

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonio Radić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Antonio Radić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na korisnim savjetima, pruženoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem dr. sc. Matiji Bušiću koji me je vodio kroz završni rad i svojim znanjem i iskustvom uvelike doprinio kvaliteti ovog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Antonio Radić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ANTONIO RADIĆ** Mat. br.: 0035195352

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **SKLONOST ČELIKA API 5L X80 PREMA HLADNIM PUKOTINAMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **SUSCEPTIBILITY OF API 5L X80 STEEL TO COLD CRACKING**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je analizirati pojavu hladnih pukotina uzrokovanih udjelom vodika u zavarenim spojevima. Posebno proučiti djelovanja vodika u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Analizirati sklonost čelika visoke čvrstoće prema hladnim pukotinama nastalim pri elektrolučnom zavarivanju. Navesti i opisati metode za ispitivanje sklonosti čelika hladnim pukotinama.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je na odgovarajućim uzorcima osnovnog materijala API 5L X80 provesti ispitivanje sklonosti čelika prema nastanku hladnih pukotina. Donijeti zaključak o prikladnosti korištene metode ispitivanja i dobivenim rezultatima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7.
2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. KARAKTERISTIKE I MIKROSTRUKTURA ČELIKA API 5L X80.....	2
2.1. Općenito o čeliku API 5L X80.....	2
2.2. TMCP- Termo-mehanički kontrolirani proces valjanja	6
2.3. Mikrostruktura čelika API 5L X80	8
3. HLADNE PUKOTINE.....	10
3.1. Općenito o hladnim pukotinama	10
3.2. Teorije nastanka hladnih pukotina	11
3.2.1. Teorija porasta tlaka	14
3.2.2. Adsorpcijska teorija.....	14
3.2.3. Teorija dekohezije	15
3.3. Utjecajni čimbenici na nastanak hladnih pukotina.....	16
3.3.1. Utjecaj vodika u metalu zavara na sklonost prema nastanku hladnih pukotinama	16
3.3.2. Utjecaj mikrostrukture čelika na sklonost prema nastanku hladnih pukotinama...	20
3.2.3. Utjecaj naprezanja čelika na sklonost prema nastanku hladnih pukotina	24
3.3.4. Utjecaj temperature čelika na sklonost prema nastanku hladnih pukotinama	26
3.4. Prepoznavanje hladnih pukotina	27
3.5. Sprječavanje nastanka hladnih pukotina	31
4. SKLONOSTI ČELIKA API 5L X80 PREMA HLADNIM PUKOTINAMA	35
5. KVANTITATIVNE METODE ISPITIVANJA SKLONOSTI MATERIJALA PREMA NASTANKU HLADNIH PUKOTINA.....	38
5.1. Jominy metoda	38
5.2. CTS metoda.....	41
5.3. Tekken metoda	42
5.4. Implant metoda.....	44

6. EKSPERIMENTALNI DIO	47
6.1. Opis eksperimenta	47
6.2. Oprema za zavarivanje	47
6.3. Dodatni materijal za zavarivanje	49
6.4. Ispitivanje sklonosti prema hladnim pukotinama Implant testom	49
6.5. Parametri zavarivanja	53
6.6. Osnovni materijal	54
6.7. Određivanje kritičnog Implant naprežanja R_{IK}	55
7. Zaključak	61
PRILOZI.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1. Označavanje čelika za cjevovode prema API 5L [4]	2
Slika 2. Grafički prikaz kronološkog razvoja čelika za cijevi [5]	3
Slika 3. Mikrostrukture čelika X60, X70 i X80; usporedba veličine zrna [5]	4
Slika 4. Usporedni shematski prikaz konvencionalnog valjanja i TMCP postupka valjanja [8]6	
Slika 5. Promjena mikrostrukture tijekom TMCP postupka [9]	7
Slika 6. Mikrostruktura čelika X80 pri povećanju od 2500X [10].....	9
Slika 7. Difuzija vodika iz metala zavara do ZUT-a tijekom zavarivanja [13].....	11
Slika 8. Utjecaj temperature na rastvorljivost vodika u željezu pri tlaku vodika od 0,1 MPa [2]	12
Slika 9. Koeficijent difuzije vodika u feritu i austenitu u ovisnosti o temperaturi [11].....	13
Slika 10. Shematski prikaz teorije tlaka kod pojave hladnih pukotina [14].....	14
Slika 11. Shematski prikaz propagacije pukotine pod djelovanjem vodika prema teoriji adsorpcije [14]	15
Slika 12. Shematski prikaz teorije dekohezije prema Troianu [11]	16
Slika 13. Utjecaj izbora postupka zavarivanja na količinu difundiranog vodika u zavaru [11]	19
Slika 14. Kontinuirani TTT dijagram za čelik AISI 1040 [11]	21
Slika 15. Kontinuirani TTT dijagram za čelik AISI 4340 [11]	21
Slika 16. Vrste mikrostrukture u čelicima. (a) martenzit, (b) bainit/martenzit, (c) acikularni ferit s feritom na granici zrna, i (d) ferit i perlit [11]	23
Slika 17. Povezanost tvrdoće i sadržaja ugljika u čeliku [11].....	24
Slika 18. Hladna pukotina na mjestu visoke koncentracije naprezanja [16].....	25
Slika 19. Primjer vodikove pukotine na mjestu visoke koncentracije naprezanja [16]	26
Slika 20. Utjecaj vodika na vlačnu čvrstoću u ovisnosti o temperaturi [11].....	27
Slika 21. Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja	29
Slika 22. Interkristalni način širenja vodikove pukotine [11]	30
Slika 23. Transkristalni način širenja vodikove pukotine [11].....	30
Slika 24. Dijagram za određivanje temperature predgrijavanja prema HRN EN 1011-2.....	32
Slika 25. Prikaz izvođenja završnih slojeva zavarenog spoja	33
Slika 26. Shematski prikaz ispitivanja prokaljivosti metodom Jominy [20].....	39
Slika 27. Jominy krivulje različitih čelika s 0,45 % C [11]	39

Slika 28. Jominy krivulje prokaljivosti za dva čelika. (a) AISI 1050 i (b) AISI 4340 [11].....	40
Slika 29. Shematski prikaz CTS metode [11]	42
Slika 30. Shematski prikaz Tekken metode [21].....	43
Slika 31. Presjeci ispitnih uzorka Tekken testa. (a) Metal zavara veće čvrstoće od osnovnog metala (b) Metal zavara manje čvrstoće od osnovnog metala [11].....	44
Slika 32. Shematski prikaz Implant metode [11]	45
Slika 33. Rezultati Implant metode [11]	46
Slika 34. Uređaj za Implant test	50
Slika 35. Shematski prikaz osnovne ploče za Implant test [14].....	50
Slika 36. Pripremljena osnovna ploča s pozicioniranom epruvetom	51
Slika 37. Implant uzorak s obostranim navojem	51
Slika 38. Prikaz Implant testa tijekom opterećenja epruvete	53
Slika 39. Zavar ispitnog uzorka 1 i ispitne ploče	56
Slika 40. Ispitni uzorak 1 nakon loma.....	56
Slika 41. Zavar ispitnog uzorka 2 i ispitne ploče	56
Slika 42. Ispitni uzorak broj 2 nakon loma	57
Slika 43. Zavar ispitnog uzorka 3 i ispitne ploče	57
Slika 44. Ispitni uzorak broj 3 nakon loma	57
Slika 45. Zavar ispitnog uzorka broj 4 i ispitne ploče.....	58
Slika 46. Ispitni uzorak broj 4 nakon loma	58
Slika 47. Zavar ispitnog uzorka 5 i ispitne ploče	59
Slika 48. Ispitni uzorak broj 5 nakon loma	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Broj zrna po jedinici površine prema ASTM normi [4].....	3
Tablica 2. Uobičajeni kemijski sastav čelika API 5L X80 [6].....	4
Tablica 3. Uobičajena mehanička svojstva čelika API 5L X80 [6]	5
Tablica 4. Prikaz kemijskog sastava i mehaničkih svojstava čelika X70 i X80 prema standardima EN 10 208-2 i API u usporedbi s podacima iz prakse [7]	5
Tablica 5. Mikrostruktura i veličina zrna mikrolegiranih čelika X60, X70 i X80 [4]	7
Tablica 6. Relativni poredak mikrostruktura prema sklonosti prema nastanku hladnih pukotinama [11]	22
Tablica 7. Utjecaj legiranih elemenata na adsorpciju vodika i osjetljivost na hladne pukotine čelika [2].....	36
Tablica 8. Oprema za zavarivanje	48
Tablica 9. Mehanička svojstva dodatnog materijala EZ-50 B [22].....	49
Tablica 10. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – 50 B [22]	49
Tablica 11. Parametri zavarivanja [14]	54
Tablica 12. Mehanička svojstva čelika API 5L X80 [9]	54
Tablica 13. Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu i ispitivanjima [14]	55
Tablica 14. Prikaz rezultata Implant testa	Error! Bookmark not defined.

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q_z	kJ/cm	Unos topline zavarivanja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Granica razvlačenja
A	%	Istezljivost
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
v	cm/min	Brzina zavarivanja
k	-	Koeficijent korisnog djelovanja električnog luka
H	% mase	Koncentracija vodika u metalu
p_{H_2}	bar	Parcijalni tlak vodika u plinskoj fazi
H_2	-	Molekula vodika
P_{cm}	%	Ekvivalent ugljika prema Itto-Bessyou
R_{IK}	MPa	Kritično Implant naprezanje
$t_{8/5}$	s	Vrijeme hlađenja od 800 do 500 °C
T_p	°C	Temperatura predgrijavanja
z	mm	Dubina zareza na uzorku kod Implant testa

POPIS KRATICA

AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
Psi	<i>Pound per square inch</i>
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
FCC	Kubična plošno centrirana rešetka
BCC	Kubična prostorno centrirana rešetka
FSB	Fakultet strojarstva i brodogradnje
TMCP	Thermo-mechanical Controlled Process
ZUT	Zona utjecaja topline
OM	Osnovni materijal
HIC	Hydrogen Induced Cracking
AWS	American Welding Society

CTS	Controlled Thermal Severity
TTT	Time Temperature Transformation
ppm	Parts per milion
AF	Acicular Ferit
BF	Bainit Ferit
M/A	Martenzit/Austenit
HIC	Hydrogen Induced Cracking
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
IIW	International Institute of Welding
EN	Europska Norma
ISO	International Organization for Standardization
MAG	Elektrolučni postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
PPŽ	Zavarivanje praškom punjenom žicom

SAŽETAK

U radu je dan prikaz istraživanja osjetljivosti čelika API 5L X80 prema pojavi pukotina uzrokovanih vodikom. Poznato je da su čelici povišene čvrstoće skloni nastanku pukotina uzrokovanih vodikom. Prisutnost vodika u metalu zavara ili ZUT-a može dovesti do oblika pukotina poznatog kao pukotina uzrokovana vodikom (HIC). Ovaj oblik pukotina obično se naziva hladne pukotine jer nastaju na ili blizu sobne temperature nakon što se zavar ohladi. Unatoč činjenici da su vodikove pukotine proučavane više od 60 godina, još uvijek ne postoji univerzalni mehanizam nastajanja.

U eksperimentalnom dijelu rada provest će se ispitivanje sklonosti čelika API 5L X80 prema hladnim pukotinama pomoću Implant testa.

Ključne riječi: čelik API 5L X80, hladne pukotine, Implant test

SUMMARY

This paper reflects on the susceptibility of API 5L X80 steel to hydrogen-induced cracking. It is known that high strength steels are susceptible to hydrogen-induced cracking. The presence of hydrogen in the weld metal or HAZ may lead to a form of cracking known as hydrogen-induced cracking (HIC). This form of cracking is also commonly referred to as since it occurs at or near room temperature after the weld has cooled. Despite the fact that hydrogen cracking and have been studied for over 60 years, there is still no universally accepted mechanism.

In the experimental part of the work, testing of the susceptibility of steel API 5L X80 to cold cracking will be carried out using the Implant Test.

Key words: API 5L X80 steel, cold cracks, Implant test

1. UVOD

Područje primjene čelika API 5L X80 vrlo je široko. Najčešće se primjenjuje kod izgradnje cjevovoda i plinovoda velikih dimenzija, podmornica, *off-shore* postrojenja i sl. Zbog povećanog omjera čvrstoće naspram mase, prvenstveno se primjenjuje na konstrukcijama gdje se teži k smanjenju mase konstrukcije i uštedi materijala. Njegova najveća prednost je visoka čvrstoća koja ima za posljedicu mogućnost proizvodnje cjevovoda s tanjim stijenkama pri većim tlakovima, što doprinosi nižim ukupnim troškovima konstrukcije.

Čelik API 5L X80 pripada grupi visokočvrstih ili ultračvrstih čelika. Karakteristika visokočvrstih čelika je visoka čvrstoća uz zadovoljavajuću žilavosti. Kombinacijom različitih načina očvršćuća: usitnjenjem zrna, martenzitnom transformacijom, precipitacijom (dozrijevanjem ili starenjem), mogu se postići visoke vrijednosti granice razvlačenja i čvrstoće. Čelik API 5L X80 proizveden je termo-mehanički kontroliranim procesom valjanja (TMCP – *Thermo Mechanical Controlled Process*) kod kojeg se u točno definiranom proizvodnom postupku s reguliranim vremenima hlađenja dobiva ciljanja mikrostruktura dobre zavarljivosti. Međutim, zbog visoke čvrstoće i mogućih uključaka, koji su posljedica TMCP proizvodnog ciklusa i zavarivanja, povećava se rizik od pojave hladnih pukotina. Povećanjem čvrstoće čelika povećava se i brzina propagacije pukotina u materijalu. [1,2]

Kod visokočvrstih čelika, hladne pukotine se pojavljuju u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Najveći problem predstavlja vodik, koji ulaskom u materijal tijekom zavarivanja ili eksploatacije, može uzrokovati pojavu krhkosti ili pukotina. Hladne pukotine u literaturi se nazivaju i zakašnjelim pukotinama te danas predstavljaju jedan od najčešćih problema u zavarivačkoj praksi. Uvjeti koji prevladavaju za nastanak hladnih pukotina su: osjetljiva mikrostruktura materijala, sadržaj vodika i naprezanje. [3]

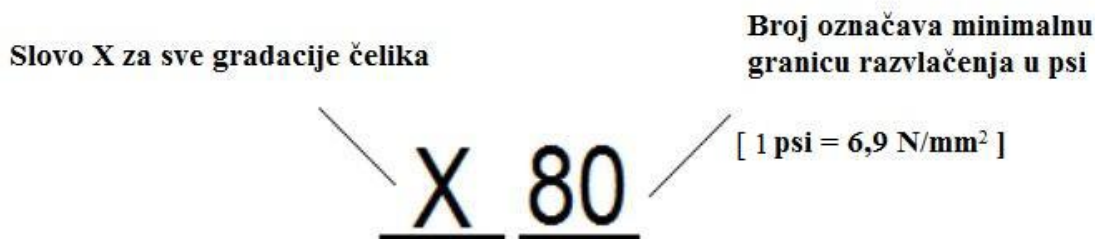
Unatoč tome što su predmet istraživanja već duže od 50 godina, hladne pukotine i danas predstavljaju velike probleme za integritet zavarenih konstrukcija.

U ovom radu bit će opisani glavni problemi u pogledu pojave hladnih pukotina u zavarenom spoju čelika visoke čvrstoće, a u eksperimentalnom dijelu rada provest će se ispitivanje sklonosti čelika API 5L X80 prema nastanku hladnih pukotina.

2. KARAKTERISTIKE I MIKROSTRUKTURA ČELIKA API 5L X80

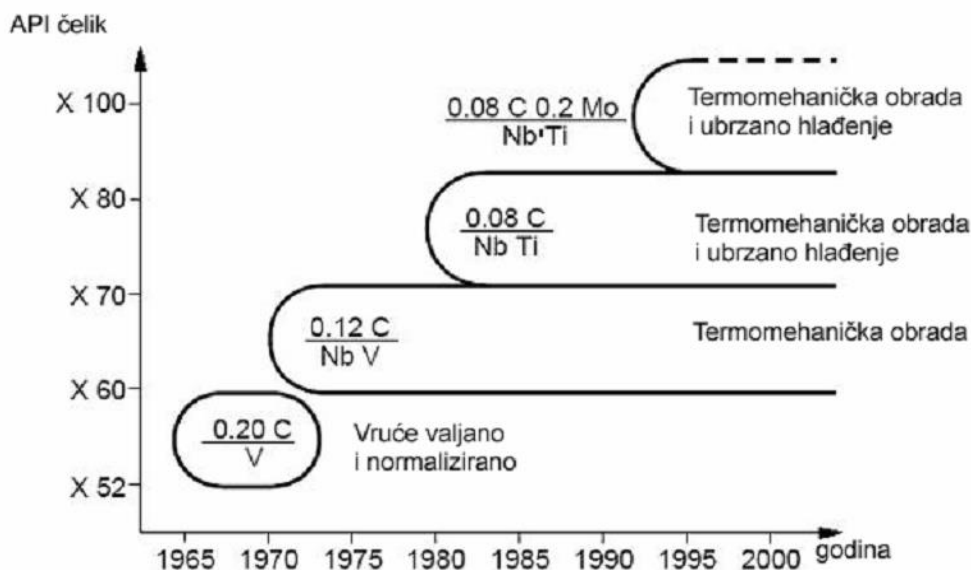
2.1. Općenito o čeliku API 5L X80

Budući da operativni i eksploatacijski zahtjevi za konstrukcije rastu s vremenom, raste i potreba za čvršćim čelicima prilikom izgradnje cjevovoda. Zbog svoje visoke čvrstoće i dobre žilavosti, čelik gradacije API 5L X80 pokazao se kao adekvatan materijal za visokotlačne cjevovode. Najčešće se koristi za cjevovode velikih promjera za prijevoz tekućina i plinova, te kao konstrukcijski čelik. Prema američkoj normi API (*American Petroleum Institute*) specificira se gradacija čelika za cjevovode. Oznaka X predstavlja seriju na temelju mehaničkih svojstava, a broj označava granicu razvlačenja čelika u tisućama funti po kvadratnom inch-u (psi – *pound per square inch*). Čelik API 5L X80 ima granicu razvlačenja 555 MPa (80 500 psi). [4] Označavanje čelika za cjevovode prema API 5L prikazano je na slici 1.



Slika 1. Označavanje čelika za cjevovode prema API 5L [4]

Za većinu današnjih zahtjeva za transport nafte i plina najčešće se koriste čelici gradacije X70 i X80 prema API 5L, dok se X90 i X100 polako uvode u primjenu. Na slici 2. prikazan je kronološki razvoj čelika za transportne cijevi i način njihove proizvodnje, te se može vidjeti kako dodatak molibdena, titana i nikla te termomehanička obrada omogućavaju povećanje čvrstoće do gradacije X100, uz to je vidljiv trend pada udjela ugljika kroz sve godine.

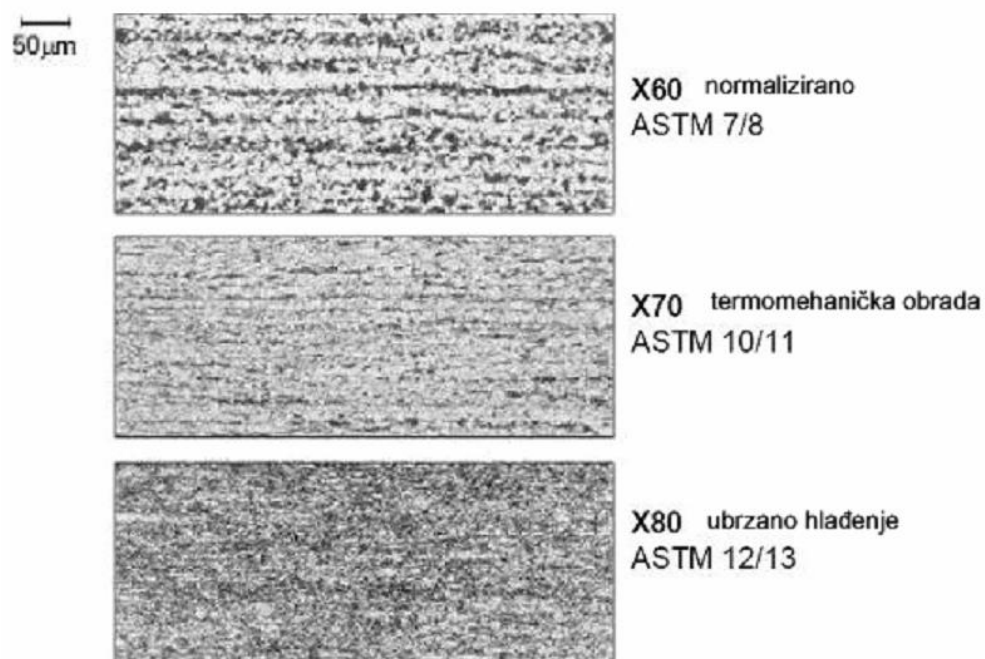


Slika 2. Grafički prikaz kronološkog razvoja čelika za cijevi [5]

Mikrostruktura pojedine gradacije čelika ovisit će o načinu proizvodnog procesa. Veličina zrna prema američkoj normi ASTM (engl. *American Society for Testing and Materials*) E 112-13 je bezdimenzijska veličina i predstavlja broj zrna po kvadratnom inču. Pa sukladno s time, čelik gradacije X60 je normaliziran i imat će trakastu feritno-perlitnu strukturu veličine zrna broj 7/8, čelik gradacije X70 podložen je termomehaničkoj obradi pa će imati ujednačeniju strukturu zrna veličine broj 10/11. Čelik gradacije X80 proizveden je termomehaničkom obradom i ubrzanim hlađenjem što ima za posljedicu feritno-bainitnu strukturu veličine zrna broj 12/13, slika 3. U tablici 1. prikazan je odnos između veličine zrna i broja zrna po kvadratnom inču. [5]

Tablica 1. Broj zrna po jedinici površine prema ASTM normi [4]

ASTM	Broj zrna / in ²	Prosječan promjer zrna (μm)	Relativna veličina
1	1	250	Grubo zrno
2	2	180	
3	4	125	
4	8	90	Srednje zrno
5	16	65	
6	32	45	
7	64	32	Sitno zrno
8	128	22	
9	256	16	
10	512	11	Ultra-sitno zrno
11	1024	8	
12	2048	5.6	
13	4096	4	



Slika 3. Mikrostrukture čelika X60, X70 i X80; usporedba veličine zrna [5]

Uobičajeni prikaz kemijskog sastava i mehaničkih svojstva za čelik gradacije API 5L X80 prikazani su u tablicama 2 i 3.

