

MATERIJAL ZA PREDAVANJA IZ PREDMETA

**OBEZBEĐENJE I
KONTROLA KVALITETA
ZAVARENIH SPOJEVA**

handout – v.6.2

*Pojava prslina u zavarenim spojevima
tokom izrade*

Prof. dr Miloš Đukić

Beograd, 2017

7. Pojava prslina u zavarenim spojevima-uvodna razmatranja i podela prslina

7.1. Uvodna razmatranja o prslinama u zavarenim spojevima i osnovnim uzročnicima

Proces zavarivanja topljenjem ima za cilj da obezbedi dovoljnu količinu toplotne energije, neophodnu da se izvrši otapanje osnovnog materijala delova koji se zavaruju i dodatnog materijala, te da se nakon završetka procesa očvršćavanja formira lokalna neraskidiva veza. Materijali delova koji se zavaruju absorbuju toplotu oslobođenu od strane toplotnog izvora, neophodnu za proces topljenja, dok se deo toplote nepovratno gubi usled odvijanja procesa prostiranja toplote konvekcijom (prenošenjem), kondukcijom (provođenjem) i zračenjem.

Termodinamički proces prenosa toplote kroz materijal kondukcijom uslovljava promenu fizičkih karakteristika materijala usled uspostavljanja vrlo neravnomernog toplotnog polja i procesa termičkog širenja. Kao rezultat javlja se u zavarenom spoju povišena temperatura koja ima izrazito neravnomernu prostornu i vremensku raspodelu tokom odvijanja toplotnih i metalurških procesa (topljenja osnovnog i dodatnog materijala, kristalizacije-očvršćavanja metala šava i hlađenja zavarenog spoja), što uslovljava pojavu:

- velikog broja neravnotežnih fizičkih i hemijskih reakcija u rastopljenom i očvrslom materijalu (isparavanje i sagorevanje gasova, apsorpcija gasova i njihove hemijske reakcije, reakcije prečišćavanja i legiranja metala šava),
- mikrostrukturnih transformacija osnovnog materijala i
- složenog i izrazito neravnomernog naponskog polja (termički indukovani naponi usled ometanog širenja i skupljanja) u zoni zavarivanja.

Prsline u zavarenom spoju nastaju tokom izrade kao posledica odvijanja vrlo složenih i međusobno povezanih toplotnih i i metalurških procesa i najopasnije su greške u zavarenim spojevima zbog svoje geometrije. Prsline u zavarenom spoju nastale tokom izrade predstavljaju neprihvatljive greške.

Prsline se **prema obliku** mogu svrstati u kategoriju ravanskih diskontinuiteta sa oštrim vrhom, pri čemu je njihova dužina najčešće znatno veća od širine (veliki odnos dužine i širine). Oštri završetak prslina izaziva veliku koncentraciju napona te omogućava njihovo lako širenje kroz susedni materijal metala šava ili osnovni materijal, u poređenju sa greškama sfernog oblika tipa šupljina i čvrstih uključaka.

Različite vrste prslina, koje se javljaju kod zavarenih spojeva, mogu da se, **u zavisnosti od vremena obrazovanja**, svrstaju u:

- prsline nastale tokom izrade i
- prsline nastale tokom eksploatacije.

Svakako, moguće je i kombinovano dejstvo kod kojeg inicijacija mikroprsline (koja regularnim metodama ispitivanja ne može da bude detektovana) nastaje tokom izrade, a do razvoja, odnosno širenja prslina, dolazi tokom eksploatacije. Ovaj vid podela je od velikog značaja, jer se često prsline nastale tokom izrade i eksploatacije zavarenih spojeva, zbog svojih specifičnosti, odvojeno proučavaju.

Vrlo često se zbog značaja toplotnih i metalurških procesa tokom izrade zavarenog spoja prsline, **prema uzroku nastajanja**, svrstavaju isključivo u kategoriju metalurških grešaka, i pored toga što su za njihovo nastajanje, kao što je to već istaknuto, odgovorna tri uzročnika :

- **konstrukcione greške,**
- **metalurške greške i**
- **tehnološke greške.**

- **Propusti u konstruisanju**, koji su odgovorni za nastajanje grešaka tipa prslina, odnose se pre svega na:

- neodgovarajući polazni materijal niske zavarljivosti,
- nepravilan izbor dimenzija elemenata konstrukcije,
- nepravilno oblikovanje detalja na zavarenoj konstrukciji i
- zavarivanje u nepristupačnom i skućenom prostoru uslovljeno konstruktivnim rešenjem.

- **Metalurške greške**, koje najčešće uslovljavaju pojavu prslina, rezultat su složenih i međusobno povezanih metalurških i toplotnih procesa:

- topljenja materijala,
- kristalizacije metala šava i
- hlađenja zavarenog spoja.

Obim metalurških propusta odgovornih za nastajanje prslina odnosi se na specifične uslove pri izradi pojedinih zavarenih konstrukcija i međusobnu povezanost sledećih faktora:

- primenjen proces zavarivanja,
- tip zavarenog spoja,
- priprema žljeba,
- korišćeni materijali (njihova zavarljivost) i
- uslovima prilikom izvođenja zavarivanja.

- **Tehnološke greške** odgovorne za pojavu prslina, hronološki klasifikovane, su:

- loš kvaliteta polaznog materijala; odstupanja od po standardu zahtevanog hemijskog sastava, strukture, mehaničkih osobina, količine uključaka, diskontinuiteta itd.,
- loše propisana tehnologija zavarivanja,
- nedovoljno precizno definisane specifikacije tehnologije zavarivanja,
- neadekvatno sprovedeni pripremni radovi (priprema spojeva, izrada žljeba, žljebljenje korena, podešavanje, pritezanje, pripajanje, temperatura predgrevanja, itd.),
- neadekvatno sprovođenje propisane tehnologije zavarivanja (odstupanja u parametrima režima zavarivanja tokom izrade),
- zavarivačke greške,
- neodgovarajuća tehnologija naknadne termičke obrade zavarenog spoja i
- odstupanja u parametrima naknadne termičke obrade zavarenog spoja.

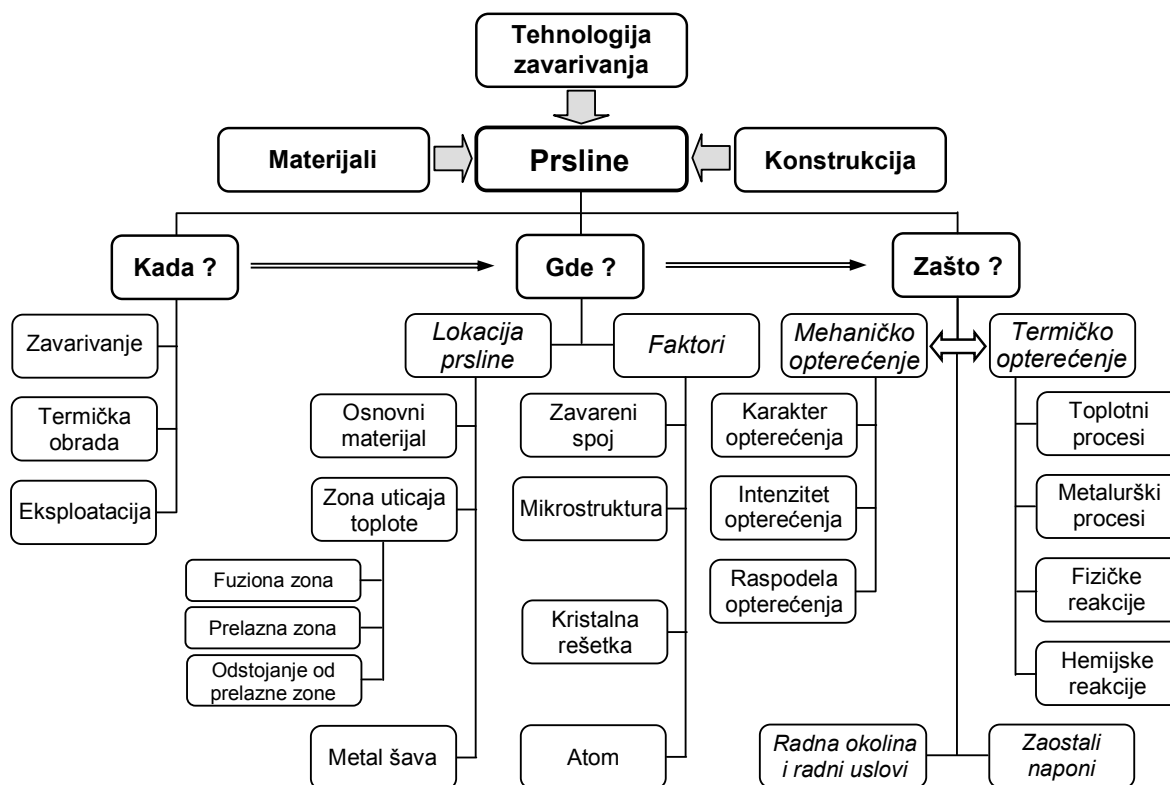
U cilju sagledavanja vrlo složenog problema analize prslina u zavarenim spojevima neophodno je uzeti u razmatranje:

- podelu prslina po različitim kriterijumima,
- mehanizme i uzročnike nastajanja pojedinih tipova prslina,
- uslove neophodne za nastajanje pojedinih tipova prslina i
- uslove neophodne za širenje pojedinih tipova prslina.

Metodološki pristup u analizi prslina zavarenih spojeva se zasniva na utvrđivanju odgovora na sledeća tri pitanja:

1. **Kada** su nastale prsline?
2. **Gde** su nastale prsline?
3. **Zašto** su nastale prsline?

Na slici 67 prikazan je algoritam metodološkog pristupa u analizi zavarenih spojeva koji ukazuje na osnovne odgovorne faktore: **materijal, tehnologiju zavarivanja (izradu) i konstrukcijsko rešenje**. Kao osnovni međusobno povezani uzročnici navedeni su: mehaničko opterećenje, termičko opterećenje, radni uslovi, okolina i zaostali naponi. Prikazani algoritam se može koristiti pri analizi prslina nastalih kako tokom izrade, tako i tokom eksploatacije zavarene konstrukcije.

