od već položene prve gusenice ka krajevima, kao prema slici, naizmenično, na jednu pa na drugu stranu.   
Luk sada uvek paliti na prethodno položenom zavaru.  
Ako je žljeb dubok, ostale slojeve je moguće, poštujući ista pravila (uraditi elektrodom 3.2 mm, jer će onaj sloj napravljen elektrodom 2.5 mm služiti unekoliko kao termalna barijera (nikl je loš provodnik toplote).  
U slučaju otvorene prsline, tj prsline koja izlazi na kraj dela, zabušiti otvor i/ili uraditi most a zavarivanje izvesti od mosta/zabušenog otvora ka kraju, poželjno kaskadno. Poštovati sve preporuke.   
U slučaju da se jedna prslina uliva u drugu, smer zavarivanja je opet od zabušenog otvora/mosta ka glavnoj prslini.  
  
Čest je slučaj lošeg vezivanja sa sivim livom. Uraditi sledeće: dletom ukloniti porozan var, ili brusilicom / roto glodalom / turpijom odstraniti 75%-80% tog poroznog vara. Sačekati da se ohladi, pa prevariti novi sloj... Ako treba nekoliko puta ponoviti. Na taj način se izvlači ulje i sl iz sivog liva, i površina postaje sve bolja za vezivanje.  
  
Ako postoji velika mreža prslina na jednom mestu (recimo kod bloka motora...), odstraniti ceo komad i staviti čeličnu zakrpu (uvek bolju čeličnu nego od sivog liva. I bolje je i ne gubi se vreme da se nađe sličan komad sivog liva).  
  
Pošto je čvrstoća čelika veća od one od sivog liva, preporuka je da se uzme debljina čelične zakrpe 60-70% od debljine zida sivog liva (zbog različitih fizičko-mehaničkih svojstava...). Težiti da zakrpa ima kružni, elipsasti oblik ili ako mora četvrtasti sa velikim radijusima na ćoškovima.  
Ćoškove uvek zavarivati na kraju.



Čelična zakrpa bi trebalo da je tanja od sivog liva.

Gledati da ukrajanje bude sa što je manjim zazorom samo spajanje sa elektrodom Ni ili NiFe).   
  
Geometriju žljebova napraviti kako je gore opisano (veliki obuhvatni ugao, sa zaobljenjem u dnu...).  
  
Staviti zakrpu na deo (težiti da zazor u korenu bude što manji) i spojeve uraditi u četiri suprotne tačke i postupiti sa njima kako je gore opisano.  
  
Zavarivanje uraditi kao što je opisano, kratkim gusenicama, od ravnih stranica zakrpe ka ćoškovima, iz 4 početne tačke, pa naizmenično u krug. Koristiti sve preporuke (iskivanje, dužina i širina gusenice, hlađenje do 60C...).

Za nepropusne spojeve, je od suštinske važnosti uraditi široke žljebove, i obezbediti perfektno vezivanje sa sivim livom. Dalje koristiti elektrode dokazane za ovu namenu. Vođenje elektrode je ponekad spiralno ili sa vraćanjem, radi boljeg vezivanja. Po potrebi preliti bilo posebnim mekim lemom ili tvrdim lemom ili zaptivnim fluidom.

Vežba 7: Zavarljivost bakra

Zavarljivost bakra i većine njegovih legura je uglavnom dobra

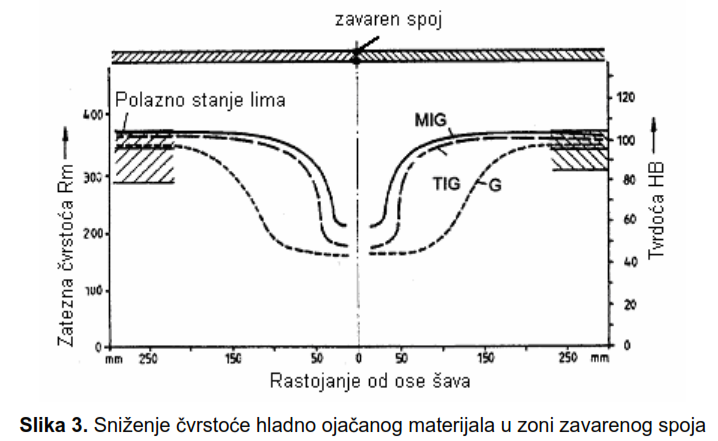
* Problemi:
* **Velika toplotna provodljivost**-brzo odvođenje toplote, otežano topljenje i dezoksidacija/odvođenje gasova (nedovoljno stapanje i poroznost)
* **Koef. toplotnog širenja je velik**-problem sa širinom korena šava
* **Cu-O iz šava može biti prisutan po granicama zrna** –kod elektrolitičkog bakra.

**Glavni problemi zavarenog spoja bakarnih materijala** :

1. **snižena čvrstoća u ZUT** rekristalizacijom hladno ojačanog materijala;
2. **pojava hladnih i vrućih prslina u metalu šava i ZUT**, usled nastanka krtosti, segregacija, hemijskih procesa i naponskih stanja;
3. **pojava poroznosti u metalu šava i ZUT**, kao posledice prisustva oksida i vodonika, ili isparavanja legirajućeg elementa niže tačke topljenja;
4. **pojava nespojenosti, deformacija i vitoperenja**, kao posledice velike toplotne provodljivosti.

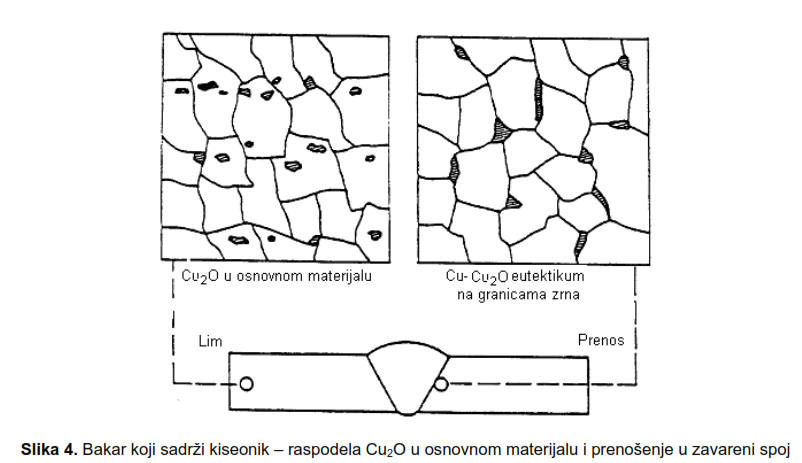
**Sniženje čvrstoće**

Kod hladno ojačanog materijala dolazi do rekristalizacije u ZUT i time do sniženja čvrstoće koje se pri konstruisanju mora uzeti u obzir. Izborom postupka zavarivanja širina zone rekristalizacije se može umanjiti, ali ne i izbeći.



