

Problem varivosti debelostenskih varjencev iz konstrukcijskih jekel

UDK: 621.791.004:621.791.002
ASM/SLA: K, k9s, 9-72

V. Prosenc in F. Seliškar

Razpoke raznih izvorov kot problem varivosti nelegiranih konstrukcijskih jekel velikih debelin; analiza razpok na zvarjenem strojnem delu; primerjava sestave jekla z mehanskimi lastnostmi in dolžino razpok v varjencu; preskušanje varivosti s preskušanci z lastno vpetostjo; možnosti za vplivanje na varivost z avtomatizacijo varjenja.

1. UVOD

Pri varjenju debelostenskih varjencev se pojavljajo številne težave, predvsem če debeline prekoračijo 40 do 50 mm. Tedaj varivost ni problematična samo pri zahtevnejših materialih (malo, srednje ali močno legiranih, oz. mikrolegiranih jeklih), ampak tudi že pri nelegiranih kvalitetah C 0462, 0463, 0563 in podobnih, ki so v normalnih debelinah pločevine (10 do 20 mm) vedno lahko variva. Problemi izhajajo iz številnih tehnoloških razlogov, ki so vedno prisotni pri varjenju debelih presekov. Ti so: velika hitrost ohlajanja vara zaradi intenzivnega odvoda toplote, velik dovod dodajnega materiala in z njim tudi toplote, neugodno večosno napetostno stanje v varu in velika togost varjene konstrukcije, ki se težko prilagodi z lastno plastično deformacijo varilnim napetostim.

Škodljivi vpliv vodika je pri velikih debelinah mnogo bolj izražen kot pri tankih materialih in tudi homogenost jekla je bolj problematična.

2. Postavitev problema

Največji problem pri varjenju debelostenskih varjencev je pokljivost. Vsi prej navedeni dejavniki prispevajo k nastajanju razpok. Te se lahko pojavljajo v varu ali v osnovnem materialu. Začetek imajo lahko v varu, a najpogosteje v prehodni coni in se nato nadaljujejo po prehodni coni ali pa prehajajo v var, oziroma osnovni material. Razpoke so vedno posledica notranjih napetosti in pogosteje nastajajo med ohlajanjem kot pa med ogrevanjem varjenca.

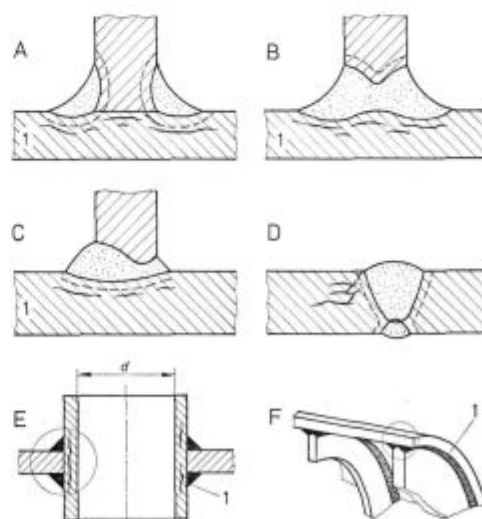
2.1 *Razpoke v varu* so lahko vroče ali hladne, a neposredni vzroki so lahko metalurški (široki interval strjevanja, nečistoče v materialu, oz. varu, nehomogenosti, neugodne strukturne spremene) ali

pa so splošni — varilski: neugodna ali nepravilna tehnologija varjenja, nekvaliteten dodajni material, vodik v varu, nekvalitetna izvedba varjenja in še drugo.

2.2 *Razpoke v osnovnem materialu* imajo lahko delno enake vzroke kot one v varu. To so predvsem metalurški vzroki: neprimerna sestava jekla, preveč nečistoč (žveplo), nehomogeni material (trakasta struktura), neustrezna predelava (valjanje), ki vodi do neustreznih mehanskih lastnosti, predvsem do prevelikih razlik v vzdolžni in prečni smeri ter po debelini.