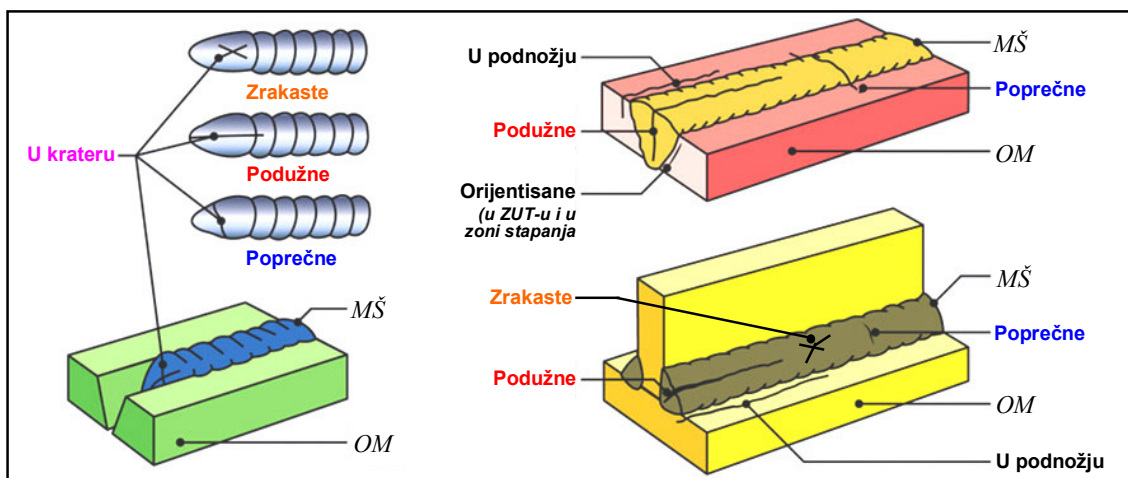


Slika 67. Metodološki pristup u analizi prsline zavarenog spoja

7.2. Podela prsline

Jednoznačna podela (klasifikacija) prsline u zavarenim spojevima do sada nije sprovedena. U stručnoj literaturi može se naći veliki broj različitih tipova podela, i to po različitim kriterijumima.

- 1. Podela prema mestu nastajanja** na: prsline u MŠ, ZUT-u i OM, slika 68.
- 2. Podela prema pravcu prostiranja u odnosu na osu šava:** podužne, poprečne, zrakaste, orijentisane, u podnožju, u krateru, slika 68.

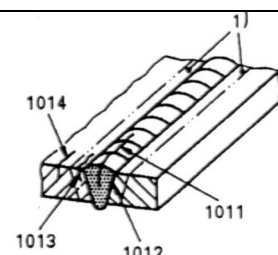
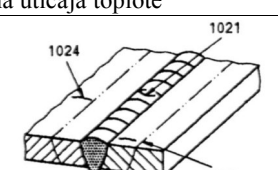
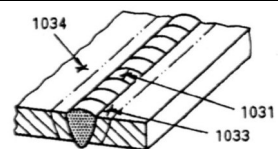
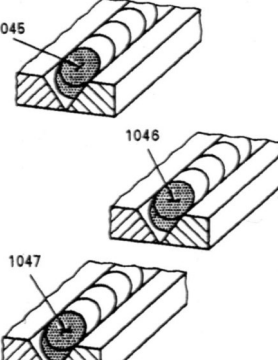
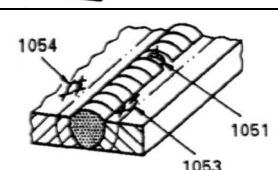
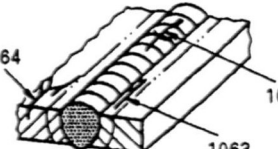


Slika 68. Podela prsline prema: mestu nastajanja i pravcu prostiranja

Najdetaljnija klasifikacija grešaka zavarenih spojeva je po vrsti a data je u standardima: SRPS EN ISO 6520 - "Zavarivanje topljenjem, klasifikacija geometrijskih nepravilnosti (grešaka)", (deo 1 - zavarivanje topljenjem, deo 2 - zavarivanje pritiskom) i SRPS C.T3.020. Tipovi grešaka su definisani opisom i skicom gde je to bilo neophodno.

U okviru standarda SRPS EN ISO 6520 izvršena je podela prslina samo prema mestu nastajanja i prema pravcu prostiranja u odnosu na osu šava, tabela 21. Takođe, ovaj standard predviđa i pojam mikroprslina.

Tabela 21: Podela nesavršenosti (grešaka) tipa prslina prema standardu SRPS EN ISO 6520-1

Broj	Opis i objašnjenje	Skica
100	Prslina: nesavršenost kao posledica lokalnog prekida u čvrstom stanju zbog uticaja hlađenja ili napona	
1001	Mikroprslina: prslina vidljiva samo mikroskopom.	
101	Podužna prslina: prslina uglavnom paralelna osi šava. Ona može da se nalazi u:	 <p>1) zona uticaja toplote</p>
1011	- metalu šava	
1012	- zoni stapanja	
1013	- zoni uticaja toplote	
1014	- osnovnom materijalu	
102	Poprečna prslina: prslina uglavnom poprečna na osu šava. Ona može da se nalazi u:	
1021	- metalu šava	
1023	- zoni uticaja toplote	
1024	- osnovnom materijalu	
103	Zrakaste prsline: prsline koje polaze iz iste tačke. One mogu biti u:	
1031	- metalu šava	
1033	- zoni uticaja toplote	
1034	- osnovnom materijalu	
104	Prslina u krateru: prslina u krateru na kraju šava može biti:	
1045	- podužna	
1046	- poprečna	
1047	- zrakasta (zvezdasta prslina)	
105	Grupa pojedinačnih prslina: grupa odvojenih prslina sa različitom orijentacijom može biti u:	
1051	- metalu šava	
1053	- zoni uticaja toplote	
1054	- osnovnom materijalu	
106	Razgranate prsline: grupa povezanih prslina koje polaze iz zajedničke prslina, a razlikuju se od grupe pojedinačnih prslina (105) i od zrakastih prslina (103). One mogu biti u:	
1061	- metalu šava	
1063	- zoni uticaja toplote	
1064	- osnovnom metalu	

U okviru aneksa A standarda SRPS EN ISO 6520 dat je pregled oznaka različitih tipova prslina pri čemu je izvršena mnogo detaljnija klasifikacija, tabela 22. Međutim, osim oznake nikakvo dodatno objašnjenje nije dato o prirodi pojedinih tipova prslina, mehanizmima i uzročnicima njihovog nastajanja. Važno je istaći da standard DIN 8524-3 – "Greške u zavarenim spojevima metalnih materijala, prsline, klasifikacija, nazivi, objašnjenja" (1975. god.), daje objašnjenje za uzroke nastajanja pojedinih vrsta prslina koje su pobrojane i u aneksu novijeg standarda SRPS EN ISO 6520, tabela 23. Standard **DIN 8524-3** je prethodio standardu SRPS EN ISO 6520 i **više ne važi**. Objašnjenja data u ovom standardu su vrlo neprecizna, nedovoljno jasna i ograničeno primenljiva za analizu uslova za nastajanje, i uzročnika navedenih tipova prslina.

Tabela 22: Oznake prslina SRPS EN ISO 6520-1, aneks A

Oznaka	Opis i objašnjenje
E	Prslina u šavu Prsline koja se javljaju tokom ili posle zavarivanja
Ea	- tople prsline
Eb	- kristalizacijone prsline
Ec	- likvacijske prsline
Ed	- prsline zbog taloženja
Ee	- prsline izazvane starenjem
Ef	- hladne prsline
Eg	- krte prsline (nedostatak duktilnosti)
Eh	- prsline skupljanja
Ei	- vodonične prsline
Ej	- lamelarni lom
Ek	- prsline u podnožju
El	- prsline izazvane starenjem (prsline difuzijom azota)

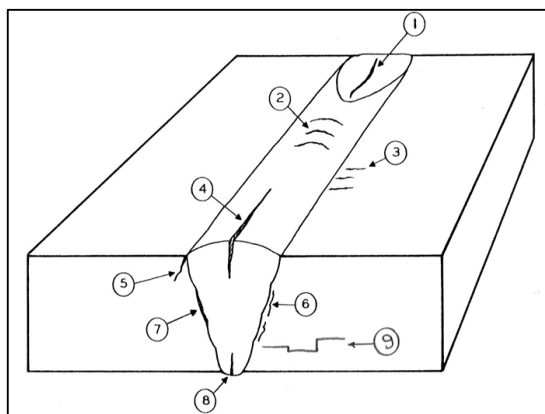
Tabela 23: Podela nesavršenosti (grešaka) tipa prslina DIN 8524-3 – *nevažeci standard*

Broj	Opis	Objašnjenje ? ?
100	Prslina	Ograničeno razdvajanje materijalna uglavnom ravanskog prav. prost.
<i>Podela prslina prema veličini</i>		
100 1	Mikroprslina	Prslina vidljiva samo uz povećanje od 6x.
100 2	Makroprslina	Prslina vidljiva okom (sa odstojanje od 250mm) ili uz povećanje od 6x.
<i>Podela prslina prema pravcu prostiranja</i>		
100 01	Interkristalne	Prostiranje duž granica zrna.
100 02	Međukristalne - Transkristalne	Prostiranje kroz granice zrna.
100 03	Interkristalne i transkristalne (i-t prsline)	Prostiranje duž i kroz granice zrna.
<i>Podela prslina prema uslovima ili uzrocima za nastajanje</i>		
100 0010	Tople prsline	Nastaju u nisko topivim fazama dok su u tečnom stanju.
100 0011	Kristalizacione prsline	Nastaju tokom kristalizacije (očvršćavanja) metalnog kupatila.
100 0012	Likvacijske (Podsoliidusne) prsline	Nastaju nisko topivim fazama u tečnom stanju nakon očvršćavanja metalnog kupatila (duž granica zrna).
100 0020	Hladne prsline	Nastaju u materijalu nakon očvršćavanja usled visokih napona
100 0021	Krte prsline (nedostatak žilavosti-duktilnosti)	Nastaju usled dejstva naprezanja koje prekoračuje deformacionu sposobnost materijala koja je u funkciji od temperature.
100 0022	Prsline skupljanja	Nastaju usled ometanog skupljanja (najčešće kod strukturnih komponenti koje imaju nisku deformacionu sposobnost ili čvrstoću).
100 0023	Vodonične prsline - Zakasnele prsline	Nastaju pri porastu zaostalih napona u materijalu (zaostali vodoničnik u materijalu nemože da napusti materijal usled mikrostrukturnih promena).
100 0024	Prsline usled ojačavanja	Nastaju usled mikrostrukturnih promena tokom vremena: promena zapremine uslovljava pojavu napona.
100 0025	Prsline u podnožju	Nastaju u zonama materijala sa povećanim zateznim naponima (geometrijski greške) uz istovremeno prisustvo nepovoljnih metalurških faktora.
100 0026	Prsline izazvane starenjem (Prsline usled difuzije azota)	Nastaju tokom procesa starenja.
100 0027	Prsline usled taloženja	Nastaju usled taloženja krutih faza tokom izvođenja procesa zavarivanja ili tokom naknadne termičke obrade
100 0028	Lamelarne prsline - Lamelarni lom (cepanje)	Nastaju tokom procesa starenja.

