

Hladne pukotine u zavarenim spojevima

Čalopek, Matko

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:801167>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 166/PS/2015

Hladne pukotine u zavarenim spojevima

Matko Čalopek, 4159/601

Varaždin, prosinac 2015. godine



**Sveučilište
Sjever**

Odjel za proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 166/PS/2015

Hladne pukotine u zavarenim spojevima

Student

Matko Čalopek, 4159/601

Mentor

Marko Horvat, dipl. ing.

Varaždin, prosinac 2015. godine

Zadatak

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR-43000 Varaždin



Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Matko Čalopek	MATIČNI BROJ	4159/601
DATUM	09.12.2015.	KOLEGIJ	Tehnologija III
NASLOV RADA	Hladne pukotine u zavarenim spojevima		
MENTOR	Marko Horvat	ZVANJE	predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Veljko Kondić, mag. ing. mech., predavač		
	2. Marko Horvat, dipl.ing., predavač		
	3. mr. sc. Zlatko Botak, viši predavač		
	4. _____		
	5. _____		

Zadatak završnog rada

BROJ	166/PS/2015
OPIS	<p>U Završnom radu potrebno je obraditi osnovne termine iz tehnologije zavarivanja, objasniti pojam zavarljivosti te obraditi klasifikaciju pogrešaka u zavarenim spojevima.</p> <p>Pojam hladnih pukotina, kao moguće pogreške u zavarenim spojevima, potrebno je obraditi s gledišta: uzroka nastajanja, sastava, mjesta pojavljivanja i pojavnih oblika, mogućnosti izbjegavanja te metoda ispitivanja sklonosti nastajanja hladnih pukotina.</p> <p>U zaključku Završnog rada potrebno je dati kritički osvrt na mogućnost nastajanja i sprečavanje pojave pogrešaka u zavarenim spojevima uz naglasak na pojavu hladnih pukotina te uvjeta u kojima nastaju.</p>

ZADATAK URUČEN

16.12.2015.



Predgovor

Zahvaljujem se svome mentoru Marku Horvatu, dipl. ing. stroj., koji mi je svojim stručnim savjetima pomogao i oblikovao ideju u izradi ovoga rada. Također zahvalu upućujem i susretljivim djelatnicima poduzeća MIDI d.d. Ivanovec, na ustupljenim materijalima, pomoći i vremenu.

Želim se zahvaliti i svim djelatnicima Sveučilišta Sjever u Varaždinu koji su svojim radom pomogli u stjecanju moga znanja o strojarstvu, te životu u struci i oko nje. Zahvaljujem se i svim kolegama koji su mi vrijeme provedeno na fakultetu uljepšali svojim prisustom.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojoj obitelji, roditeljima, te djevojci Barbari, koji su uvijek bili tu, uz mene, bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

Sažetak

U današnje vrijeme ne postoji djelatnost kod koje se ne javljaju pogreške, pa tako je i kod zavarivanja, pogreška sasvim normalna pojava. U samom uvodu završnog rada, navedeni su općeniti pojmovi o zavarivanju, odnosno zavarljivosti. Tema ovog završnog rada su pogreške koje se mogu pojaviti tijekom, te nakon zavarivanja. Opisana je podjela pogrešaka redom: pukotine, šupljine - poroznost, čvrsti uključci, naljepljivanje i nedovoljan provar, pogreške oblika zavara, te ostale pogreške. Navedeni su glavni uzroci nastajanja pogrešaka i načini na koji bi se one mogle "ublažiti", odnosno smanjiti.

U nastavku rada, detaljnije je opisana jedna skupina pogrešaka, a to su pukotine. Pukotine su jedne od najčešćih pogrešaka koje se pojavljuju kad je u pitanju zavarivanje. Pukotine se dijele na tople i hladne pukotine. Opisan je nastanak hladnih pukotina i pojašnjeni su glavni uzroci nastanka. Navede su i opisane metode ispitivanja hladnih pukotina, te na koji način se one mogu umanjiti.

Na kraju rada su objašnjene metode kojima je moguće ispitivati hladne pukotine. To su Implant metoda, Tekken metoda, CTS metoda (engl. Control Thermal Severity) i Lehigh metoda.

KLJUČNE RIJEČI: zavarljivost, zavar, pogreške, pukotine, hladne pukotine, metode ispitivanja hladnih pukotina, Implant metoda, Tekken metoda, CTS metoda, Lehigh metoda

Korištene kratice

ZUT - zona utjecaja topline

ZT - zona taljenja

REL - ručno elektrolučno zavarivanje

EPP - elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška

MIG - zavarivanje metala u zaštiti inertnog plina

MAG - zavarivanje metala u zaštiti aktivnog plina

TIG - zavarivanje metala u zaštiti aktivnog plina s punjenom žicom

ISO - engl. International Organization for Standardization - Međunarodna organizacija za standardizaciju

EN - engl. European Standard - Europska standardizacija (norma)

IWW - engl. International Institute of Welding - Internacionalni institut za zavarivanje

TMCP - čelici proizvodni termo-mehanički kontroliranim procesima

HSLA - eng. High Stength Low-Alloy steel - Sitnoznati mikrolegirani čelik povišene čvrstoće

HTLA - engl. Heat Treatable Low Alloy - Poboljšani niskolegirani čelik

CTS - engl. Control Thermal Severity - Kontrolirana termička ozbiljnost

Korišteni simboli

a - zadana debljina kutnog zavara (visina) [mm]

b - širina nadvišenja zavara [mm]

d - promjer šupljine (pore) [mm]

h - veličina pogreške (širina i visina) [mm]

l - dužina pogreške (označava se i dužina mjestimičnog zavara) [mm]

s - propisana dubina provara ili nazivna debljina sučeljenog zavara [mm]

z - zadana veličina stanice kutnog zavara ($z = a \sqrt{\quad}$) [mm]

C_{ekv} - ekvivalent ugljika [%C]

E - unos toplinske energije —

- jakost struje zavarivanja [A]

- napon električnog luka [V]

- brzina zavarivanja [cm/min]

- koeficijent iskoristivosti električnog luka

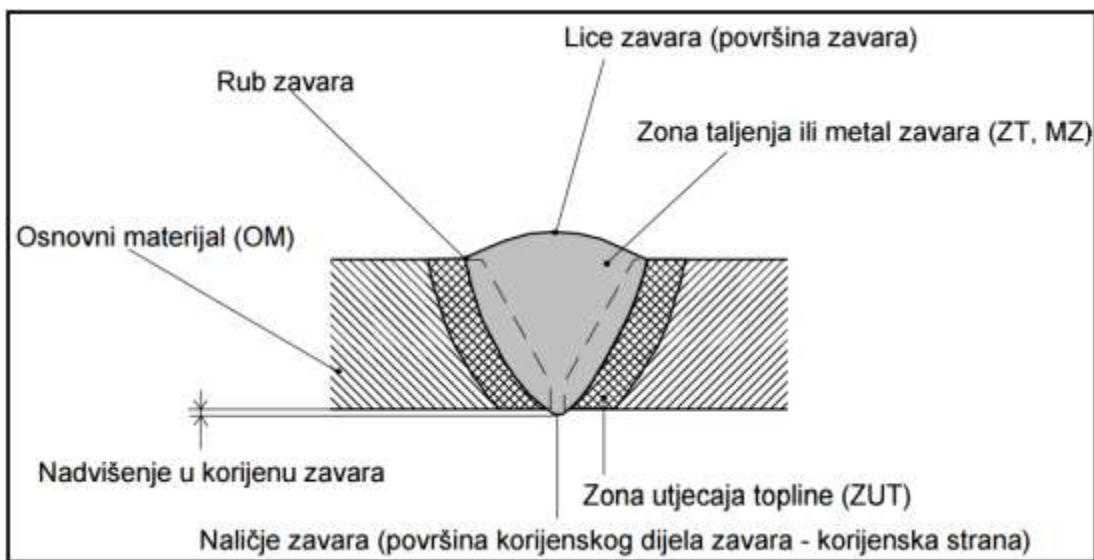
SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. NAZIVI I PODJELA ZAVARENIH SPOJEVA	3
3. POGREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA	10
4. PODJELA POGREŠAKA U ZAVARENOM SPOJU	12
4.1 Pukotine (skupina 100)	13
4.2 Šupljine - poroznost (skupina 200)	15
4.3 Čvrsti uključci (skupina 300)	17
4.4 Naljepljivanje i nedovoljan provar (skupina 400)	19
4.5 Pogreške oblika zavara (skupina 500)	21
4.6 Ostale pogreške (skupina 600)	24
5. PUKOTINE (PODJELA)	26
5.1 Tople pukotine	26
5.2 Hladne pukotine	28
5.2.1 Uzročnici nastajanja hladnih pukotina	29
5.2.2 Sustav nastajanja hladnih pukotina	29
5.2.3 Mjesta nastajanja hladnih pukotina	30
5.2.4 Pojavni oblici hladnih pukotina	30
5.2.5 Rastvorljivost vodika i dušika kod hladnih pukotina	32
5.2.6 Ekvivalent ugljika kod hladnih pukotina	33
5.2.7 Izbjegavanje nastanka hladnih pukotina	40
6. METODE ZA ISPITIVANJE SKLONOSTI NASTAJANJA HLADNIH PUKOTINA	44
6.1 Implant metoda	45
6.2 Tekken metoda	50
6.3 CTS metoda	54
6.4 Lehigh metoda	57
7. ZAKLJUČAK	59
LITERATURA	60

1. UVOD

Zavarljivost je jedan ključni pojam u zavarivačkoj tehnologiji, pa se može reći da je zavarljivost svojstvo zavarivanog metala koje pokazuje da se određenim postupkom zavarivanja može ostvariti homogeni spoj, koji će udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku uporabe zavarenog proizvoda ili strukture. Na zavarljivost metala utječu: kemijski sastav (poglavito udio legiranih elemenata i mogućih nečistoća), dimenzije dijelova koji se zavaruju, vrsta dodatnog materijala, priprema spoja za zavarivanje, i drugo. Homogenost se zavarenog spoja može narušiti, prije svega, pojavom pukotina, nemetalnih uključaka i poroznosti, pa se zavarljivost metala često ocjenjuje na temelju sklonosti pojavi pukotina. Zahtjevi za dobro zavarljive čelike su: zadovoljavajuća žilavost osnovnog metala, kemijski sastav mora biti takav da nakon hlađenja ne dolazi do porasta krhkosti, što manje ugljika jer ugljik utječe na porast zakaljivosti, tvrdoće i krhkosti. [1]

Zavarivanjem se mogu spajati metalni (čelici, Al, Cu, Ni i njihove legure) i nemetalni materijali (termoplastični dijelovi i dr.). Na *slici 1.1*, koja prikazuje presjek kroz zavareni spoj, sastoji se od zone taljenja (ZT), zone utjecaja topline (ZUT), te osnovnog materijala. [2]



Slika 1.1 Presjek kroz zavareni spoj (ZT, ZUT, te osnovni materijal) [3]

Dio zavarenog spoja, koji je tijekom zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i skrućivanja, naziva se zona taljenja. U ovoj zoni se odvijaju procesi slični kao pri proizvodnji metala u pećima (međusobno djelovanje rastaljenog metala, troske i okoline).

Kao i kod svake djelatnosti, tako i kod zavarivanja, dolazi do raznih pogrešaka. U savršenom stanju nema pogrešaka i tu su svi čimbenici usklađeni odnosno idealno uravnoteženi, toliko skladno da ono gotovo ne postoji. U našem stvarnom svijetu mnogo toga teži savršenstvu, a malo toga mu se približava. [4]

Svaki zavareni spoj je daleko od savršenstva. Mnogi čimbenici koji djeluju na vrsnoću zavarenog spoja, u određenoj mjeri su optimizirani, tj. dovedeni do najprihvatljivijeg stanja. Svaki kvalitetno izveden zavar, nikada nije savršen. Postavlja se pitanje: zašto je zavarivanje toliko u upotrebi da predstavlja gotovo nezamjenjiv postupak spajanja dijelova raznih konstrukcija? Jedan od odgovora bi zasigurno bio: zavarivanje je najekonomičniji, najbrži i danas najsigurniji postupak neraskidivog spajanja materijala! "Stara uzrečica: "Tko radi taj i griješi" vrijedi, razumije se, i za zavarivače. Međutim, malo je primjera iz svijeta (nešto su brojniji u tehnici) gdje su pogreške normirane i dosljedno razvrstane". [4]

U nastavku rada su detaljnije opisane sve moguće pogreške i načini na koji bi se one mogle smanjiti.

2. NAZIVI I PODJELA ZAVARENIH SPOJEVA

Zbog jednoznačnosti i jasnoće, objašnjeni su nazivi i oznake koji se najčešće koriste u izvedbi zavarenog spoja kao i nazivi pogrešaka u zavarenom spoju pri zavarivanju taljenjem [5]:

Zavar je pretaljeni i skrutnuti metal osnovnog i dodatnog materijala ili samo osnovnog materijala, ako se dodatni materijal ne koristi.

Zavareni spoj je ostvarena veza zavarivanjem između dva ili više osnovnih materijala. Kod zavarivanja metala taljenjem spoj se sastoji, uz osnovni materijal, od metala zavara, granice pretaljivanja i zone utjecaja topline.

Tople pukotine su pukotine koje nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja.

Hladne pukotine su pukotine koje nastaju nakon izvršenog zavarivanja na temperaturama ispod 250°C, nekad nastaju i više sati nakon zavarivanja.

Čvrsti uključci su tijela u metalu zavara, a mogu biti nemetalni i strani metali.

Poroznost u metalu zavara su oni plinoviti uključci koji se pojavljuju u zavaru i na površini zavara, a pojavljuju se u obliku šupljina.

Naljepljivanje je nepostojanje čvrste strukturne veze u zavarenom spoju ili navaru.

Nedovoljan provar je nedovoljno protaljivanje po presjeku zavarenog spoja.

Ugorine su oštećenja uz zavar u obliku oštih zareza.

Oštar prijelaz zavara je nagli, stepenasti prijelaz površine zavara na osnovni materijal u sučeljenom spoju.

Preveliko nadvišenje zavara je "nagomilan" metal zavara na površini kutnog ili sučeljenog spoja, te na korijenu sučeljenog zavara.

Preklop zavara je površinski dio materijala zavara izvan žlijeba, koji nije staljen s osnovnim materijalom.

Posmaknutost u sučeljavanju je odstupanje od ravnine u sučeljavanju stijenki na sučeljnem spoju.

Utonulost zavara je nedopušteni, udubljeni i promijenjeni oblik zavara, nastao utjecajem sile teže pri zavarivanju.

Nepравilan izgled zavara je odstupanje od zahtijevanog izgleda površine zavara, neravnomjerna površina ili neravnomjerna širina zavara.

Nesimetrični kutni zavar je odstupanje od zadane simetrije kutnog zavara.

Progaranje je udubina, odnosno rupa u zavaru, koja je nastala progaranjem.

Nedovoljno popunjen zavar je prenizak sloj pokrivanja zavara.

Šupljikav korijen zavara je materijal korijena zavara koji je šupljikavog oblika.

Uvučen korijen zavara je nedovoljno popunjen korijen zavara.

Nepravilno izveden nastavak je nedovoljno spojeno ili previše nadvišeno mjesto na površini zavara.

Kratke pogreške su jedna ili više pogrešaka ukupne dužine ne veće od 25 mm na svakih 100 mm dužine zavara ili s jednom dužinom 25% od dužine zavara za zavare kraće od 110 mm.

Duge pogreške su jedna ili više pogrešaka ukupne dužine veće od 25 mm na svakih 100 mm dužine zavara ili s najmanjom dužinom od 25% ukupne dužine zavara kraćih od 100 mm.

Oznake postupaka zavarivanja (ISO 4063):

- 111 ručno elektrolučno zavarivanje (REL)
- 114 elektrolučno zavarivanje s punjenom elektrodom
- 12 elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška (EPP)
- 131 zavarivanje metala u zaštiti inertnog plina (MIG)
- 135 zavarivanje metala u zaštiti aktivnog plina (MAG)
- 136 zavarivanje metala u zaštiti aktivnog plina s punjenom žicom (TIG)
- 311 plinsko zavarivanje plamenom kisik-acetilen
- 15 zavarivanje plazmom

Oznake položaja kod zavarivanja (ISO 6947):

- PA vodoravni položaj u koritu i žlijebu
- PB vodoravni položaj u kutu
- PC zidni položaj
- PD vodoravno - nadglavni položaj u kutu
- PE nadglavni položaj
- PF okomit položaj prema gore
- PG okomiti položaj prema dolje

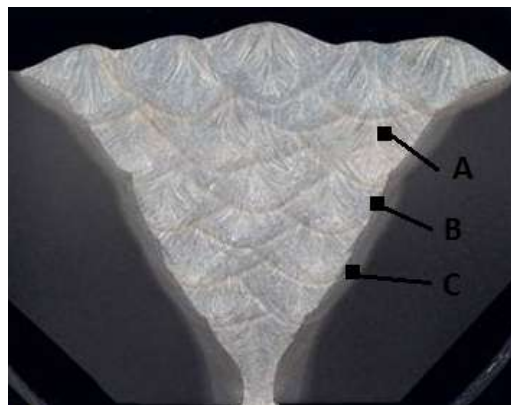
Korišteni simboli (kratice):

- a zadana debljina kutnog zavara (visina)
- b širina nadvišenja zavara
- d promjer šupljine (pore)
- h veličina pogreške (širina i visina)
- l dužina pogreške (označava se i dužina mjestimičnog zavara)

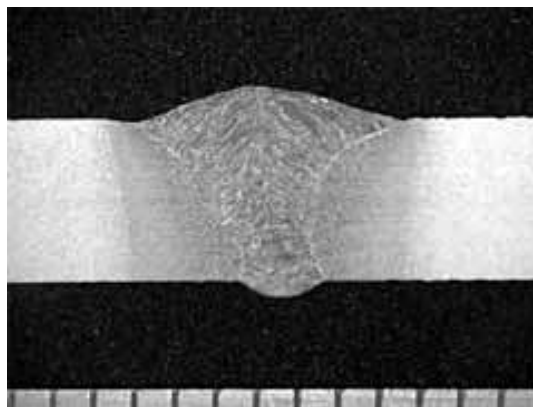
- s propisana dubina provara ili nazivna debljina sučeljenog zavara
- z zadana veličina stanice kutnog zavara ($z = a \sqrt{\dots}$)

Zavareni spojevi se dijele na tri osnovne skupine: kutni, preklopni i sučeljeni spojevi. U praksi se najviše upotrebljavaju kutni i sučeljeni spojevi, a po oblicima se dijele na: I-spoj, V-spoj, X-spoj, U-spoj, dvostruki U-spoj, K-spoj, J-spoj, dvostruki J-spoj, 1/2 V-spoj i dr.

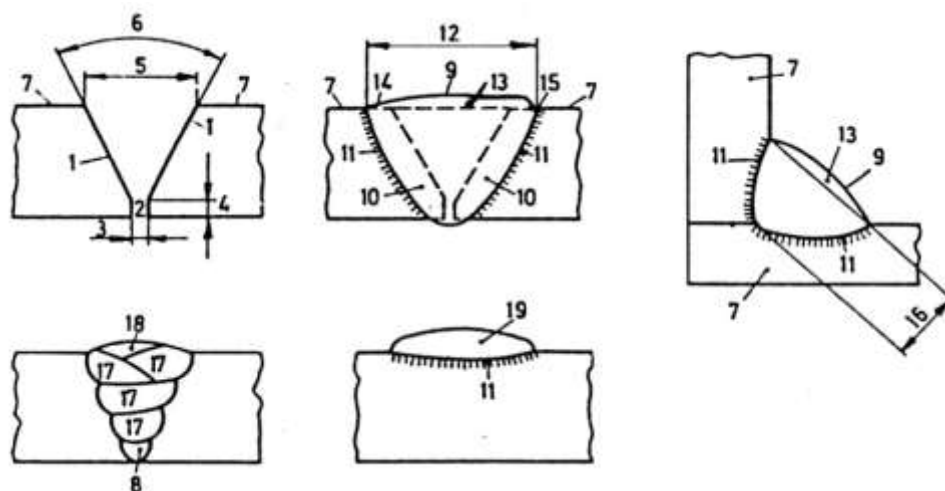
Označavanje zavarenih spojeva (na nacrtima) se provodi po međunarodno prihvaćenim oznakama, koje su definirane po nacionalnim standardima, utemeljenim na ISO 2553/92. Elementi zavarenog spoja s pripadajućim svojim nazivom su prikazani na *slikama 2.1, 2.2 i 2.3*.