2.3 *Lamelarni lom* je posebna vrsta razpok, ki se pojavljajo v osnovnem materialu. So izrazita posledica varilnih napetosti po debelini in metalurške nehomogenosti jekla. Skoraj vedno imajo svoj začetek v osnovnem materialu ali tik pod varom v prehodni coni, se nadaljujejo po osnovnem materialu in le redko prehajajo v var. Posebno nevarno je, če ostanejo zaprte pod površino in ne dosežejo večjih dimenzij ter se zato izmaknejo kontroli. Te so kasneje lahko izhodišče za porušitve.

Na sliki 1 je nekaj značilnih mest v varih za nastajanje lamelarnih razpok. V vseh primerih je oblika vara v konstrukciji takšna, da je osnovni material obremenjen v smeri debeline.

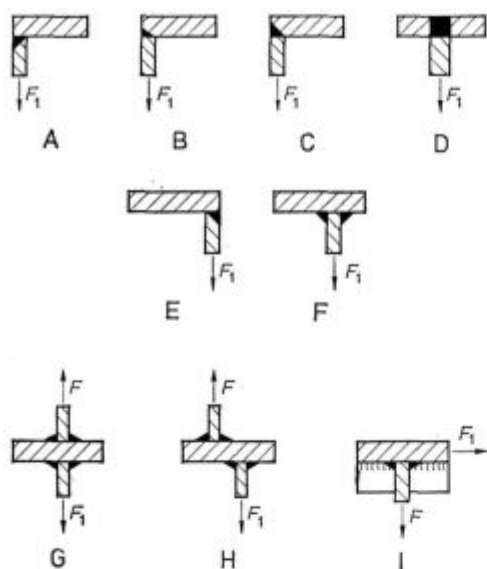


Slika 1
Nekaj značilnih mest za pojavljanje lamelarnih razpok pod zviri

Fig. 1
Some characteristic areas where lamellar cracks appeared under welds

Prof. dr. Viktor Prosenc, VTO — Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Seliškar Franc, dipl. ing. — TZ Litostroj, Ljubljana



Slika 2

Nekateri obliki zvarov z različno nagnjenostjo k lamelnim razpokam

A zelo neugodno, B, C in D ugodnejše, E neugodno, F odmik z roba je ugodnejši, G slabo, H boljše, J vzdolžna lamela razmere izboljša

Fig. 2

Some shapes of welds with various susceptibility to lamellar cracking

A very unfavourable, B, C, and D more favourable, E unfavourable, F away from the edge is more favourable, G bad, H better, J longitudinal lamella improves the situation

K nastajanju lamelnih razpok prispeva svoj delež nekvaliteten material, nepravilna zasnova varjene konstrukcije, nepravilna izvedba varjenja in priprava varnega roba. Jeklo, ki naj bi bilo odporno proti lamelnemu lomu, naj bi bilo zelo čisto, s čim bolj izotropnimi mehanskimi lastnostmi.

Številni raziskovalci [1], [2] so iskali povezavo med sestavo, načinom izdelave in predelave jekla ter lamelnim lomom. Ugotovljeno je, da imajo zelo slab vpliv sulfidne in tudi oksidne nečistoče, izločene v obliki trakov. Zato naj žveplo v jeklu ne bi prekoračilo 0,01 %, ker se nad to vrednostjo že pojavljajo lamelarne razpoke, nižje pa ne. Istočasno mora biti zagotovljena tudi dobra dezoksidacija [3].

Odpornost proti lamelnemu lomu nakazujejo mehanske lastnosti v smeri debeline materiala. Največji poudarek je na kontrakciji v smeri debeline. Najnižja prečna kontrakcija (po debelini) naj bi bila ob nizki stopnji vpetosti najmanj 25 %, pri večjih vpetostih mora biti znatno višja. Zelo važno je torej konstruiranje, kjer naj bo velik poudarek na razporejanju in oblikovanju varov. Na sliki 2 je nekaj primerov oblike in namestitve varov s slabim vplivom na pokljivost in za primerjavo so prikazane ugodnejše izvedbe.

