

ŽELEZARSKI ZBORNIK

VSEBINA

	Stran
Kosec L., F. Vodopivec, Metalurški inštitut Ljubljana, R. Tixier IRSID VPLIV ANTIMONA, ARZENA, BAKRA IN KOSITRA NA TVORBO OBOGATENE PLASTI PRI OKSIDACIJI MEHKEGA JEKLA	65
Prešeren Alojz, Metalurški inštitut Ljubljana STUDIJ TVORBE DEZOKSIDACIJSKIH PRODUKTOV IN NJIHOVO IZLOČANJE V ZLINDRO	89
Rode B., J. Rodič, Železarna Ravne STATISTIČNO PLANIRANJE IN VREDNOTENJE METALURSKIH RAZISKAV	99
Pratnekar Tone, Železarna Ravne RAZISKAVE OBSTOJNOSTI BRZOREZNIH JEKEL	113
Bratina Janez, Železarna Ravne DOMAČI UPOROVNI MATERIALI ZA VISOKE TEMPERATURE	133

1968 · LETO II **2**

VSEBINA

	Stran
Kosec L., mag. inž., F. Vodopivec dr. inž., Metalurški inštitut Ljubljana	
Vpliv antimona, arzena, bakra in kositra na tvorbo obogatene plasti pri oksidaciji mehkega jekla	65
DK: 669.14 : 621.78	
ASM/SLA: CNg; J4a—2.60; M21c; M21e	
Prešeren Alojz, dipl. inž., Metalurški inštitut Ljubljana	
Studij tvorbe dezoksidacijskih produktov in njihovo izločanje v žlindro	89
DK: 669.187.5 — 669.046.55	
ASM/SLA: D6; D11r; S11f; S11r	
Rode Boštjan, dipl. inž., Jože Rodič, dipl. inž., Železarna Ravne	
Statistično planiranje in vrednotenje metalurških raziskav	99
DK: 519.28 : 518.5	
ASM/SLA: S12j, U4k	
Pratnekar Tone, dipl. inž. Železarna Ravne	
Raziskave obstojnosti brzoreznih jekel	113
DK: 669.14.018.252-3 — 621.9.011	
ASM/SLA: TSm, G17k	
Bratina Janez, dipl. inž., Železarna Ravne	
Domači uporovni materiali za visoke temperature	133
DK: 669.018.54	
ASM/SLA: SGAq	

I N H A L T

	Seite
Kosec L., mag. inž., F. Vodopivec dr. inž., Metalurški inštitut Ljubljana Der Einfluss von Sb, As, Cu und Sn auf die Bildung der angereicherten Schichte bei der Oxidation von Weicheisen	65
DK: 669.14 : 621.78	
ASM/SLA: CNg; J4a—2.60; M21c; M21e	
Prešeren Alojz, dipl. inž., Metalurški inštitut Ljubljana Studie über die Bildung von Desoxydations- produkten und ihre Ausscheidung in die Schlacke	89
DK: 669.187.5 — 669.046.55	
ASM/SLA: D6; D11r; S11f; S11r	
Rode Boštjan, dipl. inž., Jože Rodič, dipl. inž., Zelezarna Ravne Statistische Planung und Wertung der metal- lurgischen Untersuchungen	99
DK: 519.28 : 518.5	
ASM/SLA: S12j, U4k	
Pratnekar Tone, dipl. inž. Zelezarna Ravne Untersuchungen der Beständigkeit von Schnellschneidestählen	113
DK: 669.14.018.252-3 — 621.9.011	
ASM/SLA: TSm, G17k	
Bratina Janez, dipl. inž., Zelezarna Ravne Widerstands materiale	133
DK: 669.018.54	
ASM/SLA: SGAq	

CONTENTS

	Page
Kosec L., mag. inž., F. Vodopivec dr. inž., Metalurški inštitut Ljubljana Influence of Sb As, Cu and Sn on enriched layer formation at oxidation of low carbon steel	65
DK: 669.14 : 621.78	
ASM/SLA: CNg; J4a—2.60; M21c; M21e	
Prešeren Alojz, dipl. inž., Metalurški inštitut Ljubljana A Study on Formations of Deoxydation Pro- ducts and their Precipitation into Slag . . .	89
DK: 669.187.5 — 669.046.55	
ASM/SLA: D6; D11r; S11f; S11r	
Rode Boštjan, dipl. inž., Jože Rodič, dipl. inž., Železarna Ravne Statistical Planning and evaluation of Data in Metalurgical Reseach	99
DK: 519.28 : 518.5	
ASM/SLA: S12j, U4k	
Pratnekar Tone, dipl. inž. Železarna Ravne A Study on Durability of High Speed Steels	113
DK: 669.14.018.252-3 — 621.9.011	
ASM/SLA: TSm, G17k	
Bratina Janez, dipl. inž., Železarna Ravne Resistive Materials	133
DK: 669.018.54	
ASM/SLA: SGAq	

Vpliv antimona, arzena, bakra in kositra na tvorbo obogatene plasti pri oksidaciji mehkega jekla

Z metalografsko analizo smo ugotavljali morfološke značilnosti obogatenih plasti nastalih pri površinski oksidaciji mehkega jekla. Na osnovi teh opazovanj in z rezultati analize na mikrosondi, ki nam pokaže absolutne in relativne obogatitve posameznih oligoelementov v kovini pod oksidom, si lahko zgradimo predstavo o škodljivem vplivu oligoelementov na toplo preoblikovanje mehkega jekla. Problem sam je zanimiv tudi zato, ker pokaže, da se takšen kompleksen tehnološki pojav kot je razpokanje v vročem, da obrazložiti le s sintezo več »elementarnih« procesov.

1. UVOD

Analiza večine masovnih jekel pokaže, da vsebujejo širši ali ožji spekter elementov, ki so posledica nečistega vložka in katerih z današnjo tehnologijo izdelave jekla ni moč odstraniti. Teh elementov, ki so dobili skupno ime oligoelementi ali pa rezidualni elementi, vsebuje jeklo od nekaj tisočink do nekaj desetink procenta. Spoznanja o ponašanju in vplivu posameznih oligoelementov so se zadnja leta zelo razširila, (1) tako da so danes poznane obširne študije o njihovem vplivu na lastnosti jekel v različnih delovnih pogojih.

Največ raziskav je bilo doslej usmerjenih na baker, kositer, arzen in antimon. Vzrok tega zanimanja je prav enostaven, saj je že dokaj dolgo znano, da vplivata posebno baker in kositer neugodno na preoblikovanje takega jekla v vročem (2). Metalurgi so že pred časom ugotovili, da je vzrok občutljivosti jekla na razpokanje v vročem predvsem v sestavi trdnega jekla. Pri segrevanju takega jekla v oksidativni atmosferi pride do znane pojave selektivne oksidacije. Le-ta je posledica heterogene elementarne sestave jekla in dokaj različnih fizikalno-kemijskih lastnosti posameznih elementov v jeklu.

Aktivnost železa je na mejni ploskvi z atmosfero in kasneje z oksidom, mnogo večja od aktivnosti oligoelementov. Zato se prioritetno oksidira železo, oligoelementi pa se v množini, ki ustreza masi oksidirane železa, zbirajo v ozkem pasu kovine pod oksidom.

Sestava te obogatene plasti je odvisna predvsem od sestave jekla in pogojev oksidacije. Pod

oksidom nastaja praktično nova zlitina, katere lastnosti določajo tudi lastnosti površine jekla med toplim preoblikovanjem.

Vsebinsko zelo bogate ugotovitve je objavil že Born (2), pa tudi mnogi drugi raziskovalci so potrdili škodljiv vpliv površinske oksidacije trdnega jekla. (3, 4, 5). Zelo natančno so bile raziskane obogatitve z arzenom (6, 7, 8, 9, 10). Možnosti, ki jih je na tem področju odprla uporaba mikrosonde, sta v svojih raziskavah izkoristila Melford (11, 12) in Salter (13). Melford je preučeval ponašanje različnih elementov med površinsko oksidacijo jekla. Svoje raziskave na jeklih je dopolnil še s študijami modelov obogatenih plasti, to je zlitin, katerih sestava je enaka povprečni sestavi obogatenih plasti. Na podoben način je študiral Salter sestavo različnih faz, ki nastajajo med segrevanjem ternarnih zlitin železa, bakra ter antimona, arzena, kositra, niklja in mangana, v temperaturnem intervalu med 900 in 1250° C. Zasedoval je porazdelitev elementov med posameznimi fazami in določil nekatere fizikalne lastnosti teh faz (npr. površinske napetosti).

Namen našega dela je bil razširiti poznavanje fenomena površinske oksidacije mehkih jekel, ki vsebujejo baker, arzen, kositer ter antimon. Hoteli smo določiti vpliv teh elementov samih ali pa v medsebojnih kombinacijah na morfoložijo obogatene plasti in na stopnjo obogatitve med selektivno oksidacijo. Zanimala nas je tudi primerjava ugotovitev, ki jih je dobil Salter na »statičnih« modelih v ravnotežju z interakcijo naštetih elementov, med potekom kompleksnega in neprekinjenega pojava površinske oksidacije.

Opisati smo poskušali tudi mehanizem rasti obogatene plasti in zaporedje faznih transformacij, do katerih prihaja v času oksidacije, kot nujna posledica transporta snovi v dveh nasprotnih smereh.

2. POSKUSNA TEHNIKA

Sestavo jekel, ki smo jih uporabili za večino poskusov, prikazuje tabela št. 1. Nekatere poskuse smo napravili tudi na jeklih, katerih sestava v tej tabeli ni podana.

Tabela 1

Sestava jekel

Jeklo	As	Sb	Količina v %				
			Sn	Cu	C	Mn	Si
1	—	0,088	—	0,017	0,16	0,11	0,21
2	—	0,10	—	0,22	0,16	0,11	0,21
3	—	sledi	0,12	0,02	0,25	0,15	0,23
4	—	sledi	0,093	0,25	0,25	0,15	0,23
5	0,024	—	0,002	0,28	0,18	0,42	0,23
6	0,165	0,018	0,002	0,23	0,17	0,49	0,27
7	0,024	0,058	0,005	0,29	0,10	0,33	0,22
8	—	0,057	0,15	0,28	0,1	0,09	0,04
9	0,69	0,080	0,14	0,27	0,1	0,06	0,06
10	0,69	0,080	0,14	0,27	0,1	0,06	0,06

Večino talin smo izdelali v indukcijski peči na Metalurškem inštitutu. Nekaj pa jih je bilo izdelanih v Železarni Jesenice z namenom, da ugotovijo nekatere tehnološke lastnosti jekel pri toplen preoblikovanju in vpliv oligoelementov na žilavost ob zarezi (3).

Osnova nam je bilo zelo čisto švedsko železo za releeje, baker smo dodali v obliki katodnega bakra, ostale tri elemente pa v ustreznih ferozlitinah. Le-te smo izdelali iz železovega prahu in iz tehnično čistega antimona in kositra ter zelo čistega arzena. Koncentracije oligoelementov so v večini primerov višje od normalnih količin v večini masovnih jekel.

Ingote smo skovali v palice premera 14 mm, jih normalizirali in iz njih pripravili poskusne valjčke s premerom 12 mm in višine približno 10 mm. Vse vzorce smo oksidirali na temperaturi nad A_{c_3} , premeno med 955 in 1140° C, koder je bila struktura jekla povsem monofazna (avstenit). Oksidacijska atmosfera je bila sestavljena iz dušika, vodika in vodne pare (32 : 8 : 60). Iz literature⁽¹⁴⁾ je znano, da pri oksidaciji v atmosferah z nizkim parcialnim tlakom kisika, nastaja nad določeno temperaturo samo wüstit. Ta je zelo plastičen, se trdno drži kovine in omogoča nemoten proces oksidacije. Njegova kristalna zgradba pa omogoča zelo intenziven transport železovih ionov na površino, kar močno poveča hitrost oksidacije. Pri oksidaciji na zraku se tvorijo na površini v zaporednih plasteh vsi trije železovi oksidi (wüstit, magnetit in hematit), njihova kombinacija pa nima več takih plastičnih lastnosti. Zato so pogosto polni mehanskih napak: razpok in mehurjev.

