

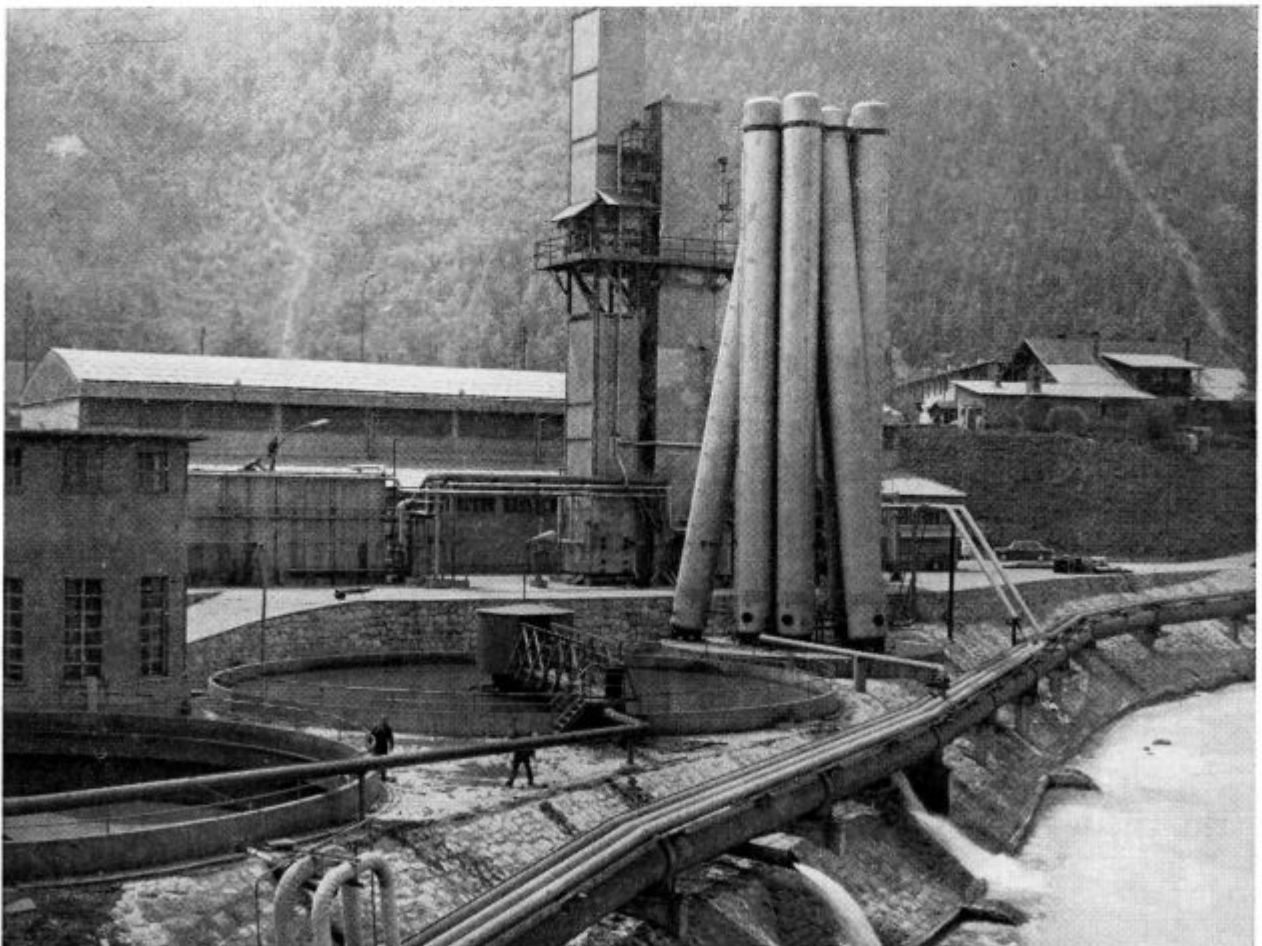
Problematika varjenja finoizrnatih mikrolegiranih jekel*

Da se izognemo pojavu večjih ali manjših razpok na zvarih jekla Č 0562 odnosno St 52-3 z mejo plastičnosti min. 36 kp/mm² moramo jeklo predgrevali. Varjenje finoizrnatih jekel z mejo plastičnosti nad 40 kp/mm² zahteva še večjo pazljivost, ker lahko dodani elementi v mikro količinah bistveno vplivajo na spremembo strukture v prehodni coni.

V članku je opisana problematika varjenja prvega objekta izdelanega iz jekla Nioval 47 z mejo plastičnost min. 47 kp/mm² in obdelan vpliv dovedene primarne in sekundarne energije na izoblikovanje trdote v prehodnih conah zvara.

Finoizrnatna mikrolegirana jekla se z ozirom na visoko mejo plastičnosti uporabljajo za močno obremenjene varjene konstrukcije. Uporaba teh jekel je zelo ekonomična in omogoča izdelavo estetsko oblikovanih konstrukcij.

Literaturni podatki kažejo, da pri jeklu s povišano mejo plastičnosti dosežemo prihranek na teži konstrukcije tudi do 50 % v primerjavi s klasičnim jeklom Č 0345. Razumljivo je, da je z ozirom na visoko obremenitev teh jekel upravičena zahteva po odgovarjajočih mehanskih lastnostih, predvsem žilavosti in temperaturi prehoda iz žilavega v krhki lom pri nizki temperaturi, na drugi strani pa garantirana varivost.



Slika 1
Visokotlačne posode za kisik izdelane iz jekla Nioval 47, postavljene v kisikarni Železarne Jesenice

* Predavanje na strokovnem posvetovanju metalurgov v Mariboru oktobra 1971

Ni namen poročila obravnavati raziskave in objektivnost posameznih preizkusov za ugotavljanje varivosti materiala. Niti ni namen poročila, da bi obravnavali vpliv posameznih elementov v jeklu na varilno tehnične lastnosti jekla. V referatu bi rad obdelal praktični primer problemov varivosti materiala NIOVAL 47, ki smo jih raziskovali, in sicer vpliv varilnih parametrov in predgrevanja na varivost jekla. S tem poročilom bi rad prikazal vplive varilnih tehnologov in varilcev na kvaliteto zvara, oziroma zvarjene konstrukcije in pogled metalurga na probleme varjenja konstrukcij, izdelanih iz finoizrnatih jekel s povišano mejo plastičnosti.