*Slika 2.1 Zavaren spoj, višeslojno zavarivanje, vezani slojevi
A - zavar, B - granica pretaljivanja, C - zona utjecaja topline [6]*



Slika 2.2 Zavaren spoj, jednoslojno zavarivanje [7]





























Slika 2.3 Uobičajeni nazivi u zavarenom spoju i navaru





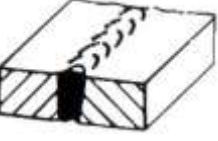

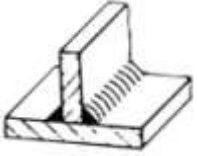

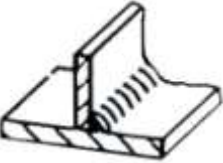



1-stranica žlijeba, 2-grlo žlijeba, 3-razmak u grlu žlijeba, 4-visina grla žlijeba, 5-otvor žlijeba, 6-kut otvora žlijeba, 7-osnovni materijal, 8-korijen zavara, 9-lice zavara, 10-provar ili protaljeni dio, 11-zona utjecaja topline (ZUT), 12-širina zavara, 13-nadvišenje zavara, 14-blagi prijelaz zavara, 15-oštri prijelaz zavara, 16-visina kutnog zavara, 17-slojevi u popuni zavara, 18-pokrivni sloj zavara, 19-navar [5]

U tablici 2.1, prikazane su navedene oznake i njihovo značenje, dok su u tablici 2.2 prikazana neka od osnovnih tumačenja označavanja prema ISO 2553.

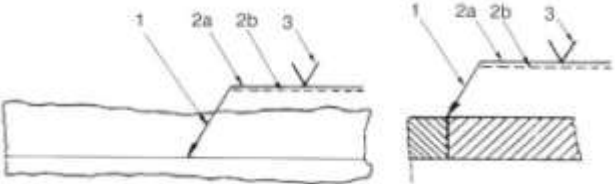
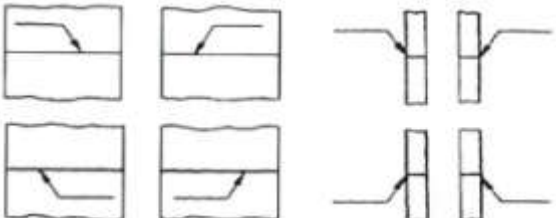
Tablica 2.1 Zavareni spojevi - označavanje i primjena (ISO 2553) [5]

Red. br.	Naziv spoja	Prikaz	Oznaka	Primjena
1.	Rubni spoj			Za vrlo tanke limove. Rub se pretaljuje, obično bez dodatnog materijala
2.	Sučeljeni I-spoj			Za tanke stijenke (2-5 mm). Kod EPP zavarivanja 4-12 mm. Zavaruje se s jedne strane ili s oboje
3.	Sučeljeni V-spoj			Za debljine stijenke 4-18 mm. Zavaruje se samo s jedne strane s provarom

4.	Sučeljeni polu V-spoj			Kako kod V-spoja, na mjestima gdje s druge strane ne treba iskošenje
4a	Sučeljeni Y-spoj			Kako kod V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje
5.	Sučeljeni polu Y-spoj			Kao kod polu V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje
6.	Sučeljeni U-spoj			Za vrlo debele materijale, više od 30 mm
7.	Sučeljeni J-spoj			Za vrlo debele materijale, tako gdje drugu stranu nije moguće obraditi
8.	Sučeljeni V-spoj zavaren i s druge strane			Kao kod V-spoja, zavaruje se i korijena strana
9.	Sučeljeni X-spoj			Za debljine stijenke 15-40 mm. Obje strane
10.	Sučeljeni K-spoj			Kao kod X-spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće iskositi
11.	Sučeljeni dvostruki Y-spoj			Kao kod X-spoja, ne zahtijeva provarivanje
12.	Dvostruki polu Y-spoj			Kao kod K-spoja, ne zahtijeva provarivanje

13.	Sučeljeni dvostruki U-spoj			Za materijale neograničenih debljina
14.	Sučeljeni V-spoj s većim razmakom u grlu žlijeba			Za deblje materijale s velikim razmakom u korijenu
15.	Sučeljeni polu V-spoj s većim razmakom u grlu žlijeba			Tamo gdje nije moguće obraditi drugu stranu
16.	Kutni spoj obostrano zavaren			Za debele materijale, zavarivanje s obje strane
17.	Kutni spoj jednostrano zavaren			Za tanke materijale, zavarivanje samo jedne strane
18.	Preklopni spoj - zavar u preseku			Tanji materijal, izvodi se u pripremljenom preseku

Tablica 2.2 Tumačenje označavanja (ISO 2553) [3]

<p>Temeljna oznaka sastoji se od:</p> <p>1 - crte sa strelicom</p> <p>2a - osnovne, pune crte</p> <p>2b - osnovne, isprekidane crte</p> <p>3 - znak oblika spoja s dodatnim oznakama</p>	
<p>Položaj crte sa strelicom, u načelu, nije bitan, a može biti različit, kao što je prikazano skicom</p>	

<p>Položaj osnovne crte je paralelan s površinom spoja na nacrtu, kao što je prikazano skicom. Znak oblika spoja može se staviti iznad ili ispod osnovne crte</p>	
<p>Moguće su čak četiri inačice označavanja, kao što je prikazano na skici. Pravilno je na jednom nacrtu označavati samo jednu inačicu, najbolje onu gdje strelica dolazi na gornju površinu spoja i gdje znak oblika spoja dolazi na osnovnu punu crtu</p>	
<p>Ovisno o položaju oblika spoja - strelica, osnovna crta i znak oblika spoja stavljaju se tako da su identični zahtjevanom spoju, kao što prikazuje skica</p>	
<p>Kod simetričnog oblika spoja, sučeljenog ili kutnog, ne stavlja se isprekidana crta. Kod kutnog spoja oštri dio oznake okrenut je na desnu stranu. Kod sučeljenog simetričnog spoja osnovna crta prolazi kroz sredinu znaka, kao što prikazuje skica</p>	
<p>Dodatne oznake prikazuju skice: a - V-spoj s ravnom površinom jedne strane b - V-spoj s ravnom površinom s obje strane c - kutni zavar konkavnog izgleda d - Y-spoj sa zavarom s druge strane e - Y-spoj sa žlijebljenjem i zavarom s druge strane f - V-spoj s posebno obrađenom površinom g - kutni spoj bez zasjeda s obrađenim nadvišenjem</p>	

3. POGREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA

Pogreške u nekom zavarenom spoju se dijele na:

- vidljive, tj. pogreške koje se mogu otkriti, raspoznati, definirati i ocijeniti bilo vizualnim pregledom ili nekom od metoda nerazorne defektoskopije, te na
- nevidljive (latentne), koje se ovim vrstama metoda ne mogu otkriti, ali znatno utječu na svojstva zavarenog spoja, a posljedično i na sposobnost konstrukcije u ispunjenju namjere. Njihovo je otkrivanje vezano uz uporabu složenih razornih, metalografskih i drugih ispitivanja, koja zbog visoke cijene i dugotrajnosti ne mogu biti redovito korištena. [8]

Suvremeni trendovi u ocjenjivanju utjecaja pogrešaka na sposobnost zavarenog spoja polako se udaljuju od tradicionalnog motrišta, po kojem su pogreške unaprijed svrstane u redove neprihvatljivih i uvjetno prihvatljivih, bez obzira na važnost proizvoda. Najnovija nastojanja, svode se na načelo stvarnog procjenjivanja utjecaja pogrešaka i to na sposobnost ispunjenja uvjeta uporabe tog proizvoda.

Svaki proizvod treba ispunjavati tri slijedeća uvjeta:

- trajnost
- sigurnost i
- pouzdanost

Zadana ili pretpostavljena trajnost, ovisi o vjerojatnim gubicima pri otkazivanju proizvoda, te se pridružuju i odgovarajuće tehničke mjere za njihovo osiguranje, što je u izravnoj svezi sa cijenom takvog proizvoda.

Naročito kod zahtjevnijih proizvoda, sigurnost nikada ne može doći pod znak pitanja. Zato je skup mjera za postizanje sigurnosti izravno povezan sa stupnjem opasnosti za okoliš takvih proizvoda.

Neki od čimbenika koji utječu na svojstva zavarenog spoja, se mogu svrstati u tri osnovne skupine [8]:

- metalurški - oni koje u zavareni spoj unose upotrebljeni materijali,
- tehnološki - oni kojima je uvjet tehnologija i izvođenje zavarenog spoja i
- čimbenike eksploatacije - koje uvjetuje način iskorištavanja zavarene konstrukcije.

Nabrajanje elemenata ovih skupina je kratko prikazano i u *tablici 3.1*.

Tablica 3.1 Čimbenici koji utječu na svojstva zavarenog spoja [3]

Metalurški uvjeti	<ul style="list-style-type: none"> -Svojstva osnovnog materijala -Stanje osnovnog materijala -Svojstva ZUT-a -Svojstva dodatnog materijala -Svojstva zone pretaljivanja
Tehnološki uvjeti	<ul style="list-style-type: none"> -Pogreške u zavarenom spoju -Naknadna toplinska obrada -Brzina hlađenja -Unos topline -Redoslijed zavarivanja -Parametri zavarivanja -Oblik pripreme žlijeba
Eksploatacijski uvjeti	<ul style="list-style-type: none"> -Erozija -Šokovi -Korozija -Preopterećenje -Opasnost od okoliša (potresi, poplave,...) -Utjecaj radnog medija

Pogledom na sadržaj *tablice 3.1*, dobiva se uvid na činjenicu da je ovdje zastupljen relativno skroman dio mogućih čimbenika utjecaja na nosivost, sigurnost i trajnost zavarenog spoja. No za razliku od ostalih uvjeta, za koje se može kazati da su još na stupnju intenzivnog proučavanja i jednoznačnog definiranja, pogreške u zavarenom spoju dovoljno su normativno obrađene za sustavno prikazivanje.

Tu će vjerojatno puno pomoći kompjutorska analiza stvarnog utjecaja, i to svake otkrivene pogreške i time izbjeći često nepotrebnog posredovanja popravcima, s naoko dobrim, a u stvarnosti katkad katastrofalnim ishodom. Utjecaj pogrešaka u zavarenom spoju, izvedenom uz primjenu posebnih, već dobro poznatih "olakšavajućih" mjera (zavarivanje elektrodama s bazičnom oblogom ili punjenjem, naknadna toplinska obrada smanjivanja za ostalih naprezanja kod zavarivanja, bazičnim praškom ...), modificiranjem kriterija ocjene danas se još ne priznaje prijeko potrebno značenje, što u neke buduće kriterije valja ugraditi. To su samo neki od dokaza da je u budućnosti i radi objektivnijeg kriterija nužno uključiti mnogo danas još neobuhvaćenih čimbenika.

4. PODJELA POGREŠAKA U ZAVARENOM SPOJU

Pogreške u tehnikama spajanja u pravilu mogu dovesti do narušavanja pouzdanosti dobivenog proizvoda u uvjetima primjene. Uzroci pogrešaka mogu biti prije provođenja spajanja ili razdvajanja materijala (projektiranje, izbor materijala, izbor tehnike spajanja itd.), nekvalitetna provedba spajanja, odnosno razdvajanja itd. Stoga je nužno poznavati vrste i uzorke nastanka pogrešaka koje se mogu pojaviti tijekom spajanja i razdvajanja materijala, kako bi se moglo preventivno utjecati na njihovo uklanjanje i smanjenje. Budući da je zavarivanje najkorištenija tehnika spajanja, a plinsko rezanje tehnika razdvajanja, u ovom poglavlju prikazat će se pogreške zavarenog spoja zavarivanja taljenjem i plinskim rezanjem.

Prema ISO 6520/1982 i EN 26520/1991 pogreške u zavarenom spoju metala izvedenog taljenjem svrstane su u šest osnovnih skupina [9]: pukotine, šupljine ili poroznost, uključci čvrstih tijela, nedovoljno vezivanje i penetracija, pogreške oblika, te ostale pogreške, što je grupirano u *tablici 4.1.*

Tablica 4.1 Pogreške u zavarenim spojevima [9]

Osnovna grupa	Oznaka grupe	Vrsta pogreške
1	100	Pukotine
2	200	Šupljine - poroznost
3	300	Čvrsti uključci
4	400	Naljepljivanje i nedovoljan provar
5	500	Pogreške oblika zavara
6	600	Ostale pogreške

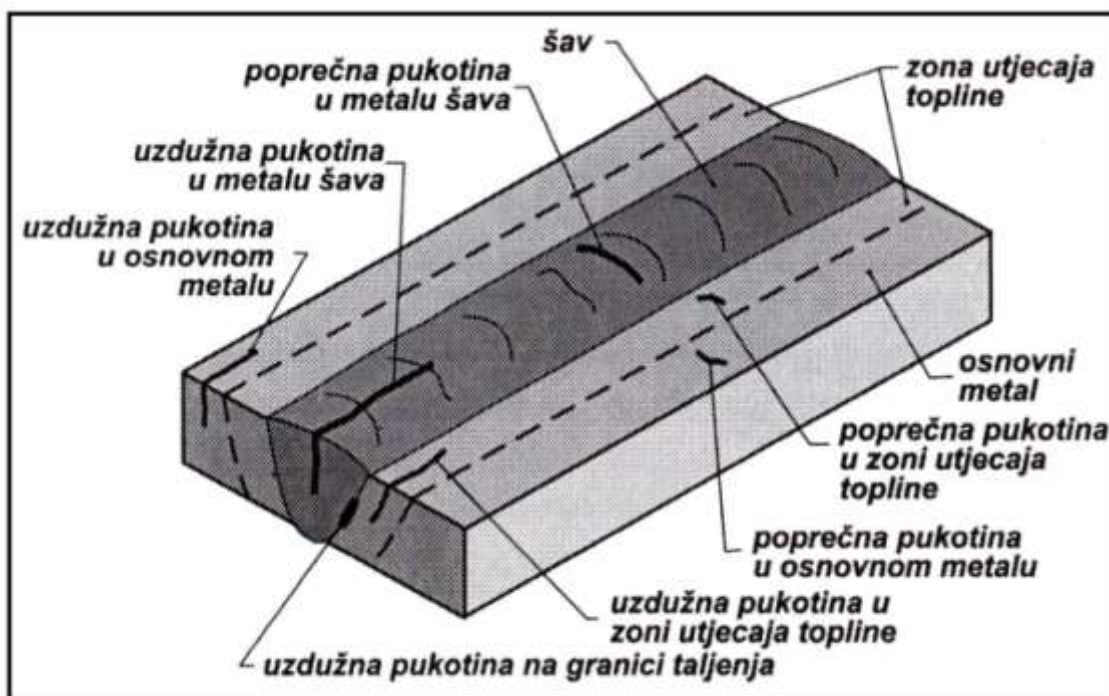
Pogreške u zavarenim spojevima su sustavno obrađene prema tim normama, i to:

- tabličnim prikazom i opisom greške,
- uzrocima i mehanizmima nastajanja,
- utjecajem pogrešaka na svojstva zavarenog spoja, i
- mjerama za izbjegavanje nastajanja pogrešaka.

4.1 Pukotine (skupina 100)

Pukotine se u zavarenim spojevima danas smatraju najopasnijim pogreškama i u pravilu nisu dopuštene, a nastaju kao posljedica prekida metalnog kontinuiteta, do kojeg može doći zbog stezanja metala zavara, napetosti zavarenih dijelova, povišenih unutarnjih naprezanja, metalurških promjena u zoni utjecaja topline i dr. Zbog njihove geometrije (dvije dimenzije izrazito velike u odnosu na treću, oštri rubovi, nepovoljni položaji), nosivi presjek zavarenog spoja, osobito ako su posložene poprijeko na smjer naprezanja, bitno se smanjuje, a time i čvrstoća spoja, ali su samo uvjetno dopuštene. Prema istraživanjima, najprije kod uvođenja računalne analize međusobnih utjecaja brojnih čimbenika, stav prema pukotinama u ocjeni utjecaja na nosivost zavarenog spoja nešto će se vjerojatno promijeniti, ali ne bitno. [5]

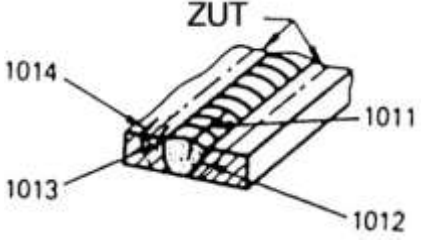
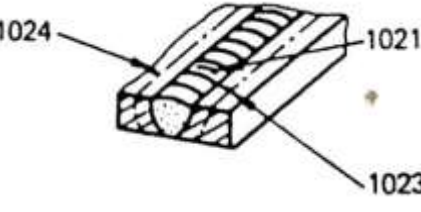
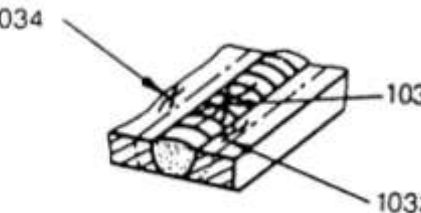
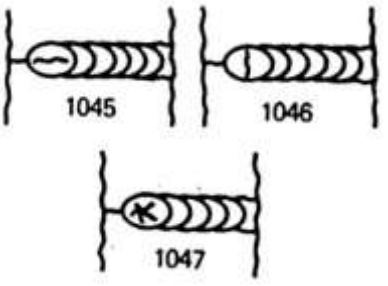
Pukotine se mogu pojaviti u metalu šava, u zoni utjecaja topline i u osnovnom metalu, a pojedine su pojave pukotina u zavarenom spoju prikazane na slici 4.1.

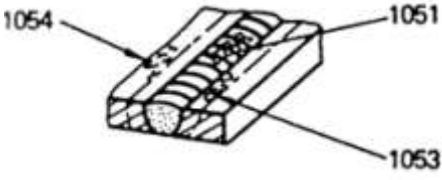
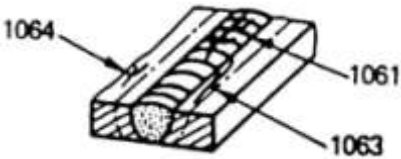


Slika 4.1 Pukotine u zavarenom spoju [9]

Kod nekih teoretičara i praktičara, pukotine su među najviše obrađivanim pogreškama, ponajprije zbog toga, što je veći broj otkazivanja konstrukcija nastao njihovom naknadnom pojavom, zbog promašaja u fazama prije ili nakon nastanka nekog zavarenog spoja, radi već prije poznatih razloga. U tablici 4.2 su prikazani, nazivi i prikazi, te opisi pogrešaka tipa pukotine.

Tablica 4.2 Pukotine u zavarenom spoju [3]

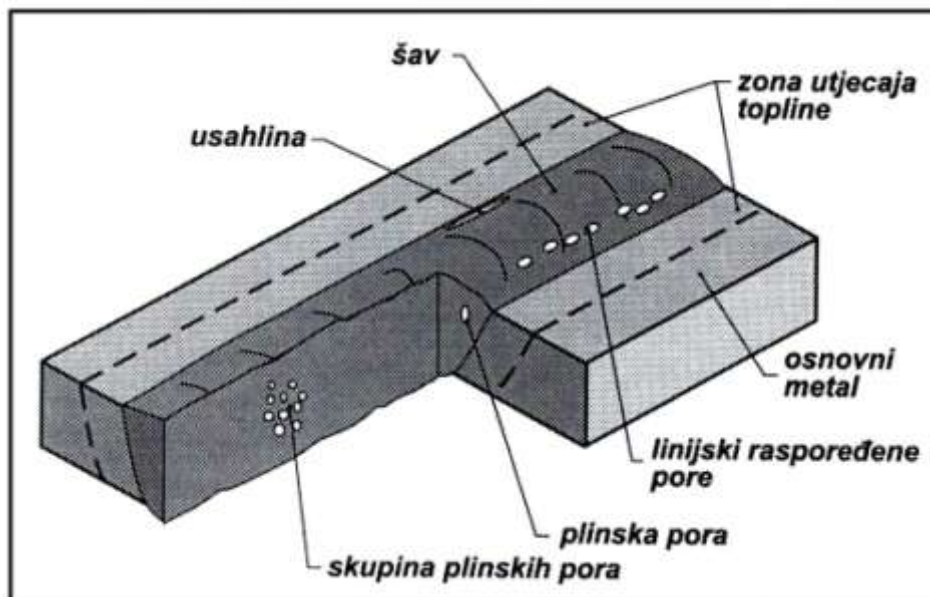
Naziv i prikaz	Oznaka		Opis
	EN	IIW	
Pukotina	100	E	Pukotine su mjestimično razdvojen materijal u zavarenom spoju zbog loma nastalog utjecajem zavarivanja
Mikropukotina	1001	-	Mikropukotina je sitna, mikroskopom vidljiva pukotina
Uzdužne pukotine 	101 1011 1012 1013 1014	Ea - - - -	Uzdužne pukotine se protežu uzdužno na zavar, a mogu biti: <ul style="list-style-type: none"> - u zavaru - na granici pretaljivanja - u zoni utjecaja topline (ZUT) - izvan ZUT-a u osnovnom materijalu
Poprečne pukotine 	102 1021 2023 1024	Eb - - -	Poprečne pukotine se protežu poprečno na os zavora, mogu biti: <ul style="list-style-type: none"> - u zavaru - u zoni utjecaja topline (ZUT) - izvan ZUT-a u osnovnom materijalu
Pukotine zvjezdastog oblika 	103 1031 1033 1034	E - - -	Pukotine zvjezdastog oblika su one koje prolaze iz jednog mjesta i zrakasto se rasprostiru, mogu biti: <ul style="list-style-type: none"> - u zavaru - u zoni utjecaja topline (ZUT) - izvan ZUT-a u osnovnom materijalu
Pukotine u završnom krateru 	104 1045 1046 1047	Ec - - -	Pukotine u završnom krateru mogu biti raznih oblika: <ul style="list-style-type: none"> - uzdužno u pravcu zavora - poprečno na zavar - zvjezdastog oblika

<p>Pukotine u odvojenim skupinama</p> 	<p>105 1051 1053 1054</p>	<p>E - - -</p>	<p>Pukotine u odvojenim skupinama koje nisu povezane, a mogu biti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - u zavaru - u zoni utjecaja topline (ZUT) - izvan ZUT-a u osnovnom materijalu
<p>Razgranate pukotine</p> 	<p>106 1061 1063 1064</p>	<p>E - - -</p>	<p>Razgranate pukotine međusobno su ovisne i prolaze iz jedne zajedničke pukotine. Razlikuju se od pukotina pod 103 i 105, a mogu biti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - u zavaru - u zoni utjecaja topline (ZUT) - izvan ZUT-a u osnovnom materijalu

4.2 Šupljine - poroznost (skupina 200)

Poroznosti u zavarenim spojevima nastaju od zaostalog plina tijekom zavarivanja, odnosno to su mjesta u zavaru ispunjena stlačenim plinom, a mogu biti posljedica nečistoća na površinama zavarivanog spoja, vlažnosti, lošeg izvođenja zavarivanja, i dr.