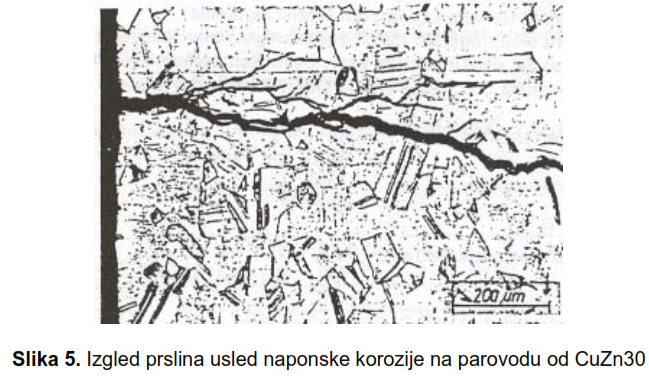
**Prsline usled krtosti**

Normalno, kod bezkiseoničnog bakra nema opasnosti od krtog loma. Kod bakra koji sadrži kiseonik, usled stvaranja eutektikuma Cu - Cu2O i njegovog izdvajanja po granicama zrna, kod zavarivanja dolazi do krtosti. Zato vrste kiseoničnog Cu po mogućnosti ne treba zavarivati (sl. 4).



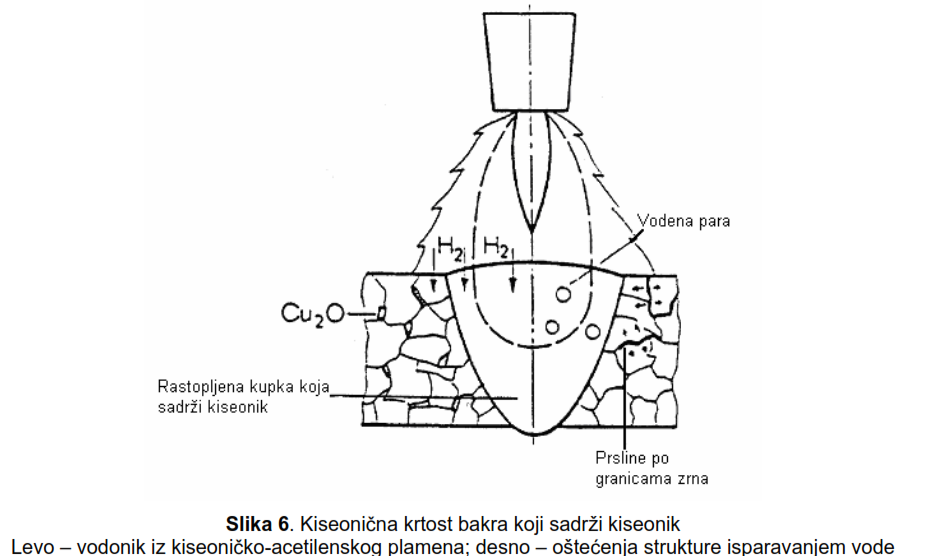
**Prsline usled hemijskih uticaja**

Za rastvaranje čvrsto prijanjajućeg oksidnog sloja, koji se stvara na vazduhu na površini bakra, mora se kod gasnog zavarivanja uvek, a često i kod TIG zavarivanja upotrebiti topitelj. Ostatak topitelja se mora detaljno ukloniti, da ne bi uzrokovao nastanak korozije.



**Pore**

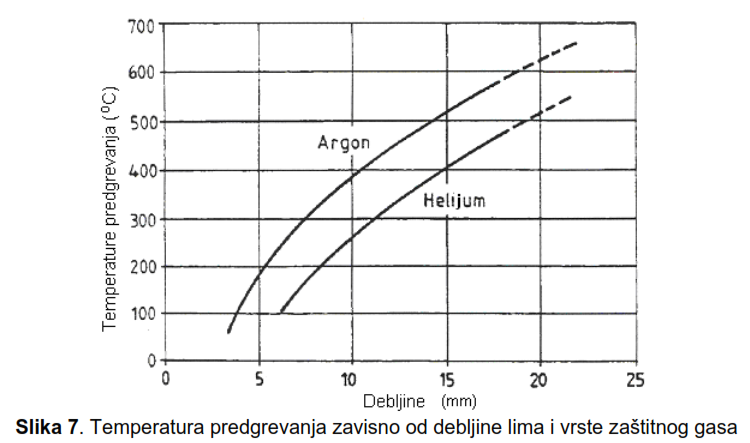
Posebno kod zavarivanja čistog bakra, pore nastaju ulaskom kiseonika i vodonika u zavarivačku kupku, i nastajanjem zarobljene i pod pritiskom vodene pare (sl.6).



Sniženje i eliminacija slobodnog kiseonika se postiže njegovim vezivanjem preko dodatnog materijala koji sadrži dezoksidante. Uvođenje vodonika može se umanjiti ako se u pripremi za zavarivanje što je više moguće izvrši čišćenje i sušenje. Za smanjenje jakog upijanja gasova koje nastaje kod pregrejane kupke, kod zavarivanja većih delova treba praviti pauze da bi se radna temperatura što više smanjila.

**Nespojenosti i deformacije**

Zbog visoke toplotne provodljivosti Cu i time jakog odvođenja toplote pri zavarivanju, da bi se materijal mogao pretopiti potreban je veliki unos toplote. Zato je preporučivo predgrevanje, počev od 6-8 mm debljine (sl. 7). Visoka toplotna provodljivost, toplotno izduženje i vitoperenje dovode do jakog oštećenja i kidanja pripoja i pomeranja stranica žleba. Navedeni problemi se pojačano sreću kod čistog bakra, dok su manje izraženi kod legura.



Osnovni postupci zavarivanja:

1. Gasno
2. REL/E (obloženom elektrodom)
3. TIG
4. MIG

POSTUPCI ZAVARIVANJA U ZAŠTITI GASA

Primena postupka u zaštiti gasa obezbeđuje:

* Smanjenje oksidacije (nema potrebe za korišćenjem topitelja)
* Čisti uslovi zavarivanja
* Manja poroznost šava
* Manje uljučaka troske

Osim konvencionalnog TIG i MIG postupka, u novije vreme primenjuju se tehnike:

* TIG sa pulsirajućom strujom;
* Plazma postupak;
* MIG postupak sa tankom žicom;
* MIG postupak sa pulsirajućom strujom.

ZAŠTITNI GASOVI

* Argon
* Helijum
* Azot

U klasama kvaliteta za zavarivanje su bez kiseonika i vlage

Cilj korišćenja gasne mešavine:

* Smanjenje temperature predgrevanja
* Povećanje uvarivanja
* Povećanje brzine zavarivanja itd

Mešani gas Ar+15-20% N2 kod TIG i MIG deluje na snagu luka a kod MIG zavarivanja dejstvom luka na topljenje utiče na izgled lica šava.

Ako se doda N više od 30% u argon kod MIG zavarivanja razara uslove prenosa kapi u mlazu.

**DODATNI MATERIJALI**

Dodatni materijali za E zavarivanje

Dodatni materijali za E zavarivanje Cu i Cu legura sadrže legirajuće elemente koji snižavaju tačku topljenja i time smanjuju zarobljavanje gasa u metalu šava. Koriste se tipovi legura: S-CuAg( AG do 1%), S-CuSn, S-CUSn6, S-CuSn12, S-CuZn40Si, S-CuZn39Ag, S-CuZn39Sn, S-CuNi10Fe (DIN 1733-1)

Dodatni materijali za gasno zavarivanje i zavarivanje u zaštiti gasa

Visoko provodljive klase bakra i neke njegove legure moguće je zavarivati bez dodatnog materijala pažljivom primenom zaštitnog gasa na površini lica i korena šava zbog sprečavanja zaprljanosti iz atmosfere, ili zbog postizanja dezoksidirajućih karakteristika, kao na primer kod aluminijumskih bronzi.