3. Analiza razpok na varjenem strojnem delu

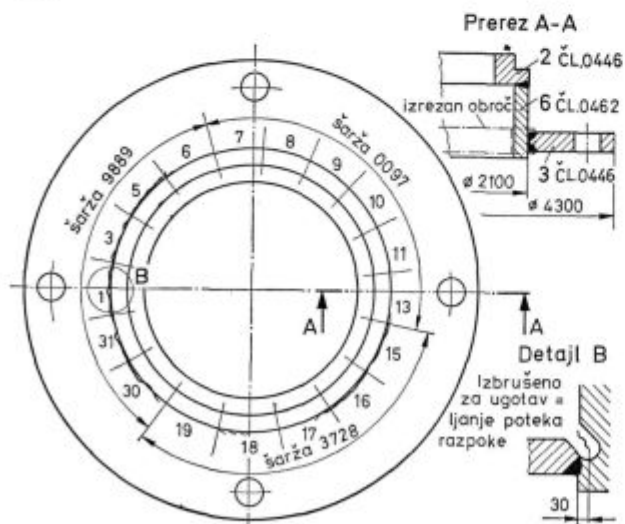
Pri varjenju strojnega dela večjih dimenzij iz jekla Č 0462, debeline 40 mm, in iz jeklene litine ČL 0446, debeline 80 mm, je prišlo do številnih razpok. Varjenec (slika 3) je bil izrazito toga konstrukcija z veliko stopnjo vpetosti. Pri varjenju krožnega vara — K, kjer je bila predpisana popolna prevaritev, so bile ugotovljene po celem obodu številne razpoke. Pri oceni oblike konstrukcije in namestitve vara je bila umestna ugotovitev, da bi bile razpoke lahko lamelarne, če bi bilo jeklo k temu nagnjeno.

Pri sanaciji varjenca je bil izrezan cel var - K. S tem je bila bistveno spremenjena oblika varnega spoja, a izrezani var je bil podvržen številnim preiskavam (mehaničnim, kemičnim in metalografskim).

3.1 Mehanske preiskave

Pozicija, iz katere je bil izrezan obroč (razpokani var), je bila iz jekla Č 0462, a sestavljena iz treh različnih šarž. Obroč je bil razrezan na 17 segmentov, dolžine 400 do 500 mm, od katerih je 6 pripadalo šarži št. 0097, 6 šarži št. 9889 in 5 šarži št. 3728. Kemična sestava in mehanske lastnosti v vzdolžni smeri so bile znane že iz prevzemnih atestov. Dodatno so bile ugotovljene še mehanske lastnosti v smeri debeline.

Rezultati so navedeni v tabeli. Iz nje je razvidno, da kemična sestava v vseh točkah ustreza predpisu za kvaliteto Č 0462. Odstopanja pri žveplu so od 0,022 do 0,035 %. Tudi pri mehanskih lastnostih so opazna odstopanja, vendar so ta v vzdolžni smeri nebitvena, celo na izrezanem obroču pri varjenju. Izrazite pa so razlike pri kontrakciji po debelini, ki je bila ugotovljena na izrezanih segmentih. Pri šarži št. 0097 z žveplom 0,022 % do 0,025 % je bila kontrakcija 19 do 33,8 %, pri šarži št. 9889 z žveplom od 0,030 do 0,035 % je bila kon-