Eno izmed podjetij kovinsko predelovalne industrije je izdelalo za Železarno Jesenice visokotlačne posode za kisik. Osnovni podatki:

| | |
|-----------------------------|-------------------|
| višina visoko tlačne posode | 21,50 m |
| premer | 1,57 m |
| volumen | 40 m ³ |
| obratovalni pritisk | 30 Atm |
| preizkusni pritisk | 39 Atm |

Visokotlačne posode, v celoti 9 kom., je projektiral Tehniški biro Jesenice. Prvotno je bila izbrana kvaliteta jekla Č 1205.

Meja plastičnosti min. 24 kp/mm² je zahtevala za posodo debelino pločevine 22 mm. Z ozirom na to, da smo prav v tem času zaključevali osvajanje finoizrnatega jekla Nioval 47, smo za objekt izbrali to kvaliteto jekla, z mejo plastičnosti min. 47 kp/mm² in s tem je bila potrebna debelina pločevine le 12 mm. Torej smo pri tem objektu prihranili pri uporabi visokovrednega materiala.

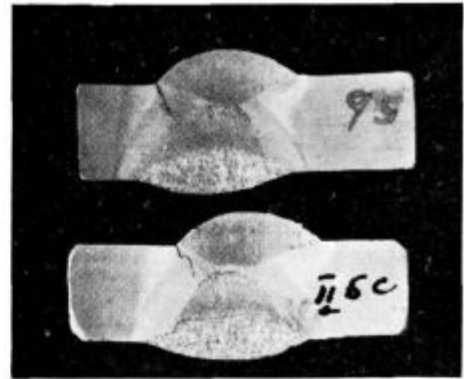
Podjetje še ni imelo izkušenj s predelavo jekla Nioval 47 in zato izvajalec ni akceptiral zahteve po predgrevanju materiala pri varenju zaradi tehničnih težav. Železarna je na ta kompromis pristala z ozirom na to, da je debelina pločevine 12 mm in pri pazljivem varjenju ne bi bilo nevarnosti za nastopanje martenzita, oziroma mikro razpok v prehodni coni.

Pri rentgenskem pregledu zvarov prve visoko tlačne posode na preskok je nadzorni organ zasledil na nekaterih mestih manjše razpoke. Zato je bilo dogovorjeno, da se izvrši rentgenografska kontrola zvara po vsej dolžini. Pri tem je bilo ugotovljeno, da so razpoke kratke do 12 mm in je bilo na vsej dolžini opaziti ca. 14 problematičnih mest.

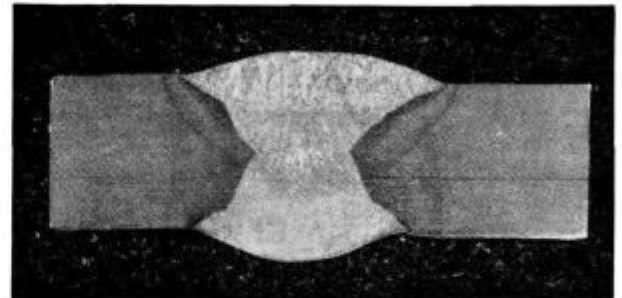
METALOGRAFSKA PREISKAVA ZVAROV

Na izrezanih vzorcih smo izvršili metalografsko preiskavo, da bi ugotovili vzroke za napake. Pri tem smo ugotovili naslednje:

Že makroskopski pregled problematičnih zvarov (sl. 1) v primerjavi z dobrimi (sl. 2) kaže,



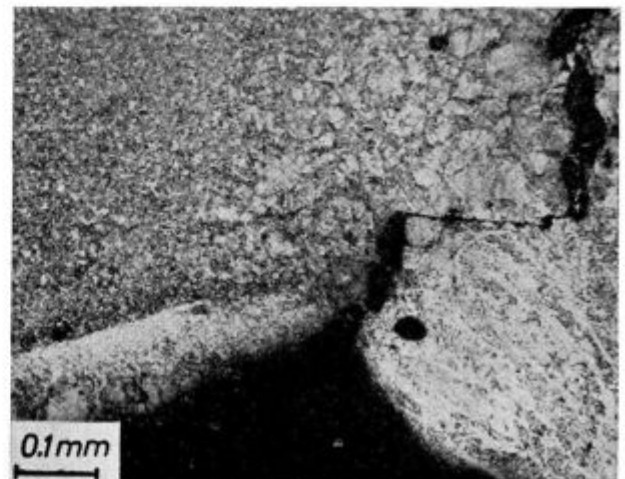
Slika 2 (Makro)
Izgled zvara z razpoko



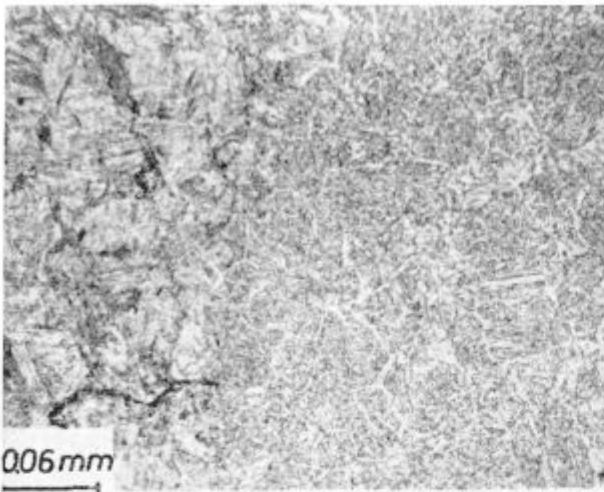
Slika 3 (Makro)
Primer izoblikovanja pravilnega zvara brez razpoke

da so razpoke nastale vedno na koremskem zvaru, in to tam, kjer se že makroskopsko opazi relativno oster prehod zvara v osnovni material. Metalurg bi rekel, da zvar ni zlit z osnovnim materialom.