Uopšte, generalno je poželjno koristiti dodatne materijale specijalno namenjene za zavarivanje u zaštiti gasa. Kada je moguće, dodatni materijal treba birati tako da bude što bliži po hemijskom sastavu i mehaničkim osobinama sa osnovnim materijalom. Dodatni materijali moraju biti jako čisti zbog sprečavanja zaprljanosti, a kod MIG zavarivanja i da se obezbedi dobar električni kontakt sa kontaktorskom cevi pištolja za zavarivanje.

**OBLIKOVANJE SPOJA I PRIPREMA**

Priprema ivica bira se za svaki spoj posebno, zavisno od sledećih faktora:

1. legure;

2. debljine spoja;

3. postupka zavarivanja;

4. položaja zavarivanja i pristupačnosti spoja;

5. tipa spoja, sučeoni ili ugaoni;

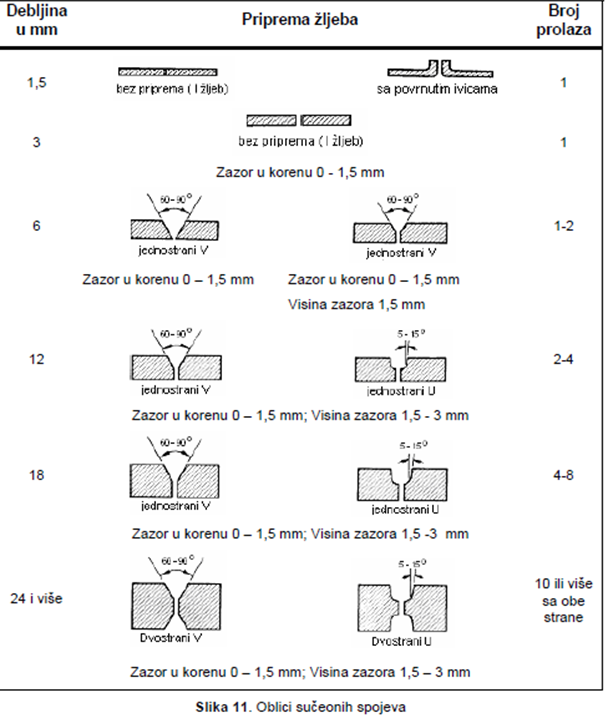
6. kada se javlja krivljenje (distorzija) i kada se zahteva kontrola;

7. zahtevane kontrole profila uvarivanja zavara;

8. sa ekonomskog aspekta potrošnje dodatnog materijala i gubitka metala pri pripremi ivica. Zato nije moguće generalno specificirati preciznu konfiguraciju spoja za svake okolnosti.

**Čišćenje pre zavarivanja i između slojeva**

Čišćenjem pre zavarivanja moraju se ukloniti svi tragovi oksida, prljavštine i masnoće. Obično je dovoljno četkanje površine zavarivanja četkom od bronzane žice, sve dok se ne pojavi čist metal, praćeno odmašćivanjem naftom ili alkoholom. Posle svakog prolaza neophodno je četkanje radi uklanjanja oksidnog filma stvorenog prilikom zavarivanja.



**Tehnike pritezanja i podloške**

Cilj ovih operacija je da se obezbedi sigurno pozicioniranje delova koji treba da budu spojeni, i da spreči preveliko krivljenje prilikom zavarivanja, i da se obezbedi kontrola provara korenog zavara. Oblik trna stezača zavisiće od zahteva predgrevanja, debljine i tipa spoja. Podloške mogu biti od:

* bakra (U slučaju kada je korena strana spoja pristupačna,
* nerđajućeg čelika a čije stapanje se sprečava nanošenjem obloge
* mekog čelika od koloidnog grafita ili odgovarajućih jedinjenja.)
* keramike Keramičke podloške, koje se koriste zajedno sa metalnom, smanjenjem brzine odvođenja toplote iz zone spoja obezbeđuju ravnomerni provar.
* integralne metalne podloške (Kada je ograničena pristupačnost, one se izrađuju od materijala namenjenog za stapanje u šav, tako da postaju integralni deo spoja

Pripoji obezbeđuju korektnu saosnost spoja i zazora u korenu i treba da budu izvedeni na isti način kao i glavni šav, tj. sa korektnom ispunom, temperaturom predgrevanja itd. Pripoji moraju da budu očišćeni kako bi se omogućilo potpuno stapanje prvog sloja zavara glavnog šava.

Za odgovarajuće pozicioniranje zazora korena, posebno kod dugačkih kružnih i podužnih šavova, koriste se pokretne stege, koje se mogu pomerati duž spoja kako napreduje zavarivanje.

**Temperatura predgrevanja i međuslojna temperatura**

kada se bakar zavaruje u zaštiti argona, mnogo je komplikovanije stvaranje i održavanje tečljive zavarivačke kupke bez predgrevanja, posebno kod većih debljina materijala. Korišćenjem gasnih mešavina argon-helijum, argon-azot ili čisti helijum ili azot umesto argona, može se značajno smanjiti temperatura predgrevanja.

Slično, međuslojne temperature moraju biti ograničene, i ako je potrebno, posle svakog sloja treba omogućiti potrebno vreme da se zona zavarivanja ohladi, kako bi se sprečilo preterano zagrevanje.

Razlog kontrolisanja međuslojne temperature je što većina legura bakra gubi plastičnost u području 400°C do 700°C. Zato, gde god je to moguće, zagrevanje treba svesti na lokalizovanu zonu, i samnjiti držanje materijala u kritičnom temperaturnom opsegu.

**Parametri zavarivanja**

Stvarni uslovi zavarivanja moraju se odrediti eksperimentalno za svaki spoj. Opšta radna pravila pri zavarivanju topljenjem bakarnih materijala

* Skladištenje i rad sa Cu materijalima odvojiti od drugih metala zbog rizika od korozije.
* Koristiti odvojene alate za Cu i čelik.
* Površine žljeba i bliska okolina (oko 50mm sa obe strane šava) moraju biti čiste i suve zbog rizika od pora u šavu.
* Zbog velikih gubitaka toplote mora se primeniti bilo predgrevanje, bilo zavarivanje većim jačinama struje ili istovremeno oboje.
* Zbog velikih termičkih dilatacija postoji rizik od krivljenja, zbog toga je potrebna posebna priprema spoja i određeni redosled zavarivanja.
* Kod TIG zavarivanja, u cilju uklanjanja oksida i njihovog ponovnog nastajanja, treba koristiti i topitelje.
* Tokom zagrevanja Cu materijala stvara se značajno obojenje. Česti su i prelazi čvrsto/tečno.

Zato je teško ostvariti zavarivačku kupku, odnosno postići zahtevani oblik šava.

