

# O vplivu mikrostrukture na vlečno sposobnost maloogljivega jekla

DK: 669.14.018.29  
ASM/SLA: W29h, F28

**Franc Vodopivec,**  
**Metalurški inštitut, Ljubljana**  
**A. Mežnar, A. Kelvišar, Železarna Jesenice**

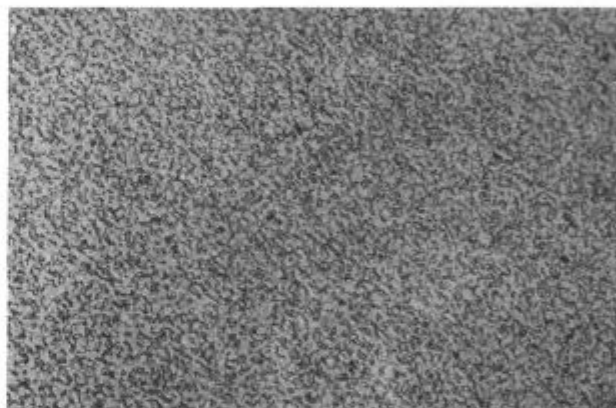
Pripravljena je bila žica iz iste šarže maloogljivega jekla z debelino 6,25 mm z mikrostrukuro ferit-martenzit, ferit-lamelarni perlit in ferit-zrnati perlit ter vlečena na enostopenjskem vlečnem stroju s poprečno redukcijo 16 %. Žica z mikrostrukuro ferit-martenzit ima slabo preoblikovalnost, ker martenzita zrna težko sodelujejo v procesu deformacije pri prehodu skozi votlico. Zato nastajajo med martenzitom in feritom mikrorazpoke. Ko gostota teh razpok doseže določeno vrednost, se žica pretrga, ne da bi na njej bili opazni mikroskopski znaki prevlečenosti.

Vlečenje ostalih dveh vzorcev je bilo prekinjeno pri debelini 0,65 mm pri skupni deformaciji 98,9 %. Preiskave hladno deformirane žice te debeline so pokazale, da ima večjo preoblikovalno sposobnost mikrostrukura iz ferita in lamelarne perlita, kot mikrostrukura iz ferita in zrnatega perlita. Ta razlika bi bila lahko posledica podobnega učinka drobnih neplastičnih cementitnih zrn na preoblikovalno sposobnost jekla, kot ga imajo pri večji debelini žice neplastična martenzita zrna.

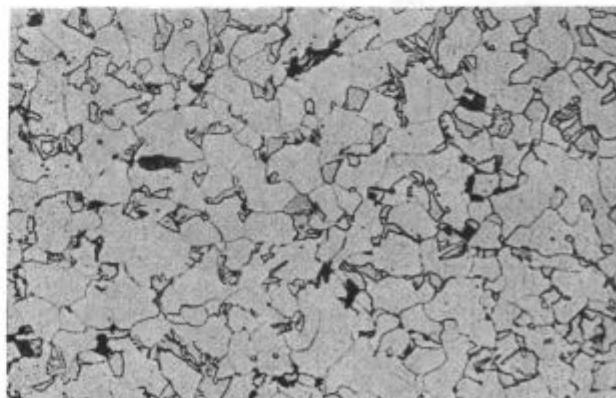
Pri raziskavah predelavnosti jekla z vlečenjem, ki so bile izvršene pred nekaj časa, smo se našli pred vprašanjem, katera mikrostrukura daje maloogljivemu jeklu največjo sposobnost za predelavo z vlečenjem skozi votlice ali, če zastavimo problem s tehnološkega stališča, kakšna naj bo izhodna mikrostrukura žice pred vlečenjem, da bo mogoča čimvečja redukcija brez vmesnega rekristalizacijskega žarjenja. Neposrednega odgovora na to vprašanje nismo mogli najti v literaturi, pa tudi ni bilo mogoče dati utemeljenega odgovora na osnovi tehnoloških izkušenj. Gotovo pa je, da pomenu tega vprašanja s tehnološkega vidika ni mogoče oporekati.

S primerno toplotno obdelavo smo pripravili jeklo iste šarže z izhodno mikrostrukuro iz ferita, martenzita in malo lamelarne perlita (sl. 1 in 2), iz ferita in lamelarne perlita (sl. 3 in 4) ter iz ferita in globularnega perlita (sl. 5 in 6). V nadaljevanju teksta označujemo vzorce v naštem vrstnem redu kot vzorce A, B in C. Izhodna debelina žice je bila 6,25 mm. Kolobarji so bili normalno luženi v železarni Jesenice ter po luženju poapnjeni. Vlečenje so opravili na enostopenjskem vlečnem stroju s povprečno redukcijo 16 %, ki ustreza redukciji na sodobnih večstopenjskih vlečnih strojih. V tabeli 1 so podatki o mehanskih lastnostih izhodne žice. Vidimo, da ima žica C manjšo trdnost in večjo plastičnost kot žica B, oba vzorca pa znatno manjšo trdnost in večjo plastičnost kot vzorec A.