Slika 3

Skica varjenca z označenimi razpokami

Fig. 3

Sketch of the welded piece with marked cracks

Tabela: Kemične sestave in mehanske lastnosti jekla iz izrezanih segmentov

		Številka šarže		
		0097	3728	9889
KEMIČNA ANALIZA %				
C		0,13 — 0,15	0,13 — 0,16	0,13 — 0,17
Si		0,22 — 0,28	0,22 — 0,26	0,15 — 0,18
Mn		0,53 — 0,59	0,63 — 0,70	0,60 — 0,67
P		0,016 — 0,020	0,016 — 0,022	0,011 — 0,012
S		0,022 — 0,025	0,030 — 0,035	0,031 — 0,035
N ₂		0,006	0,007	0,005
MEHANSKE LASTNOSTI (iz atesta)				
Meja plastičnosti	N.mm ⁻²	317	286	279
Trdnost	N.mm ⁻²	460	466	420
Razteznost	%	27	26	29
Žilavost	J	24,8 — 37,8	47,4 — 50,0	46,7 — 49,4
Kontrakcija	%	65,8	60,5	65,2
MEHANSKE LASTNOSTI (po debelini materiala)				
Meja plastičnosti	N.mm ⁻²	287 — 385	203 — 267	229 — 343
Trdnost	N.mm ⁻²	458 — 483	438 — 484	404 — 429
Kontrakcija	%	19 — 33	5,6 — 15	6,6 — 12,6
Žilavost	J	10,3 — 11	2,0 — 8,4	7,6 — 10,9
ANALIZA RAZPOK				
Štev. razpokanih segmentov		3	6	4
Skupna dolžina razpok	mm	205	2150	1530
isto	%	7,5	79,5	68

trakcija 5,6 do 15 % in pri šarži št. 3728 z žveplom med 0,031 in 0,035 % je bila 6,5 do 11,5 %. Iz navedenega sledi, da so bile kontrakcije pri vseh treh šaržah sorazmerno nizke; vendar je najvišja pri šarži z najnižjim žveplom, ki izkazuje istočasno tudi najboljšo žilavost (določeno na segmentih).

Po ugotovitvah skupne dolžine razpok na izrezanih segmentih se rezultati zelo dobro ujemajo z žilavostjo in kontrakcijo po debelini. Pri šarži št. 0097 je skupna dolžina razpok na treh segmentih samo 205 mm, kar je 7,5 % od skupne dolžine. Na segmentih šarže št. 9889, ki ima najslabše mehanske lastnosti, je skupna dolžina razpok 2150 mm, tj. 79,5 %, a na segmentih šarže št. 3728 je razpok v skupni dolžini 1530 mm, oziroma 68 %.

3.2 Metalografske preiskave

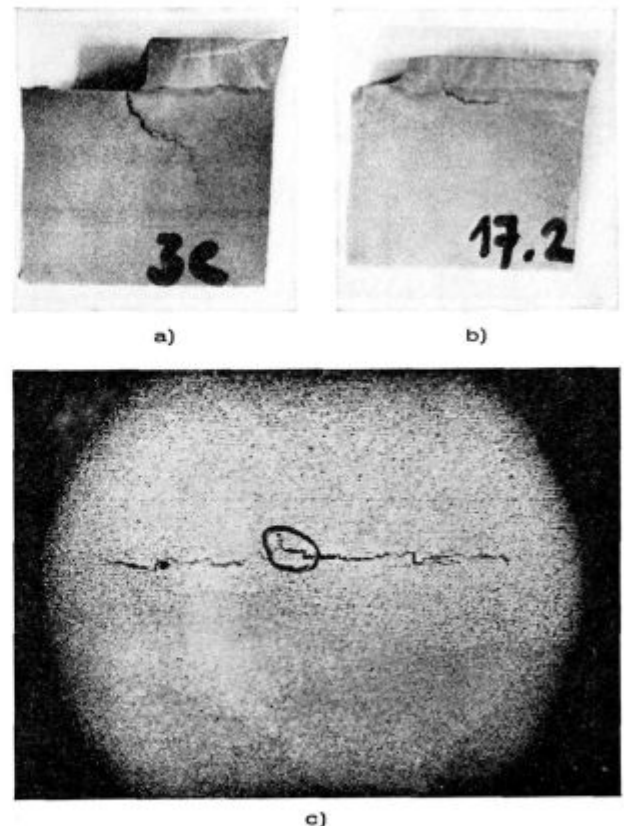
Po pregledu z ultrazvokom je sledila še metalografska preiskava razpok, da bi ugotovili, kakšen je njihov potek. Preiskava kaže, da se pričenjajo vse razpoke v prehodni coni, se širijo pod varom