**Vežba 8: Lemljenje bakra i legura bakra**

Primenjuje se kada zavarivanje ne dolazi u obzir

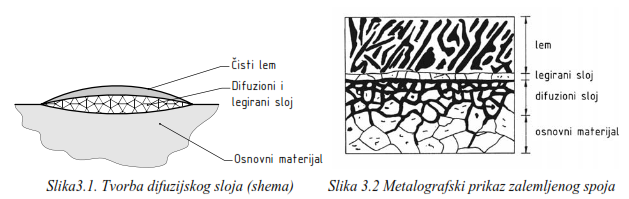
**MEKO LEMLJENJE BAKRA**

Postupak spajanja metala pri relativno niskoj tački topljenja lema.

Spajanje lemljenjem se temelji na adhezionim vezama lema i OM.

Adhezione sile su na nivou atoma

Veličina difuzionog sloja: od nekoliko μm-1mm.

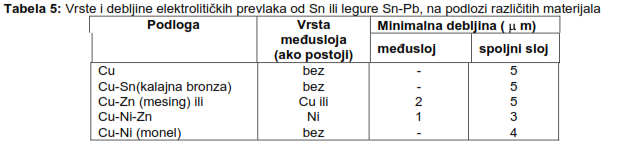


**Primena:**

Elektronska industrija (lemljenje provodnika i štampanih kola)

Priprema: obavezna pre lemljenja –mehaničko, hemijsko i elektrohemijsko čišćenje površine.

Pripremljena površina mora biti sveža- presvlači se sa Sn ili Sn-Pb debljine 4-8 μm. Presvlake se nanose galvanskim ili toplim postupkom (lemljivost do 18 meseci)



**Izbor lema:**

Lemovi na bazi Sn 50-63%Sn

Lemovi sa nižim sadržajem Sn i sa drugim LE u kojima je mala rastvorivost bakra:

* -L-PbCd17,5
* -L-PbSn12SbBi5

Mehanizovano lemljenje potapanjem:

* L-Sn63Pb
* L-Sn60Pb

Uz topitelje F-SW 31 do F-SW 34 (DIN 8511 deo 2)

\*Zadovoljavaju najviše zahteve dobre lemljivosti ( kratko vreme i nisku temperaturu lemljenja.

Lemljenje delova na tanke bakarne prevlake (štampane ploče)

* L-Sn60PbCu.

Meki lemovi sa izrazito niskim električnim otporom

* S-Sn60Pb36Ag4
* S-Sn50Pb32Cd18

Po standardu ISO 9453

**Izbor topitelja**

Zavisi od prethodne pripreme površine i mogućnosti naknadnog čišćenja ostatka topitelja nakon lemljenja.

Kad je moguće jednostavno pranje delova nakon lemljenja koriste se agresivni topitelji:

* F-SW11 do F-SW13
* F-SW21 do F-SW28

\*u ovom slučaju zahtevi za prethodnom pripremom nisu visoki.

Na mestima gde čišćenje ostatka topitelja nije izvodljivo, ostaci topitelja koroziono utiču na OM:

* F-SW31 do F-SW32

Na bazi kalofonijuma rastvorenog u alkoholima, ketonima i eterima.

Topitelji se nanose na mesto spoja direktno na površinu lemljenja pre i za vreme lemljenja ili zajedno sa lemom (lem u obliku punjene žice ili paste praktično pomešan sa topiteljem.

**TVRDO LEMLJENJE BAKRA**

Vrlo uspešan postupak.

Problem je kod gabaritnih delova velike mase kao i kad se spaja sa delovima od materijala znatno lošije toplotne provodljivosti i malog toplotnog izduženja.

Preporuke:

\*Lemljenje u pećima sa zaštitnim gasom ili u vakumu (obezbedi se const. temperatura duž celog spoja i ravnomerno zagrevanje mat. po celom preseku, što obezbeđuje ravnomerno izduženje mat, kao i kontrolisano hlađenje nakon lemljenja.

\*Za delove velikih gabarita, ako na raspolaganju nema odgov veličina peći koristiti lemljenje gasnim plamenom sa više gorionika koji ravnomerno zagrevaju ceo spoj.

\*U slučaju spajanja sa delovima od materijala znatno lošije toplotne provodljivosti primenjuje se **postupak lemljenja u bloku**, izmeću zagrejanih bakarnih ploča (tako se eleminiše pregrevanje delova od materijala lošije toplotne provodljivosti i omogućava ravnomerno razlivanje lema po površinama lemljenja elemenata spoja.

Pri izboru postupka uzeti u obzir:

Kvalitet bakra (OM) u odnosu na sadržaj kiseonika

* Ako je O>0,02% i zagrevanje u atmosferi bogatoj H (plamen ili redukujući zaštitni gas) može doći do pojave vodonične bolesti (prsline, poroznost, korozija). (veličina oštećenja zavisi od Tt lemljenja). Zato se kod lemljenja bakra i legura bakra sa negarantovano niskim sadržajem kiseonika primenjuje indukcioni postupak (kratko vreme lemljenja)ili lemljenje u vakumskim pećima.
* Nedezoksidirani bakar ipak može da se lemi i plamenom, ali lem mora da ima nisku Tt (npr. L-Ag40Cd), gorionik mora da bude dovoljno velik (da se što pre dostigne Tt lema). Kod delova velike mase preporučuje se zagrevanje acetilensko-kiseoničkim plamenom. Upotrebom dezoksidisanog bakra (SE-Cu, SW-Cu, SF-Cu) vodonična bolest ne nastaje bez obzira na primenjen postupak lemljenja.

**Izbor lema**

Koriste se lemovi sa Tt<950 oC. Zbog visoke toplotne provodljivosti i sklonosti bakra ka porastu zrna preporuka je: lemovi sa Tt= 610-750 oC.

Lemljeni spojevi u odnosu na OM imaju:

* Manju korozivnu otpornost prema hemijskim agensima
* Metalurška struktura spoja je krupnija i dendritske građe.

Najznačajniji lemovi koji se koriste:

* L-CuP6
* L-CuP8
* L-Ag2P
* L-Ag15P.

Upotreba: bez zaštitne atmosfere i bez topitelja

Pri lemljenju se dodatni materijal ne sme direktno izlagati plamenu, da ne nastane prebrzo sagorevanje fosfora, te da rastop ne ostane bez zaštite.

Primena:

* u slučajevima kada je isključena upotreba topitelja,
* zbog nemogućnosti uklanjanja ostatka nakon lemljenja,
* zbog niske cene i jednostavnosti u rukovanju.

**Nedostatak** im je što su spojevi manje ili više **krti**. Ne upotrebljavaju se za spojeve koji mogu da dođu u dodir sa sumporom, koji hemijski reaguje sa fosforom i razara spoj.

Primenom fosfornih lemova sa dodatkom srebra dobijaju se manje krti spojevi, odnosno spojevi boljih mehaničkih osobina.

Lemovi na bazi Cu-Ag-P (DIN 8513, deo 2) se koriste za spojeve delova izloženih većim opterećenjima ili termičkim naprezanjima usled temperaturskih promena.

Uz upotrebu topitelja bakar se uspešno lemi sa lemovima na bazi srebra sa sadržajem cinka, kadmijuma, kalaja ili nikla (DIN 8513,deo 3).