U ovu se grupu pogrešaka ubrajaju razna vrste plinskih pora, šupljina, usahlina uslijed stezanja, kraterskih lijevaka, i sl. Za plinske pore karakterističan je okrugli oblik, za razliku od ostalih pora koje mogu biti pravilna oblika, npr. izdužene ili crvaste. Neki od nedostataka u obliku poroznosti prikazani su na slici 4.2. [9]

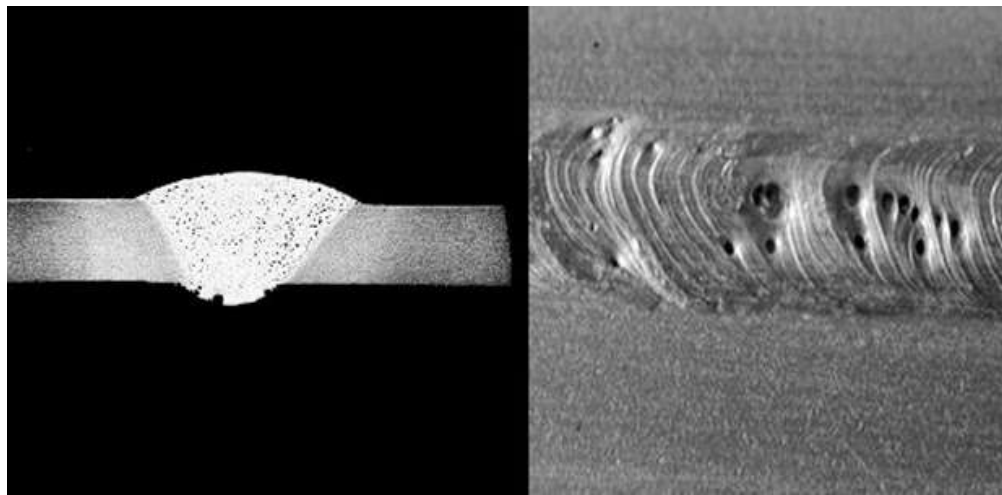


Slika 4.2 Poroznost u zavarenom spoju [9]

Sukladno normama, ova se grupa pogrešaka označava s 201, ovisno o njihovom rasporedu i položaju ta se oznaka dopunjuje, pa slijedi:

- 2011, plinski mjehurić - pora
- 2012, plinski mjehurić - poroznost
- 2013, gnijezdo mlinskih mjehurića
- 2014, plinski mjehurići u nizu
- 2015, izduženi plinski uključak
- 2016, cjevasti plinski uključak
- 2017, površinski otvoreni mjehurići
- 202, šupljine
- 2021, makrošupljina
- 2022, mikrošupljina
- 2023, međukristalna mikrošupljina
- 2024, šupljine u završnom krateru

Nastajanje poroznosti u zavaru tumači se time što metal zavara u rastaljenom stanju može upiti znatne količine plinova. Vodik i dušik se upija izravno, dok se kisik upija u spoju s ugljikom (ugljični monoksid). Štetni plinovi, kao što su kisik, vodik i dušik, ulaze u talinu električnog luka, gdje dolaze iz okolne atmosfere, iz vlage, te drugih nečistoća što se nalaze na dodatnome materijalu. Ugljični monoksid nastaje kao reakcija nepotpune dezoksidacije taline zavara, tako da se ostatak kisika veže s ugljikom u ugljični monoksid. [5] Tipični primjer šupljina u zavarenom spoju je prikazan na *slici 4.3*.



Slika 4.3 Primjer poroznosti u zavarenim spoju (MIG zavarivanje) [10]

Uzročnici poroznosti u zavaru su:

- slaba zaštita procesa zavarivanja
- nečistoće i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnim materijalima
- neispravni parametri i tehnika rada u zavarivanju

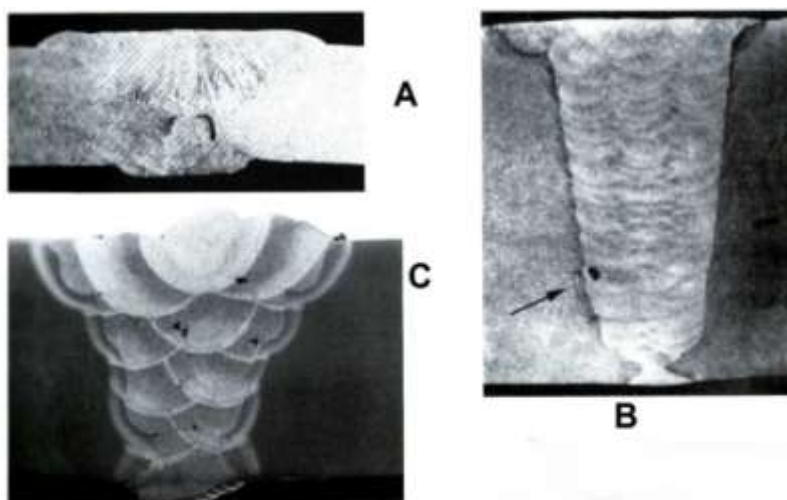
Iz primjera uzorka pojave poroznosti proizlaze pravila za izbjegavanje njihova nastajanja, kao što su:

- besprijekorna čistoća mjesta zavarivanja, naročito kod visokih zahtjeva za kvalitetu zavarenih spojeva
- ispravna količina zaštitnog plina
- sušenje obloženih elektroda i praška prije zavarivanja
- odgovarajuća čistoća zaštitnog plina
- ispravan uređaj za zavarivanje
- ispravni parametri zavarivanja
- ispravna tehnika rada
- pravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka
- prije zavarivanja nehrđajućeg čelika treba odmastiti
- uklanjanje oksida neposredno prije zavarivanja aluminijske i aluminijevih legura

4.3 Čvrsti uključci (skupina 300)

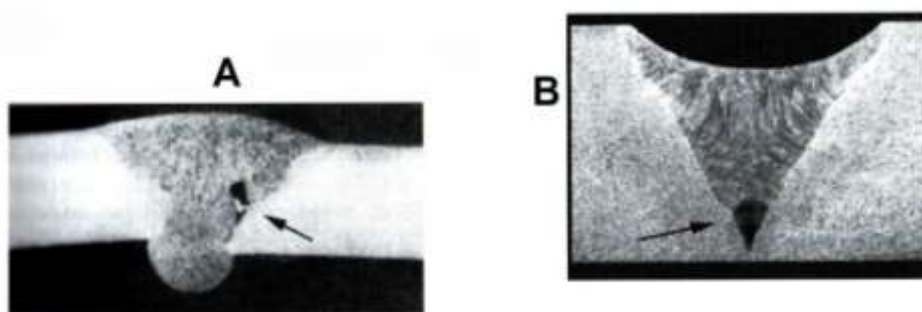
Razni uključci su posljedica zaostajanja nečistoća i drugih neistaljenih čestica u metalu šava, odnosno, to su strana tijela u zoni taljenja, a mogu biti nemetalni (troska, prašak) i strani metal, npr. uključak volframa ili oksidna kožica u zavaru (aluminij i Al legura). Uključci troske ili praška najčešće nastaju zbog nedovoljnog čišćenja među slojevima zavara, preuskog žlijeba ili u oštrom kutu kutnog spoja (talina troske podvlači se pod talinu metala), nepravilna tehnika rada (premala brzina zavarivanja). [11]

Na *slici 4.4, 4.5, 4.6* su prikazani primjeri uključaka troske u zavarenim spojevima.



Slika 4.4 Uključci troske u zavarenom spoju

A - kod EPP zavarivanja, B - EPP zavarivanje, vrlo debeli materijal, C - kod MAG zavarivanja [5]



Slika 4.5 Uključci troske u zavarenom spoju

A - kod REL zavarivanja, B - kod MAG zavarivanja punjenom žicom [5]



Slika 4.6 Uključci troske na površini zavarenog spoja

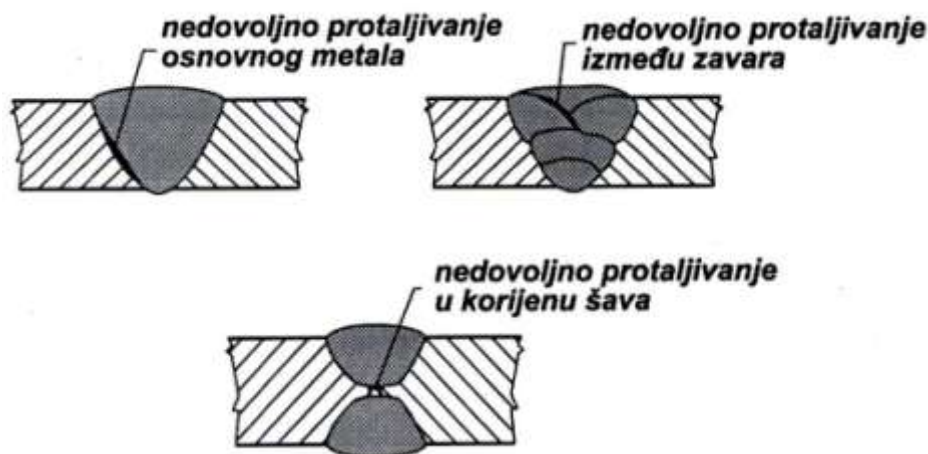
A - kod dobre brzine zavarivanja, B - kod prevelike brzine zavarivanja, C - kod premale brzine zavarivanja [12]

Iz primjera nastajanja takvih pogrešaka u zavaru, mogu se odrediti pravila izbjegavanja njihovih nastajanja:

- pravilna priprema stroja za zavarivanje, ispravan kut otvora žlijeba
- zavarivanje treba izvoditi ispravnim parametrima zavarivanja i ispravnom tehnikom rada
- obavezno je besprijekorno čišćenje troske među slojevima kod višeslojnog zavarivanja
- kod zavarivanja aluminija treba oksidnu kožicu otkloniti četkanjem
- kod TIG zavarivanja aluminija, treba pripaziti da se talina zavara ne dotiče vrhom volframove elektrode.

4.4 Naljepljivanje i nedovoljan provar (skupina 400)

Naljepljivanje je pogreška nepostojanja čvrste strukturne veze u zavarenom spoju ili navaru. Pogreška naljepljivanja je sve dosta neugodna, jer se teško pronalazi postojeće metode kontrole. [11] Nedovoljan provar je nedovoljno protaljivanje po cijelom presjeku zavarenog spoja, odnosno neprovarivanje korijena zavara. Nedovoljan provar može biti na bočnoj podlozi zavara, tj. osnovnog materijala, te između pojedinih zavara u šavu (slika 4.7).

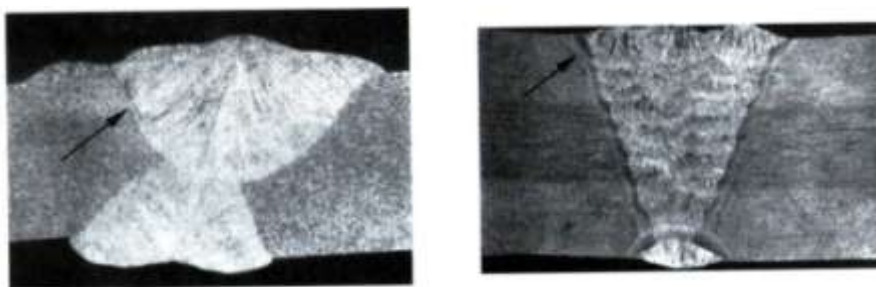


Slika 4.7 Pogreške nedovoljnog provara, odnosno protaljivanja [9]

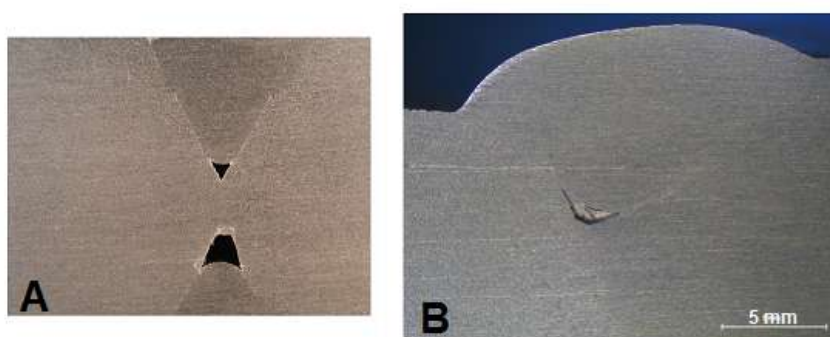
Uzroci nastajanja pogrešaka naljepljivanja su:

- nepravilna priprema spoja (preuzak žlijeb)
- neodgovarajući parametri zavarivanja (premala ili prevelika jakost struje zavarivanja)
- zaostale nečistoće na mjestu spajanja i dr.

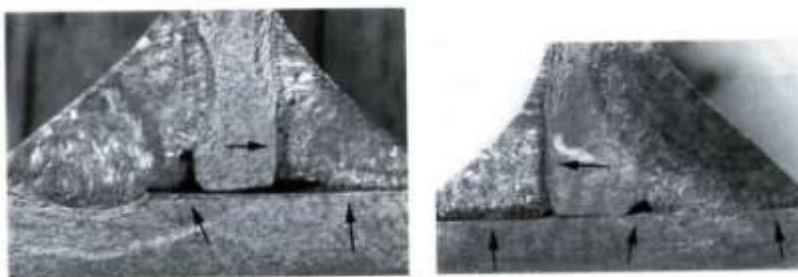
Na slikama 4.8, 4.9 i 4.10, prikazano je nekoliko karakterističnih primjera pogrešaka naljepljivanja u zavarenom spoju.



Slika 4.8 Manje pogreške naljepljivanja u zavarenom spoju [5]



Slika 4.9 Primjeri pogrešaka naljepljivanja u zavarenom spoju
A - pogreške među slojevima, B - vrlo male pogreške (2-3mm) [13]

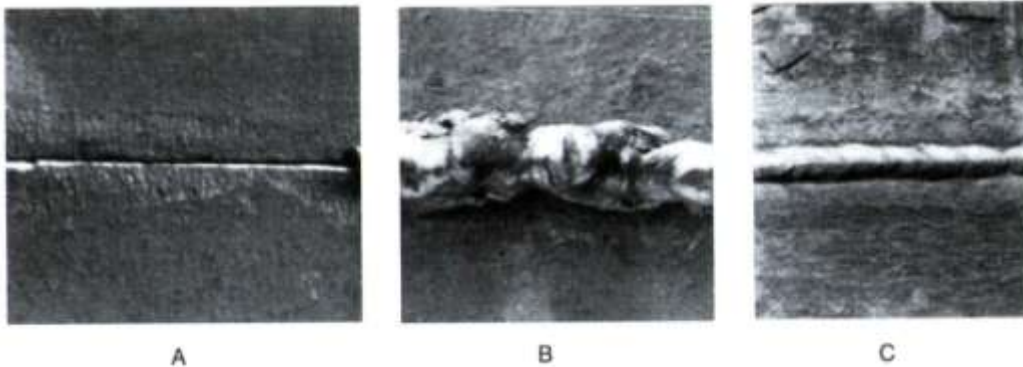


Slika 4.10 Pogreške naljepljivanja u kutnim spojevima (velika jakost struje i premala brzina) [5]

Uzroci nedovoljnog provara:

- nepravilna priprema stroja,
- neispravni parametri zavarivanja
- nepravilna tehnika rada

Kako bi se ispravno provario korijen zavora, priprema spoja mora biti s odgovarajućim razmakom u grlu žlijeba, a parametri zavarivanja dobro namješteni, te tehnika rada pravilna [5]. Izgled pravilno i nepravilno izvedenog korijena zavora prikazan je na *slici 4.11*.



Slika 4.11 Izgled korijena sučeljenog zavora

A - neprovaren korijen zavora, B - slabo izveden korijen zavora, C - dobro izveden korijen zavora
[5]

4.5 Pogreške oblika zavora (skupina 500)

Svako odstupanje od zadanog oblika zavora se smatra kao pogreška oblika zavora. U današnje vrijeme je svima dobro poznato da pogreške oblika zavora nisu samo estetske prirode, već je njihov utjecaj u smanjenju nosivosti zavarenog spoja vrlo značajan, naročito kod dinamički opterećenih konstrukcija. [5]

Sve ove pogreške su dobro vidljive (osim u specifičnim slučajevima) i mjerljive vizualnim pregledom. Njihovo je određivanje relativno jednostavno.

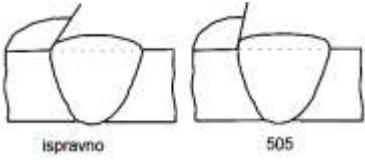
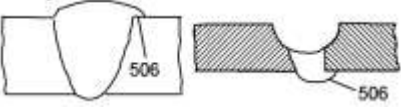
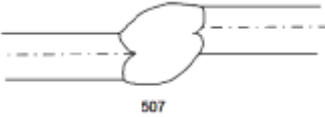
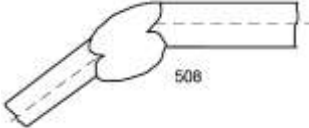
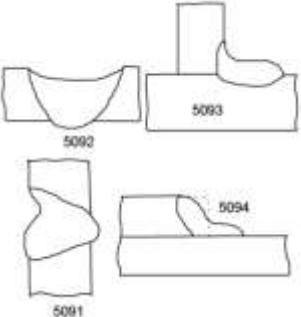
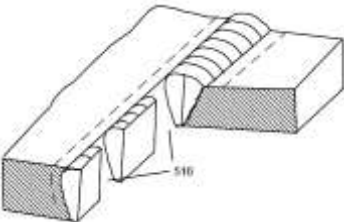
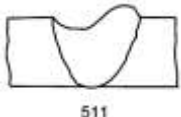
Klasifikaciju, oznake i opise pogrešaka oblika zavora (*tablica 4.3*), su podijeljene na [9]:

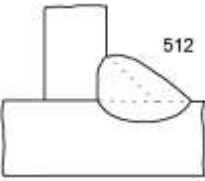
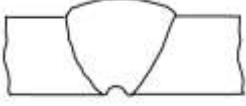
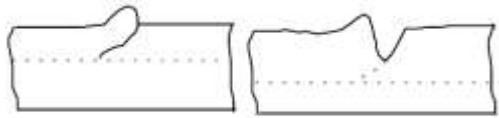

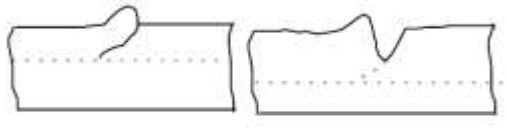
- 500, pogreške oblika zavora,
- 501, ugorine uz zavar,
- 502-503, preveliko nadvišenje zavora,
- 504, preveliko nadvišenje korijena zavora,
- 505, oštar prijelaz zavora,
- 506, preklop zavora,
- 507, posmaknutost u sučeljavanju,
- 508, odstupanje od zadanog pravca,
- 509, utonulost zavora,
- 510, progaranje,

- 511, nedovoljno popunjen zavar,
- 512, nesimetričan kutni zavar,
- 513-514, nepravilan izgled zavara,
- 515, uvučen korijen zavara,
- 516, šupljikav korijen zavara,
- 517, nepravilno izveden nastavak.

Tablica 4.3 Pogreške oblika zavara [14]

Naziv i prikaz	Oznaka		Opis
	EN	IIW	
Pogreške oblika zavara	500		Razlika od propisanog vanjskog oblika površine zavara
Ugorine u zavaru	 5011 5012 5013	501 F 5011 F 5012 F 5013 -	Ugorine uz zavar su oštri zarezi uz zavar na prijelazu zavar-osnovni materijal kod sučeljenog i kutnog spoja
Preveliko nadvišenje zavara	 502 503	502 - 503 -	Previše dodatnog materijala u završnim slojevima
Preveliko nadvišenje korijena zavara	 504	504 - 5041 -	Višak metala u korijenu.