V tabeli 2 so podatki o trdnosti žic pri nekaterih vmesnih debelinah ter ustrezni indeksi utrditve, ki smo ga definirali kot razmerje med trdnostjo žice pri določeni debelini in začetno trdnostjo. Na sliki 7 vidimo, kako rastejo indeksi utrditve s stopnjo skupne deformacije nad 80 %



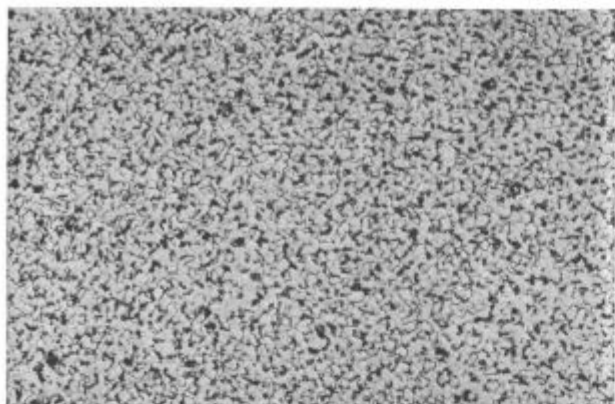
Sl. 1



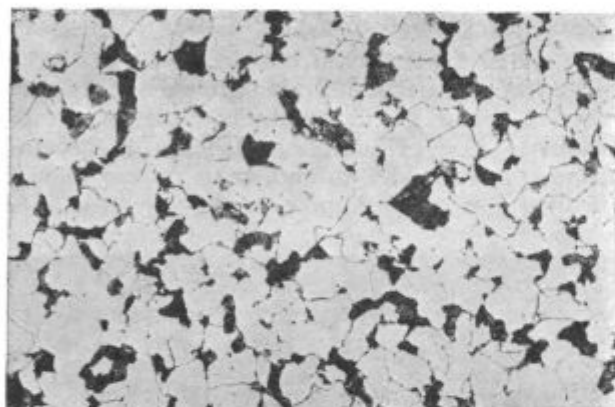
Sl. 2

Slika 1 in 2, pov. 100 in 500.  
Mikrostrukura iz ferita in martenzita.

Fig. 1 and 2  
Magnifications 100 × and 500 ×. Microstructure of ferrite  
martensite.



Sl. 3



Sl. 4

Slika 3 in 4, pov. 100 in 500.  
Mikrostruktura iz ferita in lamelnega perlita.

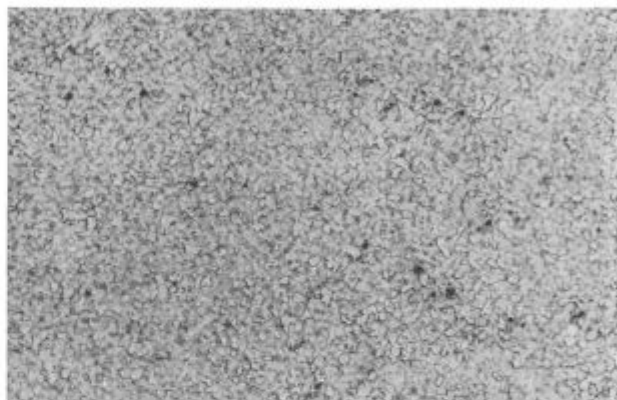
Fig. 3 and 4  
Magnifications 100 × and 500 ×. Microstructure of ferrite and lamellar pearlite.

do prekinitve vlečenja pri vzorcih B in C, oz. do debeline, ko je postalo vlečenje vzorca A praktično nemogoče zaradi neprestanega trganja.

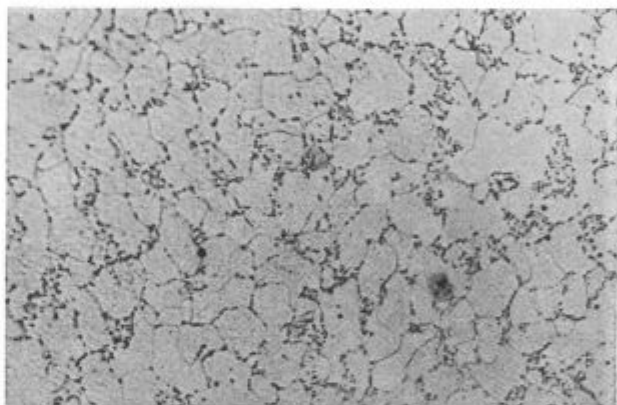
Rezultati v tabeli 2 in na sliki 7 kažejo, da je indeks utrditve sistematično večji pri vzorcu B kot pri vzorcu C. Tega pa ni mogoče razumeti tako, da ima vzorec C večjo preoblikovalnost z vlečenjem, saj je bilo na primer potrebno že pri debelini 1,92 prekiniti z vlečenjem vzorca A, če-

prav je pri njem indeks utrditve relativno najmanjši. Zanimivo je, da raste indeks utrditve pri vseh treh vzorcih paralelno s stopnjo skupne deformacije. Utrditev zaradi hladne deformacije je torej odvisna predvsem od materiala ne pa od njegove mikrostrukture. Potrebno pa je vedno upoštevati, da so bile začetne trdnosti vzorcev različne, zato so tudi različne realne trdnosti po enakih stopnjah skupne deformacije.

