

Zavarivanje čelika STREX 960E

Majcen, Zoran

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:779005>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-02**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





SVEUČILIŠTE SJEVER

Završni rad br. 217/PS/2017

ZAVARIVANJE ČELIKA STRENX 960E

ZORAN MAJCEN

0119/336

Varaždin , lipanj 2017.



SVEUČILIŠTE SJEVER

PROIZVODNO STROJARSTVO

Završni rad br. 217/PS/2017

ZAVARIVANJE ČELIKA STRENX 960E

STUDENT:

ZORAN MAJCEN

0119/336

MENTOR:

MARKO HORVAT, dipl.ing

Varaždin , lipanj 2017.

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
PRISTUPNIK	Zoran Majcen	MATIČNI BROJ	0119/336
DATUM	26.06.2017.	KOLEGIJ	Tehnologija III
NASLOV RADA	Zavarivanje čelika STREX 960E		

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Welding of STREX 960E steel
-----------------------------	-----------------------------

MENTOR	Marko Horvat	ZVANJE	predavač
--------	--------------	--------	----------

ČLANOVI POVJERENSTVA	1. prof. dr. sc. Živko Kondić, redoviti profesor
	2. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
	3. Katarina PISAČIĆ, dipl.ing., predavač
	4. dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač
	5. _____

Zadatak završnog rada

BROJ	217/PS/2017
------	-------------

OPIS

U Završnom radu je potrebno:

- opisati ulogu čelika kao konstrukcijskog materijala
- definirati skupinu visokočvrstih čelika (dobivanje, svojstva, primjena), uz naglasak na čelik STREX 960E (S960QT)
- opisati ulogu zavarivanja kao procesa spajanja u čeličnim konstrukcijama te definirati osnovne pogreške u zavarenim spojevima, navesti mjere za sprečavanje istih i opisati mogućnost pojavljivanja opisanih pogrešaka u čeliku STREX 960E (S960QT)
- izraditi proračun parametara zavarivanja čelika STREX 960E (S960QT) te isti usporediti sa preporukama proizvođača
- u zaključku Završnog rada kritički se osvrnuti na problematiku zavarivanja visokočvrstih čelika

ZADATAK URUČEN

04.07.2017.



POTPIS MENTORA

SAŽETAK

U ovom radu obrađuje se tema zavarivanja visokočvrstog čelika STRENX 960 E, proizvod švedsko-američke tvrtke SSAB. Iako se čini da zavarivanje ovog čelika nema posebnih zahtjeva jer se može izvršiti svim uobičajenim postupcima kao i za obične čelike, zbog mogućeg gubitka svih prednosti koje imaju visokočvrsti čelici, postupak zavarivanja je potrebno provesti prema točno određenim parametrima zavarivanja.

U radu se pojednostavljeno obrađuje teorija zavarivanja za sve čelike, a detaljno za onaj dio koji se odnosi na visokočvrste čelike. Praktičan dio je u obliku proračuna parametara zavarivanja za određeni zavareni spoj. Svi parametri dobiveni su iz preporuka proizvođača te uspoređeni s proračunima pomoću formula i podacima iz iskustva.

Ključne riječi: visokočvrsti čelici, zavarivanje, parametri zavarivanja, zavareni spoj

Abstract

This paper reflects with the topic of welding high-strength steel. A specific product of the Swedish-American firm SSAB, a steel under the brand name STRENX 960 E, is chosen. Although welding of this steel seems to have no special requirements, it can be done with all conventional methods as for ordinary steels due to the possible loss of all the advantages of high-strength steels, the welding process is to be carried out according to the exact welding parameters.

This paper reflects the welding theory for all steels, and in detail for the part related to high-strength steels. The practical part is in the form of a calculation of welding parameters for a particular welded joint. All parameters are derived from the manufacturer's recommendations and compared to the calculations using formula and experience data.

Keywords: high-strength steel, welding, welding parameters, welded joint

Popis korištenih oznaka i kratica

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	N/mm^2
R_e	granica razvlačenja	N/mm^2
A_5	produljenje	%
R_m	vlačna čvrstoća	N/mm^2
KV	udarni rad loma	J
K_{IC}	pukotinska lomna žilavost	J
$\sigma_{dop ZS}$	dopušteno naprezanje zavarenog spoja	N/mm^2
$\sigma_{dop OM}$	dopušteno naprezanje osnovnog materijala	N/mm^2
v	brzina zavarivanja	mm/min
V	faktor slabljenja	-
E_{ef}	efektivno unesena toplina	J/mm
Q	unesena toplina	J/mm
U	napon struje	V
I	jakost struje	A
T_O	temperatura predgrijavanja	$^{\circ}C$
T_{Omin}	minimalna temperatura predgrijavanja	$^{\circ}C$
T_{Omax}	maksimalna temperatura predgrijavanja	$^{\circ}C$
P_w	parametar pucanja	%
P_{cm}	ekvivalent ugljika Itto-Bessyou	%
HIC	Hot Crack Sensivity – sklonost toplim pukotinama	%
$t_{8/5}$	vrijeme hlađenja od $800^{\circ}C$ do $500^{\circ}C$	S
k	koeficijent iskorištenja električnog luka	-
CEV	ekvivalent ugljika prema IIW	-
CET	ekvivalent ugljika	-
b	širina zavara	mm
p	penetracija (visina) zavara	mm
d	debljina materijala	mm
A_1	linija prekrystalizacije austenit perlit	$^{\circ}C$
A_3	linija prekrystalizacije austenit ferit	$^{\circ}C$
λ	Koeficijent toplinske vodljivosti	W/mmK
δ	Debljina materijala	mm
G	Sklonost pukotinama zbog naknadne TO	-
P_L	Sklonost lamelarnom trganju	-

Kratice	Opis kratice
SPZ	specifikacija parametara zavarivanja
ZS	zavareni spoj
ZUT	zona utjecaja topline
ZT	zona taljenja
OM	osnovni materijal
KBR	kontrola bez razaranja
pWPS	prequalified Welding Procedure Specification
WPS	Welding Procedure Specification
QT	Quenched and tempered – gašeno na zraku i poboljšano
QL	Quenched and tempered – gašeno u vodi i poboljšano
MIG/MAG	Metal Inert Gas / Metal Active Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
WPQR	Welding Procedure Qualification Record
W	wolfram
V	vanadij
Ti	titan
Cr	krom
H	vodik
N	dušik
O	kisik
C	ugljik
Fe ₃ C	cementit
Mn	mangan
S	sumpor
P	fosfor
Si	silicij
Al	aluminij
Ni	nikal
Co	kobalt
OM	osnovni materijal
DM	dodatni materijal
IIW	International Institute of Welding
TO	toplinska obrada
IWE	International Welding Engineer

EP/EPT	elektrootporno zavarivanje / pod troskom
EN	Europska norma
CO ₂	ugljični dioksid
Ar	argon

Sadržaj

SAŽETAK	4
Abstract	5
Popis korištenih oznaka i kratica.....	6
Popis slika	2
Popis dijagrama.....	3
Popis shema.....	4
Popis tablica	4
Uvod.....	5
1. Tehnički materijali	7
1.1. Važnost tehničkih materijala.....	7
1.2. Proizvodnja i uporaba čelika.....	8
2. Visokočvrsti čelici.....	12
2.1. Osobine	12
2.2. Primjena	15
2.3. Strenx 960 E (S 960 QT).....	16
3. Zavarivanje.....	20
3.1. Općenito o zavarivanju	20
3.2. Zavarivanje taljenjem.....	22
3.3. Unos topline	23
3.4. Dokumentacija za postupak zavarivanja.....	25
4. Zavarivanje visokočvrstih čelika Strenx 960	27
4.1. Svojstva i gubitak svojstava zavarenog spoja	27
4.2. Priprema spoja.....	28
4.3. Zavarljivost Strenx 960 čelika	30
4.4. Greške u zavarenim spojevima	32
4.5. Hladne pukotine	33
4.6. Predgrijavanje Strenx čelika	38
4.7. Toplinski input za Strenx 960 čelike.....	43
4.8. Tople pukotine	45
4.9. Lamelarno trganje	46
4.10. Dodatni materijali-DM.....	47

4.11.	Zaštitni plin	48
4.12.	Naknadna toplinska obrada	49
4.13.	Pukotine zbog naknadnog zagrijavanja.....	50
5.	PRORAČUN PARAMETARA ZAVARIVANJA	51
6.	ZAKLJUČAK	63
	Literatura:.....	64

Popis slika

Slika 1.1	Proizvodi i poluproizvodi od čelika različitih oblika [4].....	9
Slika 2.1	Vrste čelika i odnos čvrstoće i istežljivosti [27].....	14
slika 2.2	Mikrostrukture toplovaljanih čelika dobivenih različitim postupcima [24].....	14
Slika 2.3	Dobitnik nagrade Swedish Steel Prize za 2017.- samoistovarni vagon [8].....	16
Slika 2.4	Tipični proizvodi gdje se upotrebljavaju Strenx čelici [8,10,18]	18
Slika 3.1	Faktori koji utječu na slabljenje zavarenog spoja [12].....	21
Slika 3.2	Osnovne zone zavara [15]	22
Slika 3.3	Prikaz različitih područja u ZUT kod čelika sa 0,2% C [17]	23
Slika 3.4	Primjer upute za zavarivanje sa nužnim parametrima (WPS) [21]	26
Slika 4.1	Prikaz promjene mehaničkih svojstava u odnosu na temperaturu zagrijavanja [11].....	28
Slika 4.2	Skidanje zaštitnog sloja sa Strenx čelika [19].....	29
Slika 4.3	Shema utjecaja na zavarljivost čelika [21]	30
Slika 4.4	Radna knjiga zavarivanja (Welding handbook) tvrtke SSAB za Strenx čelike [8].....	31
Slika 4.5	Položaj i orijentacija hladnih pukotina u zavarenom spoju [19]	34
Slika 4.6	Nastanak i smjer zaostalih naprezanja u zavarenom spoju [19].....	35
Slika 4.7	Priprema žljeba za zavare na pločama debljim od 25 mm [18].....	37
Slika 4.8	Neki od načina za smanjenje pojave hladnih pukotina [18].....	37
Slika 4.9	Pojava zaostalih naprezanja zbog nejednolikog rastezanja [11]	39
Slika 4.10	Predgrijavanje Strenx čelika električnim oblogama [18]	41

Slika 4.11 Automatsko predgrijavanje plinskim plamenom [19]	41
Slika 4.12 Područja predgrijavanja i mjerenja temperature [18]	42
Slika 4.13 Različite debljine zavarivanih ploča [18]	44
Slika 4.14 Područja zavarenog spoja gdje se pojavljuje lamelarno (slojevito) trganje [11]	46
Slika 4.15 Utjecaji pojave lamelnog trganja i toplih pukotina [18]	47
Slika 4.16 Korištenje različitih DM pri zavarivanju Strenx čelika [18]	48
Slika 4.17 Učinci odabranog zaštitnog plina pri zavarivanju [18]	48
Slika 5.1 Utjecaj oblika zavara na pojavu toplih pukotina [19]	53
Slika 5.2 Tehnički list za DM [25]	56
Slika 5.3 pWPS za obrađeni primjer zavara	57
Slika 5.4 Aplikacija WeldCalc za proračun parametara zavarivanja [26]	58
Slika 5.5 Uvećani prikaz dijagrama sa linijama tolerancije na pojavu pojedinih grešaka [26]	58
Slika 5.6 Prikaz različitih područja pojave grešaka [26]	59
Slika 5.7 Promjenom parametara narušena kvaliteta zavara (crna točka) [26]	60
Slika 5.8 Konačni izračun parametara zavarivanja za prvi prolaz [26]	61
Slika 5.9 Konačan pWPS za zahtijevani zavar	62

Popis dijagrama

Dijagram 2.1 Ovisnost gustoće dislokacija i čvrstoće materijala [9]	15
Dijagram 2.2 Prikaz krivulja naprežanje-istežanje za obični i visokočvrsti čelik [7]	19
Dijagram 4.1 Rastvorljivost vodika i dušika u željezu u ovisnosti o temperaturi [19]	35
Dijagram 4.2 Krivulje hlađenja materijala sa i bez predgrijavanja [11]	38
Dijagram 4.4 Dijagrami toplinskih inputa za različite temperature predgrijavanja i debljine materijala [18]	43
Dijagram 4.5 Prikaz ovisnosti penetracije i širine zavara sa pojavom toplih pukotina [11]	45

Popis shema

Shema 1.1 Dobivanje čelika i željeznih ljevova [1]	9
Shema 1.2 Opća podjela čelika prema namjeni [5]	11

Popis tablica

Tablica 2.1 Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika [7]	12
Tablica 2.2 Kemijski sastav čelika Strenx 960E (QT) [8]	17
Tablica 2.3 Tehnički podaci za Strenx QT čelike [8]	18
Tablica 3.1 Učinci unosa topline u zavar i koeficijenti korisnosti k [18]	24
Tablica 4.1 Odabir temperature predgrijavanja za Strenx čelike [18]	39
Tablica 4.2 Preporučene temperature predgrijavanja za Strenx čelike 960E, d= 10 i 30 mm	40
Tablica 4.3 Vrijednosti temperatura predgrijavanja za Strenx čelike [18]	44
Tablica 4.4 Popis dodatnih materijala (DM) prema EN normama za određene vrste Strenx čelika [18]	47
Tablica 4.5 Prikaz preporučenih zaštitnih plinova za različite vrste Strenx čelika i različite postupke [18] ..	49
Tablica 4.6 Preporučene temperature i vremena za naknadnu toplinsku obradu Strenx čelika [19]	50
Tablica 5.1 Laboratorijski utvrđen sastav Strenx 960E čelika debljine 30 mm [23]	51
Tablica 5.2 Mehanička svojstva, najviši udjeli elemenata i laboratorijski utvrđeni CET(CEV) [10]	52
Tablica 5.3 Usporedba vrijednosti parametara ovisno od sastava materijala	61

Uvod

Napredak na svim poljima ljudske djelatnosti nosi sa sobom i nove tehnološke izazove, a oni najspremniji ostvaruju prednost. Korištenje materijala poboljšanih svojstava nije samo prestiž već nužnost u svijetu sve žešće konkurencije i otvorenog tržišta.

Sama svojstva materijala, bilo fizikalna, ekonomska ili tehnološka, ne daju prednost ako ih se ne može adekvatno iskoristiti. Razvojem procesa proizvodnje sve kvalitetnijih čelika olakšan je napredak u razvoju čeličnih konstrukcija i drugih čeličnih proizvoda. Ovdje je naglasak stavljen na visokočvrste čelike. No, jedan od najzastupljenijih načina spajanja čelika, zavarivanje, ima i posebne zahtjeve za spajanje takvih materijala.

Visokočvrsti čelici imaju nekoliko puta veću konvencionalnu granicu razvlačenja R_{p02} zbog koje se mogu opteretiti znatno većim opterećenjima ili se može smanjiti presjek profila u usporedbi s običnim čelicima. Utrošak materijala je manji, manja je masa materijala, lakša manipulacija istim, a dijelom je olakšana i skraćena proizvodnja konstrukcija i proizvoda iz visokočvrstih čelika. Razlog je tome je manje obrade (kraće vrijeme obrade), bilo strojne obrade ili zavarivanje kao najčešći oblik spajanja kod čelika. Uz smanjenje vremena za zavarivanje, npr. umjesto 30 mm običnog čelika zavaruje se visokočvrsti debljine 8-12 mm, smanjuje se i trošak radnog vremena, energije, dodatnih materijala, pribora.

Primjena visokočvrstih čelika u konstrukcijama još uvijek nije u prednosti pred običnim čelicima. Razlog jest veća cijena osnovnog materijala, smanjena krutost konstrukcije, zbog veće konvencionalne granice razvlačenja veća je osjetljivost na zarezno djelovanje, povećana brzina propagacije pukotina u materijalu te neka ograničenja pri zavarivanju. Upravo kod postupaka zavarivanja mogu se dogoditi najveće pogreške, a one pak proizlaze iz zapostavljanja potrebnih mjera pri zavarivanju, poglavito kod pripreme zavarivanja.

U ovom radu će obrađuje se tema zavarivanja visokočvrstih čelika. Nakon opisa čelika kao najvažnijeg konstrukcijskog materijala, proizvodnje čelika i njegove uporabe, detaljnije se opisuju visokočvrsti čelici tvrtke SSAB.

Pojam zavarljivosti obrađuje se ukratko, dok se pojedini dijelovi o zavarivanju detaljnije objašnjavaju pod poglavljem zavarivanja visokočvrstih čelika iz razloga što se upravo ovdje uočava razlika od zavarivanja ostalih čelika. Tako je, npr. slijed zavarivanja, promjena mikrostrukture, ispitivanje zavarenih spojeva isto ili vrlo slično za sve čelike. No, unos topline, dodatni materijali

DM, naknadne toplinske obrade TO imaju vrlo različito značenje i parametre kod zavarivanja visokočvrstih u odnosu na obične čelike.

Zbog nemogućnosti provedbe realnih situacija zavarivanja i proba u laboratoriju za različite vrste pogrešaka, u radu se tema obrađuje teorijski. Praktičan dio jesu izračuni za izradu jednog zavarenog spoja iz odabranih materijala. Dobiveni proračuni usporediti će se sa preporukama koje daju proizvođači čelika ali i DM. Uz to, izrađuje se preliminarna specifikacija parametara zavarivanja, a u tu specifikaciju unose se parametri dobiveni iz preporuka, proračuna te iskustva u radu sa takvom vrstom materijala. Iskustveni podaci dobiveni su od IWE inženjera zavarivanja za istu vrstu čelika, ali drugog proizvođača.

1. Tehnički materijali

1.1. Važnost tehničkih materijala

Napredak civilizacija od njenih samih početaka, usko je vezan s otkrivanjem, dobivanjem, preradom te oblikovanjem materijala u uporabive tvorevine. Nekada se posebno isticala proizvodnja oruđa i oružja, gdje su bolji i napredniji materijali donosili prednost, bilo u ratu, lovu ili pak u trgovini takvim materijalima.[1]

Ni u današnje vrijeme je gotovo nezamisliv napredak bez poboljšanja postojećih ili otkrivanja novih tehničkih materijala. Bilo u gradnji, strojogradnji, energetici ili pak elektrotehnici. Mnogim materijalima se pri njihovu razvoju pridaje dosta važnosti, no uspjeh ovisi o mnogim čimbenicima, od dostupnosti, ekonomičnosti, obradivosti i primjenjivosti. Ekologija ja svakako još jedan čimbenik koji utječe na uporabljivost materijala, a prisutna je više no ikada, ponajprije zbog razvoja društvene svijesti. Naime, količine otpadnih materijala rastu proporcionalno s količinama proizvedenih materijala, pa se pri tom teži što većoj primjeni materijala koji se mogu reciklirati i što većem udjelu recikliranja, bez obzira na to što neki novi materijali možda imaju i povoljnija svojstva.[1]

No, razvoj i težnja za većom kvalitetom, pouzdanošću, trajnošću sklopova predstavlja sve složeniji i odgovorniji zadatak za konstruktore i tehnologe pri odabiru materijala. Tu su, dakako i nove mogućnosti uređaja koje pak materijali moraju omogućiti.

Razvoj tehničkih materijala je stalan, no osnovne grupe materijala, već duži niz vremena čine osnovu pri svakom odabiru: čelici, polimeri, drvo, beton, laki obojeni metali.

Iako imaju maseno najveću proizvodnju, betoni sa oko 12 milijardi tona godišnje proizvodnje [2], ipak nisu najvažniji tehnički materijal. Čak ni polimeri koji imaju najbrži rast u posljednjih tridesetak godina i prodiru u doista svaku sferu ljudske tehnike, sa proizvodnjom od oko 250 milijuna tona godišnje ipak zaostaju po važnosti od najraširenijeg tehničkog i konstrukcijskog materijala, čelika. Proizvodnja čelika na godišnjoj razini iznosi oko 1.4 milijarde tona (2015.g.) i zbog fluktuacije cijena te nestabilnosti tržišta, rast proizvodnje stagnira (čak i lagano opada, 0,3%). No čelik je još uvijek nezamjenjiv u mnogim sklopovima, konstrukcijama ili kao samostalan proizvod. Proizvodnja čelika desetak puta nadmašuje ukupnu masu svih ostalih proizvedenih metala i njihovih legura.

Razvoj novih materijala ne znači i da se čelici ne razvijaju. Iako skupni naziv za metastabilno kristaliziranu leguru željeza i ugljika (do 2,08 % C), čelik, ima doista raznovrsnih svojstava. To se

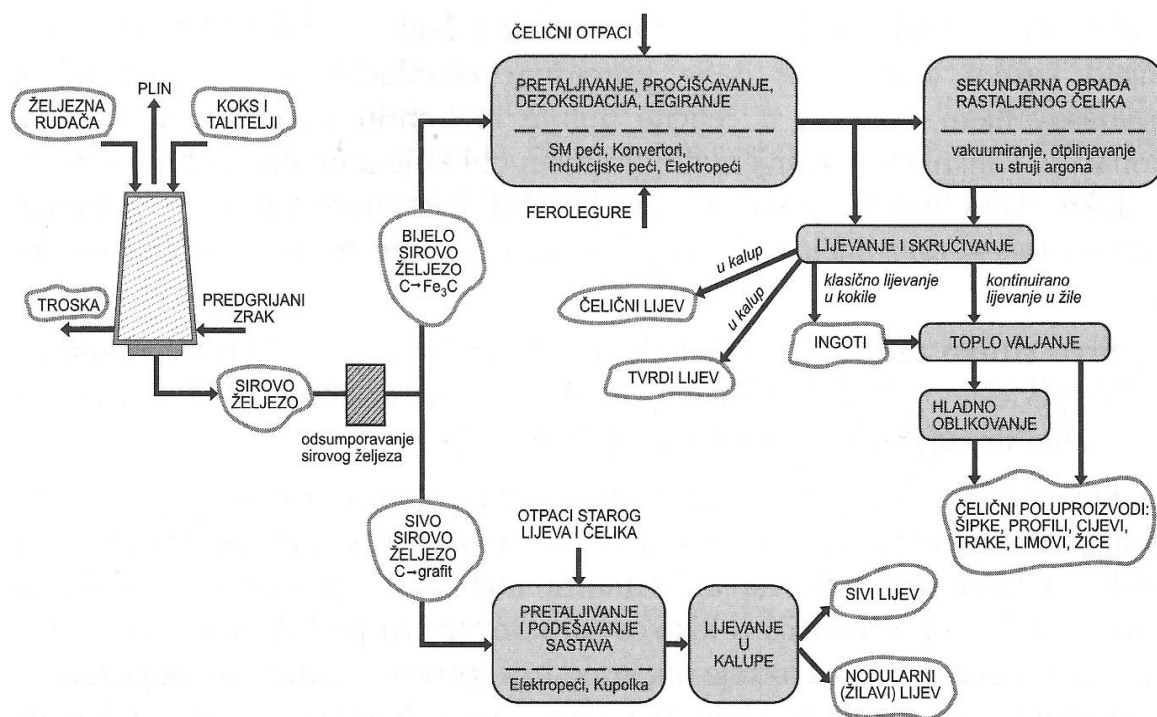
postiže različitim kemijskim sastavom, mikrostrukturom, načinom proizvodnje. Važnost čelika naglašena je i mjerenjem stupnja industrijskog razvoja neke zemlje, a koji se izražava potrošnjom čelika po stanovniku. Primat u primjeni čelicima daje dobra kombinacija svojstava – čvrstoće, žilavosti, rezljivosti, spojivosti, deformabilnosti, legiranja i promjene svojstava, toplinske obrade, relativno niske cijene...[1]

Kao jedan od najbitnih uvjeta u današnjem društvu, cijena, drži čelik još uvijek boljim izborom od većine obojenih metala i njihovih legura, no istodobno je upotreba čelika upitna u mnogim sklopivima gdje ga mijenjaju jeftiniji polimeri. Dakako, ovisno od razine kvalitete i osobina koje se zahtijevaju pri uporabi, biti će i izbor materijala.