Odgovorni delovi od bakra, delovi sa bakarnim prevlakama, kao i kombinacije bakar-čelik, leme se u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu sa lemom L-Ag72, ili lemovima koji sadrže druge plemenite metale, ali ne i cink, odnosno kadmijum. U vakuumu tanki oksidni slojevi na bakarnim delovima sublimiraju i ostavljaju čist osnovni materijal, pri čemu srednja temperatura isparavanja bakaroksida zavisi od veličine vakuuma.

Lemljeni spojevi, u odnosu na osnovni materijal, imaju manju korozionu otpornost prema raznim hemijskim sredstvima. Metalurška struktura spoja je krupnija i dendritske građe, pa time i nepovoljnija u odnosu na strukturu osnovnog materijala.

**LEMLJENJE LEGURA BAKRA**

Lemljivost bakarnih legura pri istim uslovima je lošija od lemljivosti čistog bakra i pogoršava se sa povećanjem sadržaja legirajućih elemenata. Ukoliko sadržaj legirajućih elemenata nije veći od 5%, a u legiranju ne učestvuju Si, Al, Mn, Cr i Be, lemljivost je neznatno lošija.

Ograničenja u izboru lemova su naročito uočljiva kod mekog lemljenja, pri zahtevanim nižim temperaturama, kraćem vremenu lemljenja i sa topiteljima tipa F-SW31 do F-SW34. Da bi se poboljšala lemljivost uz primenu standardnih lemova, (primer u elektronici za primenu CuSn6, CuZn30 ili CuZn37) na površine se prethodno nanosi sloj lema L-Sn60Pb, postupkom karatkotrajnog uranjanja u rastop (uz topitelje F-SW31 do F-SW34 trajanje postupka je oko 3 s) ili se nanosi galvanska prevlaka.

**Legure Cu-Zn**

Kod lemljenja legura Cu-Zn (mesinzi), cink iz osnovnog materijala difunduje ka zagrejanoj površini i smanjuje lemljivost. Za poboljšanje lemljivosti na površine lemljenja se nanosi galvanska prevlaka bakra, nikla ili nikl-kalaja, čija je uloga da spreči difuziju cinka u lem. Mesinzi sa dodatkom aluminijuma (CuZn37Al1; CuZn40Al1; CuZn40Al2), u međusobnom spoju ili u spoju sa drugim neželeznim materijalima, uspešno se leme lemovima na bazi srebra sa nižom tačkom topljenja, pri čemu se dobijaju kvalitetni spojevi otporni na udarna opterećenja. Spajanjem ove vrste mesinga sa čelikom nastaju krta jedinjenja aluminijuma i železa (železoaluminidi), pa je spoj osetljiv na udare. U tom slučaju preporučuje se pre lemljenja nanošenje na čelične elemente prevlake od nikla, pri čemu nikl predstavlja difuzionu branu.

Za specijalne mesinge sa sadržajem aluminijuma (uslovi korišćenja za morsku vodu) koriste se Ag lemovi sa sadržajem nikla (L-Ag50CdNi; L-Ag49; L-Ag56InNi). Cu-Zn legure sa sadržajem cinka > 37%, kao i fosfor i silcijum bronze, pri lemljenju su sklone toplim prslinama.

**Legure Cu-Sn**

Za legure Cu-Sn (bronze), za dobru lemljivost kod mekog lemljenja uranjanjem preporučuje se prethodno kalaisanje. Aluminijumske bronze, i pored primene specijalnih topitelja, imaju loše kvašenje. Za meko lemljenje preporučuju se lemovi L-SnAg5 i L-CdAg5.

Vežba 9: Zavarljivost aluminijuma

PCK Ttoplj=660oC

Posebno značajne osobine za primenu

* dobra livkost;
* dobra električna i toplotna provodljivost;
* dobra zavarljivost i lemljivost;
* dobra sposobnost oblikovanja;
* zadovoljavajuća koroziona otpornost;
* dobri dekorativni efekti.

Niska čvrstoća

Povećanje čvrstoće je moguće:

* legiranjem;
* hladnom deformacijom;
* termičkom obradom, i
* kombinacijom ovih mogućnosti**.**

Al materijali su većinom legure aluminijuma sa jednim ili više od glavnih pet legirajućih elemenata: **Cu, Si, Mg, Zn, i Mn** i manjim učešćem **Fe, Cr, Ti.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Al | Cu | Mn | Si | Mg | Mg, Si | Zn | drugo |
| 1xxx | 2xxx | 3xxx | 4xxx | 5xxx | 6xxx | 7xxx | 8xxx |

**KOROZIJA**

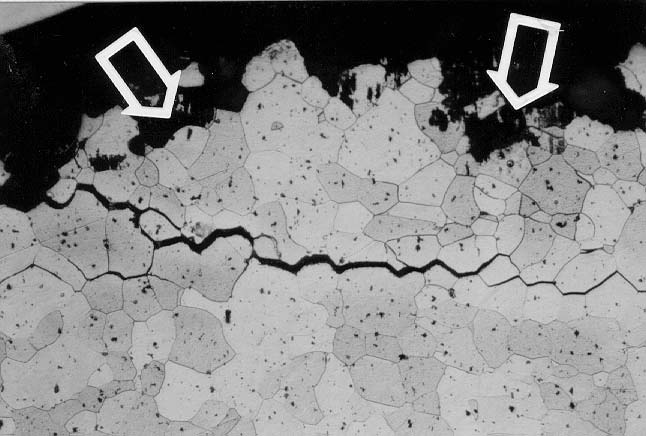
Aluminijum je pokriven gustim, čvrsto prijanjajućim **slojem oksida Al2O3** koji je zaštita postojanosti protiv korozije.

**Što je aluminijum veće čistoće, to je i koroziona postojanost bolja.**

Najčešći oblici korozije koji se javljaju kod Al:

* Naponska korozija

Kretanje prslina usled naponske korozije kod aluminijumskih materijala je uvek interkristalno. One se rasprostiru kroz taloge, naročito međusobno povezane taloge na granicama zrna. **Sklonost ka prslinama usled naponske korozije imaju legure: AlZnMg, AlZnMgCu, AlCuMg, AlMg5.**



Zaostali naponi

* **Interkristalna**

Interkristalna korozija je prisutna kod postojanja povezanih taloga po granicama zrna koji su manje plemeniti od mešanih kristala.

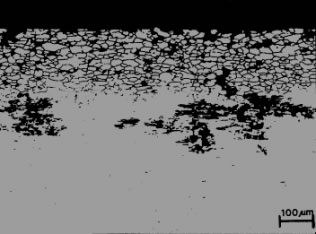
Razgraničenje između interkristalne korozije i prslina usled naponske korozije nije uvek potpuno jednoznačno.

Sklonost ka interkristalnoj koroziji imaju legure: AlCuMg kod polaganijeg hlađenja;

AlMg sa većim Mg sadržajem (AlMg5);

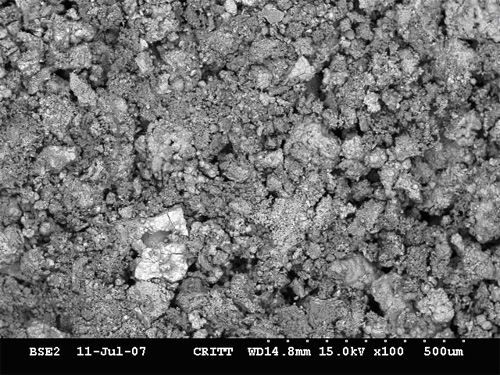
AlMgSi, samo kod presićenosti na Si;

AlZnMg samo kod povišenog Zn i Mg sadržaja, ali ne AlZnMg1.