Mikroskopska preiskava je pokazala, da je ob razpoki nastopila struktura martenzita, trdote ca. 430 HV. (sl. 4, sl. 5)

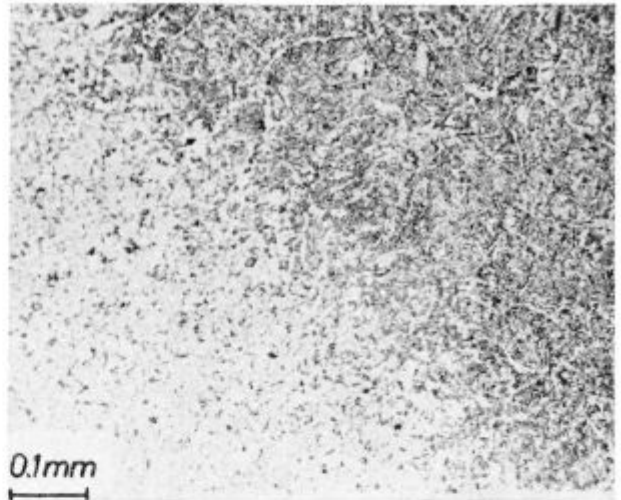


Slika 4
Primer interkristalne razpoke ob martenzitni coni zvara



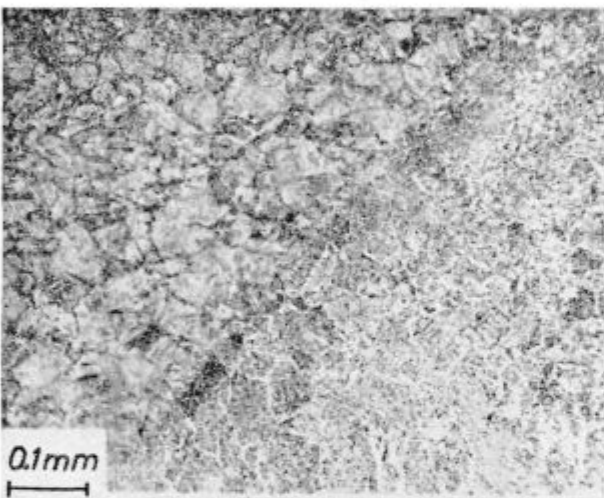
Slika 5

Martenzitna struktura z interkristalno razpoko v prehodni coni



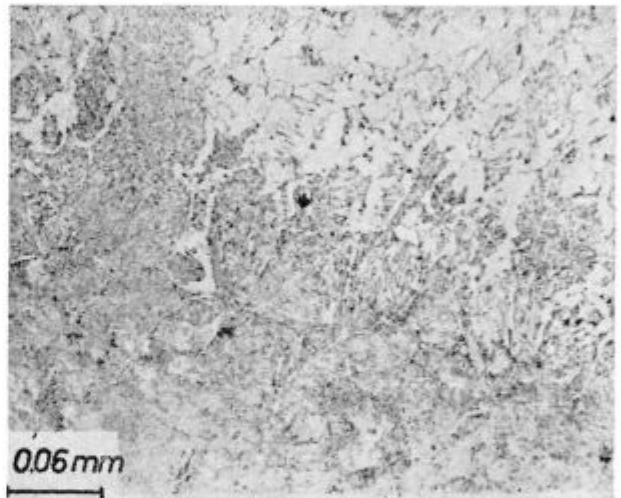
Slika 7

Pravilno izoblikovane strukture v prehodni coni zvara



Slika 6

Oster prehod zvar osnovni material z izrazito martenzitno strukturo



Slika 8

Primer feritno perlitne strukture v prehodni coni pravilno zvarjenega spoja

Martenzitno strukturo je zaslediti ob razpoki, oziroma v prehodni coni, ki je izredno ostra. (Sl. 6)

Nasprotno je pa metalografska preiskava dobrega zvara pokazala enakomerni prehod zvara v osnovni material v prehodni coni, kar je razvidno iz slike 7 in 8.

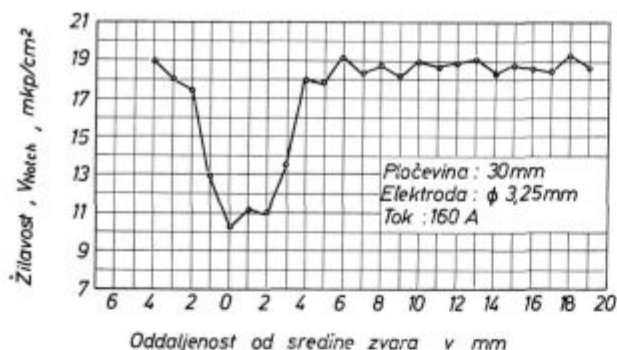
Dejstvo, da je pri varjenju te posode prišlo ponekod do razpok in pojava martenzita, čeprav je preiskava izvarov v splošnem dokazala, da jeklo ni nagnjeno k razpokljivosti pri varjenju, dokazuje, da so bili varilni pogoji neenakomerni, da so varili brez večje pozornosti in odgovornosti. Zato smo pri varjenju naslednjih posod zahtevali predgrevanje materiala na ca. 200° C.

Z ozirom na te konkretne probleme pri varjenju jekla Nioval 47 smo raziskovali vpliv tehnoloških pogojev varjenja na kvaliteto zvara. Pre-

iskava naj bi pokazala, v koliki meri je predgrevanje materiala potrebno, oziroma ali se lahko zahtevano predgrevanje nadomesti z odgovarjajočimi varilno tehničnimi parametri pri operativnem delu.

Kot merilo varilno tehničnih sposobnosti jekla smo vzeli trdoto zvara, oziroma prehodne cone, to je nastopanje martenzitne strukture. Trdota v tej prehodni coni naj ne prekorači 300 HV. Mišljenja sem, da je ta meja pri visokovrednih konstrukcijskih jeklih sporna in bo praksa v bodoče pokazala, koliko se lahko ocenjuje sposobnost za varjenje jekla s trdoto, oziroma martenzitno strukturo, upoštevajoč, da ima martenzit z nizko koncentracijo ogljika zadostno žilavost.

Varilno tehnični preizkus jekla Nioval 47 po Čabelki kaže, da jeklo ni nagnjeno h krhkosti. Padec žilavosti se opazi le v zvaru (sl. 9).