<p>Oštar prijelaz zavara</p> 	505	-	Premali kut između osnovnog materijala i površine zavara
<p>Preklop zavara</p> 	506	-	Višak dodatnog materijala, koji prelazi na osnovni materijal a ne spaja se sa njim
<p>Posmaknutost u sučeljavanju</p> 	507	-	Odstupanje od ravnine kod sučeljavanja. Najčešće se zapaža mjerenjem
<p>Odstupanje od zadanog pravca</p> 	508	-	Odstupanje od pravca kod dva ili više elemenata
<p>Utonulost zavara</p> 	509 5091 5092 5093 5094	- - - - -	Ulegnuće nanijetog dodatnog materijala, zbog utjecaja sile teže
<p>Progaranje</p> 	510	-	Otvor u zavaru ili na ivicama zavar, prouzrokovan proganjanjem (propaljivanjem)
<p>Nedovoljno popunjen zavar</p> 	511	-	Popuna na licu zavara preniska zbog nedovoljne količine nanesenog dodatnog materijala

Nesimetričan kutni zavar 	512	-	Okomita i položena stranica nisu iste dužine
Nepravilan izgled zavora 	513 514	- -	Previše različita širina ili narebrena površina zavora
Uvučen korijen zavora 	515		Smanjena debljina u korijenu nastala skupljanjem zavora
Šupljikav korijen zavora 	516		Stvaranje spužvastog šava u korijenu zavora
Nepravilno izveden nastavak 	517		Neravnomjernost površine na mjestu nastavka zavora (nedovoljno spojen ili previše nadvišen)

4.6 Ostale pogreške (skupina 600)

Sve pogreške koje se ne mogu svrstati u već navedene skupine, spadaju u ovu skupinu. To su uglavnom oštećenja pri zavarivanju površine materijala ili u pripremi za zavarivanje (*tablica 4.4*) [11]:

- oštećenje električnim lukom (601)
- onečišćenje kapljicama metala (602)
- mehanička oštećenja površine osnovnog materijala ili zavora (603, 604, 605)
- podbrušenje (606)

Tablica 4.4 Ostale pogreške (skupina 600) [11]

Naziv i prikaz	Oznaka		Opis
	EN	IIW	
Ostale pogreške	600	-	Sve pogreške koje se ne mogu svrstati u spomenute skupine
Oštećenja električnim lukom	601	-	Mjestimično oštećenje na površini osnovnog materijala, zbog uspostavljanja el. luka u blizini zavara
Onečišćenje kapljicama metala	602	-	Raspršene kapljice rastopljenog metala prijanjaju na osnovni materijal
Onečišćenje volframom	6021	-	Čestice volframa prenijete sa elektrode na površinu zavara
Mehanička oštećenja površine osnovnog materijala ili zavara	603 603 604	- - -	Oštećenja površine osnovnog materijala mogu nastati: <ul style="list-style-type: none"> - odbijanjem zavarenih montažnih ili transportnih pomagala - urezima od brušenja - zasijecanjima oštrim alatima
Podbrušenje	605	-	Smanjenje debljine zavarenog spoja brušenjem

5. PUKOTINE (PODJELA)

Kao što smo već napomenuli, pukotine se u zavarenim spojevima danas smatraju najopasnijim pogreškama i u pravilu nisu dopuštene, a podijeljene su na:

- tople pukotine
- hladne pukotine

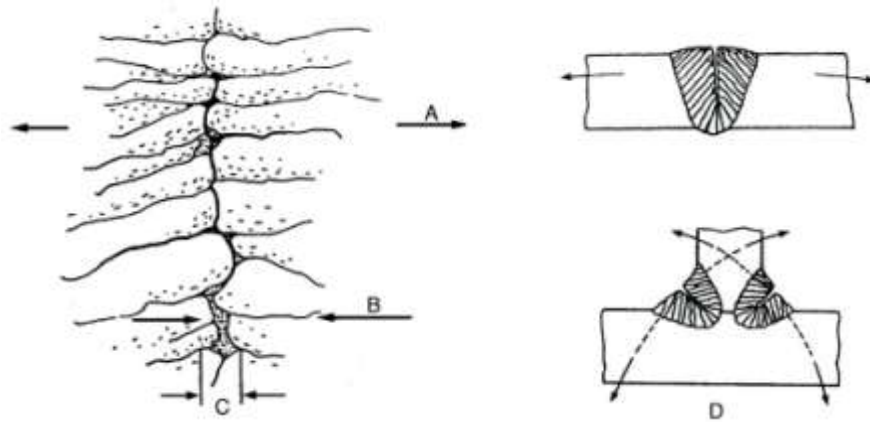
5.1 Tople pukotine

Tople pukotine kod zavarivanja nastaju pri vrlo visokim temperaturama za vrijeme hlađenja taline do čvrstog stanja, odnosno za vrijeme prijelaza metala zavara iz tekućeg u kruto stanje, tj. tijekom njegovog skrućivanja. Prostiru se po granicama zrna materijala, najčešće po dužini u sredini zavara, ali moguće su i u zoni utjecaja topline.

Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavara da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Pojava toplih pukotina, posebno je povezana s raznim nečistoćama u materijalu, legiranjem, parametrima zavarivanja, nepravilnim izborom dodatnog materijala, te nepovoljnim oblikom žlijeba. [9]

Prikaz mehanizma nastajanja toplih pukotina, može se objasniti na način (*slika 5.1*):

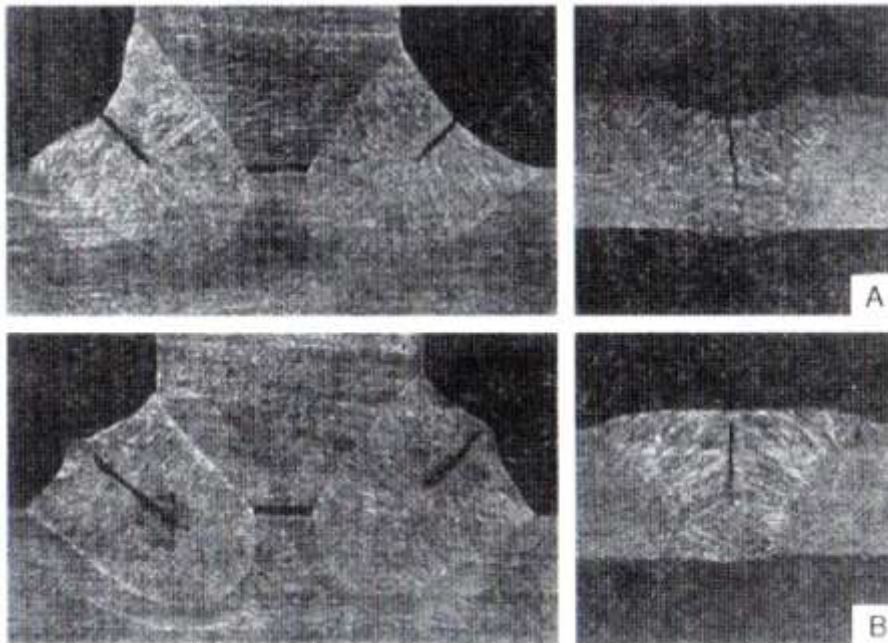
- skrućivanje zavara počinje od hladnih stranica žlijeba prema sredini zavara, a talina popunjava razdvojeni dio (B)
- u završnoj fazi skrućivanja preostaje tanki film taline između zrna skrućenog materijala (C)
- područje skrućenog materijala skuplja se u smjeru suprotnom od pravca skrućivanja stvarajući velika naprezanja (A)
- ako se u procesu između skupljanja i skrućivanja, nadvlada skupljanje, ostat će zrna materijala razdvojena, u toplom stanju - tople pukotine.



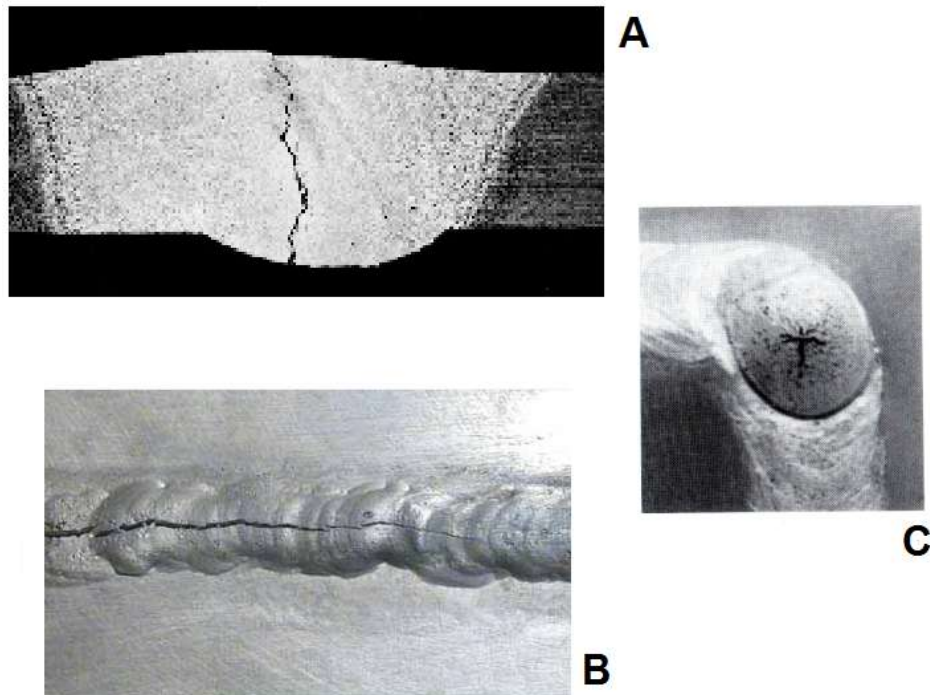
Slika 5.1 Shematski prikaz mehanizma nastajanja toplih pukotina
 A - pravac skupljanja metala zavara kod skrućivanja
 B - pravac skrućivanja metala zavara
 C - preostala talina na granici zrna
 D - pravci opiranja osnovnog materijala skupljanja zavara [5]

To se posebice dešava, ako je oblik zavara nepovoljan, te kad se u posljednjoj fazi skrućivanja poveća onečišćenje taline kao i pri smanjenoj istezljivosti metala zavara.

Tipičan izgled toplih pukotina u zavarenim spojevima čelika i slitina aluminija, se može vidjeti na slikama 5.2 i 5.3. [5]



Slika 5.2 Tople pukotine kod EPP zavarivanja čelika
 A - vidljive vanjske, B - nevidljive unutarnje [5]

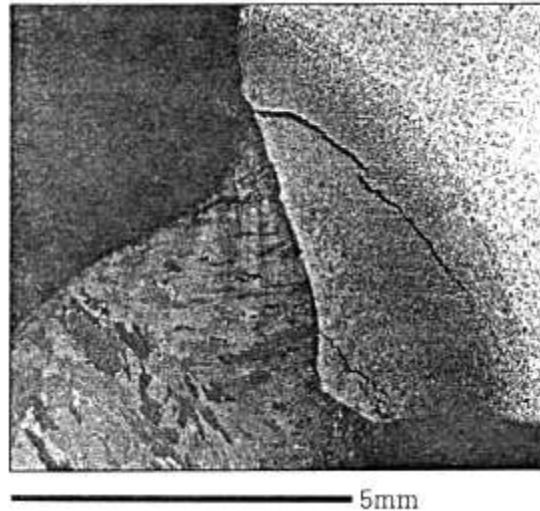


*Slika 5.3 Tople pukotine kod zavarivanja aluminijskih slitina i aluminijskih slitina
A - sučeljeni spoj (presjek), B - sučeljeni spoj, C - na završnom krateru [7]*

5.2 Hladne pukotine

"Hladne pukotine (*slika 5.4*) nastaju nakon izvršenog zavarivanja na temperaturi nižoj od 250°C. Hladne pukotine se nekad mogu pojaviti i više sati nakon zavarivanja, pa su tako u tom slučaju dobile naziv "zakašnjele" hladne pukotine". [8]

Kontrolu kvalitete metodama bez razaranja na zavarenim konstrukcijama potrebno je provoditi barem 48 sati nakon zavarivanja (to se smatra inkubacijskim periodom nastajanja zakašnjelih hladnih pukotina). Uglavnom se pojavljuju kod zavarivanja čelika koji ima povišeni i visoki čvrstoću. Mogu biti uzdužno i poprečno na zavar ili na prijelazu u osnovni materijal. Isto tako, mogu biti vidljive (na površini zavarenog spoja), te nevidljive u zavarenom spoju. Prema veličini postoje - od mikropukotina, koje su za oko kao i za mnoge od nerazornih ispitivanja, nevidljive - do makropukotina, koje su vidljive ili se nekom od metoda lako otkrivaju. [9]



Slika 5.4 Primjer hladne pukotine u zavaru [15]

5.2.1 Uzročnici nastajanja hladnih pukotina

Najčešći uzročnici nastajanja hladnih pukotina su:

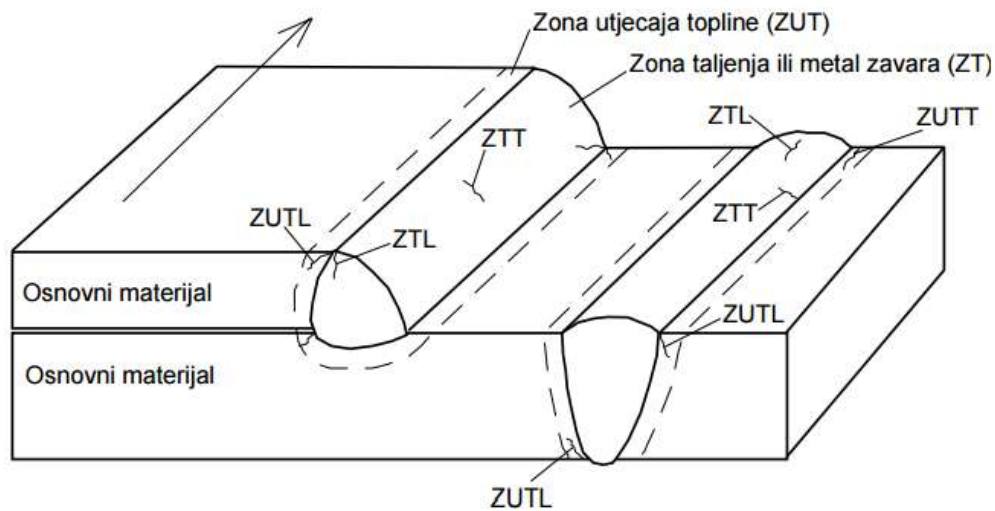
- nepovoljan položaj uključaka u zavaru,
- djelovanje naprezanja nastalih skupljanjem zavara,
- metal sklon otvrdnjavanju,
- prisutnost vodika u zavaru,
- strukture metala zavara, te ZUT-a, koje su osjetljive na djelovanje vodika.

5.2.2 Sustav nastajanja hladnih pukotina

Sustav nastajanja hladnih pukotina je vrlo složen. Može se opisati pojednostavljenim načinom: difundirani vodik u talini zavara kod visokih temperatura, nalazi se u atomarnom stanju. Kod hlađenja, vodik najčešće prelazi u molekularno stanje i "smješta" se u materijalu na mjestima sitnih pogrešaka, pri čemu nastaju vrlo visoki tlakovi, gdje se nalazi vodik u metalu zavarenog spoja. Njegova sama raspodjela ovisi o količini i tipu raznih uključaka, mikro i makro pora, te njihovog rasporeda, koje se pod utjecajem visokog tlaka vodika mogu povezati između sebe u manju ili veću pukotinu, i to posebice kada dodatno djeluju visoka naprezanja, koja su nastala skupljanjem metala zavara ili krhko stanje otvrdnutog metala u ZUT-u. Vodik je najveći uzročnik nastajanja hladnih pukotina, i on dolazi u zavar razlaganjem vlage na visokim temperaturama, te iz drugih nečistoća kao hrđa, masnoća, vlaga, koje se nalaze na površini mjesta zavarivanja. [14]

5.2.3 Mjesta nastajanja hladnih pukotina

Hladne pukotine se najčešće pojavljuju na zavarenim spojevima čelika koji imaju povišenu i visoku tvrdoću, pa zakaljiva struktura ovih čelika ima smanjenu istežljivost, i pod utjecajem velikih zaostalih naprezanja može doći do loma, odnosno nastanka pukotina. Hladne pukotine su vrlo česte kod reparaturnih zavarivanja, uglavnom kod slabo zakaljivih čelika ili na mjestima gdje su nakon zavarivanja vrlo visoka zaostala naprezanja. Isto tako, mogu nastati u metalu zavara (zoni taljenja) i/ili zoni utjecaja topline (slika 5.5). [8]



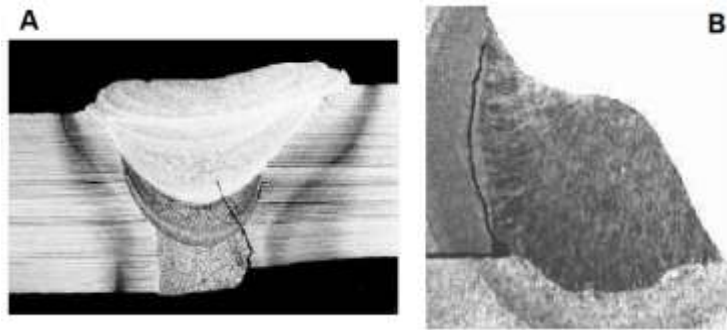
Slika 5.5 Mjesta nastajanja hladnih pukotina [8]

Mogu biti paralelne ili pod nekim kutem u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja, pa se tako s obzirom na smjer rasprostiranja govori o longitudinalnim (l), te transferzalnim (T) pukotinama.

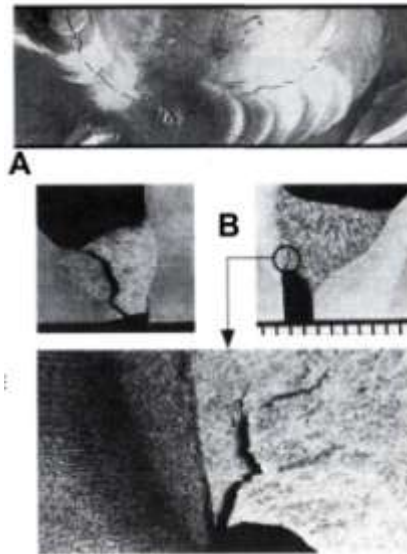
5.2.4 Pojavni oblici hladnih pukotina

Hladne pukotine se mogu pojaviti u nekoliko oblika zavarenog spoja na čelicima (slika 5.6, 5.7 i 5.8). Javljaju se na:

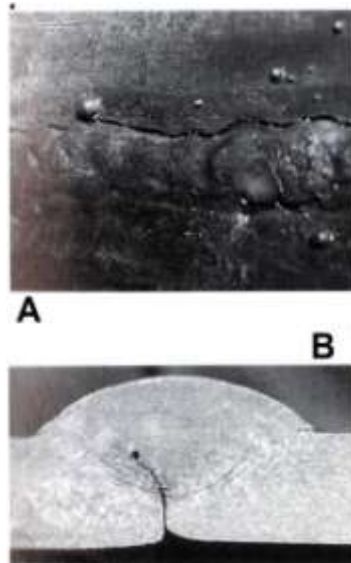
- sučeljenom spoju, pukotina u ZUT-u,
- kutnom spoju, pukotina u ZUT-u,
- kutnom kružnom spoju, pukotina u zavaru (polazi iz kratera),
- sučeljenom spoju, pukotina iz neprovarenog korijena zavara,
- kutnom spoju, pukotina u korijenu zavara.



Slika 5.6 Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja kod sučeljenog spoja (A), i kutnog spoja (B) [7]



Slika 5.7 Hladne pukotine u kutnom kružnom spoju (A) i kutnom spoju (B) [5]

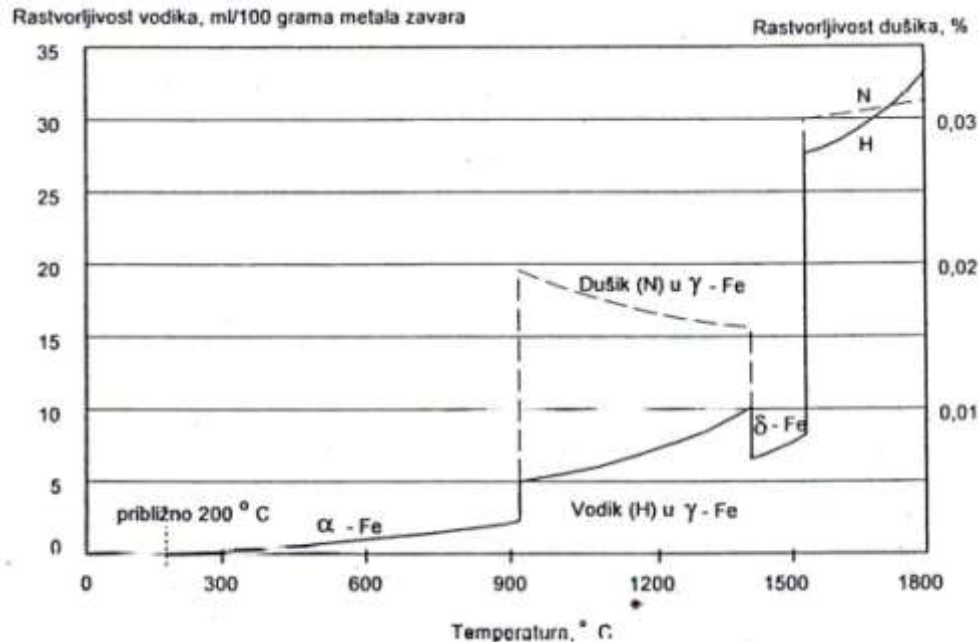


Slika 5.8 Hladne pukotine kod sučeljenog spoja pukotina u ZUT-u (A), i pukotina u korijenu zavora (B) [5]

Pukotine u sučeljenom i kutnom spoju, su nastale u otvrdnutoj zoni utjecaja topline, a ostale pukotine su inicirane u najslabijem dijelu zavarava.