* **Slojevita korozija**

**Ovaj oblik korozije se posebno sreće u zavarenom spoju legure AlZn4,5Mg1.** Osnovni materijal pored šava razara se lisnato-slojevito. Razlozi su postojanje niza segregacija i izlučevina po granicama zrna.

KOROZIONA OTPORNOST ZAVARENOG SPOJA

Kod **zavarenih spojeva od čistog aluminijuma i termički neobradivih legura**, koroziona otpornost je blago smanjena.

**Kod materijala sa većim sadržajem Mg** (>3,5% Mg), **može se zapaziti da, iako nema strukturnih promena koje utiču na smanjenje korozione otpornosti, do toga dolazi usled unosa toplote pri zavarivanju**.

Promene ovog tipa ne treba očekivati pri uobičajenom procesu zavarivanja, jer su za to potrebna relativno duga vremena žarenja u kritičnom temperaturnom intervalu.

Kod mnoštva termički obradivih legura aluminijuma, **najveća otpornost prema prslinama usled naponske korozije zapaža se kod primene veštačkog starenja ili čak kod prestarevanja.**

**Koroziona otpornost ovih legura u ZUT se umanjuje sa količinom unošene toplote tokom zavarivanja**.

Pogoršanje korozione otpornosti se može dalje dešavati pri razlici potencijala između osnovnog i dodatnog materijala.

ZAVARLJIVOST Al LEGURA

**Postupci:**

* **MIG**
* **TIG**
* **elektronski snop**
* **elektrootporno**
* **laserom**
* **trenjem**
* **ultrazvučno**
* **difuziono.**

**Osobine legura Al važnih za zavarljivost:**

1. Visoka topl.provodljivost-potrebna velika količina toplote

2. Širok interval topljenja-sklonost ka vrućim prslinama

3. Veliko toplotno širenje-sklonost ka hladnim prslinama i pojavi poroznost

4. Velika rastvorljivost vodonika u tečnoj fazi koja se tokom očvršćavanja jako smanjuje-opasnost od zarobljavanja gasova, potrebna degazacija (čišćenje, odstranjivanje štetnih elemenata)

5. Veliki afinitet prema kiseoniku-stvaraju se oksidi Al2O3 (pre i tokom zavarivanja-krti nemetalni uključci, a ako je loša atmosfera, javlja se opna koja zaustavlja degazaciju)

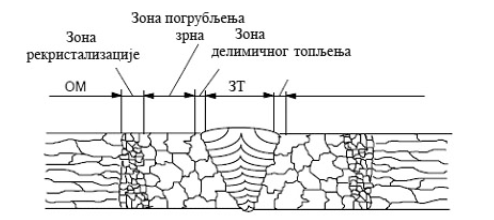
**Problemi:**

**Sklonost ka obrazovanju prslina**

**Obrazovanje pora u šavu**

**Obrazovanje oksida Al2O3 (Tt=2030)**

**Naponska korozija**



Kao rezultat termičkog ciklusa pri procesu zavarivanja zavaren spoj karakterišu međusobno metalurški različita područja:

**- Područje metala šava (MŠ),** nastalo očvrščavanjem zavarivačke kupke i delimično pretopljenog osnovnog materijala, čije osobine zavise od legure dodatnog materijala, legura nastalih mešanjem dodatnog i osnovnog materijala, i načina njihove kristalizacije (očvršćavanja).

**- Područje uticaja toplote pri zavarivanju na osnovni materijala (ZUT)**, čija širina zavisi od količine unete toplote, a osobine od uticaja toplote na promene strukturnog stanja, a time mehaničkih osobina, posebno čvrstoće osnovnog materijala.

Sa stanovišta topljenja, u zoni pretapanja moguće je smanjenje sadržaja legirajućih elemenata niske tačke topljenja. Mera za sprečavanje je primena dodatnog materijala povećane legiranosti sa onim elementima koji odgorevaju (isparavaju). Sa stanovišta očvršćavanja, moguć je nastanak kristalizacionih prslina, a u području delimičnog pretapanja nastanak likvacijskih prslina.

**U zoni uticaja toplote usled zavarivanja (ZUT) uneta toplota tokom zavarivanja dovodi do rastvarajućeg žarenja, rekristalizacije ili oporavljanja ili starenja,** zavisno od materijala i rastojanja od zone stapanja, kao i od količine unete toplote. Kod većine legura posledice su sniženje čvrstoće osnovnog materijala.

**ZAHTEVI ZA ZAVARLJIVOST I ZAVARENE SPOJEVE**

Osnovni zahtev za aluminijumski materijal za zavarivanje je da **ne sme imati sklonost ka nastajanju prslina**.

**Opšti zahtevi za zavareni spoj se odnose na:**

**zahtevanu čvrstoću,**

**potrebnu deformabilnost,**

**dovoljnu korozionu otpornost,**

**i što je moguće bolji efekat obojenosti tokom anodizacije.**

Pore ili uključci se mogu prihvatiti u ograničenom obimu, samo ako se ispoštuju prethodni zahtevi.

**Termički otvrdnuti i hladno ojačani** aluminijumski materijali imaju **opadanje čvrstoće u ZUT.**

Treba reći da opšte priznata pravila za zahtevane vrednosti deformabilnosti još ne postoje.

Često se postavlja zahtev za određenom minimalnom vrednošću izduženja ili savijanja, na šta veoma utiče poroznost. Problem je što se i u šavu i u ZUT deformabilnost oštro menja.

**Svi aliminijumski materijali**, posebno oni sa povišenom čvrstoćom, kod statičkih i dinamičkih naprezanja **su veoma osetljivi na zarez**. Osetljivost na zarez, posebno kod statičkih naprezanja, srazmerno je veća nego kod čelika. **Zato se zarezi u zavarenim konstrukcijama apsolutno moraju izbegavati.**

**OCENA SPOSOBNOSTI ZAVARIVANJA ALUMINIJUMSKIH MATERIJALA**

Sa metalurškog aspekta sposobnost za zavarivanje aluminijumskih materijala se ocenjuje prema:

- osetljivosti ka nastanku vrućih prslina, i sklonosti ka nastajanju drugih grešaka u zavarenom spoju;

- promenama, posebno smanjenju čvrstoće, u ZUT.

**TEHNOLOŠKE MERE ZA POVEĆANJE ZAVARLJIVOSTI**

**Povećanje zavarljivosti, i time obezbeđenje zahtevanih osobina zavarenog spoja se postiže:**

* odgovarajućim tehnološkim rešenjima zavarivanja:
* izborom dodatnog materijala;
* pripremom žljeba spoja;
* primenom predgrevanja, i
* izborom zaštitnog gasa.