Tablica 2. Uobičajeni kemijski sastav čelika API 5L X80 [6]

Oznaka prema API 5L	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
X80	0,07	0,35	1,94	0,015	0,00	0,15	0,01	0,001	0,01	0,027
Pcm	0,18									

Tablica 3. Uobičajena mehanička svojstva čelika API 5L X80 [6]

Mehanička svojstva	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A5, [%]
API 5L X80	557	670	20

Usporedba kemijskog sastava čelika gradacije X80 s kemijskim sastavom čelika X70 prema klasifikacijama iz normi EN 10 208-2 i API standarda i prema podacima iz do sada ostvarenih projekata prikazana je u tablici 4.

Tablica 4. Prikaz kemijskog sastava i mehaničkih svojstava čelika X70 i X80 prema standardima EN 10 208-2 i API u usporedbi s podacima iz prakse [7]

X70				X80			
Prema standardu				Prema standardu			
C	0.16	Si	0.45	C	0.16	Si	0.45
Mn	1.65	P	0.025	Mn	1.8	P	0.025
S	0.015	V	0.1	S	0.015	V	0.1
Nb	0.06	Ti	0.06	Nb	0.06	Ti	0.06
Cr	0.3	Al	0.06	Cr	0.3	Al	0.06
B	-	Ni	0.3	B	-	Ni	0.3
Mo	0.35	Cu	0.25	Mo	0.35	Cu	0.25
N	0.012			N	0.012		
Projekti				Projekti			
C	0.09-0.1	Si	0.320-0.330	C	0.067-0.1	Si	0.320-0.430
Mn	1.6-1.630	P	0.014-0.02	Mn	1.540-2	P	0.011-0.020
S	0-0.005	V	0.05-0.079	S	0.002-0.003	V	0.01
Nb	0.01-0.037	Ti	0.01-0.012	Nb	0.041-0.069	Ti	0.017-0.03
Cr	0.03-0.07	Al	0.035-0.043	Cr	0.014-0.1	Al	0.032-0.005
B	-	Ni	0.037-0.05	B	0.0003	Ni	0.03-0.180
Mo	0.013-0.02	Cu	0.017-0.04	Mo	0.001-0.280	Cu	0.03-0.220
N	0.009			N	0.003-0.005		
Standard				Standard			
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	485-605			$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	555-675		
R_m [N/mm ²]	575-785			R_m [N/mm ²]	625-827		
A, %	>18			A, %	>18		
URL [J] (0 °C)	>40-77			URL [J] (0 °C)	>68-120		
Projekti				Projekti			
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	522-544			$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	570-665		
R_m [N/mm ²]	644-653			R_m [N/mm ²]	675-805		
A, %	26-28			A, %	19.3-34.7		
URL [J] (-40/-20/0 °C)	180-192/176-262/-			URL [J] (-40/-20/0 °C)	-/105-225/116-252		

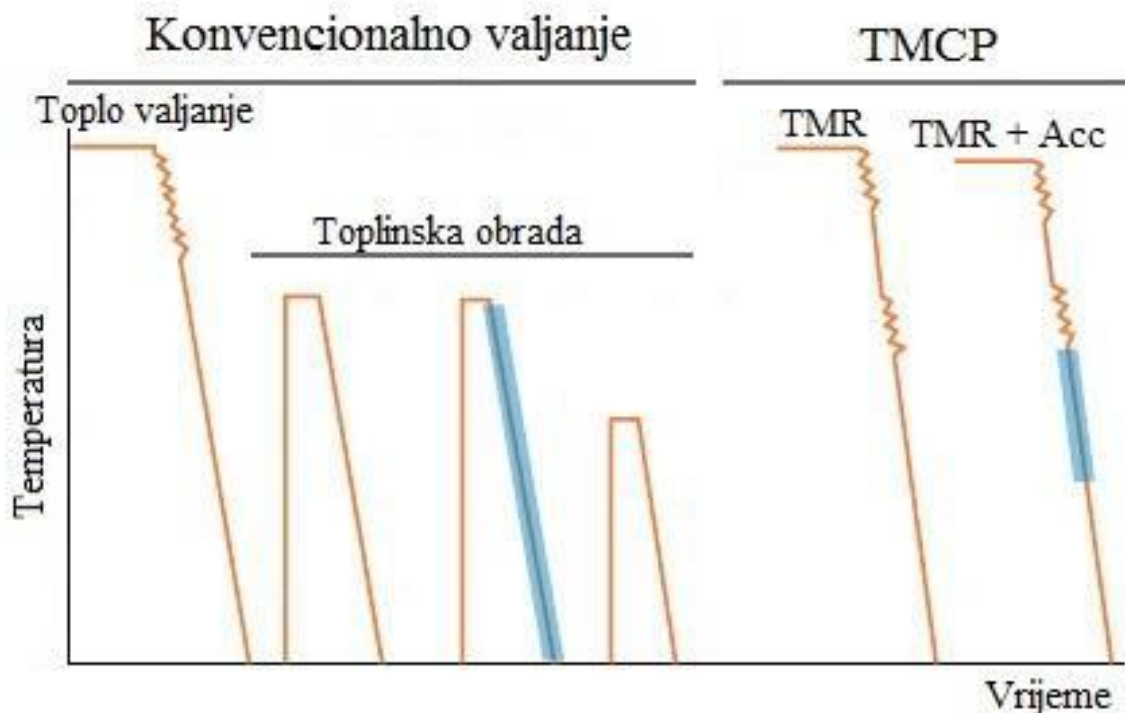
-.....detalji nisu poznati

Zbog težnje postizanja visoke čvrstoće čelika API 5L X80 i niskih udjela neželjenih primjesa i uključaka, te homogene sitnozrnate mikrostrukture, primjenjuju se posebni postupci dobivanja tih svojstva. Sve to znatno poskupljuje proizvodnju pa njihova primjena mora biti opravdana u

financijskom pogledu. Čelik API 5L X80 proizveden je termo-mehanički kontroliranim procesom valjanja (TMCP- *Thermo Mechanical Controlled Process*).

2.2. TMCP- Termo-mehanički kontrolirani proces valjanja

TMCP postupak proizvodnje sastoji se od toplinsko-mehaničkog procesa valjanja i ubranog hlađenja s ciljem postizanja specifičnih mehaničkih i metalurških svojstva, odnosno ciljane mikrostrukture. Shematski prikaz TMCP postupka prikazan je na slici 4.

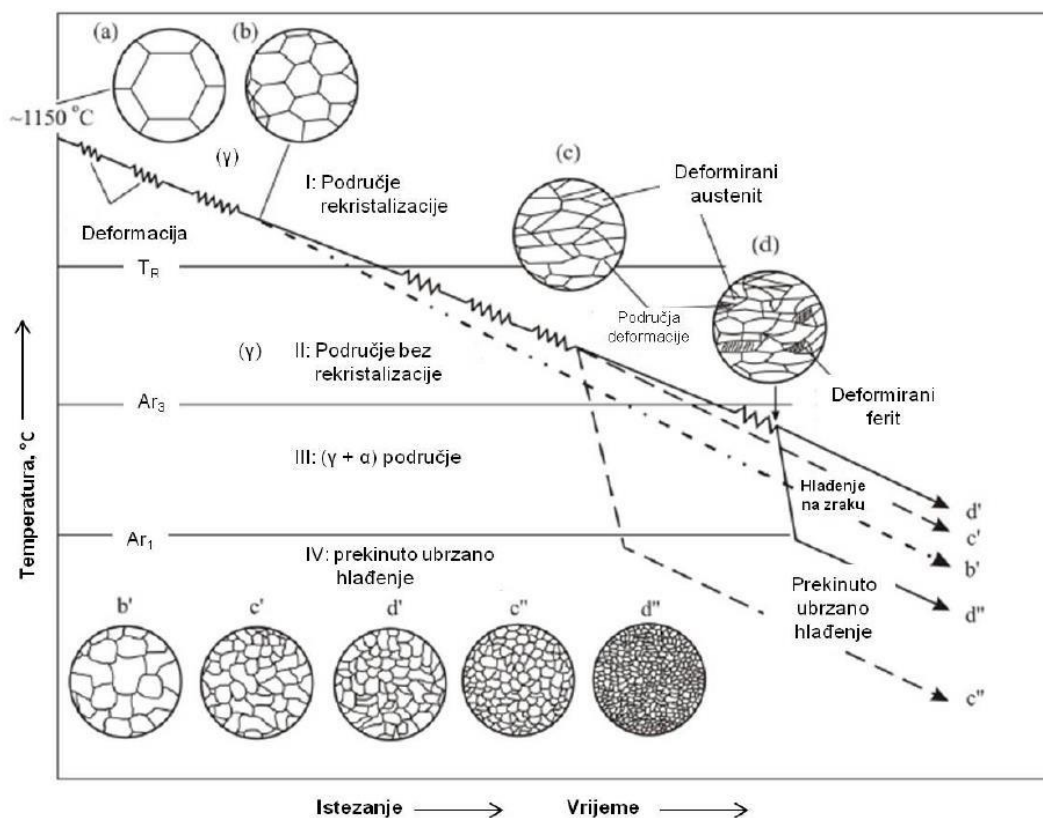


Slika 4. Usporedni shematski prikaz konvencionalnog valjanja i TMCP postupka valjanja [8]

Glavna prednost TMCP postupka u odnosu na konvencionalno valjanje jest činjenica da se zahtijevana mehanička svojstva postižu odmah nakon toplinsko-mehaničkog procesa valjanja bez potrebe za naknadnom toplinskom obradom čime se dobiva veća energetska učinkovitost procesa. Tehnologija TMCP valjanja provodi se zbog:

- postizanja finog austenitnog zrna i dovoljne količine niobija i vanadija
- rekristalizacije austenitnog zrna nakon koraka predvaljanja
- istežanja nerekrystaliziranog austenitnog zrna pri konačnom valjanju. [2]

Promjene u mikrostrukтури tijekom TMCP procesa valjanja prikazane su na slici 5.



Slika 5. Promjena mikrostrukture tijekom TMCP postupka [9]

Krajnji cilj postupka je postizanje sitnozrnate mikrostrukture sačinjene od ferita (α) u čelicima s niskim udjelom ugljika. Valjanje se odvija ispod temperature rekristalizacije te se čelik podvrgava ubrzanom i kontroliranom hlađenju. Usitnjenje zrna dobiva se dodavanjem legirnih elemenata, pri čemu se postižu veličine zrna od 1 do 3 μm , što rezultira visokom čvrstoćom i dobrom žilavošću. Iz tablice 5. možemo uočiti da je mikrostruktura materijala kod čelika gradacije X80 bolja od prethodnih generacija jer se može postići najsitnije zrno. [9]

Tablica 5. Mikrostruktura i veličina zrna mikrolegiranih čelika X60, X70 i X80 [4]

Vrsta čelika	Mikrostruktura	Veličina zrna [μm]
X60	feritno / perlitna	30 – 40
X70	feritno / perlitna	3 – 5
X80	feritno / bainitna	1 – 3

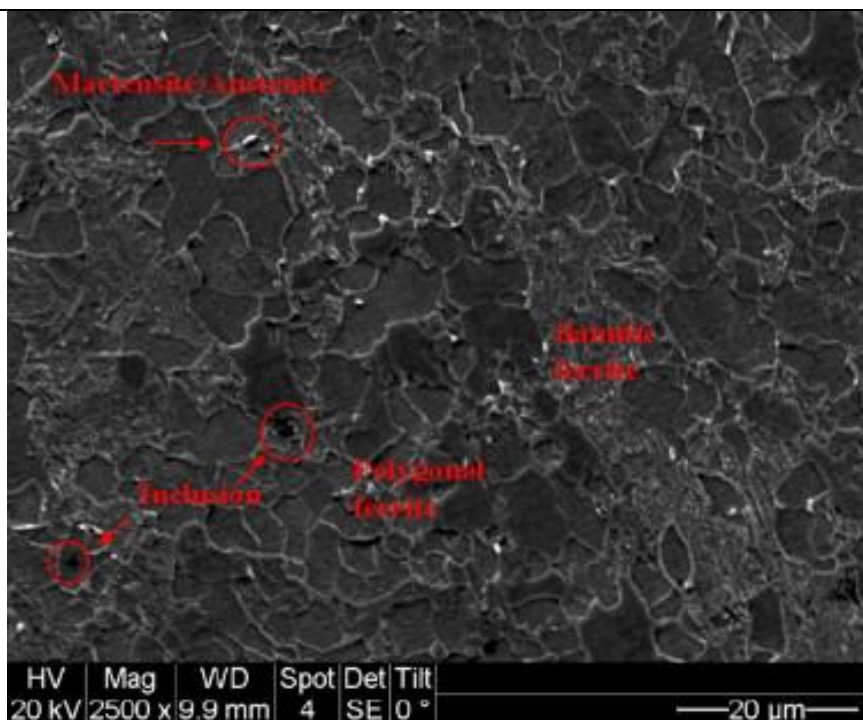
Legirni elementi poput Nb i Ti koriste se kako bi usporili proces rekristalizacije austenita te tako osigurali nepotpuno rekristalizirane austenitne strukture dok ne završi faza pretvorbe austenita u ferit. Putem TMCP postupka dobiva se čelik mikrostrukture koja se sastoji od

igličastog ferita umjesto feritno-perlitne strukture karakteristične za konvencionalne čelike. Čelici s mikrostrukturom igličastog ferita imaju veću čvrstoću uz dobru žilavost. Također, karakteristika dobivenih čelika je da imaju nizak sadržaj ugljika i nečistoća te zahvaljujući niskom ekvivalentu ugljika osiguravaju dobru zavarljivost. Dakle, TMCP postupak je jako prihvaćen proizvodni proces kojim je moguće postići visoku čvrstoću s relativno malim udjelima legirnih elemenata. [9]

2.3. Mikrostruktura čelika API 5L X80

Prilikom valjanja u termo-mehaničkom kontroliranom procesu nastaje austenitna mikrostruktura veličine zrna približno 60 μm . Zatim slijedi završni dio valjanja koji se provodi na temperaturi gdje ne dolazi do kristalizacije, time se dobiva još sitnija mikrostruktura od 20 μm . Nakon naglog hlađenja sitna austenitna mikrostruktura se transformira u mješavinu feritne i bainitne mikrostrukture s veličinom zrna od 1 do 3 μm . S obzirom na to da perlitna mikrostruktura smanjuje tvrdoću, a martenzitna mikrostruktura smanjuje zavarljivost, potrebno je kao završan produkt dobiti čelik s vrlo niskim udjelom ugljika i jednofaznom bainitno/feritnom sitnozrnatom mikrostrukturom s malim udjelom karbida. Stoga, mikrostruktura čelika API 5L X80 sastoji se od bainita i ferita. [10]

Na slici 6. prikazana je sitnozrnata struktura čelika API 5L X80 u kojoj prevladava feritna faza. Vidljiva je mješovita mikrostruktura bainitnog i poligonalnog ferita uz postojanje vrlo male količine austenitno/martenzitnog područja. Također je vidljiva i veća količina uključaka.



Slika 6. Mikrostruktura čelika X80 pri povećanju od 2500X [10]

Međutim, utvrđeno je da su čelici povišene čvrstoće skloni nastanku hladnih pukotina, stoga to može biti prepreka u njihovoj primjeni. U narednim poglavljima bit će detaljno objašnjen mehanizam nastanka hladnih pukotina uzrokovanim vodikom i sklonost čelika API 5L X80 prema hladnim pukotinama nastalim pri elektrolučnom zavarivanju.

3. HLADNE PUKOTINE

3.1. Općenito o hladnim pukotinama

Prisutnost vodika u metalu zavara ili u ZUT-u može dovesti do oblika pukotina poznatog kao vodikom uzrokovane pukotine. Ovaj oblik pukotina se također uobičajeno naziva „vodikom potpomognute pukotine“ ili „hladne pukotine“ jer nastaje na ili blizu sobne temperature nakon što se zavar ohladi. Gubitak duktilnosti povezan s prisustvom vodika često se naziva vodikova krhkost. Ovaj oblik pukotina je najčešće povezan s čelicima, ali dovoljna prisutnost vodika može dovesti do pukotina ili krhkosti i ostalih materijala. Hladne pukotine nastaju pri temperaturama nižim od 300 °C. Karakteristično za hladne pukotine je to što se mogu pojaviti nekoliko sati, ili čak dana, nakon zavarivanja. Opasnost od pojave vodikovih pukotina raste s povećanjem čvrstoće materijala te kod zavarivanja materijala s debljom stijenkom, gdje je potrebno ostvariti zavareni spoj u više prolaza.

Iako je vodik prisutan u nekim razinama kod gotovo svim materijalima, zbog uvođenja vodika tijekom zavarivanja razina vodika raste i može dostići razinu koja pogoduje nastanku pukotina. Vodik u atomarnom stanju je vrlo pokretan u mikrostrukturi metala čak i na sobnoj temperaturi, što mu dopušta da difundira na područja koncentracije naprezanja i na područja osjetljive mikrostrukture.

Vodikom uzrokovane pukotine najčešće nastaju odmah nakon hlađenja zavara na sobnu temperaturu, ali mogu se i pojaviti nekoliko dana nakon zavarivanja. Taj oblik vodikom uzrokovanih pukotina se naziva „zakašnjele“ hladne pukotine. To upućuje na to da je potrebno vrijeme inkubacije da vodik difundira, i akumulira se na mjestima gdje nastaju pukotine nakon dosegnute potrebne količine vodika.

Hladne pukotine danas predstavljaju jedan od najčešćih problema u zavarivačkoj praksi. Unatoč činjenici da su vodikove pukotine i njegove varijante već proučavane preko 60 godina, još uvijek ne postoji opće prihvaćeni mehanizam nastanka. To je dijelom posljedica činjenice da je vrlo teško detektirati vodik pomoću analitičkih metoda. Za razliku od ostalih elemenata kojih ima malo u tragovima (P, S, B, O₂) koji dovode do pukotina ili krhkosti, vodik je jako teško uočljiv unutar mikrostrukture. [11]

Utvrđeno je kako vodik, kao najmanji kemijski element, u atomarnom stanju ima mogućnost prolaska kroz kristalne strukture materijala. Struktura materijala regulira put difuzije vodika. Kako materijali u sebi imaju nehomogenosti, poput dislokacija, uključaka, šupljih prostora, pretpostavlja se da one reguliraju putanju vodika. Vodik može međusobno djelovati sa zaostalim naprezanjima te inicirati ili propagirati nastanak hladne pukotine u području zone

utjecaja topline ili osnovnog materijala, gdje se mogu pojaviti osjetljive mikrostrukture kao rezultat brzog i nekontroliranog hlađenja. [12]

Metode računalnog modeliranja napreduju u shvaćanju ponašanja vodika u metalima, a posljedica toga jest značajan napredak u predviđanju vodikove krhkosti.

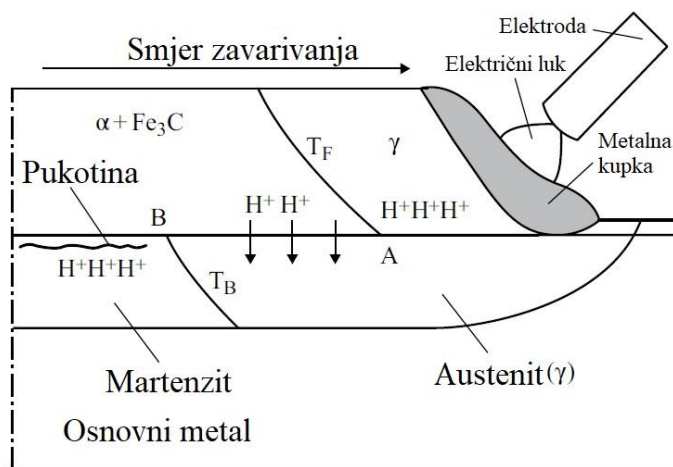
U nedostatku preciznog mehanizma nastanka vodikovih pukotina, osmišljene su metode kako bi se izbjegle vodikove pukotine u većini konstrukcijskih materijala, posebno čelika. Izborom pravilnih parametara zavarivanja, izmjenom i kontrolom kemijskog sastava, te adekvatnom mikrostrukturom možemo izbjeći ovaj oblik pukotina. U praksi se hladne pukotine mogu izbjeći u većini slučajeva ako se primijene odgovarajući postupci. [11]

3.2. Teorije nastanka hladnih pukotina

Hladne pukotine se najčešće povezuju sa zavarivanjem zbog činjenice da se vodik uvodi u talinu tijekom postupka zavarivanja. Visoke temperature u električnom luku dovode do disocijacije vodikova plina, vodene pare, i vodikovih spojeva, što rezultira formiranjem vodika u atomarnom stanju koji se lako otapa u rastaljenoj metalnoj kupci zavara i difundira u okolnu metalnu matricu. Postoje tri glavna izvora vodika tijekom zavarivanja:

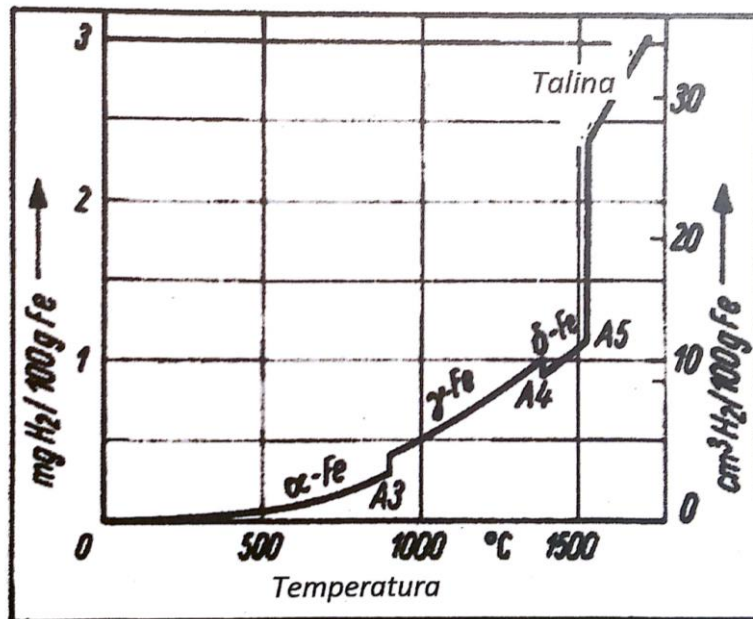
- 1) vlaga u oblozi elektrode, prašku, zaštitnom plinu, atmosferi
- 2) produkti nastali izgaranjem celuloznih obloga elektroda i plina kod plinskog zavarivanja
- 3) razne nečistoće koje sadrže ugljikovodike (masti, ulja i sl.) na površini metala za zavarivanje i dodatnog materijala.

