

Vpliv antimona in ogljika na fizikalne lastnosti jekla pri statičnih in dinamičnih preizkusih

Kvaliteta izdelanega jekla postaja vedno bolj problematična zaradi nenehnega naraščanja nezaželenih oligoelementov v jeklu. Poleg koncentracij bakra, kroma in kositra stalno narašča v jeklu tudi koncentracija antimona. Vpliv antimona na fizikalne lastnosti jekla ni poznan. V članku so nanizani rezultati tozadavnega raziskovalnega dela v železarni Jesenice.

Železarna Jesenice ima kot kvalitetna železarna širok proizvodni program od konstrukcijskih jekel z garantirano žilavostjo tudi pri nizkih temperaturah, do elektro pločevin in visoko legiranih kromnikljevih jekel. Zahteve na kvaliteto jekla in s tem na fizikalne lastnosti, z napredkom tehnike nenehno naraščajo.

Proizvodnja visoko kvalitetnih jekel z določenimi fizikalnimi lastnostmi pa je mogoča le, kolikor lahko jeklar vodi proces izdelave jekla po vnaprej predvidenem programu. Pri tem odločilno vplivajo na lastnosti jekla tudi prisotni nezaželeni oligoelementi kot As, Sb, Sn, Cu in Cr, ki pridejo v jeklo v glavnem iz nekvalitetnega vložka, to je starega železa.

Metalurški inštitut v Ljubljani¹ redno spremlja prisotnost oligoelementov v jeklih železarne Jesenice, kakor tudi ostalih jugoslovanskih železarn. Iz teh podatkov je razvidno, da dosega koncentracija oligoelementov v jeklu že relativno visoke vrednosti in sicer:

0,28 % Cu
0,23 % Cr
0,061 % As
0,048 % Sb
0,11 % As + Sb
0,047 % Sn

To so sicer povprečne vrednosti ugotovljenih oligoelementov v jeklu. Pri elektro jeklu, kjer je delež starega železa v vložku največji pa zasledimo od šarže do šarže tudi višje vrednosti teh elementov v jeklu.

Iz poročil Metalurškega inštituta lahko ugotovimo nenehno naraščanje omenjenih elementov v jeklu, kar zastavlja metalurgom resno vprašanje: kakšna koncentracija omenjenih oligoelementov v jeklu je še dopustna, da se bistveno ne poslabšajo fizikalne lastnosti izdelanega jekla?

Vpliv Cu in Cr v jeklu je že precej raziskan, čeprav vsa vprašanja o vplivu teh elementov na varljivost jekla še niso povsem razjasnjena.

Smatramo, da predstavljajo posebno poglavje v fiziki kovin vplivi elementov As, Sb in Sn, katerim do nedavnega v metalurgiji niso posvečali večje pozornosti.

Škodljiv vpliv kositra v kotlovski pločevini je dokazal M. Gabrovšek². Obsežne preiskave vpliva kositra v jeklih odpornih na staranje in sam mehanizem škodljivega vpliva kositra v jeklu so dokazali M. Gabrovšek, J. Philibert, C. Crussard³. Preiskave so bile izvršene na IRSID St. Germain en Laye.

Vpliv antimona v jeklu je za metalurga še vedno neznanka in bo zaradi naraščajoče vsebine tega elementa v jeklu, potrebno vplivu Sb na fizikalne lastnosti jekla posvetiti še dosti raziskovalnega dela.

G. W. Austin, A. R. Entswisle in G. C. Smith⁴ so dokazali vpliv Sb na napuščno krhkost krom in kromnikljevih jekel. V jeklih za poplavljanje pa prisotnost antimona pomakne prehodno temperaturo žilavosti k višjim temperaturam.

Z ozirom na to, da so v proizvodnem programu železarne Jesenice konstrukcijska jekla z garantirano žilavostjo tudi pri nizkih temperaturah, smo v raziskovalnem oddelku železarne pristopili k sistematskim preiskavam vpliva antimona na lastnosti konstrukcijskih jekel.

Program dela

Raziskovalno delo je bilo usmerjeno v preiskave vpliva antimona od 0,05 % do 0,25 % v jeklih z različno koncentracijo ogljika in to od 0,02 do 0,6 %. Medsebojne vplive teh elementov smo raziskovali pri statičnih in dinamičnih preizkusih, posebej pa moramo poudariti preiskave pri izmeničnih torzijskih obremenitvah.

¹ T. Lavrič — C. Rekar: Analitično statistična študija oligoelementov v jeklu. Metalurški inštitut Ljubljana

² M. Gabrovšek — Comptes Rendus Železarna Jesenice — OTK 1956.

³ M. Gabrovšek, J. Plateau, J. Philibert, C. Crussard — Mémoires Scientifiques de la Revue de Metallurgie 1961 No 6.

⁴ G. W. Austin, A. R. Entswisle, G. C. Smith — J. Iron Steel Institute 1953

Preiskave so bile opravljene na šaržah, izdelanih v visokofrekvenčni peči RO pod normalnimi pogoji. Kot vložek za izdelavo jekla smo izbrali mehko železo. Zaradi tega so v preizkusnih šaržah prisotni tudi ostali elementi kot Si, Mn, P in S, kar lahko na eni strani moti pri razlagi doseženih rezultatov. Na drugi strani pa se s preiskavo takih šarž najbolj približamo pogojem v praksi in rezultate uporabimo tudi pri vsakdanjem delu v metalurški praksi.

Z ozirom na to, da je kapaciteta visokofrekvenčne peči le 6 kg jekla, smo statične preizkuse trdnosti in dinamične mikrotorzijske preizkuse izdelali na istih šaržah, za preizkušanje žilavosti pa smo izdelali posebne šarže.

Kakor bo iz kemičnih analiz razvidno, je pri vsaki skupini šarž prisoten že antimon v različnih koncentracijah, ker nismo uspeli za primerjalne preiskave pripraviti vložka in šarž brez prisotnosti antimona. Tako nam dajejo tudi prve šarže iz vsake skupine odgovor o vplivu Sb na fizikalne lastnosti jekla pri nizkih koncentracijah tega elementa.

Izdelane šarže smo prekovali v palice (kvadrat 12 mm) za izdelavo mikrotorzijskih, mikrotorzijskih in normalnih žilavostnih prob.

Osnovne fizikalne lastnosti jekla smo določili na mikrotorzijskih epruvetah dolžine 40 mm in premera 4 mm. Torzijske preizkuse smo opravili na torzijskem stroju tipa SADAMEL, na jeklu v normaliziranem stanju. Normalizacijo smo izvedli pri temperaturah 860 do 920°C, odvisno od sestave jekla.

Žilavost smo preizkušali na normalnih epruvetah DVM. Jeklo za te preizkuse je bilo toplotno obdelano in sicer:

- normalizirano,
- normalizirano in žarjeno na 650° 3 ure, ohlajeno v peči,
- normalizirano in žarjeno na 650° 3 ure, ohlajeno v peči, nato starano pri 250° C po predhodni 10 % deformaciji.

Torzijske preizkuse smo opravili na mikroeprevetah dolžine 24 mm in premera 1,5 mm, na jeklu v normaliziranem stanju. Za odstranjevanje notranjih napetosti nastalih pri mehanski izdelavi epruvet, so bile vse epruvete napetostno odžarjene pri temperaturi 550° 4 ure, v vakuumu $1,5 \cdot 10^{-4}$ Torra.

Mikrotorzijski preizkusi

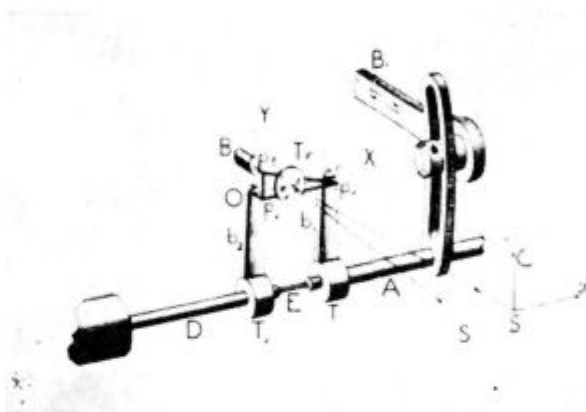
Mikrotorzijski preizkusi so za raziskovanje vpliva antimona na fizikalne lastnosti posebno pomembni, ker je naprava izredno precizna in omogoča ugotavljanje manj znanih fizikalnih lastnosti jekla, ki so močno odvisne od kristalnega stanja jekla, napetosti v mreži itd. Mikrotorzijski stroj smo za raziskovalno delo uporabili tudi zato, ker nas je zanimalo, koliko lahko mikrotorzijski stroj služi za raziskovanje vpliva rezidualnih ele-

mentov na fizikalne lastnosti jekla in če lahko fizikalne lastnosti statičnih in dinamičnih preizkusov med seboj primerjamo.

Mikrotorzijski stroj omogoča določevanje strižne napetosti, dekrementa notranjega trenja in določevanje strižnega ali Coulumbovega modula.

Ker so principi uporabljenih statičnih preizkusov poznani, bi na kratkem opisali le osnovni princip delovanja mikrotorzijskega stroja tipa SADAMEL.

Mikrotorzijski stroj proizvaja izmenična nihanja torzijskega značaja z določeno amplitudo in frekvenco. Vrtilni moment se registrira optično na fotografsko ploščo, tako da so meritve zelo precizne.



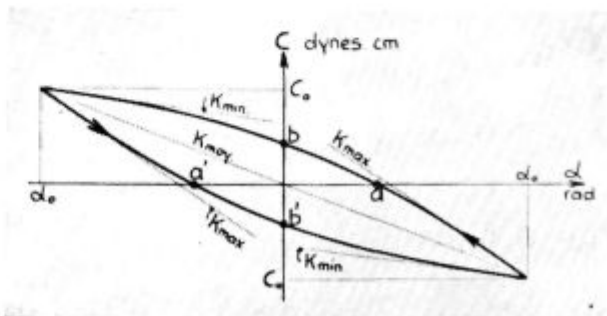
Slika 1

Princip delovanja mikrotorzijskega stroja

Preizkusna epruveta leži med oscilirajočo gredjo (A) (slika 1) in dinamometrom (D). Ekscenter poganja gonilno gred (B1) sem ter tja. S pomočjo ročičnega tečaja in vertikalne ročice nastavimo amplitudo. Frekvenca nihanja je 25 nihajev v sekundi. V napravo je vgrajen sinhronski motor.