Taki sekundarni efekti vplivajo tako, da se pogoji oksidacije spremenijo in povzročajo motnje v zveznosti procesov oksidacije in obogatitve.

Oksidna plast, nastala v opisanih pogojih, je bila debela od 0,6 do 1,5 mm. Skoraj povsem enako debele plasti dobimo z oksidacijo v identičnih pogojih časa in temperature na zraku. Kinetika rasti oksidne plasti je sledila paraboličnemu zako-

nu, kar kaže, da proces oksidacije ni bil moten. Pri metalografski preiskavi prečnih prerezov oksidnih plasti nismo opazili magnetita, kar je jasen dokaz, da ni bil tok železovih ionov na površino prekinjen z razpokami v adherenci ali z razpokami v oksidu (15). Oksidni sloj je bil na strani atmosfere sestavljen povsem iz wüstita, v notranjem delu pa še iz kompleksnih oksidov silicija, fosforja in kroma.

Po oksidaciji smo vzorce hitro ohladili, da bi čimbolj verno ohranili obliko in sestavo obogatene plasti kovine.

Vzorce za mikroskopsko preiskavo smo pripravili po postopkih primernih za kombinacije oksidkovina. Jedkali smo z znanimi jedkali po Dickensonu, po Steadu, Carapelli in z različnimi raztopinami solne, solitrne in pikrinske kisline. Najbolj učinkovito je jedkanje po Dickensonu. Vzorec za analizo na mikrosondi smo pripravili tako kot zahteva posamezen tip aparature.

3. REZULTATI PREIZKUSOV

3.1. Morfologija in sestava obogatene plasti

3.1.1 Splošne značilnosti

Izoblikovanje obogatene plasti je odvisno od temperature, oksidacije in vsebnosti bakra, arzena, antimona in kositra. Največji vpliv ima prisotnost bakra. Od njegove množine in od kombinacije z ostalimi tremi oligoelementi je odvisno ali se tvori obogatena plast, ki je lahko povsem zvezna in enakomerna ali pa neenakomerna in ločena v posamezne otoke. Na osnovi opazovanj številnih vzorcev lahko ločimo naslednje tipične oblike obogatene plasti kovine:

— zvezna obogatena plast enakomerne debeline, ki ima redke in plitve penetracije vzdolž kristalnih mej osnovne kovine,

— zvezna plast, katere debelina se spreminja iz enega kristalnega zrna v drugo in ki ima številne razvejane penetracije vzdolž kristalnih mej osnovne kovine,

— nezvezna obogatena plast z mnogimi globokimi penetracijami vzdolž kristalnih mej,

— obogatena plast, sestavljena iz penetracij vzdolž kristalnih mej, ki ima samo na manjših delih mejne površine kovina-oxid obliko plasti,

— obogatena plast s številnimi nakopičenji obogatene kovine in penetracijami vzdolž kristalnih mej,

— obogatena cona sestavljena iz ločenih otokov obogatene kovine.

Prvi dve obliki obogatene plasti se pojavljata pri jeklih, ki vsebujejo arzen, kositer in antimon posamično ali v različnih medsebojnih kombinacijah brez bakra.

Ta tip smo opazili tudi pri jeklih, ki so vsebovala nad 0,05 % arzena, pa čeprav je bil prisoten baker in če temperatura oksidacije ni preseгла tališča bakra.

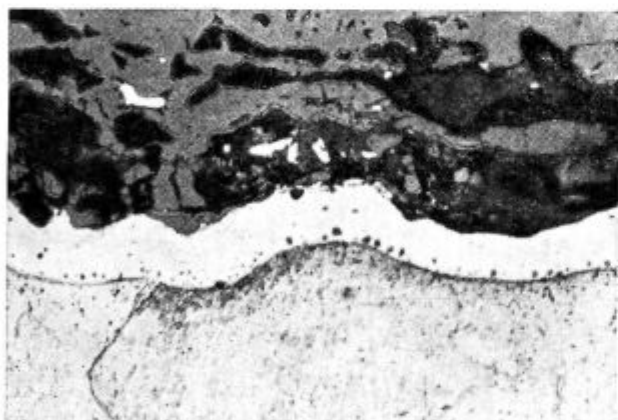
Druge oblike se pojavljajo kot rezultat vpliva bakra v kombinacijah z antimonom in kositrom ter delno arzenom. Važno vlogo pa igra vseskozi tudi temperatura oksidacije.

Penetracije sledijo ali mejam feritnih zrn, če so slednja rasla tako, da je iz enega avstenitnega zrna nastalo eno feritno, sledijo pa lahko mejam avstenitnih in feritnih zrn, ali pa samo mejam avstenitnih zrn. Menja se tudi njihova oblika ter fazni sestav.

Pri jeklih z arzenom, kositrom in antimonom je bila pri zadostnem trajanju oksidacije obogatena plast sestavljena iz dveh podslojev: iz feritnega ob oksidu in iz avstenitnega v stiku z osnovno kovino. V jeklih, ki so vsebovala baker, je bila obogatena plast eno, dvo ali trofazna. Opazili smo tudi, da arzen zmanjšuje število in globino penetracij vzdolž kristalnih mej in izgleda, da je prisotnost tega elementa ugodna za nastanek enakomerne in zvezne obogatene plasti. Taka plast raste v debelino po kinetiki, ki je podobna kinetiki rasti oksida. Med splošne značilnosti lahko štejemo tudi pojav notranje oksidacije obogatene plasti, ki se kaže s prisotnostjo kompleksnih oksidov v tem delu kovine.

3.1.2 Jeklo z antimonom ter antimonom in bakrom

Po oksidaciji mehkega jekla legiranega z 0,088 % Sb na temperaturah 1050° C in 1125° C smo opazili, da je obogatena plast zvezna in da se njena debelina le malo menja od enega kristalnega zrna do drugega (sl. 1, 2).



Slika 1

Jeklo z 0,088 % Sb, 0,017 % Cu, oksidirano 8^h, 1050° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano

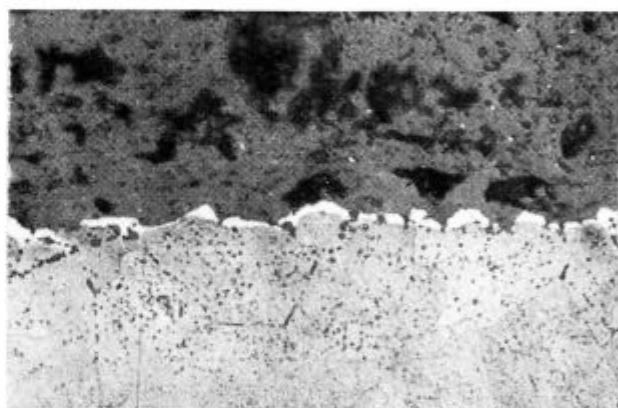
Penetracije vzdolž kristalnih mej so zelo redke. Kljub zelo nizkemu bakru, smo na nekaterih krajih ob meji z oksidom opazili fazo bogato z bakrom. Močno jedkanje je pokazalo tudi meje stebrastih kristalov, kar kaže, da je že na temperaturi oksidacije prišlo do $\gamma \rightarrow \alpha$ premene v delu na strani oksida, kjer je obogatitev preseгла topnost antimona v avstenitu (16, 10).



Slika 2

Jeklo z 0,088 % Sb, 0,017 % Cu, oksidirano 7^h, 1125° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano

V jeklu, legiranem z antimonom in bakrom, smo po oksidaciji pod 1000° C opazili fazo bogato z bakrom izločeno na mejni površini z oksidom. Faza je bila izločena v številnih zrnih tako, da je sestavljala skoro zvezan sloj. (sl. 3)



Slika 3

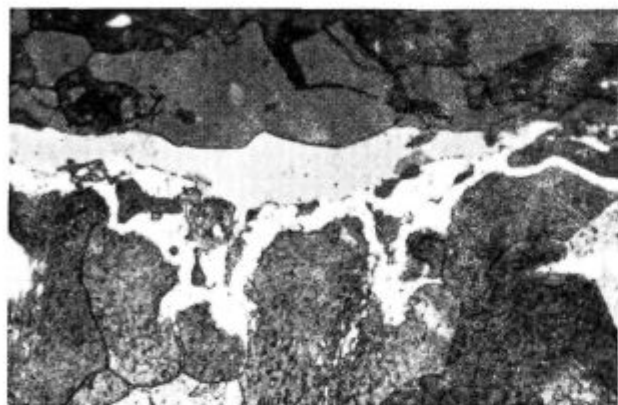
Jeklo z 0,10 % Sb, 0,22 % Cu, oksidirano 20^h, 970° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano

Videz obogatene cone kaže, da se baker in antimon zbirata na istem kraju, saj s pomočjo jedkanja nismo mogli ugotoviti nobene obogatitve antimona v okolišnem feritu. Obogatitev je vse-kakor pod mejo občutljivosti jedkala (0,2...0,3 % legiranega elementa v feritu).

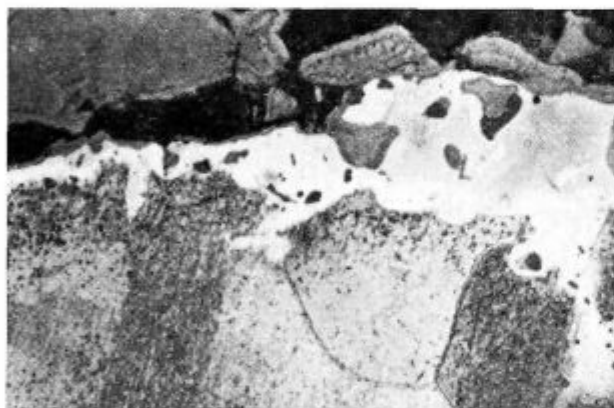
Po oksidaciji na 1050° C je bila obogatena plast neenakomerna, večkrat prekinjena, ponekod pa smo opazili tudi lokalna nakopičenja obogatene kovine (sl. 4).

Penetracije vzdolž kristalnih mej v osnovno kovino so številne in globoke. V mnogih primerih smo opazili v osi penetracij tanko žilo faze bogate z bakrom. Obogatena plast, nastala nad 1100° C, ima enake značilnosti. Opazili smo pojave močne nehomogenosti na področju faz bogatih z bakrom ter velika lokalna nakopičenja obogatene kovine (sl. 5, 6).

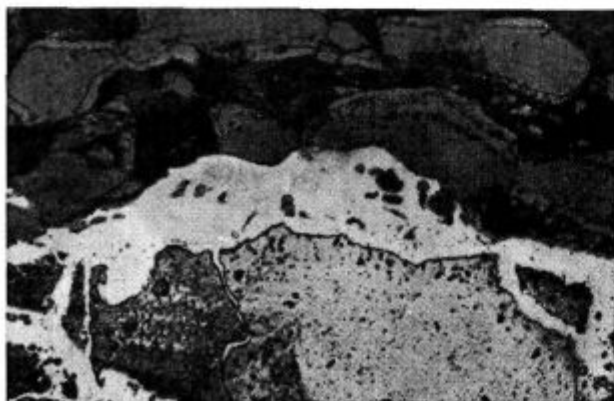
Scanning analiza na vzorcu oksidiranem na 1050° C je pokazala, da sta baker in antimon obogatena na istem kraju: na meji z oksidom (sl. 7) in v penetracijah vzdolž kristalnih mej (sl. 8, 9). Na osnovi tega lahko sklepamo, da je skoraj ves antimon zbran v kovini obogateni z bakrom ter da vsebnost teh dveh elementov skokoma pade na količino, ki se ne razlikuje mnogo od količine v osnovni kovini.