Ulazak vodika u metal zavara te njegova difuzija u područje ZUT-a, što uzrokuje nastanak pukotina, prikazano je na slici 7. [11]



Slika 7. Difuzija vodika iz metala zavara do ZUT-a tijekom zavarivanja [13]

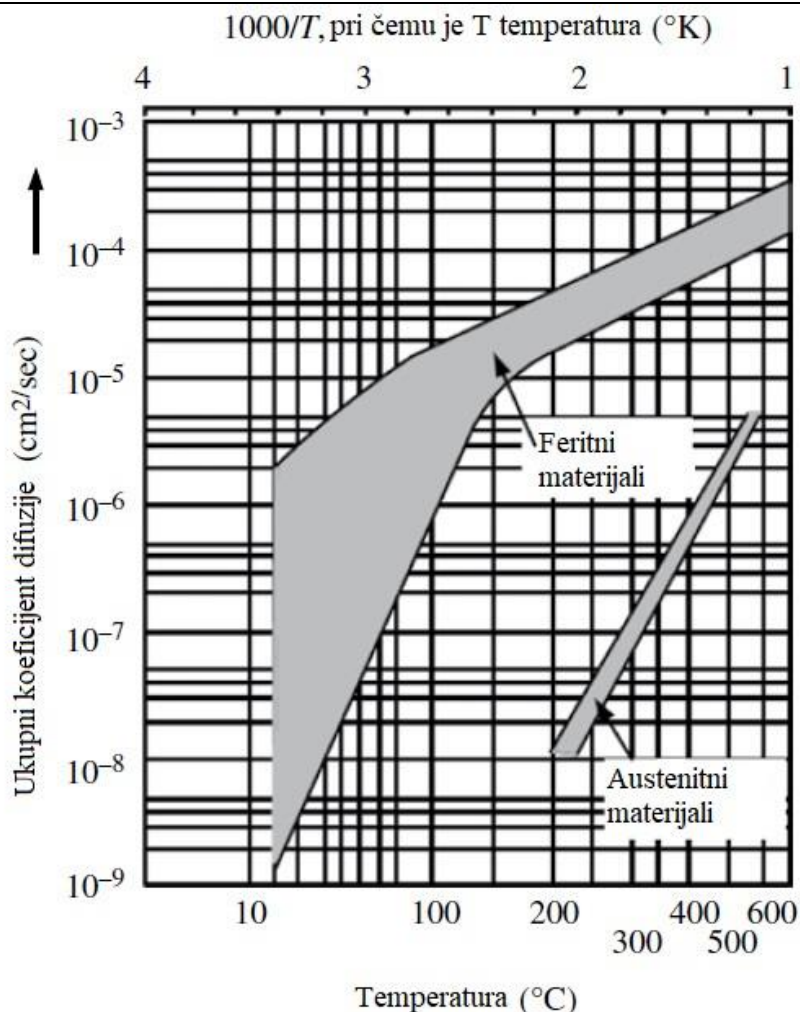
Vodik u atomarnom obliku je poprilično pokretljiv u rastaljenoj talini i brzo može difundirati u temperaturno hladnija područja, ZUT-a ili osnovnog metala, gdje može ostati „zarobljen“ u zamkama. Kao što je prikazano na slici 8., vodik ima puno veću rastvorljivost u rastaljenom nego u krutom željezu, što znači da će metal u rastaljenom stanju prihvatiti više vodika. Pri sobnoj temperaturi je mogućnost primanja vodika minimalna, iako pri određenim uvjetima vodik i pri sobnim temperaturama može difundirati u metal. [11]



Slika 8. Utjecaj temperature na rastvorljivost vodika u željezu pri tlaku vodika od 0,1 MPa [2]

Tako se pri tlaku od 0,1 MPa i sobnoj temperaturi u pravilnoj kristalnoj rešetci može nalaziti do 5 vodikovih atoma na 10^8 atoma željeza, što odgovara koncentraciji od 8×10^{-9} mol H/cm³ Fe. [2]

Vrijednost koeficijenta difuzije vodika u feritnim (bcc) i austenitnim (fcc) metalima prikazana je na slici 9. Čak i na temperaturama ispod 100 °C, vodik je poprilično mobilan u feritnim mikrostrukturama. To objašnjava nastanak „zakašnjelih“ pukotina u metalu zavora, budući da čak i pri sobnoj temperaturi postoji popriličan iznos koeficijenta difuzije vodika. [11]



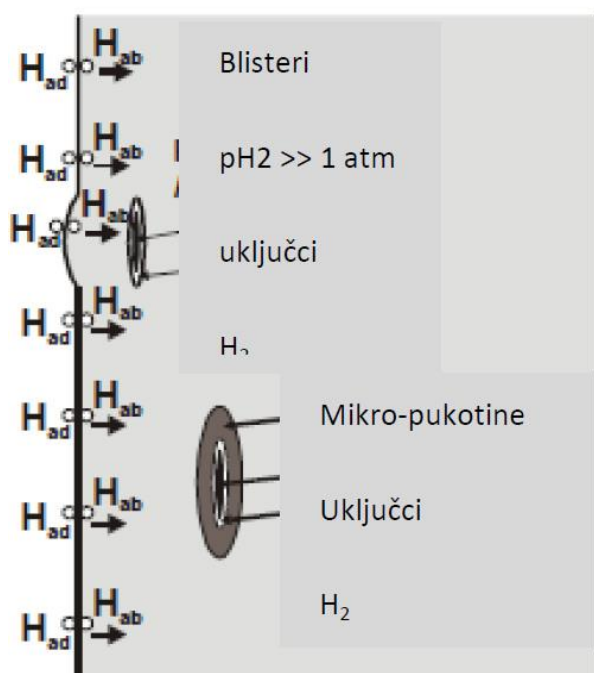
Slika 9. Koeficijent difuzije vodika u feritu i austenitu u ovisnosti o temperaturi [11]

Zbog masovnih problema s hladnim pukotinama povezanih sa zavarivanjem, mehanizam njihova nastanka se proučava od 1940-ih godina. Razvijene su mnoge teorije, ali još ne postoji univerzalan mehanizam. To je vjerojatno zbog toga što se ponašanje vodika razlikuje između materijala, zbog njihove međusobne razlike u građi kristalne rešetke, različitog koeficijenta difuzije, mehanizmima očvršćivanja i ostalim varijablama. Od svih inženjerskim materijala, hladne pukotine su najčešće prisutne u čelicima zbog njegovih složenih transformacija tijekom zagrijavanja i hlađenja, i također zbog toga što relativno niske razine vodika mogu uzrokovati hladne pukotine. Ni jedan mehanizam nastanka hladnih pukotina ne može u potpunosti objasniti sve pojave vezane uz hladne pukotine uzrokovane vodikom. Vjerojatno dolazi do interakcije nekoliko mehanizama, ovisno o koncentraciji vodika, mikrostrukтури, postojanju diskontinuiteta i nepravilnosti, naprezanjima, vremenu i temperaturi. [11]

U narednom tekstu bit će objašnjene neke od popularnijih teorija nastanka hladnih pukotina.

3.2.1. Teorija porasta tlaka

Teorija porasta tlaka predložena je od strane Zapfee i Sims. Teorija se bazira na najstarijoj predloženoj teoriji za objašnjavanje mehanizma nastanka hladnih pukotina uzrokovanih vodikom. Ova teorija povezuje nastanak pukotina s razvojem vodikovih mjehurića u mikrostrukтури. Vodikovi mjehurići nastaju zbog difuzije atomarnog vodika do mjesta poput granice zrna, mikrošupljina, praznina i nepravilnosti u mikrostrukтури. Kada se atomarni vodik počne nakupljati na tim mjestima, on se spaja i prelazi u molekularni oblik (H_2) te počinje stvarati visoki unutarnji pritisak (p_{H_2}). Ako taj pritisak premaši granicu razvlačenja materijala, te unutarnje praznine mogu rasti i povezati se zajedno. Za feritne čelike taj pritisak doseže vrijednost od 10^6 do 10^7 bar, što je dovoljno da dođe do pojave lokalnih pukotina i širenja postojećih nehomogenosti u strukturi. U konačnici, povezivanje tih praznina dovodi do stvaranja pukotina mehanizmom plastičnog deformiranja. Mikropukotine se mogu pojaviti u uvjetima odsutnosti vanjskog narinutog naprežanja. Slika 10. shematski prikazuje uvjete u kojima dolazi do stvaranja mikropukotina i vodikovih mjehurića (engl. *blister*). [11, 14]

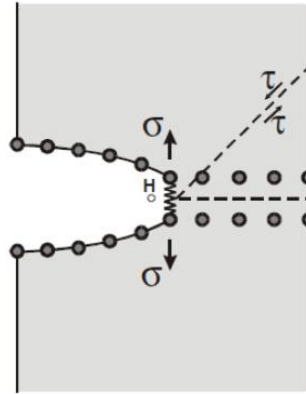


Slika 10. Shematski prikaz teorije tlaka kod pojave hladnih pukotina [14]

3.2.2. Adsorpcijska teorija

Adsorpcijska teorija predložena je od strane Uliga i osniva se na Griffith-ovom kriteriju za pojavu loma u idealno krhkim strukturama. Pretpostavlja se kako vodik djeluje na smanjenje energije vezivanja metalnih atoma, posebno na mjestima ekstremnih naprežanja (npr. zarezno

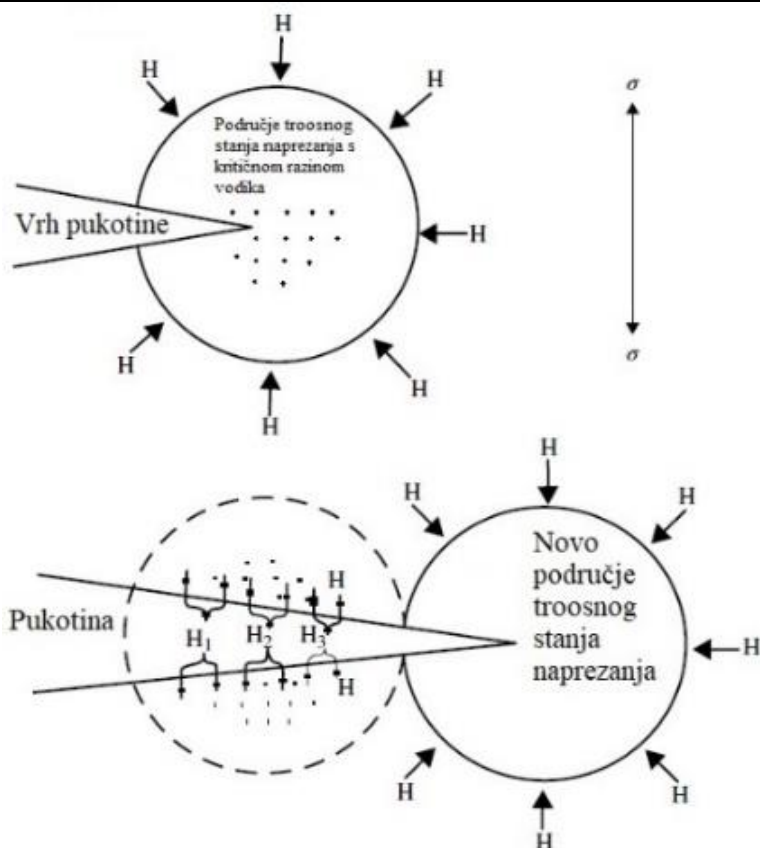
djelovanje), ispod kritične razine posmičnog naprezanja koje je potrebno za stvaranje prijelomnih površina. To znači da se inicijacija pukotine i njena propagacija odvijaju bez rastvaranja metala, slika 11. [14]



Slika 11. Shematski prikaz propagacije pukotine pod djelovanjem vodika prema teoriji adsorpcije [14]

3.2.3. Teorija dekohezije

Teoriju dekohezije predložio je Troiano. Naime, velika troosna naprezanja koja su prisutna na mjestima koncentracije naprezanja, poput vrha pukotine, privlače otopljene atome vodika koji utječu na smanjenje kohezivnih sila privlačenja između metalnih atoma. Ako se dosegne kritična koncentracija vodika, formira se mala pukotina koja propagira u područja s visokom koncentracijom vodika. Za daljnje širenje, pukotina mora čekati lokalno povećanje koncentracije vodika ispred pukotine. Ovaj mehanizam inicijacije i propagacije pukotine se ponavlja sve dok je prisutna kritična razina vodika ili dok se ne smanje troosna naprezanja. Ovaj mehanizam je prikazan shematski na slici 12. [11]



Slika 12. Shematski prikaz teorije dekohezije prema Troianu [11]

3.3. Utjecajni čimbenici na nastanak hladnih pukotina

Vodikove pukotine u čelicima mogu se pojaviti u metalu zavara i u zoni utjecaja topline, iako najčešće nastaju u zoni utjecaja topline zbog kombinacije mikrostrukture i vlačnih napreznja koja postoje u tom području metala. Kemijski sastav i mikrostruktura metala zavara obično se može kontrolirati kako bi se smanjila sklonost nastanka vodikovih pukotina. Na primjer, dodatni materijali s malo manjom čvrstoćom od čvrstoće osnovnog metala te feritnom i/ili bainitnom mikrostrukturom mogu se koristiti za zavarivanje čelika visoke čvrstoće. Za nastanak vodikovih pukotina moraju biti zadovoljena sljedeća četiri uvjeta:

1. Granična razina vodika
2. Osjetljiva mikrostruktura
3. Velika napreznja
4. Sobna temperatura . [11]

3.3.1. Utjecaj vodika u metalu zavara na sklonost prema nastanku hladnih pukotinama

Vodik može biti prisutan u metalu zavara iz više izvora. Ti izvori su sljedeći:

- Vodik u osnovnom metalu

- Vlaga u dodatnom materijalu (elektrodi ili žici)
- Organski spojevi na metalu (nečistoće, prljavštine, masti, ulje)
- Vodik u zaštitnom plinu
- Vlaga iz atmosfere . [11]

Vodik iz tih izvora može se otopiti u metalnoj kupci metala zavara budući da taljevina ima puno veću mogućnost rastvorljivosti vodika nego čestica metala (npr. željeza i aluminija). Nakon skrućivanja, difuzija vodika u mikrostrukturi metala zavara je izuzetno visoka, i vodik difundira u smjeru njegove najveće koncentracije u zoni utjecaja topline.

Stvarno mjerenje razine vodika u materijalima je predmet mnogih istraživanja (i znatnih diskusija). I dalje je teško dodijeliti „sigurnu“ razinu vodika u metal zavara i u zonu utjecaja topline kod konstrukcijskih materijala. Granična razina vodika koja potiče nastanak pukotina ovisi o vrsti materijala, njegovoj mikrostrukturi, te o veličini naprezanja. Na primjer, visokočvrstim martenzitnim čelicima je potrebna manja razina difundiranog vodika u odnosu na feritne čelike niže čvrstoće da bi nastale vodikove pukotine. Općenito, uvijek se nastoji eliminirati ili smanjiti što je više moguće svaki izvor vodika.

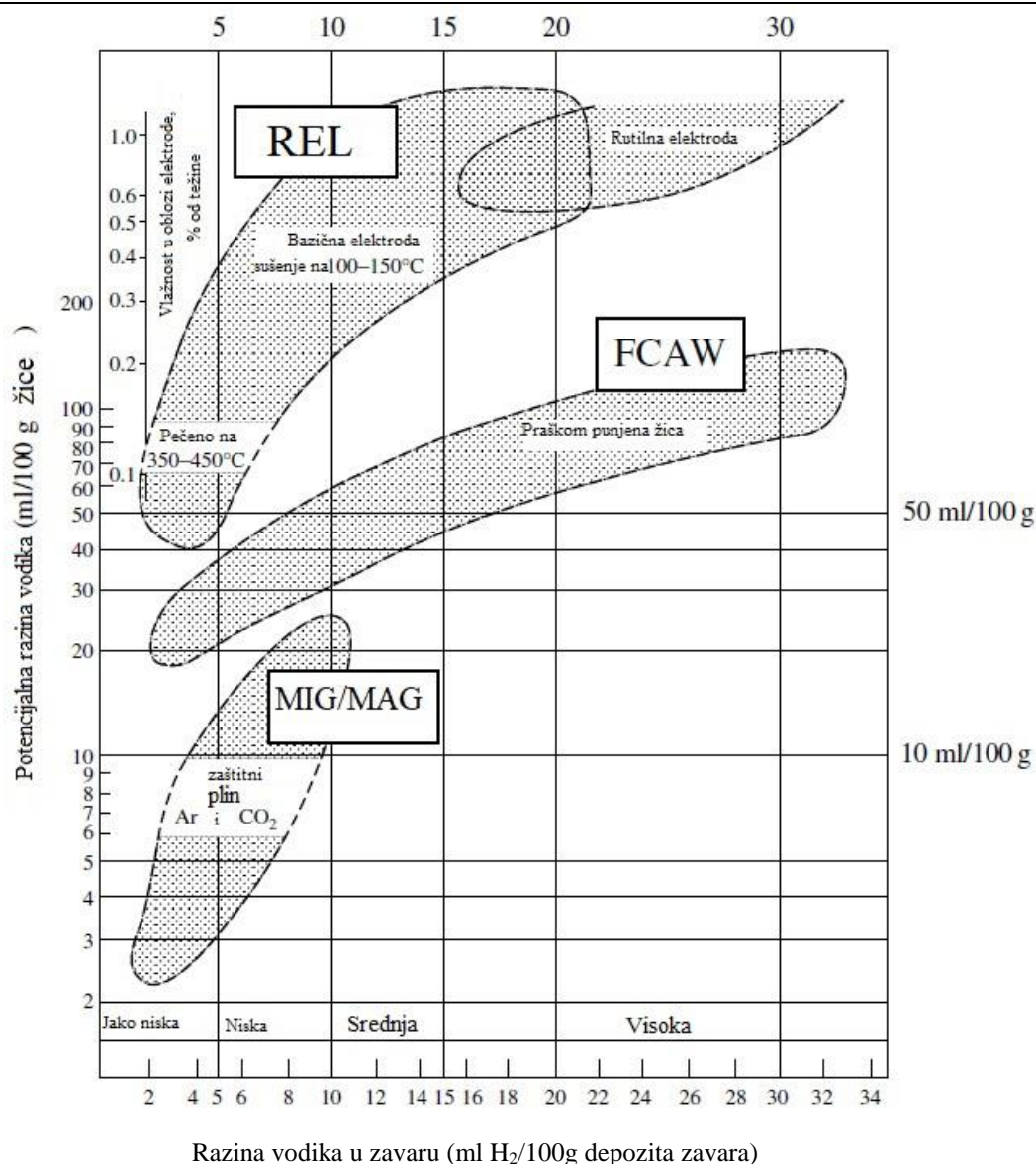
Postoji i razlika između ukupnog izmjerenog sadržaja vodika i udjela tog ukupnog sadržaja vodika koji je dostupan za difuziju i doprinosi nastanku vodikovih pukotina. Mikrostruktura metala može sadržavati mjesta gdje vodik može biti „zarobljen“. Na primjer, to može biti granica zrna i ona onda ograničava difuziju vodika. Ukupan sadržaj vodika je mjera za sav vodik koji je prisutan u materijalu i može se dobiti pomoću posebnih analitičkih metoda. Ukupan sadržaj vodika uključuje vodik koji je slobodan u kristalnoj rešetci i onaj koji je „zarobljen“. Općenito, samo slobodni vodik koji ima mogućnost difuzije može doprinijeti nastanku vodikovih pukotina. Moraju se koristiti posebne metode za mjerenje vodika koji difundira, i općenito se temelje na dopuštanju vodika da difundira iz materijala tijekom određenog vremena i unutar posebno definiranih uvjeta gdje se mjeri količina razvijenog vodika. U većini slučajeva, poželjno je izmjeriti stvarni sadržaj vodika u zavaru umjesto da se oslanja na njegovu procjenu. Vodik je vrlo teško mjerljiv budući da je jako pokretljiv i može difundirati iz uzorka na sobnoj temperaturi. Iz tog razloga razvijeni su detaljni postupci za određivanje sadržaja vodika, kao što je opisano u normi ANSI/AWS A4.3-93.

Koristeći ovaj postupak, uzorci se pripremaju zavarivanjem željenim postupkom i dodatnim materijalom u bakrenoj stezi kako bi se ubrzalo hlađenje na sobnu temperaturu. Neposredno nakon zavarivanja, uzorak se uranja u ledenu kupku i drži se na 0 ° C (32 ° F) sve dok se ne izvede analiza vodika. Ako se pravilno slijedi, ovaj postupak će zadržati većinu vodika.

Uobičajeno se koriste dvije metode za analizu vodika. U prvom postupku se primjenjuje živa i postupak uključuje uranjanje uzorka u živinu kupku koja se održava na konstantnoj temperaturi od 45°C (113°F). Uzorak se ostavlja u kupci minimalno 72 h. Dok vodik difundira iz uzorka, on istiskuje živu u kalibriranu epruvetu poznatu kao eudiometar. Odabrana je živa zato što je na sobnoj temperaturi u tekućem stanju i ima vrlo slabu topljivost za vodik. Nakon 72 sata, mjeri se količina istisnute žive, te se izračunava volumen vodika i pretvara se u ml/100 g. To je izmjera difundiranog vodika. Zbog ekoloških razloga s upotrebom žive smanjuje se korištenje ovog postupka u posljednjim godinama. Jednostavnija i izravnija metoda za mjerenje vodika jest postavljanje uzorka u plinsku kromatografiju. Taj mjerni instrument u relativno kratkom razdoblju (minutama) direktno mjeri razinu vodika. Upotreba plinskog kromatografa opisana je u normi ASTM E260. Prednost ovog postupka nad postupkom pomoću žive su niži troškovi opreme.

Ukupni sadržaj vodika može se mjeriti primjenom tehnika izgaranja, kao što je LECO metoda. Ova tehnika je također korisna za mjerenje razine ugljika i dušika. U materijalima kod kojih postoje mjesta na kojima vodik može biti „zarobljen“, mjerenje ukupnog sadržaja vodika ne mora biti dobra procjena difundiranog vodika koji doprinosi nastanku vodikovih pukotina.

Odabrani postupak zavarivanja i dodatni materijal imaju veliki utjecaj na količinu vodika koji se može otopiti u metalu zavara i zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja. Slika 13. pokazuje moguću količinu difundiranog vodika za različite postupke zavarivanja. Količina difundiranog vodika u zavaru mjeri se u ml/100g. [11]



Slika 13. Utjecaj izbora postupka zavarivanja na količinu difundiranog vodika u zavaru [11]

Iz slike 13. vidimo da količina difundiranog vodika u zavaru može varirati od jako niske (2 ml H₂/100g) pa sve do visoke (preko 30 ml H₂/100g). Ukupna količina difundiranog vodika manja od 10 ml H₂/100g zavara smatra se niskom i ne predstavlja opasnost za nastanak vodikovih pukotina (osim ako je vrlo visoka tvrdoća metala zavara ili zone utjecaja topline). S količinom difundiranog vodika u zavaru između 10 i 20 ml H₂/100g valja biti posebice oprezan. Kod količine difundiranog vodika u metalu zavara preko 20 ml H₂/100g je jako teško izbjeći vodikove pukotine u uvjetima napreznja. Postupci zavarivanja kod kojih se primjenjuje prašak kao izvor zaštitne atmosfere (REL, PPŽ, EPP) su najpodložniji nakupljanju vodika u zavaru jer vlaga u prašku najviše doprinosi stvaranju vodika. Dodatni materijali za REL i PPŽ postupak zavarivanja mogu stvoriti širok raspon razina vodika u metalu zavara ovisno o korištenom

dodatnom materijalu. Potrebno je posebno napomenuti da rutilne elektrode (kao što su E6010 i E7010) stvaraju visoku razinu vodika u zavaru. A s druge strane, postupci sa zaštitnim plinom, kao što su MAG i TIG, imaju mali potencijal za stvaranje vodika u zavaru. [11]

Vodik koji je ušao u zavar kroz električni luk ili metalnu kupku mora difundirati do zone utjecaja topline kako bi zona utjecaja topline bila podložna nastanku vodikovih pukotina. Budući da je sadržaj vodika u osnovnom metalu općenito nizak, metal zavara postaje primarni izvor vodika. Kao što prikazano na slici 9., difuzija vodika u metalu ovisi o temperaturi i mikrostrukturi.