Trinožnik (Tr), ki je z vzmetjo pritrjen na vzvoda b_1 in b_2 prenaša nihanje s pomočjo svetlobne točke na fotografsko ploščo.

Svetlobna točka omogoča torej risanje krivulje deformacije v koordinatah: vrtilni moment C in zasuk oziroma deformacijski kot probne epruvete.



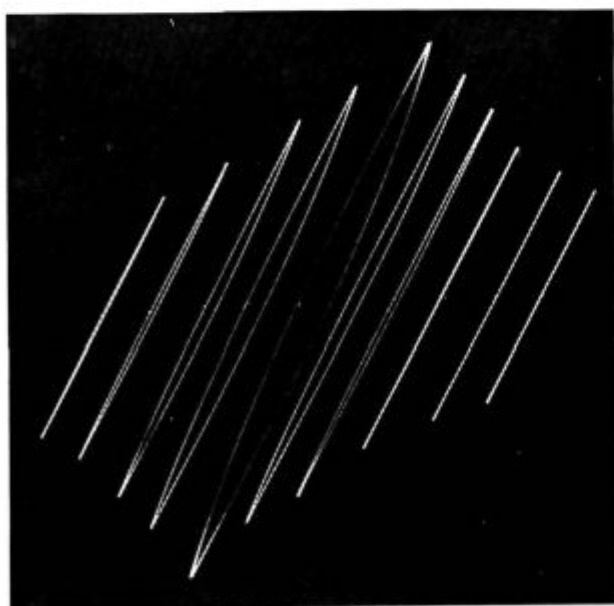
Slika 2

Primer histerezne zanke

Slika 2 prikazuje primer histerezne zanke v odvisnosti od vrtilnega momenta in deformacijskega kota. S pomočjo dobljenih oziroma izmerjenih koordinat ter računskih operacij lahko določimo iz vsake krivulje naslednje fizikalne lastnosti:

- strižno napetost,
- maksimalni, minimalni in srednji strižni modul ali Coulumov modul,
- dekrement notranjega trenja.

Medsebojne vplive ogljika in antimona smo zasledovali pri različnih deformacijskih kotih alfa. Tako je bilo za vsako koncentracijo antimona in ogljika posnetih po 10 histereznih zank, kot to prikazuje za en primer slika 3.

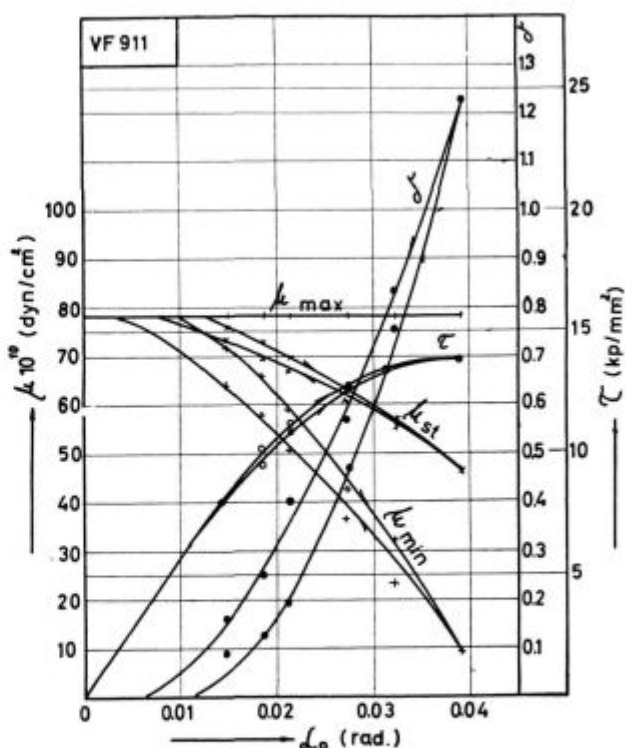


Slika 3
Prikaz histereznih zank

Kakor smo že omenili z merjenjem različnih parametrov na posameznih histereznih zankah in s pomočjo računskih operacij izračunamo že omenjene fizikalne lastnosti.

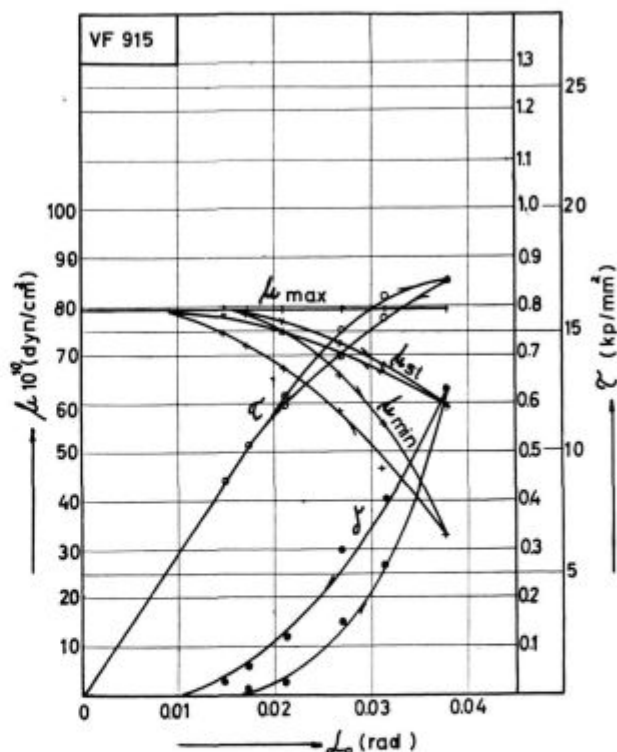
Diagram na sliki 4 prikazuje primer fizikalnih lastnosti jekla z 0,007 % C in 0,07 % Sb. Na abscisi je označen deformacijski kot v radianih, na ordinati pa vrednosti za notranja trenja, strižno napetost in strižni modul.

Vsaka od omenjenih fizikalnih lastnosti prikazuje v principu dve vrednosti z ozirom na histerezo. Diagram namreč posnamemo z naraščanjem deformacijskega kota do maksimuma in nato prehajamo od maksimuma zopet na minimum. V poteku krivulj posameznih fizikalnih lastnosti opazimo torej neko remanenco, ki je podobna remanenci pri magnetenju železa. Vzroki za ta pojav so v večjem energijskem potencialu kristalne rešetke in preobrazbi same kristalne rešetke zaradi plastične deformacije. Ti pojavi remanence so pri na-



Slika 4
Fizikalne lastnosti jekla: 0,007 % C, 0,07 % Sb

ših preizkusih toliko bolj izraziti, ker so bile histerezne zanke posnete v sorazmerno kratkem času in se v kristalni strukturi ni vzpostavilo ravnotežno stanje.



Slika 5
Fizikalne lastnosti jekla 0,02 % C, 0,16 % Sb

Za primerjavo k predhodnemu diagramu (slika 4) pogledjmo še diagram istih fizikalnih lastnosti jekla z 0,02 % C in 0,16 % Sb (slika 5). Opazimo lahko občutno zmanjšanje dekrementa notranjega trenja, kakor tudi strižnih modulov ter povečanje strižne napetosti.

Bolj podrobno se ne bi spuščali v posamezne fizikalne parametre kakor tudi način izračunavanja fizikalnih konstant ter tozadevne teorije. Vse to smo prevzeli iz literature z ozirom na to, da ni bil naš namen študij absolutnih vrednosti omenjenih fizikalnih konstant kakor tudi ocena pravilnosti omenjenih fizikalnih konstant kakor tudi ocena pravilnosti meritev le-teh, ampak smo želeli iz dobljenih fizikalnih konstant dinamičnih meritev dokazati medsebojne vplive ogljika in antimona na tehnološke lastnosti jekla.

Kemična sestava preizkusnih šarž

Za statične trgalne in dinamične mikrotorzijske preizkuse so bile izdelane šarže z različnimi koncentracijami ogljika in antimona in sicer:

Sarža	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Sb %
VF 911-a	0,007	0,02	0,10	0,013	0,033	0,07
VF 911	0,02	0,02	0,10	0,013	0,033	0,07
VF 916	0,02	0,01	0,11	0,012	0,031	0,11
VF 915	0,02	0,02	0,11	0,014	0,013	0,16
VF 1039	0,01	0,01	0,07	0,023	0,039	0,18
VF 1047	0,02	0,03	0,08	0,021	0,032	0,22
VF 1094	0,08	0,02	0,17	0,004	0,032	0,012
VF 1095	0,09	0,02	0,18	0,035	0,032	0,11
VF 1096	0,09	0,02	0,16	0,020	0,029	0,15
VF 1099	0,09	0,02	0,17	0,024	0,029	0,24
VF 1141	0,35	0,04	0,17	0,012	0,028	0,011
VF 1069	0,31	0,03	0,15	0,12	0,015	0,12
VF 1108	0,29	0,02	0,17	0,008	0,028	0,16
VF 1142	0,32	0,04	0,21	0,015	0,030	0,24
VF 1076	0,66	0,10	0,12	0,014	0,013	0,013
VF 1079	0,66	0,13	0,21	0,011	0,011	0,11
VF 1144	0,65	0,11	0,22	0,015	0,021	0,18
VF 1145	0,66	0,10	0,19	0,010	0,021	0,22

Sarža	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Sb %
-------	-----	------	------	-----	-----	------

Sarža VF 911-a predstavlja šaržo z najnižjo koncentracijo ogljika. Le-to smo dosegli z naknadnim razogličanjem jekla v atmosferi vodika.

Vse šarže so bile pomirjene z minimalnim dodatkom aluminija.