7.2.1. Podela prslina prema mestu nastajanja

Kao što je već istaknuto na početku ovog poglavlja, neravnotežni toplotni i metalurški procesi koji se odvijaju tokom izrade zavarenog spoja su odgovorni za pojavu prslina. Proces topljenja, očvršćavanja i hlađenja metala pogoduju nastajanju **prslina u metalu šava** i **u osnovnom materijalu**.

Prsline u metalu šava mogu da budu različitog pravca prostiranja u odnosu na osu šava (podužne, poprečne, zrakaste...), slika 69, obrazuju se najčešće na povišenim temperaturama, tokom procesa očvršćavanja (**tople prsline**), ali mogu nastati i tokom izvođenja naknadne termičke obrade (**prsline usled ponovnog zagrevanja**), tokom procesa hlađenja, kao i nakon hlađenja (**hladne prsline**). Pojava prslina u metalu šava tokom očvršćavanja i izvođenja naknadne termičke obrade uslovljena je sa dejstvom termički indukovanih napona.



Slika 69. Prikaz različitih vrsta prslina nastalih tokom izrade zavarenog spoja

Pojava prslina u metalu šava je generalno u vezi sa:

- kvalitetom dodatnog materijala,
- izabranom tehnologijom zavarivanja i
- prisustvom grešaka koje predstavljaju pogodna mesta za nastajanje prslina.

Nastajanje prslina u metalu šava može biti uslovljeno sledećim opštim uzročnicima:

- loš izbor dodatnog materijala,
- neodgovarajuća tehnologija zavarivanja,
- prisustvo azota i vodonika u zoni zavarivanja i
- prisustvo grešaka tipa gasnih mehurova, oksidnih i sulfidnih uključaka (posebno su nepovoljni igličasti uključci – MnS i nitridi železa).

Takođe, nastajanje prslina u metalu šava može biti uslovljeno sledećim metalurškim uzročnicima:

- uslovi hlađenja metala šava (počev od tečnog stanja),
- strukturne transformacije u metalu šava (oblast topljenja) i
- osobine čelika na povišenim temperaturama.

Više reči o pojedinim metalurškim uzročnicima za nastajanje prslina u metalu šava biće u okviru podpoglavlja koja se odnose na pojedine vrste prslina, klasifikovanih prema temperaturnoj oblasti njihovog nastajanja.

Prsline u osnovnom metalu, kao što je već istaknuto, mogu nastati u:

- fuzionoj zoni (zoni stapanja),
- zoni uticaja toplote i
- osnovnom metalu izvan zone uticaja toplote.

Slično kao i kod prslina u metalu šava i prsline u osnovnom metalu mogu imati različite pravce prostiranja u odnosu na osu šava, a mogu se javiti i kao orijentisane prsline, prsline u podnožju šava i lamelarne prsline, slika 69.

Prema temperaturnoj oblasti nastajanja prsline u osnovnom metalu mogu biti **tople**, **hladne** i **usled ponovnog zagrevanja**. Karakteristične prsline koje su javljaju u osnovnom metalu su i tzv. **lamelarne prsline** koje imaju specifičan pravac prostiranja.

Nastajanje prslina u osnovnom metalu prilikom izrade i tokom eksploatacije može biti uslovljeno sledećim opštim uzročnicima:

- valjačke greške kod limova (prisustvo uključaka, trakasta struktura),
- zaostali naponi od plastične obrade na hladno (valjanje),
- opšta korozija u kombinaciji sa različitim naprezanjima,
- naponska i interkristalna korozija,
- abrazija i
- dinamičko opterećenje tokom eksploatacije.

Nastajanje prslina u osnovnom metalu može biti uslovljeno sledećim metalurškim uzročnicima:

- hemijski sastav osnovnog metala (pojava krtih faza u ZUT-u),
- lokalni napon usled mikrostrukturnih transformacija u ZUT-u,
- termički indukovani naponi i
- prisustvo vodonika u zoni zavarivanja.

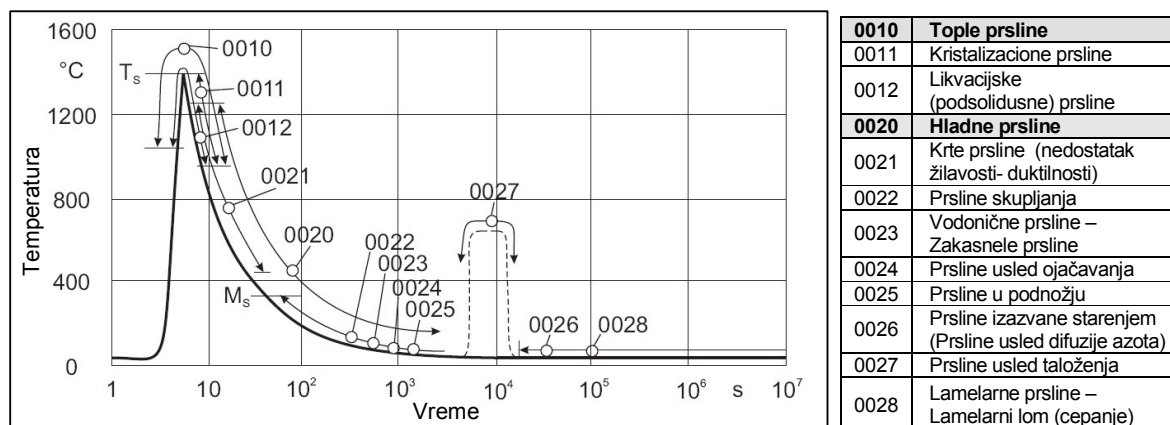
Metalurški uzrocnici nastajanja prslina u osnovnom metalu biće detaljnije razmotreni u podpoglavljima koja se odnose na tople, hladne i lamelarne prsline.

7.2.2. Podela prslina prema temperaturnoj oblasti njihovog nastajanja

Najčešće primenjivana klasifikacije prslina nastalih u zavarenim spojevima tokom njihove izrade je prema temperaturnoj oblasti njihovog pojavljivanja. I kod ovog tipa klasifikacije ne postoji jednoglasan stav o načinu podele. U stručnoj literaturi najčešće se susrećemo sa sledećom uopštenom podelom na:

1. **tople prsline**,
2. **hladne prsline**,
3. **lamelarne prsline (lom-cepanje) i**
4. **prsline usled naknadne termičke obrade (prsline žarenja).**

U okviru svake od ove četiri grupe prslina postoji i dodatna podela na podgrupe. Takođe, postoji i neslaganje oko pripadnosti pojedinih tipova prslina određenoj grupi, pa se često navode pojedinačno (npr. vodonične prsline mogu se posmatrati pojedinačno ili kao jedna vrsta hladnih prslina itd...). Na slici 70 prikazana je podela prslina navedenih u standardu DIN 8524-3, vidi tabelu 23, prema temperaturnoj oblasti njihovog pojavljivanja za slučaj zavarivanja čelika.

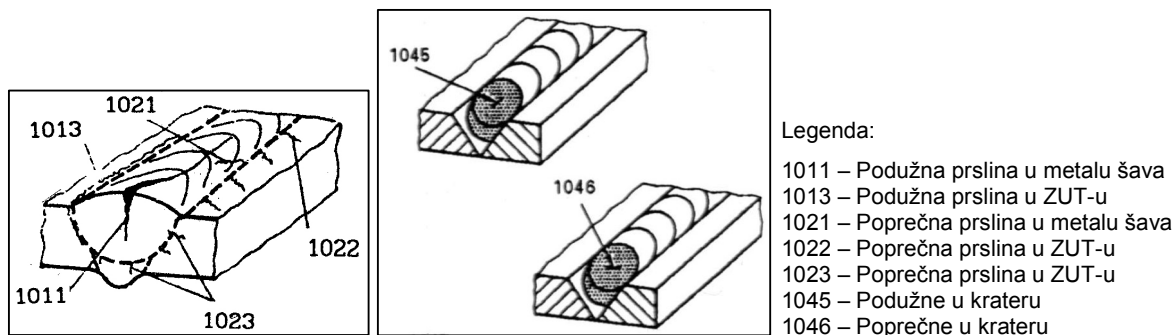


Slika 70. Temperaturna oblast pojavljivanja različitih tipova prslina

7.2.1.1. Tople prsline

Kao što samo ime ukazuje tople prsline nastaju pri relativno visokim temperaturama u temperaturnom intervalu između solidus i likvidus linije, kao i ispod solidus linije i obično se vezuju za proces primarne kristalizacije (očvršćavanja) rastopljenog metala šava. Tople prsline uglavnom ne nastaju na temperaturama nižim od $0,5T_t$, gde je T_t – temperatura topljenja (npr. kod čelika donja temperaturna granica iznosi $\sim 900^\circ\text{C}$, vidi sliku 70).

Tople prsline se mogu javiti u metalu šava i u osnovnom metalu u fuzionoј zoni i zoni uticaja toplote. Obično se javljaju kao podužne prsline u metalu šava i u krateru na kraju šava (mesto prekida luka), ali se mogu prostirati i poprečno i podužno kroz metal šava i ZUT, slika 71.



