

Problematika varjenja poboljšane konstrukcijskega jekla tipa N-A-XTRA v težkih konstrukcijah!

Med poboljšana dobro variva jekla štejemo visoko trdnostna jekla z omejeno vsebnostjo C, dobro žilavostjo in istočasno visoko mejo plastičnosti, ki ni dosežena samo s kemično sestavo, temveč v glavnem s poboljšanjem po valjanju.

Zaradi visokih mehanskih lastnosti omogočajo taka jekla lažje in cenejše konstrukcije, s tehnološke strani pa prinašajo več problematike kot visoko trdnostna normalizirana jekla.

K varjenju poboljšanih jekel, se lahko pristopi šele po dobrem poznavanju celotnega spektra strokovne literature, po do podrobnosti izdelani varilni tehnologiji, po do podrobnosti preverjeni usklajenosti varilne opreme z delovno ekipo in po zagaranirani disciplini delovne ekipe do tako zahtevnega varjenja, kajti že večje vremenske spremembe lahko privedejo do večjih motenj in napak.

Jeklo tipa N-A-XTRA 70 je primerno za uporabo v vseh težkih varjenih konstrukcijah; uporabili smo ga pri varjenju težkega tlačnega cevovoda v debelinah od 11 do 27 mm.

Značilnosti jekla N-A-XTRA 70

Jeklo je izdelek Tyssnovega koncerna in predstavlja v Evropi najbolj uporabljeno konstrukcijsko jeklo poboljšane tipa za tlačne cevovode, mostove, tlačne posode za nizke temperature in ima naslednje karakteristike:

— izdelano je po Siemens-Martinovem postopku, poboljšano po vročem valjanju v napravi, ki

jeklo kontinuirno segreva, kali z vodo ter popušča na določeno trdnost;

— minimalne mehanske karakteristike so v smeri pravokotno na valjanje naslednje (1) — tabela 1

— za statično obremenjene konstrukcije (< 1000 nihajev) znaša varnostni faktor $s = 1,8$, kar velja za napetostno nežarjene konstrukcije. Za dinamično obremenjene konstrukcije (> 1000 nihajev) je $S \sim 1,5$, vendar ga je točneje potrebno določiti po posvetu med izdelovalcem pločevine, naročnikom in nadzornim organom. Diagram št. 1 (2) prikazuje za N-A-XTRA 70 trajno utripno trdnost pri 2×10^6 nihajih.

Če primerjamo vrednosti x , ki so vnešene v diagram št. 1 s tistimi za normalizirana jekla, opazimo, da N-A-XTRA 70 prenese pri $10^3 - 10^4$ nihajih dvojno višino trajne utripne vrednosti kot pa jeklo St 52.3 (3). Pri povišanju nihajev in v primeru da je x negativen, pa ta vrednost pada in se vrednosti trajne utripne trdnosti obeh jekel izenačujejo in tako pri jeklu N-A-XTRA 70, glede na normalizirana visokotrdnostna jekla pri dinamičnih obremenitvah pridobimo le malo.

— Z dopustno napetostjo pri izračunu neke konstrukcije reguliramo, da ne pride do nasilne porušitve, plastične deformacije ali utrujenostnega loma, tako dolgo dokler ta napetost ni prekoračena. Pri teh varnostnih ukrepih pa ni vzeta v obzir lastnost kubičnega prostorsko centriranega α Fe, da se z znižanjem temperature njegova deformabilnost skokoma spreminja in je pri določeni temperaturi pri napetostih, ki so daleč pod mejo

Tabela 1

Oznaka	σ_s kpm/mm ²	σ_B kpm/mm ²	δ_5 %	ψ %	Žilavost — V zarezu kpm/cm ²
N-A-XTRA 70	70	80—95	16	55	5 pri 0° C 4 pri — 20° C 3,5 pri — 40° C
Kem. analiza:	0,20 % C, 0,50—0,90 % Si, 0,70—1,10 % Mn, 0,04 % P, 0,04 % S, 0,60—1,00 % Cr 0,20—0,60 % Mo, 0,08—0,12 % Zr				

Tabela št. 1
Mehanske karakteristike jekla N-A-XTRA 70

A - jeklo z valjčno kožico
 D - neobdelani sočelni zvar
 C - neobdelani dvojni kotni zvar
 $\chi = \frac{\sigma_v}{\sigma_0}$

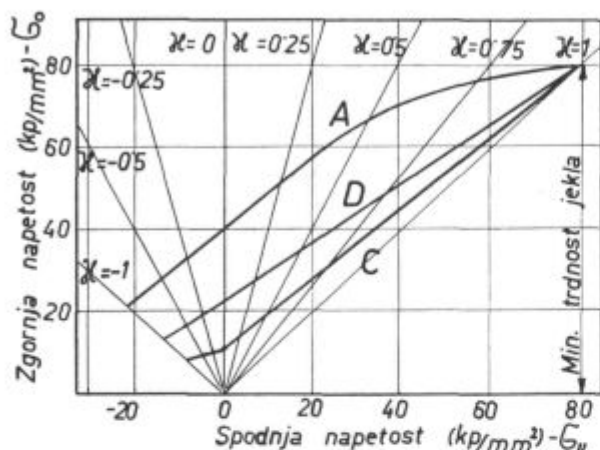


Diagram št. 1

Trajna utripna trdnost jekla N-A-XTRA 70 pri 2×10^6 nihajljih

Tabela 2

Metoda	Oblika preizkušanca	Kriterij	Prehodna temperatura °C		
			Jeklo	Zvar	Prehodna cona
1	2	3	4	5	6
Žilavostna proba	V zarez — nestarano stanje	T 3,5	— 75 do — 120	— 60	— 45
	V zarez — starano stanje	T 3,5	— 40 do — 80		
Kohaerazie proba	Ko ($r \leq 0,005$)	TL _{Ko}	— 40 do — 60		
	Bo ($r \leq 0,005$)	TL _{Bo}	— 80 do — 110	— 50	— 30
Navarilni preizkus	450 × 200 × 30 mm		do — 20 ≤ 110° žilav lom		
Drop weight test	P 2	NDT	— 50 do — 80	— 75	— 35
Robertson test	260 × 350 × 30 mm	CAT	— 50 do — 60	— 55	— 35
Drop weight tear - test	$r \leq 0,005$ mm	Ta	— 35 do — 50		
Ostri upogibni preizkus	$r \leq 0,005$ mm	Ti	— 80 do — 110	— 80	
Zarezni natezni preizkus	$r = 0,1$ mm	Ti	— 80 do — 90	— 80	

Tabela št. 2

Pregled prehodnih temperatur za jeklo, zvar in prehodnocono jekla N-A-XTRA 70 po različnih kriterijih določanja krhkega loma

smiselne fizikalne veličine (npr. kadar se lomna napetost skokoma menja v ozkem temperaturnem področju). Take metode so Drop weight test, Robertson test, Double tension test itd.

V tabeli 2 so navedene prehodne temperature po različnih kriterijih za jeklo N-A-XTRA 70.

Do tako velikega števila metod (navedene so le nekatere), je prišlo zaradi različnih pogojev, ki pri obremenitvah različnih konstrukcij nastopajo. Dosedanja spoznanja (4) prikazujejo, da lahko primerjamo med seboj rezultate metod za ugotavljanje krhkega loma, samo takrat, kadar so obremenilni pogoji (temperatura, napetostno stanje, hitrost obremenitve) primerjalni. Tako npr. ne moremo med seboj primerjati rezultate, ki jih dobimo z metodami, ki ponazarjajo obnašanje materiala v času nastopa razpoke z rezultati metod, ki ponazarjajo obnašanje materiala v času razširjanja razpok oziroma ujetja teh (ne moremo npr. primerjati prehodno temperaturo $T_{3,5}$ dobljeno s porušitvijo žilavostnih skuskov, s prehodno temperaturo NDT dobljeno z Drop weight testom).

Kot rezime tega razglabljanja, je ugotovitev, da je za določitev najnižje obratovalne temperature neke konstrukcije (s tem izbira osnovnega in dodajnega materiala) potrebno uporabiti velike preizkuse (Large—Scale—Tests kot je npr. Izotermni Robertson test za dinamične obremenitve in veliki zarezni preizkus za statične obremenitve).

Preiskave pred začetkom varjenja.

Uporabnost nekega visokotrdnostnega jekla, moramo ocenjevati kompleksno in to predvsem s stališča možnih vzrokov, ki lahko privedejo do porušitve konstrukcije (5):

- slaba izvedba projekta konstrukcije;
- anizotropnost kvalitete materiala;
- slaba izvedba v delavnici;
- spremembe v konstrukciji v času njene uporabe.

Najvažnejši faktorji, ki lahko privedejo konstrukcijo do porušitve in izvirajo iz gornjih okvirnih postavk pa so:

- termični cikel v času operacije varjenja;
- napetostni nivo in porazdelitev napetosti;
- vsebnost vodika v zvaru;
- debelina zavarjenega materiala;
- neenakomernosti različnih stopenj, ki se pojavijo v času izdelave in po njej;
- naraščanje napak v času uporabe konstrukcije;
- naraščanje krhkosti zavarjenega materiala, staranje, hladna deformacija itd.;
- oblika obremenitve — statična ali dinamična.

Preizkusi, katere pri današnjem stanju tehnike lahko izvedemo in ki navedene faktorje zajemajo,

so izbrani tako, da ponazarjajo pojave, ki izhajajo iz časa varjenja ali dejanske uporabe konstrukcije. Klasificiramo jih glede na področje zajemanja, ki so naslednja:

- razpokljivost v hladnem (Cold cracking)
- razpokljivost v vročem (Hot cracking)
- lamelarna iztrgljivost (Lamellar Tearing)
- pojav krhkega loma pod statičnimi ali dinamičnimi pogoji (Brittle fracture initiation)
- razširjanje krhkega loma in sposobnost ujetja (Arrest properties).

S temi področji so podani fenomeni, ki lahko nastopajo. Izdelovalec konstrukcije pa na osnovi njih lahko presodi, kateri od fenomenov se mu pri izdelavi lahko pojavlja ali celo več skupaj.

V nadaljevanju smo izvedli preiskave, s katerimi smo skušali za naš primer čimbolje zajeti zgornja priporočila IIW, s tem določiti nivo zahtevnosti projekta glede na uporabljeni osnovni material in na osnovi preiskav izdelati celotno varilno tehnologijo, brez katere si uspešnega varjenja ne moremo zamisliti.

Za določitev maksimalne trdote, ki lahko v prehodni coni nastopa, za določitev temperature pregrevanja pri varjenju, za določitev hladne razpokljivosti in ocenitev toplotne razpokljivosti zvara, je bila uporabljena pločevina 22 mm z naslednjimi fizikalnimi karakteristikami — tabela 3:

Tabela 3

Saržna št.	σ_s kpm/mm ²	σ_B kpm/mm ²	δ_5 %	Žilavost, DVM zareza 0° C, kpm/cm ²
136712	74,9	84,0	18	14,6 15,1 15,0

Kem.

