

3.1 PUKOTINE (skupina 100)

Pukotine se smatraju najopasnijim pogreškama u zavarenom spoju. Bitno smanjuju nosivi presjek zavarenog spoja i čvrstoću zavarenog spoja. Zbog toga pukotine nisu dopuštene u zavarenom spoju. Pukotine su pogreške koje se najviše obrađuju kako u teoretskom tako i u praktičnom smislu. Veliki je broj konstrukcija čiji je otkaz nastao naknadnom pojavom pukotine a sve zbog promašaja u fazama prije ili nakon nastanka zavarenog spoja.

Postoji više vrsta pukotina i mehanizama njihovog nastajanja, no u praksi se najčešće susreću hladne pukotine, dok se i ostale trebaju shvatiti jednako ozbiljno. Razlog tomu je što svaka pukotina u uvjetima koji pogoduju njenom širenju može dovesti do otkaza zavarenog spoja ili proizvoda u eksploataciji.

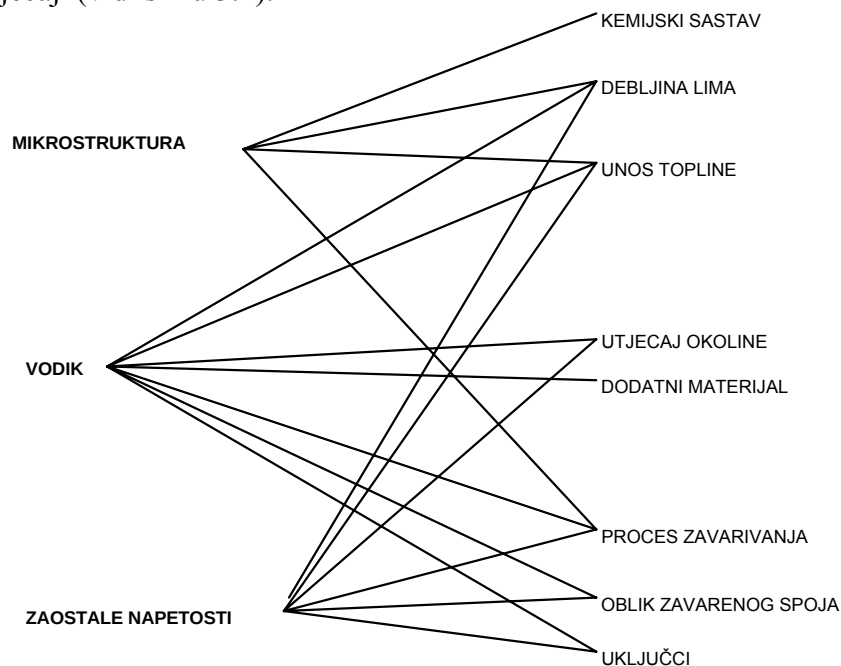
3.1.1 Hladne pukotine

Nastaju nakon izvršenog zavarivanja na temperaturi nižoj od 250 - 200 °C. [1] Nazivaju se i zakašnjele hladne pukotine. Mogu se pojaviti i par dana nakon zavarivanja. Mogu biti uzdužno ili poprečno položene na zavar ili na prijelazu u osnovni materijal. S obzirom na smjer rasprostiranja govorimo o longitudinalnim (L) i transferzalnim (T) pukotinama. Mogu biti vidljive i nevidljive za ljudsko oko odnosno mikro ili makro pukotine.

Glavni uzročnici nastajanja hladnih pukotina su:

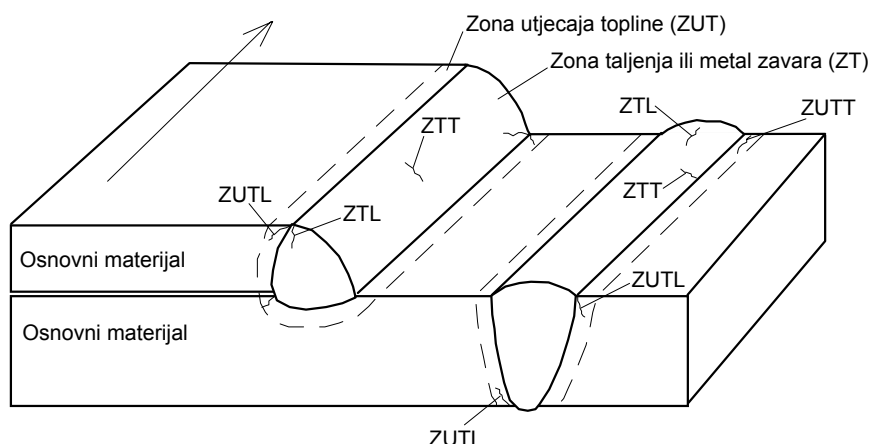
- zbog nepovoljnog položaja uključaka u zavaru;
- zbog skupljanja zavara – djelovanje naprezanja, postojanje zaostalih napetosti;
- kod struktura metala zavara;
- zbog prisutnosti vodika u zavaru;
- kod metala sklonog otvrdnjavanju, naročito u ZUT-u;
- zbog sklonosti materijala prema zakaljivanju.