Vlečenje vzorcev B in C smo prekinili pri debelini 0,65 mm; ne zato, ker ju ni bilo mogoče



Sl. 5



Sl. 6

Slika 5 in 6, pov. 100 in 500.  
Mikrostruktura iz ferita in zrnatega perlita.

Fig. 5 and 6  
Magnifications 100 × and 500 ×. Microstructure of ferrite and spheroidal pearlite.

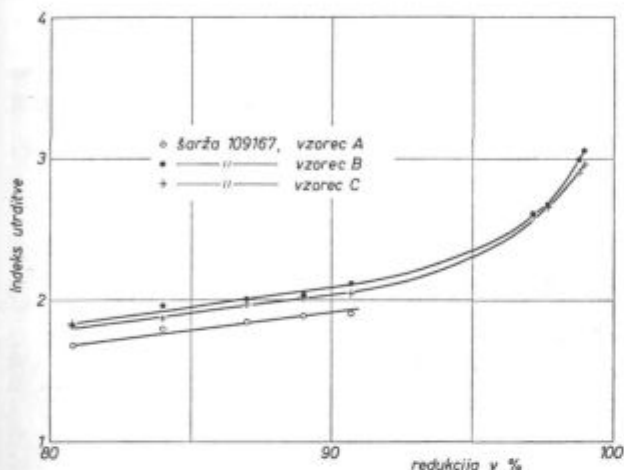
Tabela 1 — Mehanske lastnosti žice pred vlečenjem

| Vzorec | Debelina<br>mm | Trdnost<br>kp/mm <sup>2</sup> | Raztezek<br>% | Kontrakcija<br>% | Mikrostruktura                             |
|--------|----------------|-------------------------------|---------------|------------------|--------------------------------------------|
| A      | 6,25           | 69,4                          | 17,3          | 54,0             | Ferit, martenzit in malo lamelnega perlita |
|        |                | 66,3                          | 15,3          | 56,5             |                                            |
| B      | 6,25           | 56,1                          | 21,7          | 75,0             | Ferit in lamelni perlit                    |
|        |                | 58,7                          | 20,0          | 73,0             |                                            |
| C      | 6,25           | 53,6                          | 26,7          | 77,0             | Ferit in zrnati perlit                     |
|        |                | 53,2                          | 23,0          | 75,0             |                                            |

Tabela 2 — Trdnost in indeks utrditve pri različnih debelinah

|                                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Debelina mm                         | 2,74  | 2,50  | 2,25  | 2,06  | 1,92  | 150   | 0,95  | 0,69  | 0,65  |
| Redukcija %                         | 80,8  | 84,0  | 87,1  | 89,2  | 90,7  | 97,2  | 97,7  | 98,8  | 98,9  |
| Vzorec A Trdnost kp/mm <sup>2</sup> | 114,0 | 122,0 | 125,6 | 128,7 | 129,4 | —     | —     | —     | —     |
| Indeks I                            | 1,68  | 1,79  | 1,85  | 1,89  | 1,91  | —     | —     | —     | —     |
| Vzorec B Trdnost kp/mm <sup>2</sup> | 105,0 | 112,4 | 115,6 | 116,8 | 122,4 | 150,2 | 155,0 | 172,5 | 176,5 |
| Indeks I                            | 1,83  | 1,96  | 2,01  | 2,03  | 2,12  | 2,61  | 2,69  | 3,0   | 3,07  |
| Vzorec C Trdnost kp/mm <sup>2</sup> | 97,4  | 99,9  | 105,5 | 107,6 | 109,5 | 138,5 | 142,5 | 155,0 | 158,5 |
| Indeks I                            | 1,83  | 1,87  | 1,97  | 2,02  | 2,05  | 2,60  | 2,67  | 2,91  | 2,97  |

I — indeks utrditve, razmerje med trdnostjo pri določeni debelini in trdnostjo pred vlečenjem



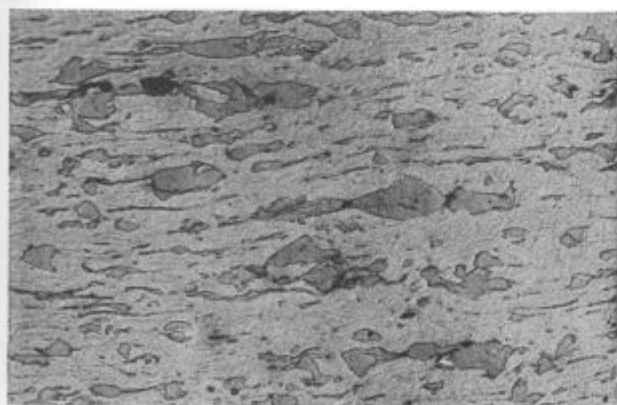
Slika 7

Ovisnost med stopnjo skupne deformacije in indeksom utrditve za žice z različno mikrostrukturo.