Slika 4
Jeklo z 0,10 % Sb, 0,22 % Cu, oksidirano 5^h, 1050° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano



Slika 5
Jeklo z 0,10 % Sb, 0,22 % Cu, oksidirano 5^h, 1110° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano



Slika 6
enako kot slika 5

3.1.3 Jeklo s kositrom in bakrom

Pri jeklu legiranem s kositrom je obogatena plast nastala na 1050° C precej enakomerna, po večini zvezna in le na nekaj krajih prekinjena s penetracijami vzdolž kristalnih mej (sl. 10, 11). Nad 1100° C je nastala skoraj povsem enakomerna zvezna plast brez izrazitih penetracij v osnovno kovino. Tudi tu smo opazili na ozkem področju obogatene kovine pod oksidom stebraste kristale, ki kažejo, da je v tem delu kovine že na temperaturi oksidacije prišlo do fазne premene $\gamma \rightarrow \alpha$.

Dodatek bakra povzroči že pod 1000° C nastanek nezvezne in neenakomerne obogatene plasti, s številnimi globokimi penetracijami vzdolž kristalnih mej (sl. 12). Pri oksidaciji na 1050° C in na 1100° C smo opazili številna nakopičenja obogatene kovine ter globoke penetracije vzdolž kristalnih mej (sl. 13, 14, 15).

Analiza z mikrosondo je pokazala, da je razdelitev elementov v obogateni plasti vzorca oksidiranega pri 1040° C enaka oni na vzorcu oksidiranem na 1110° C (sl. 16, 17, 18, 19).

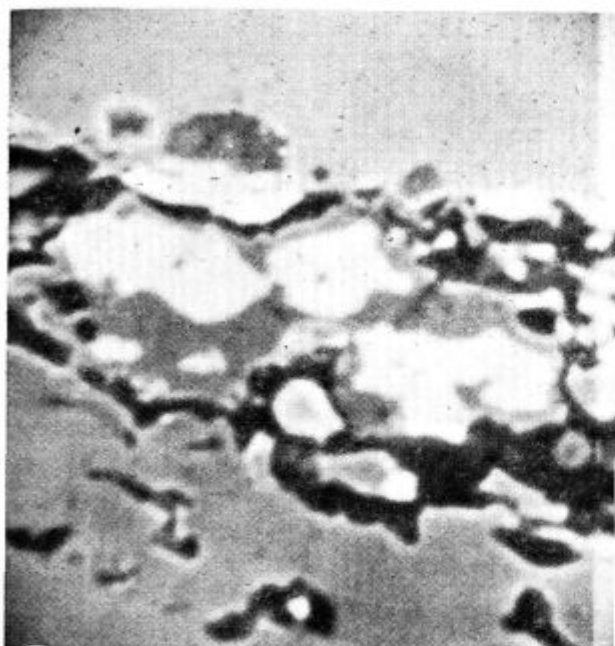
Baker in kositer se koncentrirata na istem kraju, kjer je tudi manjše nakopičenje antimona, čeprav so v jeklu le sledovi tega elementa. Na meji obogatenih con pade vsebnost bakra in kositra skokovito na količine (sl. 17, 19), ki se ne razlikujejo bistveno od količin teh elementov v osnovni kovini. Spremembe koncentracij teh elementov v obogateni plasti pa niso velike.

3.1.4 Jeklo z arzenom in bakrom

Pri oksidaciji na 950° C je v jeklu z nizkim arzenom (0,024 % As) in relativno visokim deležem bakra (0,3 % Cu) nastala obogatena plast (mrežastega) aligatorskega videza z globokimi penetracijami vzdolž kristalnih mej (sl. 20). Če smo povečali temperaturo oksidacije ali pa vzeli jeklo z višjim odstotkom arzena, je dobila obogatena plast bolj regularno obliko (sl. 21, 22, 23).

Debelina obogatene plasti je pri istih pogojih oksidacije naraščala s količino arzena v jeklu. Pri temperaturi 1050° C se je v jeklih, ki so vsebovala nad 0,05 % As izoblikoval enakomeren, zvezan, širok obogateni pas, ki kaže na nekaterih krajih tendenco penetracij po kristalnih mejah. (sl. 24, 25.) Zrna z bakrom bogate faze so bila ločena med sabo na mejni površini kovina-oxid in redkeje v notranjosti kovine obogatene z arzenom. Samo na redkih krajih je kovina bogata z bakrom prodrla preko sloja obogatene z arzenom in po kristalni meji segla v osnovno kovino (sl. 26).

Pri oksidaciji na 1110° C je nastala zvezna, nekoliko neenakomerna in večfazna obogatena plast (sl. 27). Videz obogatene plasti kaže, da je bila kovina bogata z bakrom ob meji z oksidom tekoča na temperaturi oksidacije. Tekoča faza je bila ločena z dokaj širokim pasom z arzenom obogatenega ferita in avstenita od osnovne kovine. Penetracije vzdolž kristalnih mej so bile zelo redke in plitve.

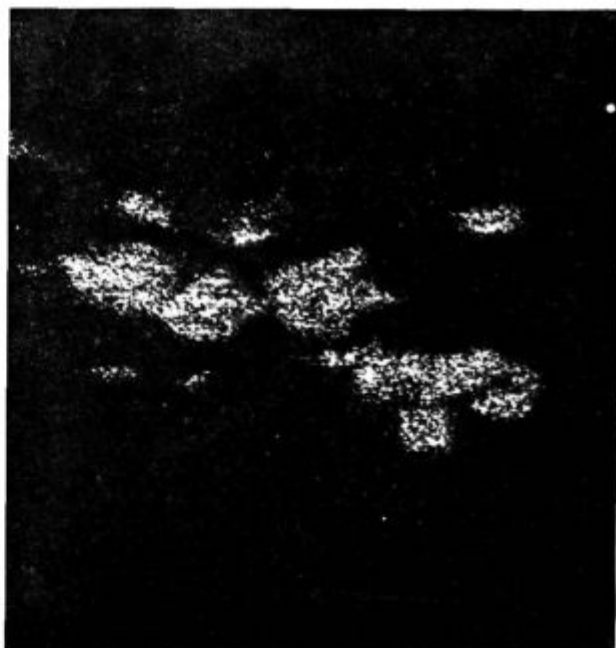


a) elektronska slika

b) Fe, K α



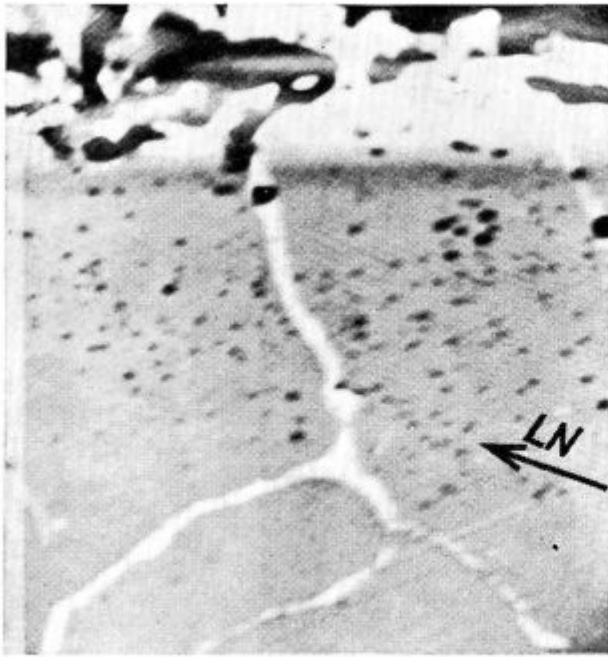
c) Cu, K α



d) Sb, L α

Slika 7

Scanning slike obogatenege sloja vzorca jekla z 0,10 % Sb,
0,22 % Cu, oksidirano 6^h, 1030° C; 600 \times povečano



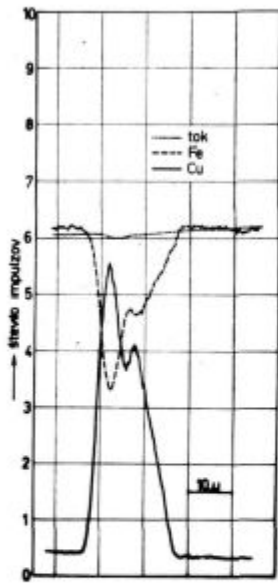
a) elektronska slika

Slika 8

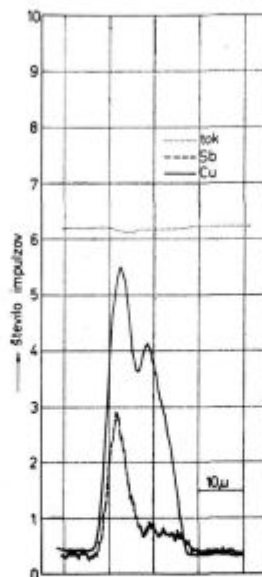
Scanning sliki penetracije in obogatenega sloja vzorca jekla z 0,10 % Sb, 0,22 % Cu, oksidirano 6^h, 1030° C, 1200× povečano; (LN — smer linijske analize)



b) Cu, K α



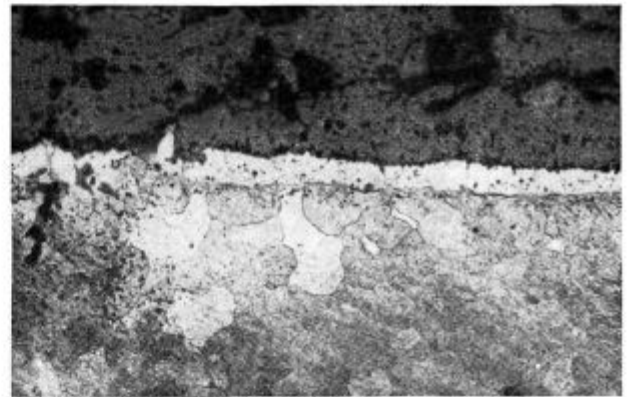
a) profil železa in bakra



b) profil bakra in antimona

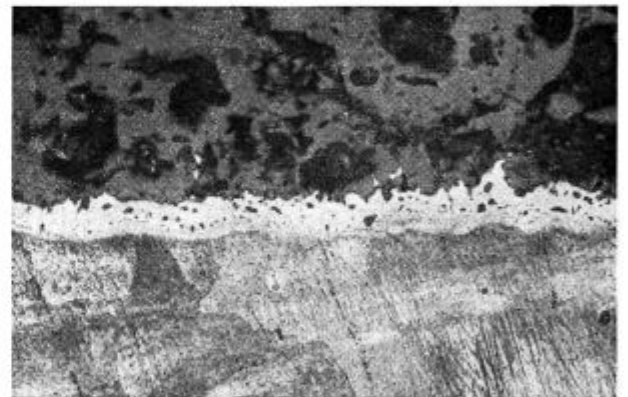
Slika 9

Profil koncentracij železa in oligoelementov v obogateni coni vzorca jekla z 0,10 % Sb, 0,22 % Cu, oksidirano 6^h, 1030° C