Za nastajanje hladnih pukotina nužni su svi navedeni uzročnici, nastajanje je veće ukoliko je veći njihov utjecaj (vidi sliku 3.1).



Slika 3.1 Shema uzročnika nastajanja pukotina [1]

Prijelomljena površina kod hladnih pukotina je svijetla, za razliku od toplih pukotina kod kojih je prijelomna površina tamnija. Kod toplih pukotina dolazi do površinske oksidacije jer nastaju na povišenim temperaturama.

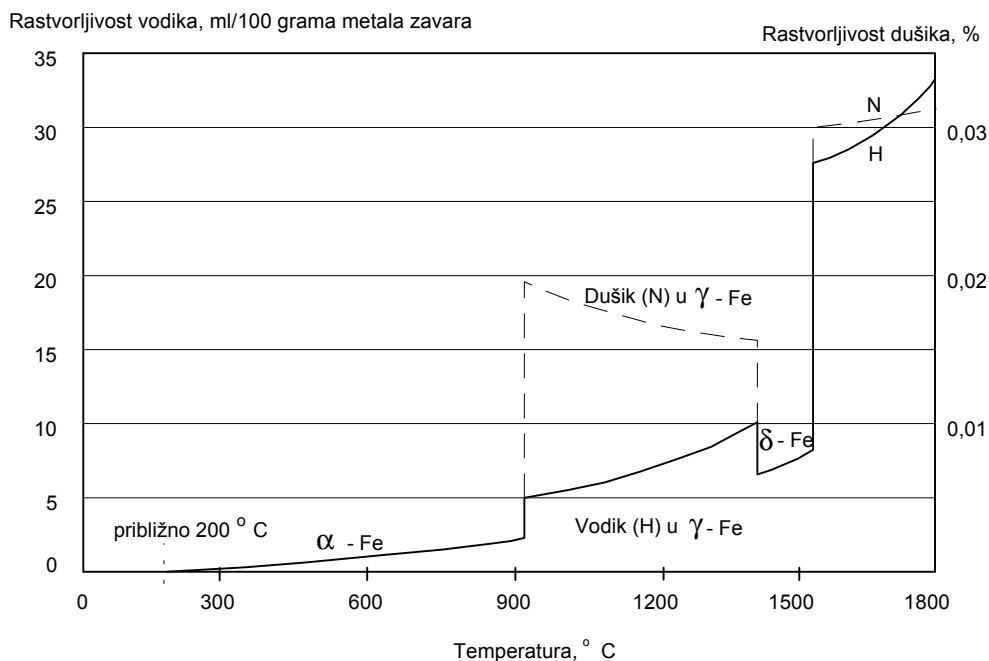


Slika 3.2 Lokacije i orijentacije hladnih pukotina [1]

Nastajanje hladnih pukotina je vrlo složen postupak. Vodik u talini zavora kod visokih temperatura se nalazi u atomarnom stanju.

Pri hlađenju vodik prelazi u molekularno stanje i smješta se u materijal na mjestima gdje su nastale sitne pogreške, i u tim mjestima nastaju vrlo visoki tlakovi. Zbog utjecaja visokih tlakova oni se međusobno povezuju u manju ili veću pukotinu, posebno kada još dodatno djeluju visoko naprezanje nastalo zbog skupljanja metala zavora.