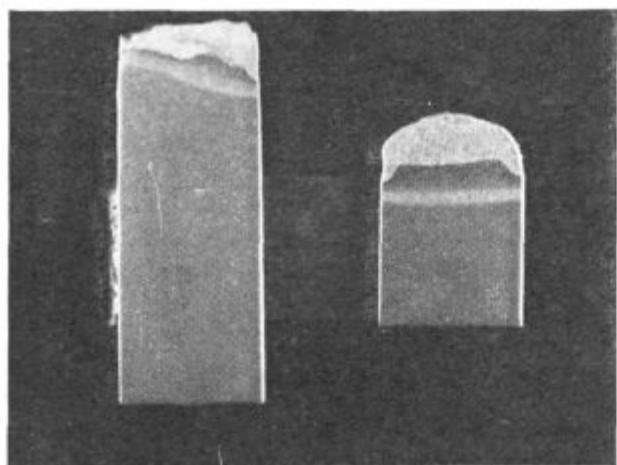
analiza: 0,17 % C, 0,66 % Si, 0,85 % Mn, 0,020 % P, 0,016 % S, 0,034 % Al, 0,76 % Cr, 0,35 % Mo

Tabela št. 3

Mehanske karakteristike jekla N-A-XTRA 70 za saržo 136712

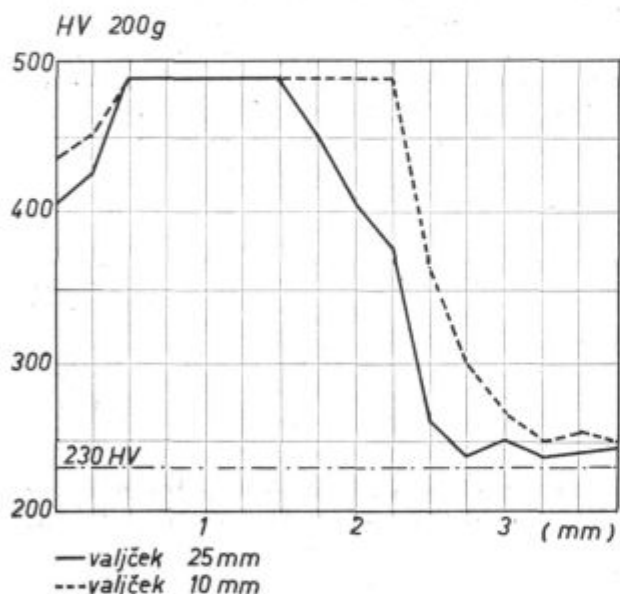
1. Določitev maksimalne trdote

Uporabljena je bila metoda »in situ« (6,7) pri kateri so bili valjčki Ø 10 mm različne dolžine, vtaknjeni v izvrtino pločevine iste debeline kot je dolžina valjčka in preko katerega se je navarilo varek z varilnimi parametri 170 A, 25 V, 150 mm/min, z bazično elektrodo, ki je bila posušena pri 300° C v trajanju 2^h. Na iztisnjenih valjčkih so bili izvedeni metalografski skuski. Slika 1 prikazuje presek obeh valjčkov in sicer Ø 10 mm v dolžini 12,5 in 25 mm.



Slika št. 1
Metalografski presek valjčkov, izvedenih po metodi
»IN SITU«

V sredini pod varkom so bile izmerjene trdote, v smeri proti osnovnemu materialu, kar prikazuje diagram 2. Maksimalna izmerjena trdota je znašala 487 HV.



Izračun trdote (8, 9) nam podaja naslednjo vrednost; po nekem kriteriju IIW, je maksimalna trdota:

$H_{\max} = (666 \times C_{eq} + 40) \pm 40 = 420 \pm 40$; velja za trdoto HV 10 kg

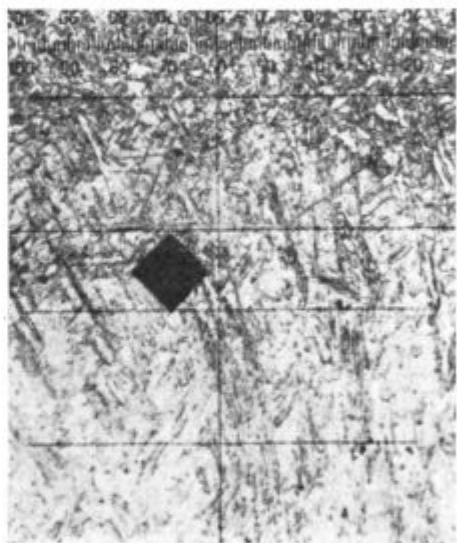
$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} = 0,57$$

V sredini tik pod varkom sta izvedena tudi metalografska posnetka; na valjčku dolžine

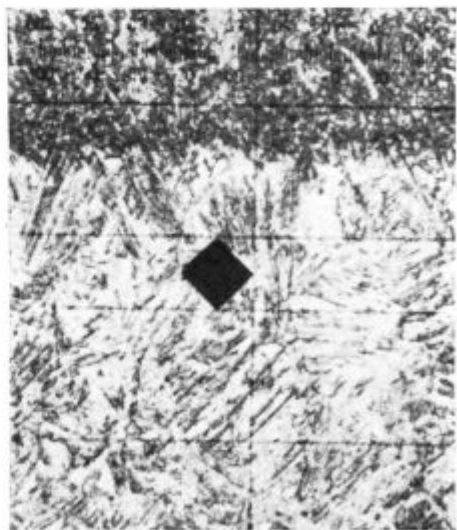
12,5 mm je izvedena slika 2, na valjčku dolžine 25 mm pa slika 3.

Iz navedenega je razvidno, da imamo v obeh ekstremnih primerih ohlajevanja približno enako trdoto, struktura je v obeh martenzitna, razlika je le v velikosti martenzitnih zrn.

Nujnost pojave nizkoogljičnega martenzita pri poboljšanih jeklih, zahteva zaradi neobičajnosti obširnejšo razlago (10). Pri višje trdnostnih normaliziranih jeklih, dobimo pri preveliki hitrosti ohlajanja v prehodni coni v področju, ki je bilo segreto nad AC_3 točko, višjeogljični martenzit (nizkoogljični martenzit ne dobimo, ker je jeklo prenizko legirano in so ohlajevalne hitrosti za nastanek, prenizke), ki je krhek in se zato pri nor-



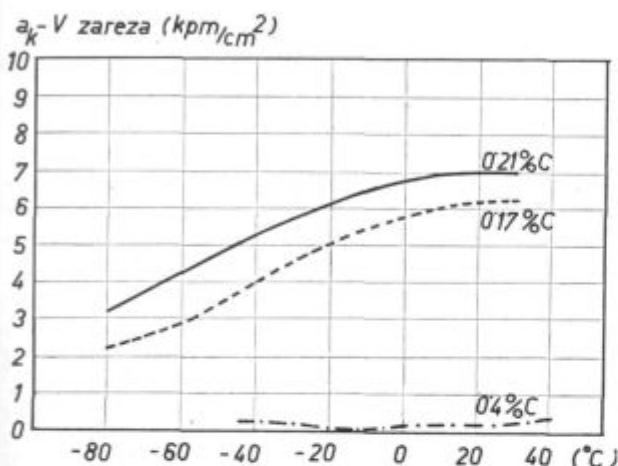
Slika št. 2
Metalografski posnetek strukture pod temenskim zvarkom valjčka, dolžine 12,5 mm, povečava $100\times$



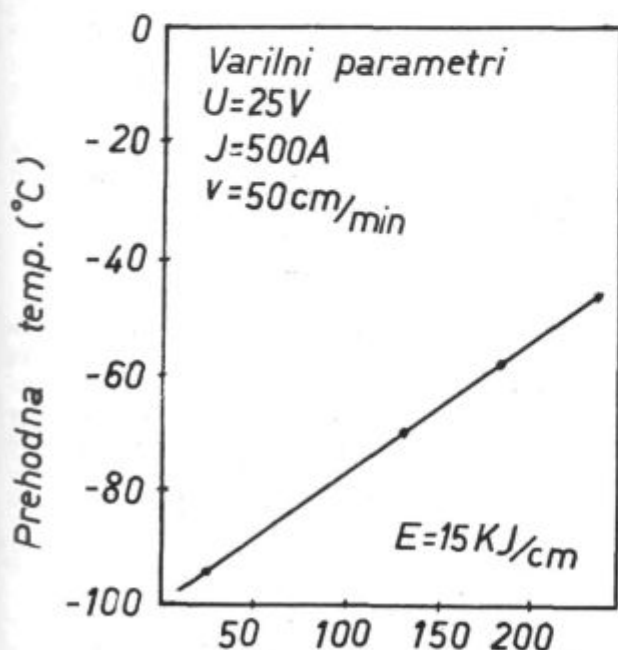
Slika št. 3
Metalografski posnetek strukture pod temenskim zvarkom valjčka, dolžine 25 mm, povečava $100\times$

maliziranih jeklih poslužujemo predgrevanja predvsem zato, da preprečimo tvorbo martenzita — zaželjene so vmesne strukture, ki imajo dobro žilavost. Obratno pa je pri poboljšanih jeklih, kjer že pri normalnem varjenju ohlajevalne hitrosti omogočajo nastop nizkoogljičnega martenzita, zato ker so kritične ohlajevalne hitrosti za takšno sestavo jekla mnogo nižje, od tistih pri normaliziranih jeklih. Metalurško gledano so krivulje TTT diagrama pri poboljšanih jeklih pomaknjene bolj na desno kot pri normaliziranih.