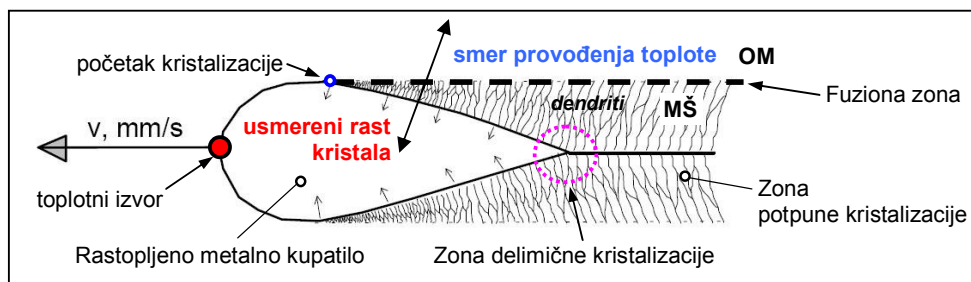
Slika 71. Šematski prikaz položaja toplih prsline u zavarenom spoju

Tople prsline se dele na:

1. **Kristalizacione** – nastaju na temperaturama između solidus i likvidus linije
2. **Podsolidusne (likvacijske-likvacione)** – nastaju na temperaturama ispod solidus linije

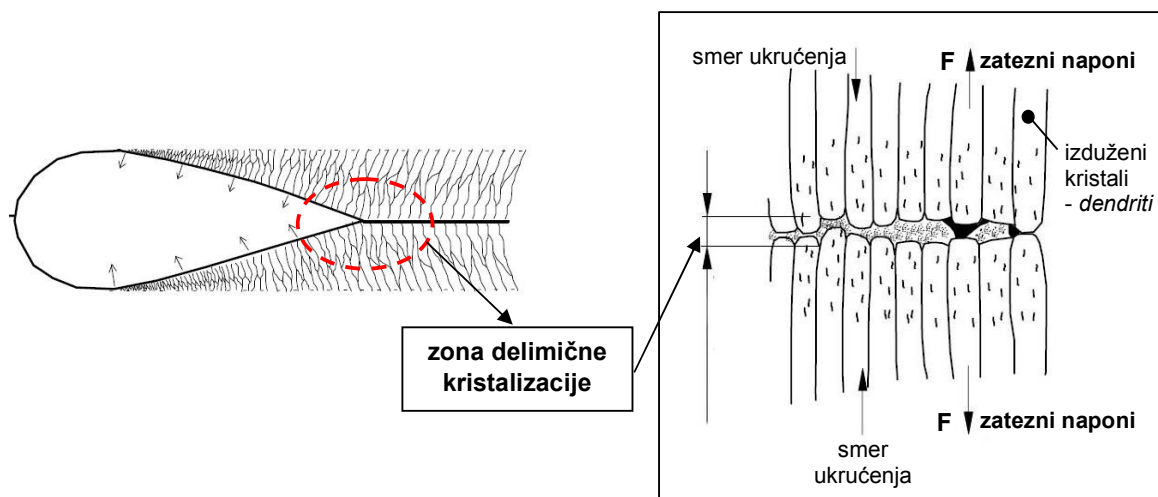
1. Kristalizacione prsline

Proces očvršćavanje rastopljenog metala šava karakteriše usmereni rast kristala upravno na površinu odvođenja toplote, tako da se formiraju stubičasti izduženi kristali – **dendriti**, slika 72. Kristalizacija započinje u fuzionoј zoni (zoni stapanja) na delimično rastopljenim zrnima osnovnog metala, a u rastopljenom metalnom kupatilu se uspostavlja toplotni fluks usled dejstva toplotnog izvora i istovremenog odvođenja toplote – hlađenja, pre svega mehanizmom provođenja (kondukcije) toplote kroz osnovni metal.



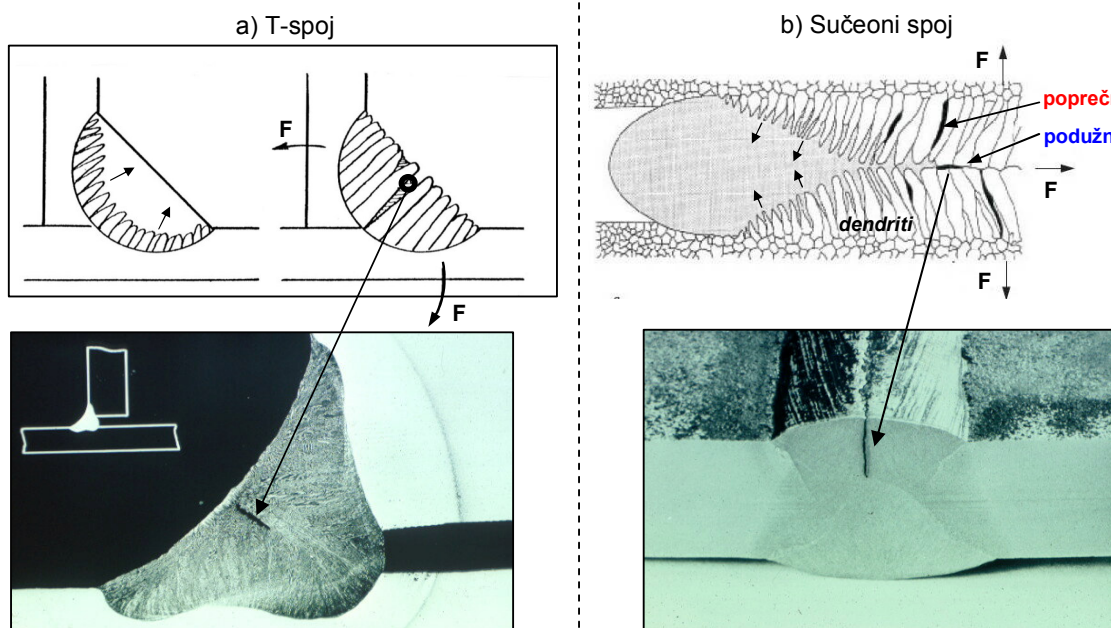
Slika 72. Šematski prikaz procesa kristalizacije (očvršćavanja) rastopljenog metala šava

Mehanizam nastanka i proces širenja oba tipa toplih prsline je pod uticajem **termički indukovanih napona**, koji nastaju tokom hlađenja zavarenog spoja. U metalu šava i zoni uticaja toplote javlja se složeno naponsko polje, odnosno javljaju se zatezni naponi kao rezultat ometenog skupljanja i širenja usled ukrućenja delimično očvrstlog metala šava, slika 73. Posebno osetljiva na pojavu toplih prsline je zona delimične kristalizacije rastopljenog metalnog kupatila.



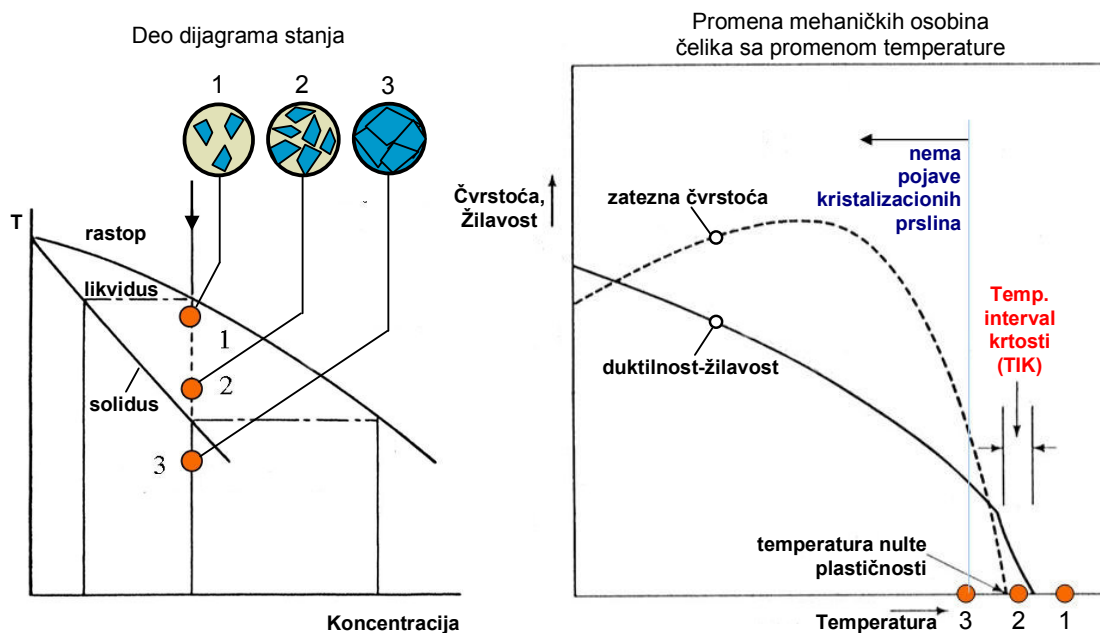
Slika 73. Mehanizam nastajanja termički indukovanih zateznih napona u zoni delimične kristalizacije rastopljenog metala šava

Napon tečenja metala u zagrejanim zonama zavarenog spoja je izuzetno nizak. Stoga se čak i pri dejstvu zateznog napona relativno niskog intenziteta javljaju izrazite plastične deformacije, usled kojih može da dođe do pojave lokalnih lomova i formiranja toplih kristalizacionih prslina sa poprečnih (meždendritskim) i podužnim pravcem prostiranja, slika 74.