Slika 4

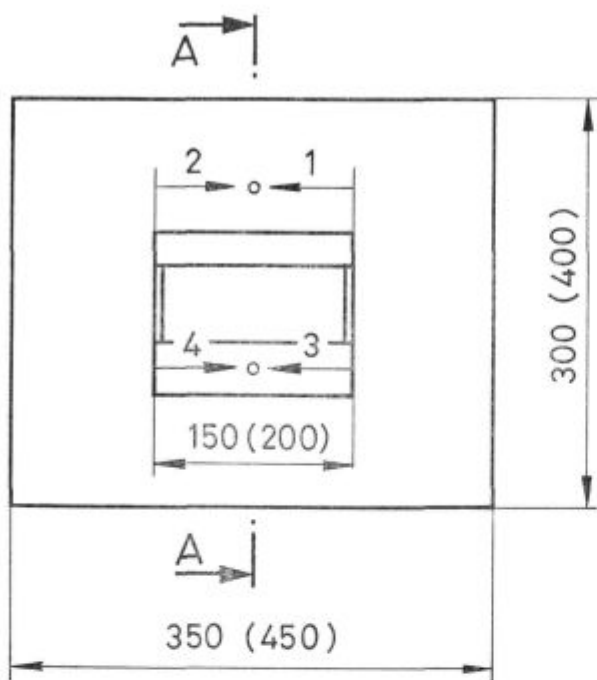
Potek razpok v nekaterih izrezanih segmentih
a) šarža 9889, b) šarža 3728, c) šarža 0097

Fig. 4

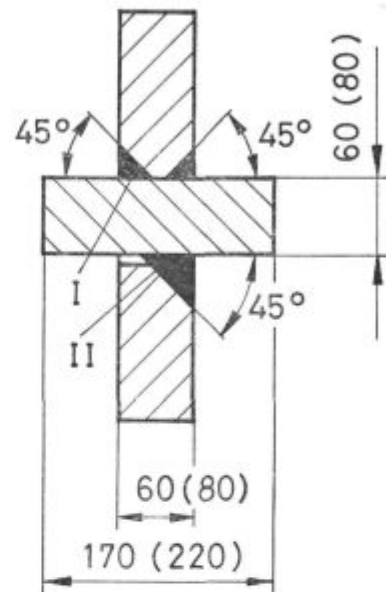
Crack course in some cut sections a heat 9889, b heat 3728, c heat 0097



