

# Vpliv oligoelementov na preoblikovalno sposobnost površine litega jekla

UDK: 669.1:669.3:621.9.011:669-11  
ASM/SLA: D, EG, R5g

M. Torkar, F. Vodopivec, J. Arh

*Nova metoda za preizkušanje preoblikovalne sposobnosti litih preizkušancev omogoča večjo zanesljivost ocenjevanja vpliva oligoelementov na pokljivost. Uporaba litih preizkušancev je omogočila, da smo dosegli rezultat, ki je pomemben tudi za prakso vročega valjanja jekla.*

## 1. UVOD

Kvalitetna jekla imajo v proizvodnem programu slovenskih železarn vedno pomembnejšo vlogo. Zaradi povečanja proizvodnje elektrojekla, se večja delež starega železa v vložku. Vzporedno s tem raste količina oligoelementov v jeklih, ker se kopičijo v jeklu in jih ne moremo odstraniti niti z žilavenjem niti z žlindro. Stalno kopičenje vsebnosti oligoelementov se odraža v slabšanju kvalitete površine vroče valjanih proizvodov.

Oligoelementi: baker, kositer, antimon in arzen imajo manjšo afiniteto do kisika, kot jo ima železo, zato jih selektivna oksidacija površine izrine iz škaže in močno poveča njihovo koncentracijo v obpovršinskem sloju jekla. Pri določenih pogojih ogrevanja se elementi koncentrirajo po kristalnih mejah avstenita. To povzroči zmanjšanje trdnosti zveze med kristalnimi zrni avstenita in nastanek medkristalnih razpok v začetku valjanja. To pokvari površino valjanca in vodi k izmečku. Zato je utemeljeno prizadevanje, da že v vložku dosežemo čim manjšo količino oligoelementov in na ta način dosežemo kvalitetnejše površine valjanih proizvodov. To je eden od pogojev za uporabo jekla pri hladni predelavi, katere cilj je, da daje jeklenim proizvodom potrebne dimenzije, lastnosti in kvaliteto površine.

## 2. NAMEN DELA

S problematiko vpliva oligoelementov na preoblikovalnost jekel smo se ukvarjali že v preteklosti in pojasnili fizikalno-metalurške osnove njihovega obnašanja v obpovršinski plasti jekla pod škažo<sup>1</sup>. Pokazala pa se je potreba, da bi vpliv oligoelementov na preoblikovalnost opredelili v kvantitativni obliki ter najprej preverili in dopolnili merila o vplivu njihove množine na preoblikovalnost, kakršno najdemo v literaturi<sup>2, 3, 4</sup>, nato pa tudi uporabne lastnosti jekel<sup>5, 6, 7, 8</sup>. Zato so slovenske železarne predlagale program raziskav s kompleksnejšimi cilji:

— opredeliti največje koncentracije posamičnih elementov za posamične kvalitete jekel, da se jeklo valja še brez napak in ima pri tem predpisane lastnosti;

— opredeliti za tipične kvalitete jekel interval najmočnejšega vpliva oligoelementov na preoblikovalnost v vročem in preveriti, ali se škodljivi učinek da zmanjšati z enostavnimi tehnološkimi ukrepi.

V letu 1976 je bil realiziran en del naloge, ki je obravnaval vpliv bakra na lastnosti nekaterih jekel<sup>9</sup>.

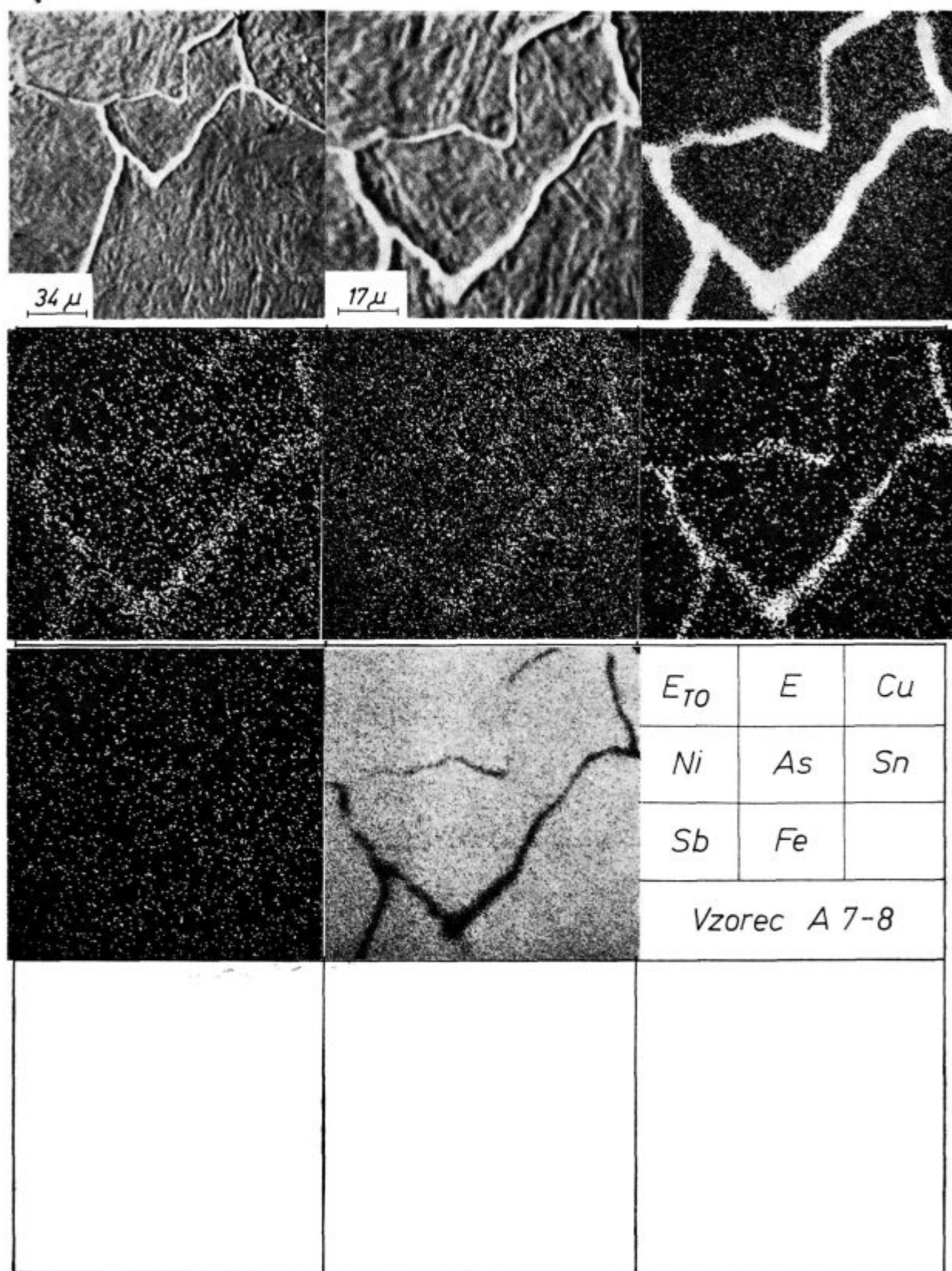
V tem delu pa obravnavamo učinke oligoelementov na preoblikovalno sposobnost jekla. Pri tem smo se omejili na obravnavo učinka bakra in kositra, ki sta najbolj pogosta v jeklih in glede predelavnosti najbolj škodljiva zaradi obogatitve pod škažo.