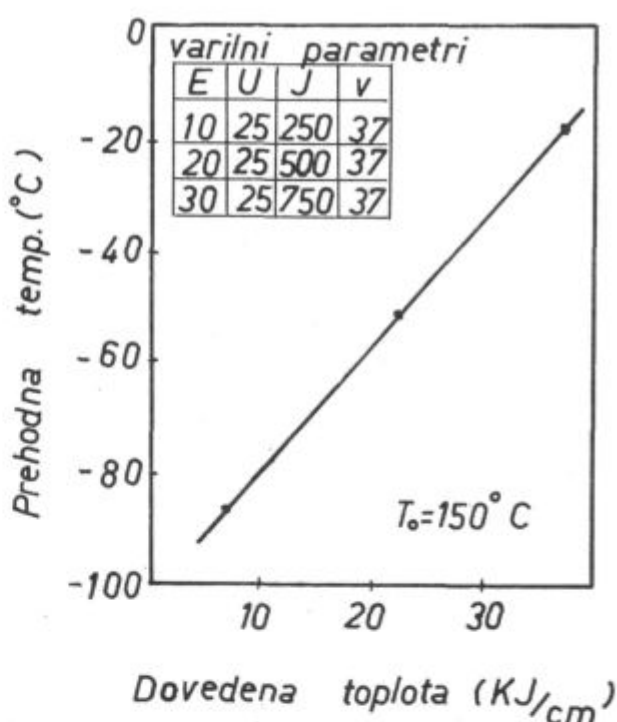
Iz diagrama št. 3 opazimo primerjavo med žilavostjo martenzita z nizkim in višjim procentom



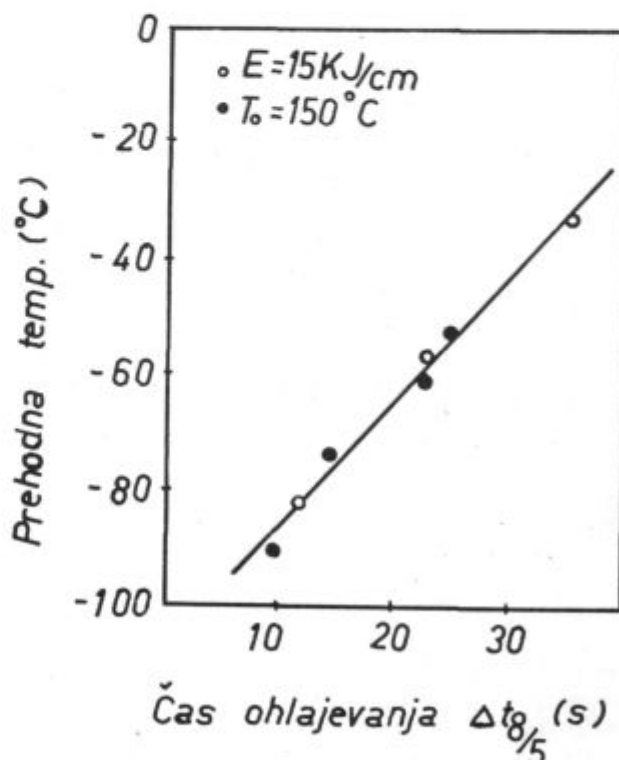
Primerjava žilavosti med jeklom z nizkim in visokim % C v martenzitu pri različnih temperaturah



Odvisnost prehodne temperature od delovne temperature pri varjenju



Odvisnost prehodne temperature od vnešene toplote pri varjenju



Odvisnost prehodne temperature od ohlajevalnega časa po varjenju

C (10). Martenzit s ca 0,20 % C ima prehodno temperaturo med -50 do -70°C , medtem ko martenzit z 0,4 % C prikazuje prehodno temperaturo nad $+50^{\circ}\text{C}$.

Ce se sedaj povrnemo k jeklu N-A-XTRA 70, bomo zaradi naštetih trditev stremeli, da pri varjenju v vsakem primeru ustvarimo takšne pogoje, da bo vedno nastopil nizkoogljični martenzit.

Ker je Ms točka za tvorbo martenzita pri tem jeklu šele nad 500°C , moramo te pogoje pri ohlajevanju osigurati v intervalu med $800\text{--}500^{\circ}\text{C}$, kar časovno znaša ca. 14—18 sek. Po sliki 2 in 3 lahko sklepamo, da so bili ti pogoji v obeh primerih izpolnjeni, razlika je le v velikosti zrn. Torej lahko trdimo, da čim manjša so martenzitna zrna oziroma čim višja je hitrost ohlajevanja, tem boljša je žilavost in nižja je prehodna temperatura, kar potrjujejo diagrami 4, 5, 6 (15), ki ponašajo žilavost v prehodni coni za N-A-XTRA 70 v odvisnosti od delovne temperature, vnešene energije in ohlajevalne hitrosti.

Kot bomo kasneje videli, ne smemo z nižanjem delovne temperature pretiravati.

2. Določitev količine H₂ v zvaru

Količino H₂ v zvaru izvedenem z elektrodo Tenacito 75 ročno obločno in v zvaru izvedenim s praškom OP 40 TT in žico Ni, Cr, Mo, 2,5 — UP avtomatsko pod praškom je bila določena po DIN 8572 z metodo ekstrakcije.

Elektroda je bila posušena pred določanjem H₂ v zvaru pri 250°C 2^h, varilni prašek pa pri 300°C 2^h. Po 48^h ekstrakcije, so bili za elektrodo Tenacito 75 v breti komaj opazni sledovi H₂, torej je H₂ v zvaru pod 0,1 ccm/100 gr zvara. V zvaru, ki je bil izveden avtomatsko pod praškom pa je znašala količina H₂ 1,1 ccm/100 gr zvara. S tem pa ni izključena možnost povišanja koncentracije H₂ v zvarni talini pri praktičnem varjenju. Ta povišek je odvisen od atmosferskih pogojev, na katere so poboljšana jekla zelo občutljiva (14) — predvsem korenski varki.

Tudi prisotnost H₂ v zvaru poboljšanih jekel, zahteva obširnejšo razlago. Moderna znanost (12, 13) pripisuje, da je vzrok za nastanek defektov, ki se pojavijo pri ohlajevanju pod 200°C ravno v nepravilnem izločanju H₂. Navedeni pojav imenujemo hladno razpokljivost, ki se kaže v mikro kakor tudi v makro obliki. Pri tem pa je važna kritična količina H₂ v zvaru in pa inkubacijska doba, po kateri se razpokljivost pojavlja.

Da se razpokljivosti zvarov, zaradi izločanja H₂ izognemo, predhodno pločevino v okolici (100 mm na vsako stran zvarnega žleba) bodoče zavarjenega zvara predgrejamo, v težjih slučajih pa še zvar nato pogrevamo. Kakšen je efekt vsebnosti H₂ v zvaru, je razvidno iz diagrama 7 (15) in velja za zvar N-A-XTRA 70.

Torej čim nižja je delovna temperatura in višja je vsebnost H₂ v zvaru, tem nižja napetost je potrebna, da pride do pojava razpok. Navedena trditev je torej v nasprotju z diagrami 4, 5 in 6, ki veljajo za idealne pogoje, ko H₂ ni prisoten v zvaru ali pa ko je delovanje H₂ odpravljeno s

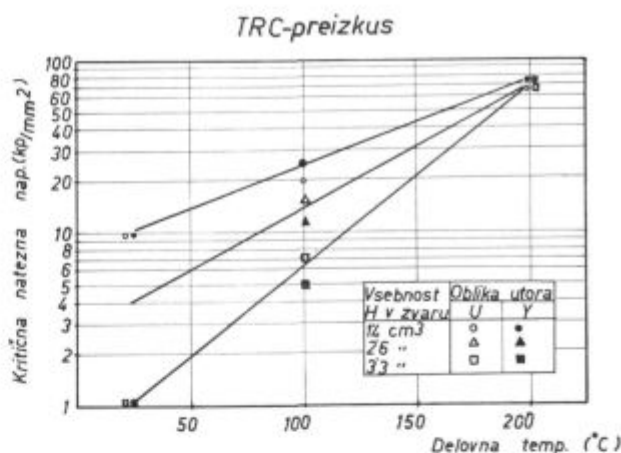


Diagram št. 7

Kritična napetost, potrebna za tvorbo hladne razpokljivosti v odvisnosti od vsebnosti H₂ v zvaru

predgrevanjem na 200°C . Zato je nujno potrebno poznati vsebnost H₂ v zvaru (izvesti preiskave v ambientu, v katerem se praktično vari) ter glede na to vrednost izbrati kompromis med njo, dovajeno toploto in temperaturo predgrevanja.

Ker preiskav v ambientu dejanskega varenja nismo mogli izvesti, smo preventivno predpisali, za kolikor možno zaščitno zvarne taline pred povišano koncentracijo H₂ naslednje omejitve:

- prepoved varjenja, ko se temperatura okolice dvigne nad 30°C in relativna vlažnost nad 80 %;
- sušenje elektrod in praškov se mora vršiti pri temperaturi nad 300°C v času trajanja minimalno 2^h. Posušene elektrode morajo biti vskladiščene pri temperaturi 150°C v prenosni peči na varilčevem delovnem mestu;
- varilni prašek mora potovati direktno iz peči v avtomat;
- ponovno sušenje elektrod in praška, se mora izvršiti, če so bili podvrženi delovanju atmosfere več kot 2^h.

3. Fenomen hladne razpokljivosti

Hladna razpokljivost ali razpokljivost povzročena zaradi H₂ (13) je tipična varilna napaka, ki se pojavlja v prehodni coni ali zvaru v času ohlajevanja. Razlikujemo podzvarne razpoke, ki se v prehodni coni razširjajo vzdolž zvara in korenske ter temenske razpoke, ki so lokalizirane na neena- komernosti zvara, katerih pojav je pospešen z efektom zarez.

Pri opazovanju nastajanja hladne razpokljivosti, moramo zasledovati pogoje ohlajevanja (višina vnešene toplote, oblika zvara, debelina pločevine), ki diktirajo nastop kalilnih struktur; vsebnost H₂, ki prihaja pri varjenju v talino (obloga elektrod, praški, atmosfera, hidratne substance na površini zvarjenja) in napetosti, ki se pojavijo po varjenju v zvarnem spoju. Na kratko so napetosti naslednje: direktne napetosti zaradi krčenja po

ohlajevanju, napetosti zaradi premene iz γ področja, indirektna vpetostna napetosti, ki izvirajo iz nezmožnosti razširjenja ali krčenja ter zunanje napetosti, ki izvirajo iz zaostalnih napetosti posameznih konstrukcijskih elementov, iz lastne teže elementov, iz vpetostnih napetosti drugih spojev itd. Nastale napetosti se pri določenih pogojih lahko seštevajo in delujejo na povečanja krhkosti prehodne cone in zvara ter povzročijo dekohezijsko razpokljivost predvsem v zadnjem stadiju ohlajevanja med 800 in 500°C, torej v področju pojavljanja martenzitne premene.

V primeru, da ima jeklo relativno visoki indeks zakaljivosti (presoja po C_{eq} , TTT diagramu, metodi »in situ«) nastopa nagnjenost k hladni razpokljivosti.

Zaradi tega je potrebno izločiti vpliv in dohod H₂ k občutljivim strukturam v prehodni coni ali zvaru. To dosežemo s predgrevanjem in pogrevanjem ter ustrezno vmesno temperaturo, kar je odvisno od tipa jekla, njegove debeline in vnešene toplote. Pri pojavljanju hladne razpokljivosti, ni nujno, da so razpoke vidne na površini in da se pojavijo takoj po varjenju (s tem v zvezi nastopa problem defektoskopskega odkrivanja). Razpoke se v zvaru pojavijo v času do 20^h po varjenju in se lahko ustavijo predno prodrejo na površino.