Rezultati trgalnih preizkusov: temperatura + 20° C

Sarža	C %	Sb %	Meja raz. kg/mm ²	Trdn. kg/mm ²	Raz. %	Kontrak. %
VF 911	0,02	0,07	31,8	40,7	33,3	78,2
VF 916	0,02	0,11	38,5	41,8	28,3	69,2
VF 915	0,02	0,16	36,4	41,4	26,5	74,5
VF 1039	0,01	0,18	32,3	40,3	26,6	74,1
VF 1047	0,02	0,22	28,3	40,3	26,6	57,6
VF 1094	0,08	0,012	27,0	37,4	36,7	77,5
VF 1095	0,09	0,11	29,0	39,2	36,7	77,5
VF 1096	0,09	0,15	31,3	41,4	36,7	75,0
VF 1099	0,09	0,24	35,3	46,0	30,0	69,1
VF 1141	0,33	0,011	41,0	53,6	30,0	63,2
VF 1069	0,31	0,12	38,9	53,4	26,6	60,0
VF 1108	0,29	0,16	40,7	57,8	20,0	61,0
VF 1142	0,32	0,24	42,1	57,8	20,0	42,9
VF 1076	0,66	0,13	44,1	76,2	16,7	44,5
VF 1079	0,66	0,11	49,0	76,0	20,0	42,5
VF 1144	0,65	0,18	51,9	81,5	10,0	15,5
VF 1145	0,66	0,22	53,6	85,1	8,0	12,1

Sarža	C %	Sb %	Meja raz. kg/mm ²	Trdn. kg/mm ²	Raz. %	Kontrak. %
-------	-----	------	------------------------------	--------------------------	--------	------------

Statični preizkusi trdnostnih lastnosti dajejo pravzaprav presenetljive rezultate. Pri koncentraciji ogljika do 0,09 % in naraščajočih koncentracijah antimona do 0,24 % ni opaziti nobenega vpliva na mejo raztezanja, trdnost kakor tudi raztezek in kontrakcijo. Če primerjamo te rezultate z rezultati preiskav normalno izdelanih jekel v SM ali električni peči, brez namerne dodatka Sb, lahko ugotovimo, da pri nizki koncentraciji ogljika antimon ne vpliva na osnovne statične mehanske lastnosti jekla.

Z naraščajočim ogljikom naraščata meja raztezanja in trdnost, raztezek je tudi pri 0,33 % ogljika še zadovoljiv. Šele pri koncentraciji ogljika 0,66 % zasledimo že pri nizkih koncentracijah Sb, vpliv na zmanjšanje raztezka in kontrakcije, poleg občutnega povišanja meje raztezanja in trdnosti.

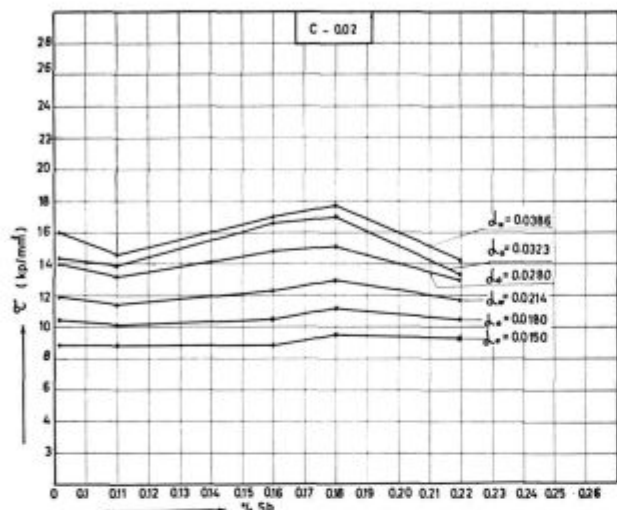
Načelno lahko ugotovimo, da nam statični trgalni preizkus kljub rahli tendenci naraščanja meje raztezanja in trdnosti z naraščajočim antimonom, ni pokazal nekega škodljivega vpliva antimona na lastnosti jekla, razen pri visokih koncentracijah, kar pa brez dvoma dokazuje, da ta način preiskave ni dovolj občutljiv za raziskave vplivov oligoelementov v jeklu.

Rezultati mikrotorzijskih preizkusov

Kakor smo že omenili, smo za mikrotorzijske preizkuse uporabili iste šarže, kakor za statične trgalne preizkuse. Delo bi bilo preobširno, če bi na tem mestu navajali vse dobljene rezultate fizikalnih lastnosti, to je dekrementa notranjega trenja, strižne napetosti in Coulombovih modulov.

Prav tako ne bi navajali vseh ostalih podatkov, število doseženih torzij v odvisnosti od sestave jekla, kakor tudi rezultatov preizkusov dobljenih pri preiskavah vpliva Sb in C na fizikalne lastnosti, v odvisnosti od števila nihajev vendar pri konstantnem deformacijskem kotu.

Omejili se bomo le na obdelavo rezultatov vpliva Sb in C na dekrement notranjega trenja in strižno napetost v odvisnosti od različnega deformacijskega kota ter aplikacijo teh parametrov na prisotnost antimona v jeklu.



Slika 6

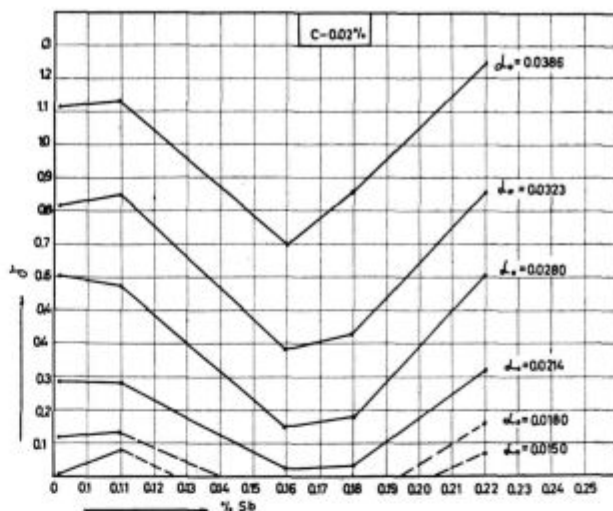
Odvisnost strižne napetosti od vsebnosti Sb pri 0,02 % C

Diagram na sliki 6 nam prikazuje potek strižne napetosti v odvisnosti od različne koncentracije antimona pri različnih deformacijskih kotih in konstantnem ogljiku 0,02 %. Pri tem sta karakteristični dve točki in sicer: 0,11 % Sb, ki predstavlja padec strižne napetosti pri maksimalnem deformacijskem kotu. Pri 0,18 % Sb pa doseže strižna napetost maksimalno vrednost 17,8 kN/mm². Ta prelomnica v strižni napetosti se opazi že pri minimalnem deformacijskem kotu 0,0150 radiana.

Podoben potek kažejo tudi krivulje notranjega trenja, kakor to kaže diagram na sliki 7. V odvisnosti od deformacijskega kota doseže pri 0,11 % Sb dekrement notranjega trenja maksimum, nato pada in doseže pri 0,18 % Sb minimum. Pri višjih koncentracijah Sb dekrement notranjega trenja ponovno narašča.

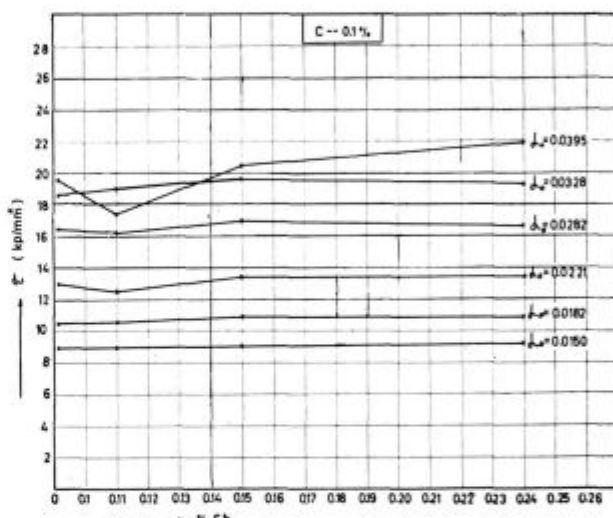
Pri koncentraciji ogljika 0,1 % se anomalije v poteku krivulje notranjega napetosti zabrišejo. Strižna napetost je neodvisna od koncentracije Sb ampak narašča samo z deformacijskim kotom. Le pri maksimalnem deformacijskem kotu zaznamo pri 0,11 % Sb padec strižne napetosti, podobno, kot smo to ugotovili tudi pri jeklu z 0,02 % C.

Podobno kakor pri strižni napetosti, lahko ugotovimo tudi pri dekrementu notranjega trenja, da doseže le-ta pri 0,11 % Sb maksimalno vrednost, ki nato z naraščajočim antimonom konstantno pada (slika 9).



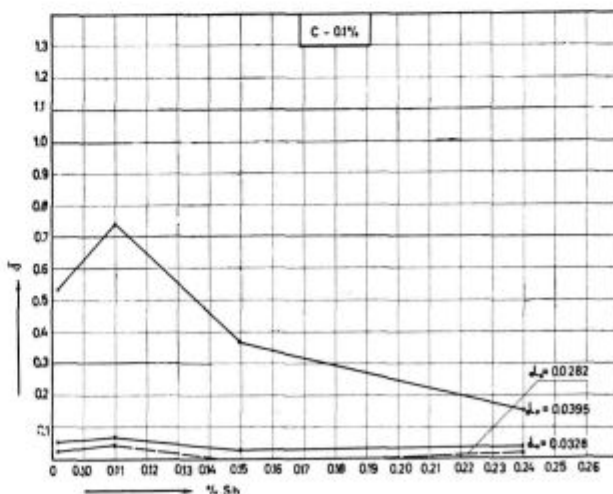
Slika 7

Odvisnost notranjega trenja od vsebnosti Sb pri 0,02 % C



Slika 8

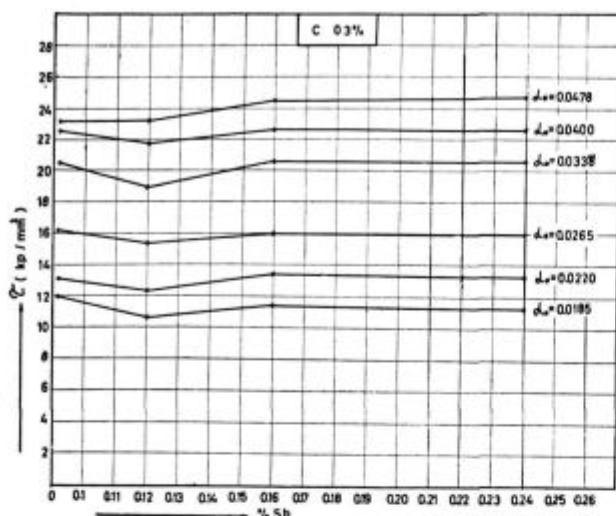
Odvisnost strižne napetosti od vsebnosti Sb pri 0,1 % C



Slika 9

Odvisnost notranjega trenja od vsebnosti Sb pri 0,1 % C

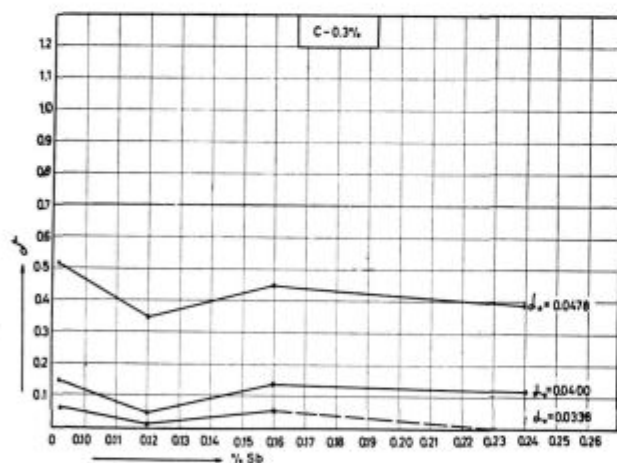
Diagram na sliki 10 kaže vrednosti strižne napetosti pri koncentraciji ogljika 0,3 %.