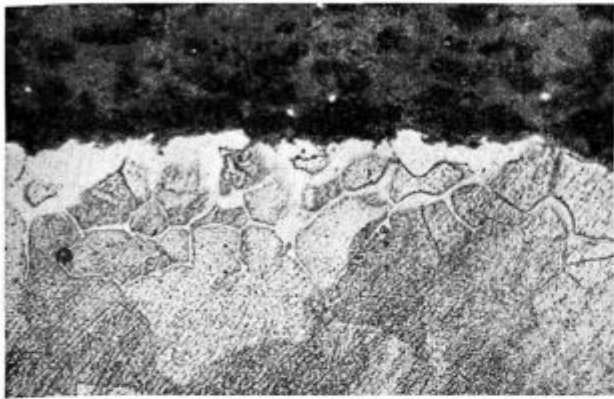
Slika 10

Jeklo z 0,12 % Sn, 0,02 % Cu, oksidirano 6^h, 1045° C, jedkano po Dickensonu; 200× povečano



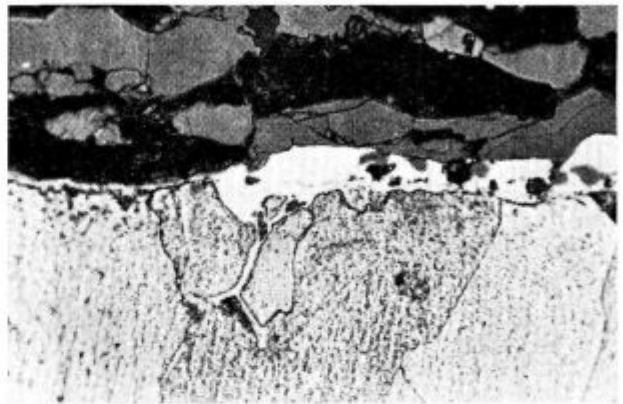
Slika 11

Jeklo z 0,12 % Sn, 0,02 % Cu, oksidirano 6,5^h, 1125° C, jedkano po Dickensonu; 200× povečano



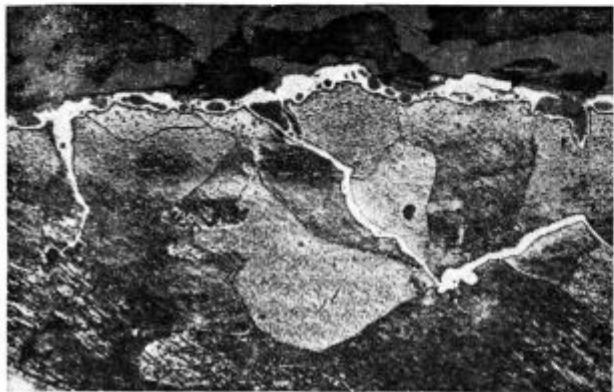
Slika 12

Jeklo z 0,093 % Sn, 0,25 % Cu, oksidirano 20^h, 970° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano



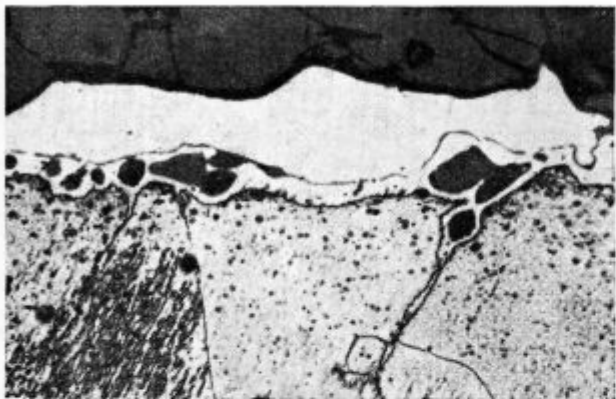
Slika 15

Jeklo z 0,093 % Sn, 0,25 % Cu, oksidirano 7^h, 1110° C, jedkano po Dickensonu; 200 × povečano



Slika 14

Jeklo z 0,093 % Sn, 0,25 % Cu, oksidirano 8^h, 1050° C, jedkano po Dickensonu; 200 × povečano



Slika 13

Jeklo z 0,093 % Sn, 0,25 % Cu, oksidirano 8^h, 1050° C, jedkano po Dickensonu in z nitalom; 500 × povečano

Analiza z mikrosondo je pokazala, da je bila obogatena plast na vzorcu oksidiranem pri 1130° C sestavljena iz dveh delov (sl. 28, 29): dela na strani z oksidom, kjer je zbran baker ter dela, ki prehaja v osnovno kovino, kjer je zbran arzen. Kljub zelo majhni količini kositra in antimona v osnovni kovini, je njuno nakopičenje na področju koncentracije bakra precejšnje.

Količina antimona, kositra in bakra se na področju njihove obogatitve zelo malo spreminja (nazobčane krivulje so verjetno posledica normalnih variacij pri merjenju na mikrosondi in posledica mikrosegregacij nastalih med strjevanjem teh zlitin).

Količina arzena je na tem področju zelo majhna v primerjavi s količino ostalih treh oligoelementov. Največja koncentracija arzena se pojavlja na meji obeh plasti, od tu naprej se postopoma zmanjšuje proti osnovni kovini, proti bogati bakrovi fazi pa je ta sprememba mnogo bolj skokovita. Podobne informacije je posredovala tudi analiza vzorca istega jekla, ki je bil oksidiran pri 1025° C (sl. 30).

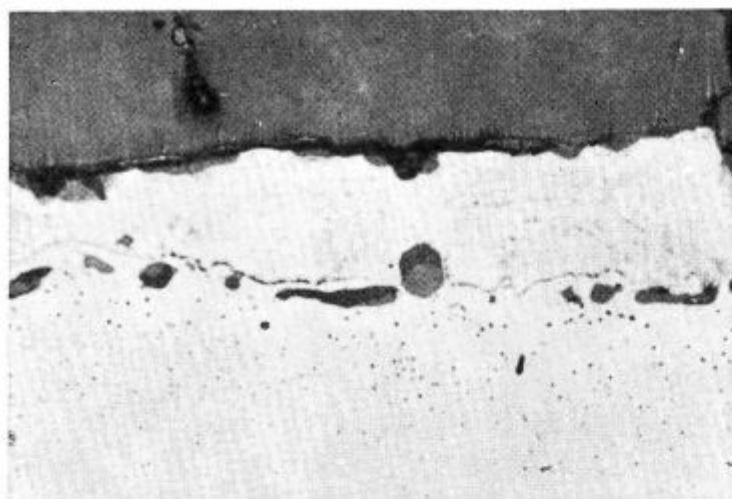
3.1.5 Jeklo legirano z arzenom, antimonom in bakrom

V teh jeklih je bila skupna koncentracija arzena in antimona dokaj nizka in je bila njihova vsota precej pod 0,1%. Zaradi tega tudi nismo opazili nastanka širokih obogatenih plasti.

Le-te so bile pri temperaturi oksidacije 1030° C, po večini zvezne, vendar z močnimi penetracijami vzdolž avstenitnih in feritnih kristalnih mej. (sl. 31, 32, 33). Ob oksidu so se pojavljala ločena zrnca bogata bakrove faze. Izgleda, da so v teh pogojih nastale obogatene plasti dokaj krhke, saj so se pri merjenju mikrotrdote pojavile v njih številne drobne razpoke.

3.1.6 Jeklo legirano z antimonom, kositrom in bakrom

Pri jeklu legiranim z antimonom, kositrom in bakrom se je že pri oksidaciji na 955° C pojavila večfazna obogatena plast. Videz faz bogatih z bakrom kaže, da so bile tekoče že na temperaturi oksidacije. Obogatena plast je zvezna, značilna zanjo pa so velika nakopičenja bogate bakrove faze, ki dosežejo tudi čez 30 μ v debelino ter globoke penetracije vzdolž kristalnih mej, v katerih smo v sredini opazili žile bogate bakrove faze (sl. 34, 35).



a) optična mikrografija, polirano



b) elektronska slika



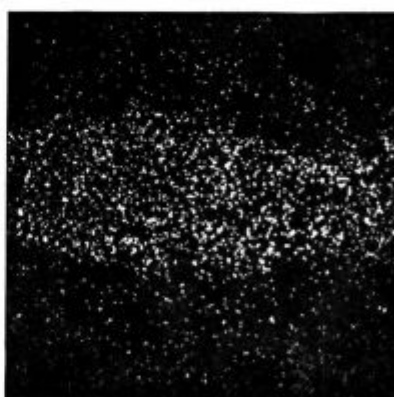
c) Fe, $K\alpha_1$



d) Cu, $K\alpha_1$



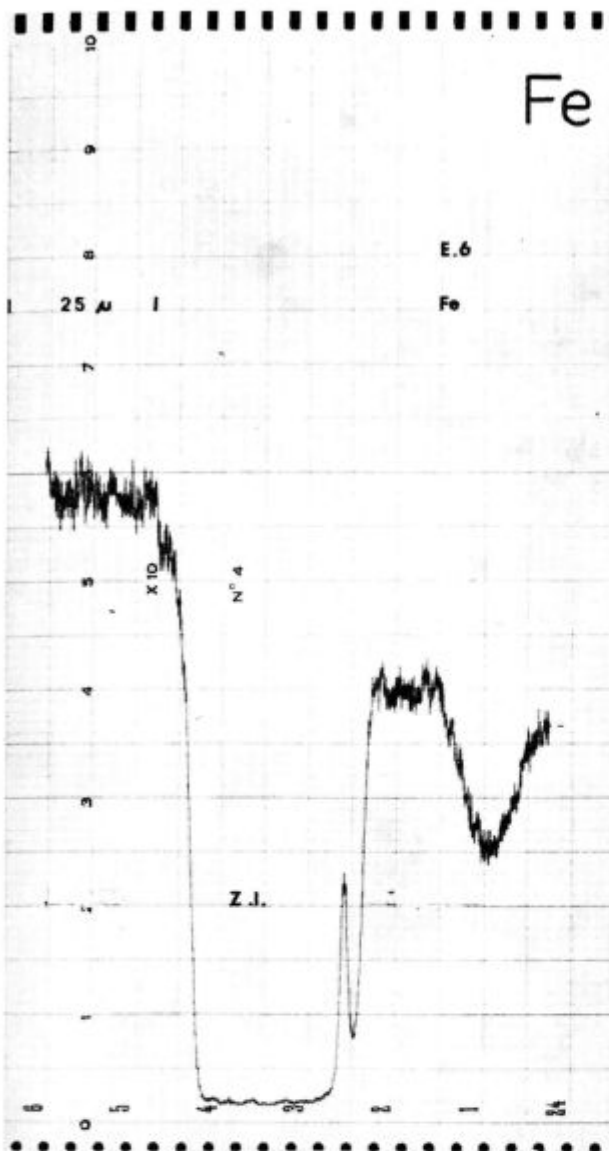
e) Sn, $L\alpha$



f) Sb, $L\alpha$

Slika 16

Mikrografija in scanning slike obogatene cone vzorca jekla
z 0,093 % Sn in 0,25 % Cu, sledovi Sb; oksidirano 8",
1040° C; 500 × povečano