1.2. Proizvodnja i uporaba čelika

Proizvodnja čelika počinje u visokim pećima procesima redukcije željezne rude gdje se iz nje izdvaja kisik. No u tom procesu dolazi i to otapanja mnogih elemenata iz okoline (zrak, koks, kremen, vapnenac...) koji ostaju u skrutnutom proizvodu te tako dobivamo bijelo ili sivo sirovo željezo. Postotak ugljika (2...4% C) je relativno visok kao i fosfora i sumpora te dobivamo tehnički neuporabljiv proizvod.[1,3]

Bijelo sirovo željezo ima mnogo veći postotak C koji se nalazi u cementitu (Fe_3C), a zbog bržeg skrućivanja i većeg masenog udjela cementatora (Mn). Ono je osnovna sirovina za dobivanje čelika, čeličnog i bijelog tvrdog lijeva. Čelik se dobiva postupcima pretaljivanja, pročišćavanja (rafiniracije), dezoksidacije i legiranja (shema 1.1) a potom toplim i hladnim valjanjem, kovanjem ili provlačenjem do željenih oblika (slika 1.1). Ovi se postupci danas vrše na nekoliko načina, a svaki od njih ima svoje prednosti te omogućuje odvajanje ili dodavanje pojedinih elemenata.[1]



Shema 1.1 Dobivanje čelika i željeznih ljevova [1]

Proizvodnja sirovog željeza isplativa je tek za veće količine te je kao takva najčešće odvojena od sekundarne metalurgije, odnosno postupaka rafinacije te toplog i hladnog oblikovanja. Sekundarni procesi odvijaju se u manjim jedinicama („loncima“) te na taj način omogućuju veliku fleksibilnost proizvodnje, ujednačenu kvalitetu i precizan sastav.[1]



Slika 1.1 Proizvodi i poluproizvodi od čelika različitih oblika [4]

Zbog navedenih razloga postoje mnoge vrste čelika, a koje su stvorene prema različitim zahtjevima. Gotovo svaka veća čeličana ima neki od svojih postupaka za proizvodnju određenih

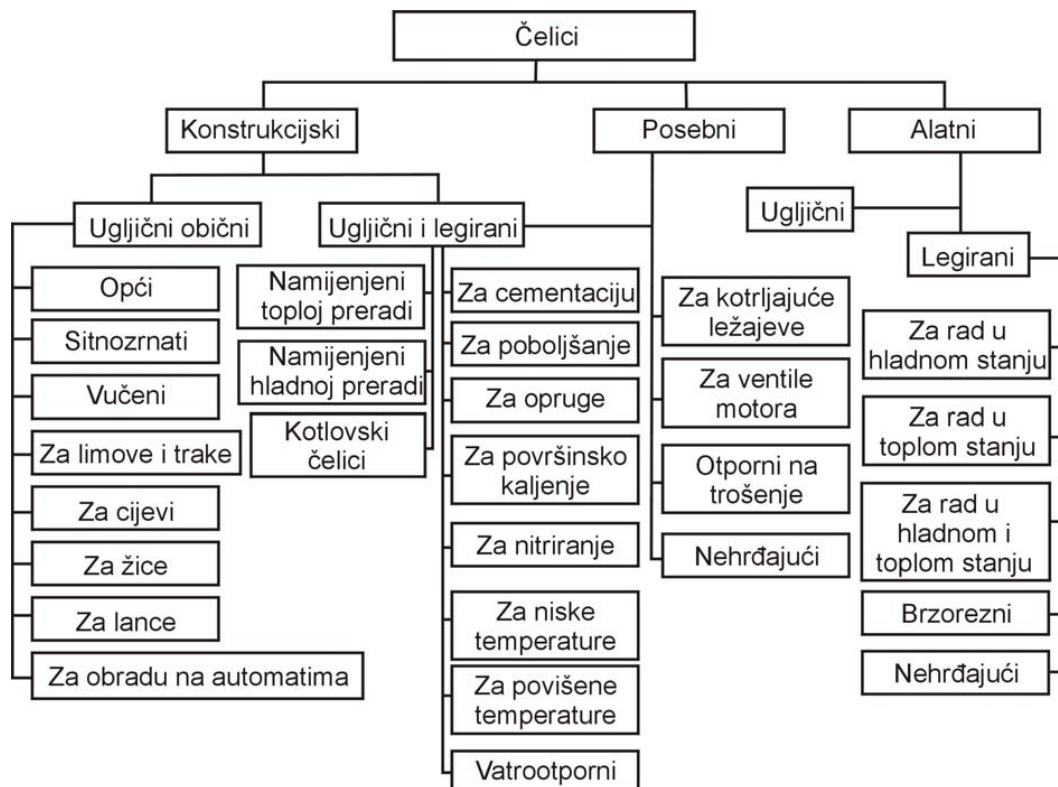
čelika. Svi su postupci kombinacija rafiniranja (a koja pak može biti na drugom mjestu od proizvodnje završnog čeličnog proizvoda), legiranja i oblikovanja te je potrebno mnogo vremena kako bi se odredili najpovoljniji udjeli i sastav legiranih elemenata, temperatura oblikovanja, vremena hlađenja, vremena i temperature držanja, naknadne toplinske obrade i sl. Zbog niza parametara, a koji mogu i uz vrlo male promjene ili drugačije načine primjene dovesti do vrlo različitih svojstava, broj različitih čelika je vrlo velik (prema procjenama više od tisuću vrsta [3]). Da se olakša snalaženje u ovim materijalima, svi su oni označeni prema međunarodnim normama ili normama pojedinih zemalja, a najviše se koristi podjela prema namjeni (shema 1.2). No isto tako postoje i razlike između isto označenih čelika, koji moraju za pojedinu oznaku zadovoljiti neku minimalnu ili maksimalnu vrijednost. Razlike se očituju u kvaliteti prilikom prerade čelika ili uporabe proizvoda od čelika.

Cijene konstrukcijskih čelika na svjetskom tržištu jesu u rasponu od 300-550 USD za tonu toplovaljanog lima, a za nehrđajuće čelike još dodatak na ove cijene u rasponu od 1400 USD do 2050 USD. Dodatak se izračunava iz prosječnih cijena legiranih elemenata, službeno se određuje, a služi kako ne bi došlo do manipulacije cijenama.[3]

Fluktuacije cijena su posljednjih godina (od 2007.g.) vrlo velike i česte, a jedan od razloga jesu i preveliki proizvodni kapaciteti u svijetu koji su iskorišteni tek oko 60 %. Kineske čeličane proizvode više od 65% ukupne svjetske proizvodnje čelika, pretežito konstrukcijskog čelika niže kvalitete, dok se u EU proizvodi oko 11% svjetske proizvodnje, ali uz veći udio visokokvalitetnih čelika. Europska proizvodnja je na razini potrošnje, ali je kineska proizvodnja dosta iznad potreba Kine, pa je nužan izvoz, a time i ranije spomenute fluktuacije cijena koje često graniče sa dampinškim cijenama.

Nesigurnost proizvodnje ima za posljedicu manja ulaganja u razvoj novih vrsta čelika pa dolazi do stagnacije potražnje za čelikom, iako je njegova budućnost još uvijek neupitna. Primjena čelika doista je raznolika, a to je i zbog velikog broja različitih vrsta čelika, te činjenice da isti materijal može zadovoljiti mnoge zahtjeve konstruktora. Sve češća zamjena čeličnih dijelova polimernim, najčešće zbog cijene i lakše obrade, ipak je ograničena na dijelove koji ne podnose veća mehanička opterećenja. Ekološka svijest postavlja čelik na visoko mjesto pri odabiru materijala zbog gotovo potpune mogućnosti recikliranja (u čeličanama se pri pretaljivanju sirovog željeza i dodavanju legiranih elemenata gotovo uvijek dodaju i čelični otpaci). Čelici pod utjecajem okoline se mogu, za razliku od polimera, relativno brzo razgraditi te na taj način predstavljaju manju opasnost za okoliš. Razgradnja, odnosno korozija, jest veliki problem čelika koji nisu proizvedeni kao korozijski postojani pa se u tom slučaju mora primijeniti neka od zaštita.

Dakle, jasno je da idealnog materijala nema, bar ne trenutno, pa je nužnost razvoja postojećih i traženja novih materijala svakako neupitna. U mnogim područjima ljudskih djelatnosti, tehnologija dolazi do granica mogućnosti korištenih materijala i daljnji razvoj zapravo je onemogućen upravo zbog svojstava pojedinih materijala. Iako mnogobrojnih vrsta, čelici se i dalje razvijaju, traži se poboljšanje vrijednosti određenih svojstava, ali uz zadržavanje onih dobrih. Kako su to iznimno skupi projekti, taj razvoj ipak vuku veliki proizvodni sustavi u najrazvijenijim zemljama svijeta.



Shema 1.2 Opća podjela čelika prema namjeni [5]

Regija koji slovi kao područje gdje se proizvode vrlo kvalitetni i pouzdani čelici jest Sjeverna Europa. Ovdje je i najveći razvoj novih vrsta čelika, a koji se provodi prema zahtjevima sa tržišta. „Švedski čelik“ već je dugo vremena uvriježen naziv za kvalitetne proizvode ovdašnjih čeličana.

SSAB AB, nordijsko-američki proizvođač čelika, razvija brendirane nazive pojedinih vrsta čelika. Tako je njihov brend naziva Hardox pojam za čvrste i na habanje otporne čelike. Njihov najnoviji proizvod nosi naziv Strenx i uključuje porodicu visokočvrstih čelika konvencionalne granice razvlačenja 600-1300 MPa (N/mm²)[4, 8].

U nastavku se nakon opisa visokočvrstih čelika te općenito postupka zavarivanja čelika, detaljnije obrađuje tema zavarivanja Strenx čelika.

2. Visokočvrsti čelici

2.1. Osobine

Razvojem tehnologija povećavali su se zahtjevi postavljeni pred tehničke materijale pri uporabi, ali i sigurnosni, ekonomski i ekološki zahtjevi. Čelik, kao najprisutniji materijal pri izradi konstrukcija, mehanički opterećenih sklopova, strojeva, postojećim vrstama nije mogao zadovoljiti sve ranije nabrojane zahtjeve. Naime povećanjem presjeka korištenog materijala postiže se veća nosivost, odnosno dozvoljeno opterećenje. No, s druge strane tu je značajno povećanje mase, veća količina materijala, teža obrada (rukovanje većom masom ili dimenzijama, zavarivanje većih debljina, veća opterećenja kod deformiranja) pa na mjestima gdje nije bilo moguće povećavati masu, moralo se pristupiti traženju novih materijala. Legiranje čelika donosi promjenu određenih svojstava (tablica 2.1), veće količine legirnih elemenata često su višestruko skuplje od osnovnog materijala (dodatak za nehrđajuće čelike, odnosno minimalno potrebne količine legirnih elemenata, sudjeluju u konačnoj cijeni čelika od 70-80 %).[1,7]

Tablica 2.1 Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika [7]

Svojstva čelika	Legirni elementi												
	C	S	P	Si	Mn	Al	Ni	Cr	Mo	W	V	Ti	Co
Čvrstoća	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tvrdoća	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rel. produljenje	-	-			+	-	+	+					-
Elastičnost	+		+	+	+		+	+	+		+		
Udarne žilavost	-	-	-	-	+	-	+		+		+	-	
Trajna statička čvrstoća (pri višim temperaturama)	+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Dinamička čvrstoća					+	-		+	+	+	+	+	+
Otpornost prema kemijskim utjecajima	-	-	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Otpornost prema vatri	+			+	-	+		+	-		-		
Sposobnost za izvlačenje	-	-	-	-	-		-	-		-	-		
Sposobnost za kovanje	-	-	+	-									
Sposobnost za zavarivanje	-	-	-	-								+	
Sposobnost za obrađivanje	-	+	+	-	-	-	-	-		-	-	-	
Sposobnost za rezanje (alat)	+			+		+		+	+	+	+	+	+
Otpornost prema popuštanju								+	+	+	+	+	+

Često jedan element poništava djelovanje drugog, a bitne su i količine pojedinih elemenata, gdje premali ili preveliki udio znači odstupanje od traženih svojstava.

Jedno od logičnih rješenja jest povećanje čvrstoće materijala, odnosno razvoj visokočvrstih čelika. To se i uspješno postiže i to kombinacijom različitih načina očvršćavanja, a najčešće korišteni su:

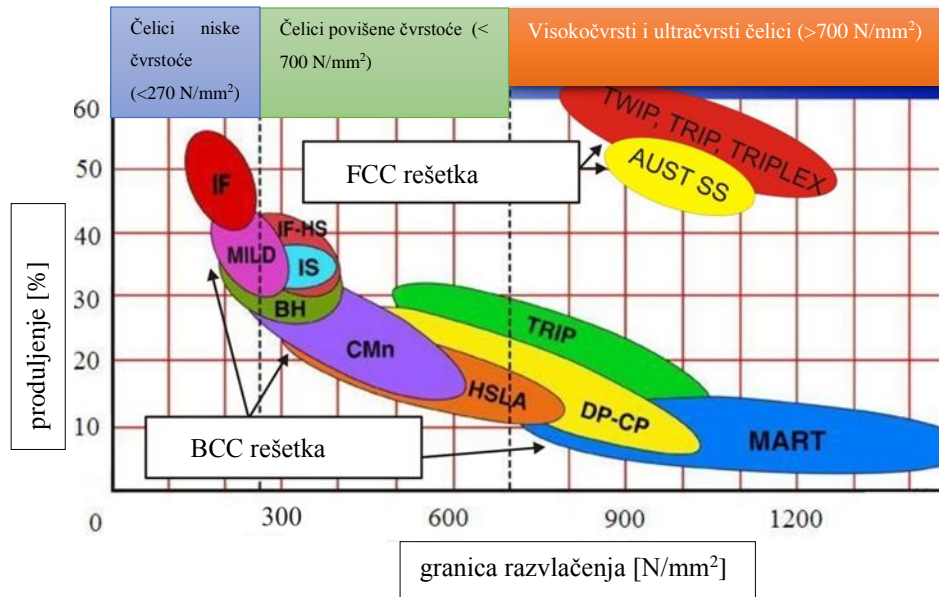
- usitnjenje zrna
- martenzitna transformacija
- precipitacija,

a sve povezano sa deformacijom austenita. Na taj način mogu se postići najviše vrijednosti granica razvlačenja ($R_e > 1000 \text{ N/mm}^2$) te čvrstoće, od svih polikristaličnih materijala. Pored postizanja visoke vlačne čvrstoće (R_m) i granice razvlačenja (R_e) visokočvrsti čelici moraju posjedovati i visoku žilavost, visoku dinamičku izdržljivost, otpornost na koroziju, čvrstoću pri povišenim i visokim temperaturama, potpunu prokaljivost (95% martenzita u jezgri), laku obradljivost odvajanjem čestica, sposobnost zavarljivosti i toplinske obradbe[1,5].

Postizanje visoke vlačne čvrstoće obično dovodi do snižavanja plastičnosti i otpornosti na krhki lom, smanjuje se plastična rezerva, odnosno veći je omjer R_e/R_m („plastična rezervna“ - svojstvo pri kojem u slučaju preopterećenja prvo dolazi do plastične deformacije, a ne do iznenadnog loma). Pri razvoju novih materijala obično se jedno svojstvo žrtvuje na račun drugog. Tako rast čvrstoće u većini slučajeva uzrokuje pad istežljivosti (slika 2.1). Tek nekoliko vrsta čelika odstupa od ovog obrasca, no oni gube neka druga svojstva. Martenzitni čelici u postižu najviše vrijednosti čvrstoće, a relativno malo produljenje razlog je manje prisutnosti u konstrukcijama. Nove vrste čelika (TWIP, TRIPLEX, TRIP) daju sve bolje kombinacije svojstava, no kod ovih je vrsta najčešće previsoka cijena razlog male prisutnosti, te još nedovoljno iskustva u primjeni. [5]

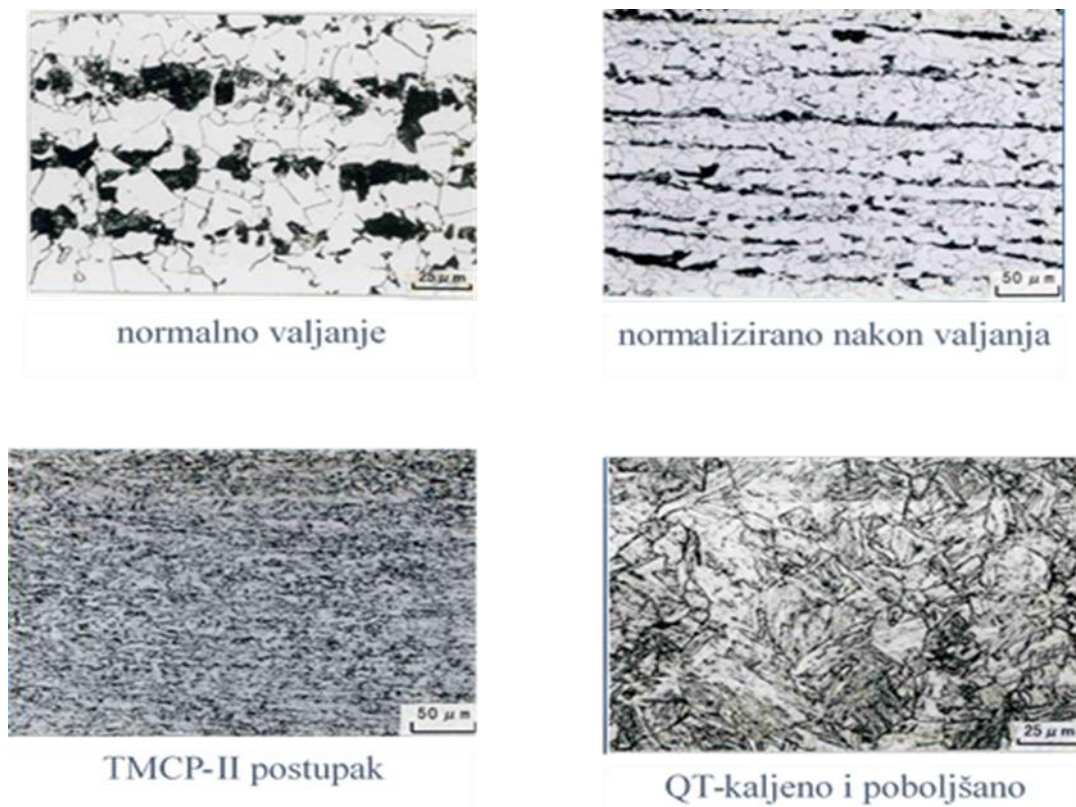
Pouzdanost materijala u konstrukcijama karakterizira se konstrukcijskom čvrstoćom odnosno skupom mehaničkih svojstava koje ovise o radnim uvjetima. Glavni parametri konstrukcijske čvrstoće jesu:

- vlačna čvrstoća R_m
- granica razvlačenja R_e , odnosno konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$
- žilavost, udrana radnja loma KV
- prijelazna temperatura žilavosti (prijelaz iz žilavog u krhko područje)
- pukotinska lomna žilavost K_{IC} (sposobnost zaustavljanja pukotine kada se ona pojavi).[1]



Slika 2.1 Vrste čelika i odnos čvrstoće i istezljivosti [27]

Nijedan postupak povećanja čvrstoće sam po sebi ne daje poboljšana svojstva za sve navedene parametre. Stoga načini očvršćenja jesu kombinacije nekoliko postupaka, a koji i sa malim varijacijama daju različita svojstva konačnog proizvoda.

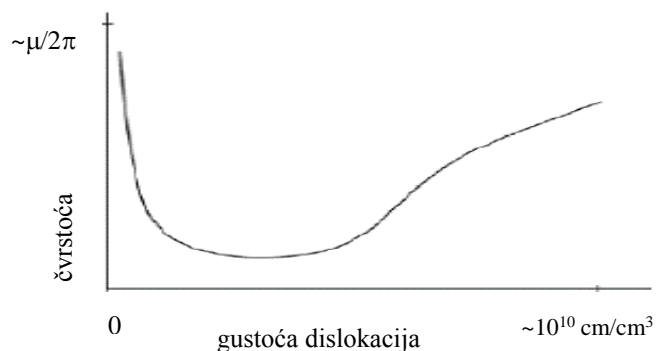


slika 2.2 Mikrostrukture toplovaljanih čelika dobivenih različitim postupcima [24]

- normalno valjanje – feritno-perlitna struktura, niski R_e i R_m
- normalizirano nakon valjanja – sitnozrnata feritno-perlitna mikrostruktura, povećana R_e i R_m
- TMCP-II – termomehaničko kontrolirano valjanje i ubrzano hlađenje, sitnozrnati igličasti ferit, visoka čvrstoća, visoka žilavost, vrlo niski ekvivalent ugljika
- QT – kaljeno i poboljšano – vrlo visoka čvrstoća i granica razvlačenja, dobra žilavost, malo produljenje, povišeni ekvivalent ugljika, potrebno predgrijavanje pri zavarivanju [24]

U pogledu mikrostrukturnih zahtjeva nastoji se dobiti sitnozrnatu homogenu mikrostrukturu uz izbjegavanje lokalnih heterogenosti (makrosegregacije, kristalne segregacije, uključci). Heterogenost u atomarnom i submikroskopskom području je poželjna radi jednoličnog usporavanja gibanja dislokacija.[5]

Ovime se želi reći da broj, odnosno gustoća dislokacija ima značajan utjecaj na čvrstoću materijala te se maksimalne vrijednosti čvrstoće postižu za izrazito mali broj dislokacija (što je iznimno teško postići) ili za vrlo veliki broj (otprilike 10^{10} cm/cm³) (dijagram 2.1).[9]



Dijagram 2.1 Ovisnost gustoće dislokacija i čvrstoće materijala [9]

2.2. Primjena

Visokočvrsti čelici našli su svoju primjenu poglavito kod visokopterećenih, pouzdanih konstrukcija kao što su dijelovi vozila, zrakoplova, raketa, oružja. Posebno se koriste u tzv. „lifting“ programu koji uključuje dizalice, kranove i s njima povezane dijelove.

Prisutnost ovih čelika je umanjena zbog više cijene, a koja iznosi oko 1500 EUR/t za čelik čvrstoće 960 N/mm². [8, 10]

Prednosti pri korištenju ovih čelika jesu manja potrebna masa zbog manjeg poprečnog presjeka za istu nosivost usporedivu sa standardnim čelicima, manji utrošak energije pri zavarivanju, smanjeno vrijeme zavarivanja, manji broj prolaza uz manji depozit dodatnog materijala (DM). Velika zastupljenost visokočvrstih čelika nalazi se pri izradi prikolica i tovarnih prostora teretnih vozila, a zbog navedenih prednosti povećava se nosivost vozila te se time smanjuje emisija CO₂. Još jedna njihova bitna odlika je vrlo dobra zavarljivost te su stoga često razmatrani pri odabiru materijala pri konstruiranju.

2.3. Strenx 960 E (S 960 QT)

SSAB je nordijsko-američki proizvođač čelika. SSAB nudi proizvode s dodanom vrijednošću i usluge razvijene u bliskoj suradnji sa svojim kupcima u cilju stvaranja jačeg, lakšeg i održivog svijeta. SSAB zapošljava radnike u više od 50 zemalja, te ima proizvodne pogone u Švedskoj, Finskoj i u SAD-u. Kao proizvođač specijalnih čelika visoke čvrstoće za industriju transporta i automobila, zajedničkim radom s dizajnerima i proizvođačima automobila pomaže u ispoštovanju novih i sve striktnijih zahtjeva poput smanjena težine vozila i CO₂ emisija, povećanja troškovne učinkovitosti i poboljšanja odgovarajućih karakteristika materijala prilikom sudara.