Slika 10

Odvisnost strižne napetosti od vsebnosti Sb pri 0,3 % C

Iz diagrama na sliki 11 pa vidimo potek dekrementa notranjega trenja v odvisnosti od koncentracije antimona in pri konstantnem ogljiku 0,3 %. Opazimo lahko, da predstavljata vrednosti 0,12 % Sb in 0,16 % Sb karakteristični točki v poteku teh lastnosti v odvisnosti od deformacijskega kota.

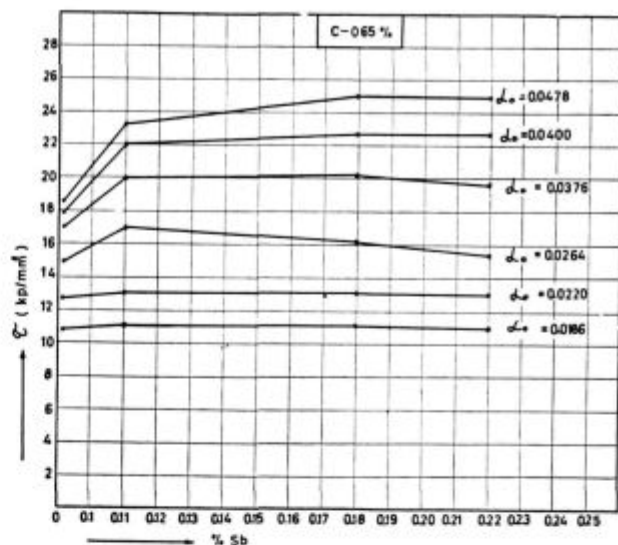


Slika 11

Odvisnost notranjega trenja od vsebnosti Sb pri 0,3 % C

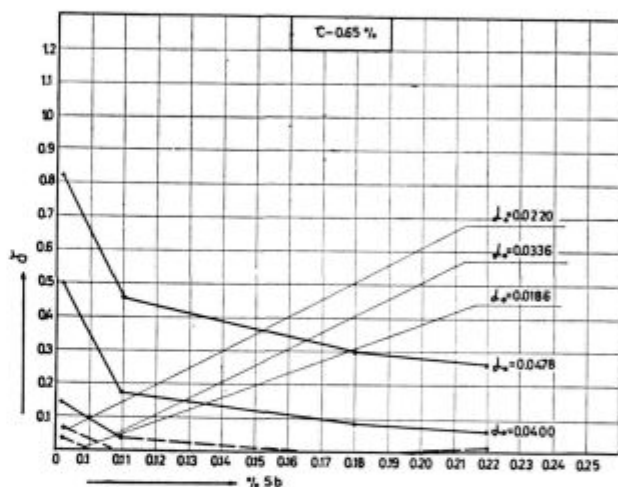
Prelomnico v poteku strižne napetosti pri 0,11 % Sb lahko ugotovimo tudi pri višji koncentraciji ogljika 0,65 % (slika 12).

Diagram na sliki 13 pa prikazuje gibanje dekrementa notranjega trenja v odvisnosti od Sb in koncentraciji C 0,65 %. Ponovno je karakteristična prelomnica 0,11 % Sb v poteku posameznih krivulj v odvisnosti od deformacijskega kota.



Slika 12

Odvisnost strižne napetosti od vsebnosti Sb pri 0,65 % C



Slika 13

Odvisnost notranjega trenja od vsebnosti Sb pri 0,65 % C

Če rezimiramo medsebojni vpliv antimona in ogljika na strižno napetost in dekrement notranjega trenja lahko ugotovimo naslednje:

— pri majhnih deformacijskih kotih je strižna napetost neodvisna od spreminjajoče se koncentracije ogljika in antimona, ampak samo od velikosti deformacijskega kota;

— z naraščajočim ogljikom pada dekrement notranjega trenja. Sprememba dekrementa notranjega trenja je tesno povezana s spremembo koncentracije antimona v jeklu.

Zasledovanje dekrementa notranjega trenja in strižne napetosti, v odvisnosti od deformacijskega kota in sestave pri mikrotorzijskih preiskavah je dokazalo, da je ta metoda preiskave vplivov Sb v jeklu zelo občutljiva in daje večji vpogled na spremembe fizikalnih lastnosti jekla, kot normalni statični trgalni preizkus.

Rezultati mikrotorzijskih preizkusov so pokazali, da se posamezne fizikalne lastnosti jekla bistveno spremenijo pri koncentracijah antimona 0,11 % in 0,16–0,18 %, posebno pri nizkih koncentracijah ogljika, kar pri statičnih preizkusih ni prišlo do izraza. Zato smo v nadaljnjih raziskavah medsebojnega vpliva antimona in ogljika v jeklu poizkušali ugotoviti morebitno povezavo dekrementa notranjega trenja in torzijske napetosti z žilavostjo jekla.

Vpliv C in Sb na žilavost jekla

Preizkuse žilavosti smo opravili na normalnih DVM probah, pri različnih stanjih toplotne obdelave, kakor tudi staranem stanju. Uporabili smo šarže naslednje sestave:

Šarža	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Sb %
VF 1433	0,02	0,05	0,05	0,011	0,036	0,05
VF 1425	0,03	0,01	0,06	0,012	0,032	0,12
VF 1406	0,03	0,02	0,09	0,007	0,030	0,16
VF 1414	0,03	0,01	0,06	0,008	0,032	0,20
VF 1407	0,03	0,02	0,09	0,007	0,030	0,25
VF 1426	0,12	0,05	0,10	0,015	0,030	0,034
VF 1427	0,12	0,05	0,12	0,014	0,032	0,12
VF 1428	0,12	0,05	0,16	0,015	0,032	0,16
VF 1415	0,11	0,01	0,12	0,009	0,029	0,20
VF 1411	0,09	0,06	0,13	0,009	0,031	0,19
VF 1416	0,10	0,01	0,13	0,009	0,029	0,25
VF 1434	0,20	0,06	0,14	0,011	0,034	0,052
VF 1429	0,28	0,08	0,16	0,012	0,028	0,12
VF 1419	0,30	0,11	0,20	0,013	0,026	0,15
VF 1431	0,29	0,12	0,20	0,013	0,030	0,20
VF 1432	0,27	0,08	0,20	0,013	0,030	0,027

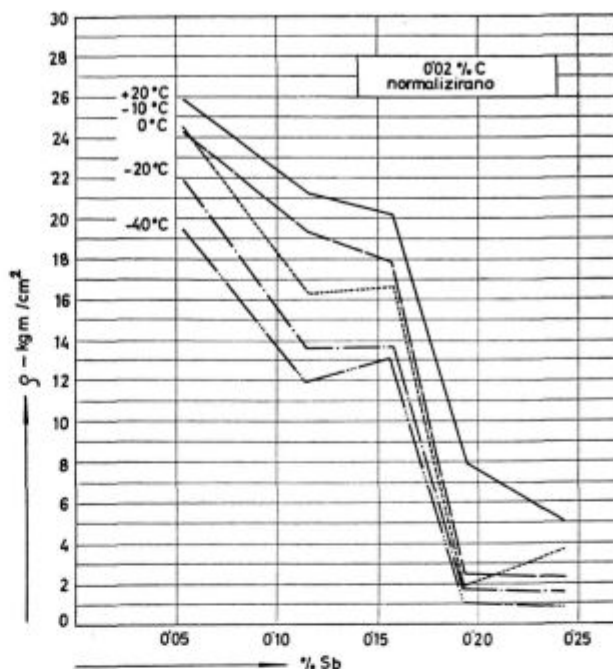
Vse šarže so bile pomirjene z dodatkom aluminija. Žilavost smo določili na epruvetah DVM, pri temperaturah +20, 0, –10, –20 in –40 °C, na jeklu v normaliziranem stanju.

Vpliv antimona na žilavost jekla v normaliziranem stanju

Diagram na sliki 14 prikazuje potek krivulj žilavosti pri koncentraciji ogljika 0,02, v odvisnosti od temperature in naraščajoče koncentracije antimona.

Z naraščajočo koncentracijo antimona žilavost pada. V poteku krivulje žilavosti zasledimo pri 0,16 % Sb prelomnico z majhnim narastkom žilavosti, ki pri višjih koncentracijah Sb hitro pada k minimalnim vrednostim.

Pri višji koncentraciji ogljika 0,1 % je vpliv Sb na žilavost v normaliziranem stanju občutno manjši (slika 15).