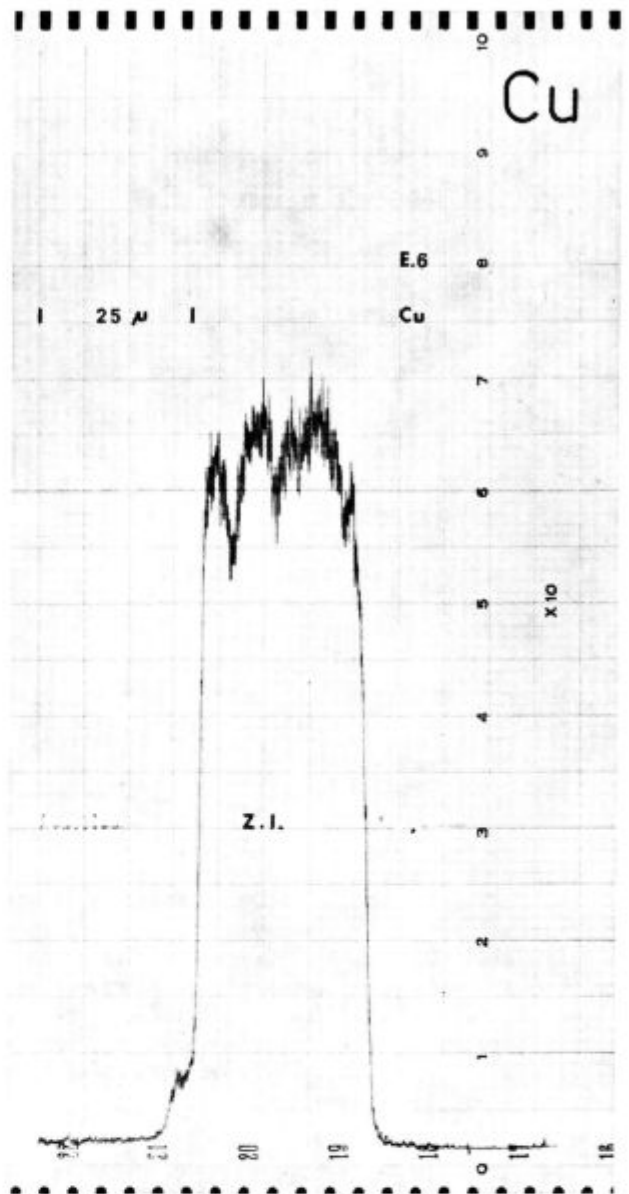


a) profil železa

Po oksidaciji na 1050°C smo opazili, da je delež faze bogate z bakrom zelo velik; delež obogatene ferita (avstenita) pa je relativno zelo majhen in se kot ozek pas razprostira med bakrovo fazo in osnovno kovino. Tega sloja na nekaterih krajih nismo opazili; tu je kovina bogata z bakrom tvorila lokalna nakopičenja, ki so bila v direktnem dotiku z osnovno kovino. Penetracije v osnovno kovino so številne in v večini primerov imajo v sredini fazo bogato z bakrom.

Videz obogatene plasti na vzorcih oksidiranih pri temperaturi 1110°C ima enake značilnosti (sl. 36, 37, 38).

Scanning analizo smo napravili na vzorcu oksidiranim pri 1045°C na kraju velikega lokalnega nakopičenja bogate bakrove faze, ki je bila v direktnem stiku z osnovno kovino. Analiza kaže, da se v kombinaciji Cu-Sb-Sn ponašajo ti elementi



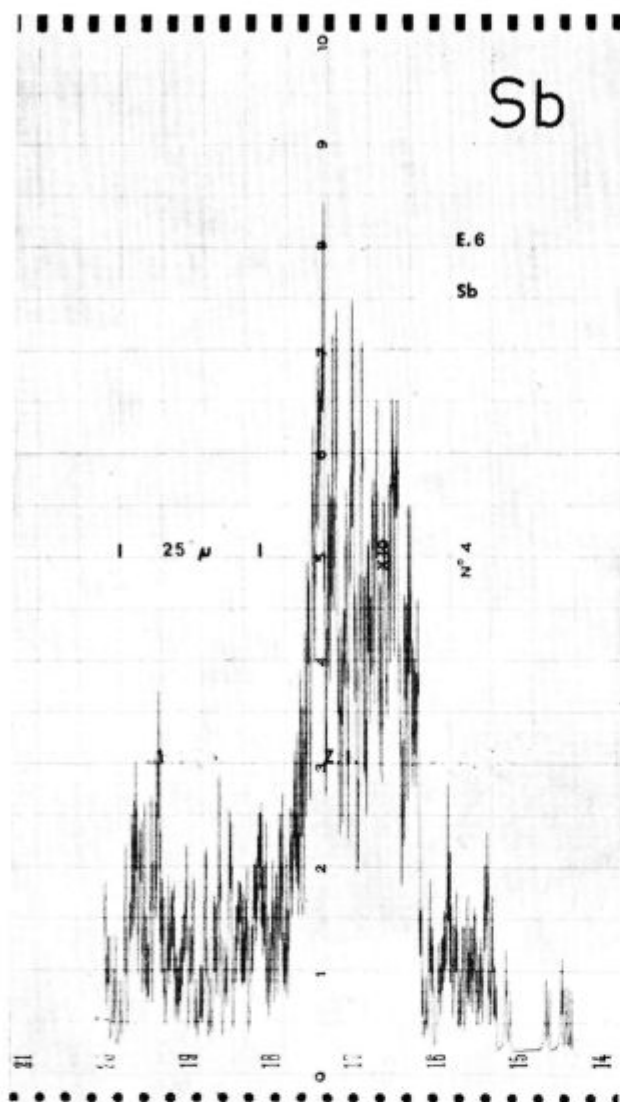
b) profil bakra

prav tako kot v kombinaciji Cu-Sb ali pa Cu-Sn: vsi trije se koncentrirajo na istem kraju (sl. 39). Njihova vsebnost se skokoma menja ob meji z oksidom in na meji z osnovno kovino; malo pa se spreminja po preseku obogatene plasti (sl. 40).

3.1.7 Jeklo legirano z arzenom, antimonom in kositrom ter njihovo kombinacijo z bakrom

Na jeklu brez bakra je bil obogateni sloj enakomeren in zvezen, z redkimi mejnimi penetracijami. Z jedkanjem smo odkrili stebraste kristale, kar pomeni, da je vsebnost teh treh elementov tako narasla, da je prekoračila mejo topnosti teh elementov v avstenitu že na temperaturi oksidacije.

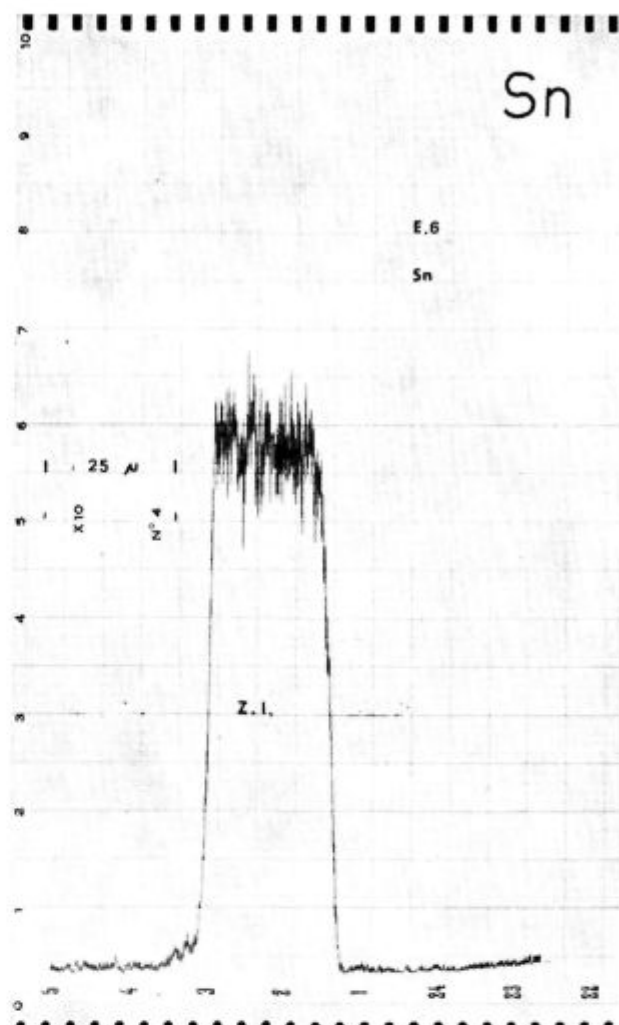
Dodatek bakra je vzrok nastanka nove faze bogate z bakrom. Pojavlja se že pri oksidaciji na



c) profil antimona

955° C (sl. 41), vendar v tem primeru večina obogatene plasti sestavlja obogateni ferit. Pri 1050° C opazimo jasne pojave tekoče faze. Obogateni sloj je heterogen, nezvezen z mnogimi lokalnimi nakopičenji, vendar brez majhnih penetracij v osnovno kovino (sl. 42). Videz obogatene sloja po oksidaciji pri 1110° C in 1059° C je zelo podoben prejšnjemu. (sl. 43, 44). Tudi v jeklu v katerem je bilo le 0,03 % Cu je prišlo do take obogatitve s tem elementom, da je nastala obogatena plast s podobnim videzom.

Z analizo na mikrosondi smo ugotovili, da je večina bakra, antimona in kositra zbrana na istih krajih ter da je tu količina arzena le malo večja od količine v osnovni kovini. Arzen se po večini koncentrira v feritni plasti, na meji proti osnovni kovini. Obratno je tu količina ostalih treh elementov zelo nizka. V coni bogati z bakrom so tudi posamezni otoki faze bogate z arzenom, kar je vzrok nazobčani obliki porazdelitvene krivulje za As (sl. 45 in 46).

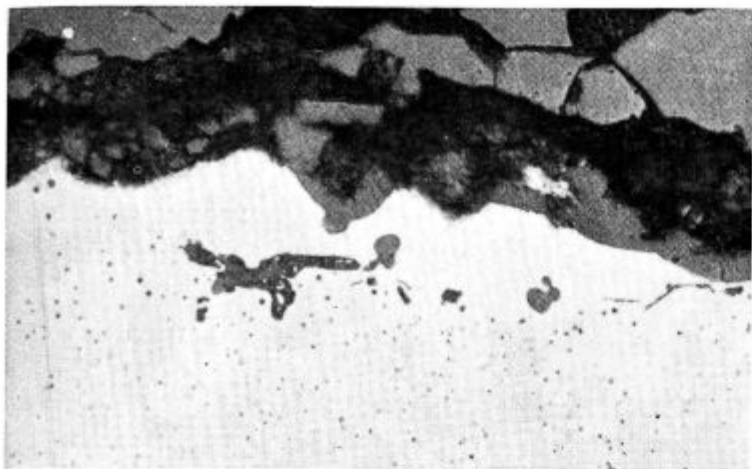


d) profil kositra

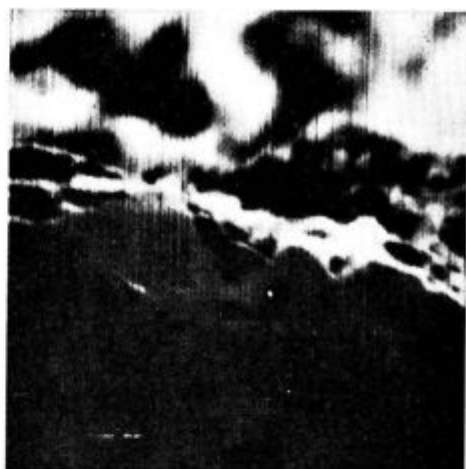
Slika 17
 Profil koncentracij železa in oligoelementov v obogateni coni jekla z 0,093 % Sn, 0,25 % Cu, sledovi Sb; oksidirano 8°, 1040° C

3.2 Stopnja obogatitve in ugotovitve na »modelih« obogatene plasti

Faktor obogatitve je definiral Melford⁽¹¹⁾ kot razmerje med povprečno koncentracijo oligoelementov v obogateni plasti ter količinami v osnovni kovini. S pomočjo te vrednosti je določal tudi sestavo poskusnih »modelov« obogatenih plasti. Za te namene je bila takšna definicija obogatitve primerna. Ne pokaže pa dejanske slike, saj je iz prejšnjega jasno, da je porazdelitev oligoelementov v obogateni plasti povsem heterogena. Sestava jekla in pogoji oksidacije odločajo o faznem sestavu obogatene plasti. Analiza z mikrosondo je pokazala v kateri fazi se prioritarno zbirajo posamezni elementi. Zaradi take nehomogene porazdelitve je prikladnejše računati stopnjo obogatitve kot razmerje med povprečno vsebnostjo oligoelementa v določeni fazi, kjer je njegova koncentracija največja in pa vsebnostjo v osnovni kovini.