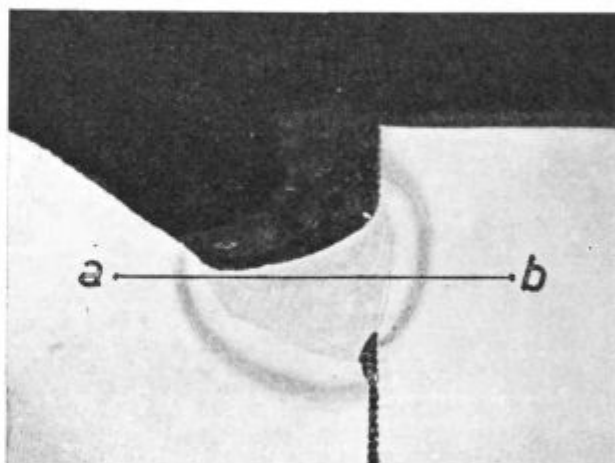
Izmed metod za določanje hladne razpokljivosti, smo se v okviru možnosti odločili za samo-vpetostni preizkus Tekken Test (17), ki je primeren za selekcijo varilnih metod, pri tem pa vplivajo na rezultat preizkusa parametri kot so: predgrevanje, vnešena toplota in izbira elektrode. Diagram št. 8 prikazuje % hladne razpokljivosti pri različnih temperaturah predgrevanja. Preizkus je bil izveden na debelini pločevine = 22 mm s karakteristikami, ki so vpisane v tabeli 3 z ročno elektrodo Ø 4 mm, varilni parametri so bili 170 A, 25 V,

170 mm/min. Nadalje je bil preizkus izvršen avtomatsko pod praškom z varilno žico Ø 3 mm s parametri 420 A, 28 V, 450 mm/min.

Sliki 4 in 5 prikazujeta presek preko testnega zvara, izvedenega z ročno elektrodo. Testni zvar na sliki 4 je izveden pri +20°C, na sliki 5 pa pri +100°C. V primeru varjenja testnega preizkusa z ročno obločno elektrodo, se je hladna razpokljivost pojavila v prehodni coni (slika 4), kar je bilo tudi za pričakovati. Hladna razpokljivost v zvaru je v tem primeru bila odpravljena pri predgrevanju nad 80°C.

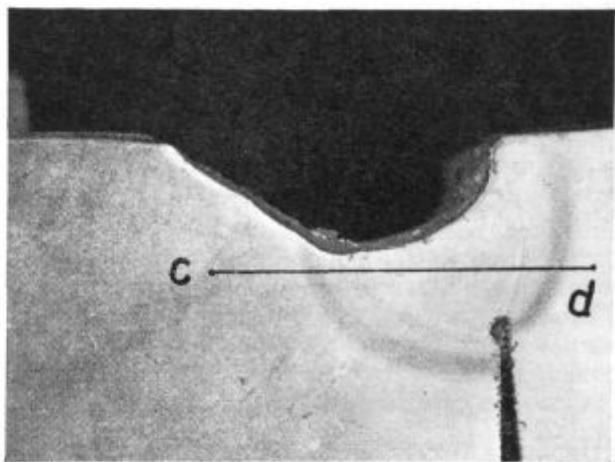
Sliki 6 in 7 pa prikazujeta presek preko testnega zvara, izvedenega avtomatsko pod praškom. Testni zvar je na sliki 6 izveden pri +90°C, na sliki 7 pa pri +110°C. V tem primeru se je nepričakovano pojavila razpokljivost v hladnem v zvaru (slika 6).

Detajlna analiza je podala naslednje zaključke: v primeru ko je bil testni zvar zaključen ročno, je zaradi nižje legiranosti zvara glede na osnovni ma-



Slika št. 4

Tekken test, izveden za ročno obločno varjenje brez predgrevanja, povečava 3:1



Slika št. 5

Tekken test, izveden za ročno obločno varjenje s predgrevanjem na 100°C, povečava 3:1

$$\text{Raz} = \frac{H_c}{H} \times 100$$

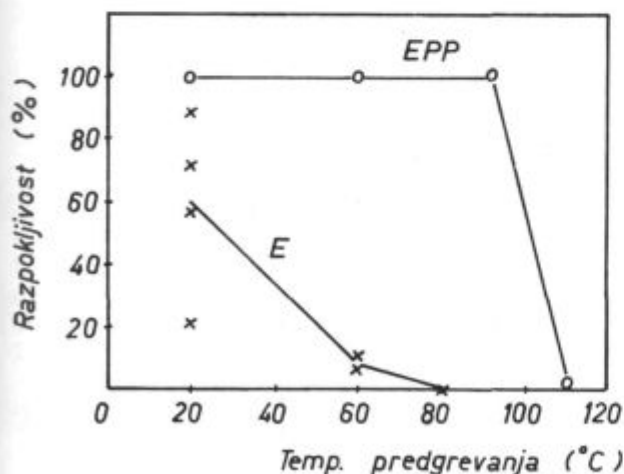
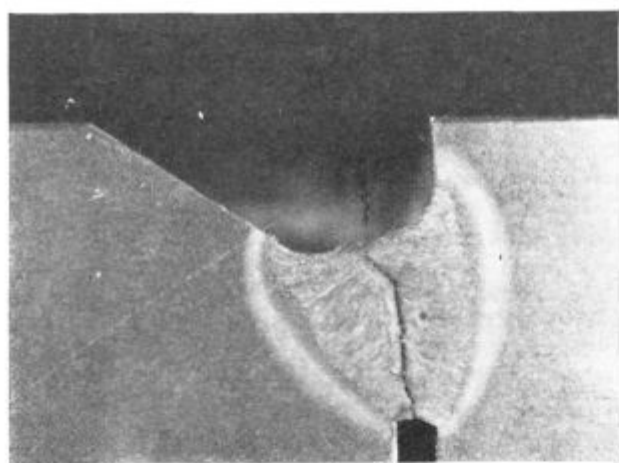


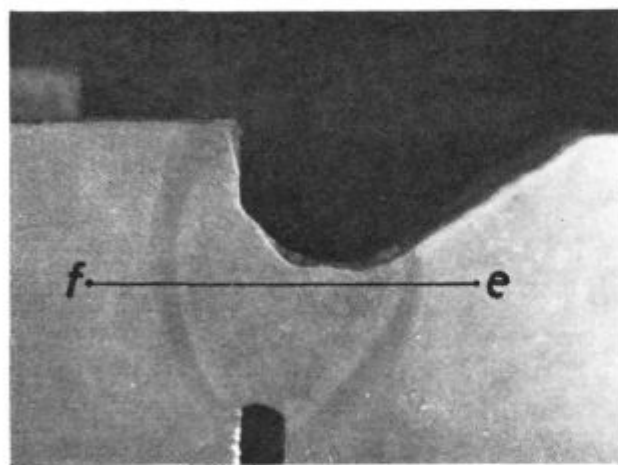
Diagram št. 8

Odvisnost hladne razpokljivosti od temperature predgrevanja pri varjenju



Slika št. 6

Tekken test, izveden za avtomatsko varjenje EPP s predgrevanjem na 90 °C, povečava 3:1



Slika št. 7

Tekken test, izveden za avtomatsko varjenje EPP s predgrevanjem na 110 °C, povečava 3:1

terial, bila tendenca migracije H₂ v smeri prehodne cone, kjer se zaradi vpetostnih napetosti in trdih struktur pojavijo posledice nepravilnega izločanja H₂ kot hladne razpoke, ki pa so odpravljene z ustreznim nivojem predgrevanja. V primeru avtomatsko izvedenega varka, pa se je zaradi močno legirane varilne žice zvar tako naleziral, da se je na eni strani znižala kritična ohlajevalna hitrost in se je zvar zakalil, na drugi strani pa je tendenca po migraciji H₂ v prehodno cono izravnana, posledica tega je ostajanje H₂ v zvaru in že zaradi naštetih parametrov nastopi hladna razpokljivost v zvaru, ki je odpravljena prav tako z ustreznim nivojem predgrevanja. Diagram 9 prikazuje potek trdot za oba primerja; razvidna je močna razlika v trdoti zvara, izvedenega ročno obločno in zvara izvedenega avtomatsko pod praškom.

Na koncu je poudariti, da samovpetostni preizkusi ne podajajo kvantitativnega vpliva vpetosti na hladno razpokljivost. Temu se približujejo pre-

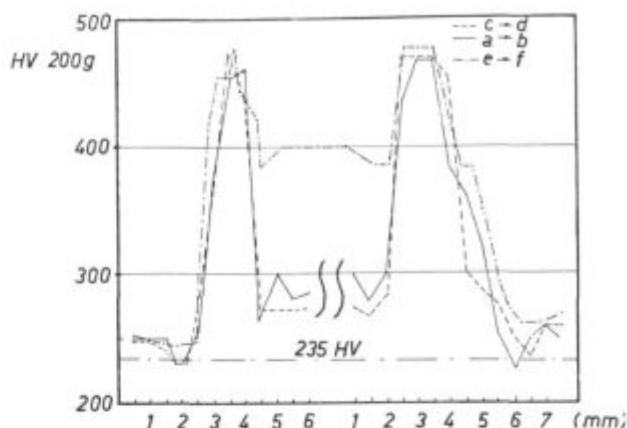


Diagram št. 9

Potek trdote prečno preko zvarov izvedenih po Tekken testu za ročno obločno in avtomatsko varjenje EPP

izkusi, ki kontrolirano lahko spreminjajo vpetost tekom preizkusa kot na primer TRC (Tensile restraint cracking test) ali RRC (Rigid restraint cracking test), ki pa občutno presegajo okvir industrijskega laboratorija (13).

4. Določitev temperature predgrevanja in temperature med varki

S preizkusom na hladno razpokljivost, smo določili temperaturo predgrevanja, nad katero se ta ne pojavi več. Ker je hladna razpokljivost v glavnem odvisna od kemične analize pločvine ali zvara, vsebnosti H₂ v zvaru in vpetosti po varjenju, se temperatura predgrevanja lahko dovolj točno določa z izrazom Ita in Bessya (18).

$$T_{oc} = 1440 \cdot P_c - 392$$

$$P_c = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{t}{600} + \frac{H}{60}$$

t = debelina pločvine (mm)

H = difuzijski H₂ (cm³/100 g zvara)

P_c = 0,34 — za kemično analizo pločvine

P_c = 0,342 za kemično analizo zvara izvedenega avtomatsko pod praškom (0,14 % C; 0,55 % Si; 0,57 % Mn; 1,57 % Ni; 0,88 % Cr; 0,44 % Mo).

Po tem izrazu izračunana minimalna temperatura predgrevanja znaša ca 790 °C za ročno obločno varjenje in ca. 1010 °C za varjenje avtomatsko pod praškom. Za oba primerja smo izbrali temperaturo predgrevanja 1100 °C s predpostavko, da debelina pločvine ne preseže 22 mm in da je vsebnost H₂ pod 1,5 cm³/100 g zvara. Ta temperatura predgrevanja predstavlja spodnjo mejo pod katero se varjenje ne sme izvrševati.

Omenjeni izraz je nastal zaradi netočnosti določanja varivosti in temperature predgrevanja na osnovi C_{eq} in trdote v prehodni coni. Veljalo je

namreč načelo, da čim višji je C_{eq} in maksimalna trdota v prehodni coni, tem večja je možnost nastopa hladne razpokljivosti. Da je to mnenje nevzdržno dokazuje dejstvo, da jekla z enakim C_{eq} pri različnih debelinah in vsebnosti H₂ v zvaru, kažejo različno nagnjenost k hladni razpokljivosti.