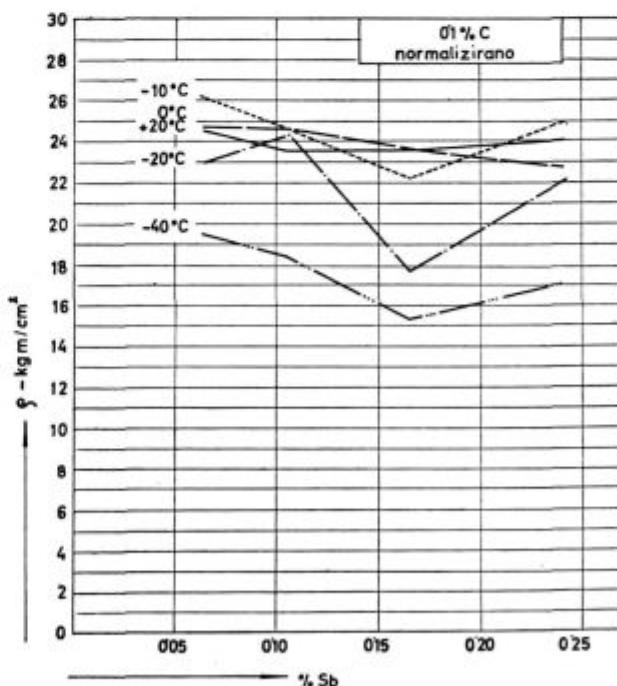


Slika 14

Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,02 % C — normalizirano

Krivulje žilavosti kažejo tudi pri tej koncentraciji ogljika, pri 0,16 % Sb prelomnico v poteku žilavosti, ki nad 0,16 % Sb ponovno nekoliko naraste. V tem je tudi bistvena razlika v primerjavi z jeklom z 0,02 % C, kjer žilavost pri višjih koncentracijah Sb hitro pada.

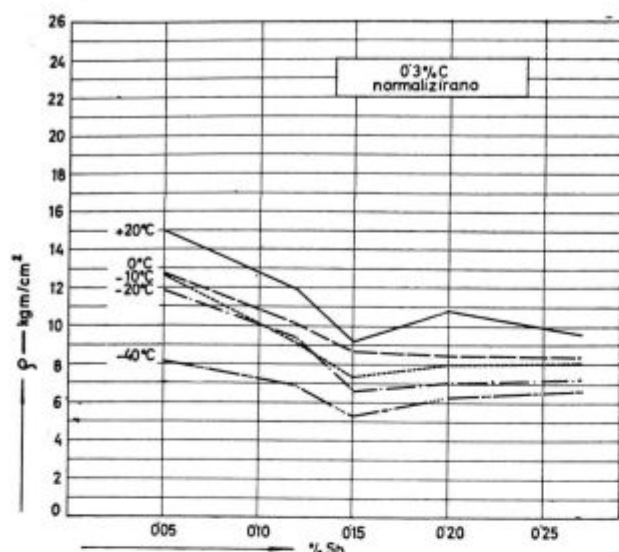
Podobno kakor jeklo z 0,1 % C kaže tudi jeklo z 0,3 % C isti potek krivulj žilavosti. Z naraščajočo



Slika 15

Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,02 % C — normalizirano

koncentracijo antimona pada žilavost do 0,16 % Sb, potem pa ponovno kaže tendenco naraščanja (slika 16).



Slika 16

Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,1 % C — normalizirano

Razumljivo je, da je absolutna vrednost žilavosti z ozirom na višjo koncentracijo ogljika nižja.

Če primerjamo krivulje žilavosti v odvisnosti od ogljika in antimona lahko torej ugotovimo bistveni vpliv Sb na žilavost pri jeklu z nizko koncentracijo ogljika 0,02 %.

Rezultati preiskave žilavosti v toplotno obdelanem in staranem stanju

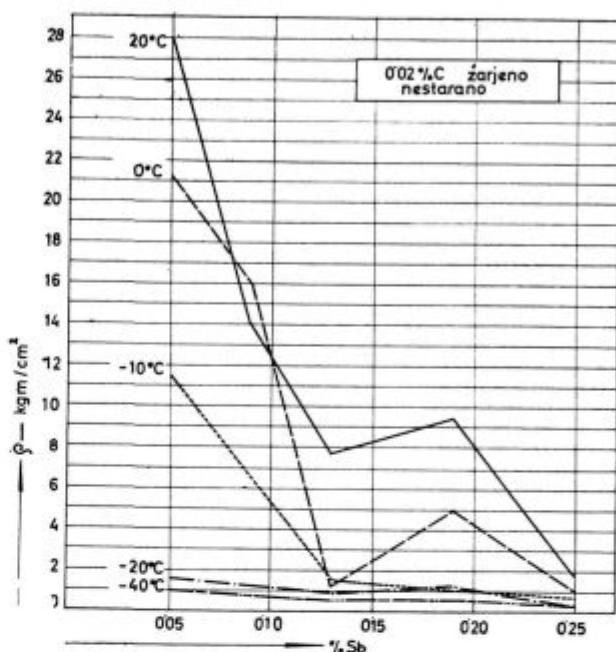
Podobno kakor pri raziskavah vpliva kositra na žilavost jekla se je tudi pri antimonu predpostavljalo, da ima toplotna obdelava in s tem sprememba strukture bistveni vpliv na potek žilavosti pri različnih temperaturah. V ta namen so bile izvršene preiskave spodaj navedenih šarž z naslednjo toplotno obdelavo:

- normalizacija pri 900° C
- žarjenje pri 650° C 3 ure, ohlajevanje v peči

Kemična sestava preizkusnih šarž

Šarža	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Sb %
VF 1373	0,02	0,01	0,13	0,010	0,030	0,05
VF 1374	0,02	0,01	0,08	0,010	0,032	0,09
VF 1356	0,03	0,02	0,10	0,015	0,031	0,13
VF 1357	0,03	0,01	0,14	0,013	0,033	0,19
VF 1358	0,03	0,02	0,14	0,014	0,031	0,25
VF 1375	0,12	0,02	0,14	0,010	0,029	0,05
VF 1376	0,11	0,01	0,13	0,011	0,031	0,10
VF 1361	0,09	0,01	0,15	0,013	0,036	0,13
VF 1362	0,12	0,01	0,19	0,014	0,032	0,18
VF 1377	0,12	0,01	0,14	0,011	0,032	0,24

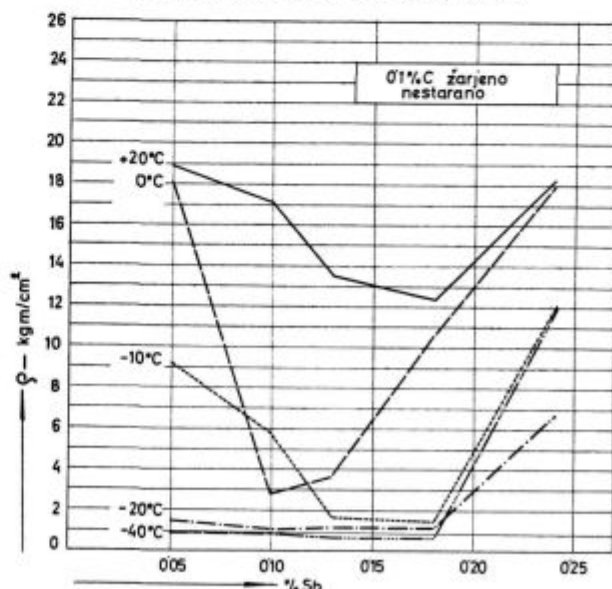
Šarža	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Sb %
VF 1378	0,29	0,07	0,23	0,010	0,028	0,05
VF 1379	0,30	0,07	0,18	0,010	0,028	0,09
VF 1366	0,29	0,07	0,13	0,014	0,028	0,13
VF 1367	0,28	0,07	0,15	0,015	0,027	0,19
VF 1368	0,32	0,07	0,20	0,018	0,030	0,26



Slika 17

Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,02 % C — žarjeno

Kakor je iz diagrama na sliki 17 razvidno, žilavost z naraščajočim antimonom, pri ogljiku 0,02 %, konstantno pada do 0,15 % Sb, se ponovno dvigne in doseže drugi maksimum pri 0,18 % Sb.

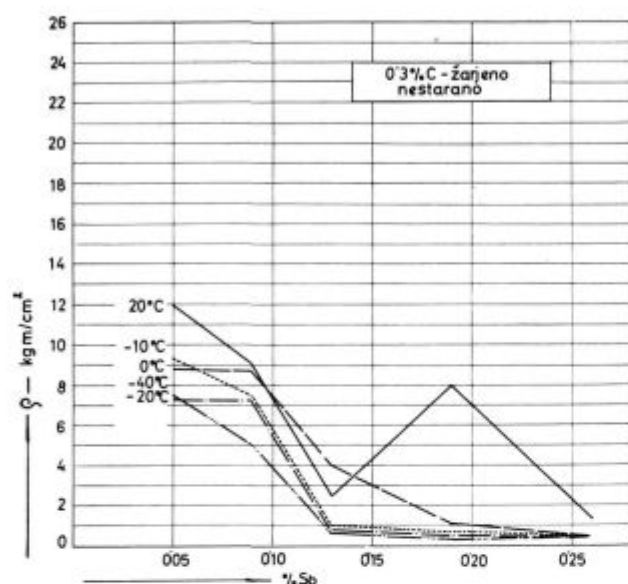


Slika 18

Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,1 % C — žarjeno

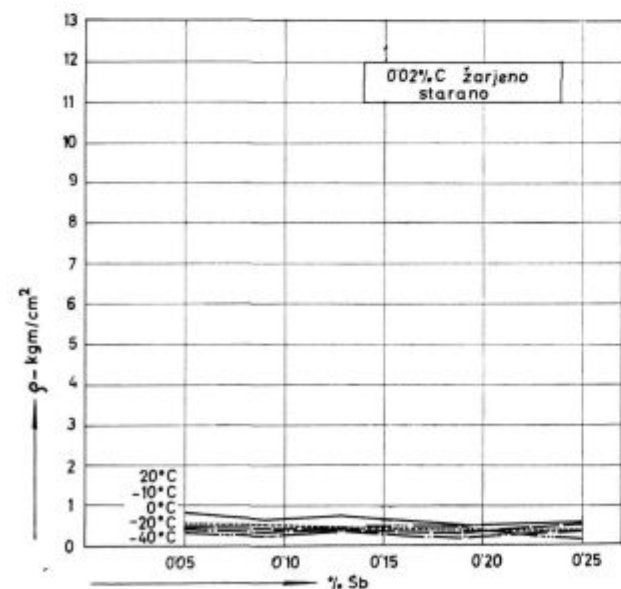
Pri višji koncentraciji ogljika 0,1 % je padec žilavosti pri + 20° C, zaradi prisotnega antimona manjši (slika 18). Karakteristično je, da se tudi pri tej koncentraciji ogljika pojavi pri 0,18 % Sb ponovno naraščanje žilavosti.