a) optična mikrografija, polirano



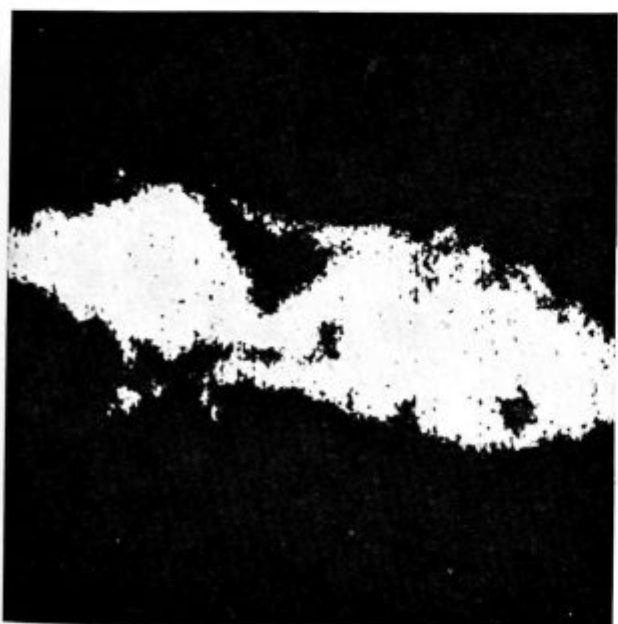
b) elektronska slika



c) Fe, K α_1



d) Cu, K α_1



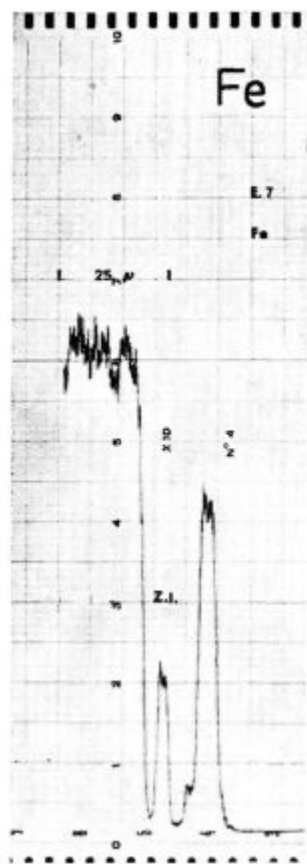
e) Sn, L α



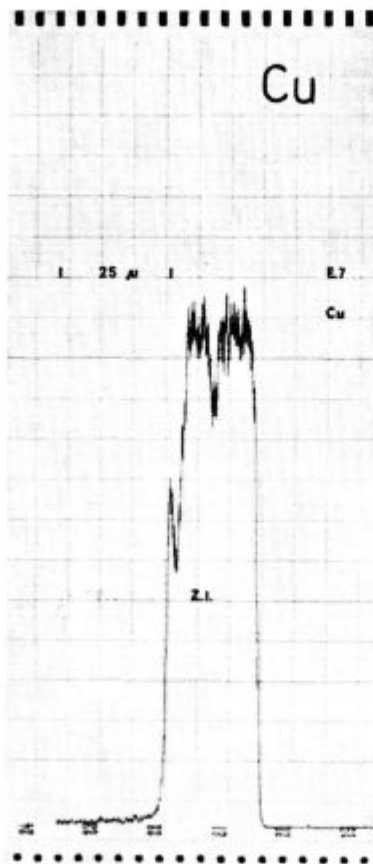
f) Sb, L α

Slika 18

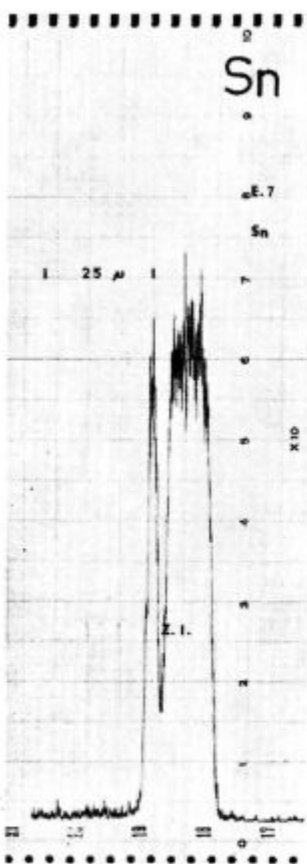
Mikrografija in scanning slike obogatene cone vzorca jekla z 0,093 % Sn, 0,25 % Cu, sledovi Sb; oksidirano 6,5°, 1110° C; 500 \times povečano



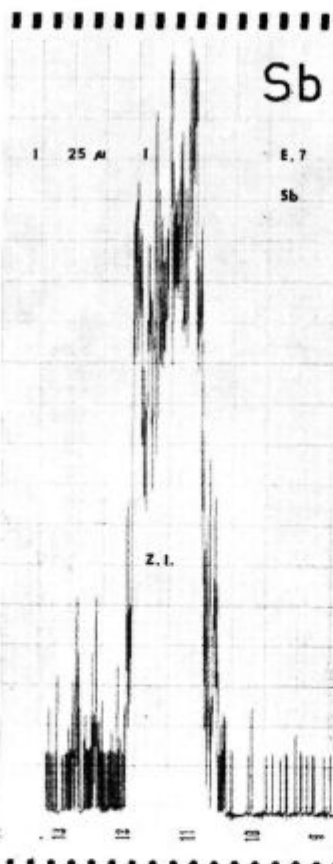
a) profil železa



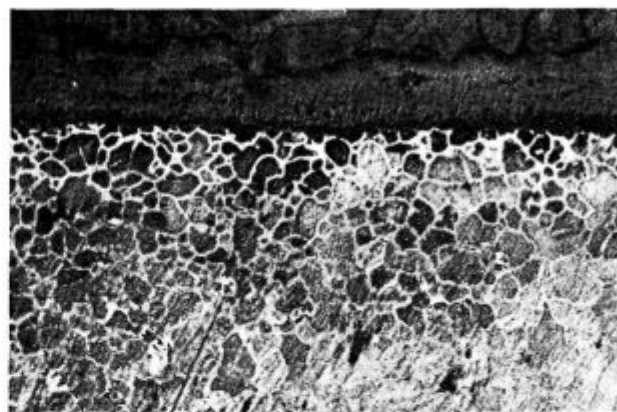
b) profil bakra



c) profil antimona

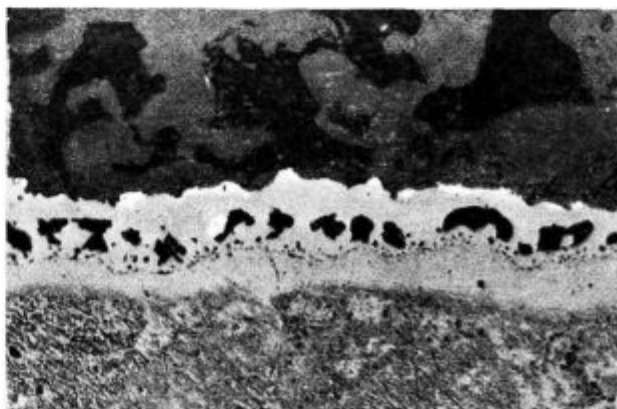


d) profil kositra



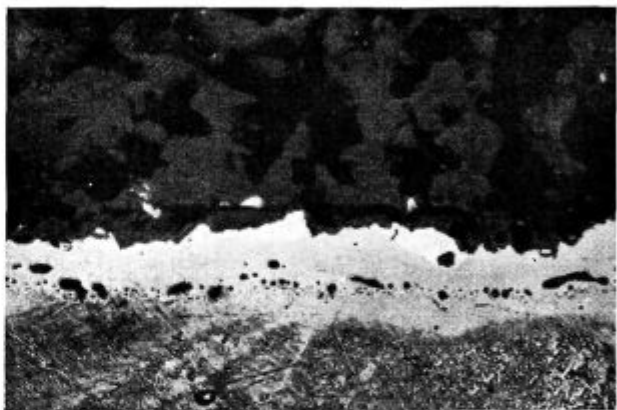
Slika 20

Jeklo z 0,024 % As, 0,002 % Sn, 0,28 % Cu, oksidirano 6', 950° C, jedkano po Steadu; 200 × povečano



Slika 21

Jeklo z 0,054 % As, 0,006 % Sn, 0,36 % Cu, oksidirano 6', 1030° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano

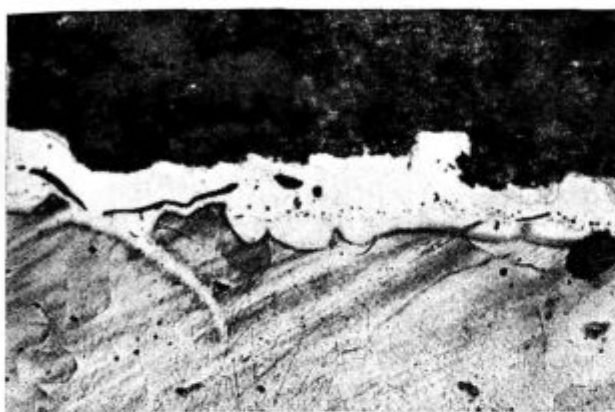


Slika 22

Jeklo z 0,54 % As, 0,006 % Sn, 0,036 % Cu, oksidirano 6', 1030° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano

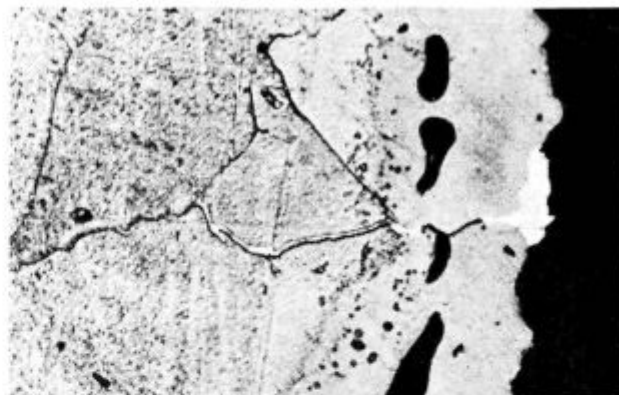
Slika 19

Profil koncentracij železa in oligoelementov v obogateni coni jekla z 0,093 % Sn, 0,25 % Cu, sledovi Sb; oksidirano 6,5', 1110° C



Slika 23

Jeklo z 0,124 % As, 0,014 % Sb, 0,003 % Sn, 0,34 % Cu, oksidirano 3^h, 1030° C, jedkano po Steadu; 500 × povečano



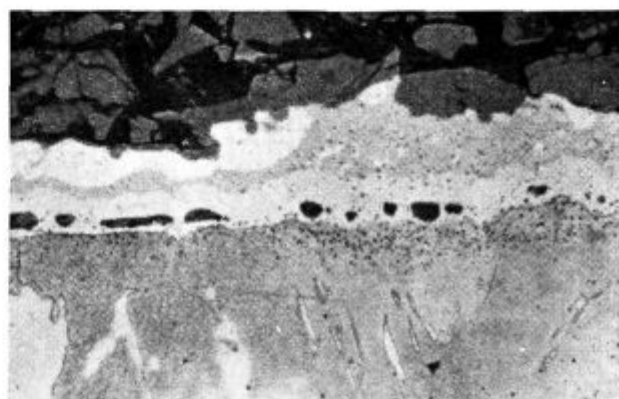
Slika 26

Jeklo z 0,165 % As, 0,018 % Sb, 0,002 % Sn, 0,23 % Cu, oksidirano 3^h, 1030° C, jedkano z nitalom; 1000 × povečano



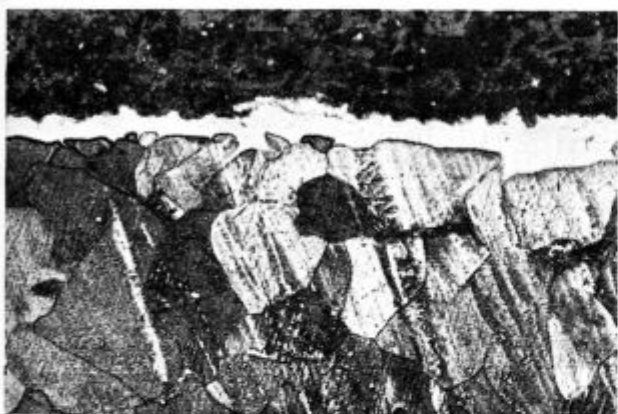
Slika 24

Jeklo z 0,165 % As, 0,018 % Sb, 0,002 % Sn, 0,23 % Cu, oksidirano 6^h, jedkano po Dickensonu; 200 × povečano



Slika 27

Jeklo z 0,165 % As, 0,018 % Sb, 0,002 % Sn, 0,23 % Cu, oksidirano 6^h, 1110° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano



Slika 25

Jeklo z 0,116 % As, 0,004 % Sn, 0,22 % Cu, oksidirano 6^h, 1030° C, jedkano po Dickensonu; 200 × povečano

Posamezni ali pa več oligoelementov vplivajo na lastnosti površine jekla neposredno preko faz, v katerih je njihova koncentracija največja.