## 3. METODE DELA

Način industrijskega ogrevanja jekla pred vročim valjanjem ne nudi velike možnosti, da bi odpravili selektivno oksidacijo, ki je naravna posledica nastajanja škaže pri ogrevanju jekla, razen v primeru, če se jeklo ogreva tako, da škaža ne nastane. Debelino in sestavo škaže je mogoče spreminjati s spremembo atmosfere in temperature peči, vendar to ne vpliva zaznavno na selektivno oksidacijo.

Po dosedanjih raziskavah sodeč, je vpliv oligoelementov na preoblikovalno sposobnost najbolj izrazit, če jeklo pred deformacijo ogrejemo na 1150°C in ga pri tej temperaturi tudi deformiramo. Tedaj so fizikalno-metalurški pogoji pod škažo taki, da pride najbolj do izraza zmanjšana trdnost zveze med kristalnimi zrni avstenita.

Če ingote in brame pred zalaganjem na ogrevanje za valjanje ohladimo do temperature, ko se izvrši prekristalizacija površine, se poruši groba lita tekstura ob površini in se spremeni deformacijska sposobnost jekla ob površini. Tak ukrep je zmanjšal pokljivost jekel, ki so pomirjena z aluminijem in imajo nadpovprečno vsebnost aluminija in dušika<sup>10</sup>. Zato smo domnevali, da se splača preveriti, ali ta enostaven tehnološki ukrep vpliva pri deformaciji v vročem tudi na pokljivost jekel, ki je posledica oligoelementov. Da bi to dosegli, je bilo potrebno razviti metodo



Slika 1  
 Obogatitev mej avstenitnih zrn z oligoelementi zaradi selektivne oksidacije

Fig. 1  
 Enrichment of austenitic grain boundaries with trace elements due to selective oxidation

za kvantitativno ovrednotenje vpliva oligoelementov na pokljivost površine jekla, podvržene natezni deformaciji pri upogibu v vročem.

V prvem delu smo s poizkusi preverili uporabnost metode in določili, kako sprememba temperature ogrevanja pred deformacijo in temperatura upogiba vpliva na pokljivost.

V drugem delu pa smo opredelili vpliv naraščanja količine bakra in kositra v jeklu na pokljivost pri konstantnih pogojih ogrevanja jekla pred deformacijo. Pokljivost smo kvantitativno ovrednotili s tem, da smo na natezni strani upognjenih preizkušancev prešteli in izmerili razpoke. To je sicer dokaj zamudno, vendar pa bolj objektivno, kot ocenjevanje po videzu površine preizkušancev po Bornu<sup>2</sup>, kot je bilo do sedaj v splošni rabi. V začetnem delu smo preizkušance pred upogibom ogrevali 2 in 8 ur pri temperaturah od 1000<sup>o</sup> C do 1300<sup>o</sup> C v intervalih po 50<sup>o</sup> C. Uporabili smo industrijsko jeklo z razmeroma visoko količino bakra in kositra, izvaljano v palice 35 × 18 mm. Sestava jekel je navedena v tabeli 1.

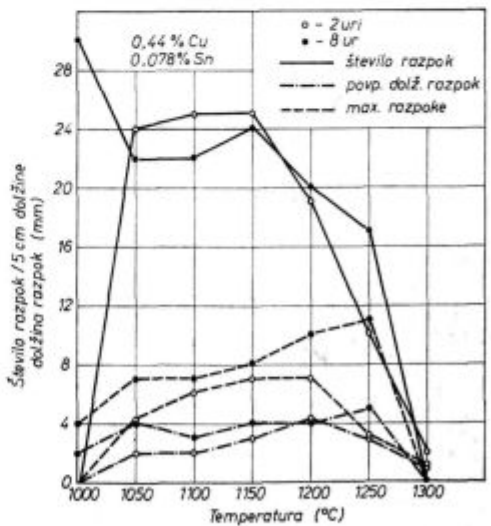
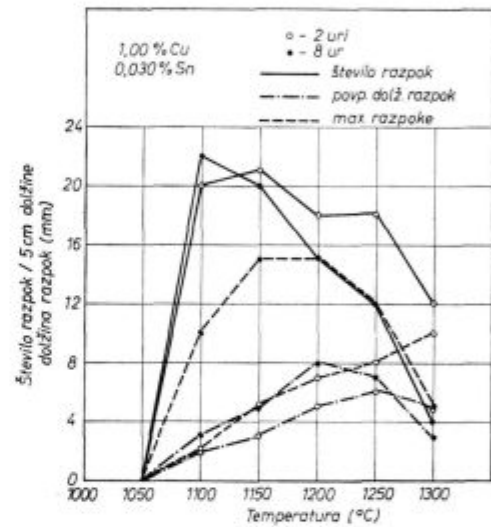
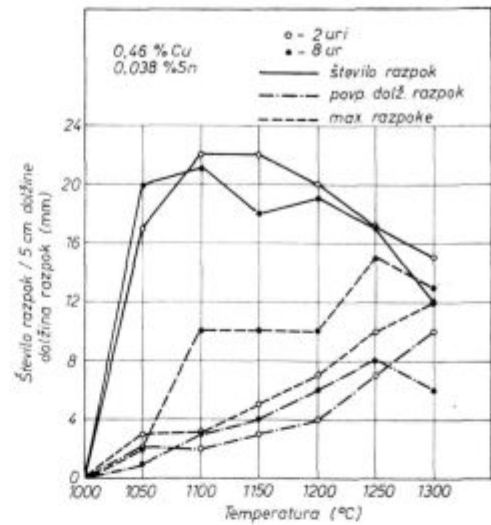
4. REZULTATI