Pri koncentraciji ogljika 0,30 % žilavost enakomerno pada do 0,13 % Sb. Pri temperaturi + 20° C se prav tako pojavi, pri 0,18 % Sb, ponovno naraščanje vrednosti žilavosti (slika 19).



Slika 19

Če primerjamo krivulje žilavosti v normaliziranem in toplotno obdelanem stanju lahko ugotovimo, da je vpliv Sb na žilavost jekla predvsem pri nizkih temperaturah zelo poudarjen. Zaradi strukturnih sprememb pri počasnem ohlajanju, je jeklo



Slika 20

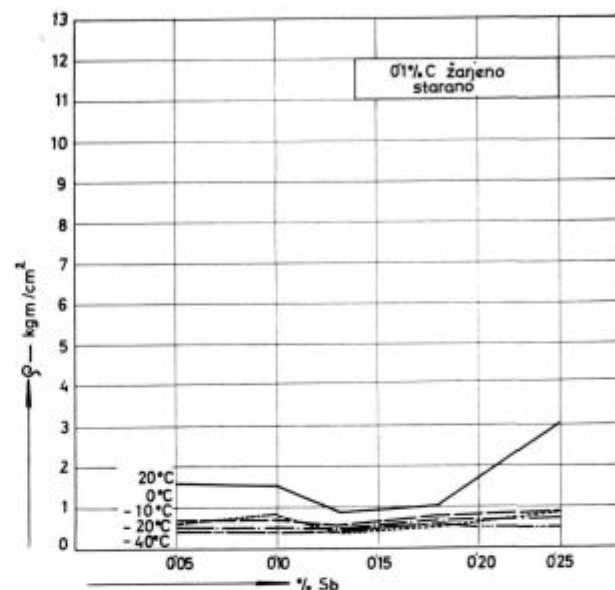
Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,02 % C — žarjeno

že pri nizkih koncentracijah Sb in ogljika, pri temperaturi — 20° C že popolnoma krhko.

Zgoraj navedene šarže so bile po opisani toplotni obdelavi preizkušene tudi na žilavost v staranem stanju, v odvisnosti od temperature.

Pri jeklu z nizkim ogljikom 0,02 % lahko ugotovimo popolno krhkost materiala (slika 20).

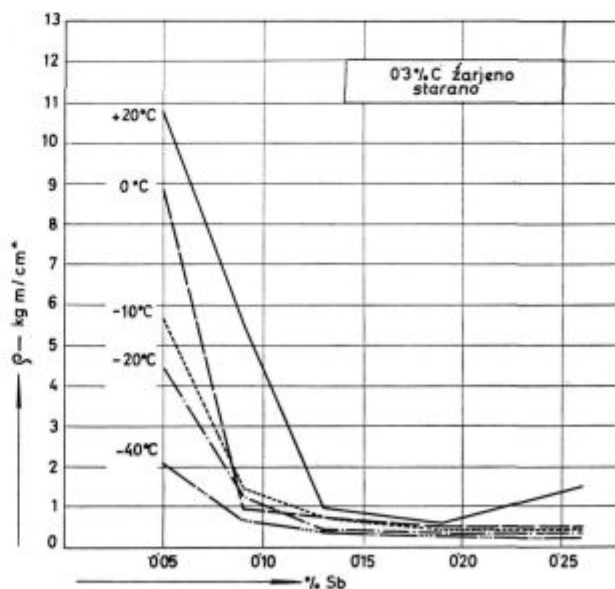
Žilavost jekla pri 0,1 % nekoliko naraste predvsem pri visokih koncentracijah Sb (slika 21).



Slika 21

Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,1 % C — starano

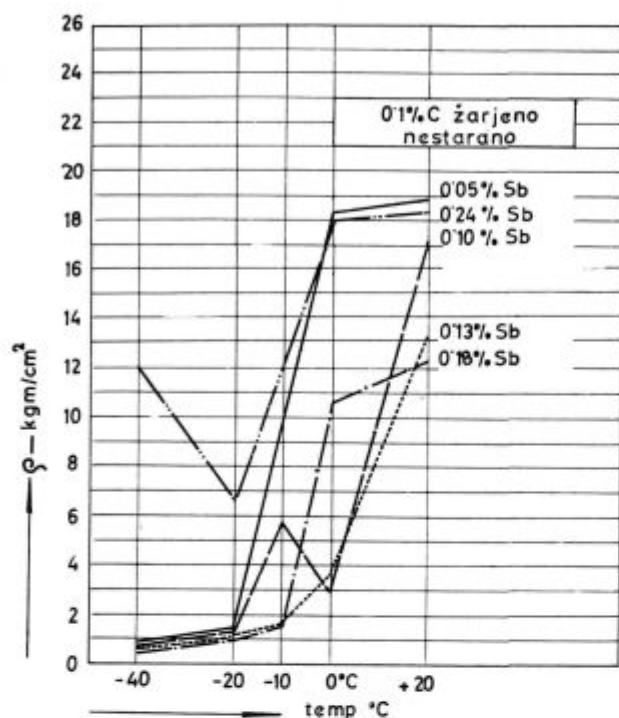
Pri visokem ogljiku 0,3 % pa zasledimo tudi v staranem stanju, pri navadni temperaturi in nizki koncentraciji Sb zadovoljivo žilavost, ki pa z naraščajočim antimonom konstantno pada k minimalnim vrednostim (slika 22).



Slika 22

Vpliv vsebnosti Sb na žilavost pri 0,3 % C — starano

Preizkusi žilavosti pri različnih temperaturah so potrdili že navedene ugotovitve raziskovalcev Austina, Entswisla in Smitha, da prisotnost Sb pomakne krivulje premene žilavosti k višjih temperaturah. Tako prikazuje slika 23 krivulje premene žilavosti v odvisnosti od temperature za jeklo z 0,1 % C.



Slika 23

Temperatura prehoda žilavosti v odvisnosti od vsebnosti Sb

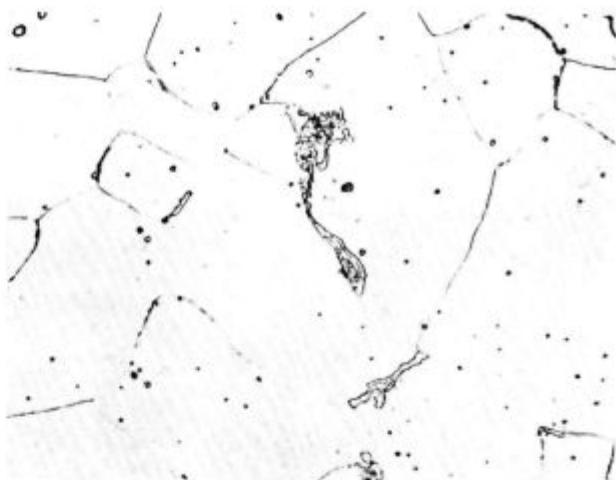
Zanimivo je, da je žilavost jekla z 0,05 % Sb enaka žilavosti jekla z 0,25 % Sb pri temperaturi + 20 °C.

Krivulje žilavosti jekla z različnimi koncentracijami antimona brez dvoma kažejo določene karakteristične oblike in sicer, da predstavljajo koncentracije okoli 0,12 % Sb in okoli 0,18 % Sb prelomnice v poteku krivulj žilavosti. Pri teh koncentracijah opazimo tudi spremembe gibanja dekrementa notranjega trenja. To se pravi, da te koncentracije antimona, v odvisnosti od ogljika v jeklu, bistveno vplivajo na fizikalne lastnosti jekla.

Metalografske in fraktografske preiskave

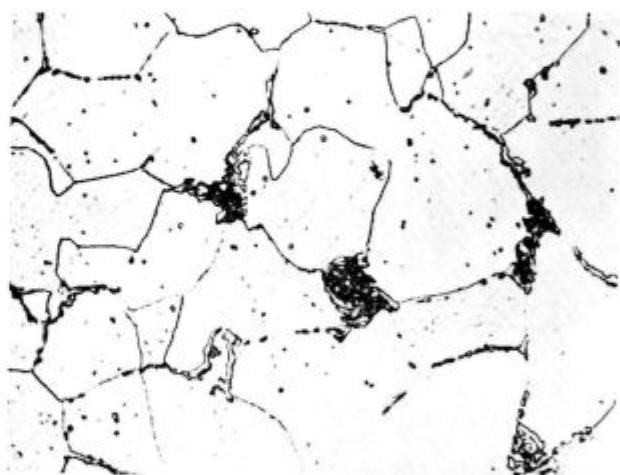
Metalografska preiskava jekla z različno koncentracijo antimona kaže vpliv antimona na abnormno kristalizacijo perlita. Ta vpliv je posebno izrazit pri nizkih koncentracijah ogljika.

Metalografska slika 24 (1000 x) kaže strukturo jekla z 0,03 % C in 0,12 % Sb, v normaliziranem stanju. Dočim ima jeklo pri 0,05 % Sb normalno lamelarno strukturo perlita, lahko ugotovimo pri 0,12 % Sb po kristalnih mejah terciarni cementit.



Slika 24 x 1000
0,03 % C, 0,12 % Sb

Podobno lahko ugotovimo tudi pri jeklu z 0,16 % Sb. Terciarni cementit obliva kristalne meje. Prav tako kaže tudi ponekod izločeni lamelarni perlit znake razkroja v terciarni cementit (slika 25 x 1000).