Maksimalne koncentracije oligoelementov v obogateni plasti smo določili iz porazdelitvenih

krivulj za baker, antimon in kositer v delu poleg oksida, kjer se je koncentrirala večina teh elementov. Maksimalna koncentracija arzena pa se je redno pojavljala na meji med bogato bakrovo fazo in feritom obogatenim z arsenom.

Rezultate teh meritev smo zbrali v tabeli št. 2.

Razmerja med maksimalno količino vseh štirih oligoelementov v obogateni plasti in njihovo količino v osnovni kovini smo označili z maksimalno stopnjo obogatitve.

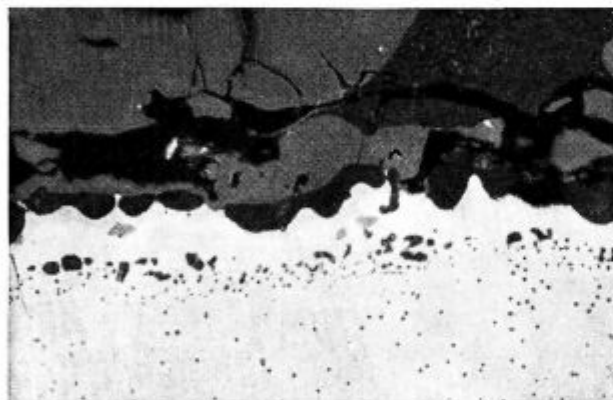
Maksimalna stopnja obogatitve je za antimon, baker in kositer nebstveno večja od prej omenjene in še to je verjetno posledica nehomogenosti, ki so se pojavljale zaradi strjevanja. Pri arzenu pa je zaradi njegove značilne porazdelitve v železovi osnovi ta razlika občutnejša.

Z analizo podatkov, ki so zbrani v tej tabeli in razdelitvenih krivulj pridemo do naslednjih splošnih ugotovitev:

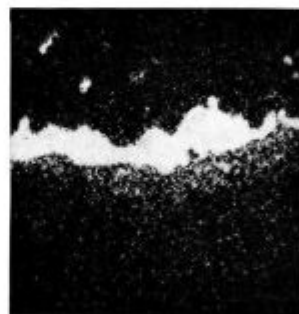
Tabela št 2

	% oligoelementov v jeklu				Pogoji oksidacije	Največje izmerjene koncentracije oligoelementov v obogateni plasti in indeksi obogatitve					
	As	Sb	Sn	Cu		As v feritu	As v Cu-fazi**	Sb	Sn	Cu	Fe
a	—	sledovi	0,093	0,25	8 ^h , 1040° C	—	—	0,56	$\frac{31,92}{293}$	$\frac{59,83}{239}$	0,85
b	—	sledovi	0,093	0,25	6,5 ^h , 1110° C	—	—	0,72	$\frac{27,83}{299}$	$\frac{59,16}{237}$	5,01
c	—	0,057	0,15	0,28	8 ^h , 1045° C	—	—	$\frac{21,26}{373}$	$\frac{18,55}{124}$	$\frac{45,48}{162}$	7,70
d	0,165	0,018	0,002	0,23	9 ^h , 1025° C	$\frac{5,73}{35}$	0,13	$\frac{2,74}{152}$	$\frac{5,09}{2545}$	$\frac{90}{390}$	3,92
e	0,165	0,018	0,002	0,23	5 ^h , 1130° C	$\frac{4,87}{29}$	0,15	$\frac{22,34}{1240}$	$\frac{13,40}{6700}$	$\frac{56,46}{241}$	1,97
f*	0,067	0,063	0,081	0,26	8 ^h , 1025° C	$\frac{1,6}{24}$	0,19	$\frac{9,46}{150}$	$\frac{19,45}{240}$	$\frac{54,96}{212}$	16
g	0,069	0,080	0,14	0,27	8 ^h , 1045° C	$\frac{6,72}{97}$	0,16	$\frac{23,2}{290}$	$\frac{23,1}{164}$	$\frac{47,24}{175}$	6

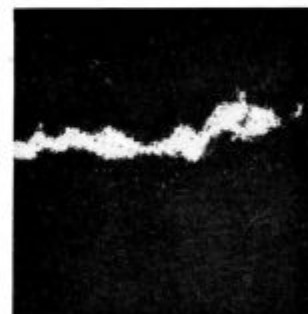
* 1,32 %Si, ** izmerjeno na kraju maksimalne konc. Cu, Sb in Sn



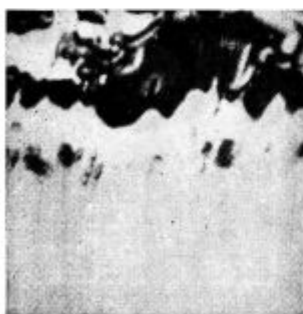
a) optična mikrofotografija polirano



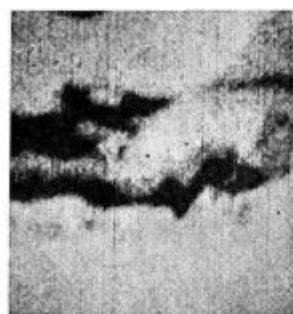
d) Cu, K α_1



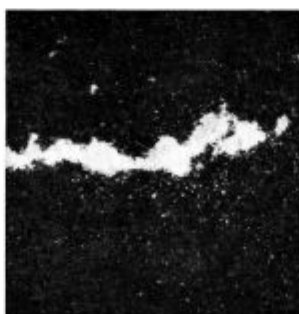
e) Sb, L α



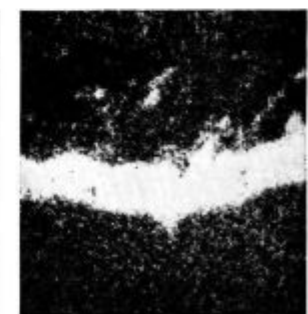
b) elektronska slika



c) Fe, K α_1



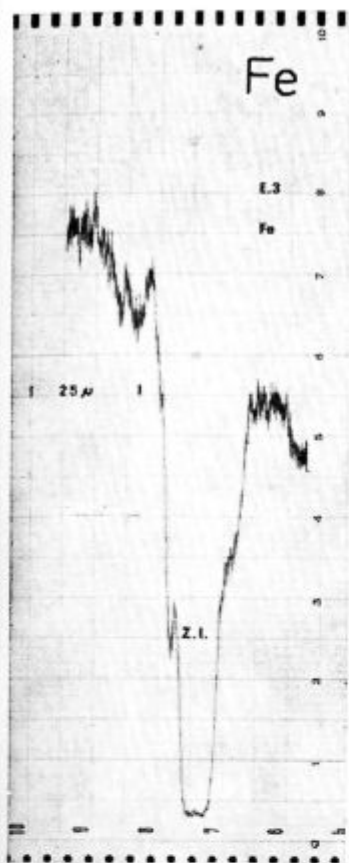
f) Sn, L α



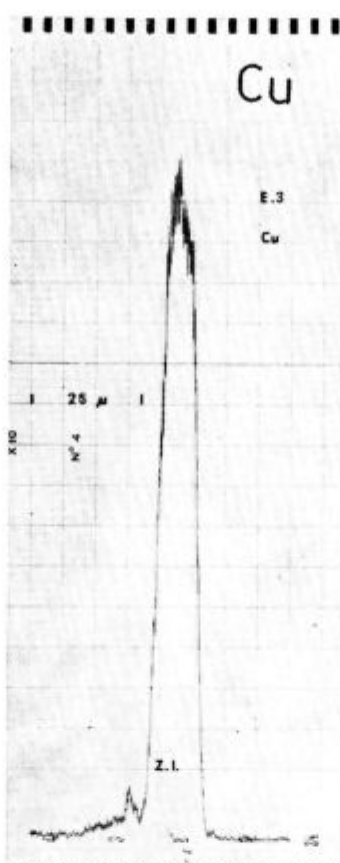
d) As, K α_1

Slika 28

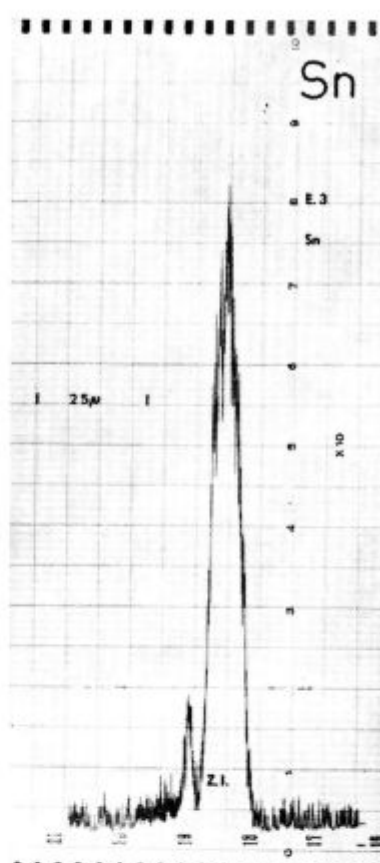
Mikrofotografija in scanning slike obogatene cone vzorca jekla z 0,165 % As, 0,018 % Sb, 0,002 % Sn in 0,23 % Cu, oksidirano 5^h, 1130° C; 500 \times povečano