Pri vzorcih jekla A, žarjenih 8 ur pri 1300<sup>o</sup> C, in vzorcih jekla D, žarjenih 8 ur pri 1000<sup>o</sup> C, opazimo, da so meje avstenitnih zrn močno obogatene z bakrom (sl. 1). To je bilo že poznano iz starejših opazovanj<sup>1, 2, 5</sup>. Tekoča faza nastaja vzdolž kristalnih mej, ker je tu difuzija elementov hitrejša kot v notranjosti kristalnih zrn. S tem prihaja v plasti jekla pod škažo do oslabitve zveze med kristalnimi zrni avstenita. Meritve na elektronskem mikroanalizatorju so pokazale v skoraj vseh primerih nad 90 % bakra, do 2 % niklja, do 1,25 % arzena, 0,55 % antimona in do 3,8 % kositra. Obogatitev z bakrom je prevladovala pred obogatitvijo z drugimi elementi zato, ker je bilo v jeklu daleč največ bakra. Z analizami v elektronskem mikroanalizatorju nismo uspeli dognati, ali temperatura ogrevanja jekla vpliva na sestavo kovine vzdolž avstenitnih mej. Podobne sestave smo dobili po kristalnih mejah v jeklu D in v jeklu A, čeprav ima prvo jeklo dvakrat več bakra kot drugo.

V diagramih na slikah 2 do 4 so prikazane odvisnosti med temperaturo deformacije ter površinsko gostoto razpok (število razpok na dolžini 50 mm), največjo in povprečno dolžino razpok, nastalih pri vročem upogibu po 2- in 8-urnem ogrevanju.

Po 2- in 8-urnem ogrevanju število razpok hitro zraste do temperature 1050<sup>o</sup> C do 1150<sup>o</sup> C, nato pa z višanjem temperature deformacije bolj ali manj hitro pada. Relativno največ razpok je na jeklu z 0,078 % kositra.

Odvisnost med temperaturo deformacije in povprečno dolžino razpok je podobna, kot odvisnost med temperaturo deformacije in največjo dolžino razpok.



Slika 2, 3 in 4  
 Odvisnost med temperaturo in deformacijsko sposobnostjo površine jekla, po 2 in 8 urah ogrevanja  
 Figs. 2, 3, and 4  
 Relationship between the temperature and the surface workability of steel after 2 and 8 hour annealing

Tabela 1: Sestava jekel

Jeklo	Kemična sestava v %								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn
A	0,10	0,11	0,40	0,052	0,095	0,46	0,19	0,14	0,038
D	0,13	0,22	0,47	0,044	0,057	1,00	0,15	0,12	0,030
E	0,09	0,16	0,36	0,017	0,035	0,44	0,10	0,10	0,078



D 2-2



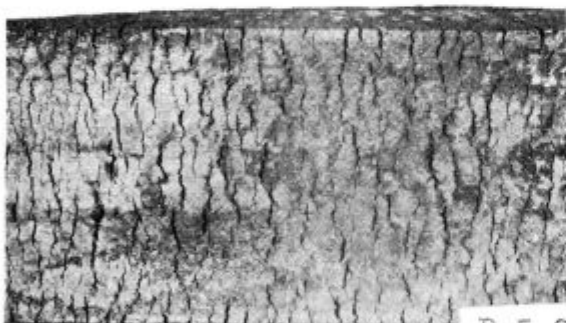
D 2-8



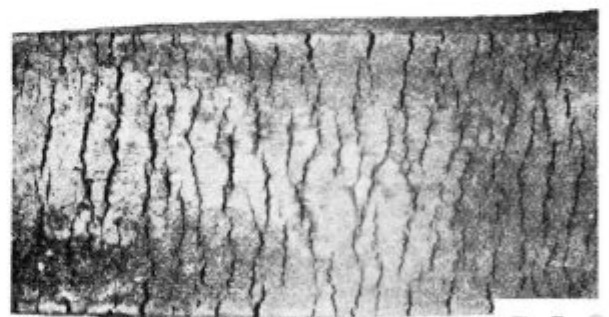
D 3-2



D 3-8



D 5-2



D 5-8



D 7-2



D 7-8

Slika 5

Jeklo D po ogrevanju 2 in 8 ur in upogibu pri 1050° C, 1100° C, 1200° C in 1300° C (od zgoraj navzdol)

Fig. 5

Steel D after 2 and 8 hour annealing and bending at 1050, 1100, 1200, and 1300° C (from top to bottom)