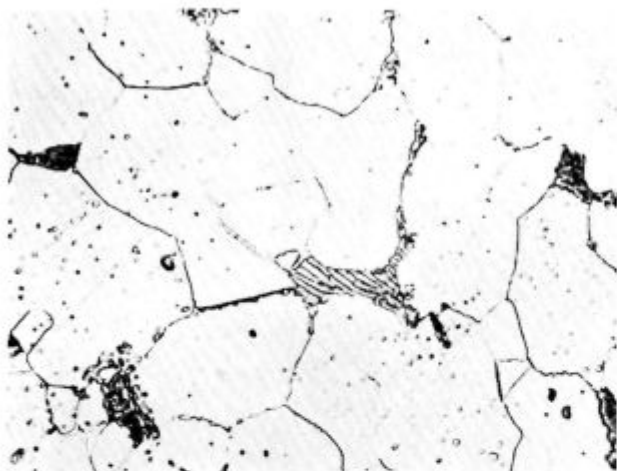
Slika 25 x 1000
0,03 % C, 0,16 % Sb

Pri višji koncentraciji ogljika 0,1 % se pojavlja v strukturi že pri 0,063 % Sb terciarni cementit (slika 26 x 1000).

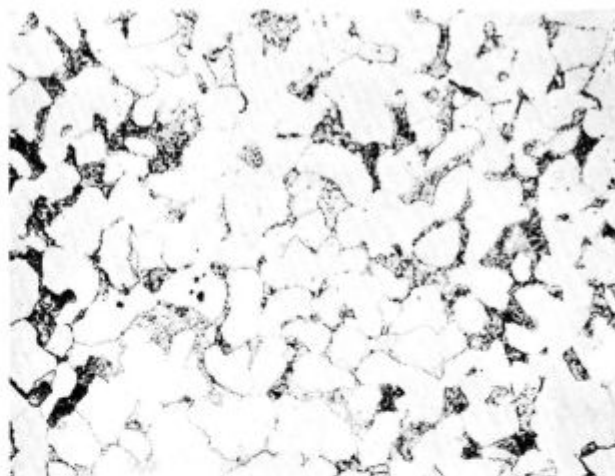
Z naraščajočo koncentracijo Sb delež terciarnega cementita v strukturi narašča, vendar počasneje kot je pri jeklu z 0,02 % C (slika 27).

Pri koncentraciji 0,25 % Sb ima jeklo zopet normalno strukturo z lamelnim perlitom (slika 28 x 1000).

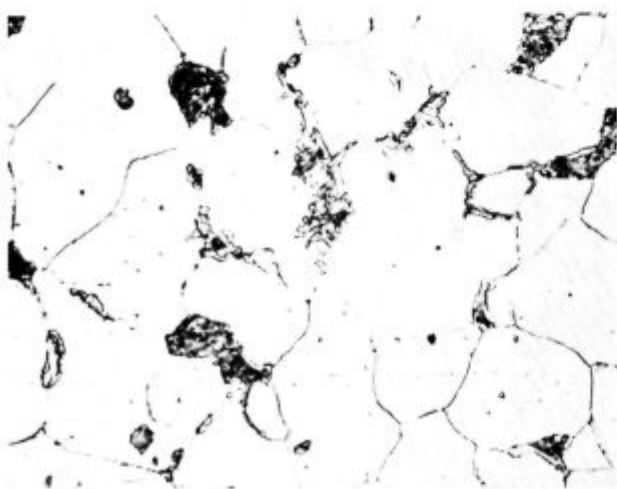
Jeklo s koncentracijo ogljika 0,3 % kaže pri 0,15 % Sb v strukturi manjše izločke terciarnega cementita (slika 29 x 500).



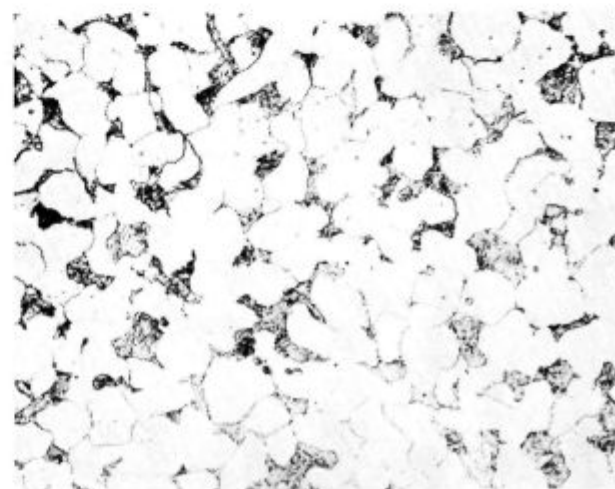
Slika 26 x 1000
0,10 % C, 0,063 % Sb



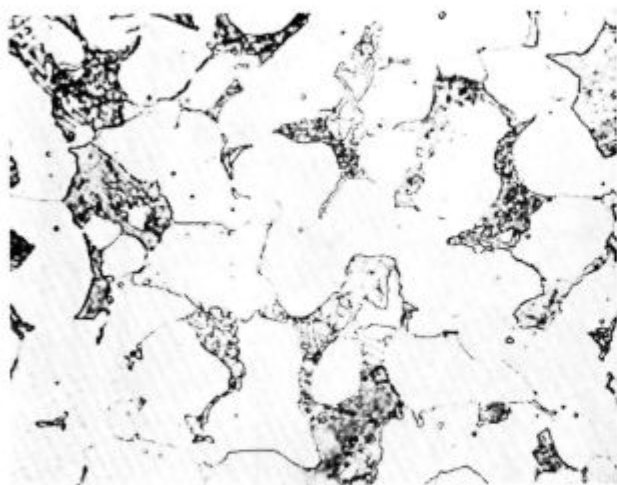
Slika 29 x 500
0,3 % C, 0,15 % Sb



Slika 27 x 1000
0,12 % C, 0,16 % Sb



Slika 30 x 500
0,3 % C, 0,27 % Sb



Slika 28 x 1000
0,02 % C, 0,25 % Sb

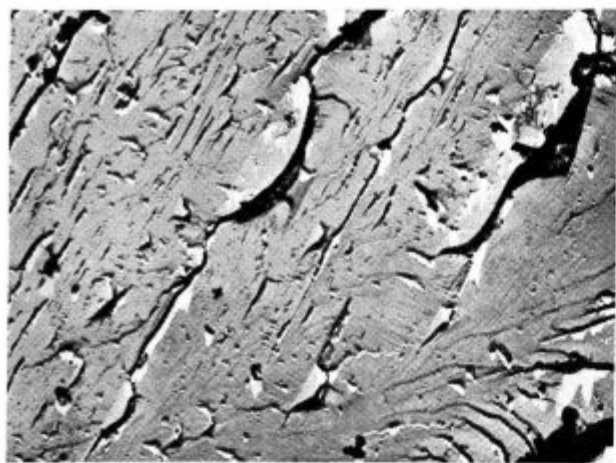
Pri 5,27 % antimona ima jeklo zopet normalno perlitno strukturo (slika 30 x 500).

Fraktografske preiskave so bile narejene na jeklih v toplotno obdelanem stanju, to je po normalizaciji in mehkem žarjenju jekla. Frakture so izdelane na prelomnih ploskvah.

V ta namen so bili vzorci lomljeni pri temperaturi — 196° C. Replike so izdelane z naparjenjem ogljika.

Jeklo z nizko koncentracijo ogljika 0,02 % in Sb 0,05 % kaže intrakristalni lom (slika 31 x 8000).

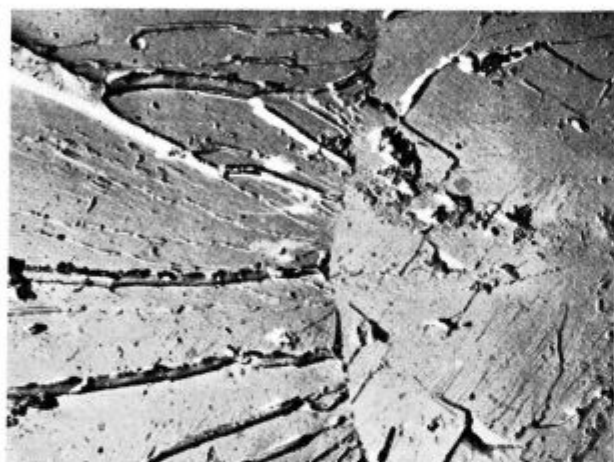
Pri višji koncentraciji Sb prehaja fraktura v mešani intra in interkristalni lom, kar kažeta sliki 32 in 33 pri 10.000 oziroma 12.000-kratni povečavi. (0,03 % C, 0,13 % Sb).