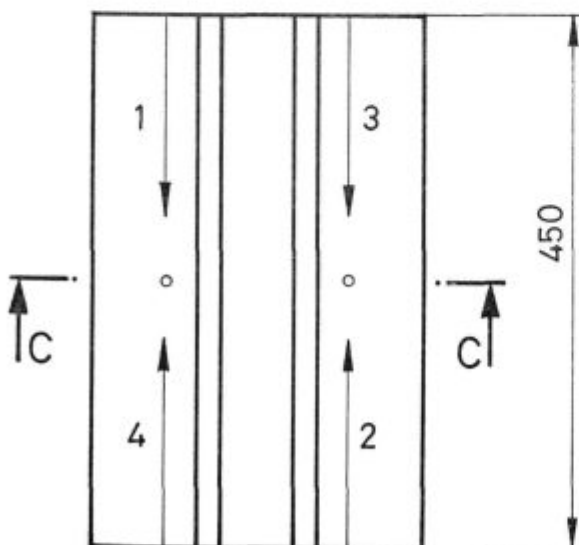
a) Test Window



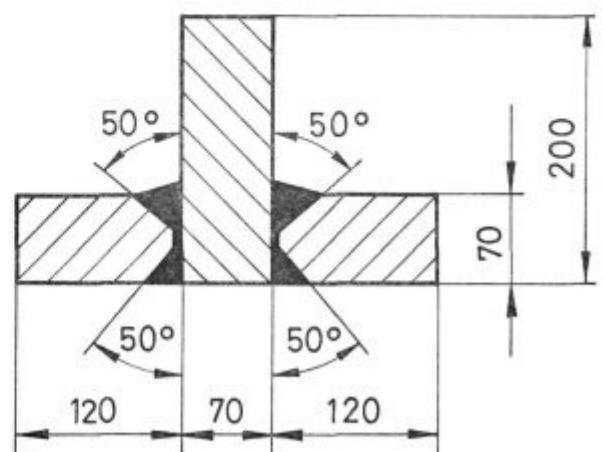
Prerez A-A



b) Dvojni zvar K



Prerez C-C



Št. varilne probe: 1 2 3
Temp. predgretja [°C]: 0 150 200

Slika 5
Obliki preskušancev za ugotavljanje varivosti z lastnim vpetjem, okenski (Window-test), dvojni zvar-K
Fig. 5

Shapes of test pieces for testing weldability by own rigity of samples, window-test, double K weld

ali pa prehajajo v osnovni material. Iz makrometalografskih posnetkov (slika 4) je razvidno, da ima le malo razpok takšen potek, ki bi ustrezal predstavi lamelnarnega loma in je le-ta samo nekoliko nakazan.

Iz te analize sledi zaključek, da pri varjenju velikih debelin ne zadošča samo poznavanje mehanskih lastnosti po dolžini, ampak je važna predvsem kontrakcija po debelini, ki je vedno povezana z nizkim žveplom.

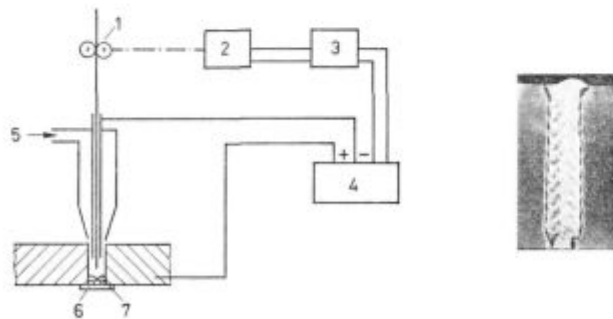
4. Preskus varivosti s preskušanci z lastno vpetostjo

Vzporedno s preskusom izrezanega vara so bili napravljeni precej številni varivostni preskusi na preskušancih z lastnim notranjim vpetjem. Izbrana sta bila dva preskušanca, dvojni var - K in Window - test (preskus z oknom) (slika 5). Preskusni material je bil jeklo Č 0462, Č 0463 in Č 0563, debeline 60, 70 in 80 mm. Varjenje je bilo ročno, z dovodom toplote 12 do 20 kJ.cm⁻¹ pri elektrodah premera 3,25 mm in 15 do 25 kJ.cm⁻¹ pri elektrodah premera 5 mm, izvedeno pri sobni temperaturi in s predgrevanjem na 150 °C. Za opazoritev posebno neugodnih pogojev je bila serija poskusov, opravljena pri temperaturi okolice s forsiranim ohlajanjem vara in varjeno z nesusenimi bazičnimi elektrodami.

Preskus je pokazal, da je s preskušanci le težko doseči tako neugodne pogoje, kot se pojavljajo v realnih varjenjih. Napake, predvsem razpoke, so se pojavile le v dveh primerih, in to pri varjenju s forsiranim ohlajanjem v hladni vodi.