SATOH (19) je s sodelavci postavil nomograme za različne debeline pločevin, različne vnešene toplote in različne izraze P_w na osnovi katerih se lahko temperatura predgrevanja odčita. Diagram št. 10 prikazuje nomogram, ki je našemu primeru najbližji in v katerega so vnešeni naši podatki.

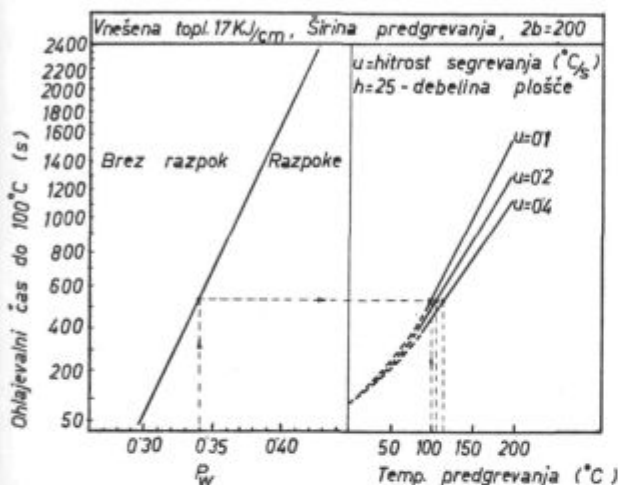


Diagram št. 10

Nomogram za določanje predgrevanja pred varjenjem za N-A-XTRA 70

$$P_w = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{H}{60} + \frac{40 \times 10^3}{K}$$

K = faktor vpetosti; pri y vpetostnem preizkusu postane tretji faktor $\frac{K}{40 \times 10^3} \approx \frac{t}{600}$ in s tem P_w enako P_c .

5. Določitev zgornje in spodnje meje vnešene toplote

Dovedena toplota v zvar je odvisna od varilnih parametrov t.j. od napetosti, jakosti in hitrosti pomika. Pri tem je potrebno še upoštevati izkoristek, ki znaša pri varjenju pod praškom 0,9, pri ročnem obločnem varjenju pa 0,8.

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v} \text{ (Joule/cm)}$$

Kot smo že spredaj omenili, moramo v prehodni coni zagotoviti takšne pogoje, da bomo v vsakem primeru dobili žilavi nizkoogljični martenzit. Če to ni primer, potem zaradi prevelike dovedene toplote, dobimo v prehodni coni krhki martenzit z visoko prehodno temperaturo, v slučaju prenizke

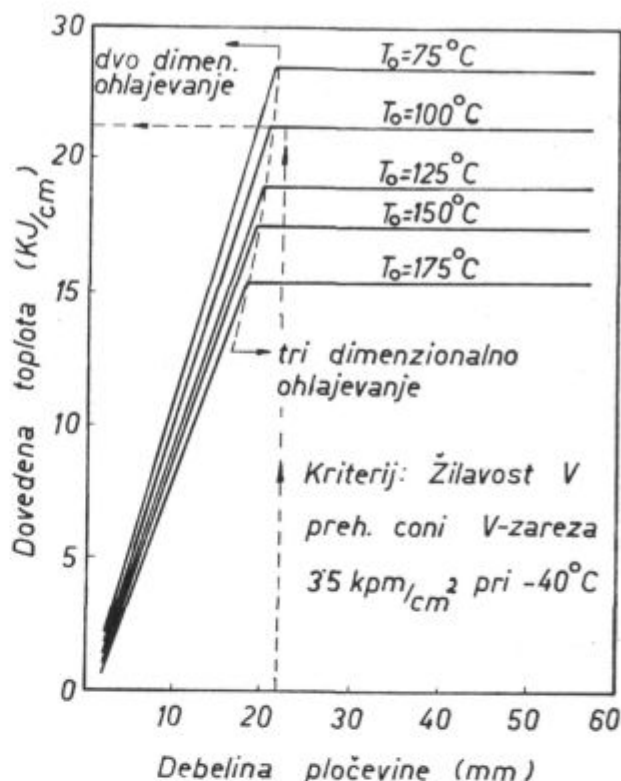


Diagram št. 11

Dovedena toplota v odvisnosti od debeline pločevine; razmejitev med dvo- in trodimenzionalnim ohlajevanjem

dovedene toplote pa trde strukture, ki so občutljive že na zelo nizke količine H₂ in to predvsem pri korenskih varkih.

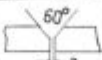
Tyssen (11) je za jekla tipa N-A-XTRA izdelal diagrame, po katerih je glede na izbrano temperaturo predgrevanja možno določiti mejo zgornje in spodnje dovedene toplote, ki ustreza določeni debelini pločevine in zagotavlja ohlajevanje med 800 in 500°C v času 14–18 sek., kar daje duktilen in žilav martenzit z zelo nizko prehodno temperaturo. Diagram št. 11 prikazuje področje maksimalno dovedene toplote za naš primer.

Glede na dovedeno toploto, se morajo izbrati ustrezni parametri, ki se nastavijo na varilnem stroju. Iz diagrama je razvidno, da je potrebno biti posebno previden pri debelinah pod 22 mm, kjer je ohlajevanje v pločevinah dvodimenzionalno, torej počasneje in se morajo ujavati znatno nižje toplote, da ohranimo ohlajevalni kriterij. Nadalje je razvidno, da vnešena toplota pri debelini 20 mm naj ne presega 22.000 J/cm. Za naš primer smo si določili področje vnešene toplote, pri temperaturi predgrevanja in temperaturi med varki 110°C v območju 15.000–21.000 J/cm.

6. Ocenitev zvara na razpokljivost v vročem

Za ugotavljanje tega fenomena, ki se pojavlja v vročem t.j. v področju strjevanja zvara, smo uporabili Schnadtov Fisco test (17). Eutektik Fe — FeS ima tališče pri 988°C in je glavni povzročitelj

toplotnih razpok. Od vrste elektrode pa je odvisno koliko je v stanju FeS in druge nekovinske vključke iz zvara odžlindrati in zagotoviti odpornost proti razpokljivosti v vročem. Razpokljivost v vročem je nato izhodišče za razpokljivost v hladnem in moramo glede na to dodajni material klasificirati. Varjenje na preizkušancu, je potekalo z razmakom: 1, 2, 3 in 4 mm.

a = razmak v korenu f _g = razpok. v vročem % f _h = razpok. v hladnem %				N-A-XTRA 70		d = 22 mm	Oblika utora
Elektroda				Sestava: 017C, 066Si, 085Mn, 0020P 0016 S, 0034 Al, 076 Cr, 035 Mo			
Tenacito 75	1	0	0	56	53	51	57 mm
"	2	0	0	60	40	46	45 mm
"	3	0	0	53	52	57	57 mm
"	4	10	0	59	53	50	51 mm
				21			

■ razpokljivost v vročem

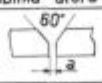
Tabela št. 4

Rezultati Fisco testa za ročno obločno varjenje

Tabela 4 prikazuje % razpokljivosti v vročem in hladnem pri različnih razmakih v utoru za elektrodo Tenacito 75. Kot je razvidno, je elektroda zelo odporna proti toplotni razpokljivosti, hladna razpokljivost pa se v nobenem primeru ni pojavila.

Nasprotno pa tabela 5 prikazuje, da je kombinacija praška OP 40 TT z varilno žico NiCrMo 2,5 UP bolj občutljiva na razpokljivost v toplem. Že pri stiku brez razmaka v korenu, je nastal določen % razpokljivosti v vročem, ki je potem bil neposreden inicijal za razpokljivost v hladnem. Varjenje s takim dodajnim materialom torej zahteva zelo pazljivo izdelano tehnologijo, ker lahko to kombinacijo označimo kot občutljivo na razpokljivost v vročem in hladnem, kar je bilo opazno že po diagramu 8.

IIW (5) je uvedel pojem toplotne razpokljivosti v prehodni coni ali likvacijsko razpokljivost. Za-

a = razmak v korenu f _g = razpok. v vročem % f _h = razpok. v hladnem %				N-A-XTRA 70	d = 22 mm	Oblika utora
Elektroda				Sestava: 017C, 066Si, 085Mn, 0025P 0016S, 0034Al, 076Cr, 035Mo		
CrNiMo-25UP OP40TT	0	35	924	75	165	24
"	0,5	210	970	109	534	54
"	1	232	100	132	15	5
				508	57	51

■ razpokljivost v vročem
▨ razpokljivost v hladnem

Tabela št. 5

Rezultati Fisco testa za avtomatsko varjenje EPP

radi dovedene toplote, se na mejah γ zrn pojavi penetracija (ovlaženje zrn) nizko taljivih faz. Ko se γ zrna ohlajajo, so postopoma podvržena plastični deformaciji, zaradi naraščanja nateznih napetosti, ki izvirajo iz krčenja. Ker je film nizko taljivih komponent tanek in je njegov odpor proti plastični deformaciji nizek glede na tistega, ki ga nudijo γ zrna, nima možnosti, da deformacijo absorbira — posledica je razpoka. Navedena napaka lahko prav tako služi kot inicijal za hladno razpokljivost in sprožitev krhkega loma, zato jo omejujemo s pravilno izbiro osnovnega in dodatnega materiala (nizek P in S, C in Si omejena). V našem primeru nagnjenosti k likvacijski razpokljivosti v prehodni coni, nismo opazili.

7. Ocenitev nagnjenosti zvara in prehodne cone napram krhkosti ter razširjanje krhkega loma

Nagnjenost h krhkemu lomu (20) (Brittle fracture initiation) je v neki strukturi določena v trenutku, ko so doseženi kritični pogoji (nezmožnost deformacije materiala) na koncu neke prisotne zareze ali kvazi razpoke. Pri tem je potrebno poudariti, da se katerikoli lom vedno prične na nezveznosti v strukturi, ki praktično deluje kot zareza.