Za najbolju primjenu i inovativnost proizvoda, a koji su temeljeni na prednostima što ih nude Strenx ili druge vrste čelika kompanije SSAB, svake se godine dodjeljuje nagrada SWEDISH STEEL PRIZE, svojevrsni Nobel među nagradama. Tako je za 2016. godinu nagradu ponio šumski traktor, a svi visokoopterećeni dijelovi izrađeni su uz primjenu visokočvrstih čelika. Pobjednik za 2017. je vagon za rasute terete (slika 2.4) čija je šasija i tovarni prostor izrađen od Strenx čelika, a zbog primjene novih visokočvrstih čeličnih materijala omogućen je sasvim novi sustav pražnjenja vagona koji ne troši energiju. [16]



Slika 2.3 Dobitnik nagrade Swedish Steel Prize za 2017.- samoistovarni vagon [8]

Seriya visokočvrstih čelika Strenx, u kojoj se nalaze čelici granice razvlačenja od 700-1300 N/mm², prisutna je kod konstruiranja i proizvodnje visokopterećenih dijelova vozila, kranova, dizalica, viličara, strojeva (slika 2.5). U tablici 2.3 navedeni su osnovni podaci o mehaničkim svojstvima Strenx čelika, a u tablici 2.2 je kemijski sastav. Postupci za očvršćivanje čelika su mnogobrojni, a najčešće su kombinacija nekoliko postupaka koje čeličane ne otkrivaju. Kod proizvodnje Strenx čelika primjenjuje se termomehanički kontrolirani proces valjanja. Ovi finoizrnatni martenzitni čelici isporučuju se u poboljšanom stanju (QT). Ingoti se zagrijavaju na temperaturu od 1200 °C, slijedi valjanje do potrebne debljine i hlađenje vodom do sobne temperature (kaljenje). Stupanj deformacije i precizno određena temperatura uz povoljan kemijski sastav razlog su dobivanja finoizrnate strukture, visokih vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i žilavosti. Nakon austenitiziranja i kaljenja u vodi sprovodi se popuštanje na temperaturama između 580-650 °C. Iako se toplinska obrada nakon zavarivanja ne predviđa, u nekim se slučajevima provodi, ovisno o preporukama proizvođača, zahtjevima konstrukcije te načinu zavarivanja.[5,8,9]

Tablica 2.2 Kemijski sastav čelika Strenx 960E (QT) [8]

STREX 960									
Kemijski sastav legure									
C ^{*)} (max %)	Si ^{*)} (max %)	Mn ^{*)} (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr ^{*)} (max %)	Cu ^{*)} (max %)	Ni ^{*)} (max %)	Mo ^{*)} (max %)	B ^{*)} (max %)
0.20	0.50	1.60	0.020	0.010	0.80	0.3	2.0	0.70	0.005

U radu se obrađuje zavarljivost čelika tipa S 960 QT (1.8933) trgovačkog naziva STREX 960 E. Ovaj čelik isporučuje se u gašenom i naknadno poboljšanom stanju. Mehanička svojstva ovih čelika navedene su u tablici 2.3. Debljine za isporuku su u rasponu 4-100 mm. Upotrebljava se za temperature do 550 °C.[8]

U porodici Strenx 960 nalaze se još Strenx Plus, cijevi (Strenx Tube, debljine 4-6 mm), čelici isporučivani u traci (Strenx MC, 3-10 mm debljine) te hladno valjani limovi (Strenx CR, 0,7-2,1 mm debljine).[8,10]

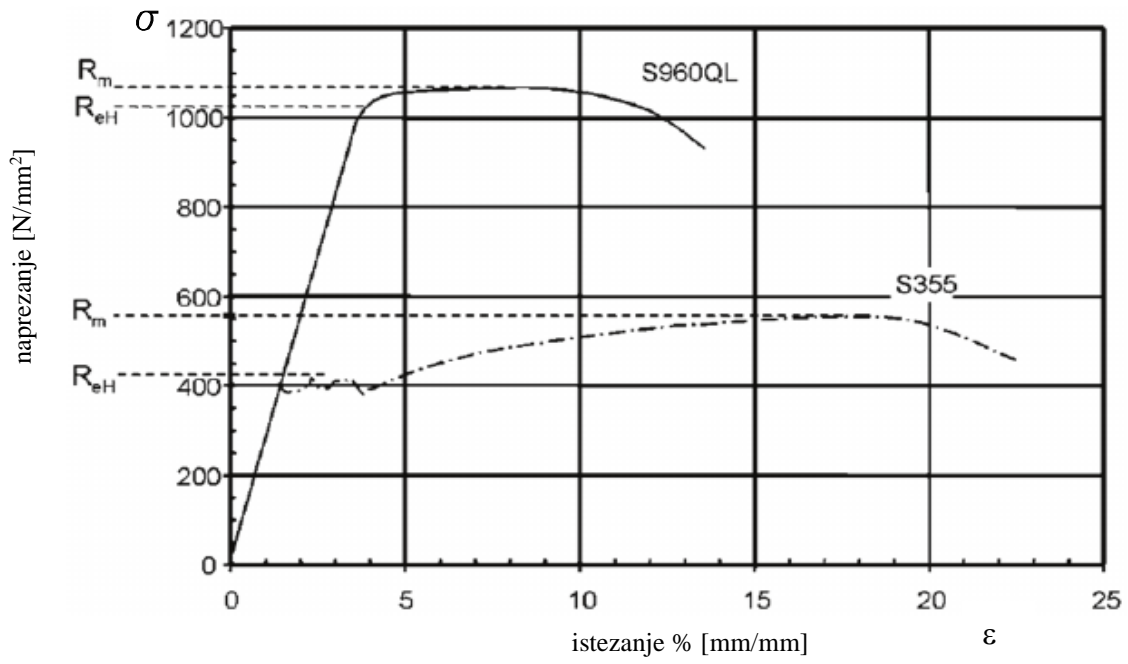


Slika 2.4 Tipični proizvodi gdje se upotrebljavaju Strenx čelici [8,10,18]

Iz tablice je vidljivo da vlačna čvrstoća nije mnogo veća od granice razvlačenja, te je produljenje smanjeno u odnosu na standardne čelike (podaci su minimalne vrijednosti a prilikom ispitivanja mogu se izmjeriti povećane vrijednosti $R_{p0,2}$, R_m i A_5 (dijagram 2.2)

Tablica 2.3 Tehnički podaci za Strenx QT čelike [8]

Naziv proizvoda	Debljina ploče	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$	Vlačna čvrstoća R_m , min[MPa]	Produljenje A_5 , [%]	CET (za $t=10\text{mm}$)	Udrani rad loma K_v , [J]
Strenx 700	4-53	700	780-930	14	0.29	69
	53-100	650	780-930	14		
	100-160	650	710-900	14		
Strenx 900	4-53	900	940-1100	12	0.36	27
	53-100	830	880-1100	12		
Strenx 960	4-53	960	980-1150	12	0.38	40
	53-100	850	900-1100	10	0.41	
Strenx 1100	4-5	1100	1250-1550	8	0.36	27
	5-40	1100	1250-1550	10		
Strenx	4-10	1300	1400-1700	8	0.42	27



Dijagram 2.2 Prikaz krivulja naprezanje-istezanje za obični i visokočvrsti čelik [7]

3. Zavarivanje

3.1. Općenito o zavarivanju

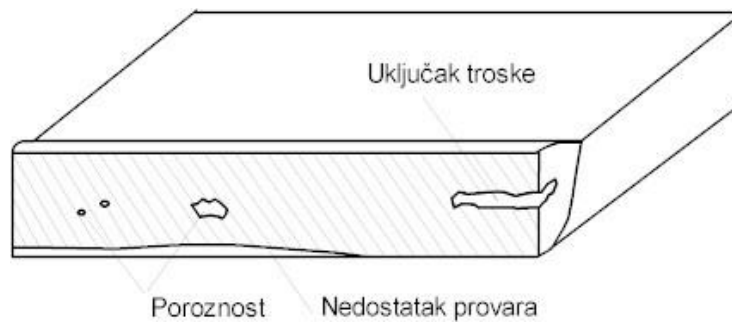
Općenita definicija zavarivanja jest spajanje dva ili više dijelova (osnovnog materijala-OM) pomoću taljenja ili pritiska na način da se dobije homogeni spoj uz ili bez dodavanja dodatnog materijala (DM). Spoj, odnosno zavar, mora biti bez grešaka (treba imati kontinuitet) i da bude što jednoličnijih svojstava.[11]

Dvije osnovne skupine postupaka zavarivanja dijele se na zavarivanje taljenjem te zavarivanje pritiskom. U daljnjim podjelama nalazi se nekoliko stotina postupaka zavarivanja, a primjena ovisi o tipovima OM ali i prema uvjetima eksploatacije, zahtjevima tehnološkog postupka ili konstruktora, te mogućnosti izvedbe pojedinog načina zavarivanja. Velike su razlike i u troškovima (energija, vrijeme, DM, obuka, strojevi...) pa se i o tome vodi računa prilikom odabira načina zavarivanja.[12]

Iako je zavarivanje zadnja tehnologija koju treba primijeniti u pri konstruiranju, ono je ipak neizostavna tehnologija nerastavljivog spajanja. Zapravo je to i najvažniji tehnološki proces koji se koristi u današnjoj industriji pri spajanju. Najčešća primjena je u strojogradnji, brodogradnji, građevinarstvu i procesnoj industriji, gdje se koristi za izradu nosećih metalnih konstrukcija spajanjem pojedinih dijelova (limova, profila), za izradu procesne opreme (posude i cjevovodi pod tlakom) te za popravak istrošenih ili slomljenih metalnih dijelova. Zavarivanje nije samo spajanje metala sa metalom, već su moguće i mnoge kombinacije (nemetall-metal, nemetall-nemetall), spaja se keramika, staklo, polimeri i slično, no u praktičnom smislu podrazumijevamo pod zavarivanje spajanje dva metala.[13]

U odnosu na spajanje zakovicama ili u odnosu na odljevke, ušteda materijala je 20% odnosno do 50% u korist konstrukcija sa zavarenim spojevima. U prilog zavarivanju ide i faktor slabljenja „V“ u zavarenom spoju u odnosu na zakovični spoj. Ovaj faktor je funkcija od zahtjeva za pouzdanosću i kvalitetom, opsega metoda KBR i vrste zavarenog spoja, a omjer je svojstava zavara i svojstava OM (1) (slika 3.1.).[12,13 ,14]

$$V = \frac{\textit{svojstva zavara}}{\textit{svojstva OM}} \leq 1 \quad (1) [12]$$



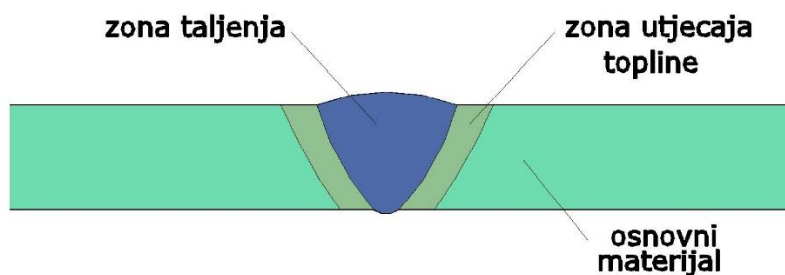
Slika 3.1 Faktori koji utječu na slabljenje zavarenog spoja [12]

Uz ovaj faktor možemo izračunati dopuštena naprezanja zavara prema formuli (2):

$$\sigma_{dop ZS} = \sigma_{dop OM} * V \quad (2) [12]$$

Svojstva zavarenog spoja Z (npr. čvrstoća) uvijek su manja ili jednaka svojstvima osnovnog materijala, no pri tome svojstva pojedinih zona zavarenog spoja (zona utjecaja topline, zona taljenja)(slika 3.2.) mogu biti bolja od svojstava osnovnog materijala. Zavareni spoj obuhvaća zonu taljenja (ZT), zonu utjecaja topline (ZUT) koja se također sastoji od pojedinih zona i zonu osnovnog materijala OM u kojoj je došlo do promjene svojstava uslijed zavarivanja. To je u stvari lanac svojstava, koji je toliko jak koliko je jaka njegova najslabija karika. Općenito gledano u odnosu na dominantni otkaz, svojstva osnovnog materijala OM mogu biti bolja, jednaka ili slabija od svojstava zavarenog spoja Z, odnosno svojstava pojedinih zona zavarenog spoja (ZUT, ZT).[14]

Lošija mehanička svojstva zavara prvenstveno su posljedica unosa topline da bi se rastalili OM i mogući DM te spojili u zajedničkoj kupci rastaljenog materijala. Kako tehnologije spajanja materijala kod kojih se toplinska energija ne koristi ili se unosi u znatno manjoj mjeri, ne daju spojeve dovoljne čvrstoće ili su preskupe (koriste se za specijalne namjene), zavarivanje taljenjem jest najbolji odabir. Kod taljenja materijala potrebno je voditi računa o ponašanju materijala tokom termičkog ciklusa, kako u ZT tako i u ZUT(slika 3.2.) [13]



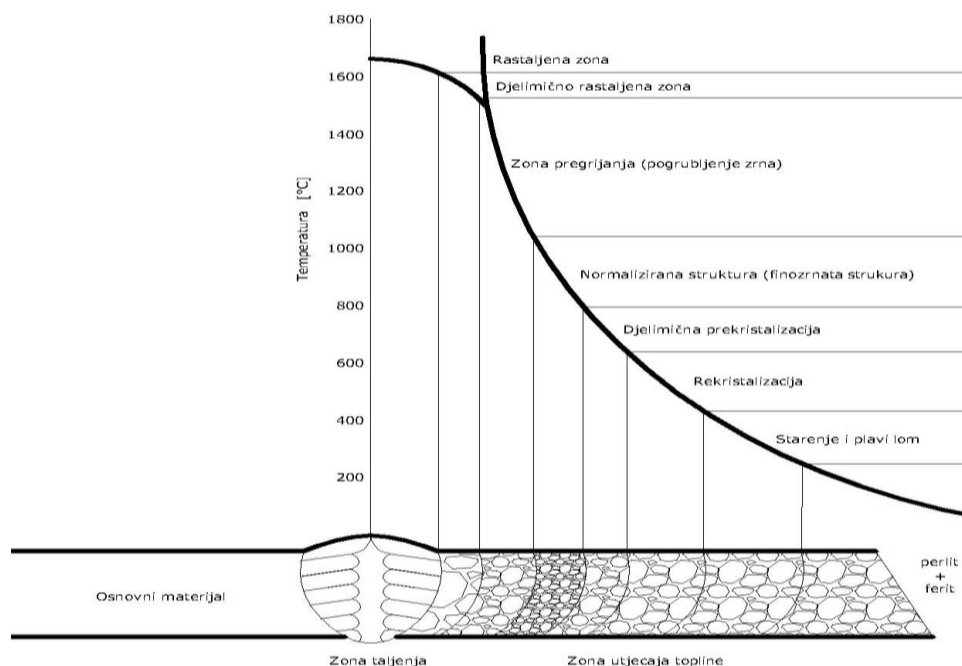
Slika 3.2 Osnovne zone zavora [15]

3.2. Zavarivanje taljenjem

Posebnost kod većine postupaka zavarivanja taljenjem je vrlo brza promjena temperature (do 1000°C/s) zbog lokalnog unošenja topline nekim izvorom topline. Lokalno, na vrlo uskom području, temperature prelaze granične temperature taljenja, pa sve do temperature okoline . Zbog navedenog dolazi do istezanja i stezanja, odnosno deformacija i napetosti, do kemijskih reakcija (između rastaljenog materijala i okoline ili troske), do različite rastvorljivosti među elementima (npr. otapa se mnogo više jednog elementa u drugom nego što je to kod krutog stanja) te do difuzijskih procesa (seljenje elemenata iz jednog u drugo područje, migracija). Iz navedenog se zaključuje da zavarivanje može znatno utjecati na promjene kemijskog sastava ZT i strukturnih promjena ZUT(slika 3.3.), a čime obično dolazi do pogoršanja mehaničkih i ostalih svojstava zavarenog spoja.[11]

Uz promjenu svojstava dolazi i do grešaka (pukotine, poroznost, uključci...) koji još dodatno smanjuju mehanička svojstva i utječu na slabljenje zavarenog spoja(slika 3.1.). Sklonost pojavama pukotina u ZT i ZUT procjenjuje se analitički na osnovu različitih formula za ekvivalent ugljika te eksperimentalno nizom laboratorijskih metoda.[17]

Tema o sklonosti materijala zavora greškama, njihovom obrazloženju i izračunu obraditi će se u poglavlju o zavarivanju Strenx 960 čelika gdje će se i vršiti pojedini izračuni na osnovu konkretnog primjera.



Slika 3.3 Prikaz različitih područja u ZUT kod čelika sa 0,2% C [17]

3.3. Unos topline

Pri zavarivanju taljenjem jedna od najvažnijih veličina za proučavanje toplinskih utjecaja jest unos topline. Unos topline (toplinski input- E), je količina topline koju unesemo po jedinici duljine zavara (J/mm ili J/cm). Ovo je ukupan unos topline, no kako se dio gubi kroz sam električni luk i ostale gubitke, u sam materijal će biti unesena efektivna toplina E_{ef} , (u pojedinim literaturama Q), a koja je u odnosu na ukupnu energiju pomnožena sa faktorom ili stupnjem korisnosti η (ili k). Faktor korisnosti ovisan je o postupku zavarivanja (tablica 3.1) Ukupna unesena topline ovisna je o osnovnim parametrima kod zavarivanja električnim lukom, naponu, jakosti struje i brzini zavarivanja, odnosno gibanja električnog luka. Za neke slučajeve zavarivanja preporuča koristiti formule za izračun toplinskog inputa uvažavajući debljinu materijala odnosno površinu presjeka zavara.[11]

Toplinski input je zbroj primarno i sekundarno unesene topline u materijal. Primarno unesena toplina je kroz predgrijavanje, ranijim prolazima ili pak toplinu okoline, dok je sekundarna sam unos topline kroz električni luk tijekom zavarivanja. Pri izračunima se svakako mora voditi računa o ukupno unesenoj toplini, a ne samo onoj kroz energiju električnog luka ili kojeg drugog izvora energije. [11].

Za zavarivanje snaga izvora energije mora biti minimalno tolika da lokalno zagrije određenu zonu (npr. rubove materijala koji se spajaju pri sučeonom spoju) na zahtijevanu temperaturu, odnosno

temperaturu iznad tališta OM i DM. Veće odvođenje topline (veća debljina OM, bolji vodič topline, specifična toplina...) zahtijeva i veću snagu izvora za istu temperaturu odnosno veći toplinski input. Više topline može se unijeti promjenom parametara zavarivanja iz jednadžbe toplinskog inputa (3) tj. povećanjem struje, napona ili stupnja korisnog djelovanja te smanjenjem brzine zavarivanja. Potrebno je obratiti pozornost na jedinicu za unos topline koja je najčešće J/mm ali može biti izražena i u drugim izvedenim jedinicama (J/cm, kJ/mm) ovisno o literaturi te o jedinici brzine gibanja (mm/min, mm/s ili druge)

$$Q = E_{ef} = \frac{U * I}{v} * \eta, \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (3) [8,12]$$

Unos topline povećava se i sa predgrijavanjem ili grijanjem međuprolaza. Posljedica prevelikog ili premalog toplinskog inputa ogledaju se u promjeni strukture ili svojstava materijala u ZT ili ZUT. Legirani materijali dobiveni posebnim postupcima gdje se za dobivanje određenih svojstava primjenjuju regulirana temperaturna područja uz funkciju vremena, često gube ta svoja svojstva. Unosom određene količine topline izbjegavaju se takve pojave, a na taj način još se smanjuju i mogućnosti pojave hladnih pukotina.[11, 16]

Unos topline u zavareni spoj ima i dodatne učinke (tablica 3.1), a koji ovise o količini unesene topline u odnosu na proračunsko najpovoljnije vrijednosti.

Tablica 3.1 Učinci unosa topline u zavar i koeficijenti korisnosti k [18]

Toplinski input može se proračunati pomoću slijedeće formule	
$Q = \frac{\eta \times U \times I \times 60}{v \times 1000}$	Stupanj korisnosti η
Q = unos topline [kJ/mm]	MMA 0.8
U = napon [V]	MAG, svi tipovi 0.8
I = jakost struje [A]	SAW 1.0
v = Brzina zavarivanja [mm/min]	TIG 0.6
η = Stupanj korisnosti [bez dimenzije]	

Općeniti učinci unosa topline u zavareni spoj	
<ul style="list-style-type: none"> Bolja žilavost Povećana čvrstoća Smanjena deformacija Manja zaostala naprezanja Uži ZUT 	<p>smanjeni unos topline povećani unos topline</p> <ul style="list-style-type: none"> veća produktivnost za uobičajene metode zavarivanja

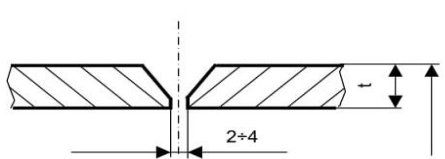
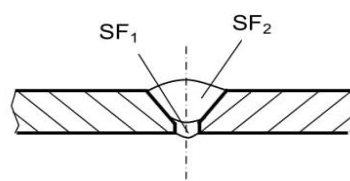
Proračun potrebne količine toplinskog inputa kao i moguće temperature predgrijavanja T_0 , izračunavaju se prema nekoliko metoda, a u koje je uključen i ekvivalent ugljika, kemijski sastav i drugi parametri ovisno o metodi. Sve veće čeličane te najraširenije vrste čelika imaju već gotove proračune za brzo određivanje potrebnih vrijednosti. Sve parametre za zavarivanje (napon, struja, brzina, temperature...) potrebno je podesiti prema WPS-u (specifikaciji postupka zavarivanja) i nije dozvoljeno neovlašteno mijenjati ih.

3.4. Dokumentacija za postupak zavarivanja

Kako bi se sproveda proces zavarivanja, a koji daje kvalitetan i po svojstvima ujednačen zavar, potrebno je izraditi dokumentaciju o zavarivanju. Nagadañje parametara i iskustvo zavarivača mogu dati samo vizualno dobar zavar, no za zavar bez značajnog gubitka mehaničkih svojstava potrebno je točno odrediti parametre zavarivanja. Kod običnih čelika odstupanje od zadanih parametra neće uzrokovati bitnije promjene, no kod visokočvrstih čelika nužno je pridržavanje svih određenih stavki.

Najbitniji dokument za zavarivača je WPS – Welding Procedure Specification (SPZ-specifikacija postupka zavarivanja), a koji sadrži podatke o parametrima zavarivanja, postupku, položaju, vrsti OM i DM, temperaturi predgrijavanja, međuprolaznoj temperaturi te drugim podaci vezanim uz samu tehnologiju zavarivanja. Dva su tipa ovog dokumenta. WPS je već odobreni dokument koji se koristi u proizvodnji, a prije njega izrađuje se pWPS (prequalified Welding Procedure Specification) koji sadrži proračunate podatke i parametre te se na osnovu njega vrši provjera postupka izrađuje konačan WPS.

WPQR (Welding Procedure Qualification Record) je dokument koji osim svih spomenutih parametara sadrži i podatke o ispitivanju i odobravanju od strane ovlaštene osobe ili institucije te se čuva u arhivi, za razliku od WPS-a koji se nalazi i na radnom mjestu zavarivanja. Kako bi WPS bio čitljiviji preporuka je da se nalazi na jednoj stranici, kao u primjeru na slici 3.4. [9]

SFSB		UPUTA ZA ZAVARIVANJE WELDING PROCEDURE SPECIFICATION SCHWEISSANWEISUNG				Broj/No./Nr. : SF-000 Rev. 0				
PQR No./WPAR Nr. : VP03/2001		Object :		Pr.br./Works No./Pr.Nr. :						
Područje važenja/ Valid range/ Geltungsbereich										
Dio/Part/Teil 1				Dio/Part/Teil 2						
Materijal	1.0305	St35.8			sa Materijal	1.0305	St35.8			
Material					to Material					
Werkstoff					an Werkstoff					
D-mjera/Size/Mass	od/from/von	12,5	do/to/bis	50,0 [mm]	D-mjera/Size/Mass	od/from/von	12,5 do/to/bis 50,0 [mm]			
t-mjera/Size/Mass	od/from/von	3	do/to/bis	9 [mm]	t-mjera/Size/Mass	od/from/von	3 do/to/bis 9 [mm]			
a-mjera/Size/Mass	od/from/von	-	do/to/bis	-, [mm]						
Oblik spoja prema crtežu/ Joint Design acc. To Drawing/ Schweissnaht form nach Zeichnung:				Slijed zavarivanja/ Welding order/ Schweißfolge:						
										
Pojedinosti zavarivanja/ Details of welding/ Einzelheiten für das Schweißen										
SF br. No. Nr.	Slijed zav. Welding order for Schweißfolge für	Postupak Procedure Prozess	Položaj zav. W. position Schw. pos.	Dodatni materijal EN/DIN Filler metal EN/DIN Zusatzwerkstoff EN/DIN	Promjer Diameter Durchmesser [mm]	Struja Current Stromstärke [A]	=, ~ / +, -	Napon Voltage Spannung [V]	Brzina zav. Travel speed Schweissgeschw. [cm/min.]	Šir. nihanja Oscillation Pendelbreite max. [mm]
1	Root	141	PA, PF	WMoSi	2+2,4	70+140	=, -	-	-	-
Korijen	Wurzel			DMO-IG						
2	Fillpass	141	PA, PF	WMoSi	2+2,4	70+180	=, -	-	-	-
Popuna	Füllage			DMO-IG						
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SF br. No. Nr.	Zaštitni plin Shielding gas Schweissgas		Korjeni zaštitni plin Backing gas Formirgas		Sekundarni zaštitni plin Trailing gas Sekundargas		Prašak za zavarivanje Welding flux Schweisspulver			
	Vrsta/ Art	[l/min.]	Vrsta/ Art	[l/min.]	Vrsta/ Art	[l/min.]				
1	Ar / 99,996	6+12	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Ar / 99,996	6+12	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Predgrijavanje/ Preheat/ Vorwärmung : Međuprolazna/ Interpass/ Zwischenl. temp. max. Hlađenje prije TO/ Cooling before PWHT/ Abk.vor der WB :				RT, min. 5°C 500 °C - °C/ h		Brzina zagrijavanja/ Heating rate/ Erwärmungsrate : Temperatura/ Temperature range/ Glühtemperatur :		-		°C/h °C
				Vrijeme držanja: Time range:		-		-		[mm]
				Haltezeit:		-		-		[min]
				Brzina hlađenja/ Cooling rate/ Abkühlungsrate :		-		-		°C/h
Posebnosti/ Particularly/ Besonderheiten: -										
Napomene/ Remarks/ Anmerkung : Ispitni uzorak/ test coupon/ Prüfstück: Ø25x4,5mm; 15Mo3 !										
Izradio/ Prepared by/ Erstellt von:				Kontrolirao/ Checked/ Geprüft:				Nadzor/ Author.insp./ Inspektor		
Datum / Date:				Datum / Date:				Datum / Date:		

Slika 3.4 Primjer upute za zavarivanje sa nužnim parametrima (WPS) [21]

4. Zavarivanje visokočvrstih čelika Strenx 960

4.1. Svojstva i gubitak svojstava zavarenog spoja

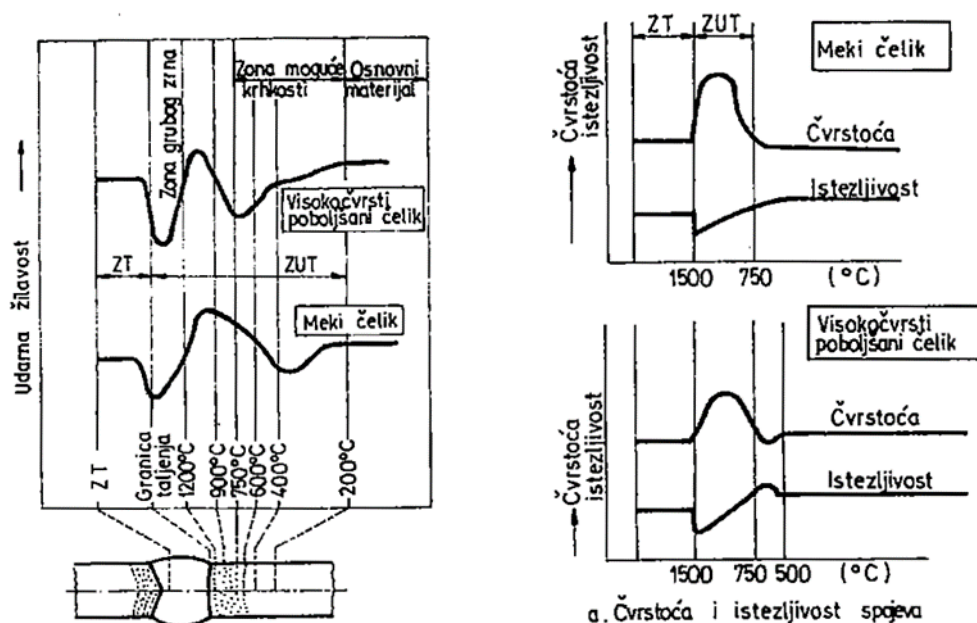
Zavarljivost visokočvrstih čelika je vrlo dobra zbog vrlo niskog sadržaja C ($<0,2\%$) te malim sadržajem ostalih legiranih elemenata. Ova dobra svojstva čelika visoke čvrstoće se narušavaju procesom zavarivanja zbog unosa topline i naknadnog veoma brzog hlađenja.