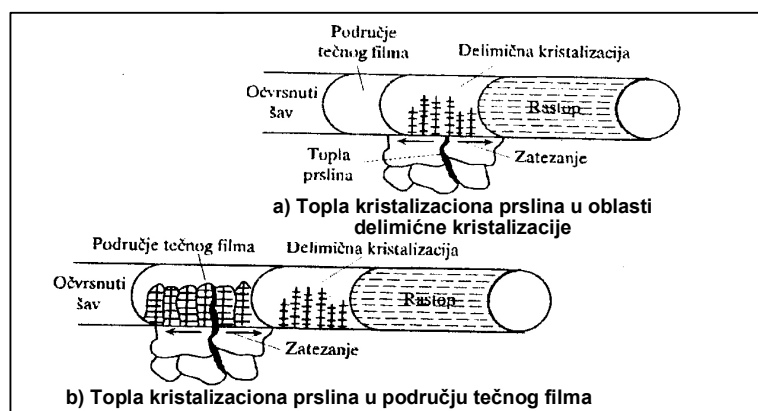


Slika 74. Tople kristalizacione prsline: a) T-spoj, b) sučeoni spoj

Mnogobrojni mehanizmi nastanka kristalizacionih prslina još uvek nisu dovoljno istraženi. Čelik na povišenim temperaturama, između solidus i likvidus linije, ima **manjenu sposobnost deformacije** (nisku plastičnost, žilavost i zateznu čvrstoću), što je posebno izraženo u tzv. temperaturnom intervalu krтости (**TIK oblast**), slika 75. Tople kristalizacione prsline nastaju kada su zatezni naponi upravni na granice zrna i dovoljno veliki da stvore diskontinuitet duž granice zrna u oblasti delimične kristalizacije, slika 76a) ili u području tečnog filma, slika 76b). Posebna opasnost od pojave kristalizacionih prslina se uočava kod **legure sa velikim intervalom očvršćavanja** (veliki razmak između solidus i likvidus linije), dok je kod legura sa malim intervalom očvršćavanja i čistih metala opasnost od pojave kristalizacionih prslina znatno manja, odnosno javljaju se uglavnom samo podsolidusne prsline.



Slika 75. Uzročnici i mehanizam nastanka toplih kristalizacionih prsline

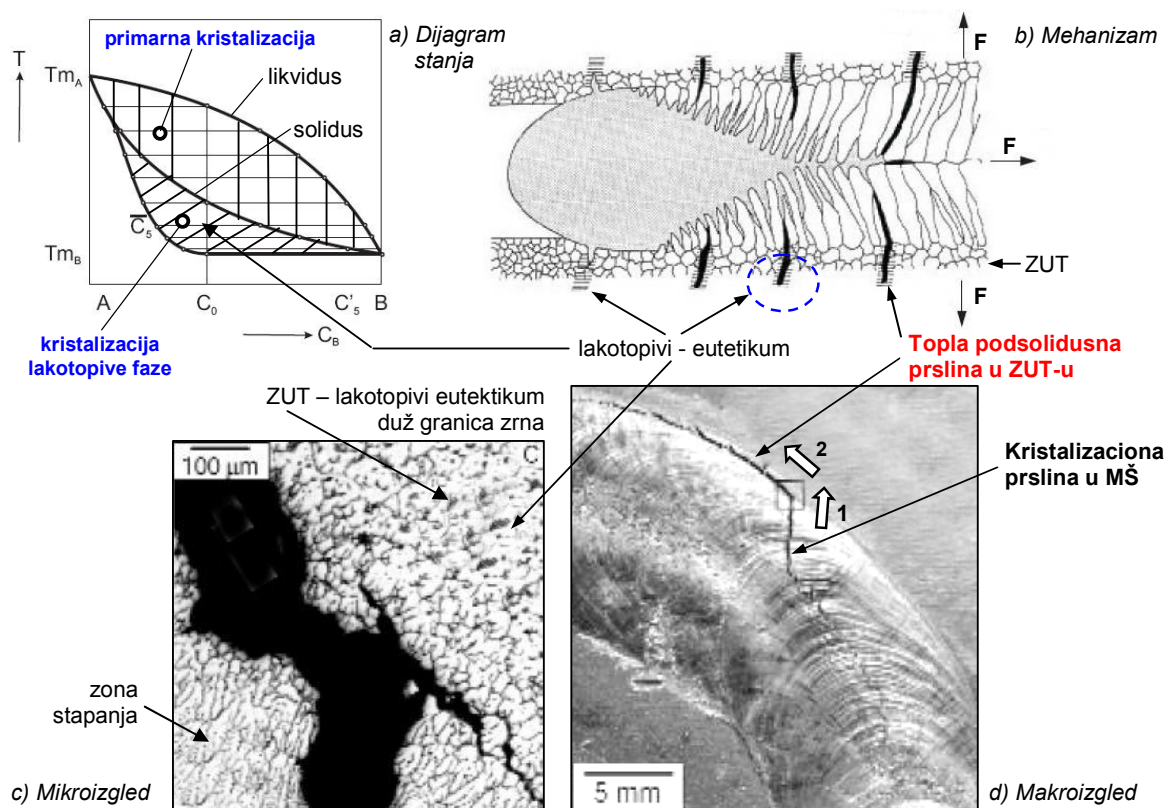


Slika 76. Mehanizmi nastanka toplih kristalizacionih prsline

2. Podsolidusne (likvacijske) prsline

Podsoliidusne prsline najčešće se javljaju u zoni uticaja toplote neposredno uz zonu stapanja, a pravac prostiranja im je podužan ili poprečan na osu šava. Pri zavarivanju čelika nastaju na temperaturama ispod solidus linije (**800-1200°C**), nakon primarne kristalizacije rastopljenog metala šava. Podsoliidusne prsline nastaju usled prisustva strukturnih nehomogenosti, nečistoća - **segregacija** koje su raspoređene po granicama zrna osnovnog materijala u zoni uticaja toplote. Na visokim temperaturama dolazi do delimičnog topljenja **lakotopivih faza - eutektikuma** koje grade nečistoće sa osnovnim metalom. Ova pojava se naziva **medukristalna segregacija**. Tokom procesa hlađenja, usled dejstva zateznih napona, nastaju podsoliidusne prsline interkristalnog tipa u ZUT-u i prostiru se duž omekšanih granica zrna na kojima se izdvojila lakotopiva faza (lakotopivi eutektikum) koja ima izuzetno nisku čvrstoću i plastičnost, slika 77.

Podsoliidusne prsline se mogu javiti pri zavarivanju čelika i aluminijuma. Ugljenični čelici sa visokim sadržajem sumpora i fosfora posebno su osetljivi na pojavu podsoliidusnih prsline. Prisustvo sumpora u vidu **sulfida železa (FeS)**, koji sa železom obrazuje lakotopivi eutektikum **Fe-FeS** ($T_f=985^\circ\text{C}$) po granicama zrna, značajno povećava opasnost od pojave podsoliidusnih prsline.

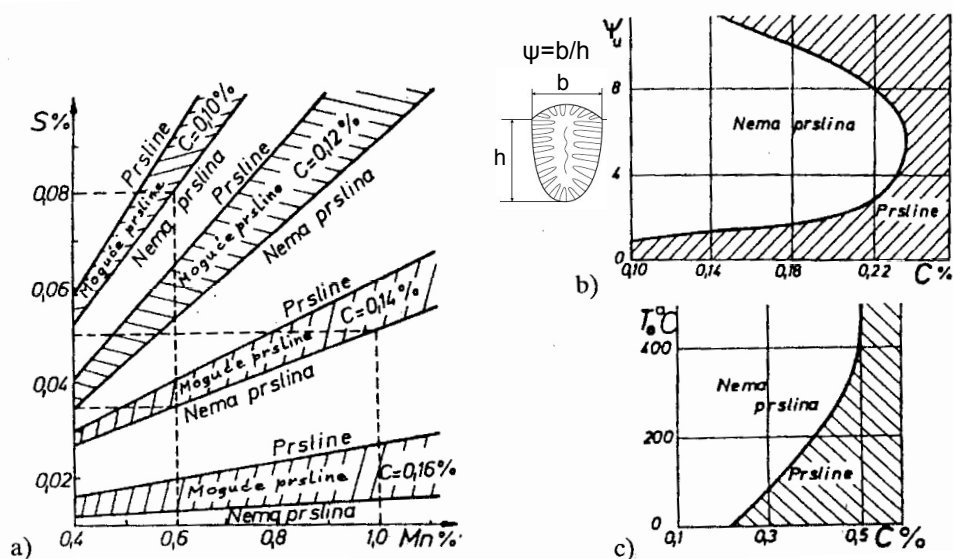


Slika 77. Mehanizam nastanka i makroizgled toplih podsolidusnih prslina

Povećanjem sadržaja mangana u čelicima smanjuje se negativan uticaj prisustva sumpora, jer nastaje jedinjenje mangansulfid (MnS), koje se takođe izdvaja po granicama zrna, ali u formi globularnih i manje opasnih uključaka.

Faktori koji utiču na nastanak toplih prslina

Tri faktora imaju najveći uticaj na mogućnost nastanka toplih prslina pri zavarivanju čelika, slika 78: a) **hemijski sastav čelika (sadržaj C, S i Mn)**; b) **oblik šava** i c) **predgrevanje**.

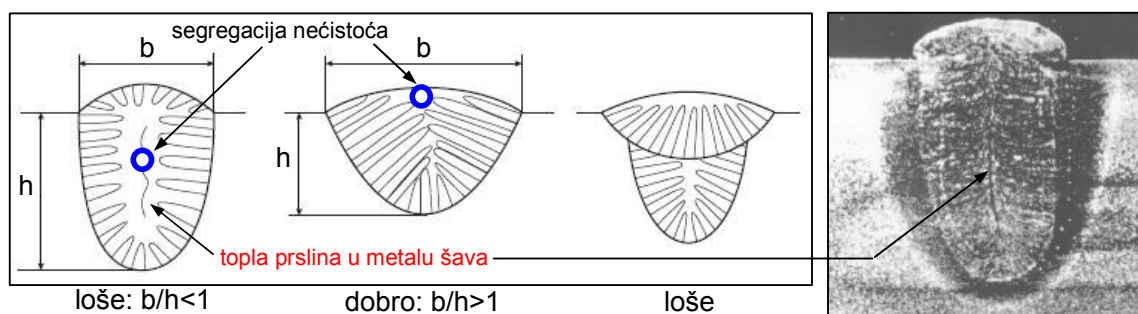


Slika 78. Faktori koji utiču na sklonost čelika ka obrazovanju toplih prslina: a) hemijski sastav čelika; b) oblik šava; c) predgrevanje

Kao što se može zaključiti na osnovu slike 78, navedeni uticaji su međusobno zavisni ali opšte je pravilo da su čelici *sa većim sadržajem C i S, a manjim sadržajem Mn* skloniji nastanku toplih prslina.

Takođe, sklonost ka pojavi toplih prslina zavisi od **oblika šava** i raste kod šavova sa malim **koeficijentom oblika šava**, $\psi=b/h$ (odnos širine i dubine šava) ili sa izrazito velikim koeficijentom oblika (kod čelika sa većim sadržajem C), slika 79.