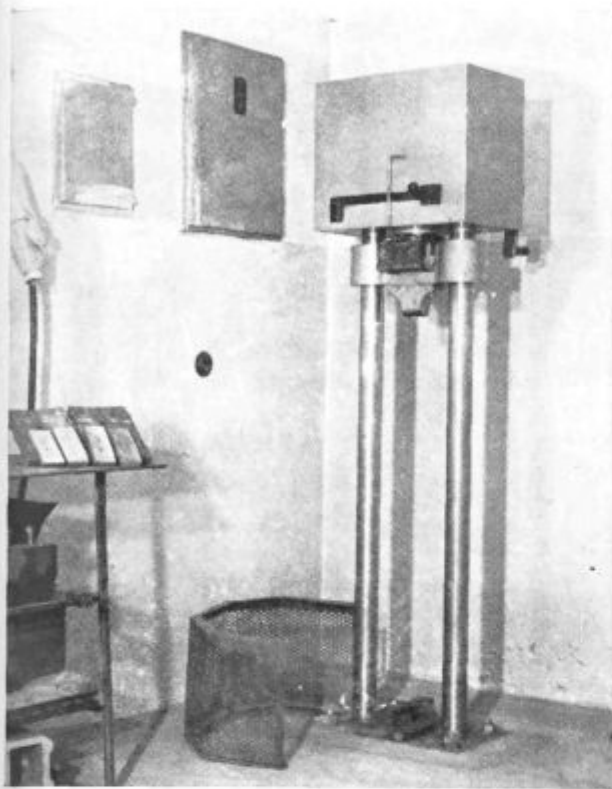
Na razširjanje krhkega loma imajo vpliv naslednji faktorji: temperatura, efekt debeline, vrsta mikro strukture kakor tudi velikost zrn, efekt staranja itd. Vsi navedeni faktorji zmanjšujejo področje okoli zareze, ki se še lahko plastično deformira. Predvsem pa prisotnost napetostnega polja, zareza in nizka lastna žilavost materiala istočasno, dajejo tipično nagnjenost h krhkemu lomu. V zvarih je področje zvara in prehodne cone nagnjeno k razširjanju krhkega loma predvsem zaradi:

- zunanje obtežbe;
 - varilnih zaostalosti napetosti;
 - geometrijskih zarez;
 - napak varjenja;
 - pokljivosti v prehodni coni in zvaru;
- } efekt zareze

Praktični pomen določanja nagnjenosti h krhkemu lomu na preizkušancih je, reproducirati kolikor se da mogoče razmere, ki vladajo v korenu najbolj možnih prisotnih napak. Pri tem so rezultati preiskav po navadi izraženi s prehodno temperaturo (Transition temperature) tj. tisto temperaturo, ki jo podaja razlika med nizko in visoko zmožnostjo plastične deformacije. Preizkuse delimo v statične (Wide plate test, COD test, Linear elastic fracture test itd.) in dinamične (Drop weight test, Niblink test, Linear elastic fracture Mechanics test).

Ker je v našem primeru dinamična obremenitev v računu vzeta ca $x = 0,8-0,9$ smo se odločili za ocenitev nagnjenosti krhkega loma zvara in pre-

hodne cone po Drop weight testu — ASTM E 208 — 66 (21) in Pellinijevi teoriji (3, 22) napovedovanja krhkega loma. Aparaturo prikazuje slika 8.



Slika št. 8

Aparaturo za določanje prehodne temperature po metodi Drop Weight test — P 3

Po Pelliniju je NDT (Nil. Ductility Transition) temperatura tista temperatura, pri kateri preizkušanece še ravno krhko počí. V Pellinijevem diagramu 12, ki je razdeljen v tri polja znaša razlika med NDT in CAT ca. 33° C.

NDT—Nil Ductility Transition
FTE—Fracture Transition El.
FTP—Fracture Transition Pl.
CAT—Crack Arresting temp.

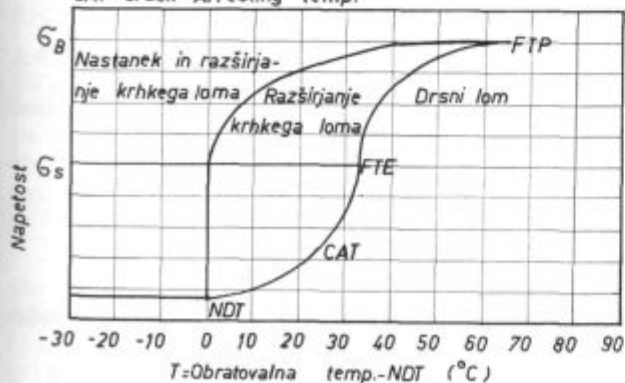


Diagram št. 12

Razmejitev med krhkim in duktilnim področjem lomov po Pelliniju

Če torej leži delovna temperatura objekta ca. 30° C nad NDT, potem ni nevarnosti, da bi nastopili krhki lomi, če pa je diferenca večja od 30° C, potem so pa krhki lomi izključeni.

V našem primeru znaša najnižja delovna temperatura + 5° C; v diagramu 13 so vnešeni rezultati preiskav NDT za zvar in prehodno cono v primeru ročno obločnega in varjenja avtomatsko pod praškom.

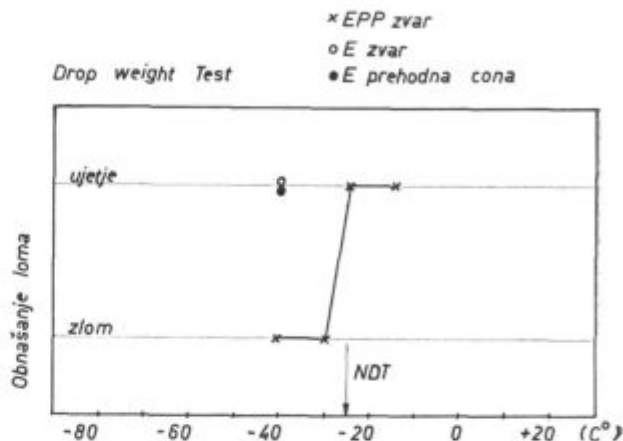


Diagram št. 13

Rezultati preiskav po Drop Weight testu — P 3, za zvar in prehodno cono

Iz diagrama 13 je razvidno, da sta zvar in prehodna cona v primeru ročno obločnega varjenja z elektrodo Tenacito 75 neobčutljiva za pojavljanje krhkega loma, saj se potujoča razpoka ujame še pri — 40° C. V primeru varjenja avtomatsko pod praškom z varilnim prahom OP 40 TT in varilno žico CrNiMo 2,5 - UP pa dobimo prehodno temperaturo za NDT pri — 25° C, kar nam, če ta podatek vnesemo v diagram 12, ravno še zagotavlja varnost proti nastopanju krhkega loma.

V zahtevnih in mejnih primerih kot je naš v primeru varjenja avtomatsko pod praškom, je potrebno poleg zgornje ugotovitve oceniti, kako bi se krhki lom razširjal, če bi nastopil in kakšna je možnost, da bi ga osnovni material, zvar ali prehodna cona ujeli (Arrest properties) (17). Krhki lom, ki se razširja, se ne ustavi, dokler:

- se ne zniža napetostno polje;
- se ne pojavi velika plastična deformacija: zaradi narastka temperature, znižanja debeline pločvine in dokler razpoka ne vstopi v bolj žilav material.

Praktična preiskava mora biti torej takšna, da določa temperaturo, nad katero se v preizkušancu in v dejanski konstrukciji ne razširjajo krhke razpoke. Dobljeno temperaturo imenujemo temperaturo ujetja (Arrest temperature). Med najbolj znanimi velikimi preizkusi (Large scale) so Robertson test, Double tension test, COD, Explosion bulge test itd.

Tabela 6

Elektroda	σ_s kpm/mm ²	σ_B kpm/mm ²	δ_s %	Zilavost V-zareza kpm/cm ²	Kemična analiza
Tenacito 75,	66 — 70	72 — 76	20 — 24	14 pri + 20° C 12 pri 0° C 10 pri — 20° C 8 pri — 40° C 5 pri — 60° C	0,07 C; 1,4 — 1,6 Mn 0,55 — 0,65 Si; 0,2 — 0,3 Cr; 1,7 — 1,9 Ni; 0,2 — 0,3 Mo;
NiCrMO 2,5-UP + OP 40 TT,	65 — 70	78 — 82	18 — 21	13 pri + 20° C 12 pri 0° C 11 pri — 20° C 10 pri — 40° C 8 pri — 60° C	0,05 — 0,07 C; 0,7 — 0,9 Mn; 0,15 — 0,30 Si; 0,40 — 0,60 Cr; 2,2 — 2,5 Ni; 0,4 — 0,6 Mo;

Za prašek in elektrodo velja sušenje pred uporabo pri 300 — 350° C 2 — 4h.

Tabela št. 6

Mehanske lastnosti čistega zvara, izvedenega ročno obločno in avtomatsko EPP

Ker taki preizkusi občutno presegajo okvir industrijskega laboratorija, nismo mogli v tej smeri izvesti preiskav. Zadovoljili smo se s podatki, ki nam jih je v tej smeri podal proizvajalec pločevine.

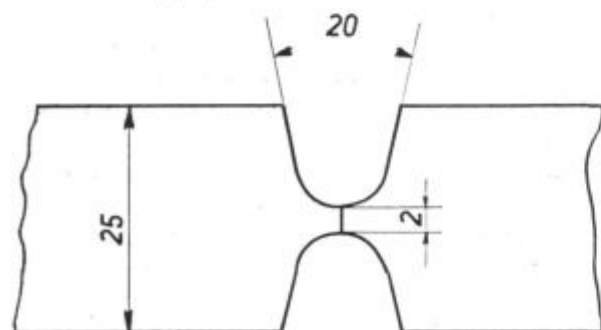
LASTNOSTI DODAJNEGA MATERIALA

Pri varjenju jekla N-A-XTRA 70 smo uporabili za ročno varjenje visokobazično elektrodo Tenacito 75, varilno žico NiCrMo 2,5-UP in varilni prašek OP 40 TT za varjenje avtomatsko pod praškom po DIN-u 8557-8b536. V tabeli 6 je prikazana analiza čistega zvara.

VARJENJE NA PREIZKUSNEM VZORCU

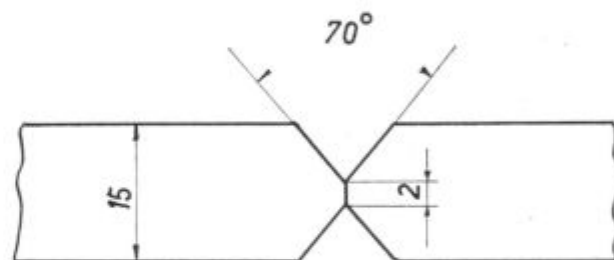
Da bi preverila usklajenost pločevine kvalitete N-A-XTRA 70 z dodajnim materialom za ročno in avtomatsko varjenje, sta bila zavarjena 2 preizkusna vzorca. Robovi za varjenje so bili po projektu določeni kot sledi:

Za ročno varjenje



Predgrevanje 140°C, ročno - obločno var.

Za avtomatsko varjenje



Predgrevanje 110°C, avtomatsko EPP.