Postupci zavarivanja za visokočvrste čelike u biti jesu svi standardni postupci koji se primjenjuju i za ostale vrste čelika. Ono što je razlika od običnih čelika pri postupcima zavarivanja je mnogo strože pridržavanje propisanih parametara za zavarivanje prema WPS-u. Naime, kod zavarivanja običnih čelika mogu se svojstva zavarenog spoja sniziti, no to sniženje nije toliko veliko kao što bi to bio slučaj kod visokočvrstih čelika (slika 4.1). Posebno je ovdje smanjenje udarne žilavosti u pojedinim zonama ZUT i u ZT, te istežljivosti koja ima oštar pad u određenom području. Poštivanjem preporuka za zavarivanje, čvrstoća zavarenog spoja pri visokočvrstim čelicima neće bitnije odstupati od čvrstoće OM. Izgubimo li prednosti koje smo imali upotrebom kvalitetnih materijala (u ovom slučaju Strenx 960), cijeli smisao izrade konstrukcije od takvog materijala je izgubljen. Upravo zbog povećane mogućnosti gubitka doista visokih performansi Strenx 960 čelika, zavarivanju je potrebno pridati nužnu pažnju. Proizvođač Strenx čelika, tvrtka SSAB, izdaje mnoge priručnike kako bi sve prednosti ovih iznimnih materijala bile maksimalno iskorištene. U izradi rada korištene su mnoge informacije dane direktno od proizvođača te je korištena i radna knjiga za zavarivanje (Welding handbook) posebno namijenjena ovim čelicima.

Koliko je tema zavarivanja visokočvrstih čelika zanimljiva svima koji se na neki način bave zavarivanjem, potvrđuje i činjenica o iznimnom broju seminara, istraživanja, završnih radova i ostalih članaka, a koji su vezani uz ovu temu. Radovi sa drugom tematikom, odnosno o drugim materijalima, iz područja zavarivanja su u znatno manjem opsegu.

Gubitak povoljnih svojstava pri zavarivanju visokočvrstih čelika najviše se ogledaju u pojavi pogrešaka u ZT i ZUT, posebice pukotina, te u promjeni strukture u tim područjima. Promjena strukture je najčešće u krhku gruboznatu strukturu u ZUT, tik uz liniju taljenja (slika 4.1). Još se pojavljuje i trostit na mjestima gdje je temperatura bila između A_1 i A_3 te omekšanje i smanjenje čvrstoće u području koje je bilo zagrijano na temperaturu od oko $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Izbjegavanje pojava promjene strukture i svojstava je nemoguće izbjeći, ali se ta zona može bitno suziti i time smanjiti

njen utjecaj. I pojava pogrešaka se može bitno smanjiti, no potrebno je, kao što je i prije naglašeno, strogo se pridržavati propisanih postupaka i parametara pri zavarivanju.[11]



Slika 4.1 Prikaz promjene mehaničkih svojstava u odnosu na temperaturu zagrijavanja [11]

Za izbjegavanje grešaka i smanjenje gubitka svojstava pri zavarivanju čelika, a naročito visokočvrstih, potrebno je obratiti pozornost na slijedeće parametre:

- čistoća pripremljenog spoja - očišćeno od vlage, i ostataka ulja, hrđe i okujine
- predgrijavanje prema naputku proizvođača, stanju okoline i zadanim parametrima prema WPS-u
- unos topline (toplinski input) - parametri na samom aparatu za zavarivanje
- izbor dodatnih materijala
- zaštitni plin
- slijed zavarivanja i veličina zazora u spoju (slika 4.7).[18]

4.2. Priprema spoja

Priprema spoja za ploče debljine 4 i više mm izvodi se glodanjem, brušenjem ili toplinskim rezanjem. Za Strenx čelike priprema spoja se ne razlikuje od pripreme za mekane čelike. Pri toplinskom rezanju nastaje tanki oksidni film na površini spoja, a kojeg se preporuča ukloniti neposredno prije zavarivanja.[18]

Vrši li se priprema spoja rezanjem plazmom, preporučuje se korištenje kisika kao plina u plazmi jer dušik (koji se također koristi) može izazvati poroznost u zavarenom spoju. Ako se ipak koristi dušik, obavezno pobrusiti površinu spoja minimalno 0,2 mm. Kod tankih limova umjesto brušenja za skidanje filma, može se upotrijebiti struganje.[18]

Kako bi se što više smanjilo unošenje u zavar odnosno u kupku rastaljenog metala, osim geometrijske pripreme zavara potrebno je zavar očistiti i od nečistoća, ulja, hrđe, okujine, a koje se mogu skupiti na mjestu obrade za zavara ako je duže vremena ta obrađena površina bila izložena atmosferskim utjecajima (duže od 4 sata). Preko ovih ostataka u zavar mogu ući nepoželjni elementi poput H, O, N te bitno utjecati na strukturu zavara, pojavu grešaka i smanjenje mehaničkih svojstava. Ovisno o sadržaju nečistoća potrebno je odabrati metodu čišćenja, a one mogu biti već ranije spomenute brušenje ili struganje.[18,19]

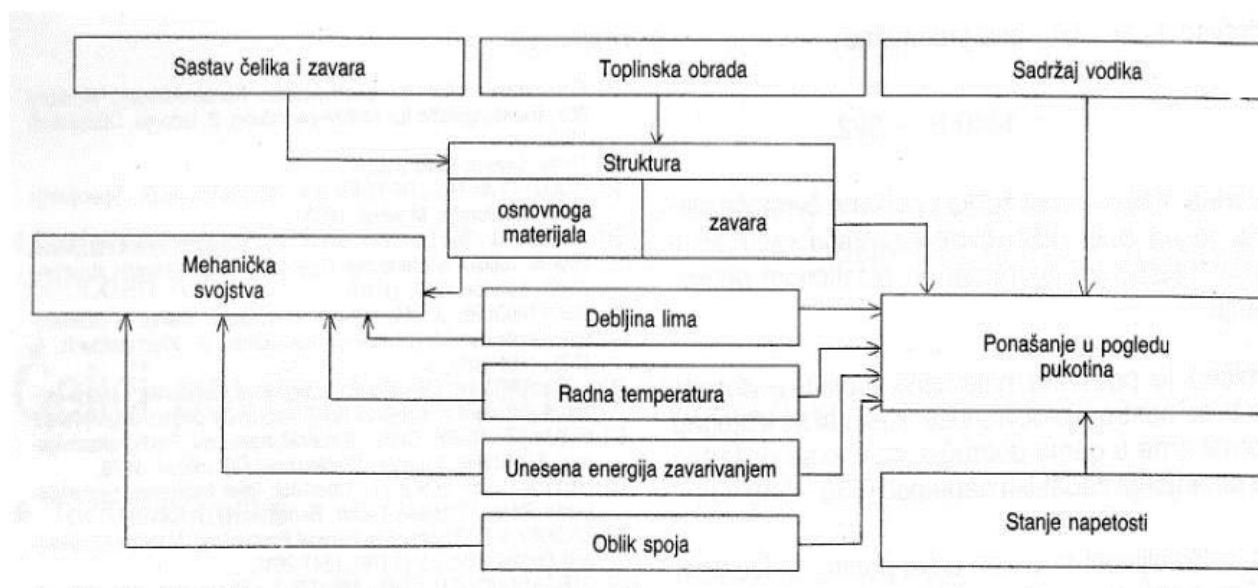
Kod visokočvrstih Strenx čelika isporuka iz čeličane uključuje antikorozivnu zaštitu u obliku prevlake (cink-silikat). Debljina ovog sloja iznosi 10 ili 15 μm , ovisno o vremenskom trajanju antikorozivne zaštite (tri, odnosno šest mjeseci). Zbog niskog sadržaja cinka nije nužno skidati zaštitnu prevlaku jer ona tek neznatno povećava poroznost zavara. No, za najbolje rezultate zavarivanja, ali i za druge položaje osim vodoravnog, preporučuje se skinuti zaštitni sloj u području zavara (slika 4.2). Kod MAG (sa punjenom žicom) i REL postupka, gdje je i inače poroznost najmanja, u slučajevima kada se zavaruje preko zaštitnog sloja, ili kada se on skida, potrebno je osigurati dobro proventiliranu prostoriju za izbjegavanje štetnih utjecaja na zavarivača i njegovu okolinu. Ovaj zaštitni sloj omogućuje u ranije spomenutim vremenskim rokovima i bojanje bez potrebe skidanja iste. Skidanje prašine, nečistoća i ulja je i dalje potrebno, a naročito ako su materijali uskladišteni na mjestima gdje je veća zaprašenost.[19]



Slika 4.2 Skidanje zaštitnog sloja sa Strenx čelika [19]

4.3. Zavarljivost Strenx 960 čelika

Kada se zavaruju čelici povišene čvrstoće potrebno je procijeniti sklonost materijala pojavi različitih vrsta pukotina, otvrdnjavanju, smanjenju žilavosti i sl. Određuje se zavarljivost materijala koja se može opisati kao zadovoljavajuća ili ne (kvalitativna ocjena) odnosno svojstva zavarenog spoja u odnosu na dominantni (najveća vjerojatnost pojave) otkaz. Osnovni faktori koji utječu na zavarljivost materijala su legirni sastav, geometrija pozicije, priprema spoja, DM (slika 4.3). Ugljik ima veliki utjecaj na zavarljivost pa se smatra da čelici sa više od 0,24% C imaju ograničeni zavarljivost, odnosno moraju se zavarivati uz posebne mjere.[20, 21]



Slika 4.3 Shema utjecaja na zavarljivost čelika [21]

Strenx 960E (S960 QT) ima sadržaj ugljika 0,2% te je zavarljiv sa stajališta sadržaja ugljika. Za potpunu ocjenu zavarljivosti potrebno je izračunati ekvivalent ugljika jer utjecaj na zavarljivost imaju i ostali legirni elementi. Kako ne postoji jedinstvena formula za ovu vrijednost, niti pak dobivene vrijednosti imaju isto značenje, poželjno je koristiti se što je moguće više uputama proizvođača. Svi veći i značajniji proizvođači čelika imaju svoje brošure iz kojih se mogu očitati najznačajniji podaci potrebni za zavarivanje. U tim brošurama navedeni su, kao u primjeru SSAB Strenx čelika (slika 4.4),



Slika 4.4 Radna knjiga zavarivanja (*Welding handbook*) tvrtke SSAB za Strenx čelike [8]

podaci o potrebi predgrijavanja, temperaturi predgrijavanja i međuslojnoj temperaturi, toplinskom inputu i preporuke za DM. Parametri zavarivanja nisu navedeni, njih se mora proračunati na osnovu danih podataka za svaki slučaj posebno te unijeti u pWPS i primjenjivati ih prilikom zavarivanja.

Metode za izračun ekvivalenta ugljika razlikuju se prema utjecaju pojedinih legiranih elemenata na zavarljivost, a na osnovi sadržaja ugljika ili vrijednosti granice razvlačenja. Za visokočvrste čelike Strenx preporuča se metoda izračuna prema IIW (4):

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (4) [20]$$

Ili formula (5) koju SSAB preporuča za visokočvrste Strenx čelike :

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (5) [19]$$

Ove i slične formule uz sadržaj ugljika daju nam uvid u zavarljivost čelika i postupke koje je potrebno provesti za uspješno izvršavanje tog zadatka. Orijentacijska vrijednost do koje ne treba poduzimati nikakve mjere prije zavarivanja iznosi 0,40. Većina konstrukcijskih visokočvrstih čelika ima potrebu za predgrijavanjem, a tu potrebu ćemo utvrditi računski iz prije spomenutih formula.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} = 0,2 + \frac{1,6}{6} + \frac{0,7 + 0,8 + 0}{5} + \frac{2 + 0,3}{15} = 0,92$$

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{40} = 0,2 + \frac{1,6 + 0,7}{10} + \frac{0,3 + 0,8}{20} + \frac{2}{40} = 0,54$$

Izračuni prema obje metode pokazuju ekvivalent ugljika preko 0,4 što nam govori o uvjetnoj zavarljivosti. Dobivene vrijednosti su za maksimalne sadržaje legirnih elemenata, što je u praksi rijetko postizivo. Kako su udjeli legirnih elemenata u zavisnosti, nikad se ne događa da su svi elementi u maksimalnim koncentracijama. Zbog toga je preporučljivo koristiti podatke iz literature proizvođača gdje su vrijednosti dobivene na osnovi mnogo većeg broja uzoraka i iskustva samog proizvođača. Kako je još i upitna opravdanost pojedine metode, preporučljivo je koristiti podatke proizvođača. Prema brošuri i tehničkom listu za Strenx 960 čelike, kod kojih CEV ekvivalent iznosi 0,38 do debljine ploče 53 mm odnosno CET iznosi 0,58, preporučuje se izvršiti predradnje prije zavarivanja, konkretno predgrijavanje. Ove vrijednosti su za prosječan kemijski sastav pa zbog sigurnosti dobivanja homogenog i povoljnog zavara, zavarljivost Strenx QT čelika svrstana u područje ograničeno zavarljivi sa mogućnošću pojave pukotina, a ima i razlika ovisno o debljini lima. Druge vrste Strenx čelika (Strenx MC, Strenx Plus, Strenx CR) imaju druge preporuke (nije potrebno predgrijavanje) te ih je obavezno pročitati prije upotrebe, odnosno zavarivanja i toplinskih obrada.

Glavni razlog za ispitivanje zavarljivosti je postizanje pouzdanog zavarenog spoja, bez grešaka i bez smanjenja vrijednosti mehaničkih svojstava OM, a sa kojima je i izvršen proračun konstrukcije. [11,20]

4.4. Greške u zavarenim spojevima

U postupcima zavarivanja pojavljuju se greške zavarenog spoja, a koje prema EN 26520 dijelimo na

1. Pukotine – hladne, tople, zbog ponovnog zagrijavanja, lamelarne (slojevito trganje)
2. Poroznost (plinski uključci) i druge praznine
3. Čvrsti nemetalni i metalni uključci
4. Nprovarenost korijena i greške vezivanja
5. Nepravilnost oblike – zajede, nadvišenja, prokapljine u korijenu, kutne deformacije
6. Ostale nepravilnosti – mjesta paljenja luka, rasprsnute kapljice metala. [11]

Od navedenih grešaka koje se pojavljuju u ZT ili ZUT najopasnije su pukotine jer su to najjači koncentratori naprezanja. Od vrha pukotine greška se može širiti do kritičnih dimenzija i pri tome uzrokovati lom po čitavom presjeku. Pukotine imaju različite mehanizme nastajanja pa su prema tome i razvrstane. Za sve pukotine postoje i određeni uvjeti nastanka pa se uklanjanjem ili smanjenjem utjecaja tih uvjeta uklanjaju ili smanjuju mogućnosti nastanka pukotina. [11, 19]

Pri zavarivanju rastaljeni metal u sebi otapa veće količine O, N, H pa dolazi do međusobnih reakcija plin metal a koje pak bitno utječu na svojstva i kvalitetu zavarenog spoja. Izvori ovih plinova mogu biti nečistoće osnovnog i dodatnog materijala, atmosfera koja okružuje rastaljene kapi i kupku metala. Zbog toga se kod nekih postupaka vrši zavarivanje u pod zaštitnim plinom (TIG, MIG/MAG), zaštitnim praškom ili troskom (EP ili EPT) ili oblogom DM koja pri zavarivanju stvara zaštitnu atmosferu.[11]

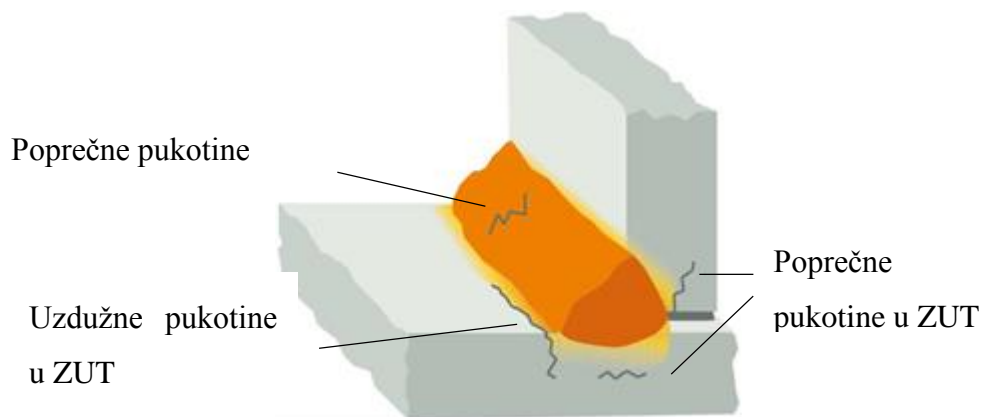
4.5. Hladne pukotine

Hladne pukotine (Cold cracking) ili vodikova krhkost (Hydrogen cracking) nastaju na temperaturama nižim od 300°C i vrlo su opasne jer se mogu pojaviti i nekoliko sati, ili dana nakon zavarivanja, te uzrokovati zakašnjeli lom (Delayed fracture) [4, 6, 10]. Hladne pukotine i vodikova krhkost u velikom dijelu literature smatra se istim problemom, no sama vodikova krhkost je nešto širi pojam od hladnih pukotina čiji uzrok jest i vodik. Tako u literaturi tvrtke SSAB se spominje isključivo vodikova krhkost.

Ove vrste pogrešaka mogu ostati neprimijećene pri ispitivanju kvalitete zavarenog spoja ukoliko se ona provode neposredno nakon zavarivanja. Hladne pukotine su gotovo nepredvidljive i najopasnije vrste pukotina, a povezuju se s količinom apsorbiranog vodika u toku procesa zavarivanja. Hladne pukotine se u materijalu mogu nalaziti u ZUT-u, ali i u metalu zavara (slika 4.5), poprečne su ili uzdužne, a nastaju kao posljedica difuzije vodika. One mogu nastati ukoliko se pojave sljedeći preduvjet:

- kritična koncentracija difuzijskog vodika,
- kritično naprezanje – zbog krutosti zavarenog spoja
- osjetljiva mikrostruktura (bainit ili martenzit)

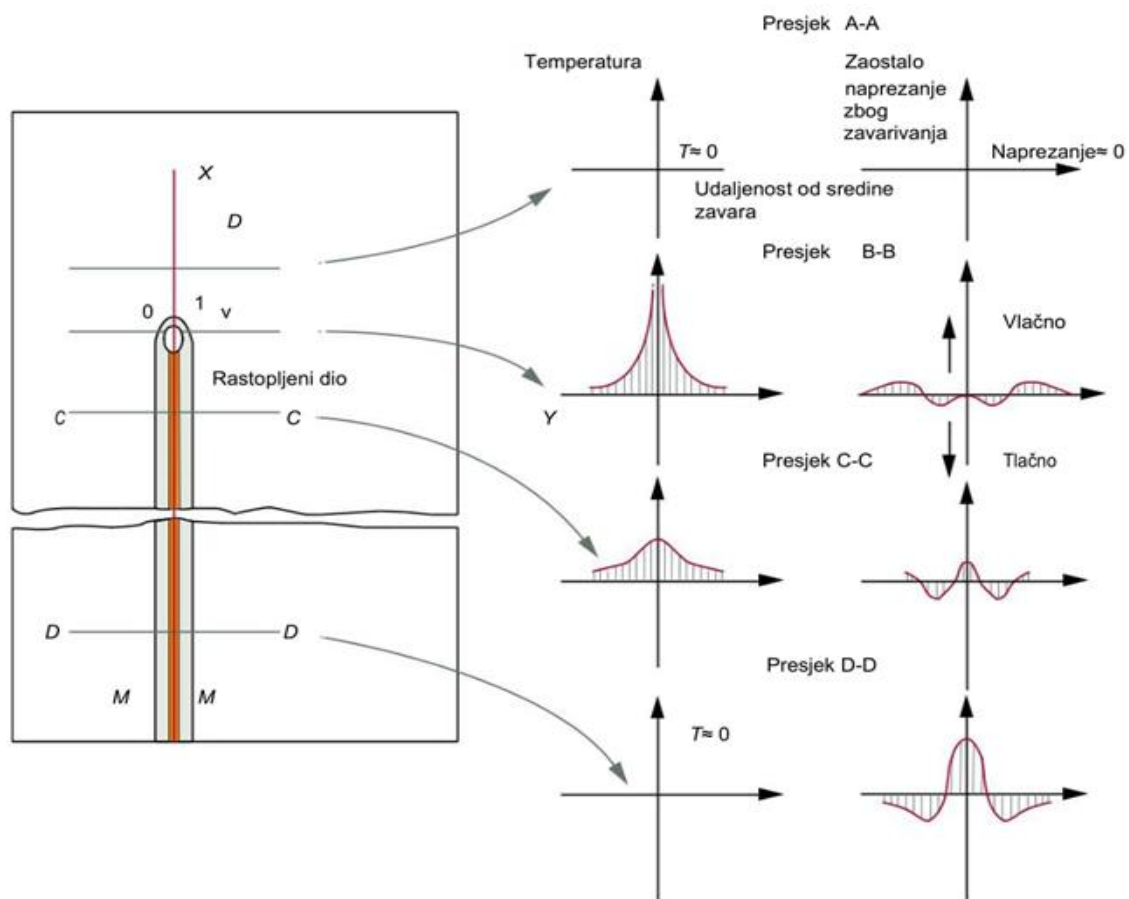
te ukoliko je temperatura materijala niža od 300°C . Ako je jedan od ovih minimaliziran, ali su ostali pojačani, svejedno može doći do pojave pukotina. Cilj je sva tri uzroka nastajanja ovih pukotina smanjiti na mjeru u kojoj neće izazvati pukotine. [11,19,22]



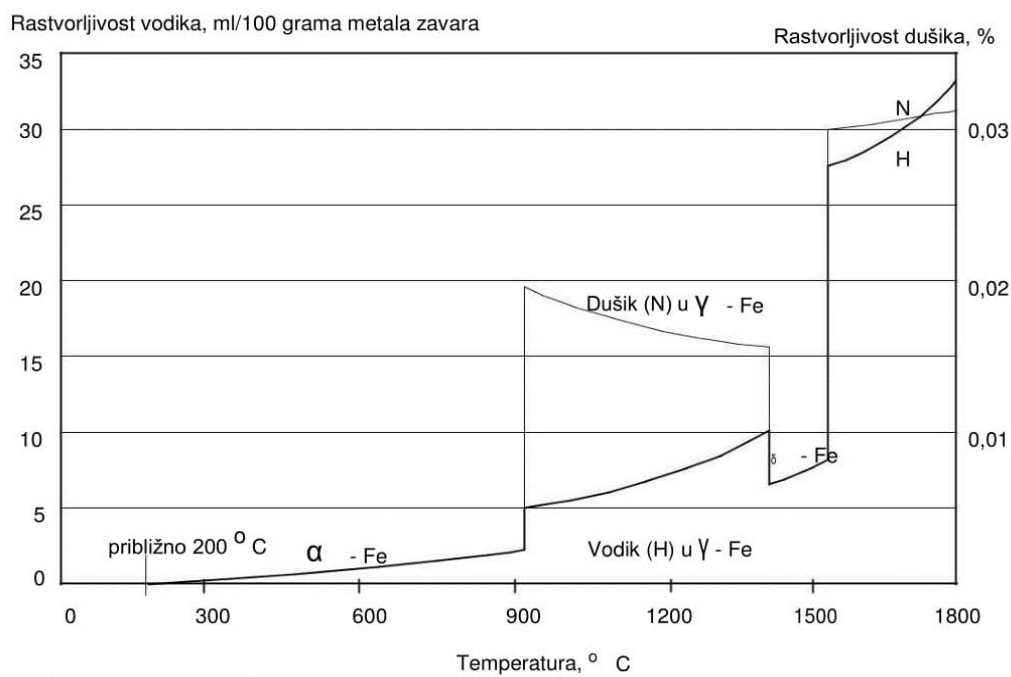
Slika 4.5 Položaj i orijentacija hladnih pukotina u zavarenom spoju [19]

Jedan od najvažnijih učinaka otopljenog vodika u kristalnoj rešetki visokočvrstog čelika je nastanak krhke strukture u uvjetima u kojima bi inače taj čelik bio duktilan. Ukoliko čelik sadrži otopljeni vodik, pri određenim koncentracijama vodika, može nastupiti trenutni lom ukoliko naprezanja rastu do naprezanja loma u odsutnosti vodika, ili može nastupiti zakašnjeli lom pri znatno nižim naprezanjima. Potrebno je naglasiti da toplinska obrada i metalurški postupak proizvodnje materijala, ili postupci proizvodnje koji uključuju postupke zavarivanja, kao i uvjeti izlaganja vodik, mogu značajno utjecati na otpornost čelika prema pojavi vodikove krhkosti. Vodikova krhkost rezultat mehanizma djelovanja atomarnog vodika, a ne molekularnog vodika. Ulaskom vodika u materijal (kod željeza u iznosu od 0,1 ppm pri 20⁰ C) može doći do pojave krhkosti, gdje uz najmanje vlačno naprezanje može doći do nastanka pukotina. Vodikova krhkost predstavlja veliki problem pri zavarivanju, jer se u zavarenim spojevima ostvaruju veće tvrdoće od osnovnog materijala, te se pojavljuju zaostala naprezanja (slika 4.6). [22]

Vodik u Fe ima vrlo veliku endotermnu topivost. Topivost vodika mijenja se proporcionalno s temperaturom (dijagram 4.1). Topivost vodika u rastaljenom željezu iznad 1500⁰ C iznosi oko 30 ppm težine, dok u krutom stanju iznosi oko 8 ppm. Kako su brzine hlađenja materijala nakon zavarivanja vrlo visoke, posljedica ulaska vodika je nemogućnost potpune desorpcije (izlaska) kompletno apsorbiranog vodika iz kristalne rešetke materijala u atmosferu. U čvrstim otopinama pri malim koncentracijama vodik nema utjecaja na mehanička svojstva sve dok ne nastupi određeno opterećenje, ili u slučaju postojanja zaostalih naprezanja. [17,22]



Slika 4.6 Nastanak i smjer zaostalih napreznja u zavarenom spoju [19]



Dijagram 4.1 Rastvorljivost vodika i dušika u željezu u ovisnosti o temperaturi [19]

Koncentracija vodika u zamkama određuje razinu oštećenja materijala do kojeg može doći. Vodikova krhkost materijala je pojava i vrsta oštećenja koja se osniva na stacioniranju vodika između atoma u rešetci materijala i deformaciji rešetke, te djelovanju primijenjenog ili zaostalog napreznja. Na taj način se ograničava gibanje dislokacija, dok se u materijalu, zbog stranog atoma, javlja lokalno napreznje koje uzrokuje otvrdnjavanje i krhkost materijala.[22]

Kod sadržaja vodika u materijalu iznad 10 ppm, može se i bez prisutnosti vanjskog vlačnog napreznja računati s nastankom pukotina. Kod čelika s granicama razvlačenja višim od 1000 N/mm², za stvaranje pukotina dovoljne su količine od 1 ppm vodika u materijalu.[22]

Analize dosadašnjih havarija pokazale su kako je veliki broj, često tragičnih, zakazivanja posljedica postojanja pukotina u zoni utjecaja topline (ZUT) u blizini metala zavara. Međutim, novi materijali koji se razvijaju s ciljem postizanja optimalnog omjera čvrstoće i žilavosti u strogo kontroliranim termomehaničkim procesima valjanja, pokazuju bolju otpornost na pojavu pukotina u ZUT, ali zato nepovoljniju otpornost na pukotine nastale u metalu zavara. Pretpostavlja se da je razlog toga DM. Geometrija pukotina je takva da su dvije dimenzije izrazito velike u odnosu na treću, da imaju oštre rubove i nepovoljni položaj, te da se zbog toga nosivi presjek zavarenog spoja, osobito ako su položene poprečno na smjer napreznja, smanjuje, čime se narušava čvrstoća spoja. I danas vrijedi općenita pretpostavka da što je čelik više čvrstoće, veća mu je sklonost pojavi vodikom uzrokovanih pukotina (HIC). Međutim, većina provedenih studija upućuje na to kako na pojavu HIC-a više djeluje mikrostruktura nego čvrstoća čelika.[22]

Najčešći izvori vodika su vlaga u elektrodama, prahu ili plinu za zavarivanje, prljavi, masni i korodirani rubovi koji se zavaruju, vlaga iz atmosfere oko rastaljenog materijala.[11]

Nepovoljna mikrostruktura, odnosno martezit ili bainit, pojavljuje se zbog naglog hlađenja, odnosno prekratkog vremena $t_{8/5}$.