Tabela 2: Sestava vzorcev

Oznaka vzorca	C	Si	Mn	Cu	Sn	Sb
11 H 11 V	0,07	0,59	1,18	0,15	0,011	0,005
12 H 12 V	0,06	0,45	1,03	0,16	0,024	0,005
21 H 21 V	0,12	0,57	1,15	0,18	0,019	0,005
22 H 22 V	0,11	0,51	1,08	0,15	0,048	0,006
31 H 31 V	0,11	0,58	1,15	0,23	0,010	0,006
32 H 32 V	0,11	0,56	1,13	0,25	0,024	0,005
41 H 41 V	0,12	0,59	1,22	0,25	0,033	0,005
42 H 42 V	0,11	0,56	1,16	0,24	0,050	0,004
51 H 51 V	0,09	0,63	1,26	0,45	0,017	0,005
52 H 52 V	0,08	0,60	1,17	0,43	0,019	0,005
61 H 61 V	0,12	0,62	1,24	0,43	0,022	0,006
62 H 62 V	0,12	0,64	1,24	0,44	0,047	0,005
71 H 71 V	0,11	0,63	1,30	0,84	0,010	0,005
72 H 72 V	0,10	0,63	1,29	0,84	0,021	0,005
81 H 81 V	0,12	0,67	1,35	0,89	0,030	0,006
82 H 82 V	0,12	0,64	1,28	0,86	0,046	0,004

Naraščanje količine kositra povečuje število razpok, naraščanje količine bakra pa njihovo dolžino.

Podaljšanje ogrevanja od 2 na 8 ur pred upogibno deformacijo poveča dolžino in število razpok (sl. 5), vendar ne v sorazmerju s podaljšanjem ogrevanja jekla. Zaradi parabolične kinetike tvorbe škaje in odlepljanja plasti škaje od kovine se zmanjša hitrost škajanja jekla, zato je zmanjšana tudi hitrost, s katero se iz škaje odrivata oba oligoelementa.

Razliko v pokljivosti zaradi sestave in temperature lahko razložimo z razliko v velikosti zrn avstenita pri temperaturi deformacije in različno globokega prodiranja bakra in kositra po mejah avstenitnih zrn ter z deležem obeh elementov, ki se zbereta po kristalnih mejah.

## 5. VPLIV SPREMEMBE KOLIČINE BAKRA IN KOSITRA V JEKLU NA POKLJIVOST

### 5.1 Sestava jekel in metodika dela

V prvem delu preiskav smo ugotovili, da selektivna oksidacija najbolj zmanjša preoblikovalnost jekel pri deformaciji po ogrevanju pri približno 1150°C, zato smo preizkuse nadaljevali pri tej temperaturi. Pred deformacijo smo vzorce ogrevali 2 uri. Preizkuse smo izvršili na litih (nepredelanih) preizkušancih, da bi se tako lahko boljše približali razmeram pri valjanju ingotov in ugotovili, ali se da doseči s spremembo ogrevanja pred valjanjem boljšo preoblikovalnost jekla. Uporabili smo enak način vročega upogibanja in smo vzorce po deformaciji kalili v vodi, da bi fiksirali strukturo jekla v trenutku deformacije.

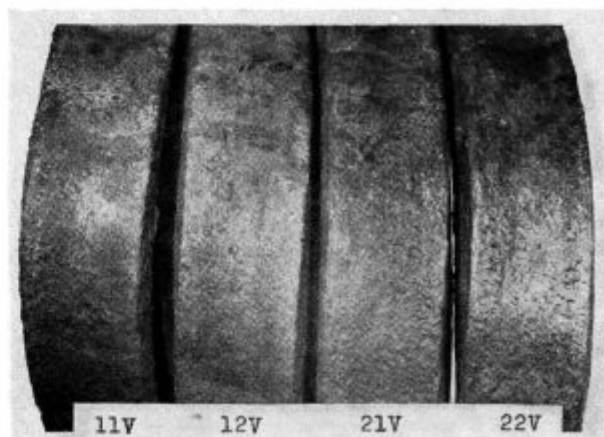
Za preizkus smo uporabili jeklo kvalitete Č 0562, ki je zelo občutljivo na pokljivost pri valjanju zaradi oligoelementov, istočasno pa omogoča, da se vlijejo preizkušanci z zadosti kvaliteto površino. Sestave jekel in oznake vzorcev so navedene v tabeli 2.

Vse šarže smo izdelali v indukcijski peči na metalurškem inštitutu. Vložek, sestavljen iz Darby železa in jekla Č 1632, smo legirali z različnimi količinami bakra in kositra v intervalu od 0,12 do 0,80 % bakra in 0,011 do 0,050 % kositra. Ta interval pokriva skoraj vse količine obeh oligoelementov, ki jih najdemo v industrijskih jeklih.

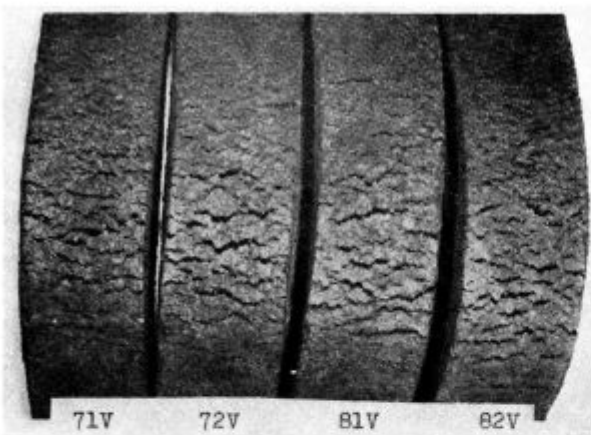
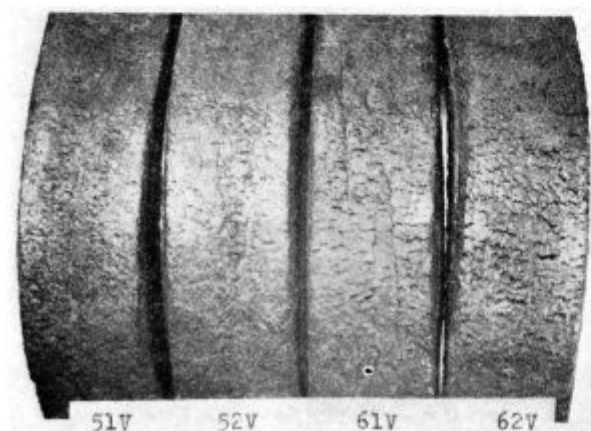
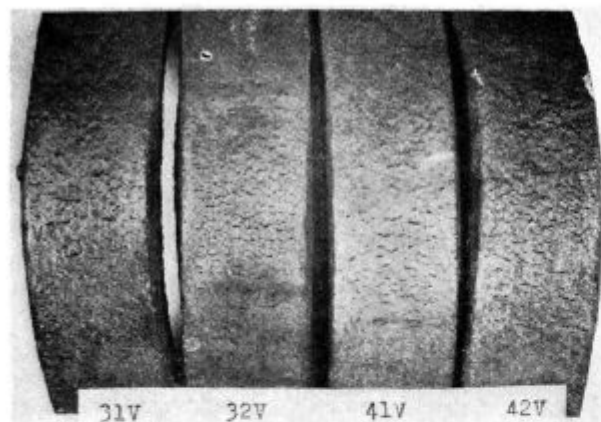
### 5.2 Rezultati