Hladne pogreške su vrlo česte kod reparaturnih zavora, uglavnom kod slabo zavarenog čelika ili na mjestima gdje su nakon zavarivanja vrlo visoka zaostala naprezanja. Najveći uzročnik nastajanja hladnih pukotina je VODIK. On dolazi u zavar razlaganjem vlage na visokim temperaturama, u oblozi elektrode ili u zaštitnom plinu ali i iz drugih nečistoća koje se nalaze na površini mjesta zavora kao što su: vlaga, hrđa masnoća. Ponekad vodik koji je ostao zarobljen u zavarenom spoju ne izaziva pukotine. Međutim na površini loma se mogu uočiti tzv. "riblje oči" i "pahuljice". Ta su mjesta karakteristična jer se na njima nakupio vodik koji nije defundirao iz zavarenog spoja. On predstavlja diskontinuitet u zavarenom spoju, a to dovodi do smanjivanja nosivosti presjeka.



Slika 3.3 Prikaz rastvorljivost vodika i dušika u čistom željezu [1]

3.1.2 Tople pukotine

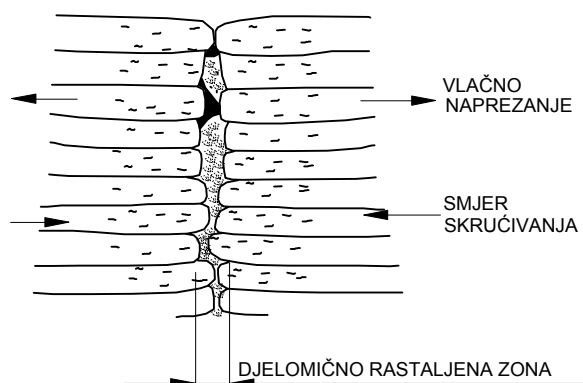
Ove pukotine nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Prostiru se po granicama zrna materijala i to najčešće po dužini u sredini zavara, a moguće su i u ZUT-u. Posljednja faza skrućivanja metala zavara kod visokih temperatura dovodi do naprezanja koju zavar ne može izdržati, što se smatra glavnim uzrokom nastajanja toplih pukotina.

Nastajanje toplih pukotina može se objasniti na slijedeći način:

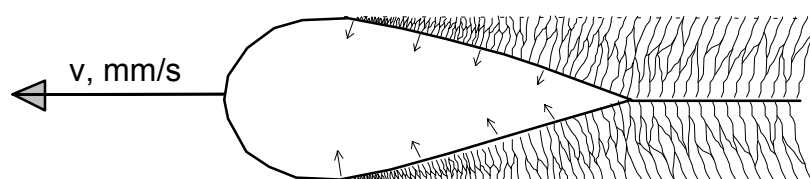
- talinu popunjava dio između stranica žlijeba, skrutnjavanje zavara započinje od stranica koje su hladnije i ide prema sredini;
- ako nadvlada skupljanje u procesu između skupljanja i skrućivanja, zrna materijala će ostati razdvojena u toplom stanju- topla pukotina;
- između zrna skrućenog materijala preostaje tanki film taline u završnoj fazi skrutnjavanja. Područje skrutnjavanja materijala skuplja se u smjeru suprotnom od pravca skrutnjavanja.

Postoje **kristalizacijske i likvacijske** tople pukotine.

Kristalizacijske tople pukotine nastaju pri kristalizaciji u zoni taljenja. Kristalizacija metala zavara je pojava koja se dešava pri hlađenju rastaljenog materijala u žlijebu zavara. Eventualne nečistoće koje se zadese ostaju zarobljene između kristala. Uslijed skupljanja zavara djelovanjem naprezanja dolazi do nastajanja tople pukotine.