Fig. 7

Relationship between the degree of total deformation and the index of hardening for wires of various microstructures.

vleči še naprej brez rekristalizacijskega žarjenja, ampak predvsem zato, ker smo menili ali domnevali, da bi se morale pri doseženi stopnji skupne



Slika 8, pov. 500.

Videz martenzitivnih zrn pri redukciji 89,1 %. Mikrorazpoka v martenzitivnih zrnih ter med temi zrnji in feritom.

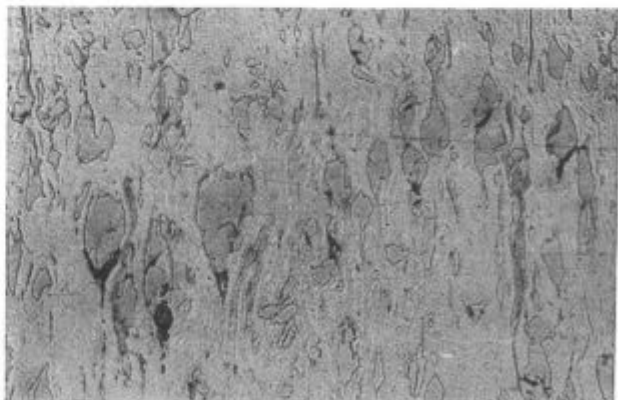
Fig. 8

Magnification 500 ×. Appearance of martensite grains after 89.1 % reduction. Microcrack in martensite grains and between those grains in the ferrite.

deformacije 98,9 % že pokazati med njima razlike, ki bi bile lahko tehnološko pomembne. Pač pa smo na obeh vzorcih izvršili še preizkus prepogiba. Vzorec B je pri tem zdržal 29 prepogibov, vzorec C pa le 11 prepogibov. To pove, da bi bilo mogoče oba vzorca vleči še naprej in da je po deformaciji 98,9 % vzorec B (mikrostrukture iz



Sl. 9



Sl. 10

Slika 9 in 10, pov. 500.

Približno isto mesto na belem in jedkanem obrusku. Puščičaste razpoke med martenzitivnimi zrnji in feritom. Redukcija 89,1 %.

Fig. 9 and 10

Magnification 500 ×. Approximately the same area on the unetched and etched specimen. Arrowlike cracks between martensite grains and ferrite. Reduction 89.1 %.

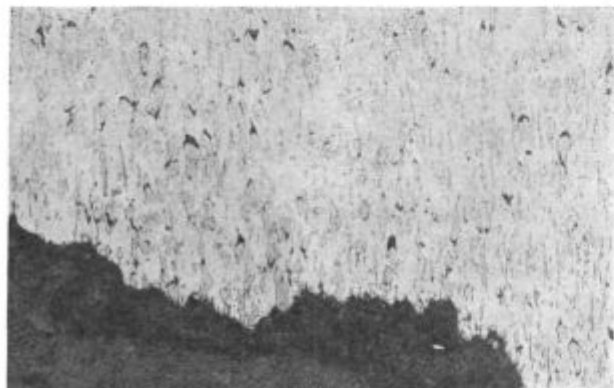
ferita in lamelnariga perlita) bolj plastičen od vzorca C (mikrostruktura iz ferita in globularnega perlita). Zaradi popolnosti omenjamo, da ima po rekristalizacijskem žarjenju navadno jeklo mikrostrukturo tipa C.

Poglejmo, kako se deformirajo posamezne komponente mikrostrukture in kako vplivajo na trganje žice pri vlečenju!

Zaradi hladne deformacije se martenzitna zrna nekoliko uredijo v nize, paralelne s smerjo vlečenja. Robovi zrn se malo zaobljijo. Pri nadaljevanju vlečenja se večja zrna lahko prelomijo (sl. 8), med njimi in feritom pa se odprejo puščiaste razpoke. Te nastanejo na sprednji strani martenzitnih zrn, ko gledamo v smeri toka materiala skozi votlico (sl. 9 in 10). To pomeni, da martenzitno zrno težko sodeluje v kompleksni deformaciji, ki je potrebna, da bi se zmanjšala debelina žice na poti skozi votlico, ter da je trdnost vezi med martenzitnim zrnom in feritom manjša od sile, ki je potrebna, da bi se mikrostruktura uredila tako, kot zahteva proces deformacije. Ko gostota mikrorazpok med feritom in martenzitom dovolj zraste, se žica utrga. Mikrostruktura ob pretrganem mestu je torej drugačna, kot v prevlečeni žici, pa tudi na površini žice ni na pretrganem mestu makroskopskih znakov prevlečenja.