Na slikah 6 do 9 je prikazana natezna površina nekaterih značilnih preizkušancev. Pri neprekristaliziranih vzorcih se drobne razpoke pojavijo že pri 0,16 % bakra in 0,024 % kositra. Po videzu površine bi se dalo sklepati, da že od 0,25 % bakra vpliv tega elementa prevladuje nad vplivom kositra.

Bistveno drugačna je površina deformiranih vzorcev, ki so bili ogreti po prejšnji prekrystalizaciji z ohladitvijo na sobno temperaturo. Na



Slika 6  
Fig. 6

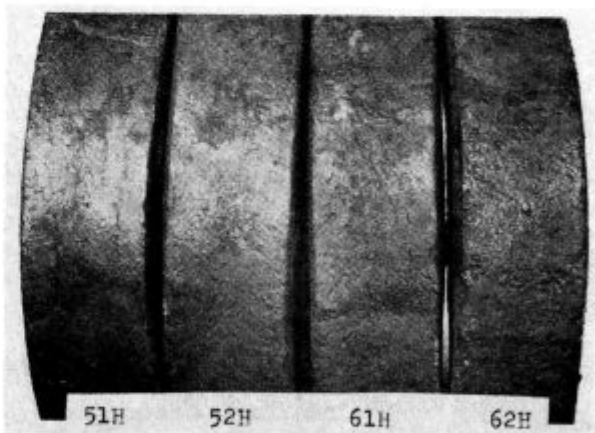
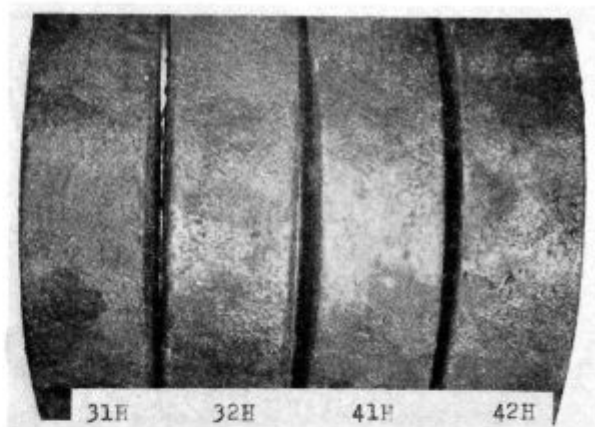
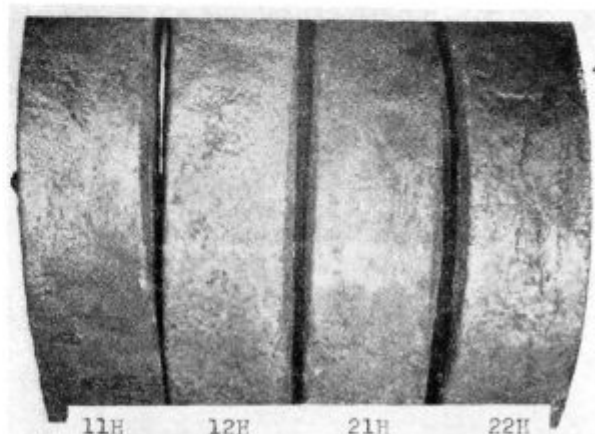


Slika 6, 7, 8 in 9  
Upognjeni, neprekristalizirani vzorci  
Figs. 6, 7, 8, and 9  
Bended untreated samples

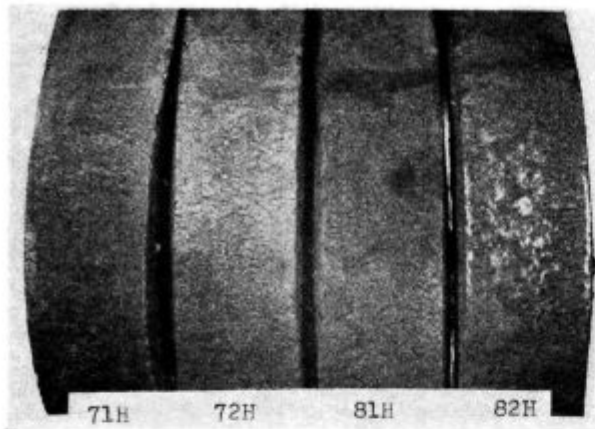
slikah 10 do 13 vidimo, da so razpoke manj številne, krajše, zato tudi manj globoke. To se jasno razloči na sliki 14. Na prekristaliziranem jeklu se pojavijo podobne razpoke pri približno 0,80 % bakra kot na neprekristaliziranem jeklu s približno 5-krat manj bakra. V jeklu s povečano količino bakra so avstenitna zrna velika, v jeklu s kositrom pa precej manjša.

Značilna je oblika razpok. Večinoma so pravokotne ali vsaj zelo pokončne glede na površino. Slabo deformacijsko sposobnost imajo meje, ki so oslabiljene zaradi penetracije bakra. Ko take obogatitve ni več opaziti v mikroskopu, se razpoka ustavi in meja avstenitnega zrna lahko brez škode prenese natezno deformacijo.