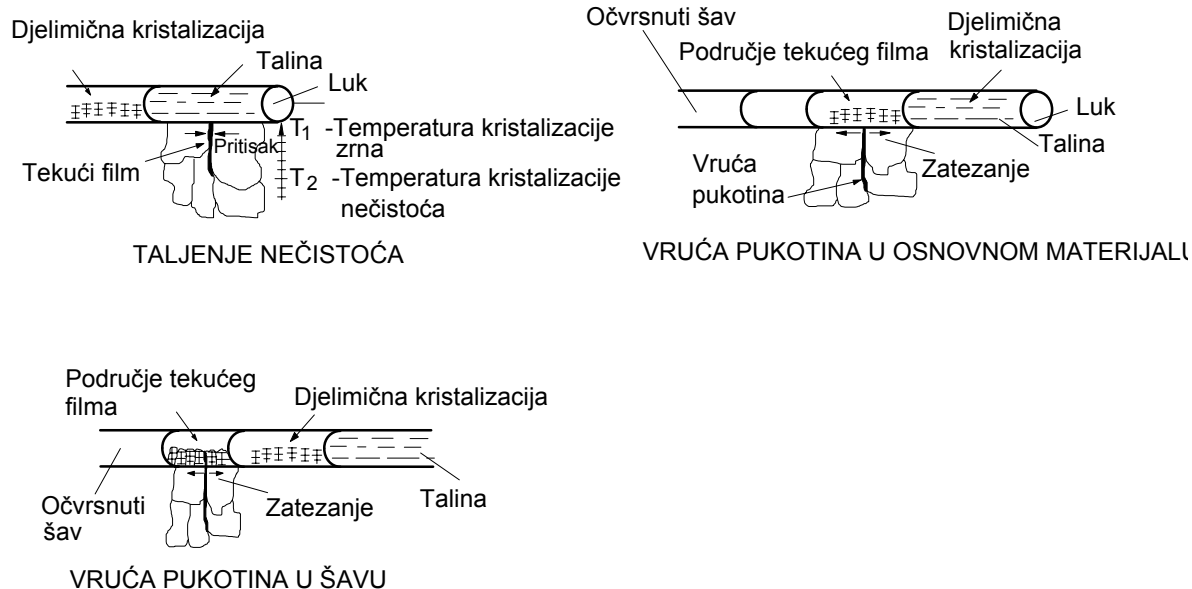
Slika 3.4 Shematski nastajanja kristalizacijskih segregacijskih pukotina [1]



Slika 3.5 Rast kristala – dendrita u zoni taljenja [1]

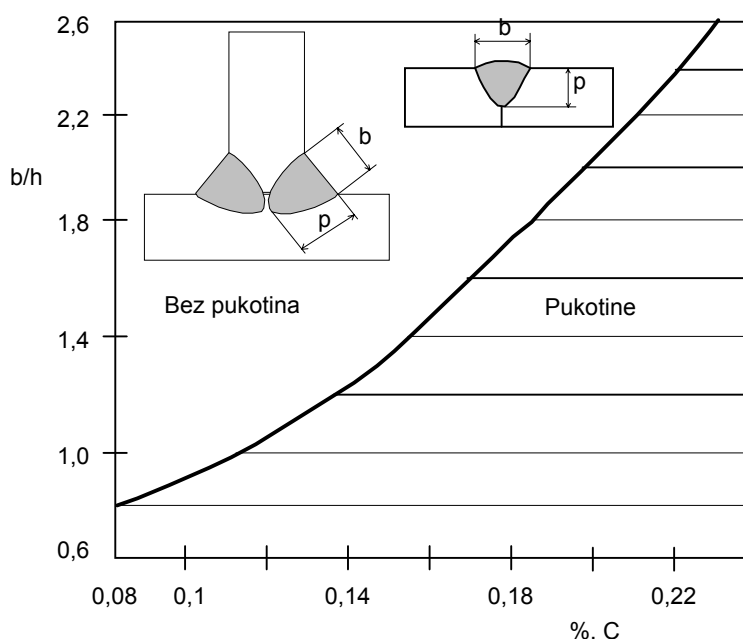
Likvidacijske pukotine najčešće nastaju u zoni utjecaja topline. Njihovo nastajanje je poprečno ili okomito na uzdužnu os zavara. Nastaju zbog nečistoća koje su raspoređene po granicama zrna osnovnog materijala u zoni utjecaja topline. Prilikom hlađenja zavarenog spoja, a zbog djelovanja naprezanja, dolazi do nastajanja toplih pukotina likvidacijskog tipa, na mjestima gdje se nalaze nečistoće. Nečistoće su zbog utjecaja topline pri zavarivanju djelomično ili potpuno rastaljene. Dakle, u zoni utjecaja topline nije došlo do taljenja osnovnog materijala, ali je zbog omekšavanja ili taljenja “tankih slojeva filma” od nečistoća došlo do pada čvrstoće po granicama kristalnih zrna.

Mehanizam nastajanja likvacijskog tipa pukotine



Slika 3.6 Nastajanje likvidacijskog tipa pukotina [1]

Pojavljivanje toplih pukotina veže se uz odnos penetracije i širine zavora prema sadržaju ugljika u zavaru (slika 3.7).