V jeklu s strukturo iz ferita in lamelnariga perlita (vzorec B) so se perlitna zrna preoblikovala najprej v kratke pasove (sl. 12 in 13), pri povečani stopnji deformacije pa so se razvila v nitaste tvorbe (sl. 14 in 15), tako da je mikrostruktura dobila videz mikrostrukture nitastega kompozita.

Do podobne preureditve mikrostrukture je prišlo v žici z izhodno mikrostrukturo C iz ferita in globularnega perlita (sl. 16 do 19). Zanimivo je bilo ponašanje nekovinskih vključkov med vlečenjem. Ob večjih vključkih, ki so bili pretrdi, da bi se med vlečenjem zdrobili, so se razvile razpo-



Slika 11, pov. 200.  
Mikrorazpoke med martenzitnimi zrn in feritom v bližini mesta, kjer se je žica pri vlečenju pretrgala. Redukcija 90,7 %.

Fig. 11  
Magnification 200  $\times$ . Microcracks between martensite grains and ferrite close to the breakage area of the drawn wire. Reduction 90.7 %.



Sl. 12

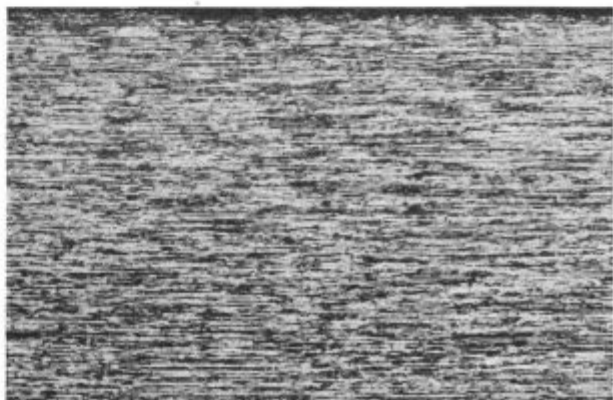


Sl. 13

Slika 12 in 13, pov. 100 in 500.  
Mikrostruktura žice B pri redukciji 89,1 %.

Fig. 12 and 13  
Magnifications 100  $\times$  and 500  $\times$ . Microstructure of wire B at 89.1 % reduction.

ke, ki so se pri vlečenju razpotegnile v osi žice (sl. 20 in 21). Krhki vključki z manjšo trdnostjo so se pri vlečenju zdrobili v vzdolžne nize, ne da bi pri tem nastale vidne razpoke. To pove, da so nekovinski vključki za preoblikovalnost škodljivi le, če jih je anormalno veliko in so toliko trdi, da se pri vlečenju ne zdrobijo ali deformirajo.



Sl. 14

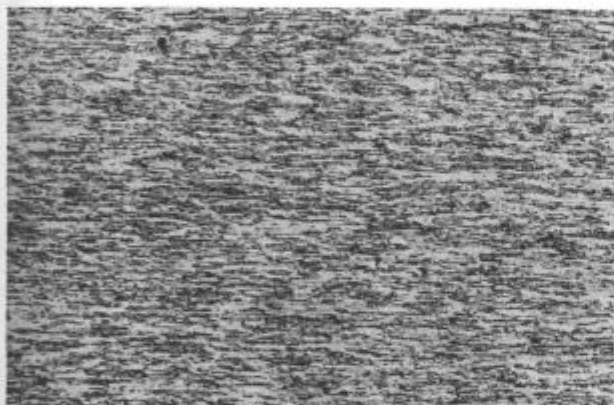


Sl. 15

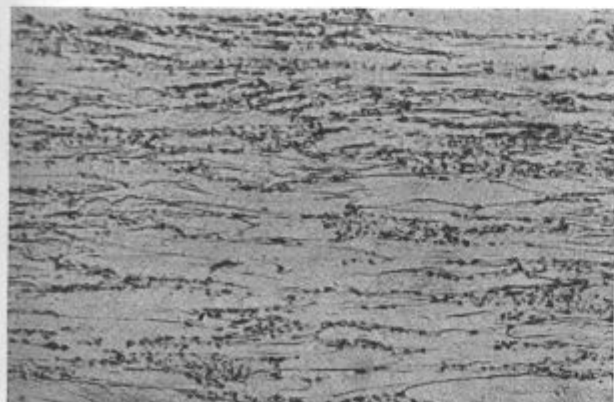
Slika 14 in 15, pov. 100 in 500.

**Mikrostruktura žice B pri redukciji 98,9 %.**

Fig. 14 and 15

**Magnifications 100  $\times$  and 500  $\times$ . Microstructure of wire B at 98.9 % reduction.**

Sl. 16



Sl. 17

Slika 16 in 17, pov. 100 in 500.