Ovrednotenje natezne površine upognjenih vzorcev je omogočilo, da smo kvantitativno opredelili vpliv naraščanja količine bakra in kositra



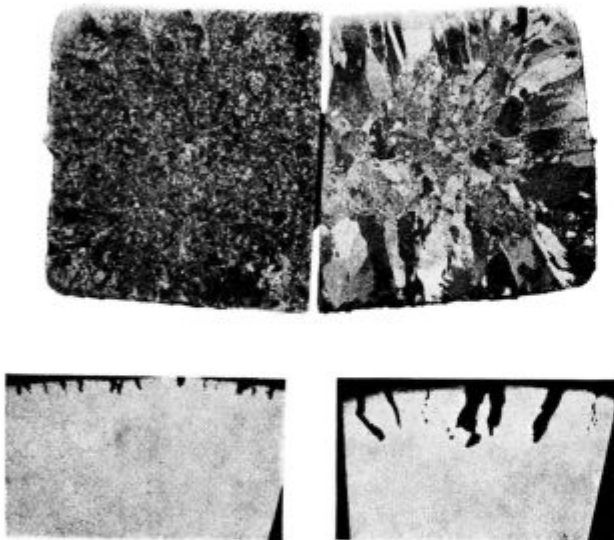
Slika 10, 11, 12  
Fig. 10, 11, 12



Slika 10, 11, 12 in 13  
Upognjeni, prekristalizirani vzorci

Figs. 10, 11, 12, and 13

Bended samples annealed below the lower critical point



Prekristalizirano

Neprekristalizirano

Slika 14

Makrostruktura prekristaliziranega (levo) in neprekristaliziranega (desno) vzorca in upogibne razpoke jekla z 0,86 % bakra in 0,046 % kositra, pov. 2,5 ×

Fig. 14

Macrostructure of annealed samples below the lower critical point (left) and of untreated samples (right), and the bending cracks of steel with 0.86 % copper and 0.046 % tin. Magnification 2.5 ×.

na pokljivost zaradi selektivne oksidacije jekla (sl. 15 in 16).

Povečanje količine bakra v jeklu vodi k rahle-  
mu zmanjšanju gostote razpok na deformirani  
površini. Največja dolžina razpok raste skoraj  
linearno s povečanjem količine bakra v jeklu.  
Tudi povprečna dolžina razpok raste skoraj  
linearno s povečanjem količine bakra v jeklu.

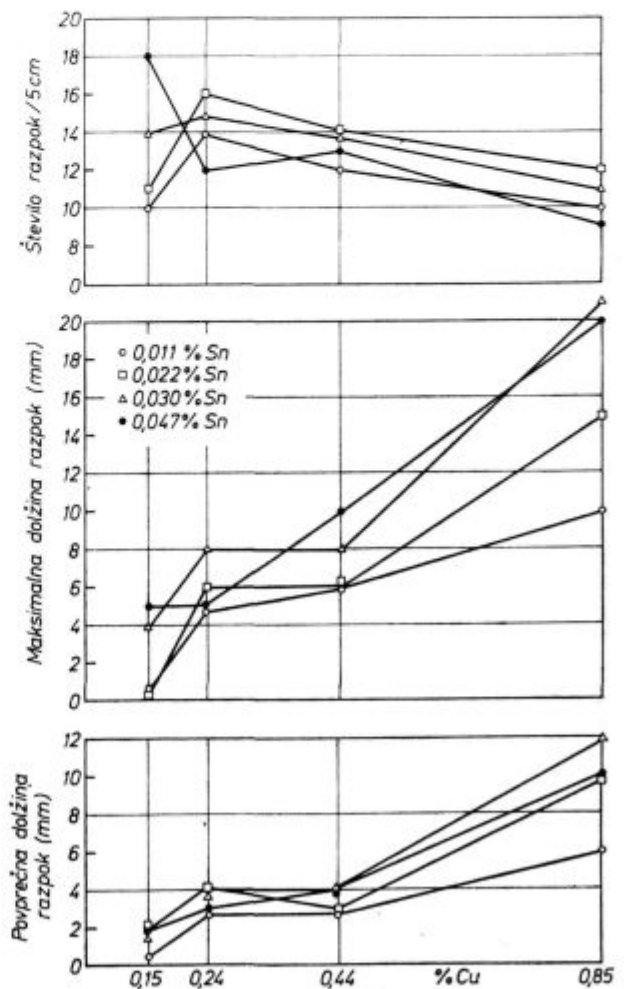
Gostota razpok na površini je praktično neod-  
visna od količine kositra in v splošnem manjša,  
če je v jeklu več bakra.

Dolžina najdaljših razpok raste s povečanjem  
količine kositra v jeklu, vendar je vpliv kositra  
mного manjši kot vpliv bakra. Povprečna dolžina  
razpok je skoraj neodvisna od količine kositra  
v jeklu in je, kot smo že omenili, tem večja, čim  
več je v jeklu bakra pri določeni količini kositra.

## 6. INDUSTRIJSKI PREIZKUS

Rezultate, dobljene v okviru laboratorijskih  
preiskav, smo nato preverili tudi v industrijskih  
pogojih. Kot osnovo smo vzeli jeklo Č 0562, ki  
smo mu dodali 0,89 % bakra in 0,032 % kositra.  
Vlili smo dva 4-tonska bloka, od katerih smo  
enega po vlišanju ohladili do temne površine,  
dr drugega pa takoj založili v peč na ogrevanje. Bloki  
so bili izvaljani v bluming valjarni v železarni  
Jesenice v gredico s presekom 135 × 135 mm.