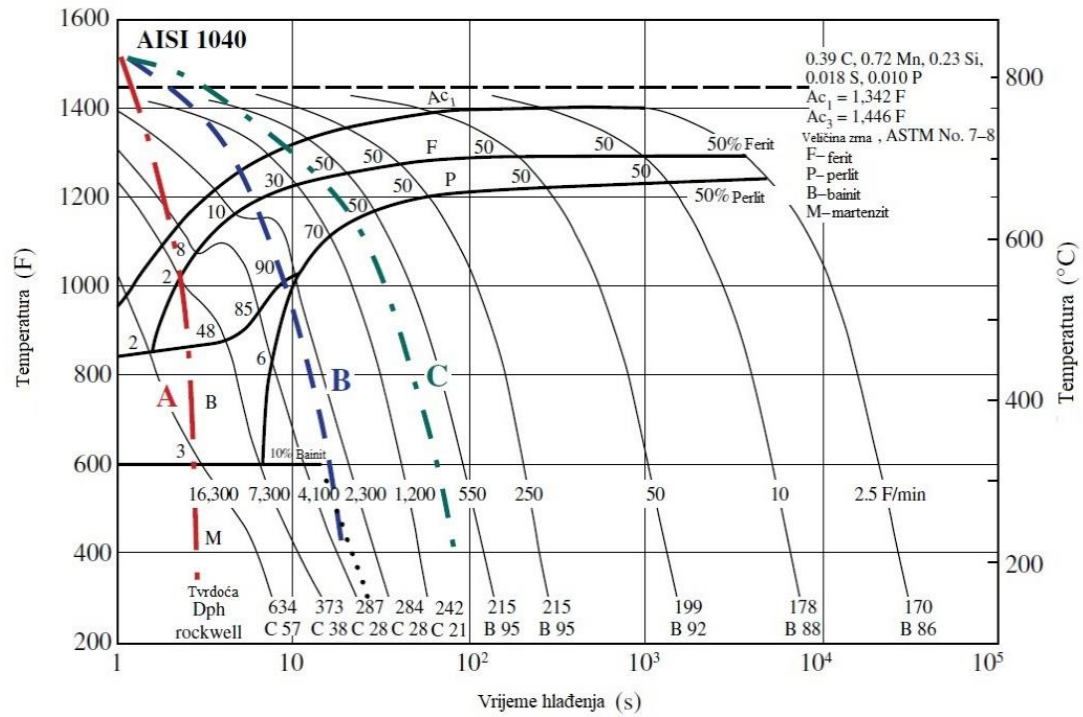
Difuzija vodika u feritnim (bcc) materijalima je mnogo veća nego u austenitnim (fcc) zbog otvorenije strukture bcc kristalne rešetke naspram fcc. Općenito, difuzija vodika u feritnim čelicima je za više od 3 reda veličina (1000 puta) veća u odnosu na austenitne legure. To djelomice objašnjava zašto su austenitni čelici na ili blizu sobne temperature otporniji na vodikove pukotine. Difuzija vodika ispod približno 150°C ovisi o različitim mogućim mikrostrukturama čelika – ferit, perlit, bainit, martenzit. Obično je najveća difuzija vodika u bainitnim i martenzitnim mikrostrukturama. [11]

3.3.2. Utjecaj mikrostrukture čelika na sklonost prema nastanku hladnih pukotinama

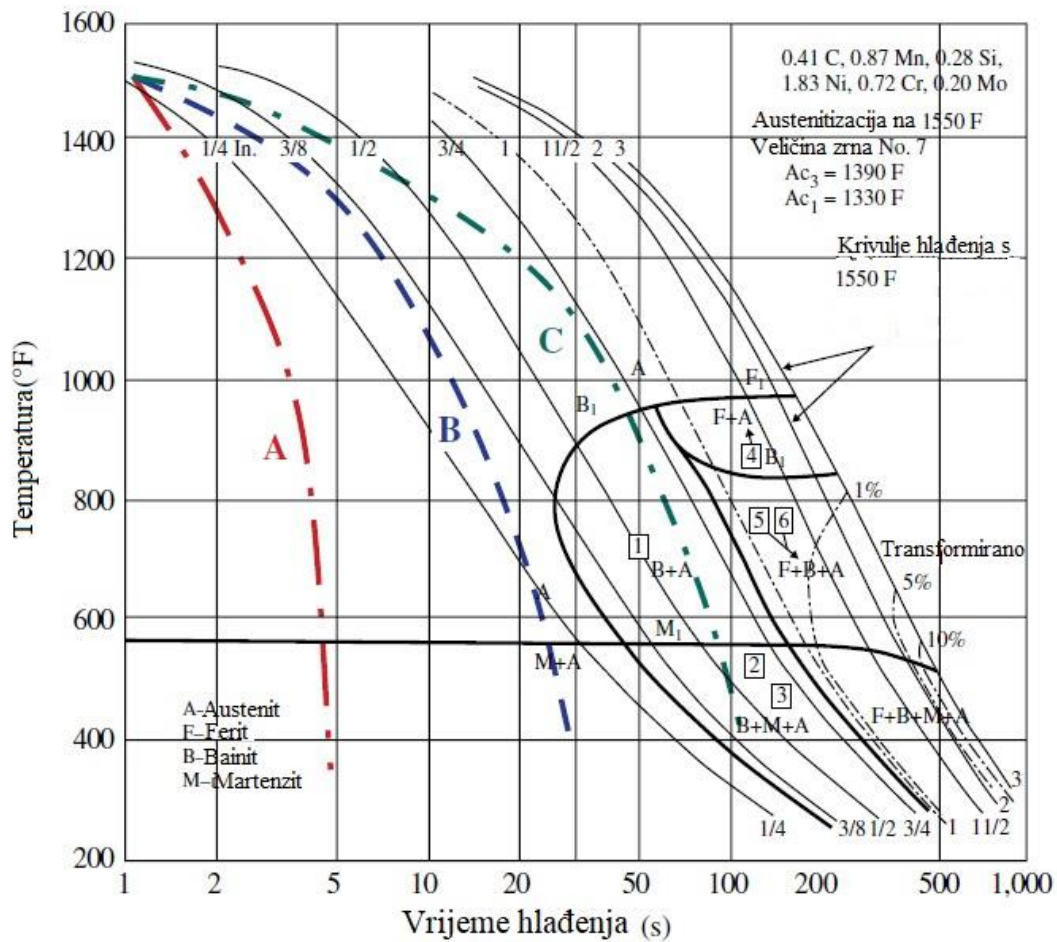
U C-Mn i niskolegiranim čelicima može postojati mnoštvo različitih mikrostrukture u metalu zavara, ovisno o kemijskom sastavu čelika i postupku zavarivanja/parametrima zavarivanja. Općenito, mikrostrukture velike tvrdoće i/ili krhkosti su najpodložnije nastanku hladnih pukotina. Te mikrostrukture obično nastaju uslijed brzog hlađenja s temperature iznad gornje kritične temperature (A_3) i normalno su martenzitne ili bainitne.

Velika brzina hlađenja zavara rezultat je niskog unosa topline prilikom zavarivanja, niske temperature predgrijavanja i/ili niske međuslojne temperature, te zavarivanja obradaka velikih debljina.

Utjecaj brzine hlađenja s gornje kritične temperature do sobne temperature na dobivenu mikrostrukturu ugljičnog čelika (AISI 1040) i niskolegirano čelika (AISI 4340) prikazan je na kontinuiranom TTT dijagramu na slikama 14. i 15. Standardne europske oznake prema normi EN 10250 za čelike AISI 1040 i AISI 4340 su C40/1.0511 i 36CrNiMo4/1.6511. Čelik 1.0511 spada u grupu nelegiranih kvalitetnih čelika, dok čelik 1.6511 spada pod legirane čelike za strojogradnju. [11]



Slika 14. Kontinuirani TTT dijagram za čelik AISI 1040 [11]



Slika 15. Kontinuirani TTT dijagram za čelik AISI 4340 [11]

Na oba dijagrama su postavljene tri krivulje hlađenja koje predstavljaju veliku (A), srednju (B), i malu (C) brzinu hlađenja s iznad temperature A_3 . Te krivulje predstavljaju raspon temperatura koji se može očekivati u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja. Za većinu čelika, brzina hlađenja u rasponu od 800 do 500 ° C (1470-930 ° F) je najkritičnija jer je to raspon tijekom kojeg se austenit transformira u ostale transformacijske faze. Vrijeme hlađenja kroz taj raspon temperatura, označen t_{8-5} , često se koristi kao mjera brzine hlađenja.

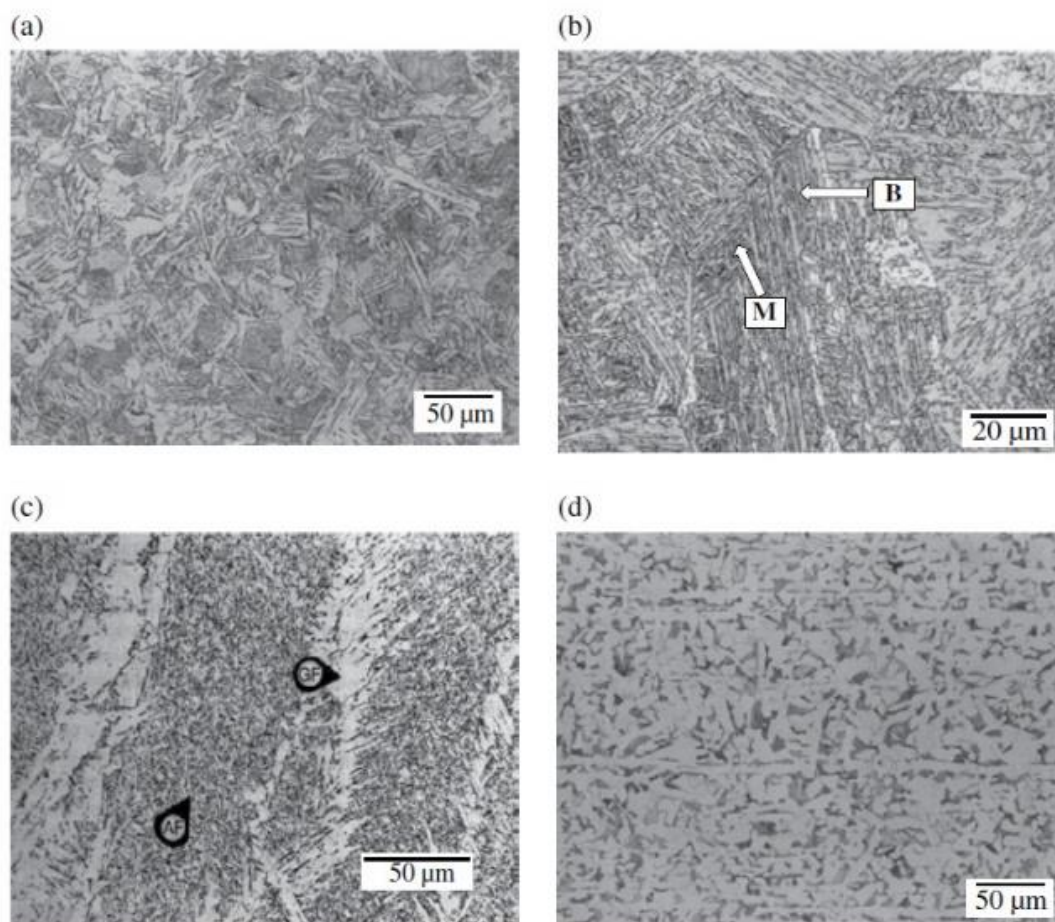
Za čelik AISI 1040, čak i najveća brzina hlađenja neće proizvesti potpunu martenzitnu strukturu, a sporije brzine hlađenja (B i C) rezultiraju mikrostrukturama koje se pretežito sastoje od ferita i perlita. Nasuprot tome, čelik AISI 4340 formira 100% martenzita s velikom (A) i srednjom (B) brzinom hlađenja, te mješavinu bainita i martenzita pri maloj brzini hlađenja (C). To pokazuje važan utjecaj zakaljivosti na nastalu mikrostrukturu u zoni utjecaja topline. Za čelike s boljom zakaljivosti poput AISI 4340, martenzit će se lako formirati u zoni utjecaja topline i ne može se izbjeći kontrolom unosa topline ili temperaturom predgrijavanja. Na mikrostrukturu zone utjecaja topline čelika AISI 1040, s lošijom zakaljivosti, može se značajno utjecati kontrolom brzine hlađenja. Stoga se može smanjiti sklonost tog čelika na hladne pukotine izbjegavanjem nastanka martenzita i bainita. Izbjegavanje nastanka hladnih pukotina kod čelike dobre zakaljivosti, poput AISI 4340, vrši se kontrolom i smanjenjem sadržaja vodika u zoni utjecaja topline budući da kontrola mikrostrukture tijekom zavarivanja nije moguća. [11] Relativna sklonost prema hladnim pukotinama različitih mikrostrukture u čelicima prikazana je u tablici 6.

Tablica 6. Relativni poredak mikrostrukture prema sklonosti prema nastanku hladnih pukotinama [11]

MIKROSTRUKTURA	
Nepopušten martenzit	Smanjenje sklonosti prema vodikovim pukotinama
Nepopušten martenzit i bainit	
Bainit	
Popušteni martenzit	
Ferit i perlit	
Acikularni ferit	
Austenit	

Nepopušteni martenzit je najskloniji nastanku hladnih pukotina, dok su ferit i perlit, acikularni ferit, i austenit najotporniji. Do određene mjere, tvrdoća se može koristiti kao mjera sklonosti prema nastanku hladnih pukotina. Općenito, mikrostrukture s tvrdoćom ispod 35 HRC (~ 350

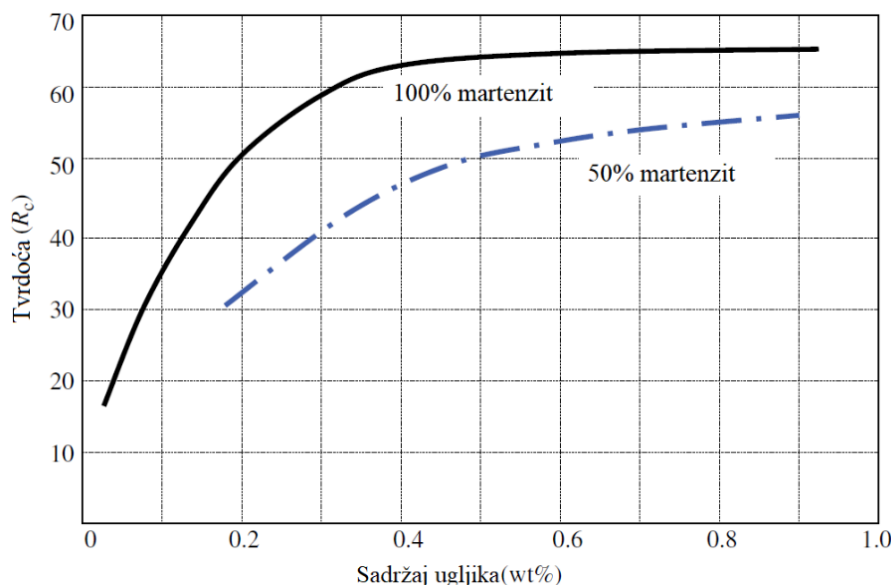
HV) su otporne na hladne pukotine u većini uvjeta. Primjeri različitih mikrostruktura u ugljičnim čelicima prikazani su na slici 16.



Slika 16. Vrste mikrostruktura u čelicima. (a) martenzit, (b) bainit/martenzit, (c) acikularni ferit s feritom na granici zrna, i (d) ferit i perlit [11]

Kemijski sastav zajedno s brzinom hlađenja u konačnici određuje mikrostrukturu i tvrdoću čelika. Sadržaj ugljika u čeliku ima najveći utjecaj na tvrdoću, dok ostali legirni elementi (zajedno s ugljikom) utječu na zakaljivost čelika. Zakaljivost čelika je svojstvo čelika da postigne što višu tvrdoću nakon kaljenja, odnosno što veći udio martenzita u strukturi. Budući da je martenzit najpodložnija mikrostruktura za nastanak hladnih pukotina, predviđanje njegovog nastanka je bitan čimbenik u određivanju sklonosti prema hladnim pukotinama uzrokovanih vodikom.

Tvrdoća čelika ovisi o sadržaju ugljika i postotku martenzita u mikrostrukturi čelika, kao što je prikazano na slici 17. [11]



Slika 17. Povezanost tvrdoće i sadržaja ugljika u čeliku [11]

U uvjetima kada nastaje 100% martenzita u mikrostrukтури čelika, tvrdoća čelika se predviđa prema gornjoj krivulji. Čak i prilikom relativno malog udjela ugljika u čeliku (0.2%) tvrdoća čelika može iznositi 50 HRC. To objašnjava zašto mnogi čelici koji su otporni na hladne pukotine imaju sadržaj ugljika približno ili ispod 0,1%. Tvrdoća se može kontrolirati smanjenjem nastalog martenzita u mikrostrukтури, kao što prikazuje donja krivulja na slici 17. za 50% martenzita. To se može postići kontroliranjem brzine hlađenja ili smanjivanjem zakaljivosti čelika.

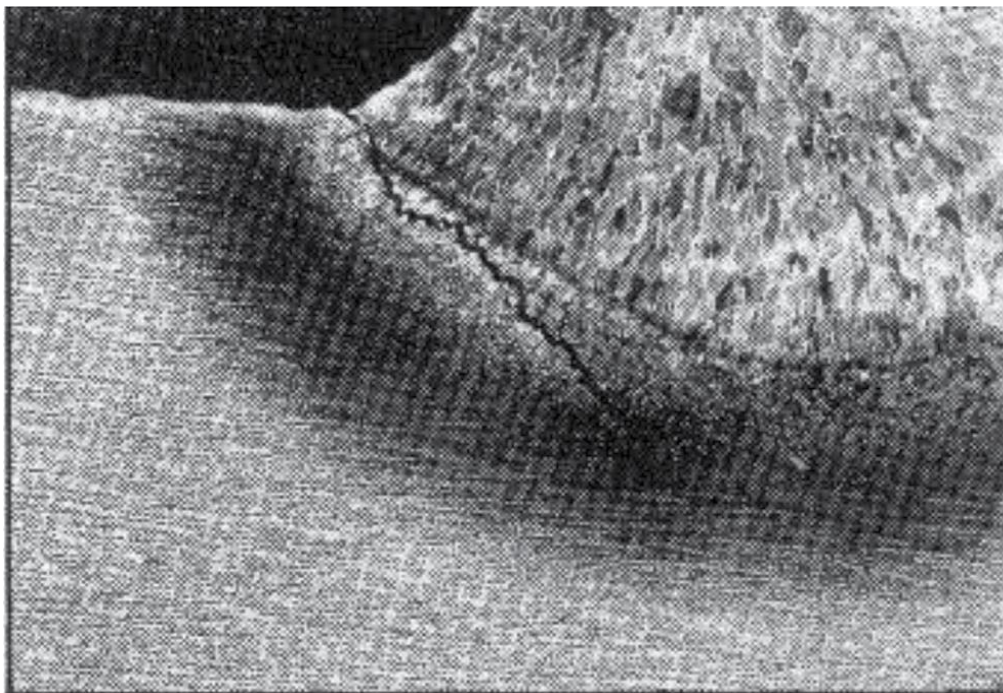
Formule za izračunavanje ekvivalentnog sadržaja ugljika (CE) koriste se za predviđanje sklonosti prema vodikom uzrokovanim pukotina. Općenito, što je veća vrijednost ekvivalenta ugljika (CE), to je čelik skloniji nastanku vodikom uzrokovanih pukotina. Nažalost, ne postoji jedna formula za CE koja se može koristiti za sve čelike. [11]

3.2.3. Utjecaj naprezanja čelika na sklonost prema nastanku hladnih pukotina

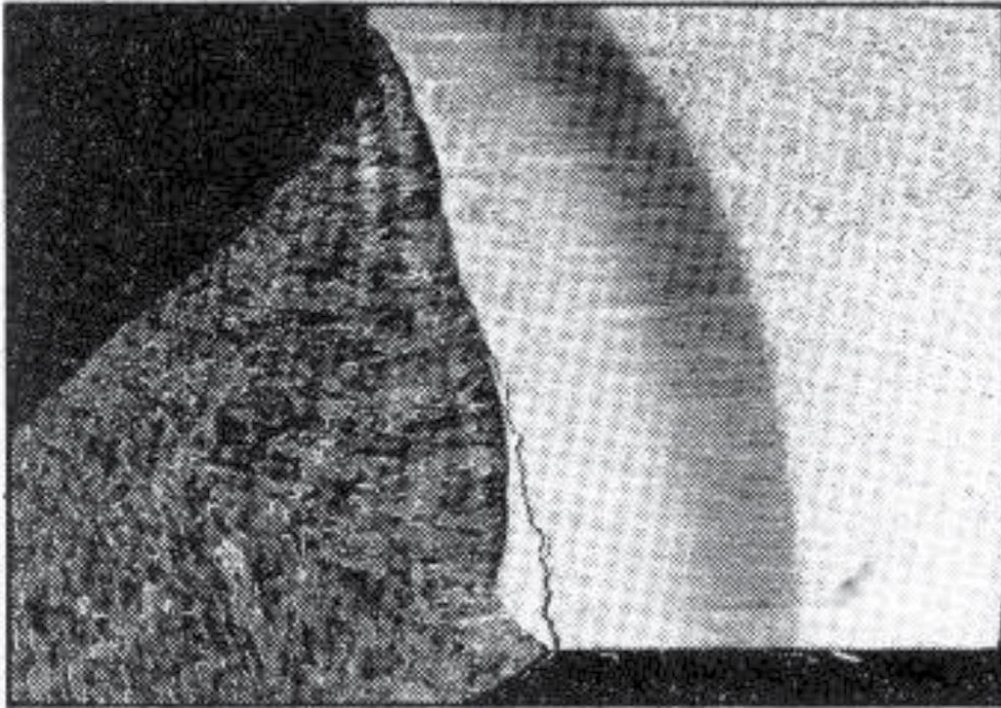
Veliki iznos naprezanja je obično nužan za pojavu vodikom uzrokovanih pukotina. Distribucija vodika u zavarenom spoju ovisi od količine i tipova raznih uključaka, mikropora i makropora te njihova rasporeda, koje se pod utjecajem visokog pritiska vodika mogu između sebe povezati u manju ili veću pukotinu, posebno kada dodatno djeluju visoka naprezanja nastala skupljanjem metala zavara ili krhko stanje otvrdnutog metala u ZUT-u. Tvrda zakaljiva struktura čelika ima smanjenu istežljivost pa pod utjecajem velikih zaostalih naprezanja može doći do loma, odnosno pojave pukotina. [15]

Općenito, naprezanje je varijabla koju je najteže mjeriti i kontrolirati u odnosu na nastanak hladnih pukotina. Debljina materijala te oblik zavarenog spoja utječu na iznos naprezanja koji povezujemo s hladnim pukotinama. Ostali čimbenici koji doprinose naprezanju u zavaru su osnovni materijal, čvrstoća metala zavara, te vanjsko stezanje zavarenog spoja. U mnogim slučajevima nije važno ukupno naprezanje, nego lokalna vlačna naprezanja koja su prisutna na mjestima visoke koncentracije naprezanja, kao što su rubovi zavarenog spoja. Budući da je vodik jako pokretan u mikrostrukтури, moguće je njegovo nakupljanje u području visokih naprezanja.