**Mikrostruktura žice C pri redukciji 89,1 %.**

Fig. 16 and 17

**Magnifications 100  $\times$  and 500  $\times$ . Microstructure of wire C at 89.1 % reduction.**

Zanimivo je bilo ponašanje pri prepogibu žic tipov B in C pri debelini 0,65 mm, to je po koncu vlečenja. Žica tipa B se je dala upogniti do dotika krakov okoli trna s premerom debeline žice, žica tipa C pa ne. V mikroskopu smo videli, da žica tipa C ne prenese deformacije, zato ker se na natezni strani odpre razpoka, ki žico trenutno razdeli (sl. 22). V žici B se zaradi deformacije na tlačni strani razpotegnjena zrna preuredijo v manj nitasto obliko. To se ne dogodi v ravnini, v kateri leži os deformacije, marveč simetralno na obeh straneh te ravnine (sl. 23 in 24), na natezni strani pa se deformirana zrna še bolj podaljšajo.

Mislamo, da smemo na osnovi opisanih rezultatov trditi, da ima v absolutnem smislu in pri preiskanem jeklu mikrostruktura iz ferita in lamelnega perlita večjo plastičnost z vlečenjem skozi votlice kot mikrostruktura iz ferita in globularnega perlita. Dela nismo nadaljevali, čeprav nas je zanimalo tolmačenje razlike v plastičnosti med mikrostrukturo niti B in C. Po analogiji z mikrostrukturo ferit-martenzit sklepamo, da imajo lahko tudi zrna cementita v globularnem



Sl. 18



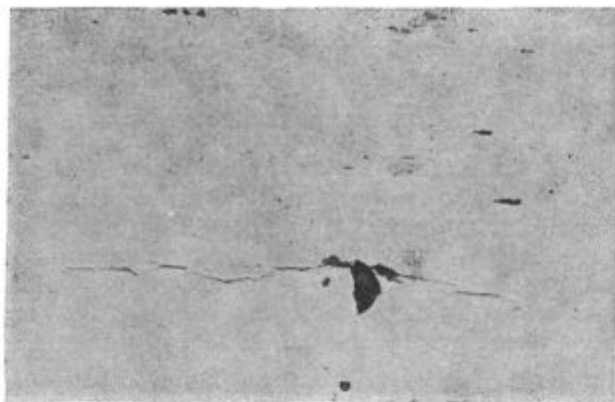
Sl. 19

Slika 18 in 19, pov. 100 in 500.

**Mikrostruktura žice C pri redukciji 98,9 %.**

Fig. 18 and 19

**Magnifications 100  $\times$  and 500  $\times$ . Microstructure of wire C at 98.9 % reduction.**



Sl. 20



Sl. 21

Slika 20 in 21, pov. 200  $\times$  bel in jedkan obrusek, isto mesto, vzorec B.

**Aksialna razpoka ob trdnem nekovinskem vključku.**

Fig. 20 and 21

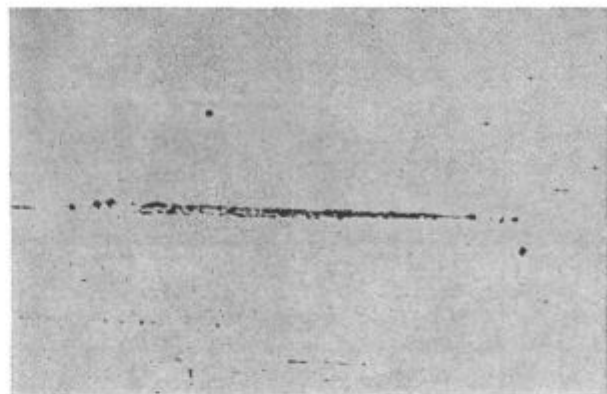
Magnification 200  $\times$ . Unetched and etched specimen, the same area, sample B. Axial crack at a hard non-metallic inclusion.

perlitu podobno vlogo kot martenzitna zrna, le da se njihov učinek pokaže šele pri večji stopnji deformacije ali manjši debelini, zato ker so manjša. Torej bi lahko prihajalo do nukleacije mikrorazpok na mejni površini ferit-cementitno zrno in do preloma zaradi razširjenja teh razpok skozi žico. Možno je, da ima določen pomen pri tem procesu tudi debelina feritne obloge okoli cementitnih zrn.

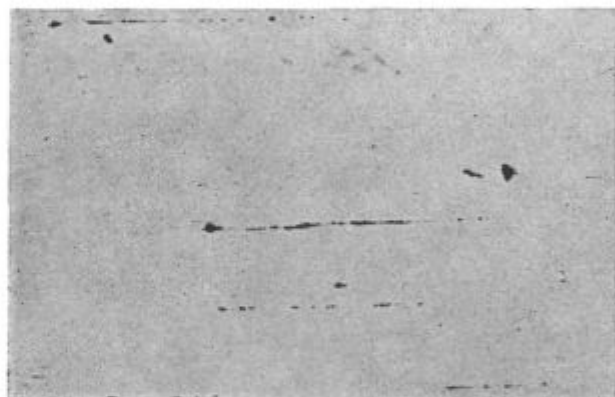
Domnevamo, da je mikrostruktura s finim lamelarnim perlitom bolj plastična pri visoki stopnji skupne deformacije zato, ker se tanke cementitne lamele lažje orientirajo tako, kot deformacija zahteva, ali pa zato, ker so razpoke, ki nastajajo med njimi in feritom, premajhne, da bi se lahko pri nadaljevanju deformacije hitro širile skozi preostalo kovino. Upamo, da bodo v bodočnosti na voljo sredstva za raziskavo s ciljem, da bi našli utemeljen odgovor na to vprašanje, ki tehnološko morda ni zanimivo, pač pa je gotovo zanimivo za razumevanje mehanizma preoblikovanja jekel pri vlečenju in spoznavanja preoblikovalnih lastnosti različnih mikrostruktur.