Slika 3.7 *Pojavljivanje toplih pukotina obzirom na odnos penetracije i širina zavora prema sadržaju ugljika u zavaru [1]*

Toplotne pukotine su posebno izražene kod povećanja onečišćenja taline u posljednjoj fazi skrućivanja i kod nepovoljnog oblika zavora.

3.1.3 Izbjegavanje nastajanja pukotina

Nestajanje pukotina se ne može izbjeći, ali se mogu određenim mjerama smanjiti i djelomično otkloniti.

Prilikom izvođenja konstrukcije treba tražiti rješenja sa što manje unošenja dodatnog materijala i što manjom ukrucenosti zavarenog spoja. Unos toplinske energije (E) ima važnu ulogu pri pravilnom izboru postupka zavarivanja, parametara i ostalih uvjeta zavora.

$$E = (I \times U \times 60 \times q) / (v \times 100) \text{ (KJ/cm)}$$

I- jakost struje zavarivanja (A)

U- napon električnog luka (V)

v- brzina zavarivanja (cm)

q- koeficijent iskoristivosti električnog luka

Dodatni materijal za zavarivanje igra veoma važnu ulogu, gdje je uputno koristiti preporuke za uporabu proizvođača dodatnih materijala.

Vrlo je važno smanjiti pristup vodik u zavaru: mjesto zavarivanja mora biti čisto od vlage i drugih nečistoća. Kod zavarivanja čelika treba birati elektrode s bazičnom oblogom i malim sadržajem vodika, bazično punjenje žice i bazične praške.

Veoma je bitno rukovanje i pravilno sušenje dodatnih materijala. U hladnim danima naročito se preporučuje da se mjesto spoja osuši plamenikom, bez obzira što izgleda suho, ako nema pregrijavanja.

Sklonost hladnim pukotinama procjenjuje se analitički na osnovi različitih formula za ekvivalent ugljika. Svi nelegirani i niskolegirani čelici kod kojih ekvivalent ugljika C_{ekv} .

$$C_{ekv} = C + Mn/6 + Ni/15 + Mo/4 + Cr/5 + Cu/13 + Si/26 + P/2 + V/5$$

Prelazi vrijednost 0,45, skloni su pukotinama.

Da bi se izbjegle pukotine treba ih pregrijavati prije zavarivanja i držati na odgovarajućoj temperaturi tijekom zavarivanja (temperatura između prolaza).

Vizualna kontrola zavarenih spojeva izvodi se prije svih kontrola pomoću odgovarajućih povećala i osvjjetljenja. Površinske pukotine i pukotine kroz cijelu debljinu lima najbolje se otkrivaju magnetskom i metodom penetrantske kontrole.

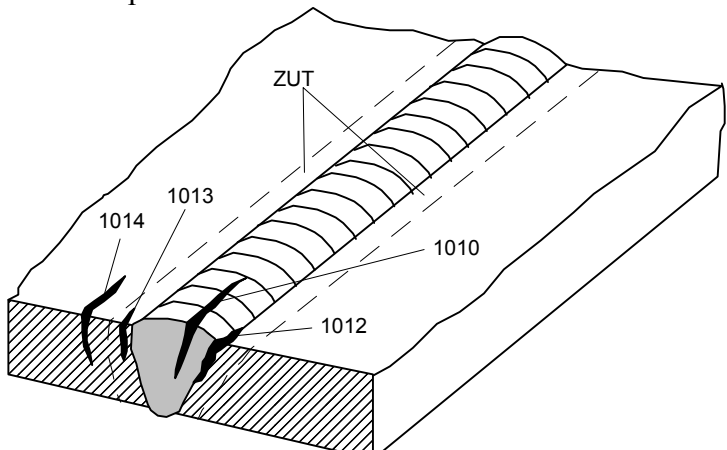
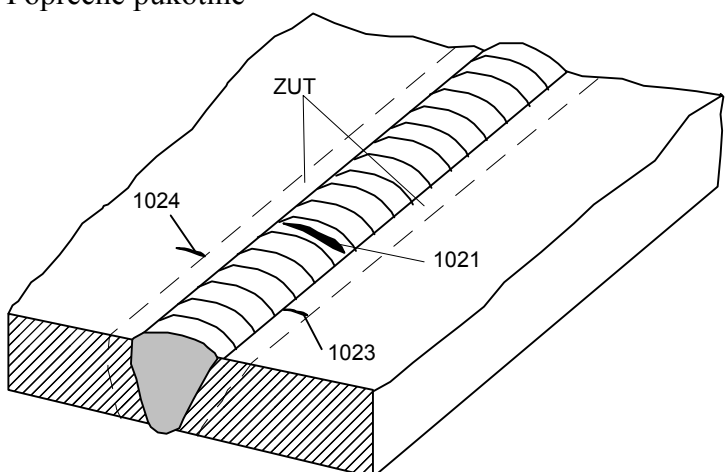
Slijedom navedenih primjera i uzroka nastajanja pukotina, mogu se postaviti osnovna pravila za izbjegavanje nastajanja pukotina:

- pravilan izbor postupka zavarivanja;
- pravilan izbor dodatnog materijala (savjetuje se dodati detaljne preporuke proizvođača);
- sušenje elektrode prije zavarivanja;
- izbjegavati oštećenja površine materijala;
- provoditi redoslijed zavarivanja koji osigurava najmanja zaostala naprezanja;
- ograničiti unos topline tijekom zavarivanja i
- čistoća u pripremi spoja za zavarivanje;

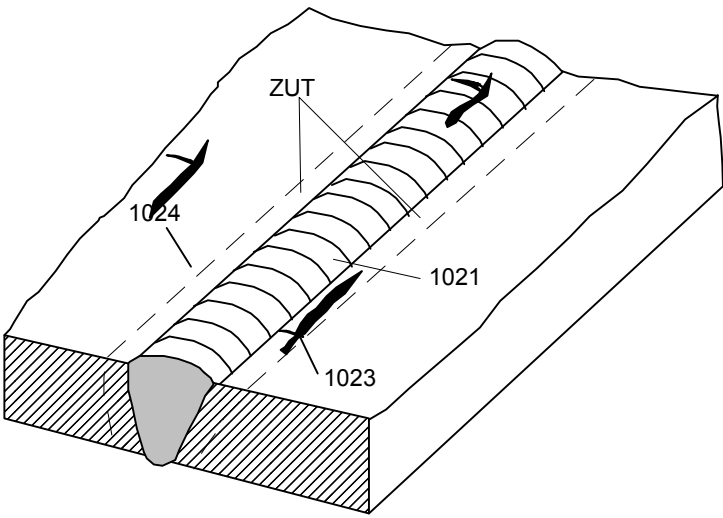
po potrebi vršiti pregrijavanje i održavanje temperature.

Tablica 3.1

Pogreške tipa **pukotine** (skupina 100) [3]

Oznaka		Objašnjenje	Naziv i shematski prikaz pogreške
EN	IIW		
100	E	Diskontinuitet uslijed lokalnog loma koji može nastati kao posljedica utjecajem zavarivanja	Pukotine
1001	-	Pukotina sa mikroskopskim dimenzijama	Mikropukotine
101	Ea	Pukotina čiji je glavni pravac paralelan sa osom šava, (uzdužno na zavar) Može se nalaziti:	Uzdužne pukotine
1011	-	- u zavaru	
1012	-	- na granici pretaljivanja	
1013	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1014	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	
102	Eb	Pukotine čiji je pravac poprečan na os zavara. Može se nalaziti:	Poprečne pukotine
1021	-	- u zavaru	
1023	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1024	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	

103	E	Pukotine koje polaze iz iste točke i zrakasto se rasprostiru. Mogu se nalaziti:	Pukotine zvjezdastog oblika
1031	-	- u zavaru	
1032	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1033	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	
104	Ec	Pukotina u završnom krateru šava; može biti:	Pukotine u završnom krateru
1041	-	- uzdužno na zavar	
1042	-	- poprečno na zavar	
1043	-	- zvjezdasta	
105	E	Skupina odvojenih pukotina sa različitom orijentacijom. Može se nalaziti:	Pukotine u odvojenim skupinama
1051	-	- u zavaru	
1053	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1054	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	

106	E	Skup pukotina koje su međusobno povezane i polaze iz iste točke. Treba ih razlikovati od grupe odvojenih pukotina (105), i od pukotina zvjezdastog oblika (103). Mogu se nalaziti:	Razgranate pukotine 
1061	-	- u zavaru	
1063	-	- u zoni utjecaja topline (ZUT)	
1064	-	- u osnovnom materijalu, izvan ZUT-a	