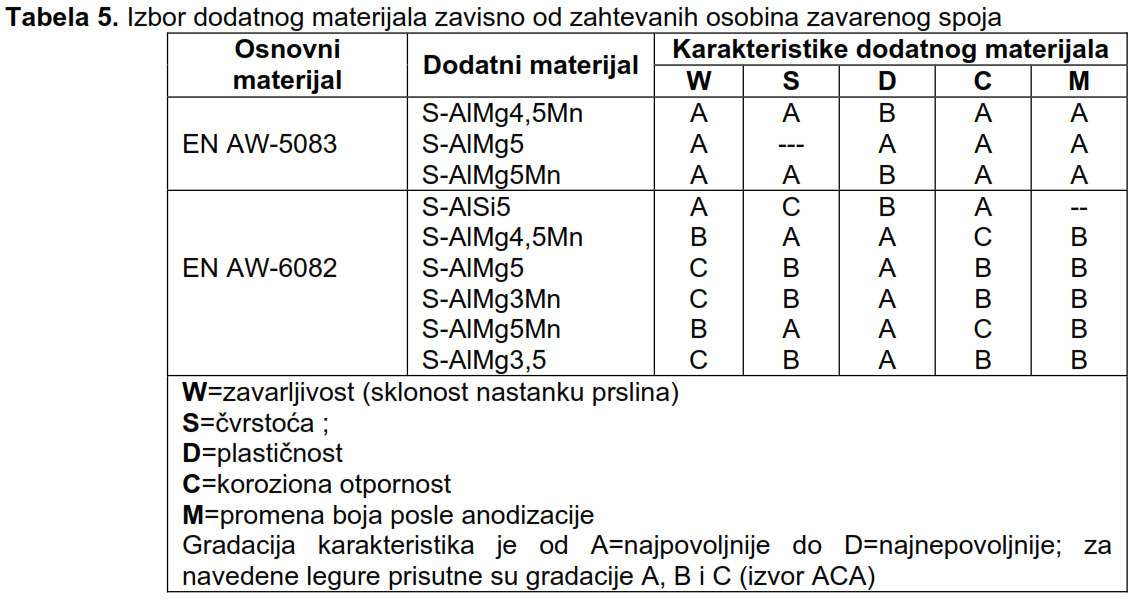
**Izbor dodatnog materijala**

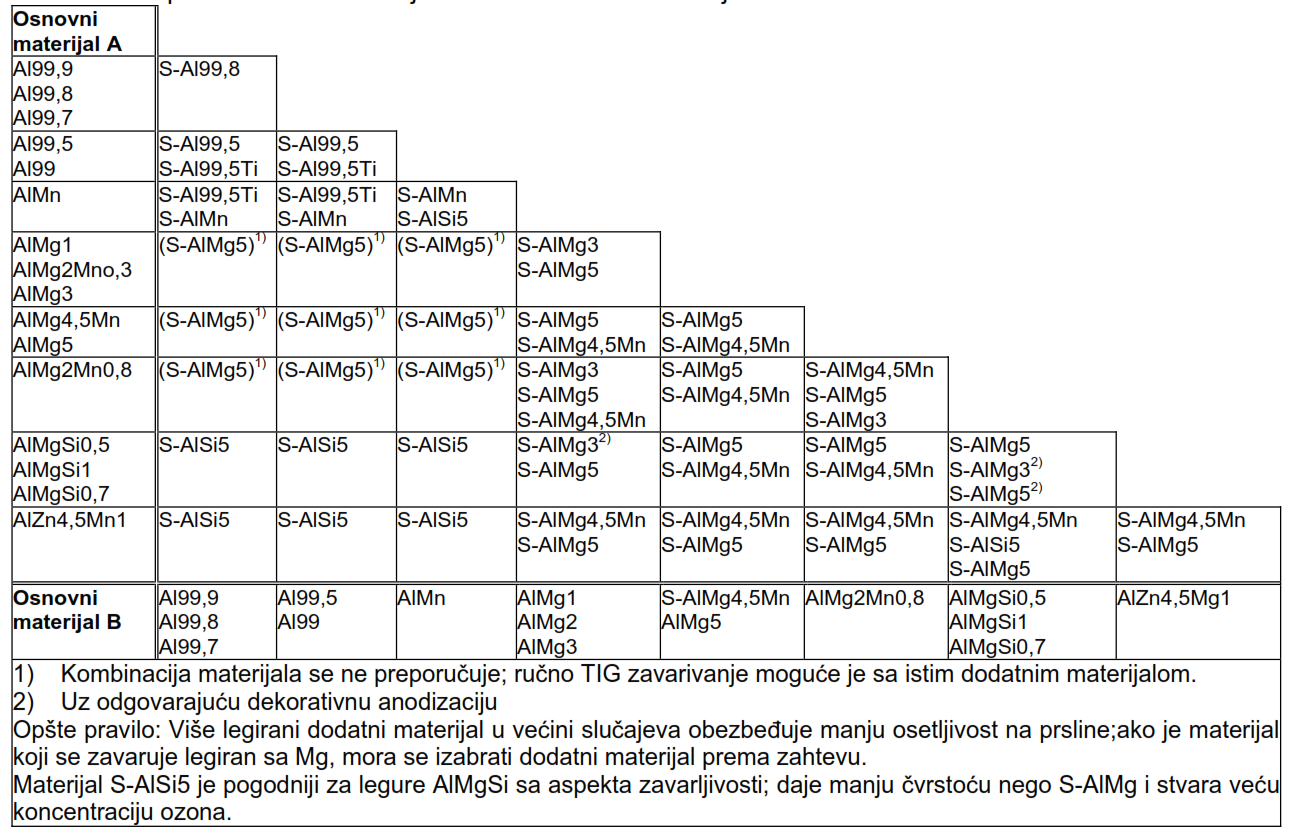
**Kao i na zavarljivost i na čvrstoću spoja utiče dodatni materija**l.

Osetljivost na prsline i čvrstoća su obično u suprotnosti jedna u odnosu na drugu.

Opšte preporuke za izbor kombinacija osnovni / dodatni materijal za zavarivanje topljenjem deformisanih legura, prevashodno u cilju smanjenja sklonosti ka nastajanju prslina, date su u tabeli 4.

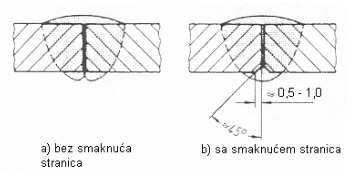
Alternative izbora, zavisno od zahtevanih osobina zavarenog spoja, pokazane su na primeru za materijal EN AW-5083 (EN AW-AlMg4,5Mn0,7) i EN AW 6082 (EN AW-AlSi1MgMn) u tabeli 5.





**Priprema spoja**

Za pripremu spojeva za MIG i TIG zavarivanje mogu se koristiti odredbe DIN 8552, deo 1. Za zavarivanje sučeonih spojeva u jednom sloju, preporučuje se obaranje ivica lima na korenoj strani. Tako je omogućeno bolje formiranje korena šava.’



**Stanice spajajućih elemenata i zone oko njih, moraju biti odmašćene i suve**. **Posle odmašćivanja, oksidni sloj se mora ukloniti neposredno pre zavarivanja**, **a kod mehaničkog čišćenja moraju se koristiti četke od nerđajućeg materijala.** Činjenica je da se odmah stvara novi oksidni sloj, ali je taj sloj relativno tanak i ujednačene debljine.