5.2.5 Rastvorljivost vodika i dušika kod hladnih pukotina

Rastvorljivost, odnosno topljivost dušika i vodika u čistom željezu je prikazano na slici 5.9, gdje se može vidjeti promjena rastvorljivosti vodika (ml/100g metala zavarava) i dušika (%), u ovisnosti od temperature. [8]



Slika 5.9 Rastvorljivost vodika i dušika u željezu [8]

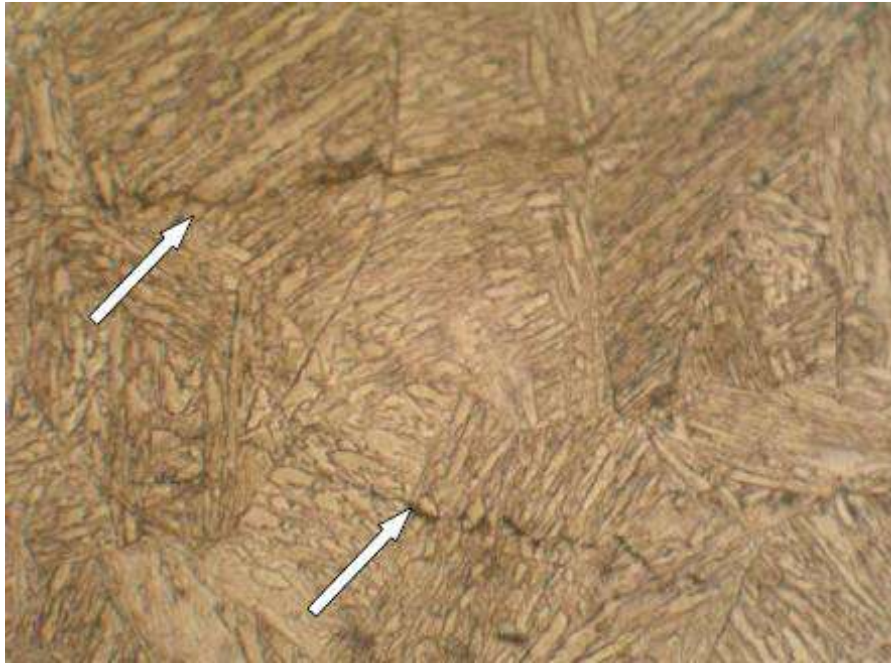
Treba naglasiti da rubovi žlijeba za zavarivanje, pokriveni korozivnim slojem, predstavljaju pojačan izvor vodika u metalu zavarava.

Sklonost hladnim pukotinama procjenjuje se analitički na osnovi različitih formula za ekvivalent ugljika (pokazuju sklonost zakaljivanju i nastajanju hladnih pukotina), a za eksperimentalno istraživanje postoji čitav niz laboratorijskih i praktičnih metoda.

Utjecaj vodika se može klasificirati u dvije glavne grupe [8]:

- Kvazi-krhki lom visokočvrstih materijala koji se može pojaviti kod relativno niskih koncentracija vodika, ova se pojava naziva vodikovom krhkosti.
- Pojava mjehurića (engl. *blister*) na površini i unutrašnje pucanje na mjestima uz sulfidne ili ostale uključke.

Na slici 5.10, prikazan je paralelni niz pukotina u grubozrnatom ZUT-u, uvećan 1000 puta.



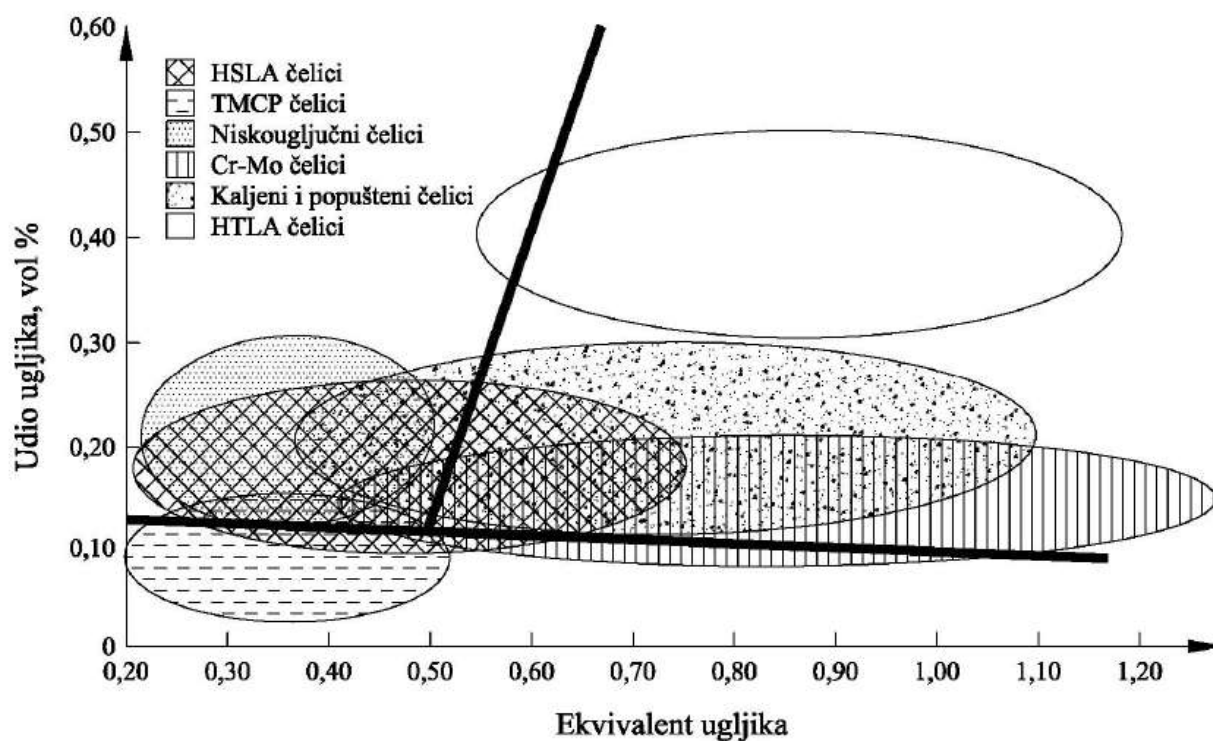
Slika 5.10 Paralelni niz pukotina u grubozrnatom ZUT-u, povećanje 1000 puta [8]

5.2.6 Ekvivalent ugljika kod hladnih pukotina

Ekvivalent ugljika, C_{ekv} , daje procjenu zakaljivosti nekog čelika tj. kod zavarivanja procjenu zakaljivosti osnovnog materijala. Zavarljivost čelika najčešće se u praksi procjenjuje upravo pomoću ekvivalenta ugljika. Mogućnost pojave martenzita i drugih tvrdih mikrostrukturnih faza i kontinuiteta direktno je povezana s ekvivalentom ugljika i brzinom hlađenja čelika s temperaturama iznad temperatura transformacija. Što je viši ekvivalent ugljika i veća brzina hlađenja, veća je i mogućnost pojave tvrdih i krhkih mikrostrukturnih faza pri hlađenju. to je osobito važno kod čelika povišene čvrstoće, ali i kod ostalih čelika koji pokazuju sklonost prema zakaljivanju i pojavi hladnih pukotina. [16]

Željena mikrostruktura zavarenog spoja koja će imati optimalnu kombinaciju mehaničkih svojstava, postiže se djelovanjem ugljika i drugih kemijskih elemenata iz čelika, uz određeni unos topline, brzinu hlađenja i druge faktore. Ugljik kao najznačajniji element ima veliki utjecaj na strukturu i mehanička svojstva čelika. Budući da u velikoj mjeri povećava tvrdoću i čvrstoću čelika, ugljik ima odlučujući utjecaj i na njegovu zavarljivost. Sa stajališta zavarivanja poželjno je imati što niži udio ugljika u čeliku ($C \leq 0,20\%$), pa tako i što niži ekvivalent ugljika. Čelici sa $C_{ekv} < 0,45$ se smatraju zavarljivim te za njih uglavnom postoje poznati parametri zavarivanja.

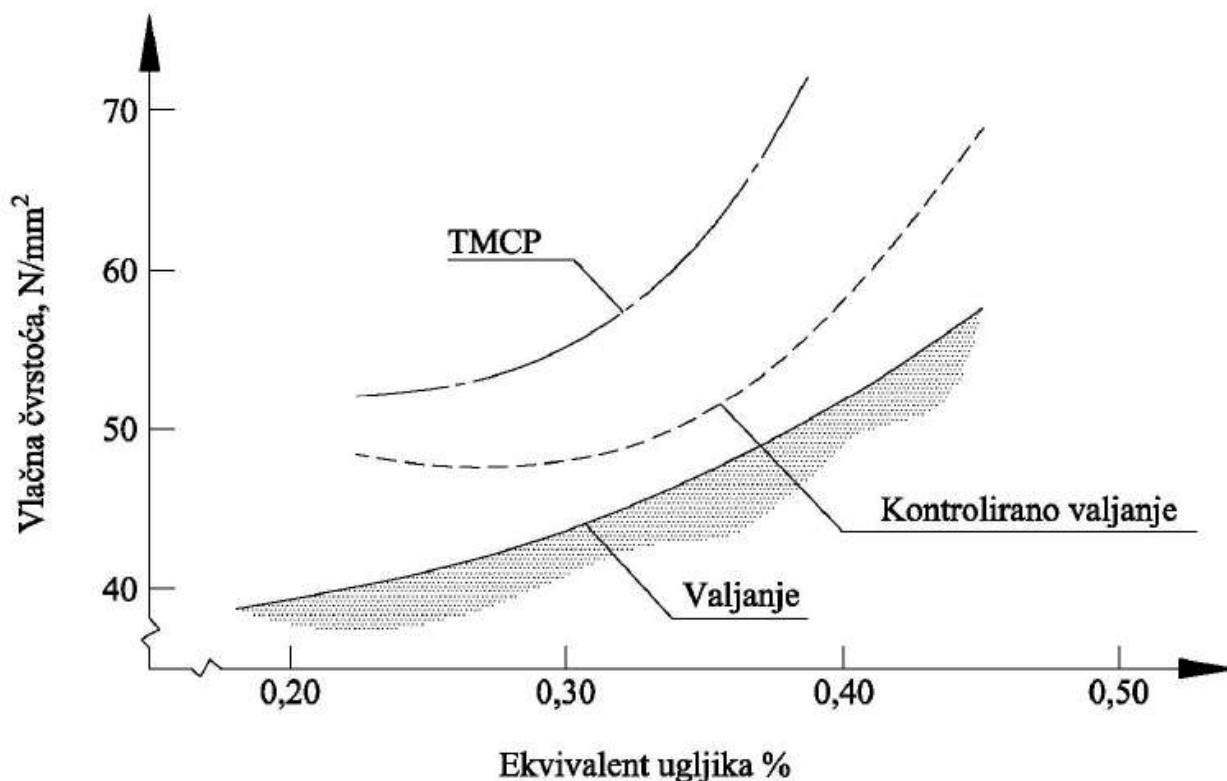
Postoji više izraza za izračunavanje ekvivalenta ugljika, a koji će se izrazi odabrati, to ovisi o vrsti čelika. Na slici 5.11 prikazan je ekvivalent ugljika kod različitih vrsta čelika (Graville-ov dijagram). Data je zavisnost ugljikovog ekvivalenta od sadržaja ugljika za: HSLA čelike, TMCP čelike (čelici proizvedni termo-mehanički kontroliranim procesima), niskougljične, Cr-Mo, poboljšane i HTLA čelike. [17]



Slika 5.11 Graville-ov dijagram [17]

U zoni I čelici posjeduju nizak sadržaj ugljika te nemaju sklonost nastanku hladnih pukotina, a to su termomehanički ojačani čelici. U zoni II se u najvećoj mjeri nalaze niskougljični i niskolegirani čelici visoke čvrstoće i kod njih se pukotine javljaju u ZUT-u ali i u metalu šava. U cilju izbjegavanja pukotina ovi čelici se zavaruju sa strogo kontroliranim unosom topline. Čelike u zoni III visok ugljikov ekvivalent i visok sadržaj ugljika čini izuzetno sklonim otvrdnjavanju, te svi načini zavarivanja daju mikrostrukturu jako osjetljivu na nastanak hladnih pukotina. I kod ove vrste čelika pukotine se mogu javiti u ZUT-u i u metalu šava. Kod ugljičnih čelika u većini slučajeva pukotine se javljaju u ZUT-u. [17]

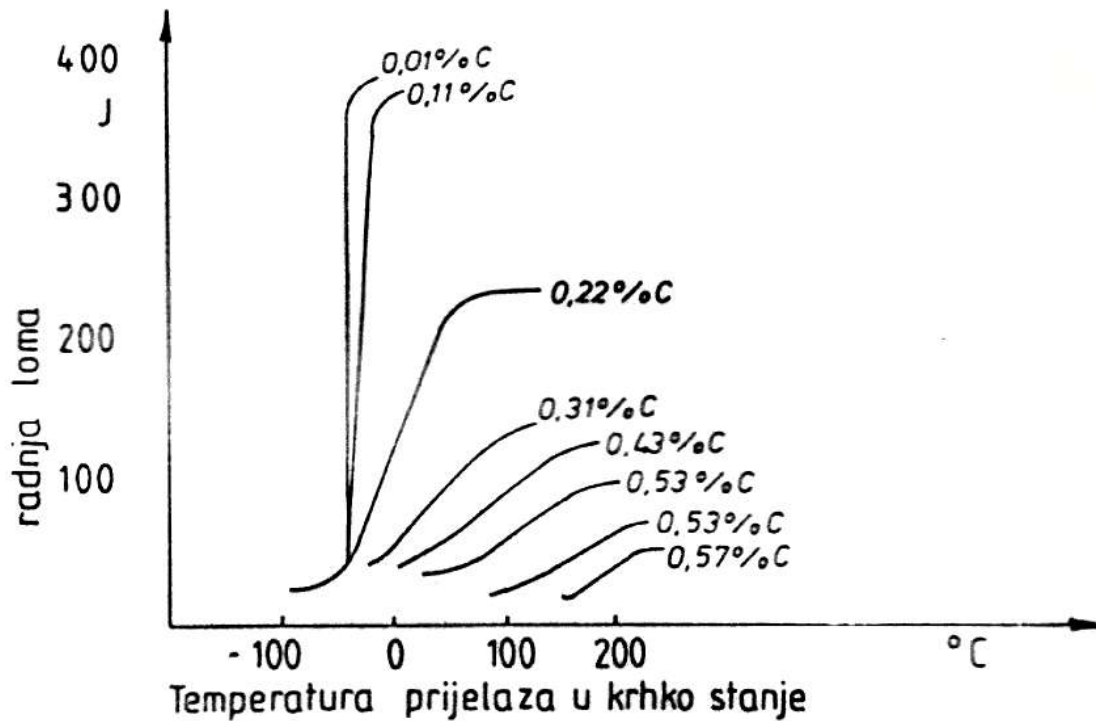
TMCP (engl. Thermo-Mechanical Control Process) je postupak termomehaničke obrade uz optimiranje mikrostrukture pomoću kontrole temperature i postupaka deformacije za vrijeme vrućeg valjanja, te kontrole procesa gašenja nakon vrućeg valjanja. Tim se postupkom postiže mikrostruktura jednolikog acikularnog i bainitnog ferita što materijalu daje veću čvrstoću i udarni rad loma. Na slici 5.12, prikazan je omjer vlačne čvrstoće i ekvivalenta ugljika gdje je vidljivo da za jednaki ekvivalent ugljika TMCP čelici imaju višu čvrstoću od klasičnih konstrukcijskih čelika. [16]



Slika 5.12 Odnos ekvivalenta ugljika (C_{ekv}) i vlačne čvrstoće [16]

S obzirom da je većina metalurških karakteristika čelika određena kemijskim sastavom, minimalna promjena kemijskog sastava osnovnog ili dodatnog materijala pri zavarivanju može znatno utjecati na pojavu pukotina u zavaru. Mogućnost pojave pukotina povećava se s povećanjem tvrdoće i smanjenjem udarnog rada loma ZUT-a, te je stoga C_{ekv} koristan pri procjeni mogućnosti pojave pukotina kod zavarivanja legiranih čelika u odnosu na nelegirane.

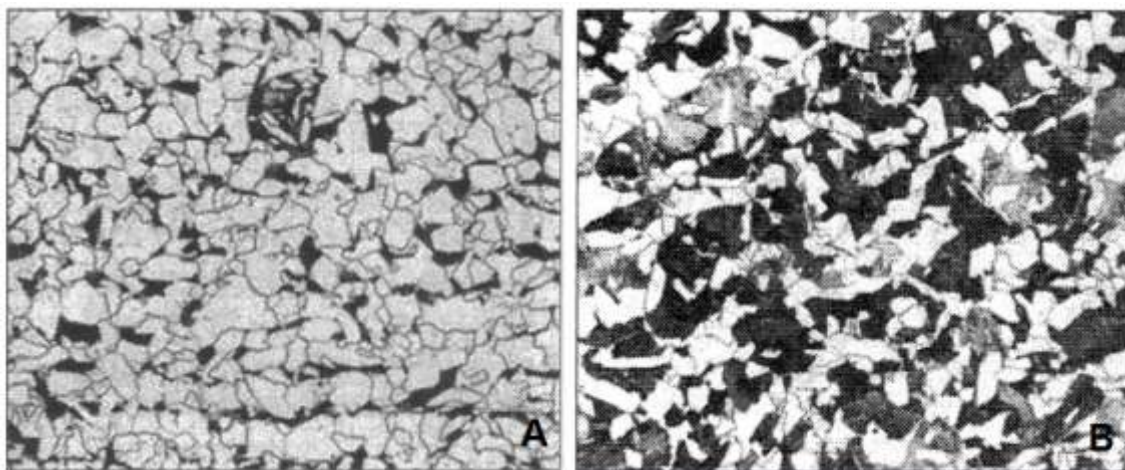
Isto tako, utjecaj o sadržaju ugljika u nekom materijalu ima i temperatura prijelaza u krhko stanje (slika 5.13). Povećanjem sadržajem ugljika, povećava se i prijelazna temperatura, pa takav čelik nije moguće koristiti pri nižim radnim temperaturama.



Slika 5.13 Ovisnost temperature prijelaza u krhko stanje i radnje loma o sadržaju ugljika u čeliku [18]

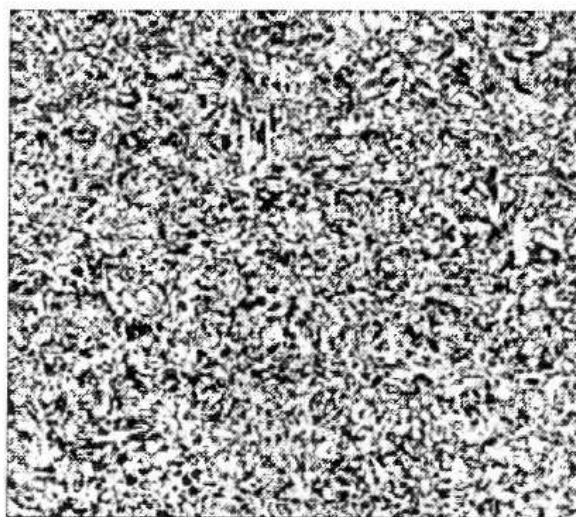
Mikrolegirajućih elementi, na veličinu feritnog zrna i mehanička svojstva sitnozrnatih visokočvrstih čelika imaju utjecaj na prirast temperature prijelaza u krhko stanje. [18]

Slika 5.14 prikazuje primjer općeg konstrukcijskog čelika, čija je mikrostruktura struktura feritno-perlitna i osjetljiva na lom. Na prvoj slici se vidi čelik s 0,1% ugljika i čelik s 0,25% ugljika. Kod oba primjera ekvivalent ugljika je manji od 0,45. Ukoliko se takvi čelici nakon toplog oblikovanja normaliziraju u mikrostrukturi će prevladavati sitnije zrno. Također prisutnost sitnijeg zrna se može poboljšati dodavanjem aluminija, te sprječava rast zrna tijekom zagrijavanja čelika. [19]



*Slika 5.14 Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika
A) čelik s 0,1% ugljika (povećanje 200x)
B) čelik s 0,25% ugljika (povećanje 200x)[19]*

Za ralik od njih, sitnozrnati mikrolegirani čelici (*slika 5.15*) nisu osjetljivi na krhki lom. Dobra zavarljivost se postiže niskim masenim udjelom ugljika ($< 0,2\%$) i ekvivalentom ugljika ispod 0,4.