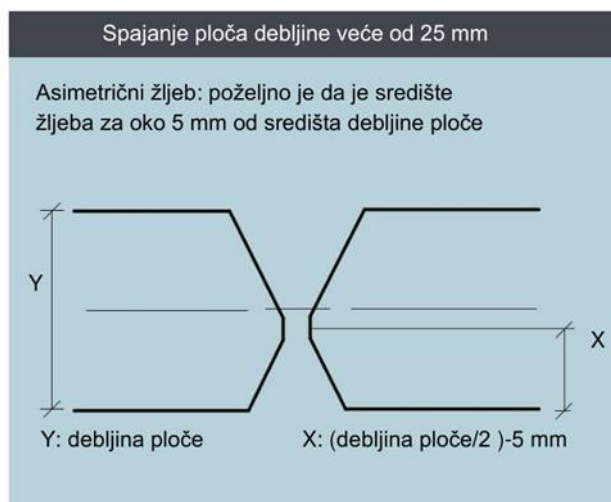
Zaostala napreznja pojavljuju se kao rezultat upetosti zavarenog spoja. Posljedica je to prevelike krutosti, te nejednolikog širenja i stezanja metala zavara i OM (slika 4.8)

Za smanjenje mogućnosti pojave hladnih pukotina vrši se predgrijavanje, a njime:

- usporavamo brzinu hlađenja - izbjegavamo pojavu tvrde i krhke strukture,
- povećavamo vrijeme $t_{8/5}$ - duže vrijeme za izlazak vodika iz ZT i ZUT,
- ravnomjernije se zagrijavaju i hlade, a time i šire i skupljaju OM i zavar pa su manja zaostala napreznja nakon hlađenja.

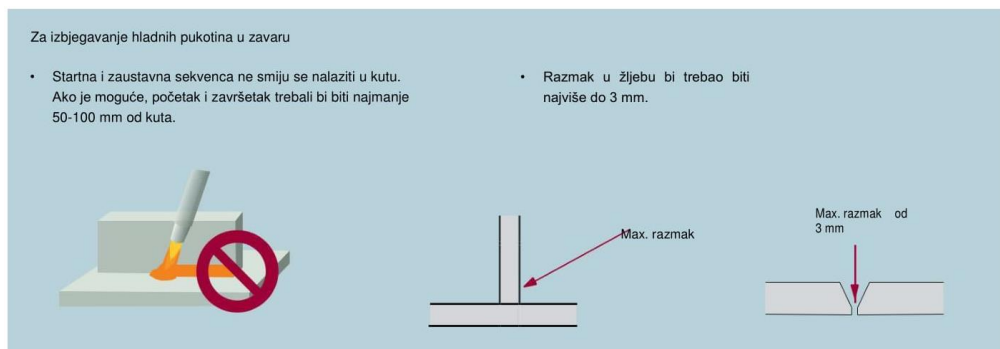
Izbjegavanje hladnih pukotina pri zavarivanju ploča debljine 25 mm i više primjenjuje se asimetričan žljeb (slika 4.7). Razlog ovog postupka je u tome što središnji dio debljih ploča može sadržavati kemijske elemente koji podupiru nastajanje hladnih pukotina jer su imali manje mogućnosti izlaska prilikom proizvodnje i prerade čelika. Ploče manjih debljina mogu imati simetrične ili asimetrične spojeve.

Razmak u žljebu ne bi trebao iznositi više od 3 mm (slika 4.8), a za izbjegavanje hladnih pukotina početak i završetak zavora ne smije se nalaziti u kutu već odmaknut 50-100 mm (slika 4.8).[18]



Slika 4.7 Priprema žljeba za zavare na pločama debljim od 25 mm [18]

Postavljanje produžnih ploča na kraju i završetku spoja pomaže izbjegavanju hladnih pukotina i lošeg zavora jer se stacionarni uvjeti zavarivanja ostvaruju na dovoljno dugim zavarenim spojevima. Kod REL-a to iznosi oko 50 mm, a kod automatskog EP i do 200 mm. Nakon zavarivanja produžne ploče se odstranjuju, zajedno sa početnim i završnim dijelovima zavora.[11]



Slika 4.8 Neki od načina za smanjenje pojave hladnih pukotina [18]

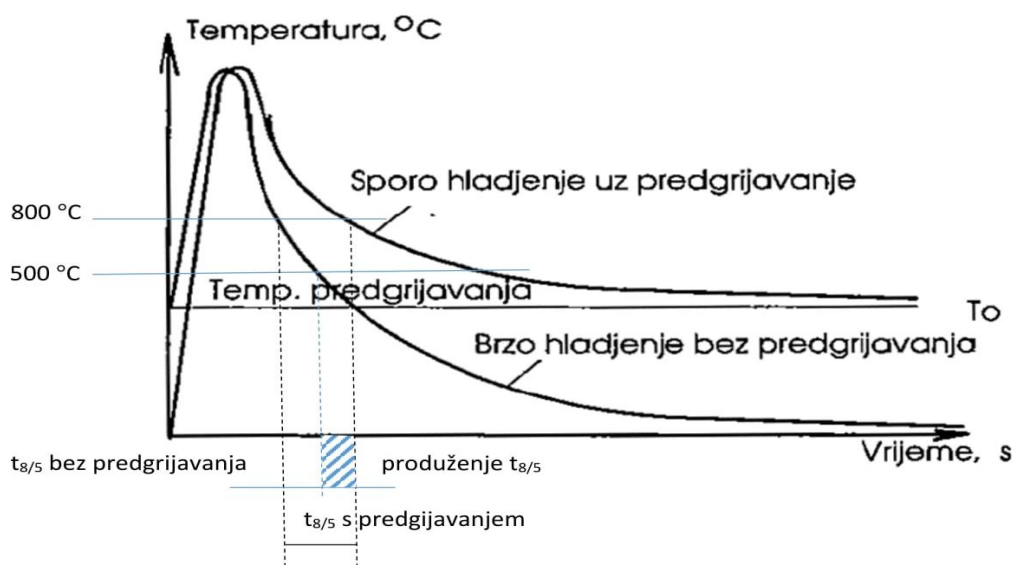
4.6. Predgrijavanje Strenx čelika

Predgrijavanje općenito podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanja iznad temperature okoline na propisanu temperaturu T_0 , i to prije početka zavarivanja. Predgrijavanje se smatra primarnim unosom topline u zavar.

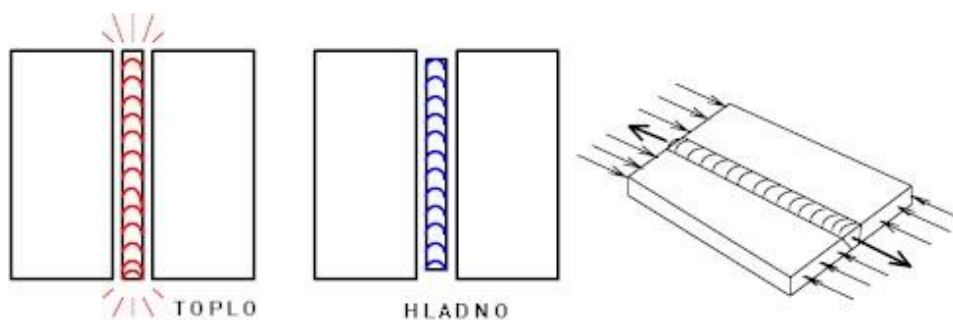
Cilj predgrijavanja (a koje se obično primjenjuje za nelegirane, niskolegirane i visokočvrste čelike) je izbjegavanje hladnih pukotina jer predgrijavanjem postizemo suprotan efekt onim uvjetima koji uzrokuju te pukotine.

Efekti koji se postižu predgrijavanjem su:

- Smanjenje brzine hlađenja ZUT i ZT - u odnosu na brzine hlađenja (dijagram 4.2) kada se ne koristi predgrijavanje. Ovime se produljuje vrijeme $t_{8/5}$, pa je osnovna uloga smanjenje količine tvrdih faza (martenzitne),
- Omogućavanje izlaska difuzijskog vodika – u rešetkama se nalazi zarobljeni atomarni vodik koji će lakše izaći pri višim temperaturama jer je i razmak među atomima metala tada veći,
- Smanjenje zaostalih napreznja – područje zavarivanja se na višoj temperaturi produži (slika 4.9). Kako se hlađenjem ponovo skuplja i postaje kraće, pojavljuju se napreznja ako OM nije bio predgrijan na neku višu temperaturu pa da se i on rastegne i ponovno skupi, ali sada zajedno sa zavarom. Iako OM nije bio zagrijan na tako visoku temperaturu kao zavar, ipak će razlika u produživanju biti manja ako se vrši predgrijavanje, a time će biti i manja zaostala napreznja.[11, 18]



Dijagram 4.2 Krivulje hlađenja materijala sa i bez predgrijavanja [11]



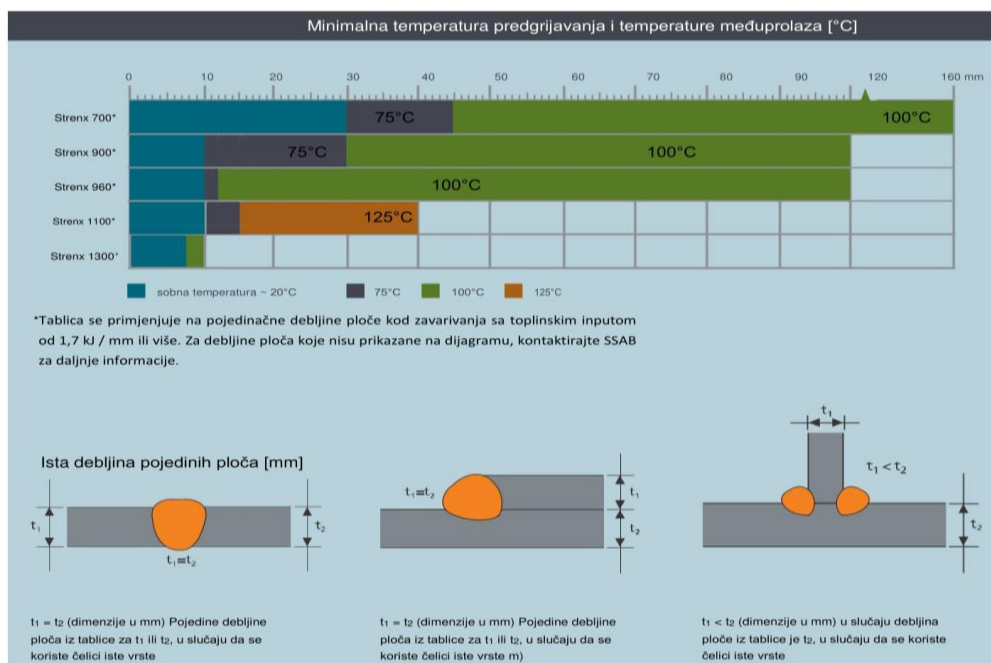
Slika 4.9 Pojava zaostalih naprezanja zbog nejednolikog rastezanja [11]

Određivanje T_0 možemo vršiti na nekoliko načina:

- Preporuke – literature ili iskustvo
- Probama sklonosti prema hladnim pukotinama – implant, Tekken, CTS i druge metode
- Atestom postupka – zavarivanje probnih uzoraka uz preporučene uvjete
- Proračunima T_0 – prema Ito i Bessyo, Seferinau ili drugim formulama
- Uvjeti okoline – kada i nije preporučeno ali nisu ni zadovoljeni uvjeti okoline
- Zavarivanje pripoja (hefotva) – povećanje T_0 za 20-40 °C

Za temperature predgrijavanja T_0 i međuprolazne T_m temperature podatke možemo izvaditi iz tablice 4.1 koju izdaje proizvođač, a osim prema izračunima iznosi su dobiveni i iz iskustva. Iz tablice je vidljivo da se za sve Strenx QT čelike (zakaljene i popuštene) preporuča predgrijavanje. [11]

Tablica 4.1 Odabir temperature predgrijavanja za Strenx čelike [18]



Pri zavarivanju visokočvrstih čelika T_O mora se držati u strogim granicama (T_{Omin} i T_{Omax}) gdje je T_{Omax} ujedno i temperatura međuprolaza T_m . Ako je temperatura preniska može u širem sloju dobiti pretvrdu i krhku strukturu, a ako je temperatura previsoka struktura će biti grubozrnata i krhka uz omekšavanje pojedinih zona.[18]

Uz predgrijavanje kod visokočvrstih čelika vrlo je bitna i temperatura međuprolaza. Iz tablica proizvođača Strenx čelika očitane su slijedeće vrijednosti za debljinu materijala 10 mm, odnosno 30 mm (tablica 4.2):

Tablica 4.2 Preporučene temperature predgrijavanja za Strenx čelike 960E, $d=10$ i 30 mm

	Temperatura predgrijavanja T_O	Međuprolazna temperatura T_m
Strenx 960E , $d=10$ mm	75 °C	300 °C (moguće do 400 °C)
Strenx 960E , $d=30$ mm	100° C	300 °C (moguće do 400 °C)

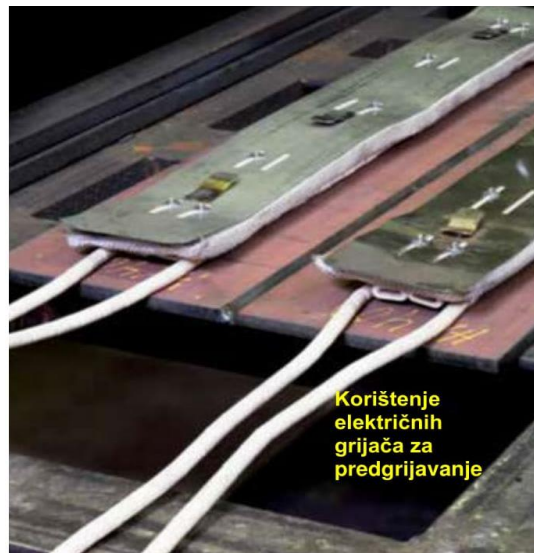
U tablici su navedene najniže T_O koje se trebaju održavati tijekom cijelog postupka zavarivanja. Prema naputku, ovi podaci vrijede za nelegirane ili niskolegirane DM. Kada se zavaruju ploče različite debljine, minimalna T_O računa se za deblju ploču. Ako se zavaruju različite vrste čelika, T_O određuje se prema ploči koja ima najvišu minimalnu T_O . [18]

Potrebno je T_O povećati za 25 °C u odnosu na gornje vrijednosti u slučajevima ako:

- je temperatura zraka niža od +5 °C
- je vlažnost zraka visoka
- su spojevi čvrsto stegnuti
- je unos topline u rasponu od 1-1,6 kJ/mm.[18]

Način predgrijavanja nije zanemariv, kako sa ekonomskog stajališta, tako i mogućnosti nastanka dodatnih naprezanja.

- induktivno zagrijavanje - najpreciznije jer zagrijava točno željeno područje i zagrijava jednoliko po cijelom presjeku (slika 4.10)



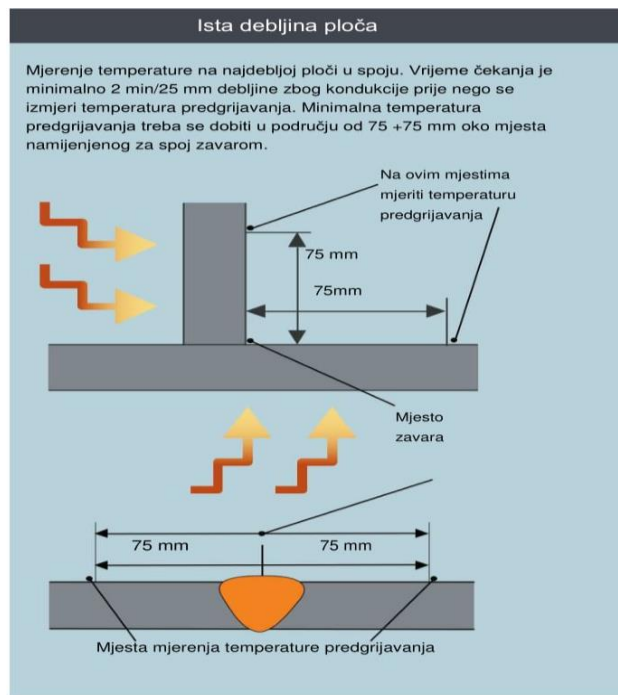
Slika 4.10 Predgrijavanje Strenx čelika električnim oblogama [18]

- zagrijavanje plinskim plamenom, najjeftinije i najjednostavnije, postoji mogućnost unošenja nečistoća u pripremljen spoj, teža regulacija temperature, grije se lokalno, postupak može biti ručni ili automatiziran (slika 4.11)[18,19]



Slika 4.11 Automatsko predgrijavanje plinskim plamenom [19]

Pregrijavanje može vršiti istovremeno i s donje strane pri čemu se vrijeme predgrijavanja može smanjiti i do 30%. Mjerenje temperature vrši se odmaknuto od mjesta spoja, SSAB preporučuje 75 mm i to sa suprotne strane od mjesta grijanja (slika 4.12). Mjerenje temperature preporuča se kontaktnim termometrima.[18,19]



Slika 4.12 Područja predgrijavanja i mjerenja temperature [18]

Kod zavarivanja sa DM koji imaju vlačnu čvrstoću do 700 N/mm², svojstva DM ne utječu na minimalnu temperaturu predgrijavanja. [19]

Svi proračuni dostupni su i putem softvera WeldCalc™ tvrtke SSAB. [18, 19]

Za Strenx čelike postoje mnoge brošure iz kojih se može direktno očitati temperatura predgrijavanja i temperatura međuprolaza. Za izračun temperatura može se koristiti slijedeće formula (6), (7), (8):

$$T_0 = 1440 \cdot P_W - 392 \quad (6) [11]$$

$$P_W = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{d}{600} \quad (7) [11]$$

$$P_{CM} = C + \frac{Mo}{15} + \frac{(Cu+Cr+Mn)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{V}{10} + \frac{Si}{30} + 5 \cdot B \quad (8) [11]$$

$$P_W = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{d}{600} = 0,523 + \frac{2,81}{60} + \frac{10}{600} = 0,586$$

$$T_0 = 1440 \cdot P_W - 392 = 452 \text{ °C}$$

Izračun temperature predgrijavanja uz pomoć formula daje ipak okvirne vrijednosti zbog sadržaja elemenata a koji je naveden kao maksimalni mogući. No izračun nam ipak daje orijentacijske

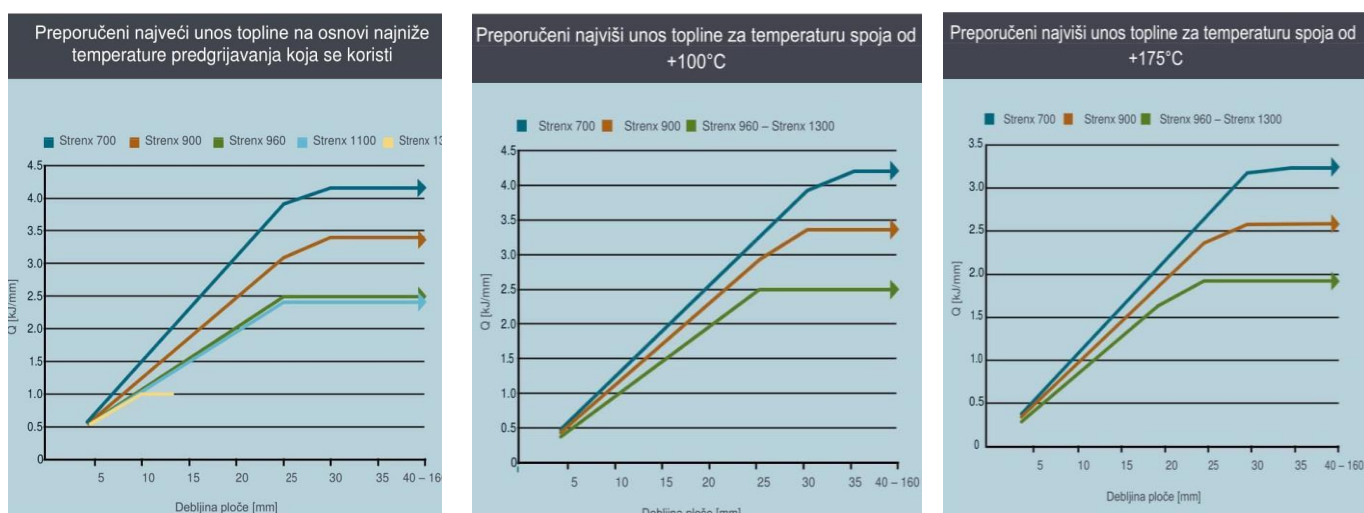
vrijednosti. U gornjem slučaju proračunata je maksimalna temperatura predgrijavanja ($d=10$ mm, maksimalni sadržaj difuzijskog vodika 5 ml/100g, maksimalne vrijednosti masenih udjela elemenata) od 452 °C, dok preporuka proizvođača glasi maksimalno do 300 °C, odnosno 400 °C u određenim slučajevima (deblji materijali).[11,19,24]

4.7. Toplinski input za Strenx 960 čelike

Kako je već ranije pojašnjeno u dijelu o zavarivanju, toplinski inputi mogu bitno utjecati na mehanička svojstva zavora, a time i na svojstva cijele konstrukcije. Toplinski input zbroj je topline unesene kroz pregrijavanje i kroz sam postupak zavarivanja.[11]