Slika 9

Rezultati preizkusa nagnjenosti jekla h krhkemu lomu po Čebelki na jeklu Nioval 47

Kakšni so vplivi predgrevanja, dovedene energije in premera elektrode na trdoto prehodne cone

Za te preiskave smo uporabili pločevino naslednje sestave:

| % C | Si % | Mn % | Nb % | V % | Al % |
|------|------|------|-------|------|-------|
| 0,17 | 0,37 | 1,54 | 0,044 | 0,06 | 0,034 |

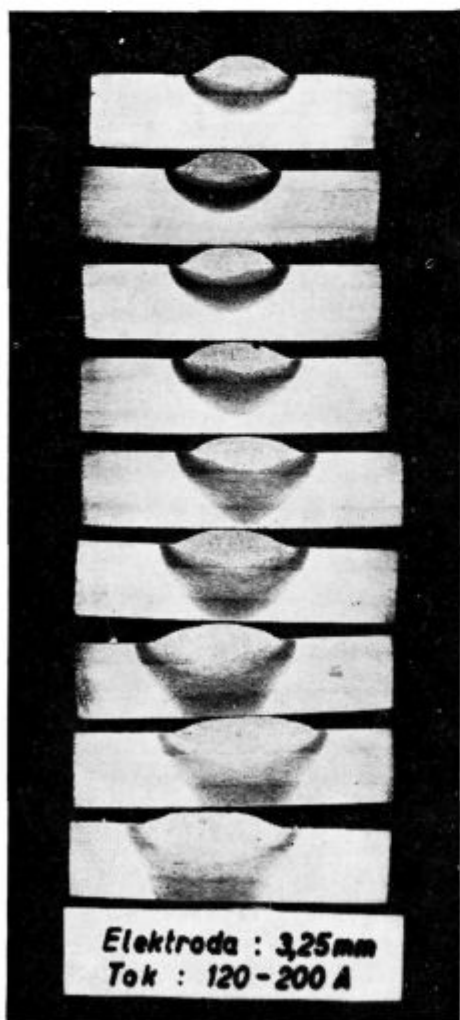
Vse preiskave smo opravili na pločevini, debeline 10–30 mm. Varili smo z oplaščenimi elektrodami in v drugi fazi tudi avtomatsko pod praškom.

Za varjenje z oplaščenimi elektrodami smo izbrali elektrodo EVB 60, premera 3,25, 4 in 5 mm.

Makroskopska ocena vplivov predgrevanja in dovedene energije na izoblikovanje prehodnih con zvara

Iz izkušenj tehnike metalografskih preiskav je poznano, da se pri jedkanju posamezne strukturne komponente različno obarvajo. Zato lahko že na osnovi makropregleda spremembe strukture v prehodni coni sklepamo tudi na prisotnost posameznih strukturnih komponent. Čim širša je torej makroskopsko ocenjena prehodna cona, pravičnejši je strukturni prehod iz zvara v osnovni material.

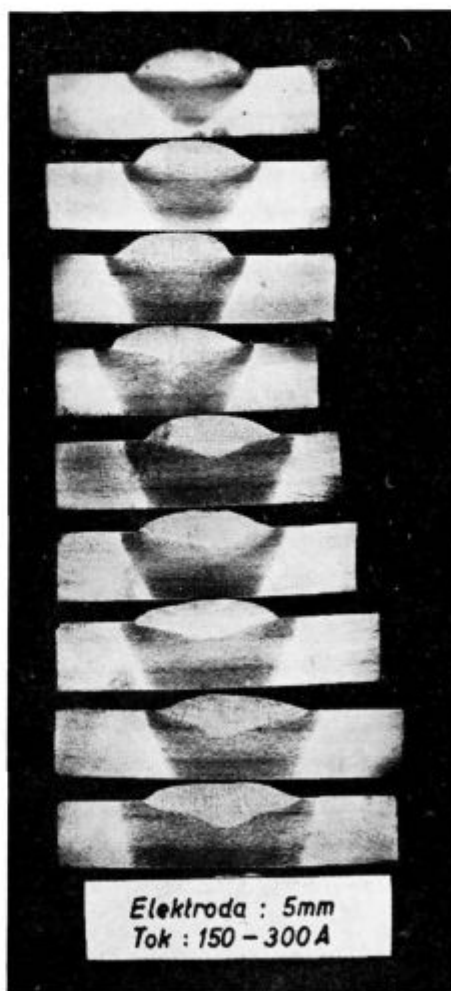
Primer izoblikovanja prehodnih con pri pločevini debeline 10 mm pri navarjanju z elektrodo \varnothing 3,25 kaže sl. 10 in pri pločevini debeline 5 mm sl. 11.



**Elektroda : 3,25 mm
Tok : 120-200 A**

Slika 10 (Makro)

Vpliv jakosti toka na izoblikovanje prehodne cone pri navarjanju z elektrodo \varnothing 3,25 mm



**Elektroda : 5 mm
Tok : 150-300 A**

Slika 11 (Makro)

Vpliv jakosti toka za izoblikovanje prehodne cone pri navarjanju z elektrodo \varnothing 5 mm

Makroskopska ocena jasno kaže vpliv dovedene energije na izoblikovanje prehodne cone in se dajo rezultati dobro reproducirati. Pri uporabi elektrode \varnothing 3,25 mm in toku 190 A je oblika prehodne cone popolnoma enakovredna prehodni coni pri navarjanju z elektrodo \varnothing 5 mm in isti jakosti toka 190 A.

Vpliv dovedene energije na izoblikovanje prehodne cone je pa z ozirom na odvod toplote viden tudi iz naslednje makroskopske preiskave.

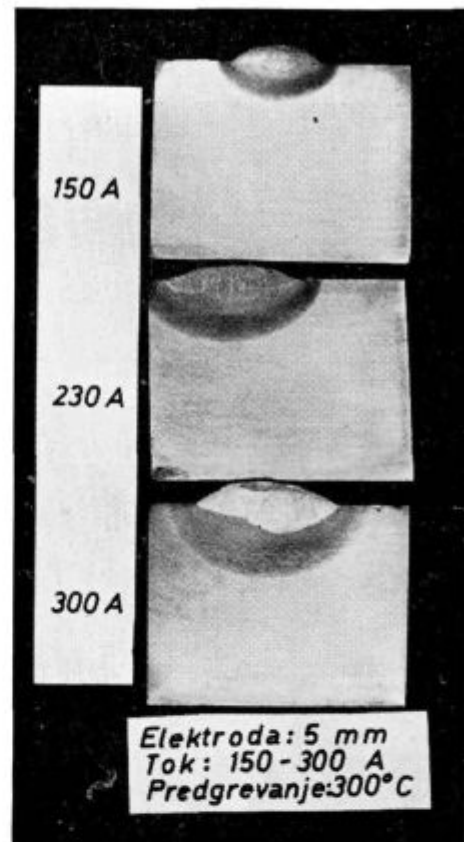
Pri debelini pločevine 30 mm (sl. 12) je opaziti brez predgrevanja materiala oster prehod zvara v osnovni material in je tudi pri višji jakosti toka opaziti v strukturi martenzit.