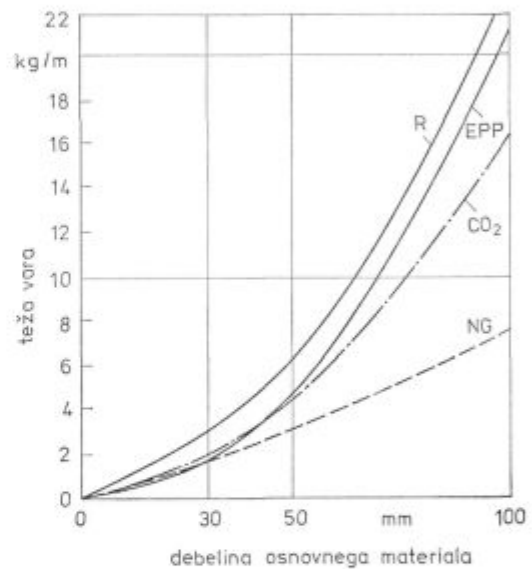
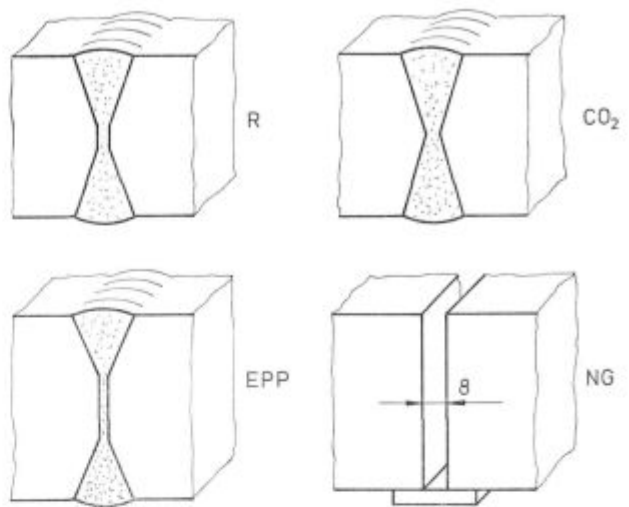
5. Vpliv avtomatizacije varjenja na varivost

V definiciji varivosti neke kovine ali zlitine ni obsežna samo vrsta, sestava, kvaliteta in debelina osnovnega materiala, ampak tudi varilni postopek. Zato je možno z izbiranjem varilnega postopka vplivati na varivost. Predvsem je zanimivo, če zamenjava ročnega varjenja z avtomatskim lahko varivost izboljša. Pri avtomatskem varjenju se dosežejo večje hitrosti taljenja in so koti posnetja



Slika 6
a) Princip varjenja v ozki regii
b) Makro posnetek zvara (v ozki regii).

Fig. 6
a Principle of welding in a narrow gap
b Macropicture of the weld (in narrow gap)



Slika 7

Primerjava porabe dodatnega materiala in priprava zvarnega roba pri: R ročnem obločnem varjenju, EPP (pod praškom, CO₂ po MAG postopku, NG varjenje v ozki regii

Fig. 7

Comparison of filler consumption and preparation of the welding edge at: R hand metal arc welding, EPP submerged arc welding, CO₂ MAG process, NG welding in narrow gap

varnega roba lahko bolj strmi. Zato je poraba dodatnega materiala manjša. S tem se skrajša čas varjenja, zmanjša potrebni dovod toplote in z njim varilne napetosti po varjenju.

Za varjenje posebno velikih debelin je ugoden postopek varjenja »v ozki regii« — Narrow-gap. [4] Shematično je prikazan na sliki 6a, a na sliki 6b je makroposnetek vara v ozki regii [5]. Varjenje je v zaščitni atmosferi. Širina varne špranje je zelo ozka in poraba dodatnega materiala majhna. [6] V sliki 7 je prikazana poraba dodatnega materiala pri štirih varilnih postopkih. Vidna je prednost polavtomatskih in avtomatskih načinov varjenja, a pred vsemj je varjenje v ozki regii.