Temperatura, ki je navedena za predgrevanje je bila v enaki višini vzdrževanja med samim varjenjem. Po varjenju je sledilo pogrevanje 1—2h pri ca. 200° C. Iz preizkusnih vzorcev so bili izrezani preizkušanci za konvencionalne preiskave, ki so bile zahtevane po pogodbi in katerih rezultati so na tabeli 7

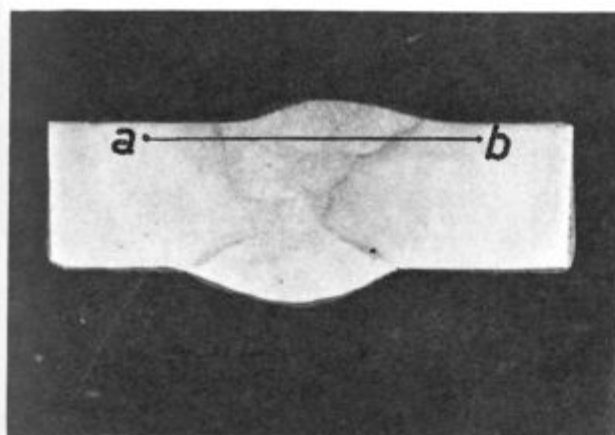
Način varjenja	Šarža	Oblika eprove	G_s kpm/mm ²	G_B kpm/mm ²	Upogib D=4a	Zilavost, 0° C V-zareza-kpm/cm ²
avtomatsko	136322		75 2 74 0	84 0 88 9	180°	11 2 10 2 10 2 17 5 20 0 16 8 P
ročno	"		-	81 0 83 1	180°	8 7 8 5 6 2 9 1 9 7 9 4 P

- natezni preizkus s paralel. boki
 - natezni preizkus z vrtimi boki
P - zarez v prehodni coni
S - zarez v sredini zvara

Tabela št. 7

Mehanske karakteristike zvara po preizkusnem varjenju

Oba makro posnetka — slika 9 in 10 prikazuje-ta prečni presek preko obeh zvarov. Na diagramu 14 so izmerjene trdote za oba primera.



Slika št. 9

Prečni presek preko zvara, izvedenega avtomatsko EPP

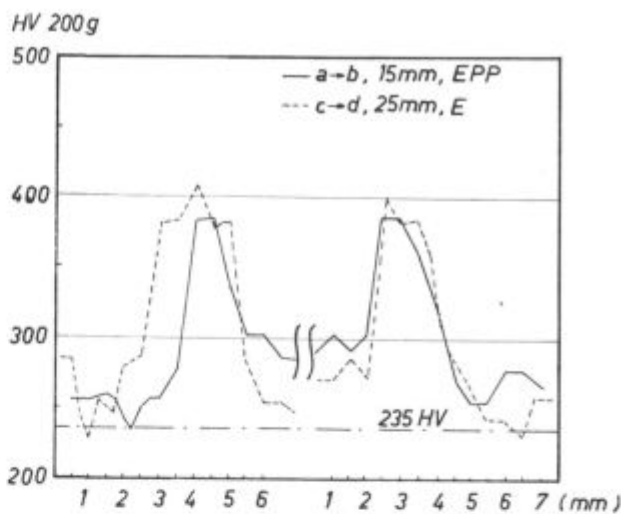
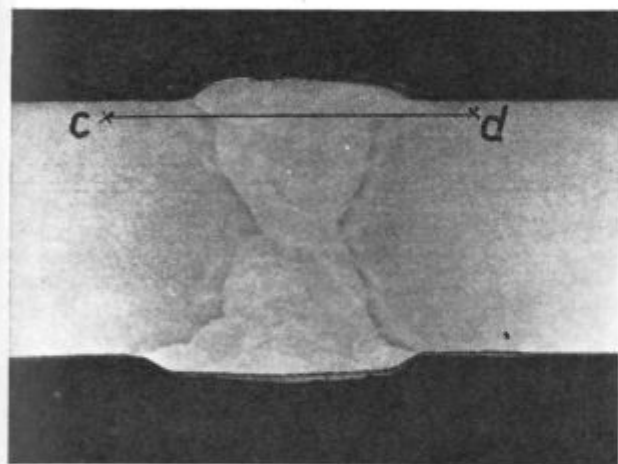


Diagram št. 14

Potek trdote, izmerjene preko obeh prečnih presekov



Slika št. 10

Prečni presek preko zvara, izvedenega ročno E

PROBLEMATIKA VARJENJA

Na osnovi sprednjih razglabljanj in preiskav, je bil določen tehnološki postopek dela pri varjenju cevovoda, ki je vseboval vsa detajlna navodila, da bi se preprečile večje napake in da bi se varjenje odvijalo v ozko dovoljenem območju.

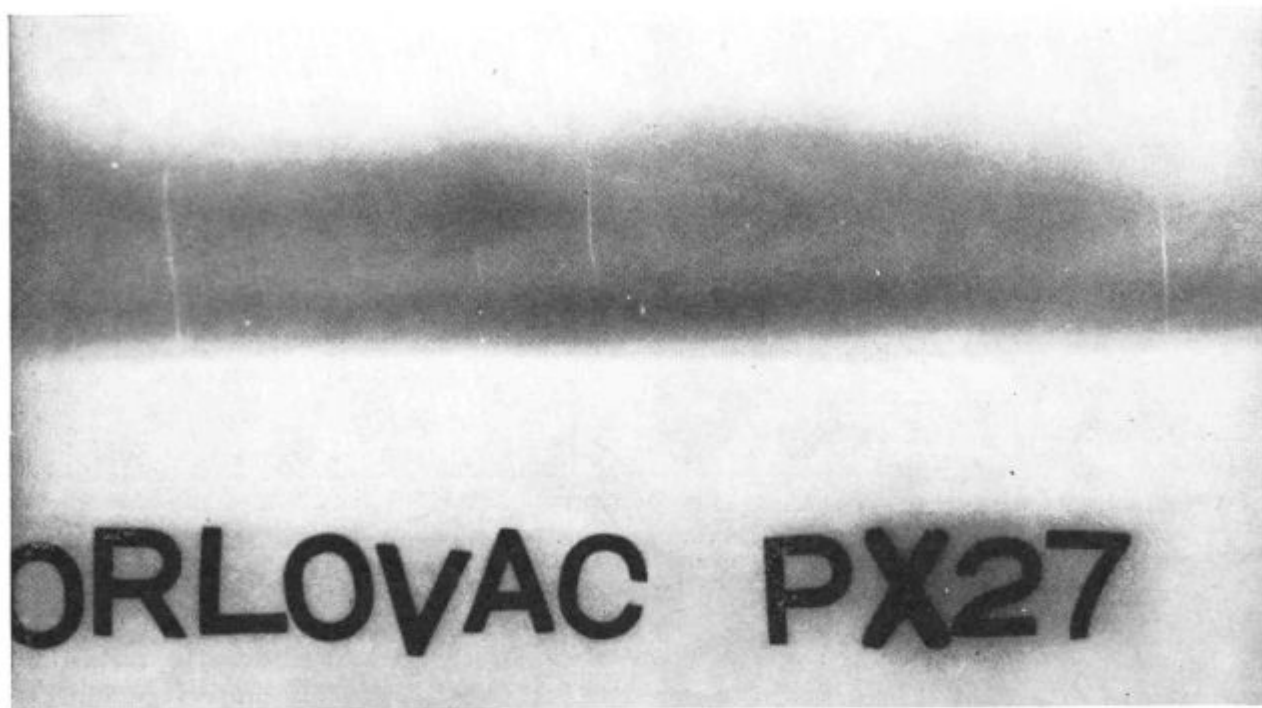
— Kljub vsej pazljivosti pa se zaradi različnih vzrokov predvsem v začetku varjenja pripetijo lahko spodrseljaji. Defektoskopija prvega zvara, ki je bil zavarjen v delavnici avtomatsko pod praškom, je prikazala prečne razpoke v zvaru, kar je razvidno iz radiograma na sliki 11, in ki na površini niso bile vidne.

Detajlna analiza tega primera je pokazala naslednje vzroke: Varjenje je bilo izvedeno ko je bila relativna vlaga zelo visoka, dodatni material ni bil posušen do zadovoljive mere in temperatura predgrevanja je bila glede na vnešeno toploto prenizko izbrana. Posledica takega režima dela je bila ta, da je trdota zvara zaradi prehitrega ohlajevanja narasla na 350 — 390 HB. Zaradi višje legiranosti

zvara napram osnovnemu materialu — vsebnost Ni ca. 2,3, ki ima težnjo pomikanja AC₃ točke proti nižjim temperaturam, je tendenca H₂, da ostaja v zvaru in ne migrira v prehodno cono. Posledica tega so (istočasno so prisotni trije škodljivi faktorji: povišana trdota, povišana koncentracija H₂ v zvaru, vpetostne napetosti (10), hladne prečne razpoke v zvaru, ki so vidne na radiogramu ali ugotovljene z ultrazvokom. Z možnostjo nastopa takega tipa napak v zvaru, nastaja problem ugotavljanja in lociranja hladnih razpok. Radiografska metoda je uspešna, dokler se fenomen pojavlja v makro obliki, postane pa neuporabna tj. na radiogramu fenomena ne moremo več zaznati, če je v mikro obliki. V takem primeru preostane samo ultrazvočna kontrola, ki pa zahteva posebno izvežbanost in natančnost pri justiranju in kasneje pri samem pregledu.

— Na drugi strani pa preži nevarnost, ki pa jo z neporušeno defektoskopijo ne moremo odkriti in sicer kadar varimo pločevine tanjših debelin (< 20 mm). V takem primeru obstoja možnost prevelikega dovoda toplote, kar lahko prinese nepravilne posledice. Zvar zaradi prepočasnega ohlajevanja ne more doseči predpisane trdnosti, prehodna cona v predelu, kjer nastopa martenzit, postane krhka in predel osnovnega materiala, ki je bil podvržen temperaturi, ki je nad temperaturo popuščanja in pod AC₁ pločevine, pa se razširi in seveda zmehča. Da omenjene negativne posledice vsaj lahko ugotavljamo, je potrebno, da se pri vsaki cevi zavarijo v podaljšku iztečni preizkušanci, na katerih se morajo izdelati trgalni, upogibni in žilavostni preizkusi. Primarno pa je potrebno imeti točno in vestno kontrolo nad parametri varjenja in predgrevanja, ker vsako odstopanje v smeri povišanja dovedene energije privede do nepopravljivih posledic.

— Napetostno žarenje zvarov pri tej kvaliteti ni priporočljivo in tudi ni bilo izvedeno. Preizkusi,



Slika št. 11

Prečni presek preko zvara, izvedenega ročno obločno

ki so bili izvedeni v tej smeri (2) to potrjujejo, saj po napetostnem žarjenju se mehanske lastnosti prehodne cone znižujejo. Kot primer naj navedemo, da znaša prehodna temperatura dobljena z Robertsonovim testom (Large scale) za prehodno cono — 55°C , če napetostno žarjenje po varjenju ni izvršeno, dvigne pa se po napetostnem žarjenju na -35°C . Enako potrjujejo tudi žilavostni preizkus, Drop weight test in Kohaerazie preizkus (Small scale).

— Za dosego popuščenih efektov in znižanje trdotnih konic v prehodni coni, ki jih povzročijo zadnji temenski varki in s tem zmanjšanje efekta zareze, ki na prehodu zvar — osnovni material vedno nastopajo, smo upoštevali tehnološki prijem (8) pravičnega zaključevanja varjenja na temenu zvara in to tako, da je zadnji varek izveden na sredini temena in tako termično vpliva na spodnje varke in njih prehodne cone.