S predgrevanjem materiala na 300°C (sl. 13) se pri maksimalni dovedeni energiji 300 A šele zasledi zmeren prehod zvara v osnovni material brez martenzitne strukture.

Če preidemo iz makroskopske ocenitve prehodne cone na bolj natančne ocenitve prehodnih struktur z mikro trdoto, lahko vplive dovedene energije ocenimo bolj eksaktno.

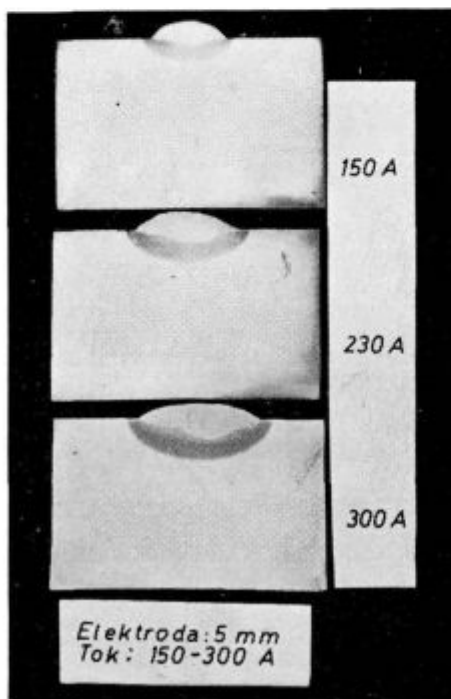
Vzemimo primer pločevine 10 mm; varjenje je bilo izvršeno pod optimalnimi pogoji z elektrodo \varnothing 3,25 in 5 mm. Kljub različni dovedeni energiji je razlika v trdotah minimalna. Vidimo lahko, da, neoziraje se na temperaturo predgrevanja, ni zaslediti bistvenih odstopanj v trdoti prehodnih con (sl. 14).

Iz tega sledi, da je odvod toplote pri tej debelini pločevine mnogo pod kritično hitrostjo ohla-



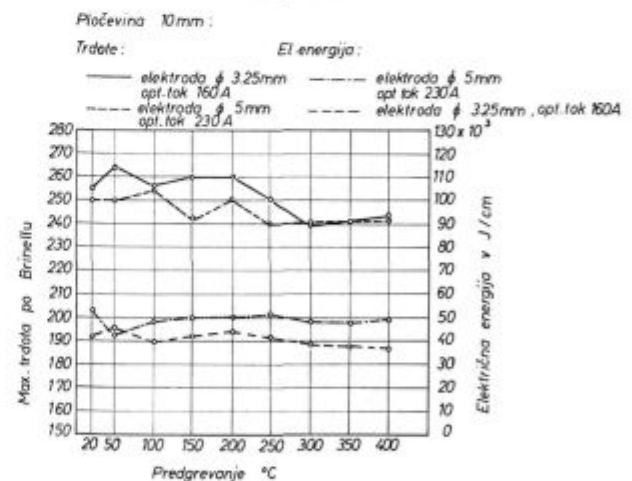
Slika 13 (Makro)

Vpliv predgrevanja materiala na izoblikovanje strukture v prehodni coni; elektroda \varnothing 5 mm, temperatura predgrevanja 300°C



Slika 12 (Makro)

Vpliv energije na izoblikovanje prehodne cone pri debelini 30 mm; navarjenje izvršeno brez predgrevanja

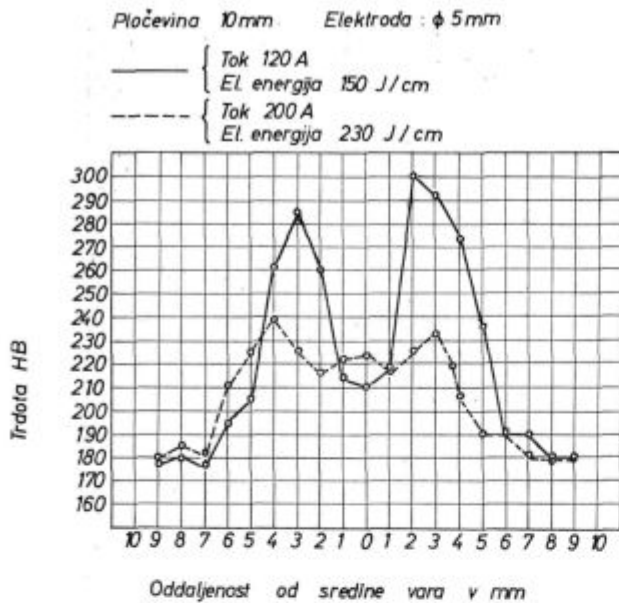


Slika 14

Vpliv dovedene energije na maksimalno doseženo trdoto v prehodni coni pri debelini pločevine 10 mm

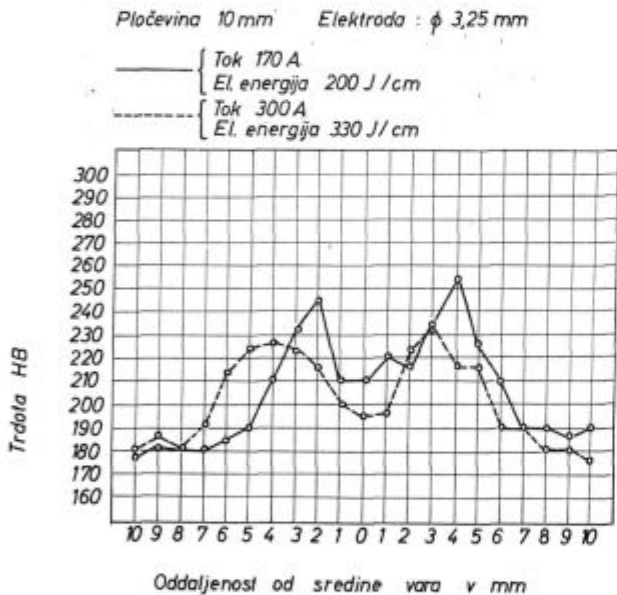
jevanja, ki naj bi vplivala na izoblikovanje martenzitne strukture.