U slučaju vodikom uzrokovanih pukotina u metalu zavara, zaostala naprezanja u zoni utjecaja topline mogu dosegnuti vrijednosti blizu granice razvlačenja metala. Vrlo su česte hladne pukotine kod reparaturnih zavarivanja, uglavnom kod slabo zavarljivih čelika ili gdje su nakon zavarivanja vrlo visoka zaostala naprezanja. Prisutnost geometrijskih pogrešaka u zavarenom spoju kao što su zajedni, preveliko nadvišenje zavara, preveliko nadvišenje korijena zavara, nepravilan prijelaz zavara, preklop zavara, utonuće zavara i ostalih koncentratora naprezanja mogu dovesti do lokalnih mjesta jako velikih naprezanja. Kod REL postupka zavarivanja, uključci troske na rubu zavara mogu se ponašati kao mjesta velike koncentracije naprezanja. Gotovo se sve vodikom uzrokovane pukotine iniciraju u mjestima visoke koncentracije naprezanja u metalu zavara, kao što je prikazano na slikama 18. i 19. [11]



Slika 18. Hladna pukotina na mjestu visoke koncentracije naprezanja [16]

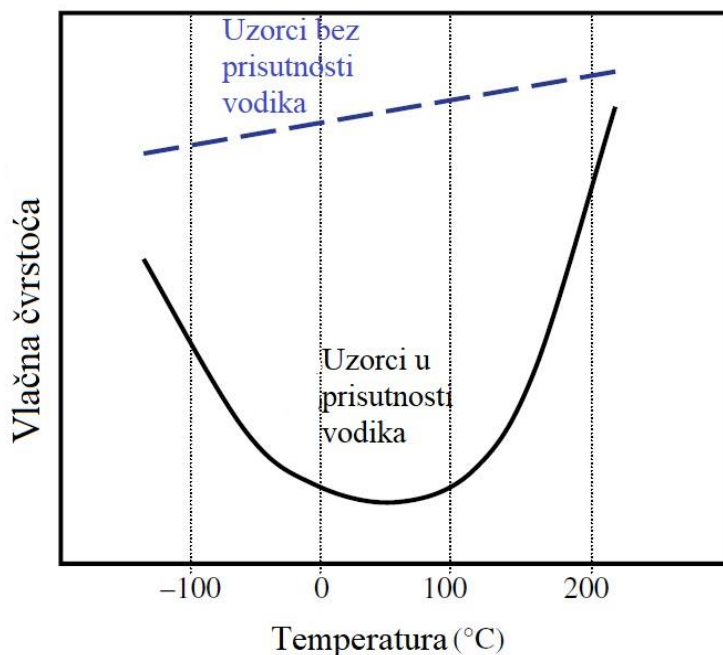


Slika 19. Primjer vodikove pukotine na mjestu visoke koncentracije naprezanja [16]

Većina metoda za ispitivanja čelika prema sklonostima hladnim pukotinama uključuje zarez ili neki drugi oblik koncentracije naprezanja. Također je važno da mjesta koncentracije naprezanja budu vrlo blizu područja grubozrnatog ZUT-a gdje se očekuje najveća razina vodika i najpodložnija mikrostruktura pukotinama. [11]

3.3.4. Utjecaj temperature čelika na sklonost prema nastanku hladnih pukotinama

Skлонost čelika prema nastanku vodikom uzrokovanih pukotina jako ovisi o temperaturi. Ta povezanost je prikazana na slici 20.



Slika 20. Utjecaj vodika na vlačnu čvrstoću u ovisnosti o temperaturi [11]

Pri temperaturama iznad 200 ° C (390 ° F), manje su šanse za nastanak vodikom uzrokovanih pukotina jer je omogućena difuzija vodika i samim time čvrstoća mikrostrukture raste. Na vrlo niskim temperaturama (< -50 ° C) mobilnost vodika se smanjuje i njegov učinak je umanjen. Kod čelika temperatura prijelaza iz duktilnog u krhko područje je najčešće u rasponu od 20 do -100°C.

Kao što je već spomenuto, ne doprinosi sav vodik prisutan u materijalu nastanku pukotina. Vodik je prisutan u difuzijskom i nedifuzijskom obliku. Samo vodik koji može difundirati doprinosi nastanku vodikom uzrokovanim pukotinama, budući da može difundirati u područja velikih napreznja. Vodik koji ne može difundirati je „zarobljen“ u strukturi. Vodik može biti „zarobljen“ u kristalnoj rešetci te na granicama zrna. [11]

3.4. Prepoznavanje hladnih pukotina

Hladne pukotine pojavljuju se odmah nakon zavarivanja ili nakon nekog vremena. Općenito, ako dođe do pojave pukotina, to će biti unutar 72 sata od završetka zavarivanja. Zbog mogućnosti „zakašnjelih“ vodikovih pukotina koje se ne pojavljuju neposredno nakon zavarivanja, mnoge norme za kontrolu zavara zahtijevaju period od najmanje 48 sati čekanja nakon zavarivanja da bi se mogla izvršiti kontrola zavara.

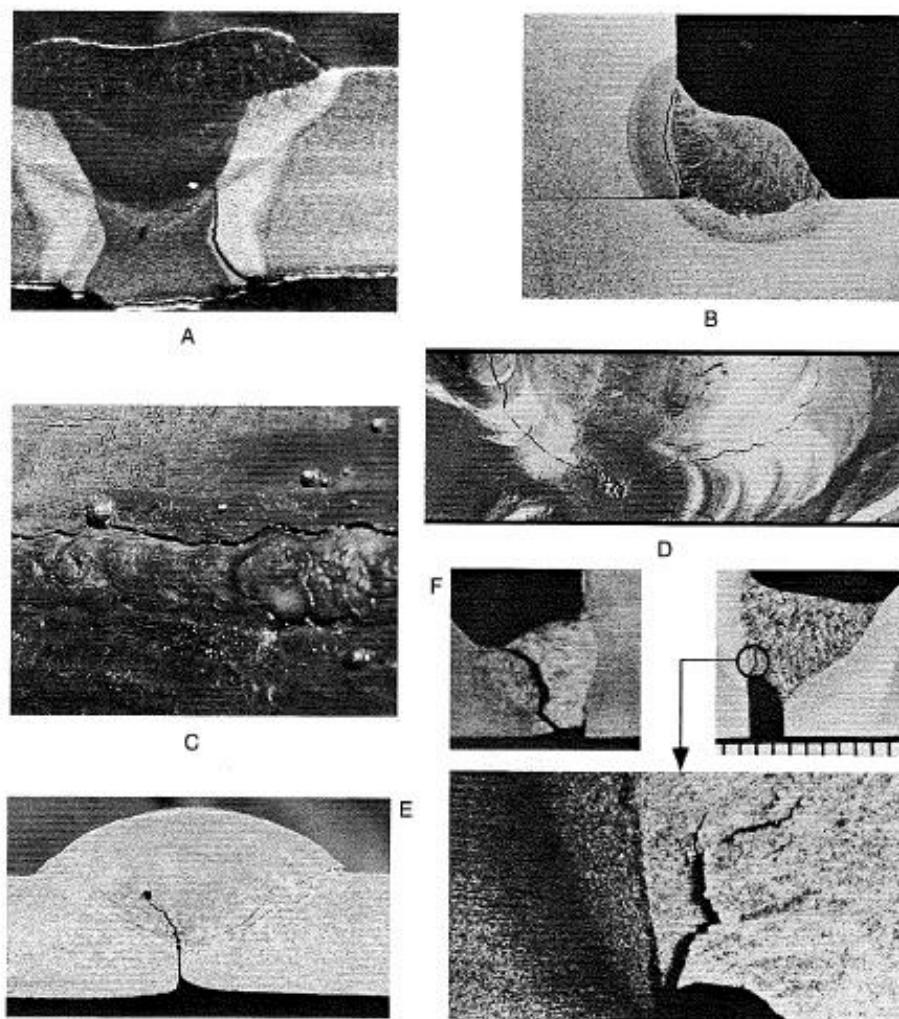
Budući da su velika vlačna napreznja i mjesta koncentracije napreznja ključni čimbenici pri nastanku pukotina, pukotine se počinju stvarati na mjestima diskontinuiteta geometrije zavara. U većini slučajeva, prirodno se stvara zarez prilikom zavarivanja korijena zavara ili na rubu

zavara na mjestima gdje se susreću metal zavara i osnovni metal. Takav nastali zarez, iako nije oštar, stvara mjesta velike koncentracije naprezanja.

Hladne pukotine mogu nastati u metalu zavara ili u zoni utjecaja topline. Budući da postoji jaka povezanost između osjetljivosti na vodikove pukotine i tvrdoće, pukotine obično nastaju u područjima najveće tvrdoće. Kod većine čelika, pukotine nastaju u području grubozrnatog ZUT-a u neposrednoj blizini linije staljivanja. U velikoj većini slučajeva, vodikove pukotine se iniciraju na liniji staljivanja i zatim se šire u područje grubozrnatog ZUT-a. To se događa jer su zadovoljena sva tri uvjeta za nastanak vodikovih pukotina: koncentracija naprezanja, velika tvrdoća, i vodik koji je difundirao iz taline metala zavara. Na primjer, pukotina ispod zavara tijekom navarivanja može biti oblik vodikove pukotine ako je prisutno dovoljno naprezanje. Vodikom uzrokovane pukotine mogu se širiti interkristalno (longitudinalno) ili transkristalno (poprečno). Ako se šire interkristalno, pukotina napreduje duž granice zrna. Interkristalne pukotine najčešće nastaju pri nižim stanjima naprezanja te kada su prisutne nečistoće i ostale segregacijske faze na granicama zrna. U većini slučajeva, propagacija pukotine je transkristalna, i može imati različite oblike prijelomne površine ovisno o stanju naprezanja i koncentraciji vodika. [11]

Dakle, pri nižim čvrstoćama čelika (oko 480 MPa), vodikom inducirane pukotine pojavljuju se u obliku longitudinalnih pukotina u zoni utjecaja topline osnovnog materijala. Pri većim čvrstoćama čelika (oko 830 MPa) može doći do nastanka poprečnih pukotina u metalu zavara. [17]

Pukotine mogu biti vidljive na površini zavarenog spoja, ali i nevidljive u zavarenom spoju. Po veličini su – od mikropukotina za oko nevidljive, kao i za mnoge od nerazornih ispitivanja - do makropukotina koje su vidljive ili se nekom od metoda lako otkrivaju. Na slici 21. prikazani su primjeri hladnih pukotina u nekoliko najčešćih oblika zavarenog spoja na čelicima. Pukotine A,B i C nastale su u otvrdnutoj zoni utjecaja topline, a ostale pukotine su inicirane u najslabijem dijelu zavara. [15]



Slika 21. Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja

A - sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u

B – kutni spoj, pukotina u ZUT-u

C – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u

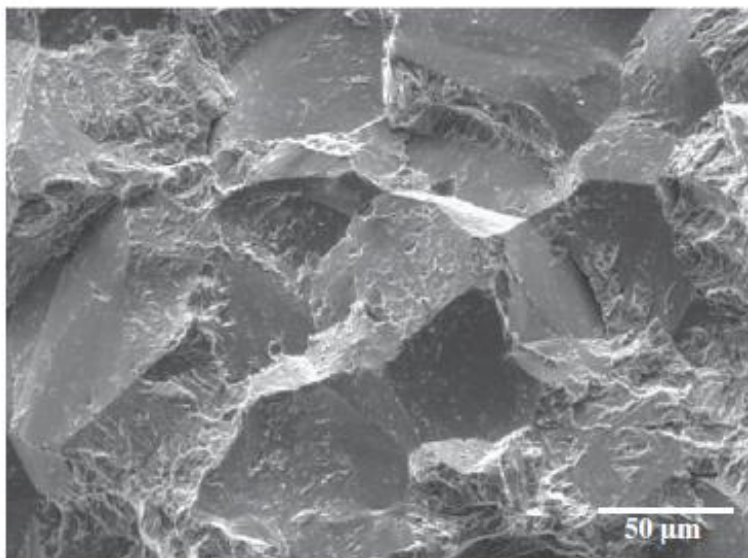
D – kutni kružni spoj, pukotina u zavaru, polazi iz kratera

E – sučeljeni spoj, pukotina iz neprovarenog korijena zavora

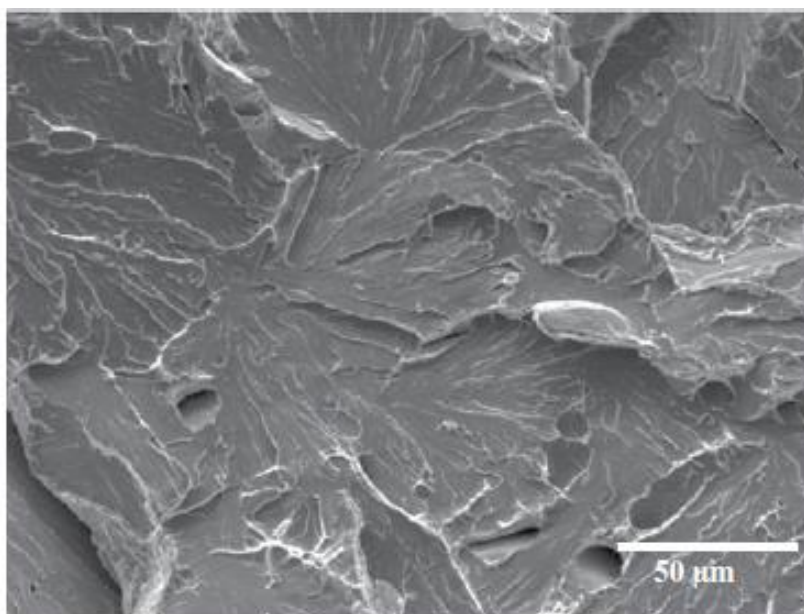
F – kutni spoj, pukotina u korijenu zavora [15]

U nekim slučajevima, kao što je kod niskolegiranih čelika, može se teško razlikovati vodikove pukotine od pukotina uslijed ponovnog zagrijavanja. Pukotine uslijed ponovnog zagrijavanja nisu prisutne u zavarivanom području, stoga ako se pojavi pukotina odmah nakon zavarivanja, vrlo je vjerojatno uzrokovana vodikom. Pukotine uslijed ponovnog zavarivanja su uvijek interkristalne i šire se duž granice u blizini zone staljivanja. Vodikove pukotine obično nisu tako usko povezane s linijom staljivanja i obično se šire unutar područja grubozrnatog ZUT-a, kao što je prikazano na slikama 18. i 19.

Općenito, najveći problem razlikovanja vodikovih pukotina od pukotina uslijed ponovnog zagrijavanja jest činjenica da se vodikove pukotine mogu širiti interkristalno ili kombinacijom interkristalnog/transkristalnog načina. Primjeri interkristalnog i transkristalnog načina širenja vodikovih pukotina dani su na slikama 22. i 23. [11]



Slika 22. Interkristalni način širenja vodikove pukotine [11]



Slika 23. Transkristalni način širenja vodikove pukotine [11]

3.5. Sprječavanje nastanka hladnih pukotina

Od svih problema vezanih uz zavarljivost metalnih konstrukcija, više je uloženo truda i vremena za sprječavanje i kontrolu hladnih pukotina nego za sve ostale probleme zajedno. Sprječavanje hladnih pukotina zahtijeva da se eliminira jedan od glavnih čimbenika koji doprinosi njenom nastanku. Ti glavni čimbenici su sljedeći: vodik, mikrostruktura, naprezanje, temperatura. [11]

Smanjenje unosa vodika tijekom zavarivanja zahtijeva posebnu kontrolu i rukovanje osnovnim i dodatnim materijalima. Preporučuje se da se elektrode ili praškom punjene žice suše u pećima na temperaturama u rasponu od 250 do 450°C, te da se nakon sušenja skladište na temperaturama iznad 100°C. Time se uklanja vlaga iz elektroda koja predstavlja potencijalni izvor vodika u metalu zavara. Također se preporučuje korištenje elektroda koje ne sadrže spojeve koji disociraju kako bi formirali vodik. Na primjer, celulozne elektrode će stvoriti vodik u električnom luku tijekom zavarivanja. Čistoća radnog mjesta i opreme je također od kritične važnosti. Boja, hrđa, mast i ostala maziva mogu poslužiti kao izvor vodika na osnovnom ili dodatnom materijalu. Prije zavarivanja je potrebno koristiti odgovarajuće postupke čišćenja.

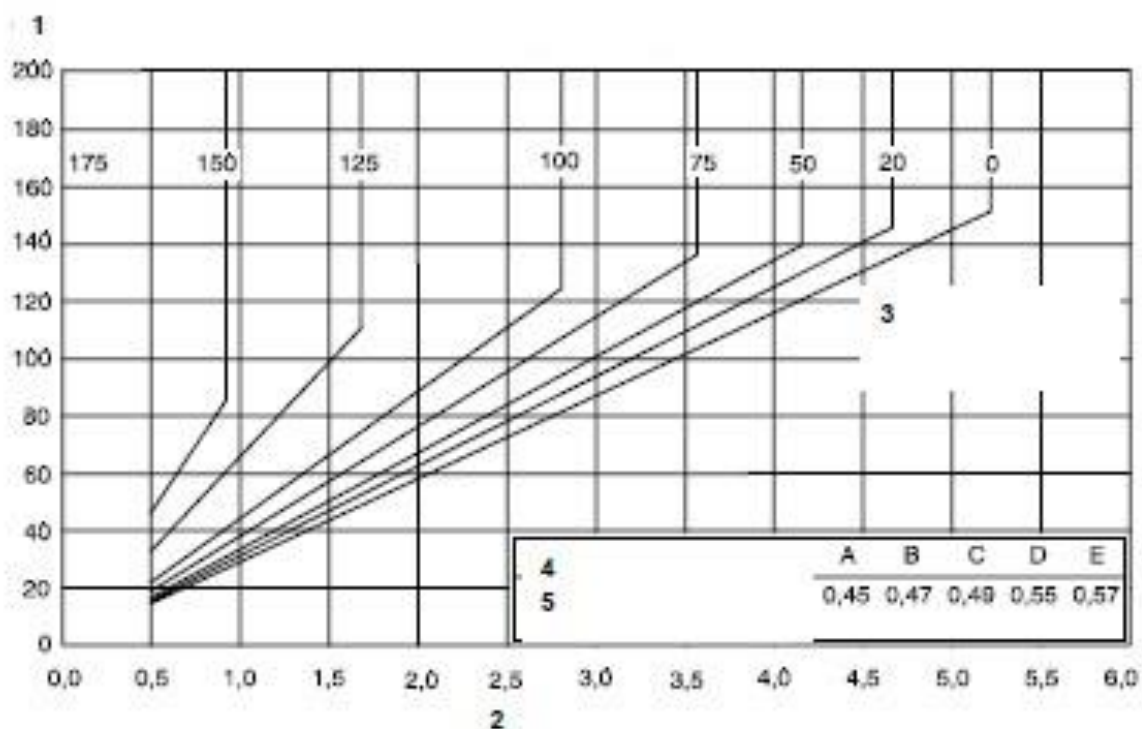
Mikrostruktura metala zavara i ZUT-a ima velik utjecaj na sklonost prema nastanku hladnih pukotina. U zoni taljenja, kontrola mikrostrukture najčešće se provodi pravilnim izborom dodatnih materijala koji stvaraju otporniju mikrostrukturu, tablica 5.