Nažalost, iz osobnog iskustva ali i iskustva drugih, i više je nego poznato da upravo mjera predgrijavanja i kontroliranog toplinskog inputa kroz zavarivanje nije gotovo uopće u upotrebi u našim pogonima. Naime, radi bržeg obavljanja radnih zadataka, ako nije prisutna ovlaštena osoba za kontrolu ili nadgledanje, iznimno je čest slučaj zavarivanja bez potrebnih mjera priprema, bilo u obliku prethodnog čišćenja spoja, predgrijavanja i mjerenja temperature ili pak parametara zavarivanja koji su podešeni na veće vrijednosti kako bi i produktivnost bila veća (tablica 3.1). Loši zavari često se prekrivaju zadnjim prolazom koji ima prihvatljivije parametre.[18]

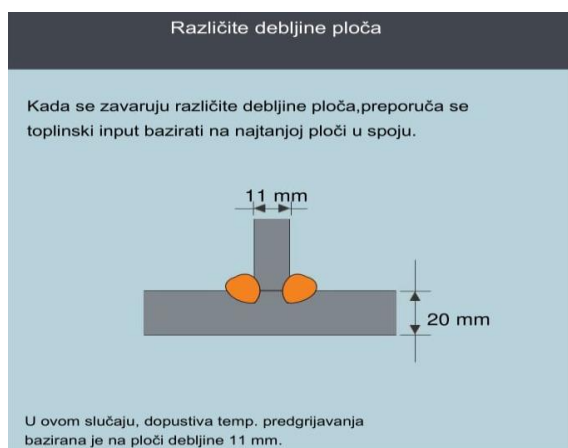
Unos topline pri samom postupku zavarivanja ovisi od minimalne temperature predgrijavanja. Za Strenx čelike izrađene su jednostavne i pregledni dijagrami (dijagram 4.3) kako bi se brzo mogli provjeriti potrebni toplinski inputi za određenu vrstu Strenx čelika.[18,19]



Dijagram 4.3 Dijagrami toplinskih inputa za različite temperature predgrijavanja i debljine materijala [18]

Preporukama za visokočvrste Strenx čelike, temeljene na vrijednosti za žilavost od minimalno 27J pri -40 °C u ZUT. Osim toga niži toplinski inputi podupiru visoke statičke čvrstoće u zavaru. Kada se zavaruju ploče različite debljine (slika 4.13) toplinski inputi računaju se za najtanju ploču u spoju.[18]

Veći toplinski inputi omogućiti će duže vrijeme $t_{8/5}$, manje mogućnosti za pojavu hladnih pukotina ali i veće brzine rada. Kod visokočvrstih čelika nužan je balans između ovih dviju zahtjeva, odnosno niži ili viši toplinski input. Odstupanje od preporučenih vrijednosti nosi veliki rizik za smanjenje mehaničkih svojstava zavara i cijele konstrukcije.[11,18,19]



Slika 4.13 Različite debljine zavarivanih ploča [18]

Toplinski su inputi određeni vremenom $t_{8/5}$ a koje se mora poštivati. Izračun ovog vremena je vrlo kompleksan. U tablici 4.3 su preporučene vrijednosti za Strenx čelike. Za Strenx 960 preporučeno je ovo vrijeme 5-15 s, kako bi se još uvijek sačuvala sva mehanička svojstva zavara.[18]

Tablica 4.3 Vrijednosti temperatura predgrijavanja za Strenx čelike [18]

$t_{8/5}$ vrijednosti, min. 27J pri -40°C	
Strenx 960-1300	5-15 s
Strenx 1100 MC	1-10 s
Strenx 900 MC, Strenx 900 Plus, Strenx 900 Section, Strenx 900 Tube MH, Strenx 960 MC, Strenx Tube 960 MH Strenx 960 Plus	1-15 s
Strenx 900	5-20 s
Strenx 700, Strenx Tube 700 QLH	5-25 s
Strenx 700 MC, Strenx 700 MC Plus, Strenx 700 Section, Strenx Tube 700 MH, Strenx Tube 700 MLH, Strenx Tube 700 QLH, Strenx 100 XF, Strenx 110 XF, Strenx 650 MC, Strenx 650 Section, Strenx 600 MC	1-20 s

Sada su dani i svi podaci pomoću kojih možemo odrediti parametre zavarivanja, dodatne materijale, temperature predgrijavanja i postupke zavarivanja. Podešavanje parametara mora biti takvo da se postigne ovo vrijeme, a koje nam garantira dovoljno usku zonu omekšavanja u ZUT.

4.8. Tople pukotine

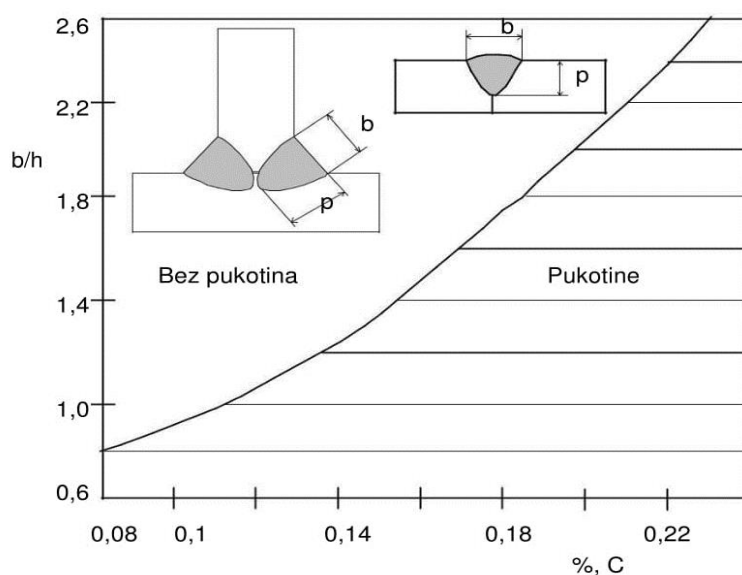
Tople pukotine nastaju na visokim temperatura, a najčešći uzrok jesu nečistoće u metalu zavara. Kristalizacijske tople pukotine nastaju većinom u ZT pri pothlađivanju taline zbog nečistoća koje imaju niže talište (prvenstveno S i P), i to po sredini ZT.[11]

Likvacijske pukotine nastaju prvenstveno u ZUT, razlog su sulfidi, oksisulfidi ili karbosulfidi koji se rastale u ZUT i popunjavaju praznine između austenitnih zrna. Pukotine nastaju kada se sve počinje skrućivati, smanjuje se kohezivna čvrstoća između zona i pojavljuju se naprezanja od stezanja.[11,17]

Uslijed hlađenja zone zavara u određenom temperaturnom intervalu dolazi do osjetnog pada istežljivosti što može uzrokovati pojavu pukotina.[11]

Visokočvrsti čelici zbog niskog sadržaja S, P i nečistoća nisu skloni toplim pukotinama. Analitička metoda daje orijentacijske vrijednosti sklonosti prema ovoj vrsti pukotina, a laboratorijske metode koje se najčešće koriste jesu Varestraint, Transvarestraint, Murex, Thomas.[11]

Na pojavu toplih pukotina utječe i penetracija (p ili h)zavara u odnosu na širinu(b) - b/p. Ovaj omjer je povoljan kada iznosi od 1,3-3,ali je ovisan i o sadržaju C (dijagram 4.4).[11]



Dijagram 4.4 Prikaz ovisnosti penetracije i širine zavara sa pojavom toplih pukotina [11]

Formula (9) za izračun sklonosti prema toplim pukotinama (HCS). Ako je vrijednost ispod 4 (za čelike sa $R_{p0,2}$ do 700 N/mm^2) odnosno ispod 2 (za čelike sa $R_{p0,2}$ iznad 700 N/mm^2), čelici ne pokazuju sklonost prema toplim pukotinama [17]

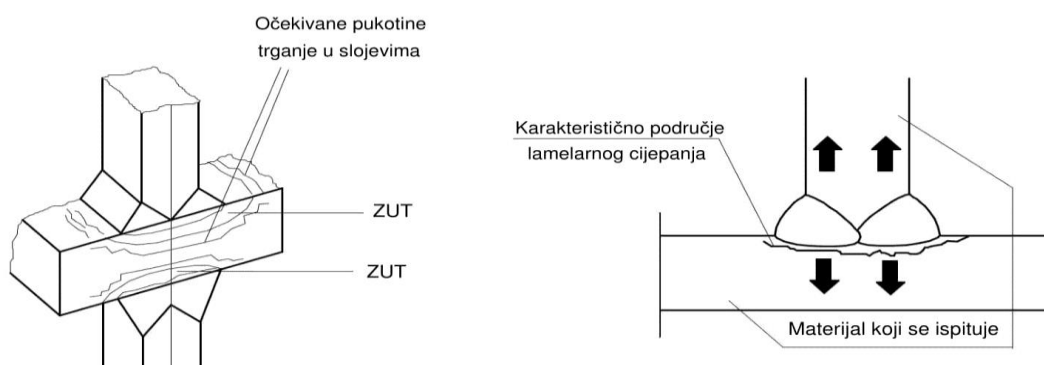
$$H.C.S. = \frac{C * \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) * 10^3}{3 * Mn + Cr + Mo + V} \quad (9) [17]$$

4.9. Lamelarno trganje

Pojavljuje se za vrijeme zavarivanja u obliku razdvajanja u slojevima OM u ZUT (slika 4.14), a zbog utjecaja topline unesene zavarivanjem i naprezanja stezanja u smjeru debljine. Sprječavanje ove pojave smanjuje se garantiranim sastavom u smjeru debljine OM. Osim od kvalitete OM (raspored i sadržaj nečistoća) sklonost ovim greška određena je i debljinom, konstruktivnom oblikovanju spoja, njegovoj krutosti i smjeru opterećenja. Ove pukotine su vrlo opasne, iako postoje od ranije, tek nakon zavarivanja dolazi do njihovog razdvajanja. Osim izborom materijala, smanjenje sklonosti prema ovim pukotinama može se postići i konstrukcijskim rješenjima. Analitička metoda za utvrđivanje sklonosti prema ovim pukotina dana je formulom (10) [11,17]:

$$P_L = P_{cm} + \frac{H}{60} + 6 * S \quad (10) [17]$$

Materijal nije sklon ovi pukotinama ako je vrijednost iz formule $P_L < 0,4$.



Slika 4.14 Područja zavarenog spoja gdje se pojavljuje lamelarno (slojevito) trganje [11]

Visokočvrsti Strenx odlikuju se izvrsnim svojstvima i garantiranim i niskim sadržajem nečistoća u svim smjerovima pa zbog toga općenito nisu skloni lamelarnom trganju.

Za izbjegavanje lamelarnih i toplih pukotina preporučljivo je kod zavora okomitih na smjer ploče, izbjegavati oštre prijelaze postavljanjem zavora od ruba ploče (slika 4.15). Na slici je prikazana i razlika između Strenx čelika i običnih čelika sa više nehomogenosti.[18]

Otpornost na lamelarno odvajanje i tople pukotine

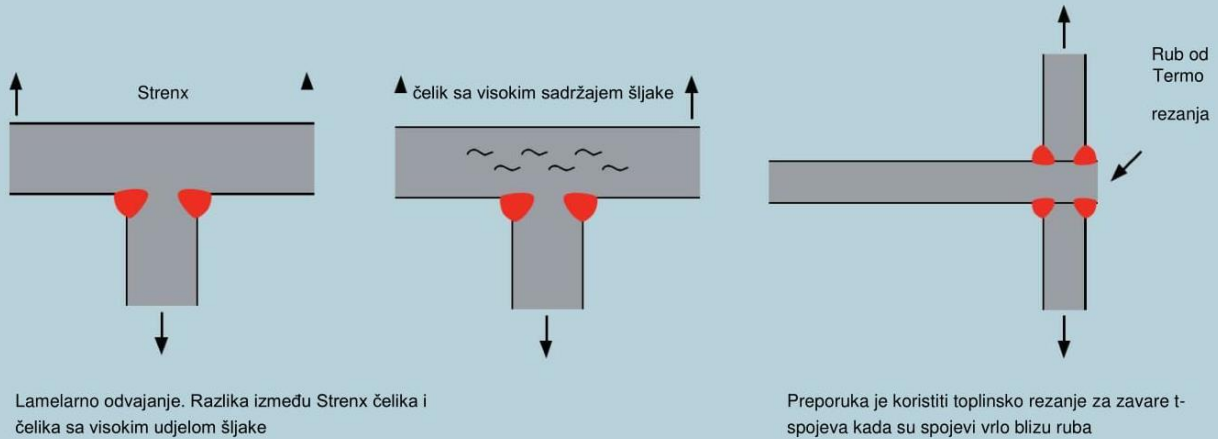
Strenx čelici se proizvode s vrlo niskim razinama onečišćenja poput sumpora i fosfora. Ova činjenica pridonosi povoljnijim mehaničkim svojstvima u ZUT-u i nepromijenjenom OM. Pored toga, to također dovodi do povećane otpornosti na diskontinuitet zavarivanja u smislu toplih pukotina i lamelnog odvajanja.

Lamelarno kidanje je rezultat nehomogenosti strukture postavljenih paralelno s pločom na kojoj je prisutan smjer vlačnog opterećenja u okomitom smjeru prema površini ploče..

Za zavare okomito na smjer površine ploče, izbjegavajte oštre prijelaze postavljanjem zavara od ruba ploče. Za zavare u tanjim pločama, toplinsko rezanje proizvodi rub s većom površinskom kvalitetom od probijanja.

Tople pukotine

- Prije zavarivanja potrebno je dobro očistiti mjesta zavarivanja od ulja i masnoća. Uklanjanje izvršiti odgovarajućim postupkom.



Slika 4.15 Utjecaji pojave lamelnog trganja i toplih pukotina [18]

4.10. Dodatni materijali-DM

Za izbjegavanje značajnih gubitaka svojstava u zavaru vrlo je bitan i odabir DM. Za Strenx čelike dane su preporuke putem brošura (tablica 4.4) ili aplikacije WeldCalc™.

Tablica 4.4 Popis dodatnih materijala (DM) prema EN normama za određene vrste Strenx čelika [18]

Dodatni materijali za zavarivanje, EN class							
		R _{p0.2} [MPa]					
Preporučena čvrstoća za jako opterećene zavare	Preporučena čvrstoća DM za ostale zavare	900	MMA EN ISO 18275 (-A) E 89X	SAW (solid wire/- flux combinations) EN ISO 26304 (-A) S 89X	MAG (solid wire) EN ISO 16834 (-A) G 89X	MAG (all types of tubular cored wires) EN ISO 18276 (-A) T 89X	TIG EN ISO 16834 (-A) W 89X
		800	EN ISO 18275 (-A) E 79X	EN ISO 26304 (-A) S 79X	EN ISO 16834 (-A) G 79X	EN ISO 18276 (-A) T 79X	EN ISO 16834 (-A) W 79X
Preporučena čvrstoća DM za ostale zavare		700	EN ISO 18275 (-A) E 69X EN ISO 2560 E 42X	EN ISO 26304 (-A) S 69X EN ISO 14171 (-A) S 42X	EN ISO 16834 (-A) G 69X EN ISO 14341 (-A) G 42X	EN ISO 18276 (-A) T 69X EN ISO 17632 (-A) T 42X	EN ISO 16834 (-A) W 69X EN ISO 636 (-A) W 42X
		400	EN ISO 18275 (-A) E 62X	EN ISO 26304 (-A) S 62X	EN ISO 16834 (-A) G 62X	EN ISO 18276 (-A) T 62X	EN ISO 16834 (-A) W 62X
		600	EN ISO 18275 (-A) E 55X	EN ISO 26304 (-A) S 55 X	EN ISO 16834 (-A) G 55 X	EN ISO 18276 (-A) T 55X	EN ISO 16834 (-A) W 55X
		500	EN ISO 2560 E 50X EN ISO 2560 E 46X	EN ISO 14171 (-A) S 50X EN ISO 14171 (-A) S 46X	EN ISO 14341 (-A) G 50X EN ISO 14341 (-A) G 46X	EN ISO 17632 (-A) T 50X EN ISO 17632 (-A) T 46X	EN ISO 636 (-A) W 50X EN ISO 636 (-A) W 46X

* uključujući i MC, PLUS, CR vrste

Preporuka je niskolegirani, nelegirani i nehrđajući DM. Niskolegiranim i nelegiranim DM nižih čvrstoća ostvarujemo veću žilavost zavara, bolju otpornost na hladne pukotine i niža zaostala naprezanja. Sadržaj vodika u tim materijalima ne smije prelaziti 5 ml/100 g zavarenog materijala. Doduše, većina žica za MIG/MAG i TIG zavarivanje proizvodi ovako niske sadržaje vodika, ali o tome se obavezno mora voditi računa kao i o skladištenju DM (temperatura, vlaga).[18,19]

Kod višeprolaznih zavara pri Strenx čelicima prednost je mogućnost korištenja DM različitih čvrstoća. U tom slučaju niže čvrstoće DM biraju se za prve i korijenske prolaze, a veće čvrstoće DM za sve ostale prolaze (slika 4.16). Na ovaj način se povećava čvrstoća i otpornost na hladne pukotine u zavaru.[18]



Slika 4.16 Korištenje različitih DM pri zavarivanju Strenx čelika [18]

Vrste DM ovisno o postupku zavarivanja

- Čvrsta žica – MIG/MAG, TIG – sve varijante
- Žica punjena prahom – MIG/MAG – bazične i rutilne varijante
- Žica punjena metalom – MIG/MAG
- Elektrode – REL – bazične varijante [18, 19]

4.11. Zaštitni plin

Izbor zaštitnog plina ovisi o postupku zavarivanja, ali i položaju i vrsti korištenog DM. Još nekoliko parametara se može promijeniti ovisno zaštitnom plinu, odnosno mješavini plinova (slika 4.17).



Slika 4.17 Učinci odabranog zaštitnog plina pri zavarivanju [18]

Najčešće su korištene smjese Ar i CO₂, a koje preporučuje i SSAB za Strenx čelike pri MAG zavarivanju, odnosno čisti Ar za TIG zavarivanje (tablica 4.5). Povećanjem udjela argona olakšava se uspostava električnog luka, smanjuje prskanje i postiže se mala količina oksida. Povećanjem udjela CO₂ stabilizira se električni luk no povećava se prskanje (začepljenje mlaznice) no ostvaruje se veća penetracija zavara.[18,19]

Tablica 4.5 Prikaz preporučenih zaštitnih plinova za različite vrste Strenx čelika i različite postupke [18]

Primjeri mješavina zaštitnih plinova			
Metoda zavarivanja	Tip električnog luka	Položaji	Zaštitni plin
MAG, solid wire	Short Arc	Svi položaji	18-25% CO ₂ ostalo Ar
MAG, cored wire	Short Arc	Svi položaji	18-25% CO ₂ ostalo Ar
MAG, solid wire	Spray Arc	Horizontalni (PA, PB, PC)	15-20% CO ₂ ostalo Ar
MAG, FCAW	Spray Arc	Svi položaji	15-20% CO ₂ ostalo Ar
MAG, MCAW	Spray Arc	Horizontalni (PA, PB, PC)	15-20% CO ₂ ostalo Ar
Robotic and automated MAG	Spray Arc	Horizontalni (PA, PB, PC)	8-18% CO ₂ ostalo Ar
TIG	Spray Arc	Svi položaji	100% čisti Ar

Protok plina druga je bitna veličina kod zaštitnih plinova, a smjernica SSAB je za sve postupke zavarivanja koristiti protok plina izražen u l/min u vrijednosti kao i unutarnji promjer mlaznice izražen u mm.[18]

4.12. Naknadna toplinska obrada

Nakon zavarivanja može se sprovesti naknadna toplinska obrada (post-weld heat treatment-PWHT), no za Strenx čelike se rijetko primjenjuje jer postupci zavarivanja daju dovoljno dobra svojstva zavara, a ima i nedostataka kod ovih toplinskih obrada.

Kao prednosti zbog kojih se koriste ove obrade jesu smanjenje zaostalih naprezanja te konstrukcija postaje duktilnija, olakšana strojna obrada odvajanjem čestica uz manje deformacije, poboljšanje žilavosti te moguće smanjenje tvrdoće zavarenog spoja.

Nedostatak ovakve obrade je povećanje troškova proizvodnje, moguće i smanjenje povoljnih mehaničkih svojstava u ZUT te opasnost od novih naprezanja ako se strogo ne pridržava preporuka proizvođača.[18, 19]

U tablici 4.6 su navedeni osnovni podaci za toplinsku obradu Strenx čelika uz napomenu da čelici iz razreda Strenx 1100-1300 ne smiju nikako biti podvrgnuti naknadnoj toplinskoj obradi zbog narušavanja mehaničkih svojstava.[19]

Teško je naknadnom TO postići istu mikrostrukturu kakva se dobije pri proizvodnji, a postoji velika vjerojatnost da se mikrostruktura kakvu ima OM još više naruši.

Tablica 4.6 Preporučene temperature i vremena za naknadnu toplinsku obradu Strenx čelika [19]

Vrsta čelika	Temperatura držanja [°C]	Brzina zagrijavanja/hlađenja [°C/h]	Vrijeme držanja	Preporučeno vrijeme na temperaturi držanja [h]
Weldox 700	550-580 °C	100	2 min/mm za glavnu ploču*, min 1 h	1-6
Weldox 900	520-550 °C	-"	-"	-"
Weldox 960	520-550 °C	-"	-"	-"
Hardox HiTuf	510-530 °C	-"	-"	-"

* glavna ploča je ona za koju se vrše proračuni

4.13. Pukotine zbog naknadnog zagrijavanja

Osim naknadne toplinske obrade, ponovno zagrijavanje može biti i zbog zavarivanja u više prolaza ili pri popravcima zavarenih spojeva. Mogu nastati propagacijom ranijih pukotina, ali se mogu i inicirati. Visokočvrsti čelici mogu biti skloni ovoj vrsti pukotina, pa je i to razlog zbog čega se naknadna TO za Strenx čelike ne preporučuje.

Razlozi nastanka pukotina u niskotemperaturnom području (200-300°C) je prebrzo zagrijavanje po debljini stjenke jer materijal u ovom području još nema povećanu plastičnost. Za izbjegavanje pojava ovih pukotina kod debelih i ukrućenih zavarenih proizvoda preporuča se brzina zagrijavanja u intervalu 15-30 °C/h. Za Strenx čelike brzina zagrijavanja (tablica 4.6.) iznosi do 100°C bez posljedica.

Pukotine se najčešće javljaju u ZUT kod grubozrnate strukture te se šire po granicama zrna. Na njihovu pojavu utječu kemijski sastav, mikrostruktura ZUT, veličina zrna, segregacija nečistoća te veličina zaostalih naprezanja i upetost. Sklonost ovim pukotinama može se ocijeniti preko formule (11):

$$G = Cr + 3,3 * Mo + 8.1 * V - 2 \quad (11) [11]$$

Na pojavu pukotina veliki utjecaj ima sadržaj Cr i Mo te nečistoća, a smanjenje utjecaja postiže se legiranjem sa Mn i Ni. Za sprečavanje pukotina ograničava se vrijeme koje smije materijal provesti na određenoj temperaturi, a naročito u intervalu 530-580 °C, ali i broj popravljivanja zavarivanjem na istom mjestu (do 3 puta).[11]

5. PRORAČUN PARAMETARA ZAVARIVANJA

Nakon teorijske obrade zavarljivosti i sklonosti pukotinama potrebno je izraditi postupke i proračunati parametre zavarivanja za konkretne primjere. Odabran je primjer zavarivanja ploča Strenx 960E čelika u debljinama od 10 i 30 mm. Zavar je kutni.

Prvo se proračunavaju sklonosti materijala prema određenim vrstama pukotina jer se za njihovo sprječavanje moraju izvršiti potrebne radnje i prije samog zavarivanja.

Nakon određivanja ekvivalenta ugljika (poglavlje 4.3.) prema izračunima, ali i preporuci proizvođača, ekvivalent ugljika prelazi graničnu vrijednost. Razlika između izračunatih vrijednosti i vrijednosti iz tehničkih listova proizvođača nastaje jer su u formulu uvrštavaju maksimalne vrijednosti masenih udjela pojedinih legiranih elemenata. Brojna mjerenja i ispitivanja u laboratorijima ipak su mnogo vjerodostojnija od univerzalnih analitičkih metoda pa se zbog toga daje prednost preporukama koje daje proizvođač. Na slici 5.1 prikazan je sastav i mehanička svojstva čelika Strenx 960E, a koja su vršena za debljinu čelika 30 mm. Analiza je vršena u laboratoriju tvrtke SSAB u lipnju 2017., te je očita razlika u sastavu pa prema tome i u izračunu ekvivalenta ugljika prema navedenim formulama i navedenom sastavu. U oba slučaja utvrđena je sklonost Strenx 960E čelika hladnim pukotinama za čije izbjegavanje je potrebno izvršiti predgrijavanje. Laboratorijske probe sklonosti prema hladnim pukotinama za Strenx čelike proizvođač vrši Tekken metodom.[19]

Tablica 5.1 Laboratorijski utvrđen sastav Strenx 960E čelika debljine 30 mm [23]

Purchaser	Product Structural steel		B01		Marking (Stamping) Steel grade, Manufacturer, MATERIAL ID												
	Quantity	B08	Dimensions [mm]		B09-B11	Weight [kg]											
	1		T 30	W 2000	L 6000	2826											
Consignee					Standard/rules OX STRENX 960 Steel grade STRENX 960 E												
MATERIAL ID 120222-298995																	
Chemical composition																	
Heat no	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	EW	C14
120222	.16		1.27	.011	.001	.20	.05	.601			.01						
Testtype	C04	Millcode	C00	Specimen position	C01	Direction	C02	Treatment	B05	Specimen type	C10	Temp [degr C]	C03	Test results			
Tensile Test		255686		Top end		Transvers		Delivery condition		Rectangular				C11 Rp0.2 [MPa] 975	C12 Rm [MPa] 1029	C13 AS [%] 16	

Temperatura predgrijavanja slijedeći je podatak koji treba odrediti. Prema tablici (poglavlje 4.6) za Strenx 960 debljine 30 mm potrebna je $T_{Omin} = 100$ °C dok je maksimalna $T_{Omax} = 300$ (400) °C. Proračunata temperatura od 452 °C također je različita od preporučene iz literature, a zbog razlika u maksimalnim i prosječnim udjelima legiranih elemenata.