Ti pogoji so bili torej ustvarjeni pri navarjanju z optimalno jakostjo toka. Vpliv dovedene energije in različnega premera elektrode na izoblikovanje trdote prehodnih con »V« zvara pri pločevini debeline 10 mm je pa razviden iz slike 15 za elektrodo \varnothing 5 mm in sl. 16 za elektrodo \varnothing 3,25 mm.



Slika 15

Diagram porazdelitve trdote v prehodni coni zvara v odvisnosti od premera elektrode in dovedene energije



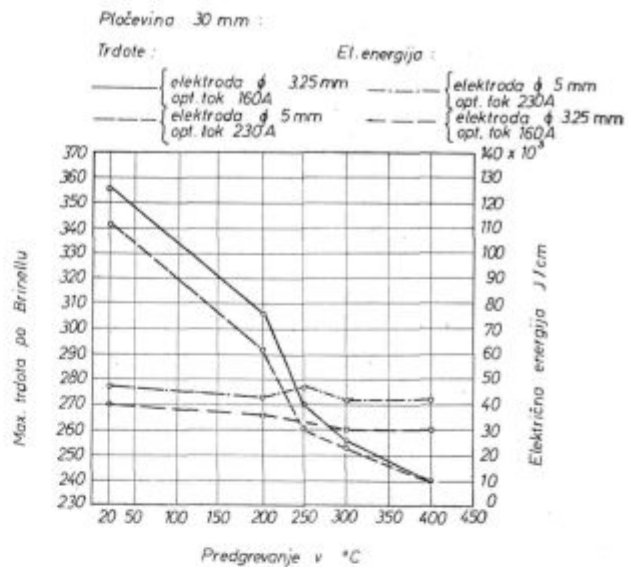
Slika 16

Diagram razporeditve trdote v prehodni coni zvara v odvisnosti od premera elektrode in dovedene energije

Tudi pri premeru elektrode ϕ 5 mm, vendar nizki dovedeni energiji 120 A, zasledimo v prehodnih conah že kritične vrednosti trdote ca. 300 HV.

Če torej govorimo o kritični hitrosti ohlajevanja, potem je razumljivo, da bo stanje pri pločevini debeline 30 mm popolnoma drugačno.

Pločevino smo navarili z elektrodo ϕ 3,25 in 5 mm z optimalnim tokom 160, oziroma 230 A. Že pri temperaturi pločevine 20° je opaziti vpliv dovedene energije. Trdota pri varjenju z elektrodo ϕ 3,25 mm je ca. 20 HV višja od trdote dosežene z navarjanjem pri elektrodi ϕ 5 mm (sl. 17). V vsakem primeru je pa trdota prehodne cone



Slika 17

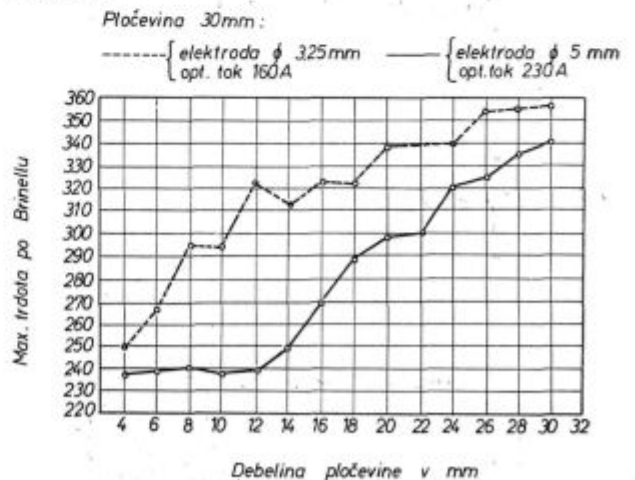
Vpliv sekundarno dovedene energije na maksimalno trdoto v prehodni coni zvara pri pločevini debeline 30 mm

večja, kot je dovoljeno in je v strukturi prehodne cone prisoten martenzit.

Z dodatno dovedeno energijo s predgrevanjem materiala maksimalna trdota prehodne cone pada in pri temperaturi materiala 200° C doseže maksimalno dovoljeno mejo 300 HV. Torej dosežemo šele pri temperaturi predgrevanja materiala na 250° C enako trdoto, kot smo jo ugotovili pri navarjanju 10 mm debele pločevine brez predgrevanja, to je 260 HV.

Kje je torej kritična debelina pločevine pri jeklu kvalitete Nioval 47, to je meja, pri kateri je potrebno pri varjenju pločevino predgreivati?

V ta namen smo poizkusili variti pločevino debeline 4 do 30 mm z elektrodo ϕ 3,25 mm in 5 mm z optimalno jakostjo toka 160, oziroma 230 A. Dobljeni rezultati so razvidni iz naslednje slike 18.



Slika 18

Potek maksimalne trdote prehodne cone zvara v odvisnosti od debeline pločevine in premera elektrode pri optimalnih pogojih varjenja

Preizkusi so jasno dokazali vplive premera elektrode in s tem dovedene energije. Rezultati tega diagrama potrjujejo že prikazane rezultate parcialnih preiskav.

Če upoštevamo, da je trdota 300 HV zgornja dovoljena trdota strukture v prehodni coni, potem lahko rečemo, da pri varjenju z elektrodo \varnothing 3,25 mm doseže osnovni material kritično trdoto pri debelini pločevine 16 mm. Pri uporabi elektrode \varnothing 5 mm in višje dovedene energije, se kritična debelina materiala zviša na ca. 26 mm.

Avtomatsko varjenje mikrolegiranih jekel s povišano mejo plastičnosti

Uvodoma sem že omenil, da mikrolegirana finožrnata jekla lahko varimo tudi avtomatsko pod praškom. V ilustraciji bo prikazal samo nekaj rezultatov.

Za varjenje finožrnatih jekel pod praškom smo razvili specialno žico na bazi Mo z oznako EPP 2 Mo, ki daje v kombinaciji s praškom EP 40 zelo dobre rezultate.