Slika 31 x 8000
0,02 % C, 0,05 % Sb



Slika 34 x 8000
0,03 % C, 0,19 % Sb



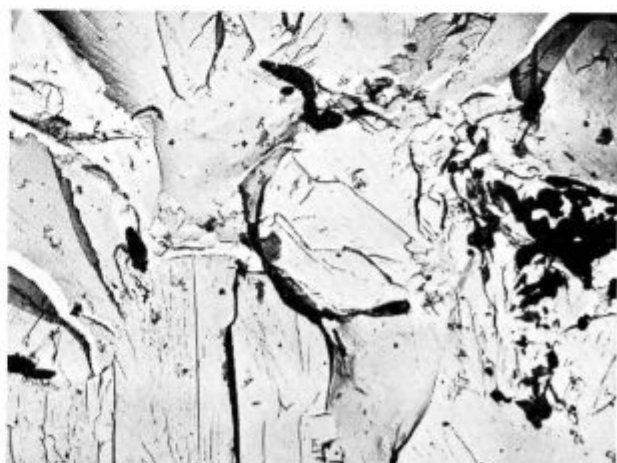
Slika 32 x 10.000
0,03 % C, 0,13 % Sb



Slika 35 x 3000
0,12 % C, 0,05 % Sb



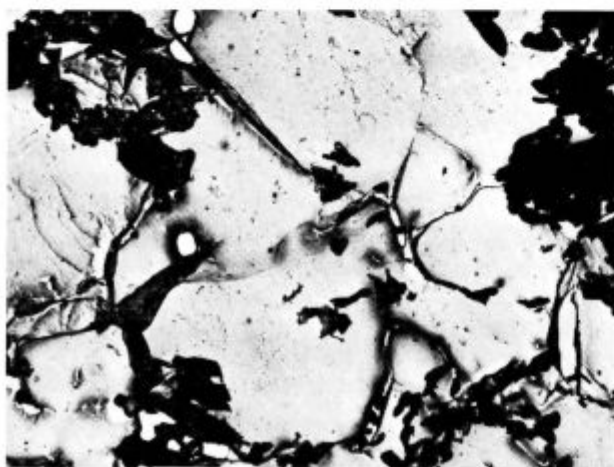
Slika 33 x 12.000
0,03 % C, 0,13 % Sb



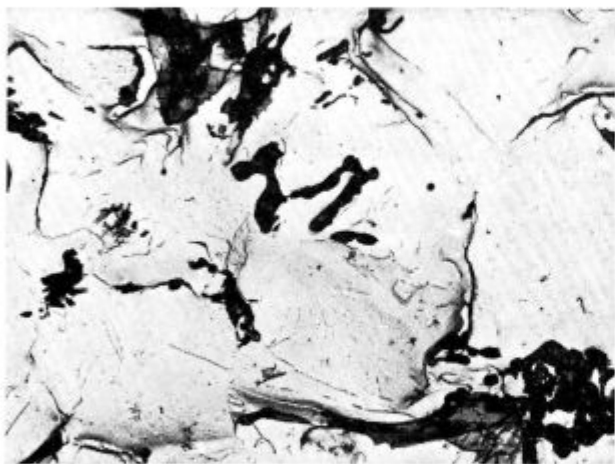
Slika 36 x 3000
0,12 % C, 0,13 % Sb



Slika 37 x 3000
0,12 % C, 0,18 % Sb



Slika 38 x 3000
0,3 % C, 0,05 % Sb



Slika 39 x 3000
0,3 % C, 0,19 % Sb

Poleg izločkov cementitne narave opazimo na površini kristalov tudi absorpcijske figure. Delež teh z naraščajočo koncentracijo Sb narašča. Slika 34 kaže, da je fraktura pri jeklu z 0,19 % Sb skoraj povsem interkristalna. Površine kristalov kažejo močan pojav absorpcijskih figur.

Pri jeklu z 0,12 % C in 0,05 % Sb lahko zasledimo mešane intra in interkristalne frakture. Delež interkristalnega loma narašča do koncentracije Sb 0,18 %.

Slika 35 kaže frakturo jekla z 0,12 % C in 0,05 % Sb.

Lom je pretežno intrakristalen, ponekod še opazimo znake duktilnega preloma.

Pri koncentraciji antimona 0,13 % pa zasledimo v frakturi intra in interkristalni prelom (slika 36). Na površinah interkristalnega preloma opazimo fine izločke, ki imajo vpliv na heterogenost frakture.

Pri 0,12 % C in 0,18 % Sb opazimo prav tako mešani inter in intrakristalni lom. Slika 37 x 3000.

Kakor pri koncentraciji Sb 0,05 lahko tudi pri koncentraciji 0,18 % Sb zasledimo v frakturi pojav duktilnega preloma.

Pri višjem ogljičnem jeklu z 0,3 % C pa zasledimo tako pri nizki koncentraciji Sb 0,05 kakor tudi pri 0,19 % Sb interkristalne frakture z gosto posejanimi cementnimi izločki (slika 38 x 3000, slika 39 x 3000).

Interpretacija rezultatov

Rezultati mehanskih preiskav jekla predvsem pa žilavosti so dokazali medsebojni vpliv ogljika in antimona v jeklu. Vpliv antimona je najbolj izrazit pri nizkih koncentracijah ogljika ter je močno odvisen od stanja materiala oziroma toplotne obdelave. Maksimalni vpliv antimona je ugotovljen na žilavost v staranem stanju oziroma pri nizkih temperaturah.

Mikrotorzijski preizkusi so pokazali velik vpliv antimona na strižno napetost in notranje trenje. Strižna napetost je odvisna od kota zasuka oziroma deformacije jekla. Medtem ko pri koncentraciji ogljika 0,02 % ugotavljamo bistveni vpliv pri 0,18 % Sb na povišanje strižne napetosti, se pri koncentraciji ogljika 0,1 % in več pomakne ta karakteristična meja proti nizkim koncentracijam antimona, to je okrog 0,11 %. Tak potek krivulj strižne napetosti, v odvisnosti od deformacije, še bolj precizira medsebojni vpliv ogljika in antimona v jeklu.

Spremembe strižne napetosti v odvisnosti od ogljika in antimona so povezane tudi s spremembami dekrementa notranjega trenja. Maksimalni strižni napetosti pri jeklu z 0,02 % C in 0,18 % Sb odgovarja tudi minimalna vrednost dekrementa

notranjega trenja. Ta meja minimalne vrednosti dekrementa notranjega trenja se z naraščajočim ogljikom pomika k nižjim koncentracijam antimonu ter doseže pri 0,65 % C in 0,1 % Sb ostro prelomnico v vrednosti dekrementa. Tudi vpliv ogljika in antimonu na dekrement notranjega trenja je odvisen od kota zasuka oziroma deformacije jekla. Povezava med strižno napetostjo in dekrementom notranjega trenja je torej dokazana za različne koncentracije antimonu in to pri koncentracijah ogljika 0,02 %, 0,4 % in 0,65 %. Odstopanja so le pri ogljiku 0,1 %. Dosedanji preizkusi niso dali pojasnila za abnormno ponašanje jekla z 0,1 % C.

Podobno kakor kažejo krivulje dekrementa notranjega trenja določene minime v odvisnosti od ogljika in antimonu, zasledimo tudi pri krivuljah žilavosti nihanja vrednosti v tem smislu, da z naraščajočim antimonom žilavost ne pada enakomerno, ampak doseže tudi pri višjih koncentracijah ponovno zadovoljive vrednosti. Ta nihanja, ki so posebno izrazita pri jeklih v žarjenem stanju, so nekako analogna s potekom dekrementa notranjega trenja. Minimalni vrednosti notranjega trenja odgovarja tudi minimum žilavosti pri + 20° C.

Kakor smo že omenili, so bili mikrotorzijski preizkusi in preizkusi žilavosti izdelani na različ-

nih šaržah, zato je različna tudi koncentracija antimonu in deloma ogljika. Z ozirom na to minimumi žilavosti in dekrementi notranjega trenja ne nastopajo vedno pri istih koncentracijah Sb. Vsekakor pa lahko ugotovimo povezanost obeh fizikalnih lastnosti. Iz tega sledi, da lahko na osnovi fizikalnih lastnosti, dobljenih pri mikrotorzijskem preizkusu, sklepamo tudi na krhkost jekla pri navadni temperaturi.

Odstopanja v navedenih zaključkih so zopet pri jeklu z 0,1 % C, za kar do danes nismo mogli dobiti pojasnila.

Mehanizem delovanja antimonu v jeklu ni pojasnjen. Z ozirom na to, da opažamo največji vpliv Sb na žilavost po žarjenju oziroma staranju, kakor tudi na osnovi metalografskih ter fraktografskih preiskav sklepamo, da antimon zmanjšuje topnost ogljika v feritu. Izločeni ogljik se razporedi v obliki terciarnega cementita po kristalnih mejah in znižuje kohezijo kristalnih mej. Maksimalni vpliv antimonu na abnormno kristalizacijo cementita zasledimo pri koncentracijah 0,12 do 0,18 %, v odvisnosti od prisotnega ogljika. Ta vpliv dokazujejo metalografske preiskave kakor tudi fraktografije prelomov, ki so pri teh koncentracijah antimonu heterogene, inter in intrakristalne po razkolnih ploskvah kristalov.

ZUSAMMENFASSUNG

Einfluss von Antimon und Kohlenstoff auf die physikalischen Eigenschaften des Stahls bei statischen und dynamischen Versuchen.

Mit Rücksicht auf die dauernde Zunahme der Oligoelemente Zinn, Arsen und Antimon in den Konstruktionsstählen, führten wir Versuche über die Einwirkung von Antimon auf die physikalischen Eigenschaften des Stahls durch.

Die Versuche führten wir auf Stählen mit Kohlenstoffkonzentrationen von 0,02 %, 0,10 %, 0,30 % und 0,65 % und bei Antimonkonzentrationen von 0,05 bis 0,27 % durch. Wir untersuchten die Einwirkung der erwähnten Elemente auf die physikalischen Eigenschaften des Stahls bei dynamischen und statischen Versuchen: Festigkeitseigenschaften, Zähigkeit, Scherspannung und Dekrement der inneren Reibung. Eine besondere Beachtung war auf Versuche auf der Mikrotorsionsmaschine gelegt mit der Ab-

sicht der Feststellung, inwiefern eine Verbindung zwischen der inneren Reibung und der Zähigkeit des Stahles besteht.

Die ausgeführten Versuche bewiesen die gegenseitigen Einwirkungen des Kohlenstoffs und des Antimons auf die physikalischen Eigenschaften des Stahls. Den grössten Einfluss hat Antimon bei niedriggekohlten Stählen. Auf Stahl im normalisierten Zustand hat Antimon nur minimalen Einfluss. In weichgeglühtem oder gealtertem Zustand wirken aber schon geringere Konzentrationen von Antimon wesentlich auf die Zähigkeit des Stahls, besonders bei niedrigeren Temperaturen.

Auf Grund der metalgraphischen und fraktographischen Versuche schliessen wir, dass Antimon die Löslichkeit des Kohlenstoffs im Ferrit verringert und die Kristallisation der Tertiärzementits nach den Kristallgrenzen fördert. Dieses verringert wesentlich die Kohäsion der kristallinen Grenzen und damit auch die physikalischen Eigenschaften des Stahles.

SUMMARY

Regarding continuous increase of tramp elements content (A, Sb) in structural steels the influence of Sb on mechanical properties of steel was examined.

Steels with carbon content 0.02 %, 0.10 %, 0.30 %, 0.65 % and with antimony content from 0.05 % to 0.27 % were examined. The influence of above mentioned elements on physical properties of steel at static and dynamic tests were examined: strength, impact strength, shear stress and decrement of internal friction. Special attention was paid to microtorsional machine tests to find out if any connection between internal friction and impact strength exists.

Influence of carbon and antimony on physical properties of steel were proven by carried out investigations. The highest influence of antimony was observed at low carbon steels. The lowest influence of antimony was noted in normalized form of steel. When steel is fully annealed or aged even small concentration of antimony strongly influence impact strength especially at lower temperatures.

Judging upon microstructure and fracture investigations, antimony is decreasing carbon solubility in ferrite and increasing crystallisation of cementite along grain boundaries. It decreases coherence of grain boundaries strongly and physical properties of steel with it.