## SKLEP

Izvršili smo primerjalno preiskavo preoblikovalnosti z vlečenjem istega jekla, ki je imelo v začetnem izhodnem stanju mikrostrukture ferit-



Sl. 22

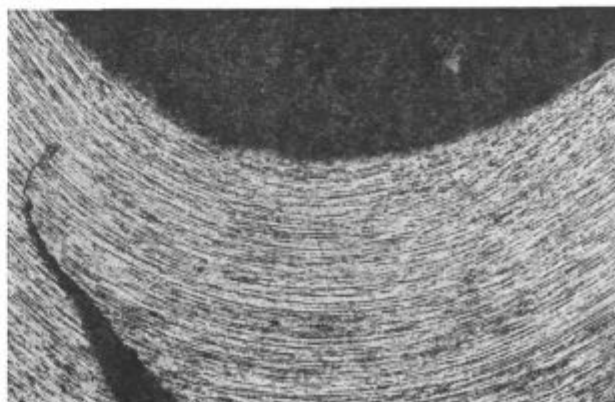


Sl. 23

Slika 22 in 23, pov. 200  $\times$ , vzorec B. Nekovinski vključki po redukciji 98,9 %.

Fig. 22 and 23

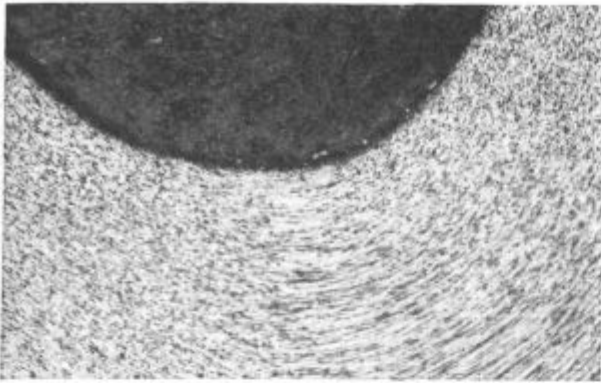
Magnification 200  $\times$ . Sample B. Non-metallic inclusions after 98.9 % reduction.



Slika 24, pov. 100, vzorec C. Razpoka nastala pri upogibu.

Fig. 24

Magnification 100  $\times$ . Sample C. Crack appeared after bending.



Slika 25, pov. 100, vzorec B.  
Mikrostruktura na tlačni strani upognjene žice.

Fig. 25

Magnification 100  $\times$ . Sample B. Microstructure on the compressed side of the bended wire.



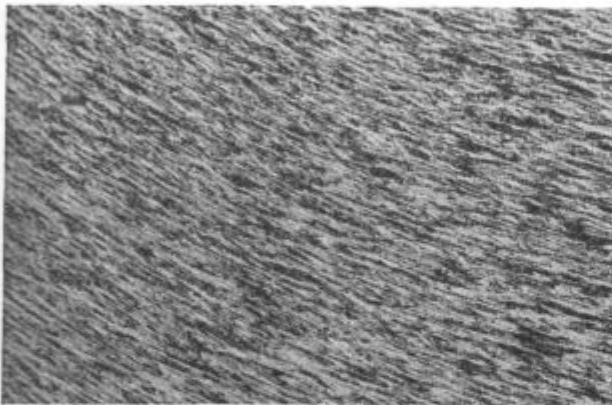
Sl. 27

Slika 26 in 27, pov. 500, vzorec B.

Zaradi upogiba spremenjena oblika, kristalnih zrn na tlačni in na natezni stranji žice (primerjati s posnetkom na sl. 15).

Fig. 26 and 27

Magnification 500  $\times$ . Sample B. Distorted form of crystal grains on the compressed and the tensile side of the bended wire (compare with Fig. 15).



Sl. 26

martenzit, ferit-fini lamelarni perlit in ferit-zrnati perlit. Ugotovili smo, da ima jeklo s feritno-martenzitno mikrostrukturo razmeroma slabo preoblikovalnost. Vzrok tega so trdna martenzitna zrna, ki se praktično ne deformirajo pri redukciji preseka žice. Zato se med feritom in martenzitnimi zrnji odpirajo razpoke, zaradi katerih se žica utrga pri nadaljevanju vlečenja. Druga dva vzorca žice sta prenesla brez vmesnega žarjenja deformacijo 98,9 %, to je redukcijo od debeline 6,25 mm na

debelino 0,65 mm. Pri tej debelini smo vlečenje prekinili, ker smo domnevali, da s tehnološkega stališča nadaljevanje vlečenja ni več zanimivo. Preiskusi in preiskave žice, vlečene na debelino 0,65 mm, pa so pokazali, da ima žica z mikrostrukturo iz ferita in lamelnega perlita pri tej debelini boljšo plastičnost od žice z mikrostrukturo iz ferita in zrnatega perlita. Nismo izvršili nobenih preizkusov, da bi to razliko pojasnili, po analogiji z žico z mikrostrukturo iz ferita in martenzita domnevamo, da je mehanizem učinka cementitnih zrn podoben kot učinek martenzitnih zrn, ker pa so cementitna zrna mnogo manjša, se njihov vpliv pokaže šele pri večjih redukcijah, ko je debelina žice manjša in tanjši sloj ferita, ki obdaja cementitna zrna.