Uski i duboki šavovi ($b/h < 1$) su nepovoljni, jer su kristali koji nastaju tokom kristalizacije upravni na površinu hlađenja i susreću se u centralnom delu šava, što uslovljava izrazitu **lokalnu segregaciju – koncentraciju raznih štetnih primesa u sredini metalu šava** i značajno pospešuje mogućnost nastanka kristalizacionih prslina, slika 79.



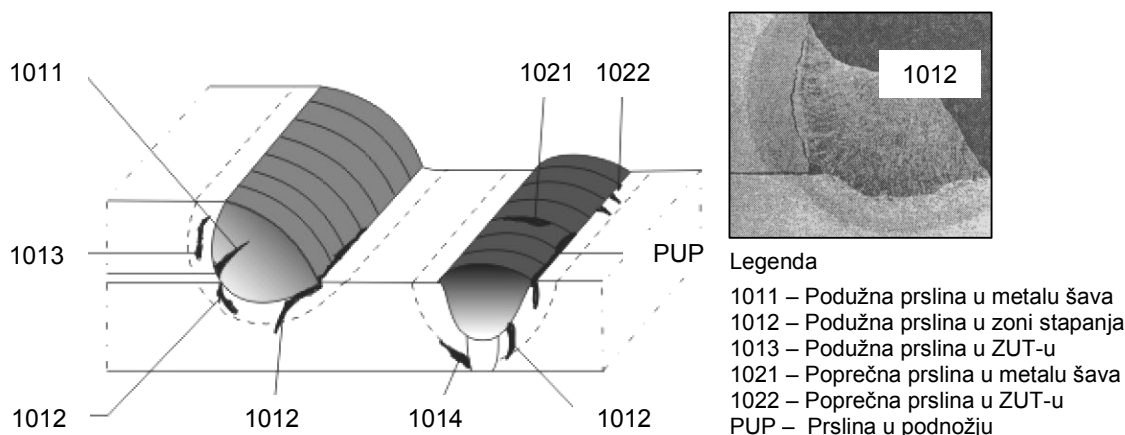
Slika 79. Šematski prikaz pravca rasta kristala u zavisnosti od koeficijenta oblika šava $\psi = b/h$

Predgrevanje značajno smanjuje opasnost od pojave toplih prslina. Negativan uticaj sumpora je već ranije istaknut i odnosi se na nepoželjan lakotopivi eutektikum Fe-FeS. S druge strane, sa povećanjem sadržaja Mn slabi štetan uticaj S koji se vezuje sa Mn gradeći jedinjenje MnS. Povećani sadržaj C u čeliku je generalno nepoželjan zbog uticaja na smanjenje plastičnosti.

7.2.1.2. Hladne prsline

U praksi se najčešće javljaju hladne prsline, pa je analiza mehanizama i uzročnika nastanka ovog tipa prslina od izuzetnog značaja.

Hladne prsline nastaju tokom procesa hlađenja u niskotemperaturnom području, obično na temperaturama nižim od 200-250°C (vidi sliku 70). Po pravilu hladne prsline se formiraju nekoliko časova nakon završetka zavarivanja, ali se mogu pojaviti i nakon 48-72h (zakasnele prsline). Hladne prsline mogu usloviti i potpuni lom zavarene konstrukcije, najčešće u ZUT-u i to čak nakon 72h od završetka zavarivanja. Hladne prsline nastaju u metalu šava i u osnovnom materijalu (zona stapanja, zona uticaja toplote i osnovni materijal van ZUT-a), slika 80.



Slika 80. Šematski prikaz položaja hladnih prslina u zavarenom spoju

U odnosu na osu šava hladne prsline mogu se prostirati podužno, poprečno i orijentisano u zoni stapanja i ZUT-u, a takođe se javljaju i kao prsline u podnožju šava u zonama sa izrazitom koncentracijom napona (geometrijski faktor), vidi sliku 68.

Uzročnici nastanka hladnih prsline

Postoje četiri osnovna uzročnika nastanka hladnih prsline:

- materijal,
- količina vodonika u materijalu,
- naponsko stanje i
- uslovi zagrevanja i hlađenja.

Navedeni uzročnici su međusobno povezani, a njihova nepovoljna kombinacija uslovljava pojavu hladnih prsline. Postoji veliki broj uticajnih faktora koji neposredno ili posredno mogu pospešiti nastajanje i širenje hladnih prsline tokom dužeg vremenskog intervala. U tabeli 24 dat je pregled najvažnijih uticajnih faktora koji se odnose na navedene glavne uzročnike nastanka hladnih prsline.

Tabela: 24: Osnovni uzročnici i uticajni faktori odgovorni za nastanak hladnih prsline

Osnovni uzročnici			
Materijal	Vodonik	Naponsko stanje	Uslovi zagrevanja i hlađenja
<i>Uticajni faktori</i>			
<ul style="list-style-type: none"> - Hemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala - Zavarljivost - CE (ekvivalent ugljenika) 	<ul style="list-style-type: none"> - Skladištenje dodatnog materijala - Sušenje elektroda - Vlaga iz okoline - Vlaga unesena sa dodatnim materijalom 	<ul style="list-style-type: none"> - Zaostali naponi - Zavarena konstrukcija - Oblikovanje detalja zavarene konstrukcije - Tehnologija zavarivanja - Predgrevanje 	<ul style="list-style-type: none"> - Predgrevanje - Dimenzije delova - Postupak i tehnologija zavarivanja - brzina hlađenja - $\Delta t_{8/5}$ - $\Delta t_{8/1}$

Materijal

Kod zavarivanja čelika kao metalnog materijala od najvećeg značaja za pojavu hladnih prsline je njegova ***sklonost ka zakaljivanju***. Generalno, usled prisustva krutih faza u zoni uticaja toplote (visoka tvrdoća ZUT-a), nakon procesa zavarivanja stvaraju se vrlo povoljni uslovi za inicijaciju hladnih prsline. ***ZUT visoke tvrdoće*** (HV=350-400) predstavlja potencijalnu opasnost za pojavu hladnih prsline.

Usled dejstva toplotnog izvora pri zavarivanju čelika u zoni uticaja toplote javljaju se strukturne transformacije i formira se austenit. U zavisnosti od brzine hlađenja austenit se prilikom hlađenja transformiše u neku od međufaznih strukturnih komponenti koje mogu imati različitu i često vrlo visoku tvrdoću. Struktura čelika u zoni uticaja toplote zavisiće od hemijskog sastava osnovnog materijala i uslova zavarivanja (količina unete toplote, debljina osnovnog materijala, temperatura predgrevanja, brzina hlađenja, temperatura okoline...).

Ocenu sklonosti čelika ka delimičnoj ili potpunoj martenzitnoj transformaciji u ZUT-u (zakaljivost čelika), možemo posredno utvrditi na osnovu njegove ***zavarljivosti***. Za ocenu sklonosti prema nastajanju hladnih prsline pri zavarivanju čelika obično se koristi ***ekvivalent ugljenika (CE)***, koji pored sadržaja ugljenika uzima u obzir i ***hemijski sastav***, odnosno uticaj ostalih legirajućih elemenata u čeliku na njegovu zakaljivost. Čelici kod kojih je **$CE \geq 0,4-0,45$** smatraju se sklonim pojavi hladnih prsline tokom zavarivanja.

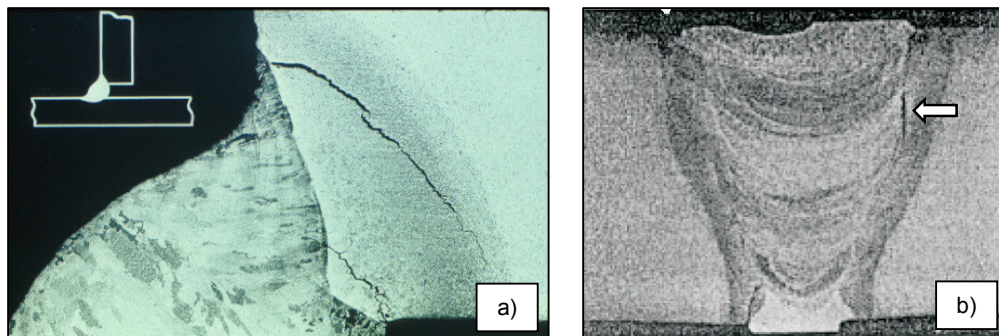
Vodonik

Prezasićenje metala vodonikom tokom procesa zavarivanja dovodi do pojave **vodoničnih prslina**. Da bi se smanjila opasnost od zasićenja metalnog kupatila vodonikom preporučuje se da se neposredno pre zavarivanja elektrode i prah suše na 300-350°C u toku nekoliko časova.

Kao što je već istaknuto ranije, količina vodonika u metalu šava se izražava u ml na 100 g rastopljelog metala. U zavisnosti od tehnologije zavarivanja ova količina se kreće u granicama od 1-30 ml/100g. Rastvorljivost i raspodela vodonika u metalu šava zavise od koncentracije i tipa uključaka, mikrošupljina, dislokacija, makropora i brzine hlađenja. Vodonika koji dospeva u rastopljeno metalno kupatilo je uglavnom u atomarnom obliku i prilikom hlađenja difunduje kroz metal do površine i odlazi u atmosferu. Međutim, u procesu hlađenja, kada temperatura padne ispod 200°C vodonik koji je razmešten na slobodnim površinama (tzv. ponorima vodonika), kao što su granice zrna, uključci i nečistoće, prelazi iz atomarnog oblika u stabilniji molekularan-gasovit oblik. U ovom obliku vodonik ispoljava svoje štetno dejstvo, ne može više da difunduje kroz metal, tako da u metalu šava nastaju gasne šupljine ispunjene molekulima vodonika. Pored toga, u zavisnosti od parcijalnog pritiska gasovitog vodonika u šupljinama, koji može dostići vrlo visoku vrednost, prikom daljeg hlađenja, pa čak i nakon 48h od završetka zavarivanja, stvaraju se uslovi za pojavu hladnih **vodoničnih prslina**, slika 81.