Slika 5.15 Feritno-perlitna mikrostruktura sitnozrnatog čelika [19]

Postoji nekoliko desetaka različitih formula za određivanje ekvivalenta ugljika. Ovisno o materijalu kojeg zavarujemo koristimo određenu formulu. Tako je za zavarivanje visokočvrstih čelika najprikladnije koristiti formulu prema autorima Ito - Bessyo. U *tablici 5.1*, prikazano je nekoliko različitih formula za izračun ekvivalenta ugljika. Velika većina tih formula dobivena je eksperimentalno. [17]

Tablica 5.1 Formule za izračun ekvivalenta ugljika [17]

Metoda	Eksperimentalna formula	Korelacija sa pojavom pukotina
$C_{eq}(WES, JIS)$	$C_{ekv}(WES, JIS) = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4}$	72,2 %
$CE(IIW)$	$C_{ekv}(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5}$	78,1 %
Graville	$C_{ekv}(Graville) = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{8} + \frac{V}{9}$	82,6 %
Tanaka	$C_{ekv}(Pn - Tanaka) = C + \frac{Si}{20} + \frac{Mn}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{30} + \frac{Mo}{20}$	82,8 %
Düren	$C_{ekv}(Dueren) = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{16} + \frac{Cu}{16} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{40} + \frac{V}{15}$	84,0 %
Ito-Bessyo	$C_{ekv}(Ito - Bessyo, P_m) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B$	84,9 %
Stout	$C_{ekv}(Stout) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10}$	86,6 %
CEN	$C_{ekv}(CEN) = C + A(C) \cdot \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5 \cdot B \right)$ $A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh [20 \cdot (C - 0,12)]$	91,1 %

Ovisno o dobivenom iznosu ekvivalenta ugljika C_{ekv} procjenjuje se zavarljivost. [8]

$C_{ekv} < 0,25$ dobra zavarljivost

$0,25 < C_{ekv} \leq 0,35$ zadovoljavajuća zavarljivost

$0,35 < C_{ekv} \leq 0,45$ ograničena zavarljivost

$C_{ekv} > 0,45$ vrlo loša zavarljivost

Na osnovu izvedenih formula, može se ocjeniti zavarljivost nekih od sitnozrnatih mikrolegiranih čelika pomoću ugljikovog ekvivalenta za podatke o kemijskom sastavu (tablica 5.2).

Tablica 5.2 Ocjena zavarljivosti čelika pomoću ekvivalenta ugljika [18]

Metoda Materijal	Ceq	CE(IIW)	Pn	Pcm	CEN	JUS	Seferijan
NIOMOL 490	0,315	0,3	0,237	0,172	0,24	0,3	0,26
NIOMOL 390	0,281	0,267	0,218	0,162	0,22	0,266	0,24
NIONICRAL 70A	0,576	0,677	0,27	0,3	0,59	0,677	0,56
NIONICRAL 70B	0,593	0,693	0,28	0,305	0,604	0,693	0,57
NIONICRAL 60A	0,594	0,683	0,258	0,298	0,597	0,683	0,594
NIONICRAL 60B	0,657	0,74	0,307	0,318	0,65	0,74	0,55
NIOBAL 43NP	0,4	0,383	0,29	0,198	0,297	0,383	0,32
NIOBAL 43	0,458	0,441	0,365	0,286	0,453	0,442	0,4
NIOVAL 50	0,471	0,475	0,365	0,294	0,478	0,475	0,43
NIOVAL 47	0,458	0,442	0,365	0,286	0,453	0,442	0,4

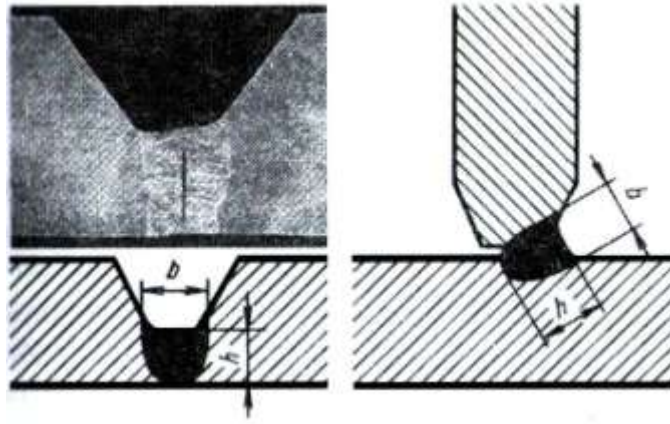
Na temelju vrijednosti ekvivalenta ugljika, može se zaključiti da je problematična zavarljivost kod sitnozrnatih čelika Nioval 50, što bi značilo da kod zavarivanja navedenog čelika treba posebno obratiti pažnju na obavezno predgrijavanje. Za orijentacijsku ocjenu zavarljivosti, vrlo često se uzima maksimalna tvrdoća koja se nakon zavarivanja može očekivati u ZUT-u.

Kao i kod ostalih izračuna vezanih za zavarivanje, tako je i ovdje od posebne važnosti točno poznavanje sadržaja kemijskih elemenata u materijalu i zavarenom spoju. Proračuni se izvode za maksimalan sadržaj legirajućih elemenata, pa se tako dobiju maksimalne temperature predgrijavanja, čime se smanjuje vrijednost pojavljivanja hladnih pukotina. [18]

Osim izračunavanja ekvivalenta ugljika, kod visokočvrstih čelika, potrebno je dodatnim ispitivanjima donijeti ocjenu o njihovoj zavarljivosti, jer uz jednaki ekvivalent ugljika, kod različitih debljina i sadržaja vodika u zavaru, pokazuju različitu osjetljivost prema hladnim pukotinama. [8]

Stoga je potrebno provesti, uz izračun ekvivalenta ugljika, neku od metoda, koje će kasnije biti navedene. Istaknuti niskolegirani čelici povišene i visoke čvrstoće obično su skloni nastajanju

hladnih pukotina kod zavarivanja. Međutim, nisu isključene ni tople pukotine pri prevelikom unosu topline, velikih količina taline zavara ili nepovoljnog oblika zavara (*slika 5.16*).



Slika 5.16 Nepovoljan oblik zavara, koji uzrokuje pukotine [5]

5.2.7 Izbjegavanje nastanka hladnih pukotina

"Navedeni faktori, koji uzrokuju pukotine kod zavarivanja metala taljenjem, ne mogu se potpuno izbjeći, ali se mogu u određenim mjerama smanjiti ili djelomično otkloniti." [5]

Prvo treba izvoditi konstrukcijska rješenja zavarene konstrukcije, na način da ukrućenost zavarenog spoja bude što manja, uz izbor oblika spoja sa što manje unesenog dodatnog materijala.

Vrlo je važan pravilan izbor postupaka zavarivanja, parametara i ostalih uvjeta zavarivanja, pri čemu važnu ulogu ima **unos toplinske energije (E)**. Ako je unos topline premali, onda se povećava sklonost hladnim pukotinama, a ako je preveliki, onda se povećava sklonost pogrubljenju zrna, smanjenu žilavosti pa i sklonosti toplim pukotinama.

Unos topline izračunava se empirijskim izrazom [5]:

$$\boxed{\quad \quad \quad}$$

gdje je:

= jakost struje zavarivanja (A)

= napon električnog luka (V)

= brzina zavarivanja cm/min

= koeficijent iskoristivosti električnog luka (kod REL i MAG 0,65-0,85, TIG 0,50,0,60, EPP 0,85-0,95)

Isto tako je važan i izbor odgovarajućih dodatnih materijala za zavarivanje, pri čemu kod zavarivanja čelika treba birati elektrode s bazičnom oblogom i malim sadržajem vodika, bazične punjene žice i bazične praškove. Dobro je koristiti preporuke za upotrebu proizvođača dodatnih materijala.

Osim što treba pravilno odabrati dodatni materijal, vrlo je važno što više smanjiti pristup vodika u zavar, što znači održavanje velike čistoće mjesta zavarivanja od vlage, masnoća i drugih nečistoća uz pravilno rukovanje i skladištenje dodatnog materijala. Važno je pravilno sušiti dodatni materijal. U slučaju da se ne provodi predgrijavanje, mjesto spoja treba plamenikom osušiti, bez obzira što možda izgleda suho, stoga se naročito preporuča taj postupak za vrijeme hladnijih dana. Na *slici 5.17* je prikazan primjer zavara, gdje su vidljive tzv. "riblje oči", mjesta gdje je vodik u zavaru. Ove pogreške se obično mogu otkriti kontrolom bez razaranja.



Slika 5.17 Površina zavarenog spoja gdje su vidljive tzv. "riblje oči" koje su rezultat vodika u zavaru [20]

U praksi se ponekad pojavljuju pukotine po sredini prvog sloja zavara, i to kod EPP zavarivanja čelika većih debljina. Takav se problem rješava manjom kupkom zavara, manjom jakosti struje, manjim promjerom žice ili polaganjem prvog sloja REL postupkom odgovarajućom bazičnom elektrodom, te povećanom brzinom zavarivanja. Oblik zavara širine (b) / dubina (h) mora biti veći od 1.

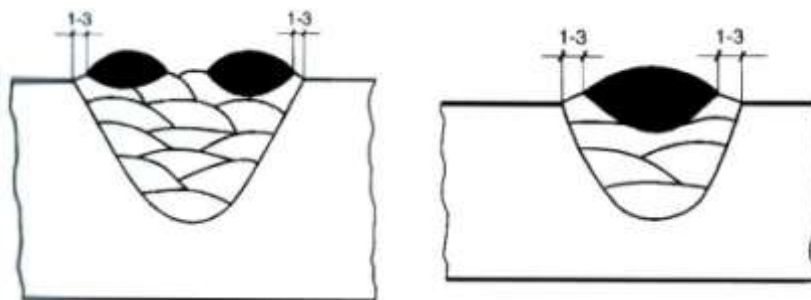
Često se postavlja pitanje, što je pravilnije s gledišta pojave pukotina u kutnom zavaru - konkavan (udubljen) ili konveksan (ispupčen) oblik zavara?

Radi boljeg prijelaza silnica naprezanja u opterećenju spoja, preporuča se udubljeni kutni zavar s blagim prijelazima. Bazična elektroda, bazični prašak i MAG zavarivanje daju malo ispupčeni oblik zavara. Kod višeslojnog zavarivanja u dubokom žlijebu preporučuju se vezani, uži i blagi ispupčeni slojevi, a ne široki slojevi udubljenog oblika (*slika 5.18*). [21]



Slika 5.18 Zavar udubljenog oblika (veća sklonost pojavi pukotina) i zavar blago ispupčenog oblika radi većih naprezanja na površini [5]

U tehnici izvođenja zavarenog spoja, važan je redoslijed kako se polažu završni slojevi, naročito kod čelika povišene čvrstoće. *Slika 5.19* nam prikazuje izvođenje pokrovnih slojeva kojima se na neki način provodi odžarivanje prijašnjih slojeva zavara.



Slika 5.19 Izvođenja završnih slojeva zavarenog spoja - "pokrovni slojevi za održavanje" [5]

Prema svim nabrojenim uzrocima nastajanja pukotina, mogu se navesti osnovna pravila za izbjegavanje nastajanja hladnih pukotina:

- provoditi redoslijed zavarivanja koji osigurava najmanja zaostala naprezanja u zavarenom spoju

- pravilan izbor postupaka i uvjeta zavarivanja
- čistoća u pripremi stroja za zavarivanje
- nužan je ograničeni unos topline tijekom zavarivanja
- pravilan izbor dodatnog materijala
- izbjegavanje oštećenja površine materijala električnim lukom i oštrim alatima
- pravilno izvoditi započinjanje i prekidanje zavarivanja, te pravilnu popunu završnog kratera
- kod zavarivanja debljih materijala, provodi se dodatna kontrola zavarenih spojeva nakon održavanja
- obavezno treba izvršiti predgrijavanje na odgovarajuću temperaturu i održavati je tijekom zavarivanja
- sušenje elektroda i praška prije zavarivanja
- izbjegavati privarivanje pomoćnih sredstava po površini materijala
- provoditi višeslojno zavarivanje vezanim slojevima, bez velikog poprečnog gibanja vrha elektrode.

6. METODE ZA ISPITIVANJE SKLONOSTI NASTAJANJA HLADNIH PUKOTINA

U načelu, kvalitetan kriterij ispitivanja zavarljivosti morao bi omogućiti korisniku da odabere kombinaciju čelika, dodatnog materijala i postupka zavarivanja koji bi osigurali dovoljan stupanj sigurnosti od pojave vodikovih pukotina uz minimalni trošak. Uz to, ispitivanjem bi se morao razlučiti utjecaj svakog utjecajnog faktora koji može dovesti do pojave pukotina. [8]

Ne postoji metoda ispitivanja koja bi jednoznačno odredila problem zavarljivosti čelika. Zbog toga, za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti, koristi se niz raznih eksperimentalnih metoda od kojih svaka služi za određivanje specifičnih svojstava. Tako se kod visokočvrstih čelika koristi Implant i Tekken test kako bi se ispitala sklonost materijala prema nastajanju hladnih pukotina. Također, zavarljivost se ispituje i s metalurškog stajališta pomoću ekvivalenta ugljika dok se veličina temperature predgrijavanja ispituje pomoću računskih i eksperimentalnih metoda. [17]

Metode ispitivanja sklonosti čelika prema nastanku hladnih pukotina pri zavarivanju možemo podijeliti također na izravne (direktne) i neizravne (indirektne). Izravne su metode one koje se provode na uzorcima zavarenih spojeva i/ili zavarenim spojevima na zavarenoj konstrukciji, dok se neizravne metode ispituju na različitim eksperimentalno dobivenim jednadžbama za procjenu utjecaja raznih čimbenika na pojavu pukotine. [17]

Izravna ispitivanja mogu se podijeliti u tri skupine [17]:

- ispitivanje sa stvarnim zavarivanjem uz vlastitu krutost (Tekken, Lehigh, CTS, probe s kružnim zarezom RD) i probe s prisilnom krutošću (s vanjskim dodatnim opterećenjem, npr. TRC, RRC i dr.)
- ispitivanje s realnim ciklusom ili uloženim uzorkom (umetak ili implant)
- ispitivanje simuliranjem ciklusa zavarivanja

Kriterij ocjene sklonosti hladnim pukotinama može biti [17]:

- kvalitativan (nakon istraživanja zavarljivosti donosi se zaključak da je materijal "sklon" ili "nije sklon" prema hladnim pukotinama)
- kvantitativan, ako se može numerički iskazati neku od relevantnih veličina (npr. maksimalna naprezanja pri kojima ne dolazi do nastajanja hladnih pukotina kod metode implant)

Neizravna ispitivanja koriste računske metode za ocjenu sklonosti čelika prema nastanku hladnih pukotina. [17]

6.1 Implant metoda

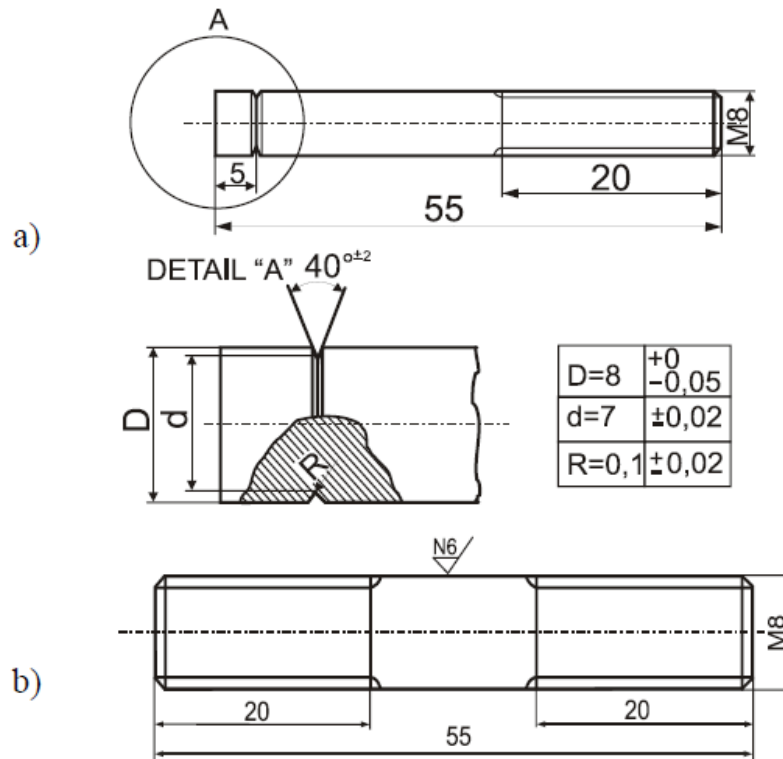
Implant metoda ispitivanja je najprikladnija metoda za ispitivanje nastanka hladnih pukotina zbog [17]:

- Jednostavnosti izvođenja eksperimenta
- Implant uzorak prolazi kroz sve toplinske cikluse kao i osnovni materijal
- Postupak predgrijavanja i naknadne toplinske obrade isti je kao i kod zavarivanja u realnim uvjetima
- Iz malog uzorka moguće je sakupiti veliku količinu podataka (kritično implant naprezanje, izgled zone zavara sa zonom utjecaja topline i metalom zavara, mikroanalizu uzoraka,...).

Ispitivanje zavarljivosti ovom metodom zasniva se na promjeni utjecajnih čimbenika, kao što su: dodatni materijal, zarivački toplinski ciklus, temperatura predgrijavanja, udjel difundiranog vodika, naprezanje i dr., kao i sagledavanje njihova utjecaja na nastanak hladnih pukotina. [22]

Ispitivanje se provodi s ciljem utvrđivanja sklonosti materijala prema hladnim pukotinama u ispitnim radnim uvjetima. Implant metoda daje kvantitativan rezultat (postoje li pukotine ili ne). [17]

Pri ovom ispitivanju upotrebljava se strojno obrađeni cilindrični umetak iz čelika koji treba ispitivati, prikazan na *slici 6.1*. Takav umetak se umetne u kalibriranu rupu izbušenu u potpornoj ploči, tako da je zarezani kraj u ravnini s površinom ploče. [22]



Slika 6.1 Dimenzije i oblik ispitne epruvete (implanta) za ispitivanje Implant probom
a) izgled zareza b) stvarni izgled uzorka [22]

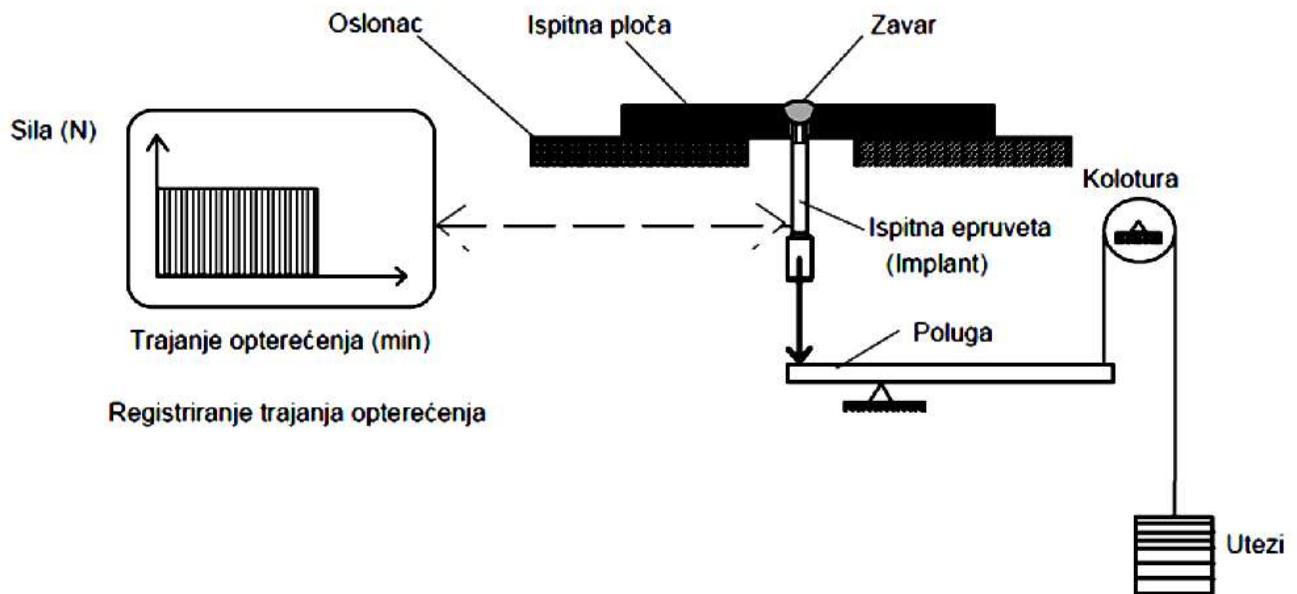
Implant uzorak ima narezan navoj s obje strane (slika 6.2), te se kao takav polaže u provrt na položenoj osnovnoj ploči gdje navoj ima funkciju mnogostrukih zarezova koji djeluju kao koncentratori naprezanja.