Kod nekih čelika, u zoni utjecaja topline, mogu se stvoriti otporne mikrostrukture smanjenjem brzine hlađenja, obično povećanjem unosa topline ili predgrijavanjem, ili njihovom kombinacijom. Povećanjem ekvivalentnog sadržaja ugljika CE u čeliku teže je kontrolirati mikrostrukturu pomoću unosa topline i predgrijavanja. [11]

Porastom ekvivalenta ugljika CE povećava se i sklonost nastanka hladnih pukotina uzrokovanih vodikom. Da bi se to spriječilo, čelike treba predgrijavati prije zavarivanja i tijekom zavarivanja održavati na odgovarajućoj temperaturi (tzv. međuslojna temperatura). Međutim, potrebno je odrediti optimalnu temperaturu predgrijavanja kako bi se smanjili troškovi i izbjegle posljedice prekomjernog zagrijavanja poput degradacije mehaničkih svojstva i povećanih deformacija. Postoji nekoliko izraza za određivanje ekvivalenta ugljika, ovisno o vrsti čelika ili pak proizvodnoj normi. Jedna od njih je tzv. IIW metoda po kojoj se za nelegirane čelike ekvivalent ugljika izračunava prema izrazu:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}, \% \quad (1)$$

Na osnovu ekvivalenta ugljika, unosa topline, dodatnog materijala (određuje količinu vodika) i debljine materijala, iz dijagrama se određuje temperatura predgrijavanja, slika 24. [15]



Slika 24. Dijagram za određivanje temperature predgrijavanja prema HRN EN 1011-2

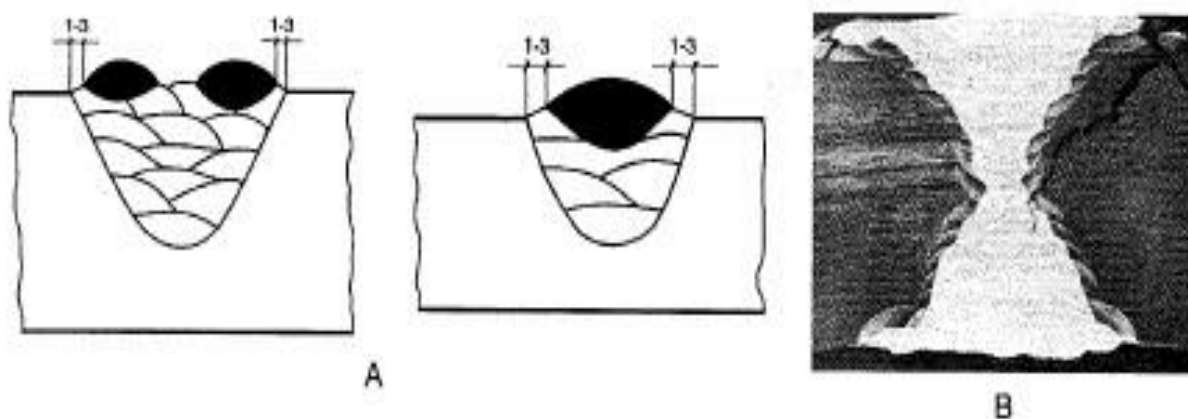
1-kombinirana debljina, mm; 2-unos topline, kJ/mm; 3-linija temperature predgrijavanja u °C;

4-klasifikacija količine vodika;5-iznos ekvivalenta ugljika CE [15]

Kod druge metode koja je preporučljiva za nelegirane, sitnozrnate i niskolegirane čelike za skupine 1 – 4 prema HRI CEN ISO/TR 15608, ekvivalent ugljika računa se prema izrazu:

$CET=C+(Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$ u postocima (%). [15]

U tehnici izvođenja zavarenog spoja važan je redoslijed polaganja završnih slojeva, naročito kod čelika povišene čvrstoće. Na slici A prikazano je izvođenje pokrovnih slojeva kojima se provodi toplinska obrada tj. odžarivanje prethodnih slojeva zavara. Pogrešno izvedeni završni slojevi u kritičnoj prijelaznoj zoni, kao što prikazuje slika 25., mjesta su inicijalnih pukotina koje se kasnije u eksploatacijskim uvjetima otvaraju i dovode do loma zavarenog spoja. [15]



Slika 25. Prikaz izvođenja završnih slojeva zavarenog spoja

A – „pokrovni slojevi za odžarivanje“;

B-mogućnost pojave pukotina zbog nepravilno izvedenih završnih slojeva na zavarenom spoju [15]

Pogotovo je to bitno kada nije moguća toplinska obrada nakon zavarivanja. Naprezanja u zavaru su čimbenik na kojeg možemo najmanje utjecati. Potrebno je obratiti pažnju na oblik zavarenog spoja i zavarivačku praksu koji umanjuju zaostala naprezanja, posebno kod zavarivanja debelih komada. Predgrijavanje i kontrola međuslojne temperature mogu pomoći pri smanjenju zaostalih naprezanja. Provođenje toplinske obrade žarenja za redukciju zaostalih naprezanja odmah nakon zavarivanja jest najučinkovitiji način za uklanjanje zaostalih naprezanja. Uz opća naprezanja koja prevladavaju u konstrukciji, bitna su i mjesta koncentracije naprezanja. Uklanjanjem mjesta koncentracije naprezanja pravilnim oblikom zavarenog spoja ili brušenjem odmah nakon zavarivanja može se smanjiti sklonost nastanku vodikovih pukotina.

Obično se smatra da je temperaturni raspon u kojem nastaju vodikove pukotine između -100 i 200 °C (-150 do 390 °F). Svaki zavar će se prirodno hladiti u tom rasponu temperatura. Jedino na što možemo ovdje utjecati jest kontroliranje brzine hlađenja zavara iznad tog raspona temperatura. Time omogućujemo dovoljno vremena da vodik difundira iz strukture metala. U nekim slučajevima moguće je zadržavati temperaturu zavarenog spoja iznad 200 °C kako bi vodik mogao difundirati iz strukture, a zatim ohladiti na sobnu temperaturu.

Tijekom godina razvijene su metode za izbjegavanje nastanka vodikom uzrokovanih pukotina. Metode se mogu podijeliti u dvije kategorije, (i) metode za izračun vremena hlađenja (ii) metode za izračun naprezanja. Metoda za izračun vremena hlađenja uključuje čimbenike za kemijski sastav, koncentraciju vodika, i naprezanja u zavarenom spoju. [11]

Jedna od metoda za izračun vremena hlađenja koju su razvili Ito i Bessyo određuje kritično vrijeme hlađenja od 300 do 100 °C (572-212 ° F), P_w , gdje P_{CM} je ekvivalent ugljika CE, H_{GL} je sadržaj vodika koji može difundirati, i R_F je faktor naprezanja zavarenog spoja.

$$t_{100} = 1,4 * 10^4 * (P_w - 0,28)^2 \quad (2)$$

$$P_w = P_{CM} + \frac{H_{GL}}{60} + \frac{R_F}{400,000}. \quad (3)$$

Stvarno vrijeme hlađenja zavara koje prelazi vrijednost t_{100} izbjeći će nastanak vodikom uzrokovanih pukotina. To je vjerojatno zbog toga što povećano vrijeme hlađenja smanjuje tvrdoću ZUT-a i/ili dopušta da više vodika difundira iz strukture metala.

Metode za izračun naprezanja predviđaju kritičnu razinu naprezanja koja dovodi do pojave vodikom uzrokovanih pukotina. Vlačna naprezanja u metalu su ključan element za nastanak vodikovih pukotina, međutim mnogo ih je teže kontrolirati i kvantificirati. Kao rezultat toga, koriste se metode koje predviđaju temperaturu predgrijavanja ili propisuju uvjete zavarivanja pomoću koje se kontrolira brzina hlađenja zavara. U normi ISO/TR 17844 navedene su četiri takve metode:

1. CE metoda
2. CET metoda
3. CE_N metoda
4. AWS metoda. [11]

4. SKLONOSTI ČELIKA API 5L X80 PREMA HLADNIM PUKOTINAMA

Kao što je već spomenuto, čelik API 5L X80, proizveden je termo-mehanički kontroliranim postupkom valjanja. Rezultat toga je sitnozrnata struktura visoke čvrstoće i dobre žilavosti. Međutim, zavarivanjem, naglim temperaturnim i mikrostrukturnim promjenama izvan kontroliranih uvjeta, stvara se diskontinuitet materijala u zoni zavarenog spoja kod kojeg je moguće očekivati pojavu hladnih pukotina. Takvi materijali, proizvedeni modernim tehnologijama, predstavljaju izazov proizvođačima dodatnih materijala koji moraju osigurati takav dodatni materijal za zavarivanje kojim će se moći ostvariti integritet konstrukcije izjednačavanjem svojstva osnovnog metala i zone zavara. Greške koje se javljaju u metalu zavara mogu biti posljedica neodgovarajućeg odabira dodatnog materijala.

Čelik API 5L X80 najčešće sadrži tri vrste uključaka koji su posljedica TMCP ciklusa proizvodnje: na bazi Mn, Al i Si. Dokazano je kako su uključci na bazi Mn i Al bili mjesta inicijacije pukotine, dok to nije bilo uočeno kod čelika s uključcima na bazi Si. Sumpor, kao nečistoća, je prisutan kod svih čelika. Skupina autora s Domizzijem pokazala je kako je osjetljivost prema hladnim pukotinama povezana empirijski s udjelom sumpora, prosječnom i ukupnom duljinom po jedinici površine sulfidnih uključaka. Iz tablice 3. možemo uočiti da je kemijski udio bakra u čeliku API 5L X80 prema standardu 0,250 %. Dokazano je kako bakar djeluje na unos vodika te više od 0,2% bakra smanjuje osjetljivost na pojavu hladnih pukotina. Legirni elementi utječu na čvrstoću, mikrostrukturu i ostale segregacije u čeliku, samim time imaju i utjecaj na nastanak hladnih pukotina. U tablici 7. prikazani su utjecaji legirnih elemenata na adsorpciju vodika i osjetljivost na hladne pukotine. [2]

Tablica 7. Utjecaj legirnih elemenata na adsorpciju vodika i osjetljivost na hladne pukotine čelika [2]

Legirni element	Utjecaj na adsorpciju vodika i osjetljivost na hladne pukotine
Bakar (Cu)	-Bakar utječe na adsorpciju vodika -Iznad 0,2% Cu osjetljivost je smanjena -Bakar smanjuje koncentraciju vodika na površini materijala, ali ne mijenja prag koncentracije vodika koji je dovoljan za nastanak pukotine
Mangan (Mn)	-Više od 1% Mn povećava osjetljivost prema hladnim pukotinama -Postupcima toplinske obrade može se smanjiti učinak Mn
Kobalt (Co)	-Kobalt smanjuje unos vodika čime se smanjuje opasnost
Ugljik, silicij, nikal, krom i vanadij (C, Si, Ni, Cr i V)	-Vrlo malo utječu na osjetljivost čelika prema hladnim pukotinama, iako literatura navodi kako Ni smanjuje adsorpciju vodika
Bakar (Cu)	-Literatura navodi kako više od 0,2% Cu smanjuje osjetljivost na pojavu hladnih pukotina
Bizmut, paladij i platina (B, Pa i Pt)	-Stvaranjem filmova na površini metala, ovi elementi djeluju kao vrsta „barijere“, ali zbog cijene ne bi predstavljali tržišno isplativo rješenje
Kalcij, lantan i cerij (Ca, La i Ce)	-Sferoidiziraju nemetalne uključke i povećavaju otpornost na nastanak hladnih pukotina
Titan (Ti)	-Dodatak Ti visokočvrstim čelicima djeluje na stvaranje uključaka na bazi Ti -Očvrsnuti titan karbonitridi djeluju kao ireverzibilne zamke

Dakle, za visokočvrste čelike, poput API 5L X80, opasnost od nastanka hladnih pukotina predstavljaju uključci na bazi Mn, Al, Si, Ca i Ti. Takvi materijali pokazuju veću osjetljivost prema pojavi hladnih pukotina u metalu zavara nego u zoni utjecaja topline.

Što je čelik više čvrstoće, veća mu je sklonost prema nastanku hladnih pukotina. Međutim, većina provedenih studija upućuje na to kako na pojavu hladnih pukotina više djeluje mikrostruktura nego čvrstoća čelika. [14]

Mikrostruktura čelika API 5L X80 sastoji se uglavnom od igličastog ferita zajedno s granularnim bainitom uz postojanje vrlo male količine austenitno/martenzitnog područja. [18] Dokazano je kako povećan udio igličastog ferita u mikrostrukturi povećava otpornost prema hladnim pukotinama, dok bainitni i martenzitno/austenitni konstituenti pogoršavaju radna svojstva zavarenih uzoraka u kiselom mediju. Iako se mnogo istraživanja baziralo na utvrđivanju utjecaja mikrostrukture na ponašanje modela difuzije vodika i nastanka hladnih pukotina uzrokovanih vodikom, mnogi istraživači nisu uspješno mogli povezati kombinirani utjecaj mikrostrukture i vodika na prirodu nastanka hladnih pukotina. Pojedini znanstvenici tvrde kako je igličasti ferit najpoželjnija mikrostruktura kod visokočvrstih čelika za cjevovode zbog osiguravanja dobre otpornosti prema vodikovim pukotinama, međutim difuzija vodika kroz takvu mikrostrukturu nije u potpunosti razjašnjena. Također, bainit može osigurati veću čvrstoću materijala od igličastog ferita ali i pokazati veću sklonost ka pojavi hladnih pukotina. Martenzitno/austenitna područja u mikrostrukturi mogu biti uzrok pojave hladnih pukotina jer mogu djelovati kao zamke za vodik.[14]

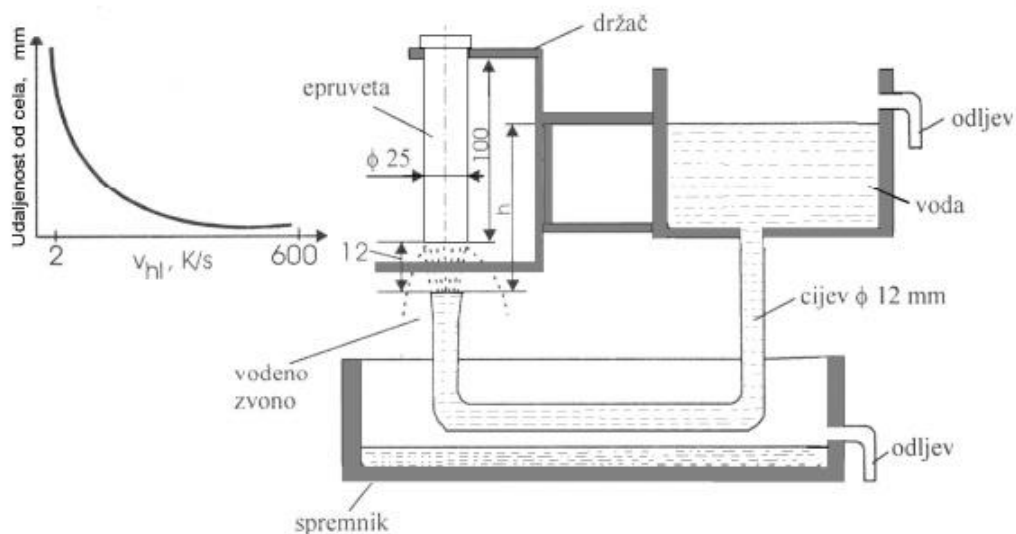
5. KVANTITATIVNE METODE ISPITIVANJA SKLONOSTI MATERIJALA PREMA NASTANKU HLADNIH PUKOTINA

Budući da ne postoji dovoljno podataka o izbjegavanju pojave hladnih pukotina u metalu zavara kod visokočvrstih čelika, primjenjuju se kvantitativne metode određivanja otpornosti materijala prema hladnim pukotinama. Kvantitativna ispitivanja sklonosti materijala prema hladnim pukotinama moraju obuhvatiti varijable poput mikrostrukture, vremenske inkubacije, naprezanja i mjesta koncentracije naprezanja. Jako je bitno osigurati realne radne uvjete i rubne uvjete koji će dati odgovarajuće rezultate. Većina metoda ispitivanja metala zavara na sklonost prema hladnim pukotinama uključuje vrijeme pojave loma ili pukotine kao indikator osjetljivosti. Neke od kvantitativnih metoda ispitivanja hladnih pukotina su: Jominy metoda, CTS Metoda, Tekken metoda, Implant metoda. [2]

5.1. Jominy metoda

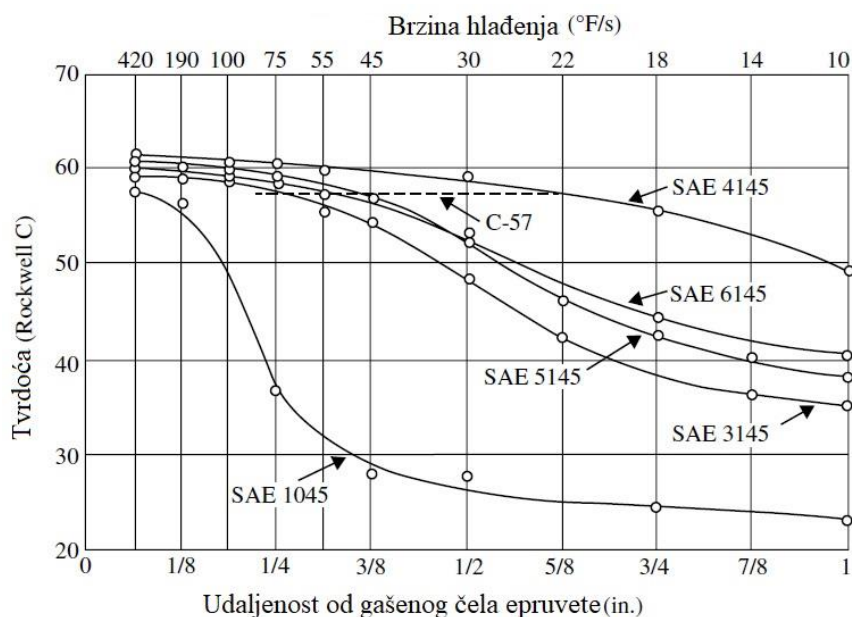
Jominy metoda je jedna od najpraktičnijih i najviše korištenih metoda za ispitivanje prokaljivosti. Prokaljivost je svojstvo čelika da gašenjem s temperature austenitizacije postigne što jednoličniju tvrdoću na poprečnom presjeku. Jominy metoda može koristiti kao i indirektna metoda za ispitivanje sklonosti materijala prema hladnim pukotinama. Metoda se bazira na pokusu s jednom cilindričnom epruvetom. Cilindrična se epruveta promjera 25 mm i dužine 100 mm nakon austenitizacije u zaštitnoj atmosferi gasi vodom s čela u posebnom uređaju. Pri tome se brzina ohlađivanja smanjuje od čela prema suprotnoj strani epruvete, čime se postiže cijeli raspon brzina ohlađivanja od najvećih do najmanjih (pa prema tome i nastalih mikrostruktura i tvrdoća). Nakon ohlađenja ispituje se tvrdoća metodom Rockwell C ili Vickers po brušenim izvodnicama epruvete na propisanim udaljenostima od gašenog čela. Iz dobivenih vrijednosti konstruira se tzv. "Jominy-krivulja" koja predstavlja tijek tvrdoća ovisno o udaljenostima od čela epruvete. [19]

Shematski prikaz ispitivanja prokaljivosti metodom Jominy prikazan je na slici 26.



Slika 26. Shematski prikaz ispitivanja prokaljivosti metodom Jominy [20]

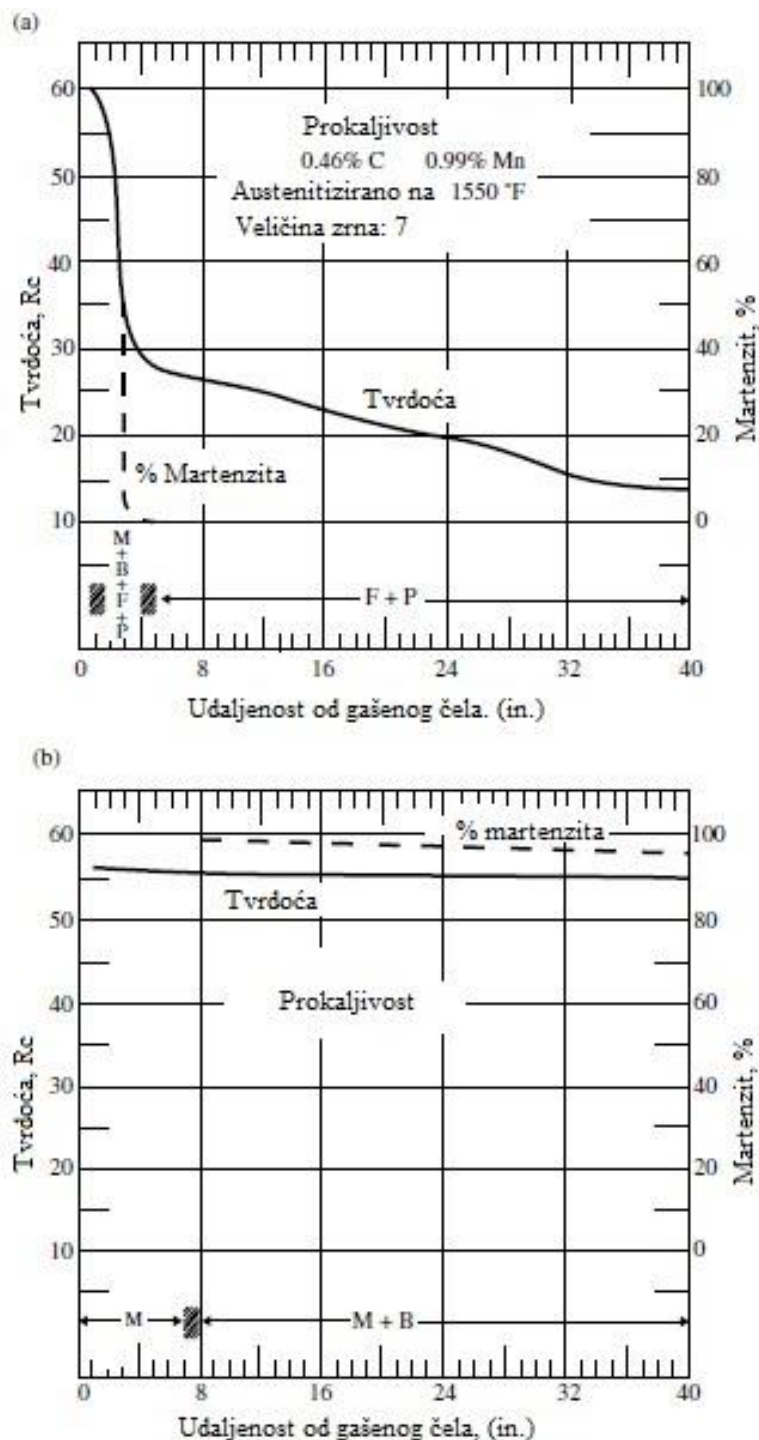
Tipične Jominy krivulje za čelike sličnog sadržaja ugljika (0,45 %) prikazane su na slici 27.