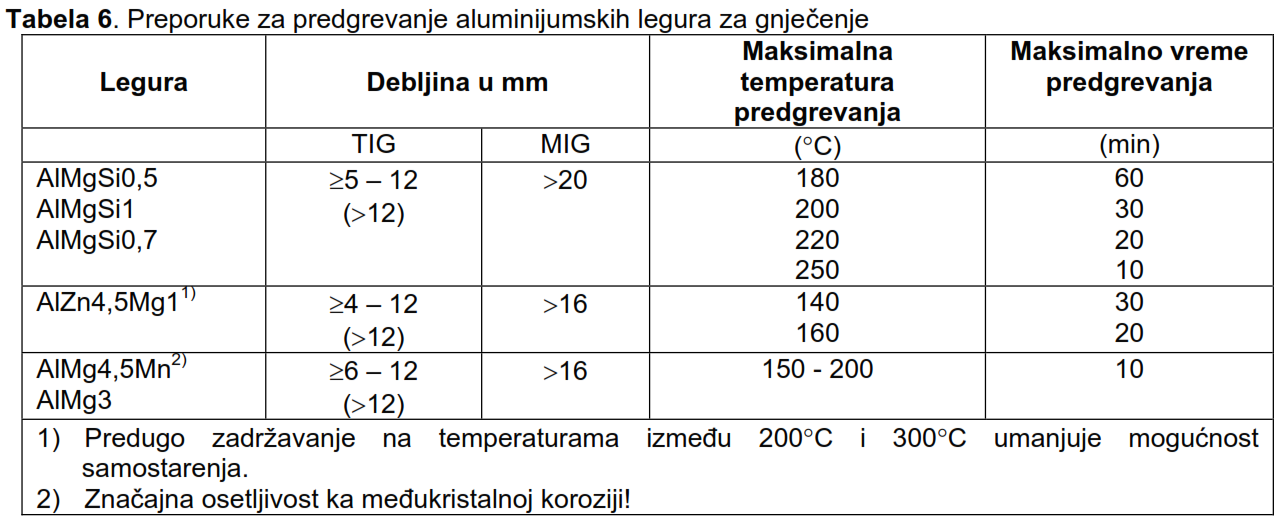
**Predgrevanje**

**Za određivanje temperature predgrevanja uzimaju se u obzir sledeći uticajni faktori:**

- **Toplotnofizičke osobine osnovnog materijala**: granične temperature područja topljenja i očvršćavanja, specifična toplota, temperatura topljenja, toplotna provodljivost i prenos toplote.

- **Proces zavarivanja**: presudan značaj ima snaga zavarivačkog strujnog izvora. Što je snaga luka veća to je potrebno manje predgrevanje. Kod procesa zavarivanja manje gustine snage luka i sa dodavanjem dodatnog materijala potrebno je češće i više predgrevanje, nego kod procesa sa visokim gustinama snage, uz jednovremeno topljenje dodatnog materijala.

- **Geometrija zavarivanog dela**: kod delova velikih preseka, u zavisnosti od vrste i geometrije šava neophodne su više temperature predgrevanja.



**U mnogo slučajeva dovoljno je predgrevanje pre početka zavarivanja**.

**Širina područja zagrevanja sa obe strane šava treba da je oko 10 x debljine osnovnog materijala, najviše 250 mm.**

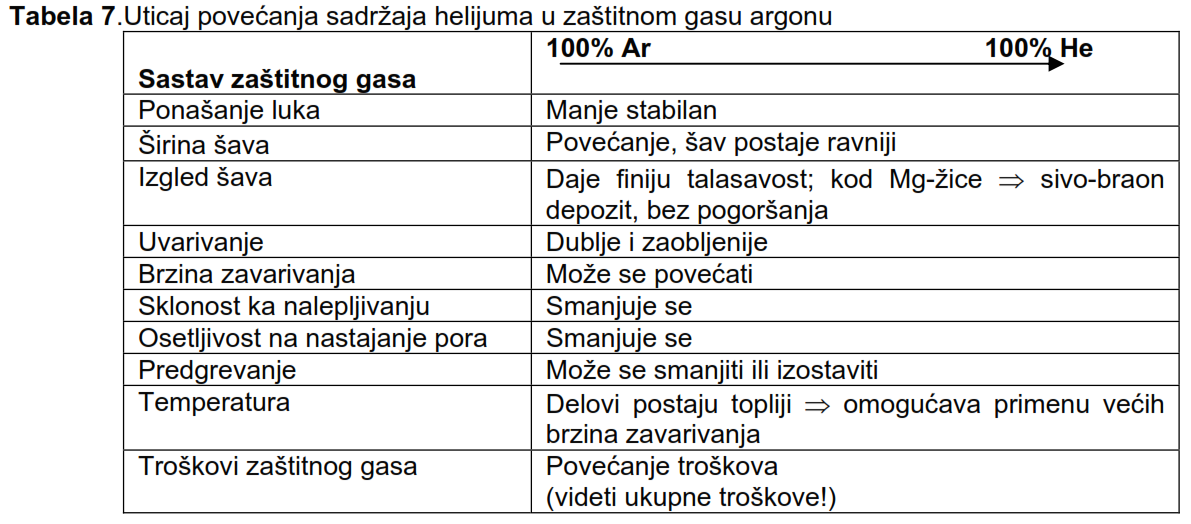
**ZAŠTITINI GASOVI**

Dobra zaštita zavarivačke kupke kod aluminijumskih materijala se obezbeđuje korišćenjem zaštitnih **gasova argona i mešavina argon / helijum**.

**Kod upotrebe helijuma pri istoj jačini struje veća je snaga luka, a samim tim i uvarivanje i brzina nanošenja sloja**.

**Efekat dodatka kiseonika u inertni zaštitni gas je kontraverzan, tj. ima i pozitivan i negativan uticaj.**

**Ustanovljeno je da dodatak kiseonika značajno povećava uvarivanje, ali zavisno od njegovog sadržaja povećava se sagorevanje Mg i mogu se javiti crne mrlje na površini šava.**



ZAVARIVANJE LIVENIH LEGURA ALUMINIJUMA

**Aluminijumski liveni materijali, zbog prisustva mikrolunkera i livene strukture, imaju nižu deformabilnost od odgovarajućih legura za gnječenje**.

Zavarivanje se uglavnom primenjuje kao reparaturno zavarivanje u popravci grešaka livenja, ili zbog oštećenja u eksploataciji.

Odlivci liveni pritiskom većinom sadrže veliku količinu gasova koji kod zavarivanja stvaraju kipuću zavarivačku kupku.

**Najbolju zavarljivost imaju AlSi legure sa 7-12%Si, sa ili bez dodatka Mg. Sa dodatkom Cu zavarljivost se umanjuje.**

Zbog čestog prisustva skupina nečistoća, naročito u području lunkera, povoljna je **primena ručnog elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom**, sa funkcijom obloge kao topitelja.

Zbog komplikovane geometrije odlivaka različitih debljina zida, za smanjenje pojave prslina pri zavarivanju preporučuje **se primena predgrevanja na temperaturama 150-250 °C.**