Slika 6.2 Implatni uzorak s obostranim navojem [17]

Navoj na drugom kraju uređaja koristi se za pričvršćivanje u implant uređaj za ispitivanje. Nakon pozicioniranja radnog komada i pištolja za zavarivanje s kontroliranom udaljenosti sapnice od ranog komada u iznosu od 15 mm, polaže se zavar na ispitnoj ploči. Zavar ide preko Implant ploče i prelazi preko Implant uzorka zavarujući ga tako na položenu ploču. Nakon pozicioniranja implant uzorka u uređaj i implant položenu ploču, te polaganja zavara, potrebno je opteretiti uzorak s određenom silom, koja se određuje prema granici razvlačenja i vlačnoj čvrstoći osnovnog materijala.

Na *slici 6.3* shematski je prikazan skica implant uzorka i potporne ploče.

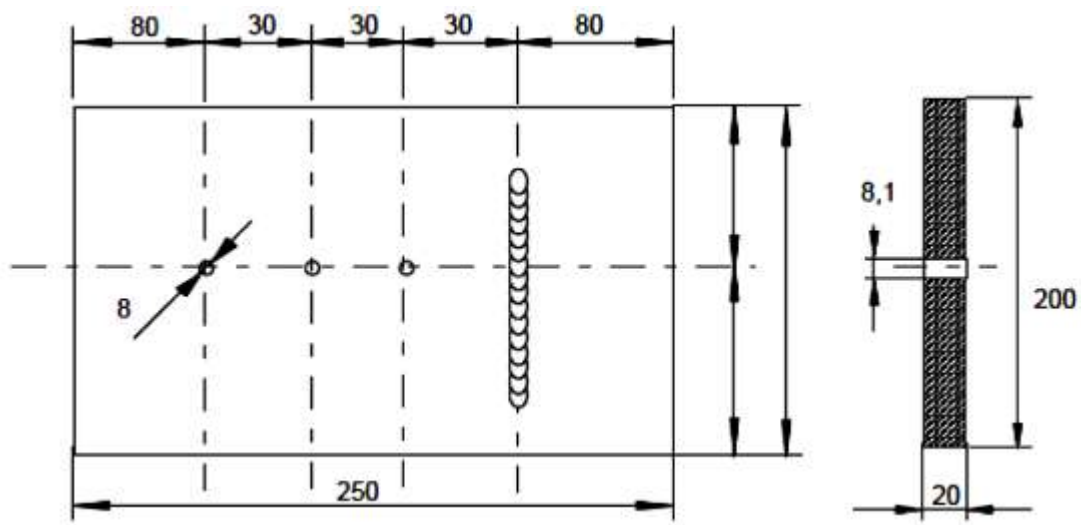


Slika 6.3 Shematski prikaz uređaja za ispitivanje - Implant metoda [23]

Na *slici 6.4*, prikazan je navar na implant ploči (primjer iz prakse), pomoću kojeg će se ispitivati razlog nastanka hladnih pukotina u zavarenom spoju, dok *slika 6.5* prikazuje shemu implant ploče za ispitivanje hladnih pukotina.



Slika 6.4 Prikaz navara na Implant ploči [17]



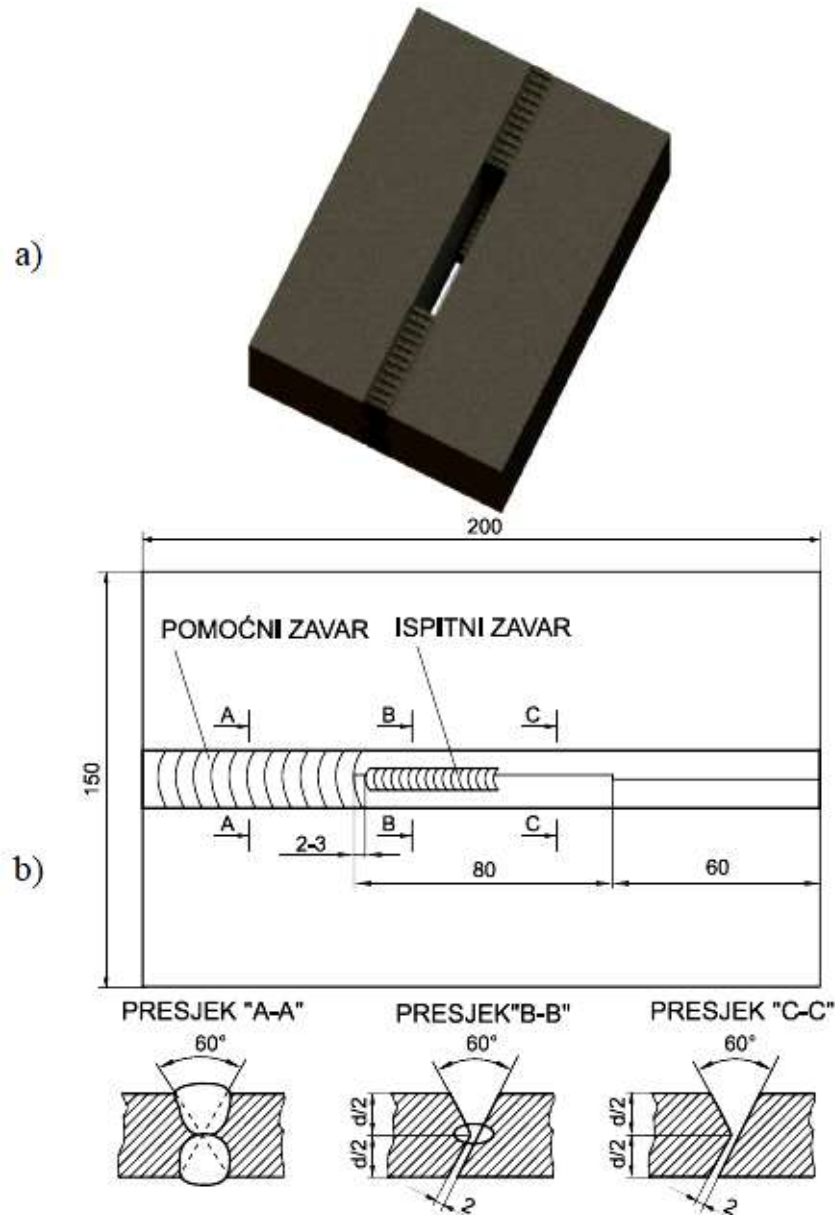
Slika 6.5 Izgled ispitne ploče po Implant metodi [23]

Urezi na zavaru nastali zbog naprezanja, imaju oblik spirale, koje nastaje u ZUT-u (slika 6.6). Ispitivanje pukotina preko Implant metode, najpovoljnije je kod ispitivanja HSLA čelika.

6.2 Tekken metoda

Ova metoda ispitivanja može se koristiti kao tehnološko ispitivanje pri postupku elektrolučnog zavarivanja i zavarivanja pod praškom za relativno tanke limove (12 mm) i za one debljine do 150 mm . Ispitivanjem dobivamo kvantitativne pokazatelje, tj. ima li ili nema pukotina uz određenu tehnologiju i uvjete zavarivanja. Ispitivanje se najčešće koristi pri izboru parametara zavarivanja korijenskog prolaza sučeljenih spojeva. [9]

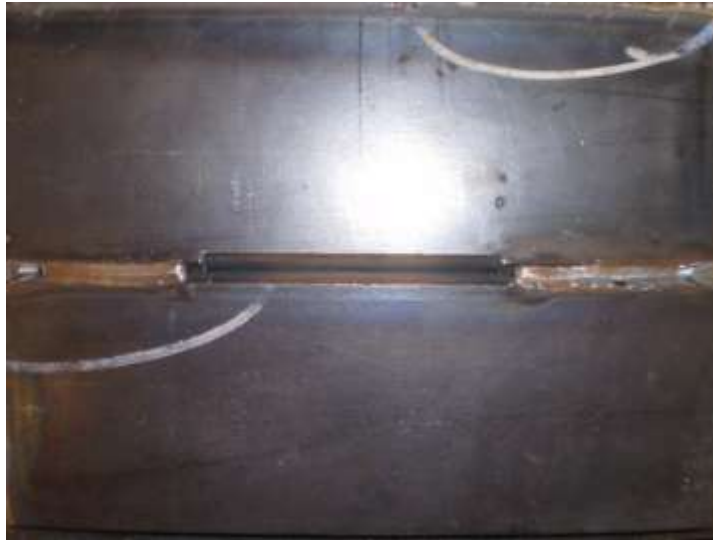
Oblik, priprema i dimenzije uzorka za ispitivanje po Tekken metodi, prikazani su na *slici 6.8*.



Slika 6.8 Epruveta za Tekken ispitivanje

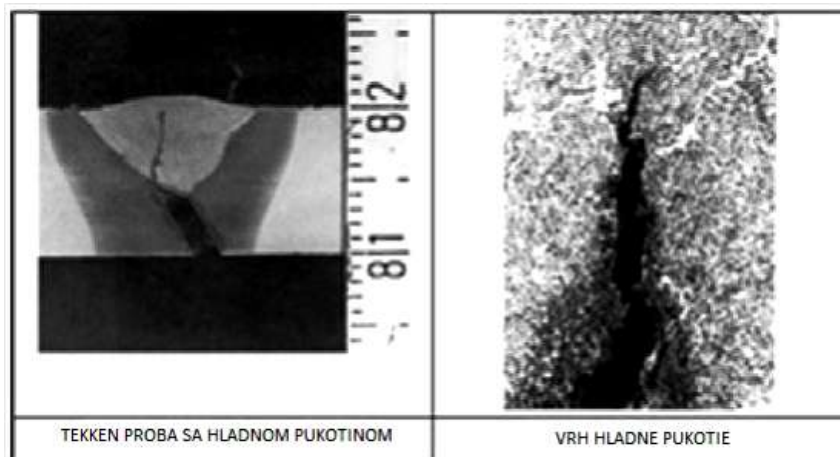
a) izgled zavarenog uzorka, b) priprema i dimenzije uzorka [22]

Slika 6.9 prikazuje također ispitni uzorak, ali iz prakse, gdje se na ploči nalaze pomoćni zavari, nakon čega je uzorak spreman za ispitivanje.



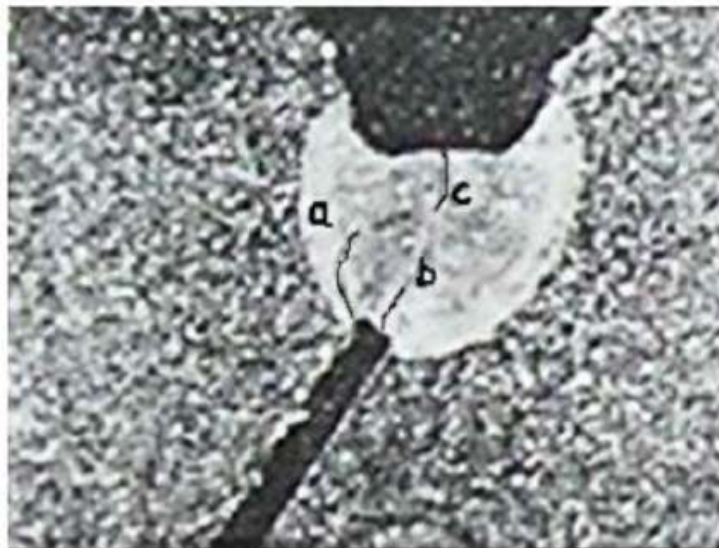
Slika 6.9 Ispitni uzorak (praksa) - Implant metoda [25]

Pukotine se najčešće javljaju u području linije staljivanja metala zavara, što ukazuje na to da je pogodno za razlikovanje raznih osnovnih materijala. Uzorak se najčešće priprema od dvije međusobno zavarene ploče, pri čemu zazor Y spoja treba biti 2 mm. Za tehnologiju zavarivanja pod zaštitom praška pomoćni šav se završava do kraja na jednoj strani. Pri ovom ispitivanju javljaju se 3 tipa pukotina. To su pukotine koje nastaju na prijelaznoj zoni donjeg dijela korijenskog spoja *a*, na strani X pripreme ispitnog spoja. To su tipične hladne pukotine, čiji je glavni uzrok nastanka vodik (slika 6.10), pa se šire do ZUT-a i mogu se vratiti natrag do metala zavara. [25]



Slika 6.10 Hladna pukotina uzrokovana vodikom - Tekken metoda [26]

Na *slici 6.11*, može se vidjeti tipična mjesta nastanka hladnih pukotina. Pukotina tipa b i c nastaju u metalu zavara pri čemu se mogu spajati.



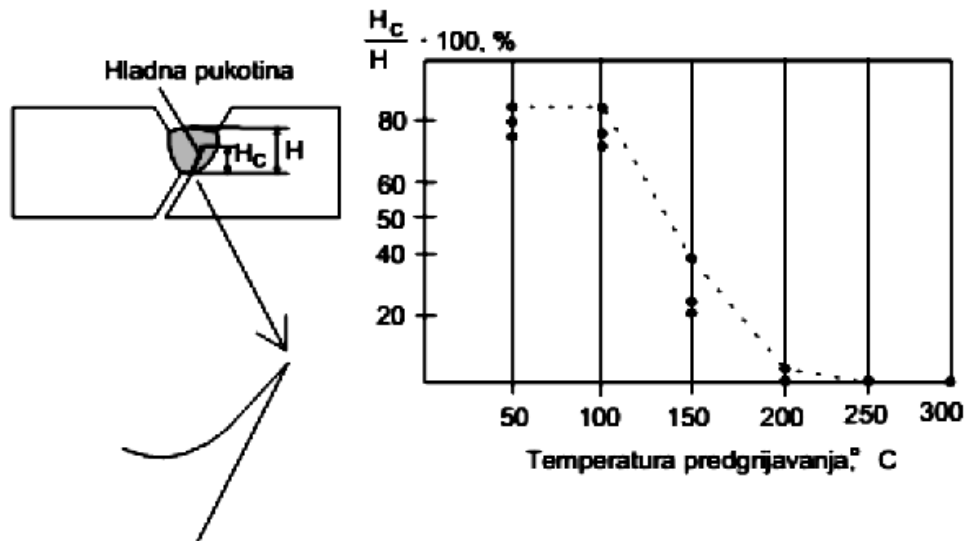
Slika 6.11 Tipična mjesta nastanka hladnih pukotina [25]

Sljedeća faza provođenja Tekken metode je analiza parametra pukotine, odnosno omjera veličine pukotine i visine zavara. Uzet je jedan primjer iz prakse (*slika 6.12*), gdje se Iz makroizbruska vidi kako je pukotina nastala i napredovala u ZUT-u. Pukotina se pojavila na licu zavara.



Slika 6.12 Lice zavara uzorka - primjer iz prakse [25]

Ispitivanje se ocjenjuje analizom 5 isječaka, od kojih su dva iz početnog i završnog kratera. Iz ovih analiza se određuje učestalost pojave pukotina po dužini uzorka u ovisnosti od parametara zavarivanja (npr. temperatura predgrijavanja). Na slici 6.13 je prikaz ovakvog ocjenjivanja. [25]



Slika 6.13 Prikaz ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama po Tekken metodi [25]

Da bi se prihvatio parametar zavarivanja poput temperature predgrijavanja potrebno je uspješno zavariti bez nastanka pukotina 3 uzorka. Utjecajni parametri za izbjegavanje pukotina su: sadržaj vodika u metalu zavara, temperatura predgrijavanja te unos topline. Kad se pukotina pojavi, klasifikacija zavarenog spoja se izvodi uvođenjem "koeficijenta pukotine". Koeficijent pukotine jednostavno se izračunava omjerom visine pukotine i visine zavarenog spoja. [8]

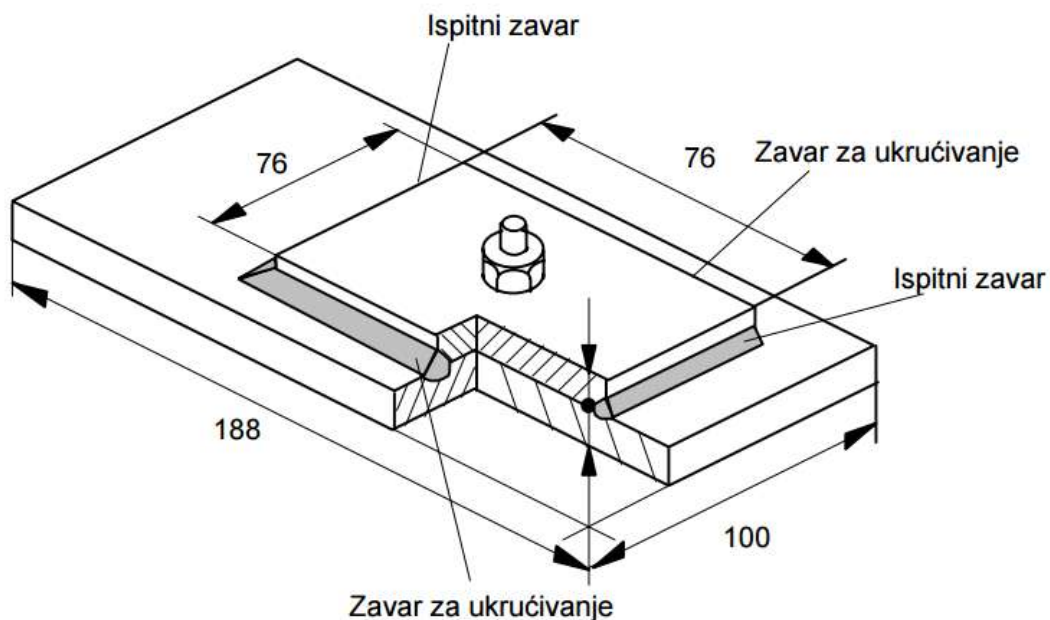
Pukotine se najčešće javljaju od prijelazne zone do ZUT-a, što ukazuje na to da je pogodno za razlikovanje raznih osnovnih materijala. Procedura izvođenja Tekken testa [27]:

- Prvo se zavare pomoćni zavari, a tek onda ispitni zavar - pomoćnim zavarima ploča je ukrućena (nema stezanja niti rastezanja)
- Epruvetu je potrebno ostaviti 48 sati i nakon toga se ispituje
- Ispitivanje se prvo vrši vizualnim pregledom, zatim penetrantskim tekućinama, a zatim se zavar reže na tri mjeta, rade se izbrusci i promatraju se mikroskopom;
- U ovisnosti o duljini i visini pukotina zaključujemo o sklonosti prema hladnim pukotinama.

6.3 CTS metoda

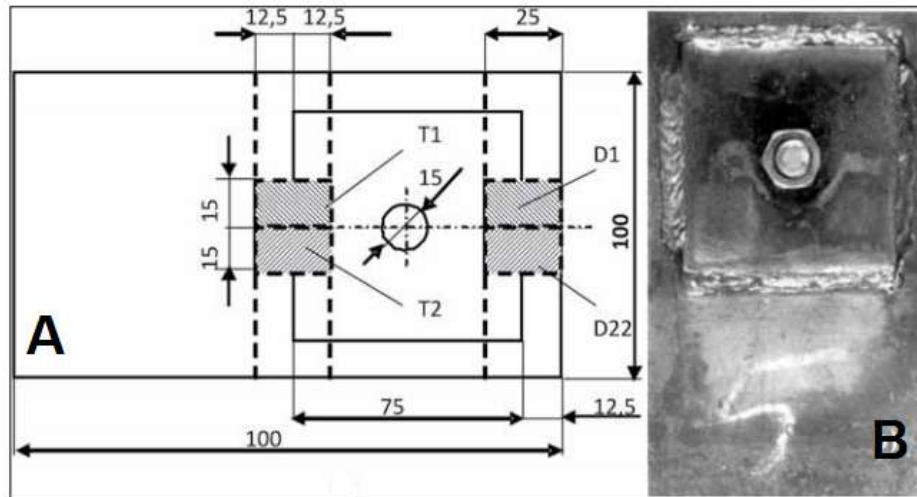
CTS metoda (engl. Control Thermal Severity) je metoda koja je praktična za pogonska ispitivanja sklonosti kutnih zavarenih spojeva prema hladnim pukotinama.

CTS metoda simulira različite modele vođenja topline. Između ploča (slika 6.14) se postavi npr. podložna pločica, pa se osjetljivost metode na hladne pukotine značajno poveća. Prvo se izvode zavari za ukrućenje, koji su nešto deblji od ispitnih. Ispitni su debljine 4-6 mm, i duljine od 75 mm. Nakon zavarivanja i potpunog hlađenja, vrši se odgovarajuće isjecanje uzoraka i mikroskopska analiza zavarenih spojeva. CTS metoda je isto kvalitativna metode ispitivanja zavarljivosti [28].