Rezultati industrijskega preizkusa so potrdili  
laboratorijske ugotovitve. Blok, ki je bil vroče  
založen, je imel, kot smo pričakovali, številne



Slika 15  
Fig. 15

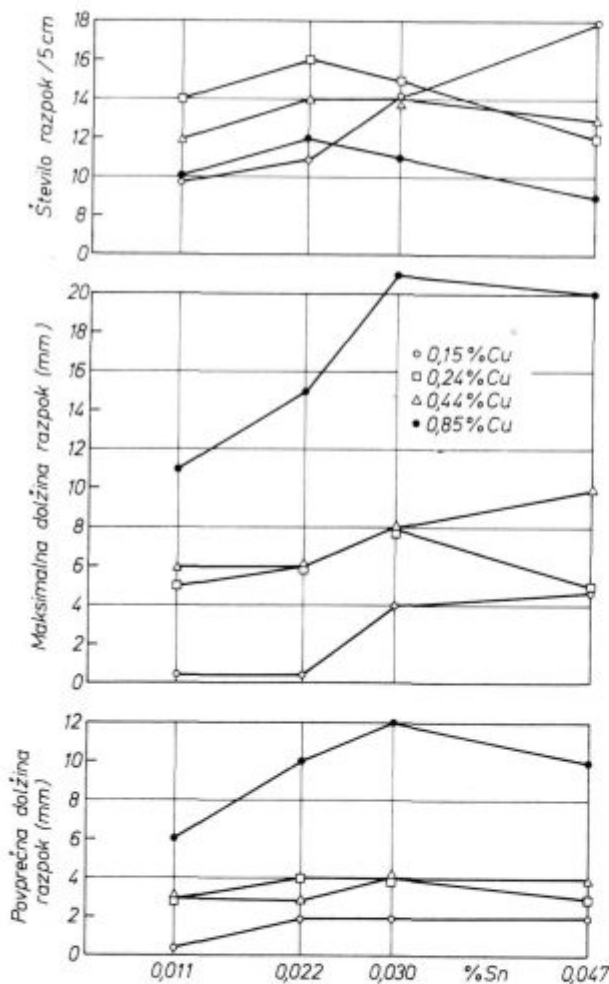
grobe površinske napake (sl. 17), medtem ko se je prekrystaliziran blok, to je po vlišanju ohlajeni blok, izvaljal skoraj brez napak (sl. 18).

Torej lahko od tehnološke aplikacije prekrystalizacije pričakujemo precejšen učinek, saj je v laboratorijskih pogojih dosežena enaka preoblikovalnost prekrystaliziranega jekla z 0,80 % bakra kot pri neprekrystaliziranem jeklu s približno 5-krat manjšo količino bakra. Enake rezultate je dal tudi industrijski preizkus.

### 7. ANALIZA REZULTATOV

1. Znatno napredek pri metodologiji in zanesljivosti ocenjevanja vpliva oligoelementov na pokljivost je bil dosežen z uporabo litih preizkušancev. Samo uporaba litih preizkušancev je omogočila, da smo pri delu dosegli rezultat, ki je pomemben tudi za prakso vročega valjanja jekla.

2. Vpliv bakra in kositra na deformacijsko sposobnost površine jekla po selektivni oksidaciji

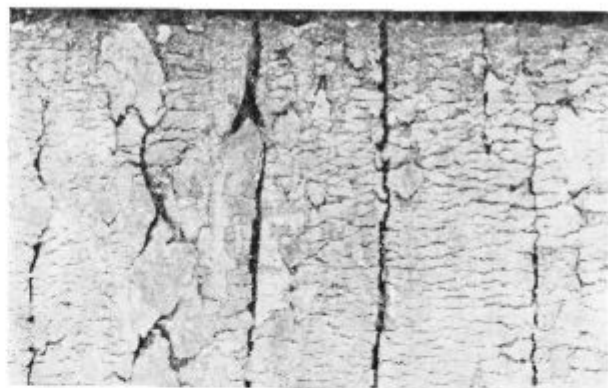


Slika 15 in 16

Vpliv naraščanja količine bakra in kositra na pokljivost jekla zaradi selektivne oksidacije

Figs. 15, and 16

Influence of increased copper and tin content on the crack susceptibility of steel due to selective oxidation

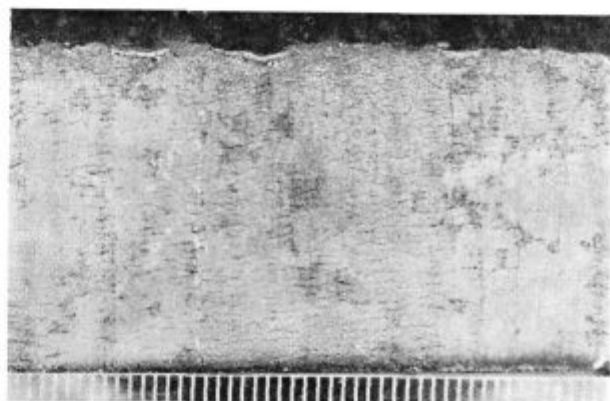


Slika 17

Površina neprekrystaliziranega industrijskega ingota po valjanju v gredico 135 x 135 mm, pov. 1,7 x

Fig. 17

Surface of untreated industrial ingot after rolling into 135 x 135 mm billets. Magnification 1.7 x.



Slika 18

Površina prekrystaliziranega industrijskega ingota po valjanju v gredico s presekom 135 x 135 mm, pov. 1,7 x

Fig. 18

Surface of annealed industrial ingot after rolling into 135 x 135 mm billets. Magnification 1.7 x.

površine je najbolj izrazit pri temperaturi okoli 1150°C. To potrjujejo tudi literaturni podatki.

3. Pri znižanju temperature ogrevanja pred deformacijo se pokljivost zelo hitro zmanjšuje, pri povišanju temperature pa se pokljivost počasi zmanjšuje.

4. Z naraščanjem količine bakra v jeklu raste dolžina razpok, z naraščanjem količine kositra v jeklu pa raste število razpok na površini deformiranega jekla.

5. Zmanjšanje pokljivosti z naraščanjem temperature je premalo pomembno, da bi ga lahko izkoristili kot ukrep za izboljšanje vroče predelavnosti jekel s povišano količino bakra in kositra.

6. Ukrep za zmanjšanje vpliva visoke vsebnosti oligoelementov na preoblikovalnost površine jekla je tehnološko enostaven; ingote in brame je po-



trebno po slačenju iz kokil ohladiti do temne površine pred zalaganjem v peč na ogrevanje pred valjanjem.