U cilju sprečavanja pojave hladnih vodoničnih prslina neophodno je:

- sprečiti kondenzaciju vlage u zoni zavarivanja,
- adekvatno skladištiti dodatni materijal,
- obaviti propisno sušenje obloženih elektroda ili praška neposredno pre izvođenja procesa zavarivanja i
- izabrati eventualno novi materijal sa nižom sklonošću ka pojavi vodoničnih prslina.



Slika 81. Hladne vodonične prsline u zoni uticaja toplote: a) T-spoj, b) sučeonni spoj

Naponsko stanje

Jedan od najvažnijih uzročnika pojave hladnih prslina su **zaostali naponi** u zavarenom spoju nakon izrade. Intenzitet zaostalih napona je u funkciji od:

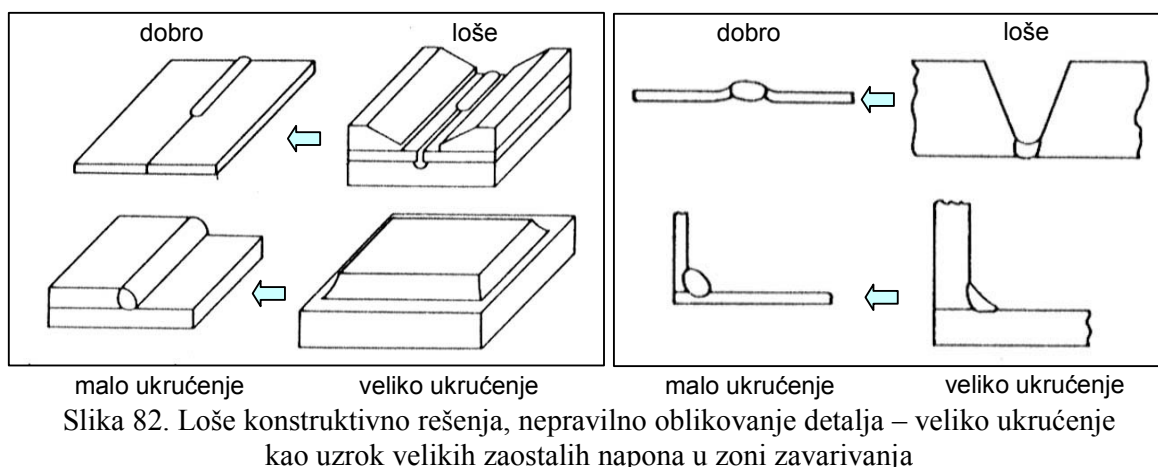
- debljine zavarenog spoja,
- vrste zavarenog spoja i
- krutosti zavarenog dela konstrukcije.

Naponi u zavarenom spoju koji su od značaja za pojavu hladnih prslina mogu se podeliti u četiri grupe:

- zaostali naponi pre početka zavarivanja kao posledica izrade i montaže,
- naponi koji potiču od sopstvene težine delova zavarene konstrukcije,
- termički indukovani naponi tokom hlađenja usled prevelikog ukrućenja i ometene dilatacije, slika 82 i
- termički indukovani naponi usled faznih i strukturnih transformacija.

Veličina zaostalih napona može biti vrlo visoka i bliska, ili čak veća od napona tečenja materijala koji se zavaruje.

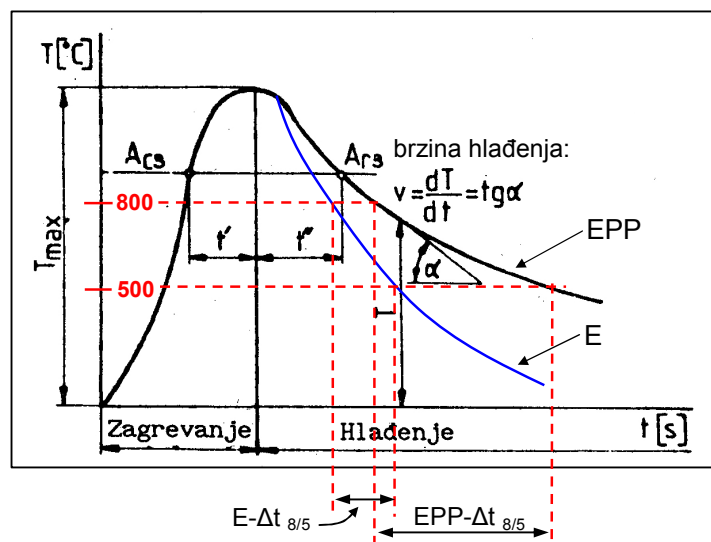
Inicijacija hladnih prslina može usled dejstva samo zaostalih napona u materijalu nakon zavarivanja ili usled superponiranja zaostalih napona sa naponima od sopstvene težine.



Uslovi zagrevanja i hlađenja

Na slici 83 prikazan je termički ciklus prilikom zavarivanja kod E i EPP-postupka. Na dijagramu uočavamo sledeće karakteristične veličine:

- maksimalnu temperatura zagrevanja (T_{max}),
- vreme potrebno za hlađenje od 800 do 500°C ($\Delta t_{8/5}$),
- vreme zagrevanja od temperature A_{c3} do T_{max} (t') i
- vreme hlađenja od T_{max} do temperature A_{c3} (t'').

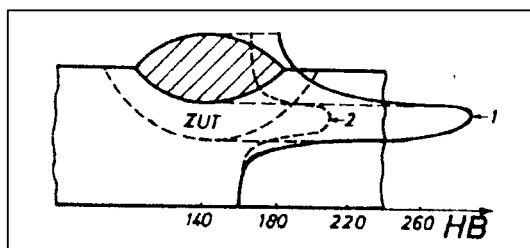


Slika 83. Šematski prikaz termičkog ciklusa pri zavarivanju E i EPP - postupkom

Brzina hlađenja predstavlja jedan od ključnih parametara na koji može da se utiče da bi se izbegao nastanak hladnih prslina. Ako je brzina hlađenja manja od kritične, čime se izbegava **martenzitna transformacija**, dobija se materijal koji ima dovoljnu otpornost na nastanak i rast hladnih prslina. Pri velikim brzinama hlađenja, osim opasnosti od krutih faza u ZUT-u, raste i količina rastvorenog vodonika u metalu šava. Rastvoreni **vodonik** iz rastopljenog metalnog kupatila difunduje ka površini i odlazi u atmosferu jer se njegova rastvorljivost smanjuje pri snižavanju temperature (hlađenju metalnog kupatila, odnosno metala šava nakon kristalizacije). Što je brzina hlađenja manja više je vremena da vodonik napusti metal šava.

Brzina hlađenja takođe zavisi i od **dimenzija delova** koji se zavaruju. Pored toga, velika brzina hlađenja nepovoljno utiče i na pojavu deformacija tokom zavarivanja, kao i velikih **zaostalih napona** nakon zavarivanja. Na slici 83 prikazana je razlika brzina hlađenja kod E i EPP-postupka preko različitih **vremena potrebnih za hlađenje od 800 do 500°C, $\Delta t_{8/5}$** ($E \cdot \Delta t_{8/5} \leq EPP \cdot \Delta t_{8/5}$). Uočava se da je hlađenje znatno sporije pri primene EPP postupka, čime se generalno smanjuje i opasnost od pojave hladnih prslina. Proces difuzije vodonika iz metala u atmosferu prestaje pri temperaturama nižim od 100°C, pa je stoga mnogo bolji pokazatelj sklonosti ka pojavi hladnih vodoničnih prslina zapravo **vreme potrebno za hlađenje od 800 do 100°C, $\Delta t_{8/1}$** .

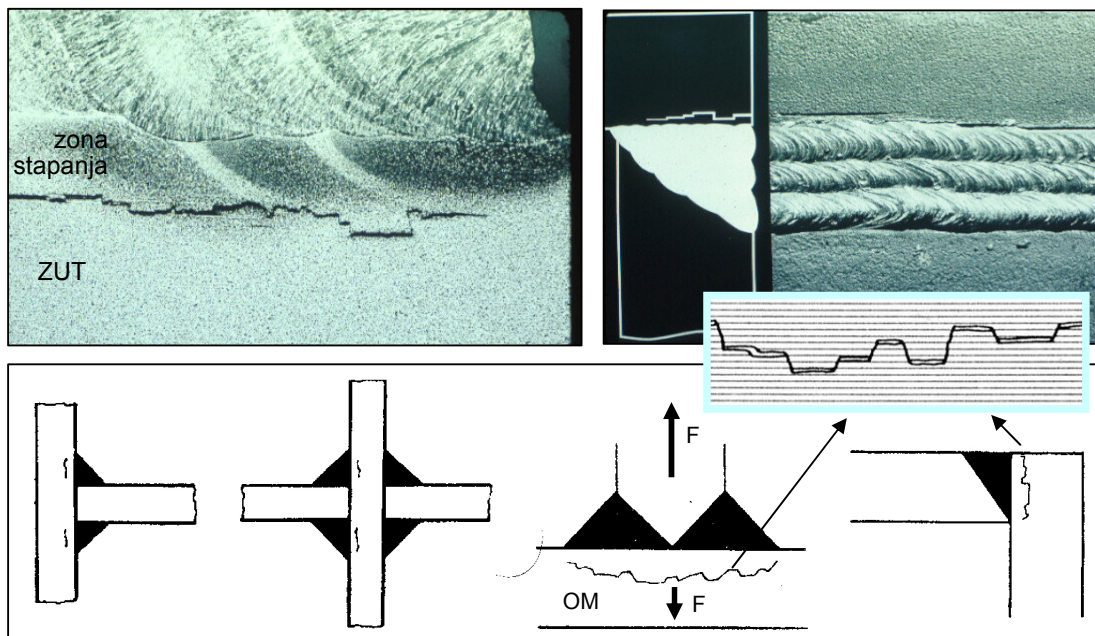
Predgrevanje takođe utiče na smanjenje zaostalih napona, naročito maksimalnih zateznih napona jer se smanjuje neravnomernost skupljanja pri hlađenju (manja je razlika u temperaturi osnovnog metala i metala šava). Pored toga, predgrevanje obezbeđuje **smanjenje brzine hlađenja** koje je često neophodno da bi se sprečila pojava krtih faza u ZUT-u pri zavarivanju pojedinih vrsta čelika. Uticaj predgrevanja na brzinu hlađenja se posredno vidi na slici 84, na kojoj su prikazani različiti profili promena tvrdoće u ZUT-u za slučaj sa i bez predgrevanja.