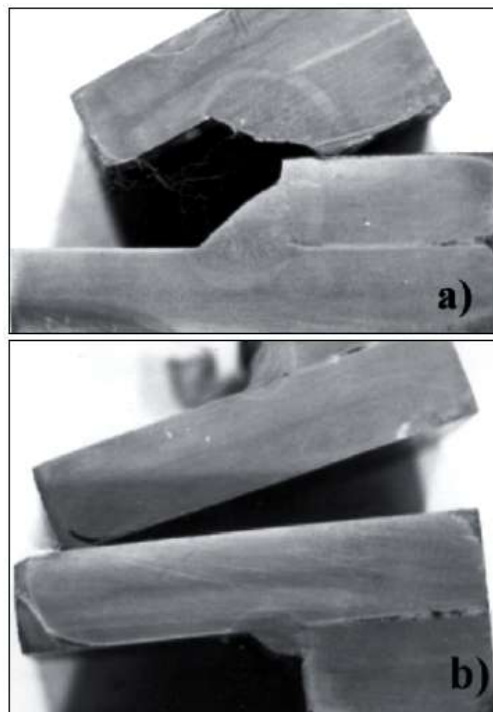
Slika 6.14 Primjer ispitivanja zavarljivosti pomoću CTS metode [28]

CTS test za čelik daje realne parametre toplinskih uvjeta zavarivanja. Za ispitivanje čelične ploče, debljine 11 i 14,5 mm, uzeti su uzorci koji su spremni za ispitivanje, što se može vidjeti na slici 6.15. Pomoćni zavari se nalaze sa obje strane i nakon hlađenja i zatezanja vijka, se napravilo ispitivanje u dužini od 75 mm. [29]



Slika 6.15 CTS metoda, konfiguracija zavara
(A), slika iz prakse (B) [29]

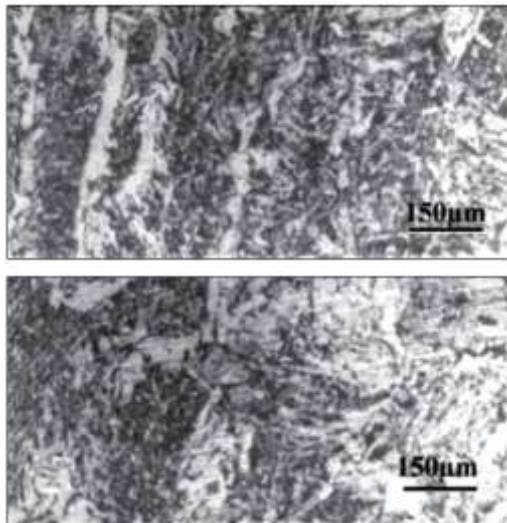
Na slici 6.16, dati su izrezani uzorci koji su spremni za tehnološka ispitivanja na optičkom mikroskopu, gdje će se ispitivati tri toplinska zavara na materijalu. Zaključeno je da u svakom slučaju nije pronađena niti jedna pukotina. Na slici 6.16 se vide neki od tipičnih struktura ispitivanog kontrolnog uzorka. [30]



Slika 6.16 Poprečni presjek ispitnog uzorka - CTS metoda
a.) struja zavarivanja 24 KJ/cm, b.) struja zavarivanja 6 KJ/cm [30]

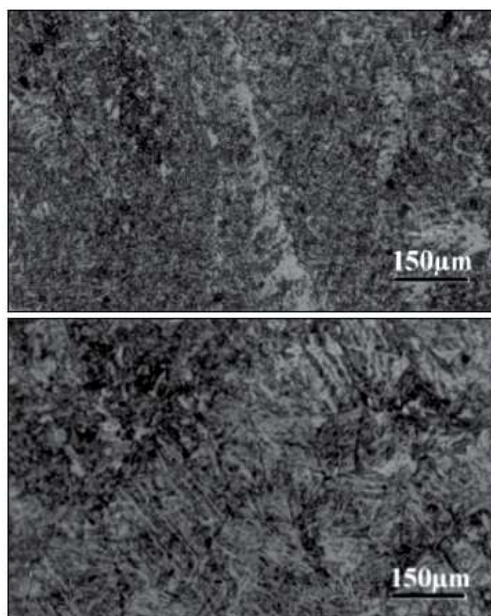
Uzeti su uzorci kod kojih je struja prvog uzorka zavarivanja bila 24 KJ/cm, dok je drugog bila 6 KJ/cm. Vidi se da je uzorak sa većom strujom zavarivanja više sklon nastanku pukotina, nego uzorak sa manjom strujom zavarivanja.

Slika 6.17 prikazuje neke tipične strukture od tri toplinska kontrolnog uzorka za ispitivanje.



Slika 6.17 Tipična mikrostruktura zavara kod CTS metode ispitivanja [30]

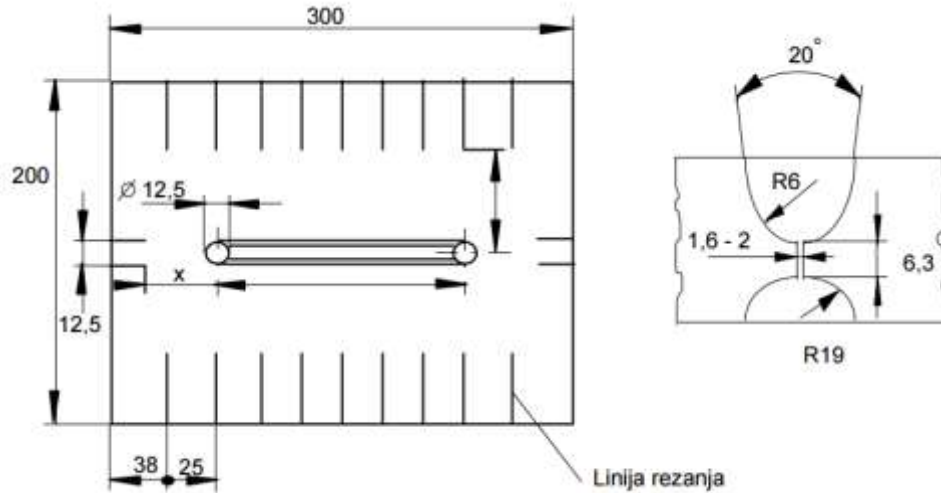
Nakon ispitivanja CTS metodom, može se zaključiti da je zavar na čeliku A, B i C kvalitete otporan na hladne pukotine ako je unos topline u rasponu od 6 - 10 KJ/cm, što se može vidjeti na *slici 6.18*. [30]



Slika 6.18 CTS ispitivanje uzorka povišene kvalitete [30]

6.4 Lehigh metoda

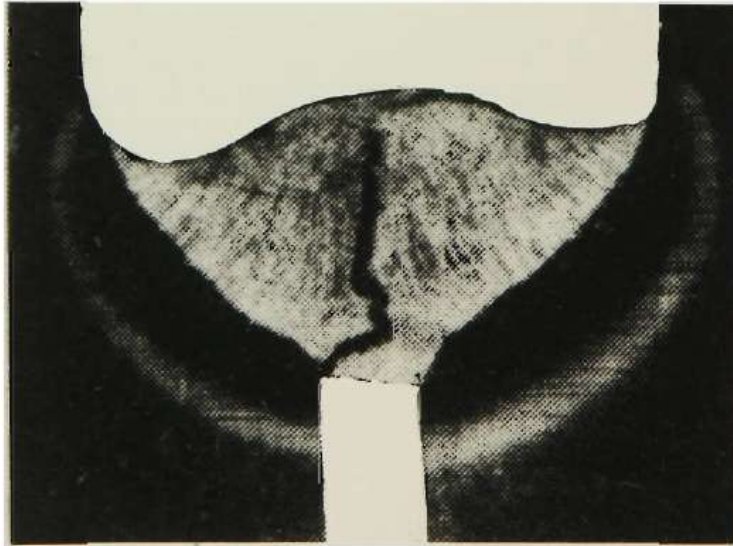
Lehigh Restraint metoda je još jedna od metoda pomoću koje se dobiva kvalitativna ocjena zavarljivosti. Shema Lehigh metode je prikazana na slici 6.19.



Slika 6.19 Shema ispitivanja zavara pomoću Lehigh metode [28]

Metoda Lehigh se koristi za stvaranje kvantitativnih podataka za ovisnost o skrućivanju vodika, odnosno osjetljivost zavara na pukotine. Ovaj ispitni postupak se temelji na osnovnom principu stupanja ograničenja, koji je potreban za proizvodnju kvalitetnog metalnog zavara. [31]

Ispitivanje čelika visoke čvrstoće, može se raditi preko svih metoda, ali kod usporedbe Lehigh metode i Tekken metode, može se iz nastalih pukotina u poprečnom presjeku zaključiti da je Lehigh metoda ispitivanja poželjnija metoda nego Tekken, iz razloga što su u zavaru šava bolja svojstva nakon ispitivanja, što se tiče čelične ispitne ploče. Ovaj zaključak, temelji se na promatranju da se kod Lehigh metode pukotina dogodila gotovo u samom šavu zavara (slika 6.20). [24]



Slika 6.20 Prikaz presjeka pukotina u zavaru kod Lehigh metode ispitivanja [24]

Lehigh Restraint metoda se koristi za određivanje učinka sljedećih varijabli kod nastanka hladnih pukotina [24]:

- sadržaj vodika u elektrodi
- sastav kod zagrijavanja u metalu zavara
- unos topline (mikrostruktura)

7. ZAKLJUČAK

Tema rada je prije svega zavarljivost, te pogreške koje se javljaju kod navedene djelatnosti. Možemo se zapitati kako bi danas svijet izgledao da nekom igrom slučaja ne postoji način spajanja materijala zavarivanjem. Sasvim sigurno bi se otkrilo nešto novo, što bi zamijenilo zavarivanje, ali se može reći da svijet sigurno ne bi gledao u istom smjeru, pošto je strojarska industrija i samo zavarivanje, jedno od najjačih oružja koja su zaslužna za mnoge znamenitosti, te konstrukcija pomoću kojih su nastala.

Glavna problematika kod zavarivanja su pukotine, koje se grupiraju na tople i hladne pukotine. Nikako nisu poželjne hladne pukotine, koje se mogu pojaviti tek nakon što prođe 48 sati, odnosno dva dana od završetka zavarivanja. Stoga se može zaključiti da kod tog slučaja zavar može izgledati savršeno i bez greške, dok problemi mogu nastati tek nekoliko dana kasnije.

Ne postoji metoda ispitivanja koja bi jednoznačno odredila problem zavarljivosti čelika. Zbog toga, za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti, koristi se niz raznih eksperimentalnih metoda od kojih svaka služi za određivanje specifičnih svojstava. Tako se kod visokočvrstih čelika koristi Implant i Tekken test kako bi se ispitala sklonost materijala prema nastajanju hladnih pukotina. Također, zavarljivost se ispituje i s metalurškog stajališta pomoću ekvivalenta ugljika koji daje procjenu zakaljivosti nekog čelika tj. procjenu zakaljivosti osnovnog materijala, dok se veličina temperature predgrijavanja ispituje pomoću računskih i eksperimentalnih metoda. Nakon proučavanja i istraživanja navedenih metoda, može se lako zaključiti da su Implant i Tekken metoda poznatije metode u svijetu i da se preko njih vrši većina istraživanja, dok se CTS i Lehigh metoda rjeđe koriste, jer su pogodna samo za pogonska ispitivanja kutnih zavarenih spojeva prema hladnim pukotinama. Ovaj rad na osnovu provedenih ispitivanja zavarenih spojeva dokazuje da je moguće uspješno zavariti savršen zavar, ali da li je on doista savršen, da kod njega ne postoje neke "mikrogreške", za to bi trebala dodatna ispitivanja.

Na kraju se može zaključiti da detaljno obrazloženje pojave samih pukotina, bile to tople ili hladne, pri primijenjenim režimima zavarivanja, zahtjeva dodatna istraživanja i metode ispitivanja.

U Varaždinu, 29.12.2015.

Matko Čalopek

LITERATURA

- [1] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarljivost>, listopad 2015.
- [2] http://www.pfri.uniri.hr/~bernecic/literatura/DIPL_Zav_Isp/ZAVARIVANJE_2015.pdf, listopad 2015.
- [3] <http://ewi.org/the-art-of-narrow-groove-welding>, listopad 2015.
- [4] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/zo_za.html, listopad 2015.
- [5] Juraga Ivan, Ljubić Kruno, Živčić Milan: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 1998.
- [6] <https://ewi.org>, listopad 2015.
- [7] <http://www.twi-global.com>, listopad 2015.
- [8] I. LUČIĆ: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja (Croatian Welding Society), Zagreb, 2003.
- [9] G. Meden, A. Pavelić, D. Pavletić: Osnove zavarivanja, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2000.
- [10] <http://www.weldpedia.com/2014/08/10-causes-of-weld-porosity-and-their.html>, listopad 2015.
- [11] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Sisak, 2003.
- [12] <http://www.mig-welding.co.uk/arc-faults/speed-faults-section-large.jpg>, studeni 2015.
- [13] http://repositorij.fsb.hr/1599/1/19_01_2012_Diplomski_rad_-_Damir_Levacic.pdf, studeni 2015.
- [14] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/3_1.pdf, studeni 2015.
- [15] <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar1>, studeni 2015.
- [16] D. Kolednjak: Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014.
- [17] Tomić T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [18] <http://www.materials.unsw.edu.au>, prosinac 2015.
- [19] S. Kožuh: Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu - Metalurški fakultet, Sisak 2010.
- [20] <http://blog.esabna.com/welding-is-a-universal-language>, studeni 2015.
- [21] http://repositorij.fsb.hr/256/1/19_05_2008_Doktorski_rad_Garasic_2008.pdf, studeni 2015.
- [22] Dunder, M., Salopek, G., Horvat, M., Kondić, V., Marković, M.: Pristup određivanju zavarljivosti čelika, stručni glasnik, 2015.
- [23] Samardžić I.: Analiza tehnološkičnosti zavarenih konstrukcija – digitalni udžbenik,

Sveučilište u Osijeku – Strojarski fakultet, Slavonski Brod

[24] A. Lionel: An appraisal of the Tekken Test, časopis, University of Wollongong, 1986.

[25] Mikulić I.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2012.

[26] Barun T.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009., Zagreb

[27] Kralj S., Samardžić I.: Pregled metoda ispitivanja sklonosti prema nastanku hladnih pukotina, Zavarivanje 35, 5-6, 199-208, 1992.

[28] Kuzman V.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2012.

[29] http://pdf.ttem.ba/ttem_6_1_web.pdf, studeni 2015.

[30] Kralj S.: Ispitivanje sklonosti mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće na nastanak pukotina, Sarajevo 2011.

[31] <http://www.china-weldnet.com/English/information>, studeni 2015.

POPIS SLIKA:

<i>Slika 1.1 Presjek kroz zavareni spoj (ZT, ZUT, te osnovni materijal) [3]</i>	1
<i>Slika 2.1 Zavaren spoj, višeslojno zavarivanje, vezani slojevi</i>	5
<i>Slika 2.2 Zavaren spoj, jednoslojno zavarivanje [7]</i>	5
<i>Slika 2.3 Uobičajeni nazivi u zavarenom spoju i navaru</i>	6
<i>Slika 4.1 Pukotine u zavarenom spoju [9]</i>	13
<i>Slika 4.2 Poroznost u zavarenom spoju [9]</i>	15
<i>Slika 4.3 Primjer poroznosti u zavarenim spoju (MIG zavarivanje) [10]</i>	16
<i>Slika 4.4 Uključci troske u zavarenom spoju</i>	18
<i>Slika 4.5 Uključci troske u zavarenom spoju</i>	18
<i>Slika 4.6 Uključci troske na površini zavarenog spoja</i>	18
<i>Slika 4.7 Pogreške nedovoljnog provara, odnosno protaljivanja [9]</i>	19
<i>Slika 4.8 Manje pogreške naljepljivanja u zavarenom spoju [5]</i>	20
<i>Slika 4.9 Primjeri pogrešaka naljepljivanja u zavarenom spoju</i>	20
<i>Slika 4.10 Pogreške naljepljivanja u kutnim spojevima (velika jakost struje i premala brzina) [5]</i> ..	20
<i>Slika 4.11 Izgled korijenja sučeljenog zavara</i>	21
<i>Slika 5.1 Shematski prikaz mehanizma nastajanja toplih pukotina</i>	27
<i>Slika 5.2 Tople pukotine kod EPP zavarivanja čelika</i>	27
<i>Slika 5.3 Tople pukotine kod zavarivanja aluminijskih slitina</i>	28
<i>Slika 5.4 Primjer hladne pukotine u zavaru [15]</i>	29
<i>Slika 5.5 Mjesta nastajanja hladnih pukotina [8]</i>	30
<i>Slika 5.6 Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja</i>	31
<i>Slika 5.7 Hladne pukotine u kutnom kružnom spoju (A) i kutnom spoju (B) [5]</i>	31
<i>Slika 5.8 Hladne pukotine kod sučeljenog spoja</i>	31
<i>Slika 5.9 Rastvorljivost vodika i dušika u željezu [8]</i>	32
<i>Slika 5.10 Paralelni niz pukotina u grubozrnatom ZUT-u, povećanje 1000 puta [8]</i>	33
<i>Slika 5.11 Graville-ov dijagram [17]</i>	34
<i>Slika 5.12 Odnos ekvivalenta ugljika (C_{ekv}) i vlačne čvrstoće [16]</i>	35
<i>Slika 5.13 Ovisnost temperature prijalaza u krhko stanje i radnje loma o sadržaju ugljika u čeliku [18]</i>	36
<i>Slika 5.14 Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika</i>	37
<i>Slika 5.15 Feritno-perlitna mikrostruktura sitnozrnatog čelika [19]</i>	37
<i>Slika 5.16 Nepovoljan oblik zavara, koji uzrokuje pukotine [5]</i>	40
<i>Slika 5.17 Površina zavarenog spoja gdje su vidljive tzv. "riblje oči"</i>	41
<i>Slika 5.18 Zavar udubljenog oblika (veća sklonost pojavi pukotina) i zavar blago ispupčenog oblika radi većih naprezanja na površini [5]</i>	42
<i>Slika 5.19 Izvođenja završnih slojeva zavarenog spoja - "pokrovni slojevi za održavanje" [5]</i>	42
<i>Slika 6.1 Dimenzije i oblik ispitne epruvete (implanta) za ispitivanje Implant probom</i>	46
<i>Slika 6.2 Implatni uzorak s obostranim navojem [17]</i>	46
<i>Slika 6.3 Shematski prikaz uređaja za ispitivanje - Implant metoda [23]</i>	47
<i>Slika 6.4 Prikaz navara na Implant ploči [17]</i>	48

<i>Slika 6.5 Izgled ispitne ploče po Implant metodi [23]</i>	48
<i>Slika 6.6 Implantni uzorak - spiralni utor [24]</i>	49
<i>Slika 6.7 Dijagram opterećenja Implant (epruveta) tijekom vremena do loma [23]</i>	49
<i>Slika 6.8 Epruveta za Tekken ispitivanje</i>	50
<i>Slika 6.9 Ispitni uzorak (praksa) - Implant metoda [25]</i>	51
<i>Slika 6.10 Hladna pukotina uzrokovana vodikom - Tekken metoda [26]</i>	51
<i>Slika 6.11 Tipična mjesta nastanka hladnih pukotina [25]</i>	52
<i>Slika 6.12 Lice zavara uzorka - primjer iz prakse [25]</i>	52
<i>Slika 6.13 Prikaz ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama po Tekken metodi [25]</i>	53
<i>Slika 6.14 Primjer ispitivanja zavarljivosti pomoću CTS metode [28]</i>	54
<i>Slika 6.15 CTS metoda, konfiguracija zavara</i>	55
<i>Slika 6.16 Poprečni presjek ispitnog uzorka - CTS metoda</i>	55
<i>Slika 6.17 Tipična mikrostruktura zavara kod CTS metode ispitivanja [30]</i>	56
<i>Slika 6.18 CTS ispitivanje uzorka povišene kvalitete [30]</i>	56
<i>Slika 6.19 Shema ispitivanja zavara pomoću Lehigh metode [28]</i>	57
<i>Slika 6.20 Prikaz presjeka pukotina u zavaru kod Lehigh metode ispitivanja [24]</i>	58

POPIS TABLICA

<i>Tablica 2.1 Zavareni spojevi - označavanje i primjena (ISO 2553) [5]</i>	6
<i>Tablica 2.2 Tumačenje označavanja (ISO 2553) [3]</i>	8
<i>Tablica 3.1 Čimbenici koji utječu na svojstva zavarenog spoja [3]</i>	11
<i>Tablica 4.1 Pogreške u zavarenim spojevima [9]</i>	12
<i>Tablica 4.2 Pukotine u zavarenom spoju [3]</i>	14
<i>Tablica 4.3 Pogreške oblika zavara [14]</i>	22
<i>Tablica 4.4 Ostale pogreške (skupina 600) [11]</i>	25
<i>Tablica 5.1 Formule za izračun ekvivalenta ugljika [17]</i>	38
<i>Tablica 5.2 Ocjena zavarljivosti čelika pomoću ekvivalenta ugljika [18]</i>	39