Slika 27. Jominy krivulje različitih čelika s 0,45 % C [11]

Može se uočiti da je tvrdoća svih čelika jednaka na gašenom čelu epruvete, što odražava učinak ugljika na tvrdoću čelika kada svi čelici imaju potpunu martenzitnu strukturu. Tvrdoća čelika 1045 opada brzo jer on tvori martenzit samo u uvjetima brzog hlađenja. Ostali čelici pokazuju bolju prokaljivost jer sadrže legirne elemente koji omogućuju stvaranje martenzita pri manjim brzinama hlađenja. Čelik AISI 4145 (oznake 42CrMo4 prema HRN EN 10083-3:2009) ima

najbolju prokaljivost jer ima mogućnost stvaranja martenzita čak i kod najsporijih brzina hlađenja. Također je potencijalno najskloniji čelik nastanku hladnih pukotina. Detaljniji prikaz usporedbe Jominy krivulje ugljičnog (1050) i nisko-legiranog (4340) čelika prikan je na slici 28. [11]

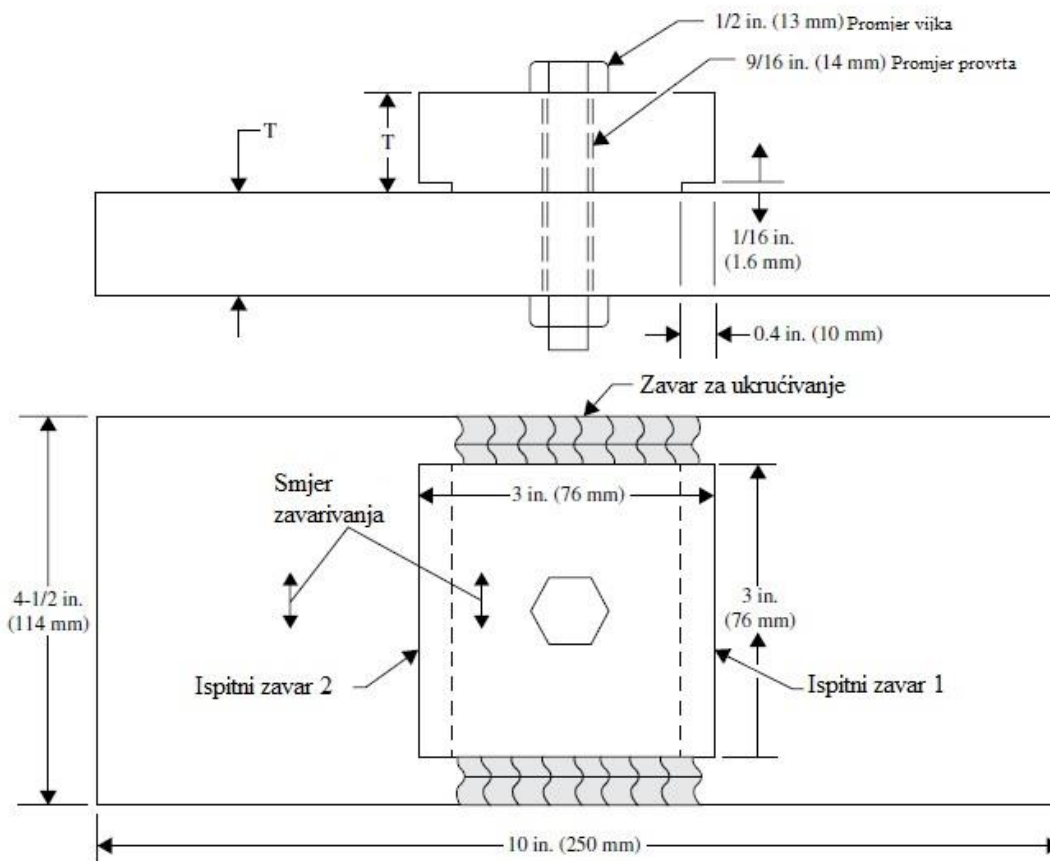


Slika 28. Jominy krivulje prokaljivosti za dva čelika. (a) AISI 1050 i (b) AISI 4340 [11]

Ugljični čelik (1050) može postići visoku tvrdoću pri velikim brzinama hlađenja, ali ima slabu prokaljivost budući da se njegova tvrdoća (i udio martenzita) brzo opadaju sa smanjenjem brzine hlađenja. Čelik 4340 ne pokazuje nikakve promjene tvrdoće sa smanjenjem brzine hlađenja i smatra se čelikom odlične prokaljivosti. Nije iznenađujuće da je potrebno poduzeti posebne mjere opreza prilikom zavarivanja čelika 4340 (i ostalih čelika dobre prokaljivosti) da bi izbjegli nastanak hladnih pukotina. [11]

5.2. CTS metoda

TWI („The Welding Institute“) je razvio CTS metodu. CTS („Control Thermal Severity“) je metoda praktična za pogonska ispitivanja sklonosti kutnih zavarenih spojeva prema hladnim pukotinama. Ova metoda simulira različite modele vođenja topline (zavar uz rub ploče se brže hladi od onog koji je više udaljen od ruba ploče). Raspored uzoraka u ovoj metodi ispitivanja sastoji se od jedne donje ploče i jedne gornje ploče (čelik koji se treba ispitati). Gornja ploča je pričvršćena vijkom na donju ploču, i napravljena su dva kutna zavara za ukrućivanje. Moguće je između ploča postaviti npr. podložnu pločicu, pa se osjetljivost metode na hladne pukotine značajno povećava. Na suprotnim stranama gornje ploče se izvode dva ispitna zavara pod kontroliranim uvjetima. Shematski prikaz CTS metode dan je na slici 29. [11, 21]



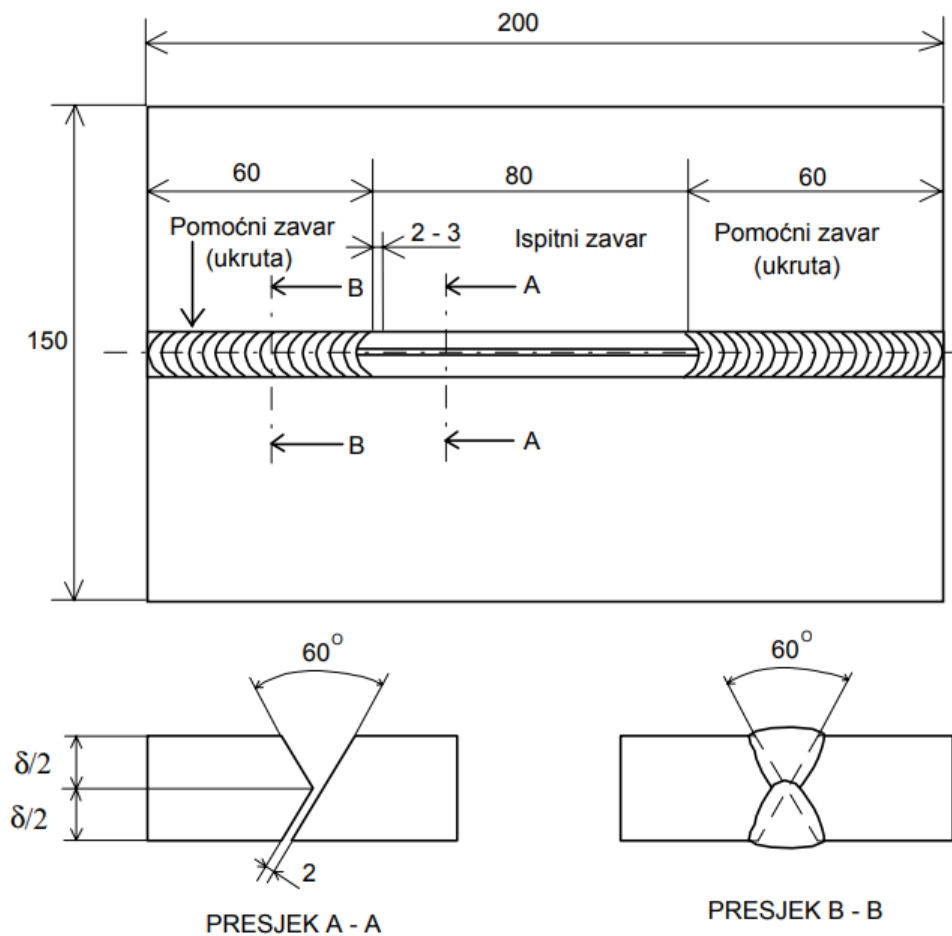
Slika 29. Shematski prikaz CTS metode [11]

Na gornjoj ploči urezan je mali zarez (10 mm u dubinu) kako bi osigurao mjesto koncentracije naprezanja u području metala zavara/zone utjecaja topline i time inicirao stvaranje pukotine na tom mjestu. Nakon zavarivanja i hlađenja (uvažavajući inkubacijski period od 48 sati nakon zavarivanja), vrši se odgovarajuće isjecanje uzoraka i mikroskopska analiza zavarenih spojeva. Iako je izvorno namijenjena za ispitivanje sklonosti prema hladnim pukotinama u zoni utjecaja topline, moguće je da CTS metoda ispita sklonost nastanku pukotina u metalu zavara. Međutim, kasnije je ustanovljeno da je vrijednost vlastitih zaostalih naprezanja uslijed ukrućivanja tijekom CTS metode manje u usporedbi s prisutnim zaostalim napreznjima stvarnih zavarenih konstrukcija. Kao rezultat toga, parametri za sprječavanje nastanka hladnih pukotina, poput temperature predgrijavanja, mogu se pogrešno odrediti ako se određuju na temelju rezultata CTS metode. Na primjer, potrebna temperatura predgrijavanja potrebna za sprječavanje nastanka hladnih pukotina može biti veća od predviđene na temelju CTS metode. [11]

5.3. Tekken metoda

Kihara i suradnici su razvili Tekken metodu za ispitivanje sklonosti prema hladnim pukotinama. Tekken metoda (daje kvalitativne pokazatelje, tj. ima ili nema pukotina uz određenu tehnologiju

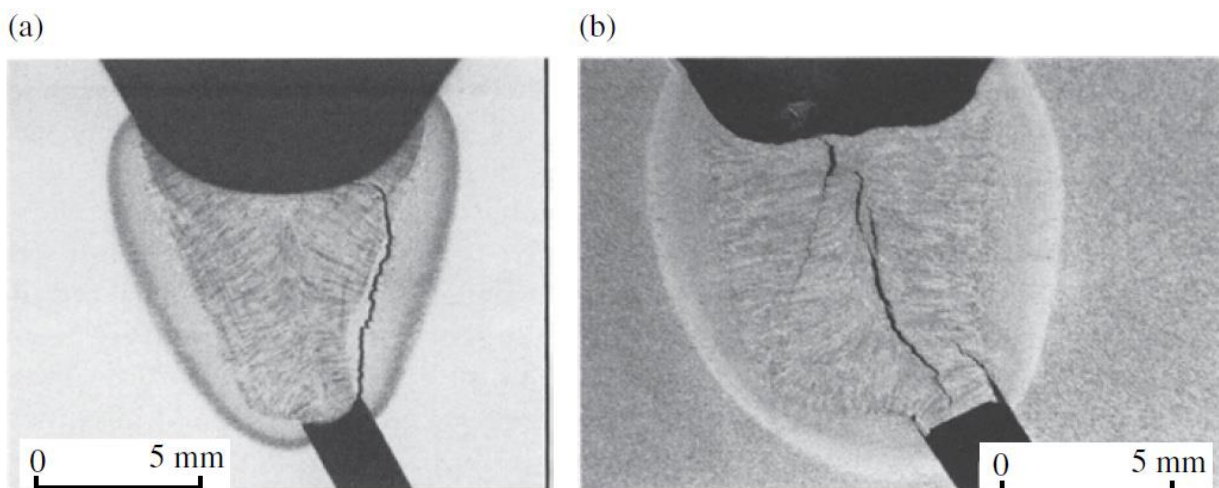
i uvjete zavarivanja). U izvornom obliku metode, prvo se zavare dva pomoćna zavora s dodatnim materijalima niskog sadržaja vodika na svakom kraju pripremljenog spoja od čelika koji se želi ispitati. Pomoćnim zavarima ploča je ukrućena (nema stezanja i rastezanja). Zatim se izvodi ispitni zavar s dodatnim materijalima koji se žele ispitati. Oblik, priprema i dimenzije uzorka za ispitivanje po Tekken metodi, prikazani su na slici 30. [11, 21]



Slika 30. Shematski prikaz Tekken metode [21]

Oblik zavarenog spoja rezultirat će stvaranjem zareza u korijenu zavora. Zbog takvog kuta zareza, vodikova pukotina može se širiti u smjeru metala zavora ili u smjeru zone utjecaja topline. Nakon zavarivanja ispitnog zavora, zavar se ispituje nakon najmanje 72 sata kako bi se u obzir uzele moguće zakašnjele pukotine. Metalografskim ispitivanjima na nekoliko mjesta uzorka odredit će se da li je došlo do pojave pukotine. Zbog oblika spoja, Tekken metoda daje veću koncentraciju naprezanja od CTS metode i omogućuje pukotini da propagira ili u metal zavora ili u zonu utjecaja topline. Tekken metoda može se koristiti za izbor parametara zavarivanja korijenskog dijela sučeljenih spojeva ili za ispitivanje sklonosti različitog

kemijskog sastava dodatnog materijala prema nastanku hladnih pukotina. Međutim, zahtjevi za pripremu uzorka za Tekken test su poprilično strogi, a tolerancije obrade i hrapavost površine moraju biti pažljivo kontrolirani. Postavljanje pomoćnih zavara (ukrute) na svakom kraju uzorka može dovesti do izobličenja geometrije pripreme zavarenog spoja uzorka. Jedan od načina da se to izbjegne jest priprema zavarenog spoja rezanjem vodenim mlazom. Time se eliminira potreba za pomoćnim zavarima i smanjuje ukupni trošak pripreme uzorka. Presjeci ispitnih uzorka Tekken testa prikazani su na slici 31. [11]



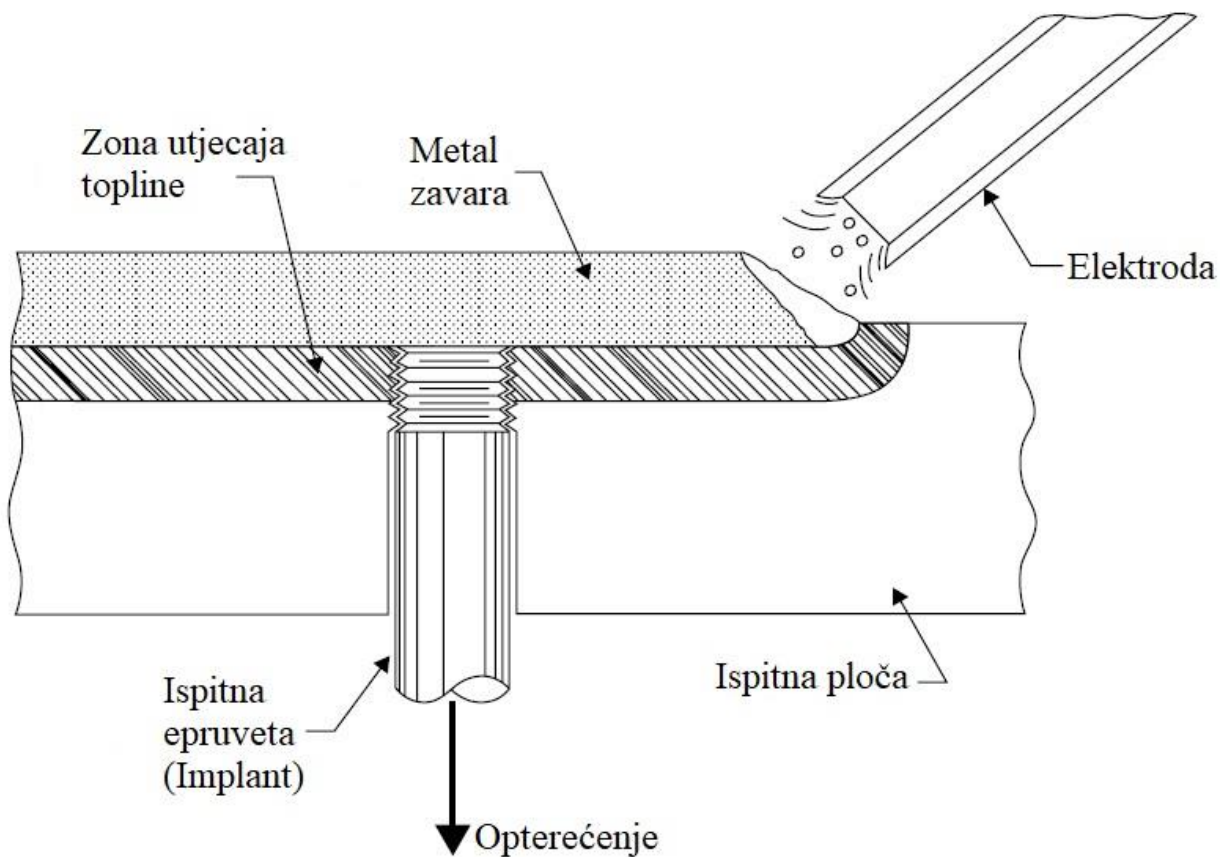
Slika 31. Presjeci ispitnih uzorka Tekken testa. (a) Metal zavara veće čvrstoće od osnovnog metala (b) Metal zavara manje čvrstoće od osnovnog metala [11]

U jednom slučaju, čvrstoća metala zavara premašuje (engl. „*overmatched*“) čvrstoću osnovnog metala, i pukotina se stvorila u području grubozrnatog ZUT-a na korijenu zavara. U slučaju da je čvrstoća metala zavara manja od čvrstoće osnovnog metala (engl. „*undermatched*“), pukotina nastaje u metalu zavara. Ovo pokazuje svestranost Tekken metode jer se može koristiti za ispitivanje sklonosti hladnih pukotina u metalu zavara i zoni utjecaja topline. [11]

5.4. Implant metoda

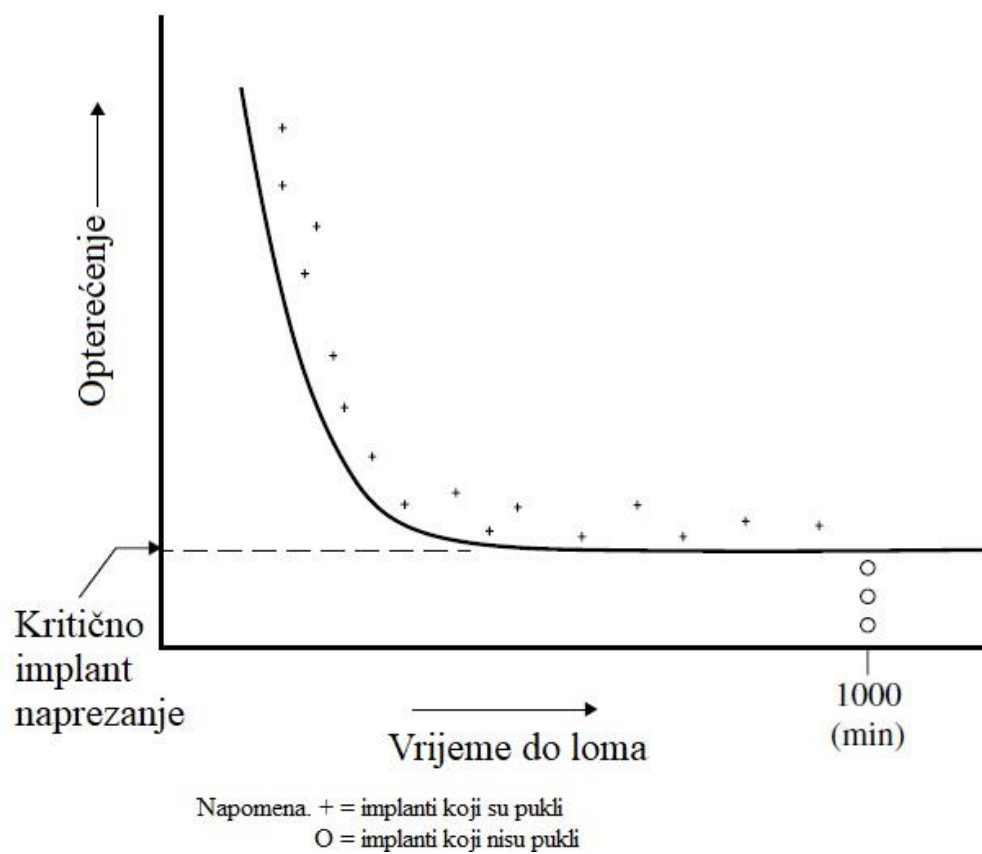
Implant metodu razvio je Henri Granjon 1960-ih godina. „Implant“ je u suštini cilindrični ispitni uzorak (epruveta) koji ima narezan navoj s obje strane, te se kao takav polaže u provrt na sredinu ispitne ploče pri čemu je gornja površina ispitne epruvete u istoj razini s ispitnom pločom. Urezani navoj na ispitnoj epruveti ima funkciju mnogostrukih zarez koji djeluju kao koncentratori naprezanja. Navoj na drugom kraju ispitne epruvete koristi se za pričvršćivanje u implant uređaj za ispitivanje. Zatim se polaže zavar na vrhu ispitne ploče neposredno iznad

ispitne epruvete i provrta. Time se spaja ispitna epruveta na ispitnu ploču i područje gornjeg navoja ispitne epruvete postaje zona utjecaja topline, kao što je prikazano na slici 32. [11]



Slika 32. Shematski prikaz Implant metode [11]

Implant uzorak se nakon zavarivanja opterećuje narinutim vanjskim opterećenjem. Ako uzorak izdrži narinuto statično opterećenje u trajanju od 24 sata u uvjetima sobne temperature, tada se to isto naprezanje označava kao kritično implant naprezanje i smatra se da u tim uvjetima neće doći do pojave hladnih pukotina, slika 33. Zatim se na istom uzorku mogu provesti daljnja ispitivanja koja uključuju karakterizaciju materijala i mikrostrukturne analize s ciljem utvrđivanja mikropukotina u zoni utjecaja topline i metalu zavara. [14]



Slika 33. Rezultati Implant metode [11]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio završnog rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju za Implant test. Predmet istraživanja eksperimentalnog dijela rada je sklonost visokočvrstog čelika prema nastanku hladnih pukotina. Cilj je utvrditi kritično Implant naprezanje čelika API 5L X80. Kritično Implant naprezanje je najveće naprezanje kod kojeg neće doći do loma materijala. Poželjno je da je ono što više jer je onda sklonosti materijala prema hladnim pukotinama manja. Odabrani postupak zavarivanja je ručno elektrolučno zavarivanje, REL (111 prema normi HRN EN ISO 4063:2012). Za dodatni materijal odabrana je bazična elektroda EZ-50 B. Odabrani dodatni materijal u svojoj specifikaciji, od strane proizvođača, sadrži područje primjene i parametre za zavarivanje visokočvrstih čelika.

Glavni parametri koji će se mijenjati tijekom eksperimenta su sila ispitivanja, odnosno Implant naprezanje i unos topline.

Unos topline prilikom zavarivanja određen je na temelju prijašnjih pokusa i u skladu s područjima primjene ispitivanog materijala. Parametri zavarivanja moraju osigurati kvalitetan zavar i dovoljnu količinu depozita potrebnog za provedbu ispitivanja. Tako je odabran teorijski unos topline od 12 kJ/cm. Međutim, REL postupak spada pod ručne postupke zavarivanja i nije moguća potpuna preciznosti i ponovljivost kod izvođenja svih stanja pokusa. Utjecajni čimbenici poput ljudskog faktora, udaljenosti elektrode od radnog komada, nagiba elektrode, brzine zavarivanja utjecat će na iznos unosa topline, koji stoga neće biti u potpunosti ponovljiv. Postojat će manje varijacije u iznosu unosa topline u metal zavara koje će biti izračunate za svako stanje pokusa. Zavarivanje će se izvršiti pri sobnoj temperaturi na 20 °C, dakle bez predgrijavanja.

Uzorci za određivanje Implant naprezanja izrađeni su tokarenjem od visokočvrstog čelika, API 5L X80. Strojnom zareznicom je narezan navoj M8 koji služi kao koncentrator naprezanja.

6.2. Oprema za zavarivanje

Korišteni uređaj za zavarivanje jest PICO 140 od proizvođača Messer EWM, prikazan u tablici 8. Uređaj se može koristiti za REL i TIG postupak zavarivanja. Na komandnoj ploči uređaja prvo se odabire postupak zavarivanja pomoću prekidača (REL ili TIG), zatim se namješta struja u rasponu 5-140 A.