Pored izračuna za maksimalne vrijednosti elemenata, kada se dobiva najlošija varijanta ekvivalenta ugljika i potrebnih temperatura predgrijavanja, izračunavaju se i parametre pomoću točnog sastava utvrđenog u laboratoriju SSAB-a:

$$\begin{aligned}
 &= C + \frac{Mo}{15} + \frac{(Cu+Cr+Mn)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{V}{10} + \frac{Si}{30} + 5*B \\
 &= 0,06 + \frac{0,6}{15} + P_{CM} \frac{0,01 + 0,2 + 1,27}{20} + \frac{0,05}{60} = 0,174 \\
 P_W &= P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{d}{600} = 0,174 + \frac{5}{60} + \frac{30}{600} = 0,31
 \end{aligned}$$

$$T_0 = 1440 * P_W - 392 = 54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Izračunata temperatura od 54 °C je nešto niža nego što je preporuka, pa se primjenjuje temperatura utvrđena iz tablica 4.1.

Tablica 5.2 Mehanička svojstva, najviši udjeli elemenata i laboratorijski utvrđeni CET(CEV) [10]

STRENX 960									
Kemijiski sastav (maksimalni mogući sadržaj elemenata)									
C _γ (max %)	Si _γ (max %)	Mn _γ (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr _γ (max %)	Cu _γ (max %)	Ni _γ (max %)	Mo _γ (max %)	B _γ (max %)
0.20	0.50	1.60	0.020	0.010	0.80	0.3	2.0	0.70	0.005
Maksimalni eivalent ugljika CET(CEV)									
Debljina (mm)			4.0 - 34.9 mm				35.0 - 100.0 mm		
CET(CEV)			0.38 (0.58)				0.41 (0.67)		
$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$			$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$						
Mehanička svojstva									
Debljina (mm)	Granica razvlačenja R _{p0,2} (N/mm ²)		Vlačna čvrstoća R _m (N/mm ²)		produljenje A (min %)				
4.0 - 53.0	960		980- 1150		12				
53.1 - 100	850		900- 1100		10				
Udarni rad loma									
Vrsta	Min udarni rad energija pri temp. Charpy-ev bat, V 10x10 mm epruveta				Odgovara zahtjevima za				
Strenx 960 E	40 J/ - 40 °C				S 960 QL				

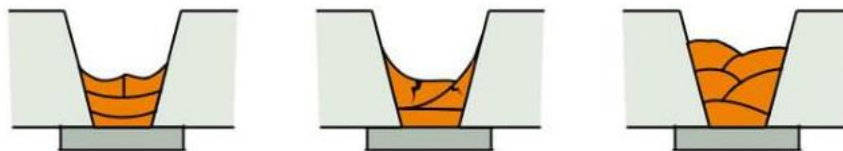
Sklonost toplim pukotinama nije kritična za Strenx čelike prema preporuci proizvođača, a zbog niskog sadržaja nečistoća (prvenstveno S i P). Izvršiti će se proračun prema formuli (9),

$$H.C.S. = \frac{C * \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) * 10^3}{3 * Mn + Cr + Mo + V} = \frac{0,2 * \left(0,001 + 0,011 + \frac{2}{100} \right) * 10^3}{3 * 1,6 + 0,8 + 0,7} = 2,22$$

te prema točno utvrđenom kemijskom sastavu. Parametar sklonosti prema toplim pukotinama će biti:

$$H.C.S. = \frac{C * \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) * 10^3}{3 * Mn + Cr + Mo + V} = \frac{0,06 * \left(0,01 + 0,02 + \frac{0,05}{100} \right) * 10^3}{3 * 1,27 + 0,2 + 0,6} = 0,396$$

Granična vrijednost za pojavu toplih pukotina je <2. Kako je samo kod maksimalnog udjela legirnih elemenata moguća sklonost za pojavu toplih pukotina, uzimamo preporuku proizvođača, a ona glasi da nije potrebno poduzimati posebne korake za sprječavanje ovih pukotina, već se držati općih pravila kod zavarivanja. Potrebno je prilagoditi brzinu zavarivanja, pravilan kut zavarivanja te izbjegavanje konkavnih zavora (slika 5.1) i unosa nečistoća, omjer penetracije i širine zavora.[18]



Slika 5.1 Utjecaj oblika zavora na pojavu toplih pukotina [19]

Opasnost o lameranog trganja također se smanjuje manjim udjelom nečistoća. Prema formuli (10) veliku ulogu kod pojave ovih grešaka ima S, a kako je kod Strenx čelika njegova razina vrlo niska tako je i niska opasnost na pojavu lameranih pukotina.

Kod maksimalnog sadržaja legirnih elemenata:

$$P_L = P_{cm} + \frac{H}{60} + 6 * S = 0,523 + \frac{2,81}{60} + 6 * 0,01 = 0,62$$

Pri sadržaju elemenata prema provedenoj analizi:

$$P_L = P_{cm} + \frac{H}{60} + 6 * S = 0,174 + \frac{5}{60} + 6 * 0,001 = 0,263$$

Prema analitičkim metodama granična vrijednost za pojavu pukotina je iznad 0,4. I ovdje je kod maksimalnog sadržaja elemenata parametar P_L iznad dozvoljene granične vrijednosti, a kod stvarnog sastava je u prihvatljivim granicama. SSAB garantira za svoje materijale da nisu skloni ovim vrstama grešaka, a prema njihovim laboratorijskim ispitivanjima[18, 19].

Skлонost prema pukotina zbog naknadnog zagrijavanja prema najvišim sadržajima elemenata:

$$G = Cr + 3,3 * Mo + 8.1 * V - 2 = 0,8 + 3,3 * 0,7 + 8,1 * 0 - 2 = 1,11$$

Te izračun prema točno utvrđenom kenijskom sastavu

$$G = Cr + 3,3 * Mo + 8.1 * V - 2 = 0,2 + 3,3 * 0,601 + 8,1 * 0 - 2 = 0,183$$

Granična vrijednost za sklonost prema ovim pukotinama je $G > 0$. U našem slučaju izračun nam govori da je materijal sklon pukotinama prilikom naknadne TO, te se je potrebno strogo pridržavati uputstva za vremena i temperaturu prilikom takve vrste obrade, kao i kontrola međuslojne temperature.[11]

Odabir DM izvršen je prema preporukama za Strenx čelike te su uspoređeni podaci iz tehničkog lista DM o sukladnosti prema zahtijevanim normama (tablica 4.4). [25]

Na osnovi preporuka iz tablica 4.1 su očitani potrebni toplinski inputi. Kod zavarivanja različitih debljina materijala, toplinski input preporuča se računati za tanji materijal. Napomena je da se ovdje toplinski input odnosi na dio koji će biti unesen samim zavarivanjem.

Podaci o predgrijavanju (tablica 4.1):

$$T_{O \min} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Najviši toplinski input za OM predgrijan na 100 °C (dijagram 4.3)

za debljinu OM 10 mm – 0,99 kJ/mm – preporučeni max. toplinski input za zahtijevani spoj

za debljinu OM 30 mm – 2,5 kJ/mm

Preko formule (12) možemo izračunati potrebni toplinski input, a za to nam je potrebno još i vrijeme $t_{8/5}$. Iz preporuka SSAB-a potrebno je da to vrijeme iznosi 5-15 s. Prema preporukama za zavarivanje, u računski dio ulazi srednje vrijeme. Kako se zavaruje debljina od 30 mm, smatramo da je vođenje topline u 3D modelu pa koristimo slijedeću formulu (12):

$$E_{ef} = Q = \frac{2 * \pi * \lambda * t_{8/5}}{\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0}} \quad (12) [11]$$

Izračunati toplinski inputi isti se za obje debljine u zavaru, a ovisno o vremenu $t_{8/5}$ iznose:

- vrijeme $t_{8/5} = 5$, $Q = 1,22\text{kJ/mm}$ – odabrani toplinski input
- vrijeme $t_{8/5} = 10$, $Q = 2,45\text{kJ/mm}$
- vrijeme $t_{8/5} = 15$, $Q = 3,68\text{ kJ/mm}$

Svi izračunati toplinski inputi su preveliki za tanji materijal i $T_0=100\text{ }^\circ\text{C}$. Da bi dobili toplinski input u granicama moramo povećati temperaturu predgrijavanja. Računskim probama utvrđena je temperatura predgrijavanja od $175\text{ }^\circ\text{C}$, a toplinski inputi su slijedeći:

- vrijeme $t_{8/5} = 5$, $Q = 0,89\text{kJ/mm}$ – odabrani toplinski input
- vrijeme $t_{8/5} = 10$, $Q = 1,78\text{kJ/mm}$
- vrijeme $t_{8/5} = 15$, $Q = 2,67\text{ kJ/mm}$

Odabrana je temperatura predgrijavanja od 175°C jer toplinski inputi za odgovarajući interval $t_{8/5}$ su u granicama preporučenih, odnosno manje od $0,99\text{ kJ/mm}$

Uz odabrani toplinski input iz tablica može se proračunati vrijeme $t_{8/5}$ prema formuli (13), a nama će poslužiti za kontrolu odabira toplinskog inputa.

$$t_{8/5} = (6700 - 5 * T_0) * Q * \left(\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right) * F_3 \quad (13) [19]$$

Rezultat iznosi oko $5,13\text{ s}$ i nalazi se unutar preporučenih vrijednosti iz brošura SSAB-a.

Prema dobivenim i iz tablica izvađenim podacima, pristupa se izradi pWPS-a (slika 5.3) sa svim parametrima zavarivanja. Da bi bili parametri najpovoljniji što mogu biti za traženu kvalitetu i da se parametri ne određuju samo prema iskustvu, vrlo su bitni podaci o DM (slika 5.2), a koji odgovara preporukama proizvođača čelika.[25]

Klasifikacije:

AWS-SFA-5.29 :E 120 T5-G
 EN 12535 : T89 4 Mn2Ni1CrMo B M3 H5
 EN ISO 18276-A :T894Mn2Ni1CrMoBM3 H5
 EN ISO 18276-B :T834T5-3MA-N4C2M2 H5

FILTUB 38B

Osobine i primena:

FILTUB 38B je srednjelegirana visokobazična punjena žica, pogodna za zavarivanje finoizrni čelika zatezne čvrstoće do 1100 N/mm². Optimalne rezultate pri zavarivanju dobijamo ako je unos energije $E \leq 15$ kJ /cm i ako međuprolazna temperatura ne prelazi 150°C. Zavarivanje ovom žicom odlikuju sve osobine koje su važne za bazične punjene žice.

Osnovni materijali:

	DIN	W.Nr. :
Finozrni čelici	StE 460 , StE 500 WStE 500 , TStE 460 TStE 500	1.8905 , 1.8907 1.8937 , 1.8915 1.8917
Poboljšani finozrni čelici	NAXTRA 56 , NAXTRA 63 HY 80	1.8944 , 1.8954 1.6780
Termički postojani finozrni čelici	WB 35 , WB 36 BHW 35 , BHW 38 XABO 620 , XABO 890 , XABO 960	1.5403 , 1.6368 1.8807 1.8914 , 1.8925 , 1.8933

Tip žice:

bazični

Vrste struje:

DC + / (-)

Položaji zavarivanja:



Zaštitni gas:
(EN 439)

M 21
Potrošnja: 12 - 18 l / min

Tipične osobine čistog metala šava:

Hemijski sastav, ut %:

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,05	0,45	1,60	1,0	2,10	0,40

Sadržaj vodonika na 100 g metala šava: < 5 ml

Mehaničke osobine:

Napon tečenja	R _{p0.2%} :	> 880 N/mm ²
Zatezna čvrstoća	R _m :	940 - 1050 N/mm ²
Izduženje	A ₅ :	> 14 %
Žilavost	A _v :	> 60 J (na 0°C) > 55 J (na - 20°C) > 47 J (na - 40°C)

Parametri zavarivanja i pakovanje:

Odobrenja:	Parametri zavarivanja				Pakovanje
	φ mm	Jačina struje A	Napon V	Brzina žice m / min	
	1,2	150 - 200	20 - 27	3,0 - 10,0	K 300 , D 300 precizno namotano težina cca. 15 kg
	1,4	170 - 290	22 - 30	2,8 - 8,8	
	1,6	200 - 350	24 - 34	4,0 - 10,0	

Slika 5.2 Tehnički list za DM [25]

SPECIFIKACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA SCHWEIßANWEISUNG pWPS	pWPS Br. /Nr.: 001
	Rev. Br. /Nr.: 00

Proizvođač, mjesto / Hersteller, Ort

Postupak zavarivanja (EN ISO 4063)

Schweißverfahren des Herstellers:

135 MAG

Oznaka br./ Beleg Nr..

WPQR Nr.:

Zavarivač/ Schweißer

Vrsta spoja i zavara

FW

Položaj zavarivanja:

PB

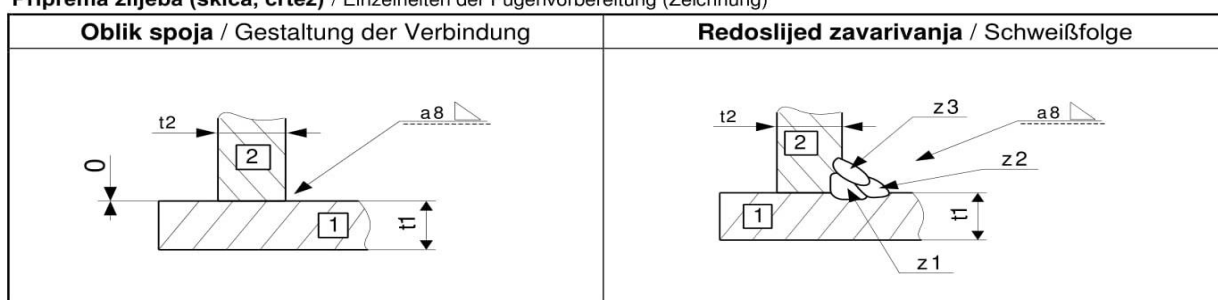
Verbindungsart und Nahtart:

Schweißposition:

Br. Nr.	Osnovni materijal Grundwerkstoffs	Debljina izratka Werkstückdicke	Promjer cijevi Rohrdurchmesser	Specifikacije materijala Spezifikation des Grundwerkstoffs	Grupa prema / Gruppe nach	
					CR ISO 15608	AD-Me.
1	Strenx 960	t1 = 30 mm	-	Interne OX Richtlinie	3.2	-
2	Strenx 960	t2 = 10 mm	-	Interne OX Richtlinie	3.2	-

Vrsta pripreme i čišćenja / Art der Vorbereitung und Reinigung: - **rezanje i brušenje** / schneiden und schleifen

Priprema žlijeba (skica, crtež) / Einzelheiten der Fugenvorbereitung (Zeichnung)



Podaci zavarivanja / Einzelheiten für Schweißen

Prolaz zavara Schweißraupe	Proces Prozess	Promjer dodatnog materijala (mm) Durchmesser des Zusatzwerkstoffes	Jakost struje Stromstärke (A)	Napon Spannung (V)	Vrsta struje – polaritet Stromart - Polung	Brzina žice Drahtvorschub (m/min)	Brzina zavariva. Vorschub-Geschwindigkeit (mm/min)	Unos topline Wärmeein-Bringung (kJ/mm)
z1	135	∅ 1,2	185 – 200	23,0 – 24,5	= +	8,0	250 - 300	0,77 – 0,94
z2	135	∅ 1,2	215 – 225	24,0 – 24,5	= +	8,3	250 - 300	0,82 – 1,05
z3	135	∅ 1,2	200 – 225	23,0 – 24,5	= +	8,0	300 - 360	0,64 – 0,88

Dodatne napomene / Zusätzliche Bemerkungen:

Dodatni materijal Zusatzwerkstoff:	Zaštitni plin Schutzgas:	Prašak Schweißpulver:	Zaštita korijena Wurzelschutz:
Oznaka i standard Bezeichnung und Standard: G 89 5 M Mn4Ni2,5CrMo EN ISO 16834	M21; DIN EN ISO 14175		
Oznaka i proizvođač Bezeichnung und Hersteller: BÖHLER, Union X 96; ∅1,2mm	82 % Ar + 18%CO2; Linde (Corgon)		
Posebne upute za sušenje / Sondervorschriften für Trocknung: ---			
Protok plina / Gasdurchflussmenge: ---	15 - 18 l/min		l/min
Razmak kontaktne vodilice / Kontaktdüsenabstand: ---	15 – 20 mm		
Vrsta i promjer W elektrode: Wolframelektrode und Durchmesser: ---		Pojedinosti žlijebljenja: Einzelheiten über Ausfugen: ---	
Pojedinosti podloge zavarivanja / Schweißbadsicherung: ---			
Temperatura predgrijavanja: Vorwärmtemperatur: ---	TP = 100 - 125°C	Temperatura međusloja / Zwischenlagentemperatur: ---	Ti max. ≤ 300 °C
Naknadna toplinska obrada i/ili odžarivanje / Wärmenachbehandlung und/oder Aushärten: ---			
Vrijeme, temperatura, proces / Zeit, Temperatur, Verfahren: - brzina zagrijavanja i hlađenja / Erwärmungs und Abkühlungsrate: ---			

Ostale informacije / Weiter Informationen:

Način prijenosa metala; impulsni / standardni: Schweißmod, Pulse, Standard:	Standardni: z1	Impulsni: z2, z3
Njihanje (širina prolaza) / Pendel (maximale Raupenbreite): ---	Njihanje / Pendeln	
- amplituda / Amplitude: ---	- frekvencija / Frequenz: ---	- vrijeme zadržavanja / Verweizeit: ---

Proizvođač / Hersteller:

Ispitivač ili ispitno tijelo / Prüfer oder Prüfstelle:

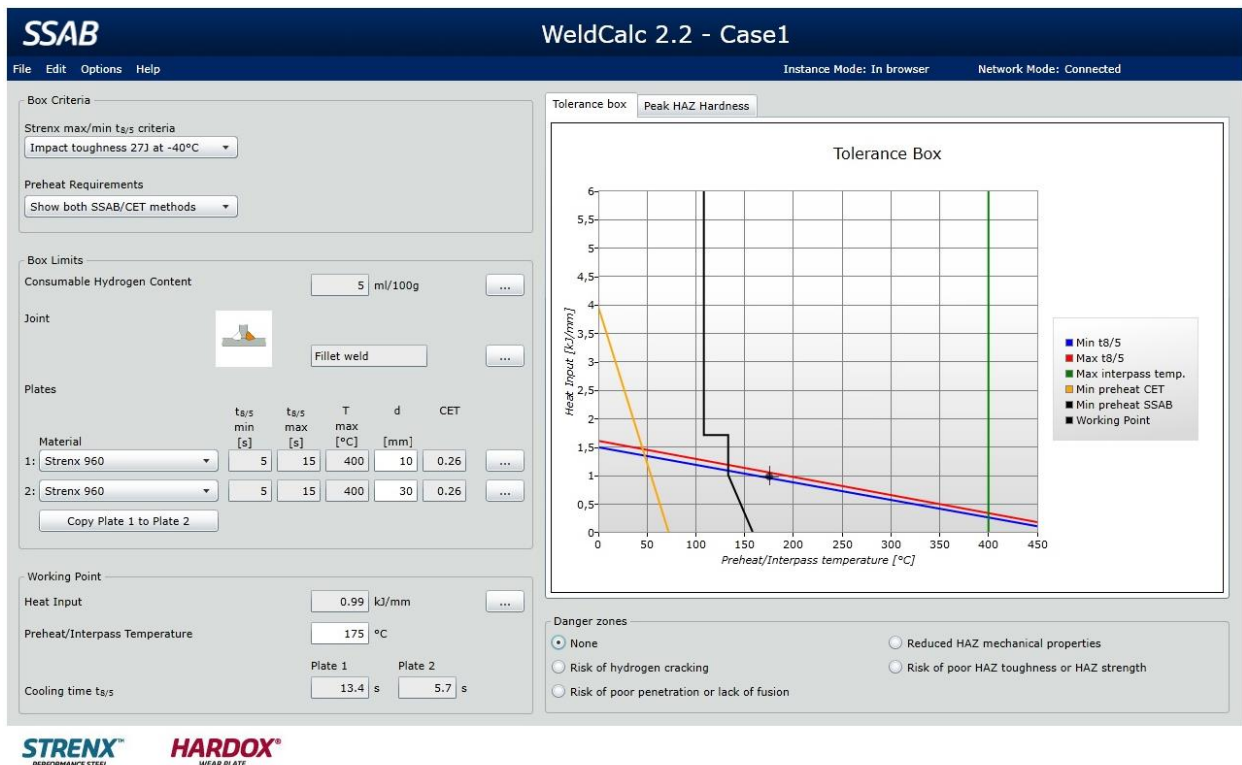
Zoran Majcen, 29.04.2017.

Ime, datum i potpis / Name, Datum und Unterschrift

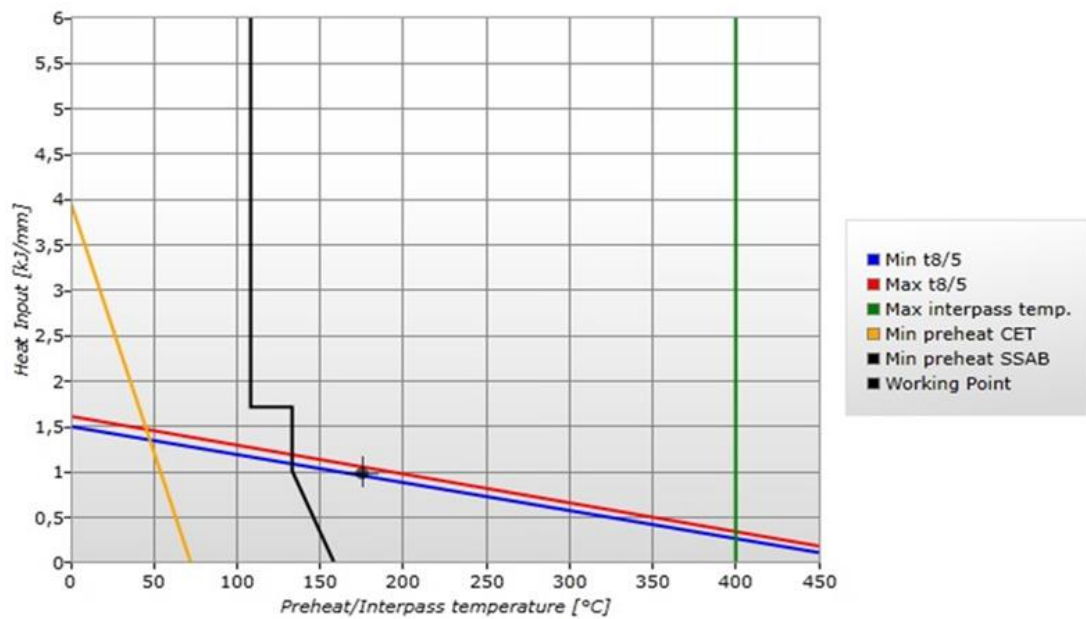
Ime, datum i potpis / Name, Datum und Unterschrift

Slika 5.3 pWPS za obrađeni primjer zavara

Sve analitički dobiveni rezultati uspoređuju se sa rezultatima dobivenima kroz program WeldCalc (slika 5.4) tvrtke SSAB, a koji nam precizno pokazuje potrebne parametre i moguće pogreške (slika 5.5).