Rezultati teh poizkusov kažejo, da mehanske lastnosti pri maloogljčnih jeklih, predvsem razteznost, pa tudi trdnost, ne dajejo prave podobe o preoblikovalni sposobnosti jekla z vlečenjem. Žica B je pokazala večjo plastičnost, kljub temu da je ob začetku vlečenja imela manjšo plastičnost in večjo trdnost kot žica C.

## ZUSAMMENFASSUNG

Für die Versuche der Ziehbarkeit ist aus einer Schmelze eines niedriggekohnten Stahles Walzdraht mit 6,25 mm Durchmesser und verschiedenartigem Gefüge vorbereitet worden. Das Gefüge war einmal Ferrit-Martensit, Ferrit-lamelaler Perlit und Ferrit-körniger Perlit. Der Draht ist auf einer einstufigen Ziehmaschine mit einer durchschnittlichen Querschnittsabnahme von 16 % gezogen worden. Der Draht mit einem ferritisch-martensitischen Gefüge besitzt eine schlechte Verformbarkeit, weil martensitische Körner bei der Verformung, beim Durchgang durch die Ziehöse, nur schwer mitwirken. Deswegen entstehen Mikrorisse zwischen dem Martensit und Ferrit. Wenn die Dichte dieser Risse einen bestimmten Wert

erreicht, zerreiht der Draht, ohne dass sich am Gefüge Zeichen der Überzogenheit gezeigt hätten.

Das Ziehen anderer zwei Prüflinge ist bei einem Durchmesser von 0,65 mm und einer Verformung von 98,9 % unterbrochen worden. Untersuchungen dieses kaltverformten Drahtes zeigten, dass das Gefüge, bestehend aus Ferrit und lamelarem Perlit, eine grössere Verformbarkeit besitzt, als das Gefüge aus Ferrit und körnigem Perlit. Dieser Unterschied in der Verformbarkeit des Stahles kann als Folge einer ähnlichen Wirkung der winzigen unplastischen Zementitkörner angesehen werden, welche bei der grösseren Dicken die nichtplastischen Martensitkörner verursachen.

## SUMMARY

Wires of the same batch of low carbon steel, 6.25 mm thick, with microstructures ferrite-martensite, ferrite-lamellar pearlite, and ferrite-spheroidal pearlite were prepared. They were drawn on a single-step drawing machine with an average reduction of 16 %. Wire with ferrite-martensite microstructure has a bad workability because martensite grains hardly cooperate in the process of deformation during passing through the die. Therefore microcracks appear between the martensite and ferrite. When density of these cracks reaches a certain value the wire breaks without microscopic marks of overdrawing were observed.

Drawing of the other two samples was interrupted at the thickness 0.65 mm and at the total deformation of 98.9 %. Investigations of cold worked wire of this thickness showed that ferrite-lamellar pearlite microstructure has a greater workability than the ferrite-spheroidal pearlite microstructure. This difference can be caused by similar influence of fine unplastic cementite grains on the steel workability as it was the case with unplastic martensite grains at the greater wire thicknesses.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из одной и той же самой шаржи низкоуглеродистой стали приготовлена проволока в толщине 6,25 мм. Её микроструктура: ферритно-мартенситная, ферритно-ламеллярно-перлитная и ферритно-зернисто-перлитная. Проволока подвергнута волочению на одноступенчатом волочильном устройстве с средней редукцией 16 %. Проволока ферритно-мартенситной структуры имеет плохую податливость, так как зёрна мартенсита весьма мало участвуют в процессе деформации при проходе через протяжную матрицу. Поэтому между мартенситом и ферритом образуются микротрещины. Как только густота этих трещин достигнут определённую величину, проволока разрывается, несмотря на то, что на ней не обнаружены микроскопические знаки перетяжки.

Волочение последующих двух образцов было прервано при толщине 0.65 мм при совокупной деформации 98.9 %. Исследование холодно деформированной проволоки этой толщины показало, что более хорошую податливость имеет микроструктура состоящая из феррита и ламеллярного графита в сравнении с структурой из феррита и зернистого перлита, которая более слабой податливости. Возможно, что эта разница последствие подобного эффекта при мелких непластических зёрнах цементита на способность к деформации стали в сравнении с более крупными непластичными зёрнами мартенсита.