ZAKLJUČEK

Pred pričetkom varjenja poboljšane tipa jekla je v grobih obrisih potrebno upoštevati naslednje:

— potrebno je določiti nivo dovedene toplote. Posebno je pri tem potrebno upoštevati prehod iz dvodimenzionalnega v trodimenzionalno ohlajevanje.

— Glede na vsebnost H_2 v zvaru, ki je izveden ročno obločno in avtomatsko pod praškom je potrebno določiti temperaturo predgrevanja, temperaturo med varki ter temperaturo pogrevanja.

— Da bi dosegli optimalne mehanske lastnosti zvara in prehodne cone je potrebno s preizkusi določiti kompromis med dovedeno toploto v zvar in temperaturo predgrevanja. Z drugimi besedami potrebno je dovesti tolikšno količino toplote, da se žilavost zvara in prehodne cone ne zniža, pri tem pa da ostane še jamstvo proti nastopanju hladne razpokljivosti.

— Potrebno je izvršiti selekcijo dodatnega materiala glede na razpokljivost v vročem in na likvacijsko razpokljivost v prehodni coni.

— Glede na delovno temperaturo, v kateri bo objekt obratoval in glede na vrsto obremenitve, kateri bo podvržen, je bistvene važnosti, da že pred pristopom k varjenju določimo njegovo prehodno temperaturo, nad katero se ne bodo pojavljali in razvijali krhki lomi. Poudariti je potrebno, da mora biti prehodna temperatura, (Large scale, Small scale), v vsakem primeru pod najnižjo delovno temperaturo objekta. Omenjeno velja za osnovni material, zvar in prehodno cono.

Literatura

1. Vd TÜV — Vorläufiges Werkstoffblatt 257/66 — Hochfeste vergütete Sonderbaustähle HOAG N-A-XTRA 55, 60, 65, 70.
2. B. Müssgen, J. Degenkolbe: Erfahrungen mit wasservergüteten CuMoZr -legierten Baustählen; Molybden — Dienst 70/71.
3. T. Varga, W. Felix, W. Müller: Die Eigenschaften von Schweissverbindungen aus vergüteten Baustählen; Schweisstechnik Zürich 5/70.
4. J. Degenkolbe: Vergleich von Sprödbbruchprüfverfahren; Sonderdruck aus der Zeitschrift TU Bd 10/69.

5. IIW Document IX-766-71: Questionnaire on the use of type testing for assessment of weldability and resistance to brittle fracture.
6. H. Granjon, S. Debiez, R. Gaillard: Nove metode, rezultati in perspektive pri določanju varivosti jekel; predavanja na Zavodu za varjenje, Ljubljana 1967.
7. J. Žvokelj: Presoja kaljivosti jekel pri varenju; *Želzarski zbornik* 4/69.
8. S. Anik: Hardness distribution in the heat affected zone of heat treated high strength steels; IIW document II-402-66.
9. IIW Document IX-747-71: Some observation on weldabilities of thick high strength steels and welding procedures applying to steel structures for civil engineering.
10. J. Degenkolbe, B. Müsken: Schweißen hochfester vergüteter Baustähle, Untersuchungen an Cr-Mo-Zr legierten Stählen.
11. Tyssen, Stranski institut für Metallurgie, Abteilung Werkstoffkunde, Schweißtechnik — 1971; Empfehlungen für das Schweißen von N-A-XTRA.
12. H. Kihara: Welding cracks and notch-toughness of heat-affected zone in high-strength steels; 1968 IIW HOUDREMONT LECTURE.
13. Salkin: IIW Document IX-766-71: Type tests to assess the sensitivity to cold cracking.
14. H. Oba, S. Susei, Y. Fujishiro: IIW Document IX-747-71: Some observation on weldabilities of thick high strength steels and welding procedures applying to steel structures for civil engineering.
15. Degenkolbe, D. Uwer: Erfahrungen beim schweißen wasservergüteter Stähle mit Streckgrenzen von 47 bis 90 kp/mm².
Tyssen — Stranski Institut für Metallurgie, Abteilung werkstoffkunde — Schweißtechnik 71.
16. H. Suzuki: On the use of high strength steels in Japan; IIW colloquium commission IX — Stockholm 71.
17. Y. Ito, Bessyo: Weldability formula of high strength steels; IIW Document IX-576-68.
18. K. Satoh: Determination of preheating conditions to avoid weld cracking in steel constructions; IIW Document IX-730-71.
19. Cepolina: Type tests to assess-sensitivity towards brittle fracture; IIW Document IX-766-61/IXF-71-20.
20. ASTM E2 08-66T: Conducting drop-weight test to determine Nil. — ductility transition temperature of ferritic steels.
21. W. E. Müller: Druckrohrleitungen neuzeitlicher Wasserkraftwerke; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1968.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel werden die Probleme beim Schweißen des vergüteten Konstruktionsstahles des Types N-A-XTRA behandelt. Dieser vom Thyssen stammende Stahl ist für eine Druckrohrleitung von 2500 mm Durchmesser angewendet worden. Probleme welche beim Schweißen eines solchen Stahles auftreten, sind hauptsächlich nicht von Stahltyp und von dem Stahlerzeuger abhängig, weil die nach bestimmten Kriterien gelöst werden müssen, welche für alle hochfesten Stähle gemeingültig sind. Wir sind der Meinung, dass ähnliche Probleme auch bei den einheimischen vergüteten Stählen, welche noch im Entwicklungsstadium sind, auftreten werden.

Die Betonung gilt den Schwierigkeiten mit welchen sich der Erzeuger der schweren Konstruktionen bei der Auswahl des Schweißzusatzmaterials befassen muss, denn das Problem ist mit einem einwandfrei erzeugtem Stahl, noch lange nicht gelöst. Ausser der projektiven Ausführung muss aus Sicherheitsgründen noch die technologische Ausführung der Konstruktion gewährleistet werden. Bei der Ausführung einer schweren Konstruktion können verschiedene Einflussfaktoren auftreten, welche bei der statischen Berechnung nicht eingefasst oder vorgesehen werden können. Die moderne Wissenschaft versucht in dieser Richtung mit verschiedenen Prüfungsmethoden den Zustand, in welchen sich die Konstruktion später befinden

wird, so gut wie möglich zu ergreifen und auf Grund dieser Prüfungen die Sicherheitsgrenzen der Konstruktion festzustellen, wenn diese vollbelastet wird.

Die Forschungsarbeit umfasst vor allem die Untersuchungen des Mechanismus der Entstehung und Ausbreitung des Sprödbrechens und der Methoden mit denen das Auftreten und Ausbreiten des Sprödbrechens vorausgesagt werden kann. Auf Grund solcher Vorschungsergebnisse und Voraussagen wird versucht die Konstruktion vor solchen Schadensfällen zu sichern. Schwierigkeiten treten auf bei der Auswahl der Methode für die Bestimmung des Sprödbrechens und anderer Methoden für die Bestimmung der Schweißbarkeit.

Unter den zahlreichen Kriterien von welchen jedes auf seine eigene Art die einzelnen Einflüsse (die nicht standardisiert sind) zu erfassen versuchen, ist es schwer diejenigen auszusuchen, welche für eine bestimmte Konstruktion am besten geeignet sind.

Im Rahmen der Möglichkeiten, die uns zur Verfügung stehen, versuchen wir die richtigen Kriterien auszuwählen und auf deren Grund eine entsprechende Schweißtechnologie auszuarbeiten, welche auch im Falle einer nicht kontrollierten Beanspruchung der Konstruktion eine noch genügende Elastizität gewährleisten würde, um die Möglichkeit eines Sprödbrechens auszuschließen.

SUMMARY

Problems on weldability of N-A-XTRA tempered structural steel are discussed in the paper. This steel manufactured by Thyssen Company was used for pressure pipeline of diameter 2500 mm because such high quality steel in greater amounts is not yet manufactured by domestic manufacturers. Problems in welding such steels are in general not dependant on the steel quality or manufacturer because they are solved by criteria valid for all high-strength steels. Similar problems will appear also with domestic tempered structural steels which productions is being developed.

The intention was to show the difficulties in choosing correct weldable material for heavy constructions because

this problem is not solved only by the quality of manufactured steel. The safety of the construction must be guaranteed by the design and by the technological realization. In constructing heavy constructions many factors appear which cannot be included or foreseen in the statistics. Modern science tries by various systems of tests to simulate the conditions under which the construction will later operate and thus to find the guaranteed limit for a safe construction under full load. Research work is directed mainly to the mechanism of appearing and propagation of brittle fracture and to the methods used in forecasting the appearing and propagation of brittle fractures thus enabling us to prevent the construction

from such fracturing. Difficulties appear in choosing the best methods for determining brittle fracture and the methods for determining the weldability. Among various criteria which include single influences (parameters are not standardized) in specified ways, it is difficult to select the most suitable one for single constructions.

A trial in selection of the correct criteria was made according to the available possibilities, and a corresponding technology of welding which will enable the ductility and elasticity of the construction also in the case of uncontrolled loads was designed, excluding the possibility of brittle fracturing.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены проблемы сварки инструментальной улучшаемой стали марки N-A-XTRA. Эту марку стали — изделие немецкого концерна Тиссен — употребили для изготовления нагнетательного трубопровода $\varnothing 2.500$ мм. Этот сорт стали благодаря своего высокого качества производится в нашей стране лишь в небольшом количестве.

При сваривании конструкций из этой стали возникают разные проблемы которые не зависят только от производителя и от вида конструкции и разрешаются по определенным показателям. Эти показатели имеют действительность для всех сортов стали высокой вязкости. Можно предполагать, что похожая проблематика получится при производстве домашней инструментальной стали для улучшения которая ещё находится в начальной стадии развития.

Тенденция статьи рассмотреть затруднения с которыми должен считаться производитель крупных конструкций при выборе сварочного материала (также добавочного), так как только с выработкой качественной стали проблем ещё не закончен. Параллельно с гарантией на надёжность конструкции что касается проектирования требуется загарантировать также технологическую часть выполнения. При изготовлении крупных конструкций возникает целый ряд проблем охватить которых нет возможности а также

и предвидеть в статистическом расчёте. При помощи различных систем исследования современная наука стремится охватить ситуацию которая будет применена позже при крупных конструкциях, и, на основании которых можно будет определить до которых пределах загарантирована надёжность конструкции при полной нагрузке. Такое исследование должно главным образом охватить механизм возникновения и расширения хрупкого излома; необходимо также взять во внимание методы исследования на основании которых можно предполагать вероятность появления и расширения хрупкого излома. На основании полученных данных стремимся предохранить конструкцию от хрупкого излома. Затруднения возникают при выборе методов определения свариваемости. Из сравнительно большого числа критериев, из которых каждый стремится по своему охватить отдельные параметры (при чём они не стандартизованы) представляет затруднение в выборе самых подходящих для определённую конструкцию. В пределах допускаемости, которые находятся в распоряжении цель исследования выбрать правильные критерии и, на их основании выработать подходящую технологию сварки, которая также в случаи неконтролируемой нагрузки обеспечить дуктильность и упругость конструкции, так что возможность хрупкого излома исключается.