Tablica 8. Oprema za zavarivanje

a) – držač elektrode za zavarivanje; b) - komandna ploča uređaja marke Messer EWM; c) uređaj za zavarivanje marke Messer EWM



a)



b)



c)

6.3. Dodatni materijal za zavarivanje

Za REL postupak zavarivanja korišten je dodatni materijal EZ-50 B od proizvođača Elektroda Zagreb (oznaka E 42 4 B 32 H5 prema normi HRN EN ISO 2560). Radi se o bazičnoj elektrodi promjera 3,2 mm koja se koristi za zavarivanje konstrukcijskih, kotlovskih i brodskih čelika čvrstoće do 590 MPa. Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su u tablici 9. Orijehtacijski kemijski sastav dodatnog materijala dan je u tablici 10. [22]

Tablica 9. Mehanička svojstva dodatnog materijala EZ-50 B [22]

EZ-50 B	Mehanička svojstva				
	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Istezljivost, %	Udarni rad loma, J	
				-20 °C	-40 °C
	> 440	510-610	>26	≥120	≥47

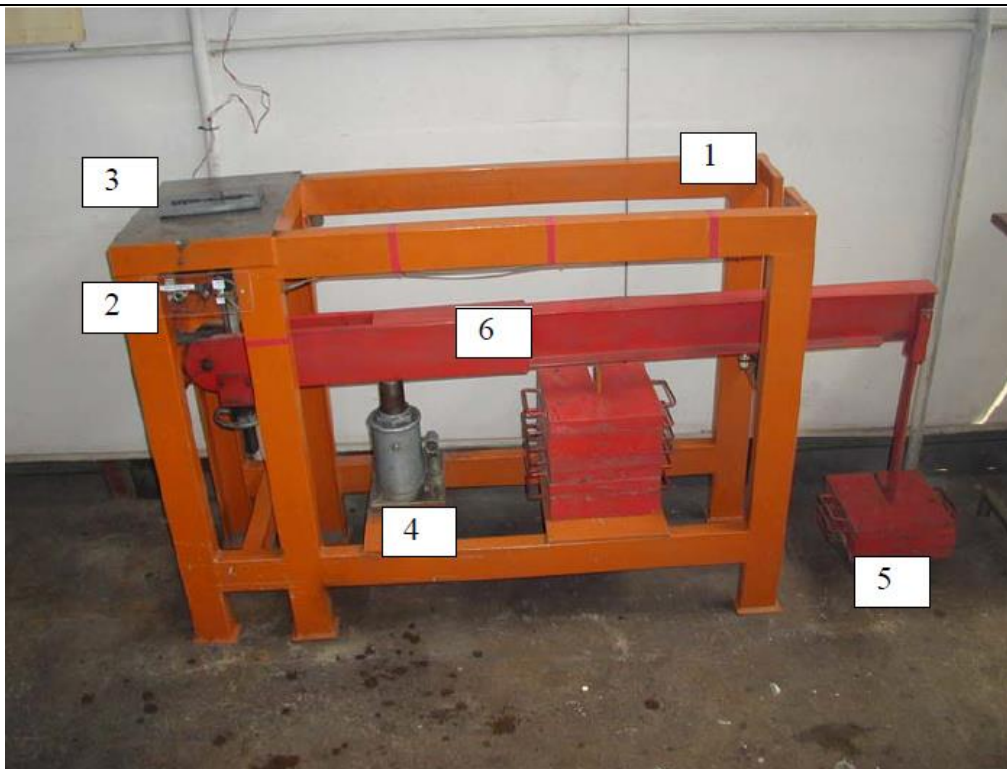
Tablica 10. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – 50 B [22]

EZ-50 B	Kemijski sastav, %		
	C	Mn	Si
	0,08	1	0,5

S obzirom na to da elektroda EZ-50 B ima oznaku H5, proizvođač garantira sadržaj vodika u zavaru manji od 5 ml/100 g zavara.

6.4. Ispitivanje sklonosti prema hladnim pukotinama Implant testom

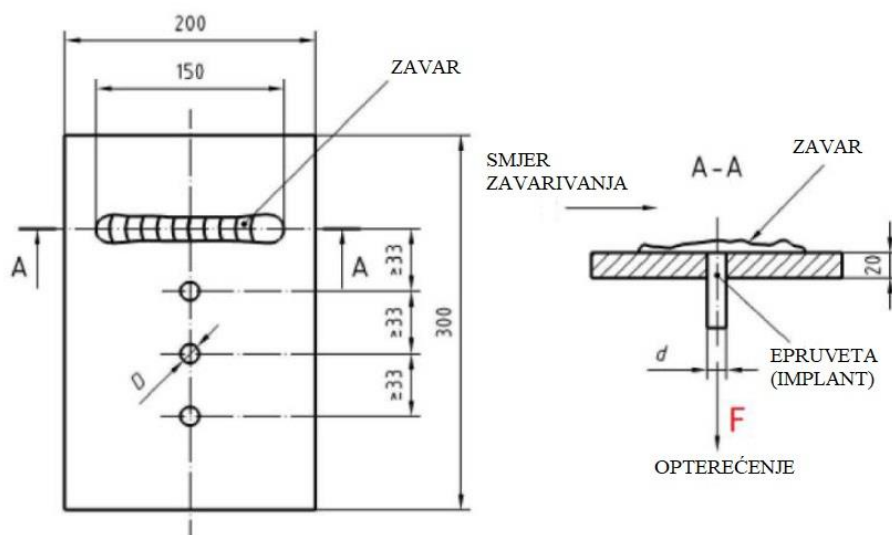
Ispitivanje sklonosti prema hladnim pukotinama Implant testom provedeno je na pet ispitnih epruveta koje su bile izrađene od materijala gradacije API 5L X80. Ispitivanje se provodi s ciljem utvrđivanja najvećeg vlačnog naprežanja koje epruveta (ispitni uzorak, Implant) može podnijeti u ispitanim radnim uvjetima. Implant test daje kvantitativne rezultate (da li je nastala pukotina na epruveti ili nije). Za provođenje Implant testa, osim Implant uređaja koji je prikazan na slici 34., potrebna je osnovna ploča s provrtima u koju se polaže ispitna epruveta.



Slika 34. Uređaj za Implant test

1-okvir uređaja, 2-upravljačka konzola, 3-ispitni uzorak, 4-hidraulička dizalica, 5-utezi za opterećenje, 6-radna poluga [5]

Shematski prikaz pripreme osnovne ploče s provrtima, te način pozicioniranja ispitne epruvete u osnovnu ploču za Implant test, prikazan je na slici 35.



Slika 35. Shematski prikaz osnovne ploče za Implant test [14]

Pozicioniranjem se mora ostvariti fiksni okomiti položaj epruvete u odnosu na osnovnu ploču. To je jako bitno jer će epruveta nakon zavarivanja biti opterećena s narinutom vanjskom silom

i poželjno je da to opterećenje bude isključivo vlačno, bez savojnog naprezanja. Korištena pripremljena osnovna ploča s pozicioniranom epruvetom i još četiri slobodna provrta prije početka ispitivanja prikazana je na slici 36.



Slika 36. Pripremljena osnovna ploča s pozicioniranom epruvetom

Implant ispitni uzorak s obostranim navojem, prikazan na slici 37. izrađen je tokarenjem i mora imati točno definirani promjer (oznake metričkog normalnog navoja M8).



Slika 37. Implant uzorak s obostranim navojem

Implant uzorak ima narezan navoj s obje strane, te se kao takav postavlja u provrt na osnovnoj ploči. Navoj na jednom kraju epruvete ima funkciju mnogostrukih zarezata koji djeluju kao koncentratori naprezanja i za očekivati je pojavu pukotine u tome dijelu. Navoj na drugom kraju Implant uzorka koristi se za pričvršćivanje u Implant uređaj za ispitivanje. Nakon postavljanja

osnovne ploče i epruvete započinje se s navarivanjem i polaže se jedan zavar. Gornja površina epruvete i osnovne ploče moraju biti u istoj ravnini. Zavar se polaže na gornjoj površini osnovne ploče direktno iznad epruvete pri čemu dolazi do spajanja Implant epruvete za osnovnu ploču. Zavar treba prolaziti po simetrali gornje površine epruvete u smjeru uzdužne osi osnovne ploče. Duljina zavara treba iznositi oko 150 mm.

Prilikom završetka zavarivanja i čišćenja troske, potrebno je opteretiti epruvetu s određenom silom. Otpuštanjem hidrauličke dizalice, koja je sprječavala opterećenje epruvete tijekom zavarivanja, Implant se polako vlačno opterećuje određenom masom utega preko poluge. Vlačno naprezanje u epruveti (Implant naprezanje) izračunava se preko podataka o promjeru epruvete, dubini zarez na epruveti, i sili ispitivanja koja se dobije pomoću određene kombinacije utega. Implant naprezanje može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$R = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot (d - 2 \cdot z)^2}, \text{MPa} \quad (4)$$

Gdje je:

R – Implant naprezanje, MPa

F – Sila ispitivanja, N

d – promjer epruvete, mm

z – dubina zarez na uzorku, mm

Opterećeni Implant uzorak bio je pod nadzorom sljedeća 24 sata zbog eventualne pojave pukotina. Praćenje eksperimenta odvija se uz pomoć satnog mehanizma (štoperice) koji počinje s mjerenjem vremena prilikom početka naprezanja. Ako dođe do pojave puknuća, satni mehanizam se zaustavlja i prikazuje vrijeme do nastanka loma. Implant test nakon zavarivanja za vrijeme opterećenja epruvete prikazan je na slici 38.



Slika 38. Prikaz Implant testa tijekom opterećenja epruvete

Ako epruveta pri određenoj sili ispitivanja ne pukne unutar 24 sata, onda se to naprezanje smatra Kritičnim Implant naprežanjem (R_{IK}), i epruveta se ručno uklanja iz uređaja.

6.5. Parametri zavarivanja

U tablici 11. prikazani su parametri zavarivanja korišteni u eksperimentalnom radu. Za svaki ispitni uzorak izračunat je unos topline. Unos topline računa se prema izrazu [15]:

$$Q = k * \frac{U * I}{v} * \frac{60}{1000}, kJ/cm \quad (5)$$

gdje su:

Q – unesena toplina, kJ/cm

k – koeficijent iskoristivosti topline električnog luka postupka zavarivanja, za REL postupak 0,8

U – napon zavarivanja, V

v – brzina zavarivanja, cm/min.

Zavarivanje svih pet uzorka izvodilo se bez predgrijavanja.

Tablica 11. Parametri zavarivanja [14]

Ispitni uzorak	Vrsta struje i polaritet	Jakost struje I_z [A]	Brzina zavarivanja v [cm/min]	Napon, U_z [V]	Promjer elektrode [mm]	Nagib elektrode [°]	Unos topline Q [kJ/cm]
BAZIČNA ELEKTRODA EZ-50 B							
1	DC, +	140	14,01	25,6	3,2	80-90	12,288
2		130	12,38	25,2	3,2	80-90	12,702
3		130	12,09	25,2	3,2	80-90	13,006
4		130	11,67	25,2	3,2	80-90	13,478
5		130	12,38	25,2	3,2	80-90	12,707

6.6. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentalnom dijelu rada je visokočvrsti čelik API 5L X80 (oznake L555MB prema normi HRN EN 10208-2:2009). Od tog materijala su izrađene epruvete za provođenje Implant testa kojim se ispituje sklonost prema nastanku hladnih pukotina. Mehanička svojstva čelika API 5L X80 prikazana su u tablici 12. Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu i ispitivanjima prikazan je u tablici 13.

Tablica 12. Mehanička svojstva čelika API 5L X80 [9]

Mehaničko svojstvo	Vlačna čvrstoća, MPa		Granica razvlačenja, MPa	
	Min	Max	Min	Max
X80	621	827	552	690
X80 (prema atestu)	650		557	

Tablica 13. Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu i ispitivanjima [14]

API 5L X80	Kemijski sastav, %										P _{cm} , %
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	
Ispitivanje	0,07	0,35	1,94	0,015	0,00	0,15	0,01	0,001	0,01	0,027	0,1869
Atest	0,065	0,330	1,97	0,015	0,0004	0,170	0,018	0,002	0,009	-	0,19
API 5L	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	<0,25

P_{cm} predstavlja ekvivalentni sadržaj ugljika u čeliku. S obzirom na to da je udio ugljika manji od 0,12% ekvivalent ugljika računa se prema Itto-Bessyo formuli, prema normi API 5L [14]:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (6)$$

pri čemu P_{cm} ne smije biti veći od 0,25 %. Prema proračunu ekvivalenta ugljika po Itto-Bessyo formuli za ispitivani čelik API 5L X80 P_{cm} iznosi 0,19 %. Budući da je ta vrijednost manja od granične (0,25 %), navedeni čelik može se smatrati dobro zavarljivim.

6.7. Određivanje kritičnog Implant napreznja R_{IK}

Implant uređaj za ispitivanje u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje može istovremeno ispitivati samo jedan uzorak. Svaki ispitni uzorak opterećen je s različitom silom ispitivanja kako bi se utvrdila vrijednosti kritičnog Implant napreznja. Ispitni uzorak broj 1 opterećen je s najvećom silom ispitivanja iznosa 22 200 N i do loma je došlo odmah. Zavar ispitnog uzorka 1 i ispitne ploče prikazan je na slici 39.



Slika 39. Zavar ispitnog uzorka 1 i ispitne ploče

Na slici 40. prikazan je ispitni uzorak 1 nakon loma.



Slika 40. Ispitni uzorak 1 nakon loma

Budući da je odmah došlo do loma, sljedeći ispitni uzorak broj 2 opterećen je s manjom silom ispitivanja iznosa 20 400 N. Međutim, i taj iznos opterećenja je veći od kritičnog Implant napreznja i lom je ponovno nastupio odmah. Na slici 41. prikazan je zavar ispitnog uzorka 2 i ispitne ploče.



Slika 41. Zavar ispitnog uzorka 2 i ispitne ploče

Na slici 42. prikazan je ispitni uzorak broj 2 nakon loma.



Slika 42. Ispitni uzorak broj 2 nakon loma

Budući da je sila ispitivanja od 20 400 N kojom je bio opterećen ispitni uzorak broj 2 uzrokovala lom odmah, ispitni uzorak broj 3 opterećen je s manjom silom ispitivanja iznosa 18 700 N. Nakon opterećenja, ispitni uzorak broj 3 izdržao je 24 sata bez pojave loma i time je određeno početno kritično Implant naprezanje. Nakon izdržanog opterećenja u trajanju od 24 sata, ispitni uzorak broj 3 nasilno je prelomljen i ručno izvađen iz stroja. Na slici 43. prikazan je zavar ispitnog uzorka broj 3 i ispitne ploče, a na slici 44. prikazan je ispitni uzorak broj 3 nakon Implant testa.



Slika 43. Zavar ispitnog uzorka 3 i ispitne ploče



Slika 44. Ispitni uzorak broj 3 nakon loma

Da bi se odredila vrijednost kritičnog Implant naprezanja, povećana je sila ispitivanja uzorka broj 4 u odnosu na uzorak broj 3 i ona iznosi 19 440 N. Nakon opterećenja ispitnog uzorka broj 4 sa zadanom silom ispitivanja, lom je odmah nastupio i može se zaključiti da se kritično Implant naprezanje nalazi između sila ispitivanja 18 700 N i 19 440 N. Zavar ispitnog uzorka broj 4 i ispitne ploče prikazan je na slici 45., a na slici 46. prikazan je ispitni uzorak broj 4 nakon loma.



Slika 45. Zavar ispitnog uzorka broj 4 i ispitne ploče



Slika 46. Ispitni uzorak broj 4 nakon loma

Zadnji ispitni uzorak broj 5 opterećen je sa silom ispitivanja iznosa 19 070 N što je malo iznad početne vrijednosti kritičnog Implant naprezanja. Ispitni uzorak broj 5 izdržao je 24 sata bez pojave loma i time je određeno kritično Implant naprezanje. Na slici 47. prikazan je zavar ispitnog uzorka broj 5 i ispitne ploče, a na slici 48. prikazan je ispitni uzorak broj 5 nakon ručnog vađenja iz stroja.



Slika 47. Zavar ispitnog uzorka 5 i ispitne ploče



Slika 48. Ispitni uzorak broj 5 nakon loma

Najveća sila ispitivanja koju je uzorak izdržao bez pojave loma jest 19 070 N, što odgovara iznosu naprezanja od 549,88 MPa. Dakle, iznos kritičnog Implant naprezanja iznosi 549,88 MPa pri unosu topline od 12,707 kJ/cm.

Tijekom provođenja ovog ispitivanja na uzorcima od visokočvrstog čelika API 5L X80, može se uočiti da je na svim uzorcima lom nastupio odmah ili je materijal izdržao opterećenje u trajanju od 24 sata. Tablica 14. prikazuje rezultate Implant testa za provedeni eksperiment.

Tablica 14. Prikaz rezultata Implant testa

Ispitni uzorak	Redoslijed ispitivanja	Sila ispitivanja, N	Implant naprezanje, MPa	Vrijeme do loma, min	Lom, DA/NE
1	1.	22200	640,14	1	DA
2	2.	20400	588,24	1	DA
3	3.	18700	539,22	1440	NE
4	4.	19440	560,55	1	DA
5	5.	19070	549,88	1440	NE

Prema tablici 12., vrijednost granice razvlačenja čelika API 5L X80 iznosi 557 N/mm^2 , a vlačne čvrstoće 650 N/mm^2 . Implant testom utvrđeno je kritično Implant naprezanje u iznosu od 550 N/mm^2 što je manje, ali vrlo blizu iznosa granice razvlačenja za ispitivani čelik.

Literatura navodi kako je materijal skloniji nastanku hladnih pukotina ako vrijedi da je $R_{IK} < R_e$. [14]

7. Zaključak

Cilj ovog rada bio je ispitati sklonost visokočvrstog čelika API 5L X80 prema hladnim pukotinama. Čelik API 5L X80 zbog svoje visoke čvrstoće i mogućih uključaka koji nastaju kao posljedica TMCP postupka proizvodnje je sklon nastanku hladnih pukotina uzrokovanih vodikom. Na temelju proučene literature može se zaključiti da:

- TMCP način proizvodnje daje pretežito feritno/bainitnu mikrostrukturu visoke čvrstoće i dobre žilavosti.
- Prema Ito-Bessyo formuli, koja se koristi za visokočvrste čelike, ekvivalentni udio ugljika u čeliku ne prelazi vrijednost od 0,25 % što ukazuje na dobru zavarljivost čelika.
- Glavni problem čelika visoke čvrstoće predstavlja vodik, koji ulaskom u materijal tijekom zavarivanja može uzrokovati pojavu pukotina. Hladne pukotine uzrokovane vodikom mogu se pojaviti u metalu zavara ili u zoni utjecaja topline. Čelik API 5L X80 pokazuje veću sklonost prema pojavi hladnih pukotina u metalu zavara.
- Vodik u metalu zavara može potjecati iz nekoliko različitih izvora, ovisno o postupku zavarivanja. Najčešći izvor vodika jest vlaga iz atmosfere, dodatnog materijala ili zaštitnog plina. Kod visokočvrstih čelika i količine manje od 1 ppm vodika mogu uzrokovati pojavu pukotina.
- Za visokočvrste čelike opasnost od nastanka pukotina predstavljaju uključci na bazi Mn, Si i Ti.
- Budući da ne postoji dovoljno podataka o izbjegavanju hladnih pukotina, primjenjuju se kvantitativne metode ispitivanja sklonosti prema nastanku vodikovih pukotina. Najpoznatije su: Implant metoda, Tekken metoda i CTS metoda.
- S obzirom na opseg primjene čelika API 5L X80 pri izgradnji cjevovoda, problemi zavarljivosti su zadovoljavajuće riješeni.

Na temelju provedenog ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada moguće je zaključiti sljedeće:

- Implant metodom ispitivanja sklonosti prema nastanku hladnih pukotina moguće je odrediti iznos kritičnog Implant naprezanja, odnosno najveću vrijednost vlačnog naprezanja koje materijal može podnijeti 24 sata bez puknuća. Iznos kritičnog Implant naprezanja može se povezati s nastankom hladnih pukotina. Što je to naprezanje veće, to je materijal otporniji prema nastanku hladnih pukotina.

-
- Prilikom zavarivanja čelika API 5L X80 s bazičnom elektrodom, koja općenito osigurava dobra mehanička svojstva, i relativno visokim unosom topline od 12,707 kJ/cm, iznos kritičnog Implant napreznja iznosi 550 N/mm², što je vrlo blizu iznosa granice razvlačenja (557 N/mm²). U navedenim uvjetima zavarivanja neće doći do nastanka pukotina.

Na kraju se može donijeti zaključak da je Implant test prikladna metoda za ispitivanje sklonosti prema hladnim pukotinama. To je metoda kojom se iteracijski može odrediti kritično Implant napreznje promjenom unosa topline ili opterećenja.

LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.; Svojstva i primjena materijala; FSB, Zagreb, 2002.
- [2] Časopis Zavarivanje, 55. pp. 5-13, 2012.
- [3] O'Brien, Annette (ur.); Welding Handbook, Volume 4 Materials and Applications, 9. izdanje, American Welding Society, 2011.
- [4] API 5L, Specification for pipelines, 42nd edition, 2000.
- [5] Garašić Ivica: "Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju", doktorski rad, Zagreb 2008.
- [6] Kovačević, T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [7] Felber, S.: Pipeline Engineering, ISBN 978-3-9501528-2-1, Austrija, 2009.
- [8] <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=EN&site=kts&NM=376>, pristupljeno 05.01.2018.
- [9] Jurica, M.: Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [10] H.B. Xue, Y.F. Cheng: „Characterization of inclusions of X80 pipeline steel and its correlation with hydrogen-induced cracking“, 2011.
- [11] John C. Lippold, Welding Metallurgy and Weldability, Wiley, 2015.
- [12] Cwiek, J.:“The effect of welding parameters on levels of diffusible hydrogen in weld metal deposited using gas shielded rutile flux cored wires“, PhD Thessis, University of Wollongong, 2004.
- [13] Kou S. *Welding Metallurgy*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience; 2003. p 411.
- [14] Tomić T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [15] Juraga Ivan, Ljubić Kruno, Živčić Milan, Garašić Ivica: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [16] Threadgill PL. : Avoiding HAZ defects in welded structures. *Metals Mater* 1985; July: 422 - 429.
- [17] ASM Handbook Volume 6 – Welding, Brazing and Soldering, SAD, 1993.
- [18] Qingyun Shan , Dahang L: Microstructure, mechanical properties and hydrogen induced cracking susceptibility of X80 pipeline steel with reduced Mn content.

-
- [19] Jalusić B.: Analiza utjecajnih parametara na intenzivnost hlađenja epruvete strujom dušika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [20] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1329737528-0-podloge_za_vjezbe_11_12.pdf, pristupljeno 30.01.2018.
- [21] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/greske.pdf>, pristupljeno 30.01.2018.
- [22] <http://www.zavarivanje.info/product/3312/elektroda-ez-50-b-elektroda-za-zavarivanje-nelegiranih-celika-elektrode-zagreb-zavarivanje>, pristupljeno 12.02.2018.

PRILOZI

I. CD-R disc