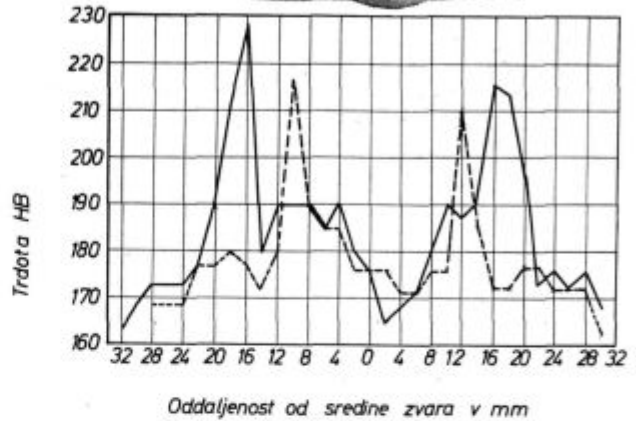
Slika 19 kaže primer fizikalnih lastnosti pri pločevini, debeline 15 mm v »V« zvaru.

Slika 20 kaže prav tako maksimalno dosežene trdote v prehodnih conah pri avtomatskem varjenju pločevine, debeline 30 mm in obliki zvara »V«.

Slika 21 pa kaže razporeditev trdot prehodnih con pri varjenju pločevine debeline 30 mm pri takoimenovanem »X« zvaru.

V vseh primerih ugotovimo, da doseže zavarjeni spoj zadovoljive fizikalne lastnosti, odgovar-

jajoče osnovnemu materialu Nioval 47. Tudi žilavost materiala, ki je pri avtomatskem varjenju kritična, doseže pri nizkih temperaturah zadovoljive vrednosti.

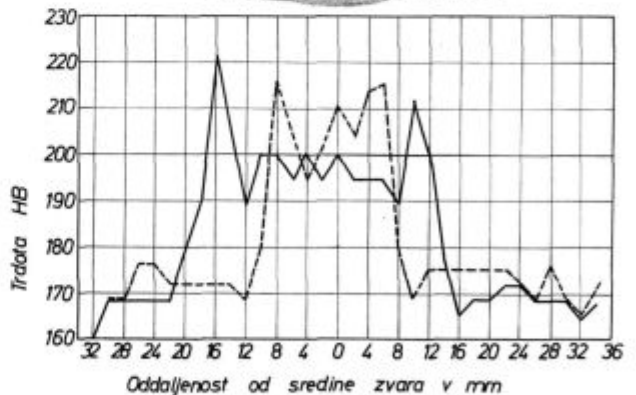
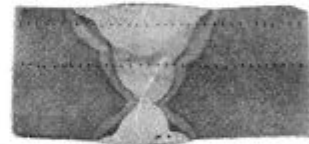


| | | | |
|-------------------------------------|------|-----|-------|
| Žilavost V_{Notch} pri mkp/cm^2 | 20°C | 0°C | -20°C |
| | 13,5 | 11 | 8,25 |

$G_s = 47,8 \text{ kp/mm}^2$ raztezek $5d = 21,5\%$
 $G_B = 63,9 \text{ kp/mm}^2$

Slika 20

Krivulje trdote zvara in prehodne cone pri jeklu Nioval 47, varjeno z žico EPP 2 Mo in praškom EP 40; debelina pločevine 30 mm, V zvar

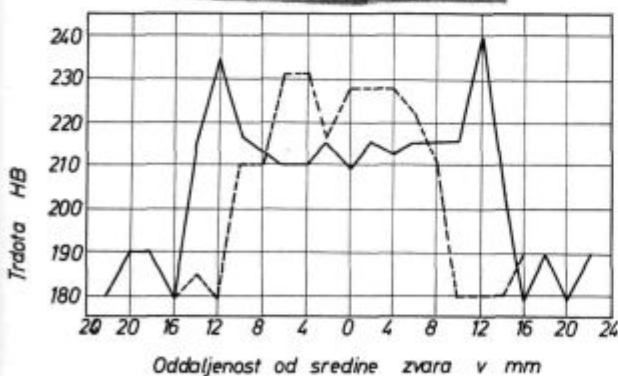


| | | | |
|-------------------------------------|------|-----|-------|
| Žilavost V_{Notch} pri mkp/cm^2 | 20°C | 0°C | -20°C |
| | 9 | 7 | 6,7 |

$G_s = 47,5 \text{ kp/mm}^2$ raztezek $5d = 22\%$
 $G_B = 63,6 \text{ kp/mm}^2$

Slika 21

Krivulje trdote zvara in prehodne cone pri jeklu Nioval 47, varjeno z žico EPP 2 Mo in praškom EP 40; debelina pločevine 30 mm, X zvar



| | | | |
|-------------------------------------|------|-----|-------|
| Žilavost V_{Notch} pri mkp/cm^2 | 20°C | 0°C | -20°C |
| | 11,7 | 10 | 9,1 |

$G_s = 47,6 \text{ kp/mm}^2$ raztezek $5d = 21\%$
 $G_B = 64,5 \text{ kp/mm}^2$

Slika 19

Krivulja trdote zvara in prehodne cone pri jeklu Nioval 47, varjeno z žico EPP 2 Mo in praškom EP 40; debelina pločevine 15 mm, V zvar

Z a k l j u č e k

Iz navedenih rezultatov preiskav je razvidno, da lahko z različnimi parametri pri varjenju bistveno vplivamo na fizikalne lastnosti zvara. Z dodatki legurnih elementov v mikrokoličinah le-ti vplivajo na zniževanje kritične hitrosti ohlajevanja jekla in povečujejo nevarnost za pojav martenzitne, oziroma kvazimartenzitne strukture v jeklu.

Pri varjenju jekla je torej potrebno izbrati take parametre varjenja, premer elektrode in jakost toka ter hitrost varjenja, oz. število navarjenih plasti, da so ti pogoji prilagojeni debelini pločevine. Pogoji morajo biti prilagojeni hitrosti ohlajevanja, ki mora biti pod kritično hitrostjo ohlajevanja jekla. Če teh pogojev ni mogoče ustvariti z energijo, dovedeno z dodatnim materialom, to je z elektrodo, potem je nujen dovod sekundarne energije s predgrevanjem materiala.