7. Potrditev laboratorijskih ugotovitev z industrijskim preizkusom daje dobljenim rezultatom še večjo vrednost.

#### Literatura:

1. L. Kosec, F. Vodopivec, R. Tixier: *Metaux-Corrosion Industries*, maj 1969, 525, 1—17
2. K. Born: *Stahl und Eisen* 73, 1953, 1268—1280
3. D. A. Melford: *Journal of ISI* 200, št. 4, 1962, 290—299
4. D. A. Melford: *Journal of ISI* 204, št. 5, 1966, 495—496
5. C. Rekar, R. Brifah: *Rudarsko-metalurški zbornik*, 1959, št. 3, 227—258
6. R. Brifah, C. Rekar, J. Zvokelj: *Poročilo MI v Ljubljani* 1964
7. E. T. Stephenson: *Journal of Metals*, 26, 1974, št. 3, 48—51
8. R. L. Rickett, W. C. Leslie: *Transactions of the American Society of Metals*, Cleveland, 1959, vol. 51, 310—333
9. A. Kveder: *Poročilo MI*, 1976
10. J. Arh, F. Vodopivec: *Zelezarski zbornik* 4, 1970, 259 do 264

### ZUSAMMENFASSUNG

Die stetige Anhäufung der Spurenelemente im Stahl äussert sich in immer schlechterer Warmverarbeitbarkeit und in der Verschlechterung der Oberflächengüte des Walzgutes. Der Einfluss der Spurenelemente auf die Warmverarbeitbarkeit der Oberfläche ist am deutlichsten ausgeprägt wenn der Stahl vor der Warmverformung auf die Temperatur von 1150°C aufgewärmt und bei dieser Temperatur auch verformt wird.

Wenn man Blöcke vor dem Einsetzen in die Tieföfen auf eine Temperatur abkühlen lässt, bei welcher die Oberfläche umkristallisiert, so ändert sich auch die Verformungsfähigkeit des Stahles an der Oberfläche. Dieser Eingriff hatte die Rissanfälligkeit der Aluminiumberuhigten Stähle mit überdurchschnittlichem Aluminium und Stickstoffgehalt erheblich vermindert.

Diese Technologie haben wir auch an Stählen mit hohem Gehalt von Spurenelementen erprobt. Wir haben eine eigene Methode des Heissbiegeversuches entwickelt,

welche uns die Bewertung der Oberflächengüte der gegossenen Proben möglich machte.

Wir haben zuerst an Versuchen die Anwendbarkeit dieser Methode überprüft und festgestellt wie die Änderung der Erwärmungstemperatur vor der Warmverformung die Rissanfälligkeit der gegossenen Proben mit verschiedenem Kupfer und Zinngehalt beeinflusst. Danach ist der Einfluss der wachsenden Menge von Kupfer und Zinn im Stahl auf die Rissanfälligkeit bei konstanten Erwärmungsbedingungen vor der Warmverformung beurteilt worden.

Von der technologischen Anwendung der Umkristallisierung bei Stählen mit hohem Gehalt von Spurenelementen wird ein grosser Effekt erwartet, denn es ist unter laboratorischen Bedingungen eine gleiche Verformbarkeit des umkristallisierten Stahles mit 0.80% Kupfer erzielt worden, wie bei dem nicht umkristallisierten Stahl mit einem ungefähr fünfmal kleinerem Kupfergehalt. Dieselben Ergebnisse sind auch bei Industrierversuchen erzielt worden.

### SUMMARY

Constant piling of trace elements is expressed in the reduced hot workability of steel and the lower surface quality of the hot rolled products. The influence of trace elements on the surface workability is the most pronounced if steel before the deformation is heated to 1150°C and then worked at this temperature.

If ingots before soaking are cooled that the surface temperature drops below the lower critical point, also the surface workability is changed. Such a measure has reduced the crack susceptibility of aluminium killed steel with an over-average contents of aluminium and nitrogen.

This measure was checked also with the steel having high content of trace elements. An original method of hot bending of cast samples was developed which enabled the quantitative evaluation of the surface quality.

At first, the applicability of the method was tested followed by the determination of the influence of changing temperature of heating before deformation on the crack susceptibility of cast samples with various copper and tin contents. Then, the influence of increased copper and tin amounts in steel on the crack susceptibility was determined for constant heating before the deformation.

Technological application of annealing steel with high content of trace elements below the lower critical point can give good effect since the same workability of so annealed steel with 0.80% copper was achieved in the laboratory conditions as it is with the not treated steel having five times lower copper content. The same result was achieved also in an industrial test.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постоянное накопление содержания олигоэлементов отражается в ослаблении пластичности стали в горячем состоянии, и в ослаблении качества поверхности горяче катаных изделий. Влияние олигоэлементов на пластичность поверхности более всего выразительно, если до деформации сталь согрета на  $t$ -ру 1150°, а сама деформация при этой же  $t$ -ре и выполнена.

Если слитки до загрузки на намеченный нагрев предварительно охладить на  $t$ -ру, при которой происходит перекристаллизация поверхности, изменяется также пластичность поверхности стали. Такое мероприятие уменьшает наличие трещин в сталях, успокоенных с алюминием, если содержание алюминия и азота выше среднего значения.

С этой целью были выполнены исследования, чтобы проверить описанное поведение сталей также с высоким содержанием олигоэлементов. Для этого выработан собственный метод для изгиба отлитых образцов в горячем состоянии, который дает

возможность выполнить также качественную оценку качества поверхности.

С опытами сперва проверили применимость этого метода и определили, каким образом изменение  $t$ -ра нагрева до деформации влияет на образование трещин отлитых образцов с различным содержанием меди и олова. Затем определяли влияние постепенного увеличения содержания меди и олова в стали на образование трещин при постоянных условиях нагрева до деформации.

От технологического применения перекристаллизации сталей с высоким содержанием олигоэлементов можно ожидать значительный эффект. Так например, при лабораторных условиях пластическое трансформирование перекристаллизованной стали возможно с содержанием около 0,80 % меди, между тем как, неперекристаллизованная сталь выполняет условия только при пять раз меньшем содержании меди. Одинаковые результаты получены также с промышленными опытами.