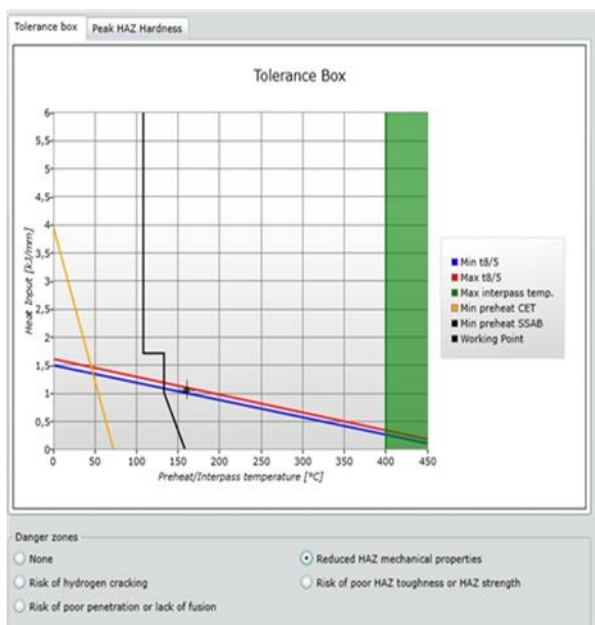
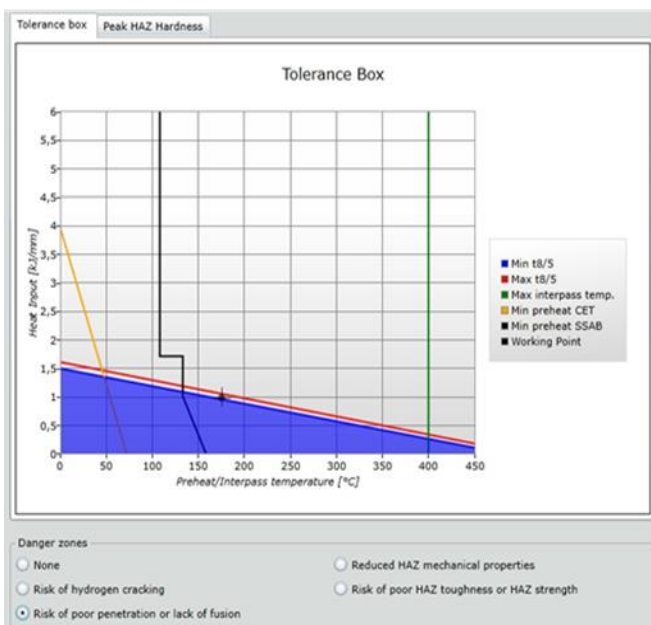
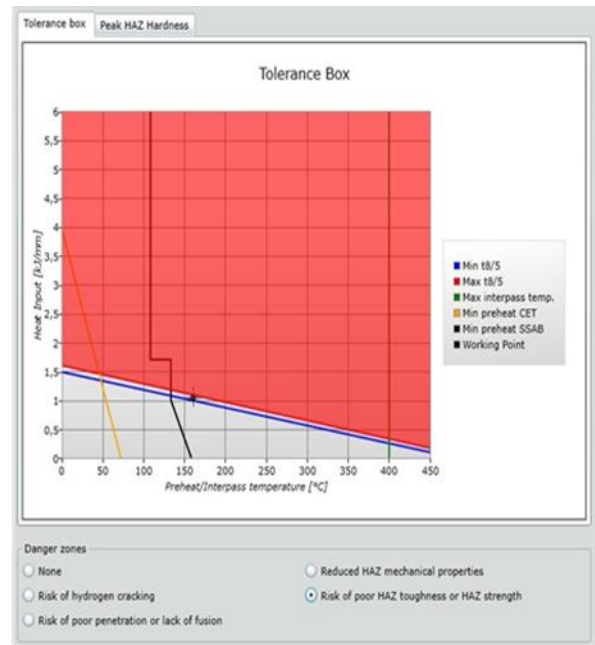
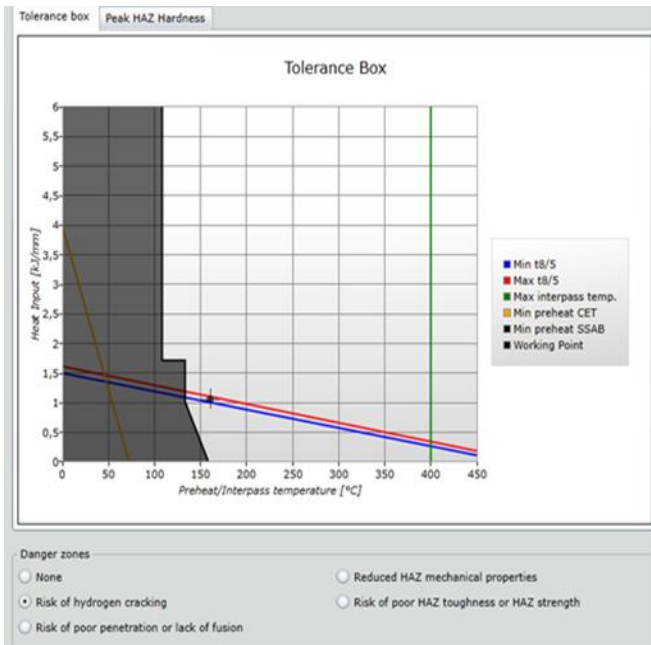


Slika 5.4 Aplikacija WeldCalc za proračun parametara zavarivanja [26]



Slika 5.5 Uvećani prikaz dijagrama sa linijama tolerancije na pojavu pojedinih grešaka [26]

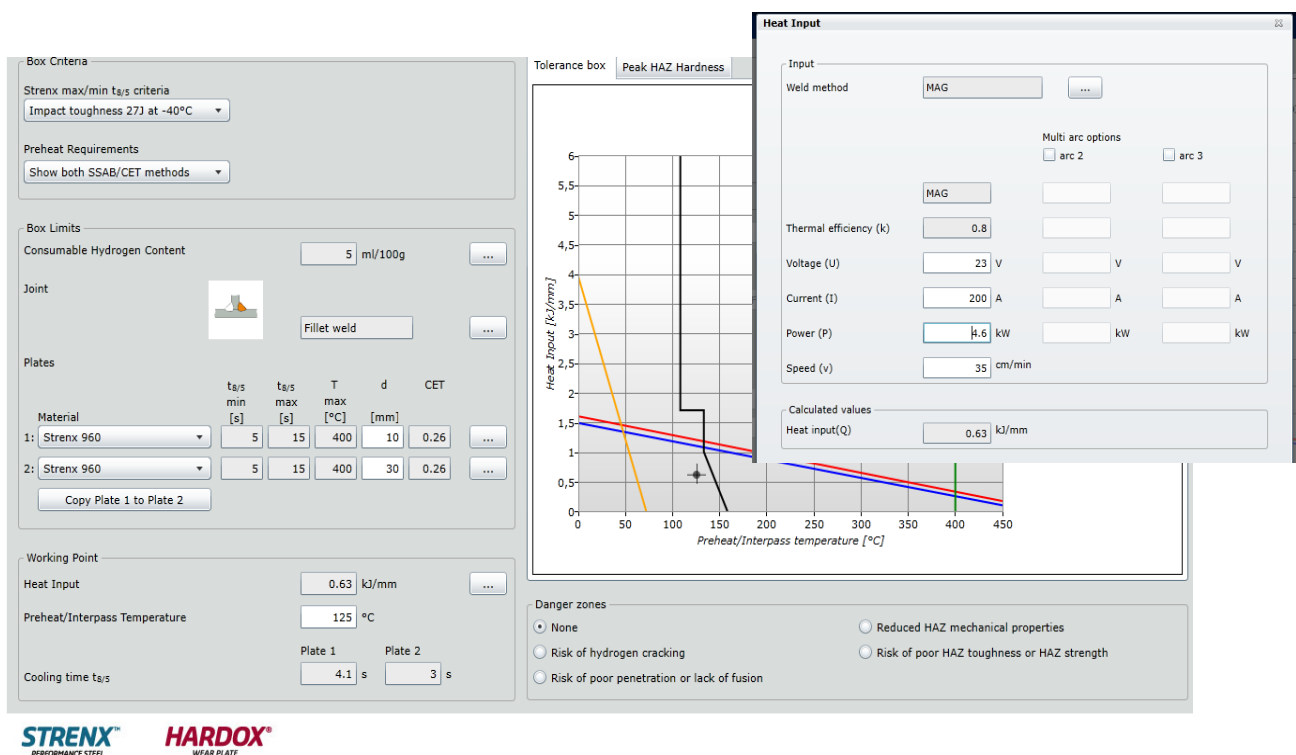
Vrlo koristan je prikaz na dijagramu područja u kojima se dolazi do pojave hladnih pukotina (tamnosivo), gubitka žilavosti i čvrstoće (crveno), poroznosti ili lamelnog trganja (plavo) te smanjenja mehaničkih svojstava (zeleno) (slika 5.6). Plava i crvena linija označavaju područje povoljnog intervala za vrijeme hlađenja od temperature 800 do 500 °C. [26]



Slika 5.6 Prikaz različitih područja pojave grešaka [26]

Crna točka na dijagramu označava odnos odabranih parametara prema navedenim pogreškama. Najpovoljniji slučaj je kada se ta točka nalazi u intervalu između $t_{8/5min}$ i $t_{8/5max}$, te kada ne ulazi u područje preniske ili previsoke T_0 . Dobro je primijetiti crnu liniju (slika 5.5) na dijagramu koja označava minimalno potrebnu temperaturu predgrijavanja prema SSAB preporukama, a koja se razlikuje od žute linije, odnosno preporuka prema CET. Točan sastav materijala nije nužan, ali se putem njega dobivaju točniji podaci.

Za provjeru, unosom manjih vrijednosti parametara (slika 5.7) primjetno je značajno odstupanje od područja u kojem se ne očekuje pojava pogrešaka.

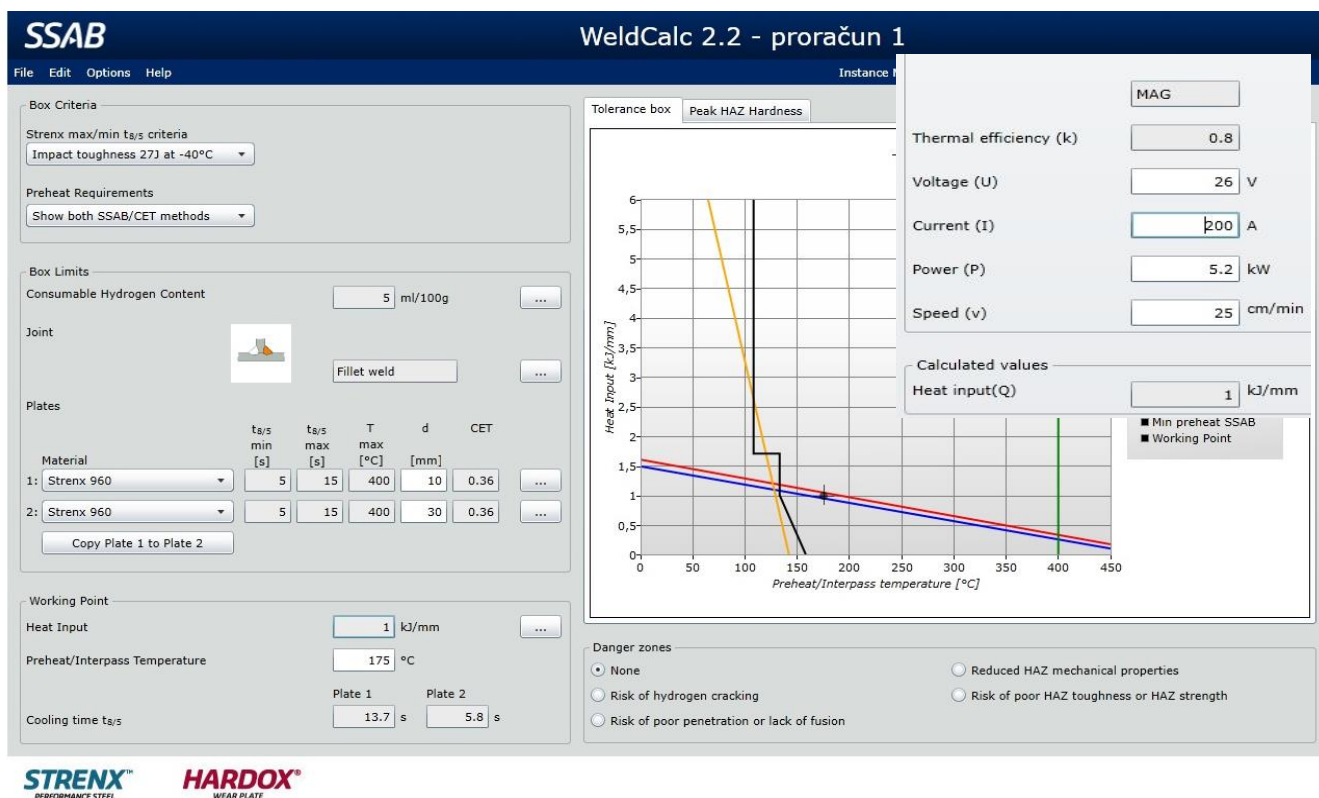


Slika 5.7 Promjenom parametara narušena kvaliteta zavarivanja (crna točka) [26]

Na ovaj je način olakšan izbor optimalnih parametara zavarivanja, a kako bi se ispoštovala ograničenja koja nameće sam materijal, bez da se izgube njegova povoljna svojstva. Optimalnim odabirom parametara postižu se i zadovoljavajući ekonomski učinci (manje prolaza, niža temperatura predgrijavanja, manji trošak energije, izbjegavanje naknadnih popravaka).

Usporedbom vrijednosti parametara (tablica 5.3) dobivenih preko aplikacije WeldCalc (slika 5.8) te parametara koji su izračunati putem raznih formula, izvađenih iz priručnika i iskustva iz prakse, utvrđena su vrlo mala odstupanja, osim kod temperature predgrijavanja. To dokazuje pravilan odabir parametara, a razlika u temperaturi predgrijavanja nije prevelika i ne donosi pojavu grešaka.

Ovaj način je još sigurniji u nastojanju osiguranja kvalitetnog zavarenog spoja dvije ploče Strenx 960 čelika.



Slika 5.8 Konačni izračun parametara zavarivanja za prvi prolaz [26]

Zbog razlike temperatura izrađen je novi pWPS kao konačan prijedlog prije atestacije (odobrenja) postupka i parametara zavarivanja za odabrani zavareni spoj. Osim promjene temperatura promijenjen je i DM koji sada potpuno odgovara OM, a ostali parametri ostali su u približnim vrijednostima. Za prolaz broj 2 korištena je veća gustoća toplinskog inputa zbog toga jer ovaj zavar gotovo u potpunosti naliježe na deblji materijal. Toplinski inputi pri tome nisu značajnije promijenjeni, a vremena $t_{8/5}$ za oba materijala su u granicama preporuka. [26]

Tablica 5.3 Usporedba vrijednosti parametara ovisno od sastava materijala

parametri	Analitički izračun parametara (maksimalni udio leg. elemenata)	Izračun parametara prema točnom kemijskom sastavu ili pomoću aplikacije WeldCalc
CET(CEV)	0,54 (0,92)	0,38 (0,58)
P_{cm}	0,523	0,174
P_w	0,586	0,31
T_O	452	54
$T_{8/5}$	5,13	13,7 (d=10 mm), 5,8 (d=30 mm)
H.C.S.	2,22	0,396
P_L	0,62	0,263
G	1,11	0,183

	SPECIFIKACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA SCHWEIßANWEISUNG pWPS	pWPS Br. /Nr.: 001
		Rev. Br. /Nr.: 00

Proizvođač, mjesto / Hersteller, Ort

Završni rad- zavarivanje Strenx čelika

Postupak zavarivanja (EN ISO 4063)

Schweißverfahren des Herstellers:

135 MAG

Oznaka br./ Beleg Nr..

WPQR Nr.:

Zavarivač/ Schweißer

Vrsta spoja i zavara

FW

Položaj zavarivanja:

PB

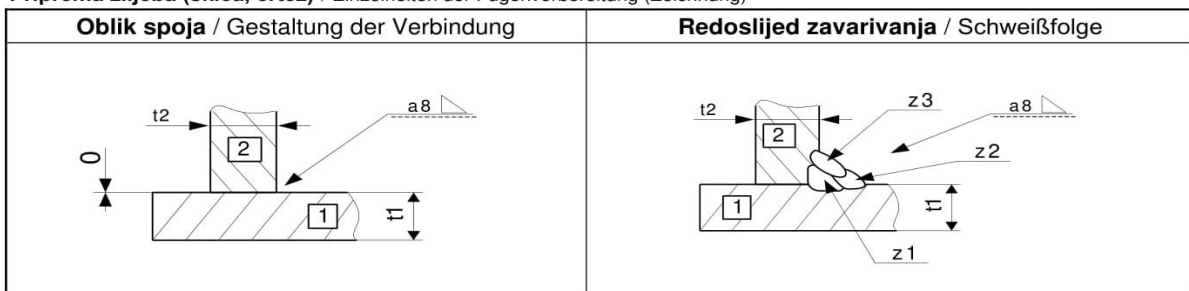
Verbindungsart und Nahtart:

Schweißposition:

Br. Nr.	Osnovni materijal Grundwerkstoffs	Debljina izratka Werkstückdicke	Promjer cijevi Rohrdurchmesser	Specifikacije materijala Spezifikation des Grundwerkstoffs	Grupa prema / Gruppe nach	
					CR ISO 15608	AD-Me.
1	Strenx 960	t1 = 30 mm	-	Interne OX Richtlinie	3.2	-
2	Strenx 960	t2 = 10 mm	-	Interne OX Richtlinie	3.2	-

Vrsta pripreme i čišćenja / Art der Vorbereitung und Reinigung: **- rezanje i brušenje** / schneiden und schleifen

Priprema žlijeba (skica, crtež) / Einzelheiten der Fugenvorbereitung (Zeichnung)



Podaci zavarivanja / Einzelheiten für Schweißen

Prolaz zavara Schweißraupe	Proces Prozess	Promjer dodatnog materijala (mm) Durchmesser des Zusatzwerkstoffes	Jakost struje Stromstärke (A)	Napon Spannung (V)	Vrsta struje – polaritet Stromart - Polung	Brzina žice Drahtvorschub (m/min)	Brzina zavariva. Vorschub-Geschwindigkeit (mm/min)	Unos topline Wärmeein-Bringung (kJ/mm)
z1	135	ø 1,2	195 – 205	25,5 – 26,0	= +	7,1	240 - 260	0,92 – 1,07
z2	135	ø 1,2	210 – 215	26,0 – 26,5	= +	7,3	260 - 280	0,94 – 1,05
z3	135	ø 1,2	185 – 195	25,5 – 26,0	= +	7,0	240 - 260	0,87 – 1,01

Dodatne napomene / Zusätzliche Bemerkungen:

Dodatni materijal Zusatzwerkstoff:		Zaštitni plin Schutzgas:	Prašak Schweißpulver:	Zaštita korijena Wurzelschutz:
Oznaka i standard Bezeichnung und Standard	G 89 5 M Mn4Ni2,5CrMo EN ISO 16834	M21; DIN EN ISO 14175		
Oznaka i proizvođač Bezeichnung und Hersteller	ELEKTRODE JESENICE, FILTUB 38B, Ø1,2mm	82 % Ar +18%CO2; Linde (Corgon)		
Posebne upute za sušenje / Sondervorschriften für Trocknung: ---				
Protok plina / Gasdurchflussmenge:		15 - 18 l/min		l/min
Razmak kontaktne vodilice / Kontaktdüsenabstand:		15 – 20 mm		
Vrsta i promjer W elektrode: Wolframelektrode und Durchmesser:	---	Pojedinosti žlijebljenja: Einzelheiten über Ausfugen:		---
Pojedinosti podloge zavarivanja / Schweißbadsicherung: -				
Temperatura predgrijavanja: Vorwärmtemperatur:	Tp = 175 ± 10 °C		Temperatura međusloja / Zwischenlagentemperatur:	Ti max. ≤ 300 °C
Naknadna toplinska obrada i/ili odžarivanje / Wärmenachbehandlung und/oder Aushärten: ---				
Vrijeme, temperatura, proces / Zeit, Temperatur, Verfahren: - brzina zagrijavanja i hlađenja / Erwärmungs und Abkühlungsrate: ---				

Ostale informacije / Weiter Informationen:

Način prijenosa metala; impulsni / standardni: Schweißmod, Pulse, Standard:	Standardni: z1	Impulsni: z2, z3
Njihanje (širina prolaza) / Pendel (maximale Raupenbreite):	Njihanje / Pendeln	
- amplituda / Amplitude: ---	- frekvencija / Frequenz: ---	- vrijeme zadržavanja / Verweizeit: ---

Proizvođač / Hersteller:
Zoran Majcen, 19.06.2017.

Ispitivač ili ispitno tijelo / Prüfer oder Prüfstelle:

Ime, datum i potpis / Name, Datum und Unterschrift

Ime, datum i potpis / Name, Datum und Unterschrift

Slika 5.9 Konačan pWPS za zahtijevani zavar

6. ZAKLJUČAK

Upotrebom čelika visoke čvrstoće dobivamo proizvod visokih karakteristika, no samo u slučaju da su isti bili pravilno upotrijebljeni. Zavarivanje, kao najzastupljeniji način spajanja kod čeličnih konstrukcija, može nam osigurati visoke performanse koje ima i osnovni materijal uz mnogo strože pridržavanje proračunatih ili od strane proizvođača preporučenih parametara zavarivanja.

Zbog niskog sadržaja ugljika, visokočvrsti čelici su izuzetno dobro zavarljivi, ali i vrlo podložni hladnim pukotinama, kao jednoj od najopasnijih grešaka pri zavarivanju. Pojava samo manjeg broja pukotina u zavaru može znatno oslabiti konstrukciju, učiniti je neuporabljivom. Uz strogo pridržavanje uvjeta zavarivanja za visokočvrste čelike povećavaju se tehnološki troškovi ali je dobit neusporedivo veća nego izvršavanje naknadnih popravaka. Kako pojava hladnih pukotina nije vidljiva odmah nakon operacije zavarivanja, postoji mogućnost da se greške pojave i kada je konstrukcija već u upotrebi pa štete, u odnosu na povećane tehnoloških troškova, mogu biti mnogostruko veće.

Proizvodnja visokočvrstih čelika zahtijeva visoku razinu tehnološke opremljenosti, kako zbog smanjenja neželjenih primjesa, tako i zbog strogo kontroliranih uvjeta hlađenja i mehaničke obrade. Zavarivanje ovih čelika, nasuprot proizvodnji, ne zahtijeva posebnu opremu. Oprema za zavarivanje u odnosu na obične čelike razlikuje se tek u opremi za kontrolu temperature. Najvažnija razlika u postupku zavarivanja visokočvrstih čelika u odnosu na obične je educiranost zavarivača i njegova spremnost na točno slijedenje uputa za zavarivanje.

Problem nedovoljne educiranosti je podcijenjen. Vrlo je često mišljenje da se ovi čelici zavaruju kao i obični jer osim zaštitne prevlake nema vidljive razlike. I nakon zavarivanja, gdje je u ZUT moguć manji ili veći gubitak povoljne sitnozrnate strukture, nema vidljive razlike. No pogrešno izvedenim postupcima moguće je, kao što je i ranije navedeno, višestruko umanjiti povoljna svojstva osnovnog materijala.

Iako je samo teoretski obrađeno zavarivanje visokočvrstih Strenx čelika, dokazano je da odstupanje od proračunatih ili od strane proizvođača preporučenih parametara i postupaka povezanih sa zavarivanjem može prouzročiti nastanak zavarenog spoja loše kvalitete. Upravo to je cilj zavarivanja, dobiti kvalitetan spoj, pa je ovim malim istraživanjem skrenuta pozornost osobama koje su presudne da uspjeh bude potpun.

Varaždin, 14.07.2017.



Literatura:

1. T.Filetin, F.Kovačićek, J.Indof :SVOJSTVA I PRIMJENA MATERIJALA, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb , Zagreb,2009.
2. M. Alagušić, F. Lavriv; EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE REOLOŠKIH SVOJSTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA ; završni rad; Građevinski fakultet Zagreb, 2010.
3. <http://e-metallicus.com/hr/metal/celik.html>, travanj, 2017.
4. <http://www.fabemametal.hr/> , travanj, 2017.
5. S.Kožuh : SPECIJALNI ČELICI – SKRIPTA , Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
6. B.Kraut : STROJARSKI PRIRUČNIK, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
7. https://www.researchgate.net/publication/236644976_Strength_analysis_of_the_kinematic_pairs_of_a_mobile_collapsible_bridge/ , travanj, 2017.
8. <https://www.ssab.com/products/brands/strenx> , ožujak, 2017.
9. K. Tandarić : Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2015.
10. <https://www.ssab.com/> , ožujak, 2017.
11. Z.Lukačević : ZAVARIVANJE, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 1998.
12. I.Samardžić: Skripta TEHNIKE SPAJANJA , Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavoski Brod, 2016.
13. DŽafer Kudumović: ZAVARIVANJE I TERMIČKA OBRADA, Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike i mašinstva, 1997.
14. I.Samardžić i studenti: digitalni udžbenik ANALIZA TEHNOLOGIČNOSTI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2017.
15. http://www.wikiwand.com/sh/Metalna_konstrukcija , svibanj, 2017.
16. <http://www.metalworkingworldmagazine.com/> , svibanj, 2017.
17. I.Samardžić: skripta TEHNOLOGIJA III, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2017.
18. <https://www.ssab.com/SSAB-Strenx-Welding-Brochure-2017> , travanj, 2017.
19. SSAB Company, WELDING HANDBOOK-GUIDE TO BETTER WELDING OF HARDOX AND WELDOX, EDITION 1, Oxelosund, Sweden, 2016.
20. M.Horvat: skripta ZAVARLJIVOST, TOPLINSKE OBRADU U ZAVARIVANJU Tehnologija III, UNIN, Varaždin, 2017.

21. F.Vusić: završni rad ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2014.
22. T. Tomić Kovačević: doktorski rad UTJECAJ SADRŽAJA VODIKA NA ZAVARLJIVOST ČELIKA API 5L X80, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2012.
23. <https://www.ssab.com/support> - tomas.brtnik@ssab.com , lipanj, 2017.
24. <http://slideplayer.com/slide/1566288/> Metallurgy of High Strength Steel N. Yurioka, svibanj, 2017
25. http://www.honex.rs/sites/default/files/jesenice/elektrode_web.pdf , lipanj, 2017.
26. [https://extern.ssab.com/wa_transparent_root WeldCalc](https://extern.ssab.com/wa_transparent_root_WeldCalc) , lipanj, 2017.
27. www.worldautosteel.org , lipanj, 2017.



**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, ZORAN MAJCEN pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom ZAVARIVANJE ČELIKA STRENX 960E te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Zoran Majcen

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, ZORAN MAJCEN neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom ZAVARIVANJE ČELIKA STRENX 960E čiji sam autor.

Student:
Zoran Majcen

(vlastoručni potpis)