6. ZAKLJUČEK

Varivost debelostenskih varjencev je vedno kritična. Za uspešno varjenje je treba zagotoviti cel sklop ukrepov, ki se začinjajo pri pravilni konstrukciji, ustrezni kvaliteti osnovnega materiala, pravilni varilski tehnologiji in zadostni tehnološki disciplini, ki zagotavlja kvalitetno izvedbo varilskih del.

Tudi avtomatizacija varilnih postopkov lahko prispeva izdaten delež k izboljšanju varivostnih pogojev.

Literatura:

1. Wilson, G. W.: Minimizing lamellar tearing by improving Z-direction ductility. *Weld. J.* (1974) nov., s. 611
2. Kobayashi, K. in sodel.: Propagation de fissures de fatigue Soud. et techn. conn. 32 (1978) 4/5, s. 127
3. Autorski kolektiv: Soud. et techn. conn. 31 (1977) 5/6, s.
4. Soudage Narrow. gap, Cahiers techniques Sciaky, (1977) 10
5. Henderson, I. in K. Seifert: Untersuchung verschiedener Badsicherungen beim Engspaltschweissen eines Reaktorbaustahles. *Schweiss. Schneid.* 26 (1976) 8, s. 291
6. Beokert, M. in R. Probst: Betrachtungen zum Schweißen von Nähten geringen Volumens... *Schweiss. u. Schneid.* 28 (1976) 8, s. 287

ZUSAMMENFASSUNG

Ein grosses Problem beim Schweißen von dickwandigem Grundwerkstoff ist die Rissigkeit. Lamellenbrüche sind ganz besondere Fehler, deren Ursache metallurgische Unreinigkeiten im Stahl sind.

Die metallographische Untersuchung eines Risses an einer Schweissverbindung aus Stahl C 0462 und einer Dicke von 40 mm und Stahlguss CL 0446 und 80 mm Dicke, und die chemischen und mechanischen Untersuchungen am Stahl in der Dickenrichtung haben eine unmittelbare

Verbindung zwischen der Risslänge, dem Schwefelgehalt und der Einschnürrung in der Dickenrichtung ergeben. An Rissen war der Lamellenbruch nur leicht angezeigt. An verschiedenen Proben welche bei der Versuchsdurchführung eingespannt werden, können die Verhältnisse beim Schweißen nicht zuverlässig reproduziert werden. Automatisierung der Schweissverfahren kann die Schweissbarkeit günstig beeinflussen, da die Wärmezufuhr niedriger ist und damit auch die Schweissspannungen.

SUMMARY

The greatest problem in welding thick-walled pieces is their susceptibility to cracking. Lamellar fractures appearing mainly because of metallurgical non-homogeneities in steel are a special type of cracks. Metallographic analysis of cracks in 40 mm thick welded piece of C 0462 steel and 80 mm thick welded piece of CL 0446 cast steel showed at simultaneous chemical and mechanical investigations of steel in the direction of thickness that direct relation-

ship exists between the length of cracks and the sulphur content, and the contraction in transversal direction (thickness). The lamellar characteristic of the cracks was only slightly indicated. Test pieces having own rigidity cannot reliably reproduce conditions in welding. Automation of the welding process can favourably influence the weldability since the needed heat input is reduced and thus also the welding stresses.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенный вопрос при сварки толстостенных сварных соединений представляет наличие трещин. Своеобразный вид трещин это слоистые трещины, которые образуются главным образом вследствие металлургических неоднородностей в стали. На сварных образцах стали марки С. 0462 толщиной 40 мм и стального литья марки CL. 0446 толщиной 80 мм, выполненные химические и механические исследования в направлении толщины образца показали непосредственную связь между длиной трещин и % серы, а

также связь с сужением в поперечном направлении (по толщине). Слоистый вид трещин только слегка примечен. На образцах с самонапряжением нет надежных возможностей воспроизводить условия, которые возникают при сварки. Автоматизация сварки может повлиять положительно на свариваемость, так как уменьшает введение необходимого количества теплоты, и с этим также сварочные напряжения.