Če se na osnovi vseh zbranih rezultatov varilnih preizkusov in ugotavljanju vpliva dovedene energije na izoblikovanje prehodnih struktur povrnem na konkretni primer razpok pri varjenju visokotlačnih posod, potem lahko ugotovimo naslednje:

Jeklo je bilo normalno varljivo. Občasno nastopanje martenzitne strukture in razpok, ki so bile ugotovljene z rentgensko analizo, je posledica nepravilnega tehnološkega postopka varjenja. Na mestih razpok je varilec prižigal elektrodo, in to na popolnoma ohlajeni konstrukciji. Ker s samo dovedeno energijo tega mesta ni pregrel, oziroma je takoj nadaljeval z normalnim varjenjem, je prišlo na teh mestih do martenzitne strukture in opisanih razpok.

Ker ni bilo mogoče zagotoviti pravilnega tehnološkega postopka varjenja, smo nadaljnje varjenje konstrukcije izvršili s predgrevanjem, kar je zagotovilo kvalitetne spoje.

Rezultati preiskav so torej dokazali, da je mikrolegirano finoizrnatno jeklo dobro varljivo

z oplaščenimi elektrodami pod pogojem, da je zagotovljena konstantna tehnologija varjenja. Poudarili smo tudi že zahtevo, da mora pri izbiri dodatnega materiala in varilnih parametrov sodelovati varilni tehnolog, ki bo z ozirom na zahtevnost konstrukcije in razpoložljiv kader varilcev določil pravilno tehnologijo varjenja jekla.

Kakor se zahteva od metalurga večje znanje in pazljivost pri izdelavi in predelavi finoizrnatih mikrolegiranih jekel, tako so upravičene zahteve, da tudi konstrukterji, varilni tehnologi in varilci varijo taka jekla s posebnim poslušom za kvaliteto in z vso odgovornostjo.

Varljivost finoizrnatih mikrolegiranih jekel sem ocenjeval kot metalurg. Prepričan sem, da je pri vrednotenju in ocenjevanju varljivosti materiala potrebno upoštevati tudi varilno tehnološke možnosti. Brez dvoma bo pa sodelovanje metalurgov in varilnih tehnologov prispevalo k večji uporabi mikrolegiranih finoizrnatih jekel s povišano mejo plastičnosti tudi v naši kovinsko-predelovalni industriji.

L i t e r a t u r a

1. H. Wirts: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen I, II Band 44, DVSGMBH Düsseldorf 1966, 1968.
2. E. Bain: Alloying Elements in Steel. Metals Park, Ohio 1962.
3. E. Sudasch: Schweißtechnik, Carl Hauser Verlag München 1959.
4. Welding High Strength Steels, American Society for Metals 1970.
5. Mandry-Namdar-Wache: Precipitation de carbonitrides de Niobium dans les aciers de construction soudables. Revue de Metallurgie št. 8-9 1969.
6. L. Maöer - D. Schauwindhold: Einfluss von Niob auf die Eigenschaften unlegierter schweißbarer Baustähle. Stahl u. Eisen No 1, 1967.
7. M. Economopoulos - T. Greday: Recherches sur les aciers de construction soudables à haute résistance. C. N. R. M. No 1, 1961.
8. W. B. Morrison - J. H. Woodhead: The influence of small niobium additions on the mechanical properties of commercial mild steels. Journal of the Iron and Steel Institute No 1, 1963.

ZUSAMMENFASSUNG

Die mikrolegierten Elemente verursachen im Feinkornbaustahl das Vorkommen bainitischer und martensitischer Struktur in der Übergangszone der Schweißverbindung. Trotzdem, dass der Martensit mit niedrigem Kohlenstoffgehalt noch eine gewisse Kerbschlagzähigkeit besitzt, ist dessen Anwesenheit in hochbeanspruchten geschweißten Konstruktionen nicht erwünscht.

Die zulegierten Elemente Nb und V vermindern auch in Mikromengen die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit, welche beim Schweißen von der Wärmeableitung bzw. von der Blechdicke abhängig ist.

Durch die Untersuchungen über den Einfluss der einge-

tragenen primären und sekundären Wärmeenergie haben wir bewiesen, dass eine richtige Schweißtechnologie bei genügenden Wärmeeinträgen der primären Energie auch das Schweißen dicker Bleche ohne Vorwärmung ermöglicht. Dabei ist die Schweißgeschwindigkeit und den Elektrodendurchmesser der Blechdicke anzupassen.

Bei den Untersuchungen über den Einfluss der Wärmeeinträge war ein Maas für die Schweißbarkeit des Materials eine höchstzulässige Härte in der Schweißverbindung von 300 Einheiten nach Vickers, und eine geeignete Verteilung der Gefügebestandteile in der Übergangszone der Schweißverbindung.

SUMMARY

Added microalloying elements cause in fine grained steel phenomena of bainitic and martensitic structure in the transition zone of the weld. Though martensite with small carbon concentration has certain toughness its presence in highly loaded welded constructions is not wanted.

Added elements Nb and V even in micro amounts influence the reduction of the critical cooling rate of steel which is in welding controlled by heat transfer or plate thickness.

Influence of the supplied primary and secondary energy was investigated and results showed that correct technology of welding, i.e. sufficient primary supplied energy enables welding of the thickest sheet without material preheating. Welding rate and electrode diameter must be adjusted to the sheet thickness.

When influence of the supplied energy was investigated the standard for weldability of the material was then as maximal allowed hardness of 300 HV in the weld and corresponding distribution of structure components in the transitional weld zones.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причина появления бейнитной и мартензитной структуры в переходной зоне сварочного шва состоит в добавке микролегирующих элементов. Несмотря на то, что мартензит при низкой концентрации углерода имеет ещё определённую вязкость его наличие в высоко нагруженных сварочных конструкциях нежелательно.

Добавочные элементы Nb и V даже в микроколичествах влияют на уменьшения скорости охлаждения стали что зависит от отвода теплоты соответственно от толщины жести во время сварки.

Исследованием доказано, что при точном выполнении предназначенной технологии сварки т.е. при достаточной подаче первичной энергии можно сваривать и более толстую жести без подогрева. При этом необходимо быстроту сварки и диаметр электрода согласовать с толщиной жести. При этом исследованию влияния введённой энергии масштаб оценки свариваемости материала была ограничена на максимально 300 Hv и соответствующим распределением компонент в переходных зонах сварочного шва.