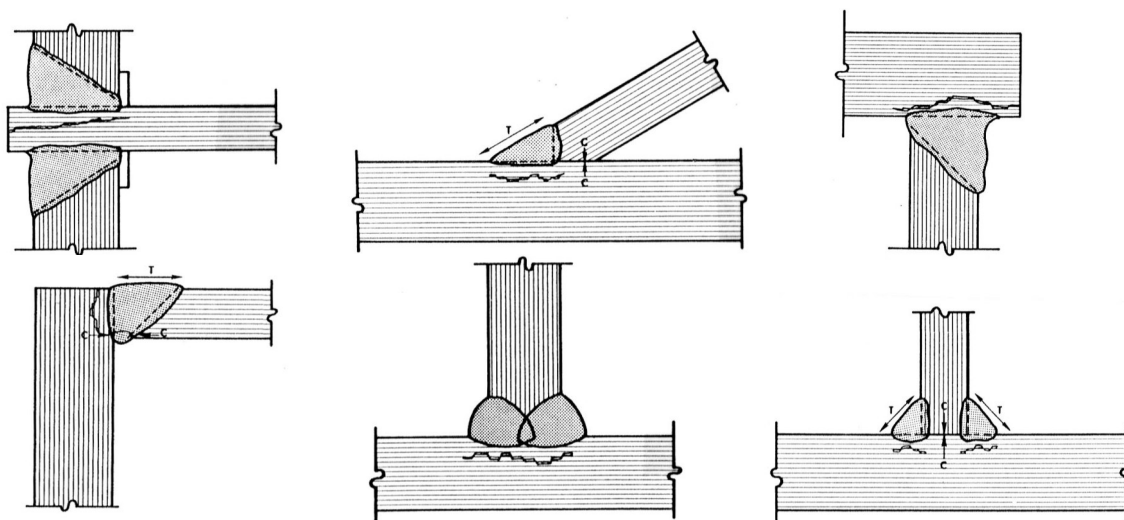
Slika 84. Promena tvrdoće po debljini spoja:
1 – bez predgrevanja; 2-sa predgrevanjem

7.2.1.3. Lamelarne prsline

Lamelarne prsline spadaju u kategoriju **hladnih zakasnelih prslina** (vidi sliku 70), ali se zbog svojih specifičnosti najčešće se tretiraju i proučavaju kao posebna vrsta. Lamelarne prsline nastaju u zoni stapanja i ZUT-u i obično se dalje šire u osnovni materijal, slika 85 i slika 86.



Slika 85. Karakteristične lokacije i makroizgled lamelarnih prslina kod različitih zavarenih spojeva



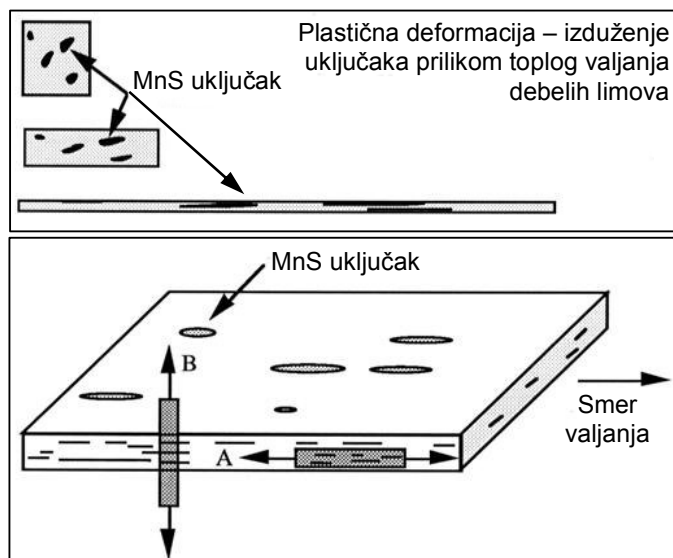
Slika 86. Lokacije lamelarnih prslina kod različitih vrsta spojeva

Lamelarne prsline po pravilu su paralelne površini osnovnog metala i posledica su:

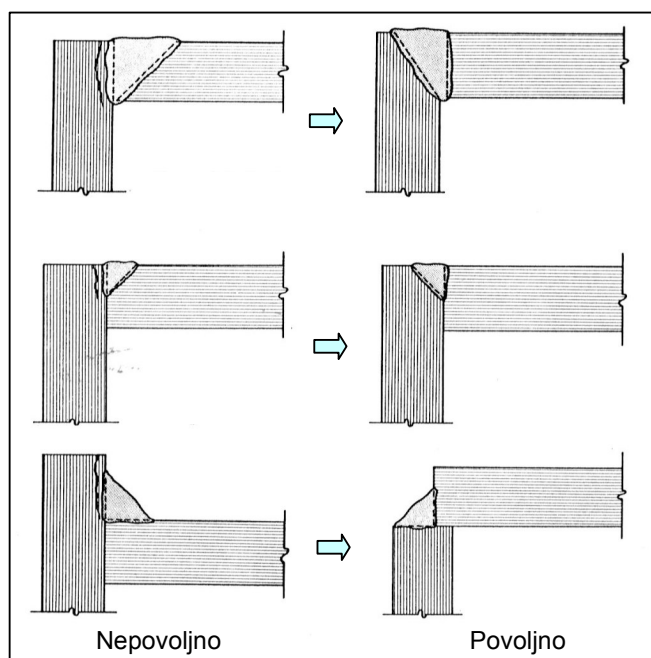
- dejstva zateznih napona u pravcu debljine spoja nastalih u termičkom ciklusu zavarivanja i
- smanjene plastičnosti materijala,

Ove prsline nastaju na relativno niskim temperaturama, a na njihovu pojavu bitno utiču **MnS uključci**, silikati i druge nečistoće koje smanjuju plastičnost materijala u pravcu debljine. Lamelarne prsline imaju karakterističan pojavni oblik i pravac širenja (međusobno paralelne lamele), slika 85. Najčešće se javljaju na **ugaonim, T i krstastim spojevima** veće debljine, slike 85 i 86. Iako su lamelarne prsline tipične za spojeve koji su ukrućeniji od drugih (ugaoni, T i krstasti), one se ipak mogu pojaviti i kod sučeonih spojeva velike debljine kao npr. kod C-Mn čelika zavarenih EPP postupkom, prvenstveno zbog trakaste strukture debelih valjanih limova sa visokom koncentracijom izduženih mangansulfidnih (MnS) uključaka u pojedinim ravnima slika 87.

Lamelarne prsline mogu da se izbegnu dobrim konstruktivnim rešenjem spoja (smanjenjem ukrućenja), slika 88, i korišćenjem osnovnog materijala sa malim sadržajem nečistoća i visokom plastičnošću u pravcu debljine ($S \leq 0,007\%$; $A_5 \geq 25\%$). Takođe, primena predgrevanja smanjuje opasnost od pojave lamelarnih prslina.



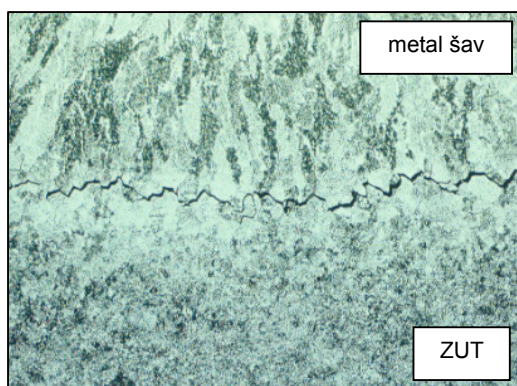
Slika 87. Deformacija nečistoća (MnS uključaka) u materijalu nakon postupka toplog valjanja



Slika 88. Izbegavanje opasnosti od pojave lamelarnih prslina primenom odgovarajućeg konstruktivnog rešenja sa smanjenim ukrućenjem

7.2.1.4. Prsline usled naknadne termičke obrade (prsline žarenja)

Prsline usled ponovnog zagrevanja nastaju u ZUT-u ili metalu šava tokom termičke obrade posle zavarivanja, slika 89. Najčešće se javljaju **kod legiranih čelika**. Važno je istaći da **ovaj tip prslina nastaje prilikom zagrevanja**, a ne tokom hlađenja, kao što je to slučaj kod prethodno opisanih tipova prslina.



Slika 89: Prslina usled naknadne termičke obrade kod toplotno postojanog Cr-Mo-V čelika

Osnovni uzrok nastanka prslina usled termičke obrade je sličan kao i kod ostalih tipova prslina:

- termički indukovani zatezni naponi,
- zaostali naponi i
- razlika u čvrstoći granica i unutrašnjosti metalnih zrna.

Razlika u čvrstoći granica i unutrašnjosti metalnih zrna je tipična za čelike koju se ojačani mehanizmom disperzionog ojačavanja, usled čega se deformacija pri dejstvu **termičkih napona** tokom zagrevanja koncentriše po granicama zrna. Kako su granice zrna kod disperziono ojačanih čelika manje čvrstoće, duž njih lako dolazi do lokalnog loma, odnosno nastanka prslina koje se dalje šire međukristalno (kroz zrna), slika 89.

Na mogućnost pojave prslina usled ponovnog zagrevanja značajan uticaj imaju **zaostali naponi** nakon izrade zavarenog spoja koji se superponiraju sa termičkim naponima pri zagrevanju (naknadnoj termičkoj obradi), a kao rezultat u pojedinim zonama zavarenog spoja (zona stapanja, granica ZUT-MŠ) lokalna vrednost ukupnih zateznih napona (zaostali plus termički indukovani) može biti vrlo visoka i približna naponu tečenja materijala usled čega nastaju prsline.

Preporuke za sprečavanje nastanka prslina žarenja:

- izbegavati čelike legirane sa vanadijumom i imati u vidu nepovoljan uticaj ostalih karbidoobrazujućih elementa (Nb, Ti, Mo, Cr),
- smanjiti ukrućenje zavarene konstrukcije ili promeniti tehnologiju termičke obrade pojedinih zavarenih spojeva i
- strogo kontrolisati brzinu zagrevanja pri žarenju ili početi zagrevanje pre završetka hlađenja zavarenog spoja.