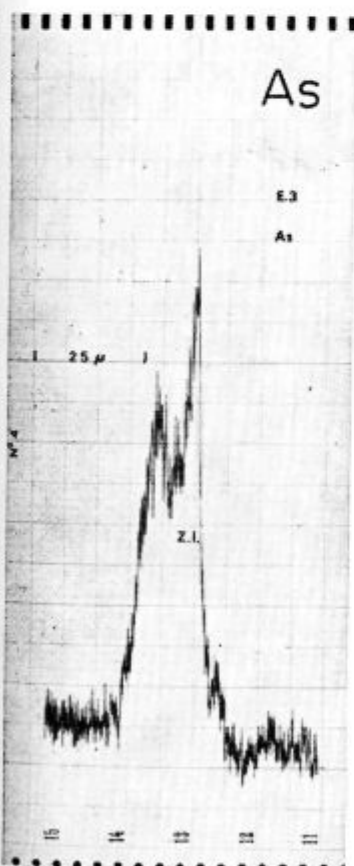
a) profil železa



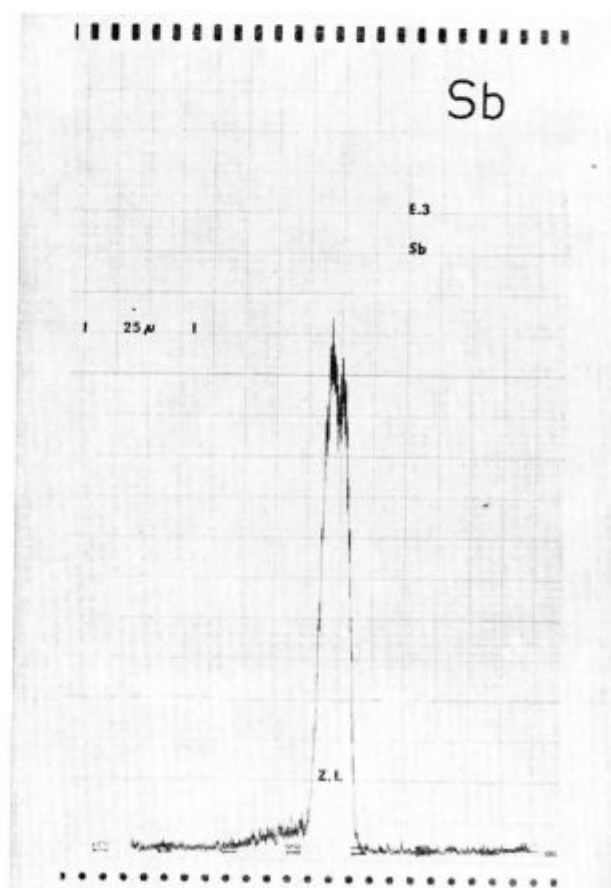
b) profil bakra



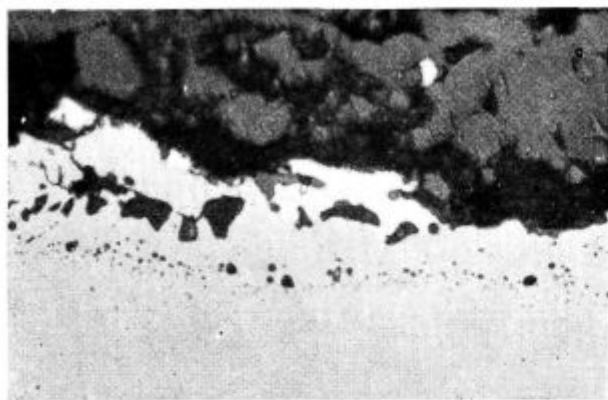
c) profil kositra



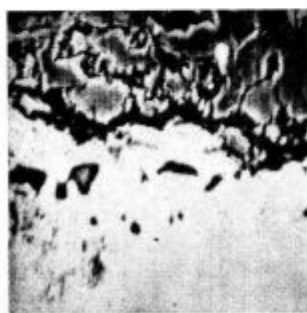
d) profil arzena



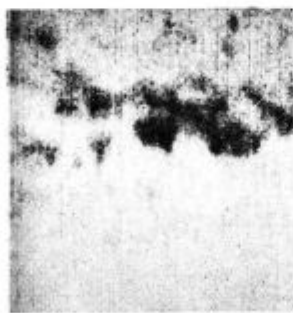
e) profil antimona



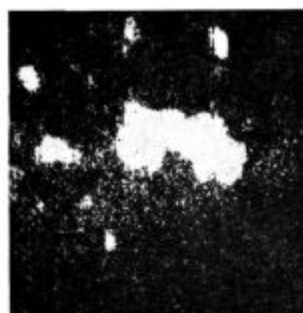
a) optična mikrofotografija, polirano



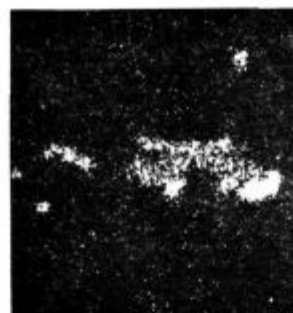
b) elektronska slika



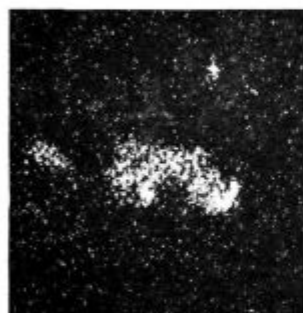
c) Fe, $K\alpha_1$



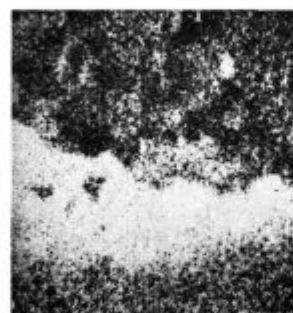
d) Cu, $K\alpha_1$



e) Sb, $L\alpha$



f) Sn, $L\alpha$



g) As, $K\alpha_1$

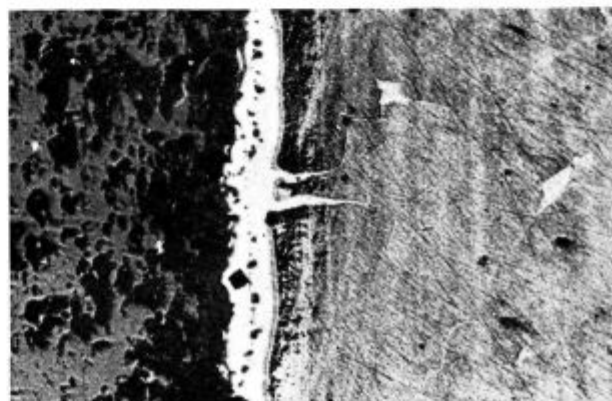
Slika 30

Mikrofotografija in scanning slike obogatene cone vzorca jekla z 0,165 % As, 0,018 % Sb, 0,002 % Sn in 0,23 % Cu, oksidirano 9^h, 1025° C; 500 × povečano



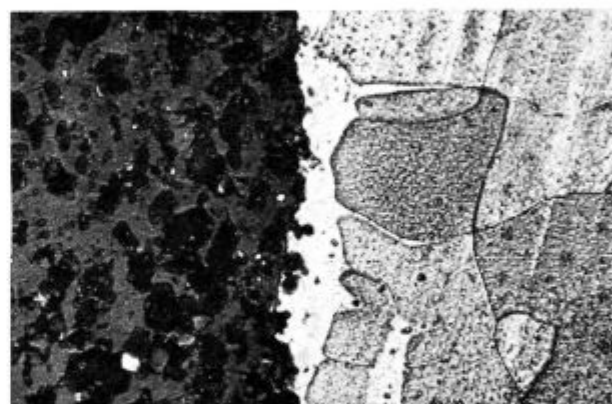
Slika 31

Jeklo z 0,024 % As, 0,058 % Sb, 0,005 % Sn, 0,29 % Cu, oksidirano 6^h, 1030° C, jedkano po Dickensonu in z nitalom; 500 × povečano



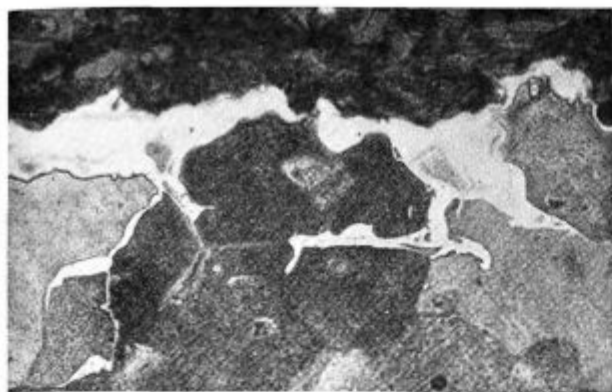
Slika 32

Jeklo z 0,078 % As, 0,049 % Sb, 0,14 % Cu, oksidirano 6^h, 1030° C, jedkano po Dickensonu; 200 × povečano



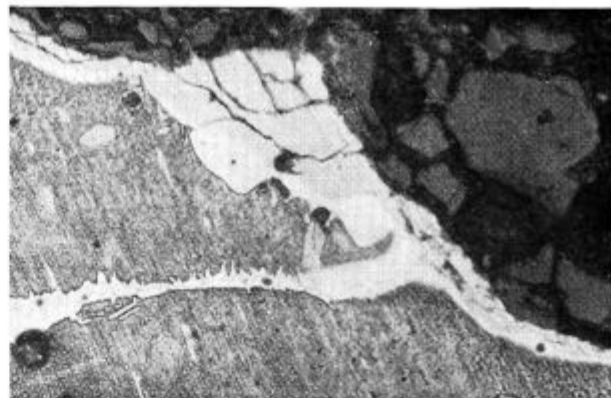
Slika 33

Jeklo z 0,024 % As, 0,058 % Sb, 0,005 % Sn, 0,29 % Cu, oksidirano 6^h, 1030° C, jedkano po Dickensonu in z nitalom; 500 × povečano



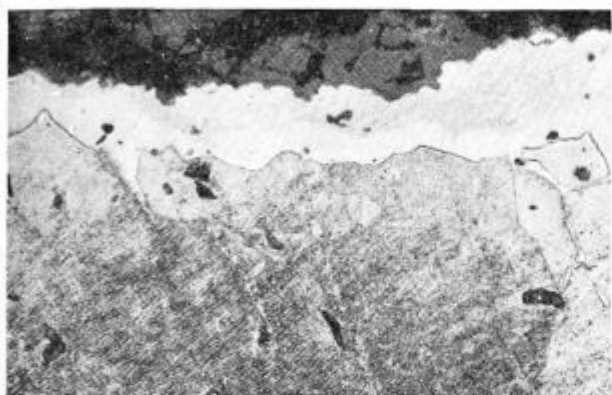
Slika 34

Jeklo z 0,057 % Sb, 0,15 % Sn, 0,28 % Cu, oksidirano 17^h, 955° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano



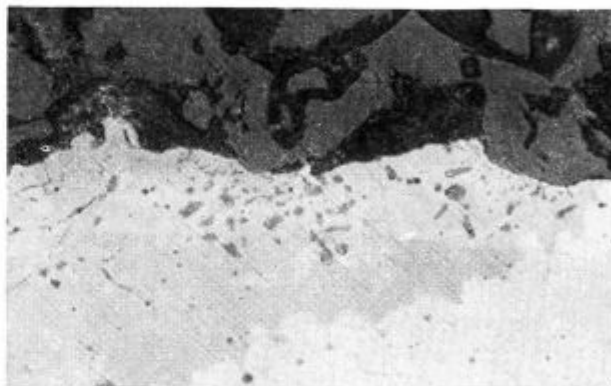
Slika 37

isto kot na sliki 36; 500 × povečano



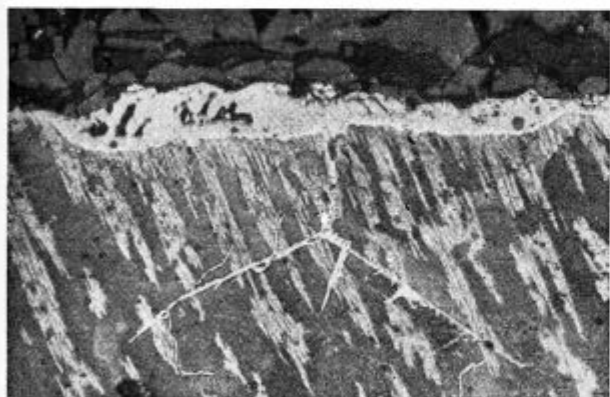
Slika 35

Jeklo z 0,057 % Sb, 0,15 % Sn, 0,28 % Cu, oksidirano 17^h, 955° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano



Slika 38

isto kot na sliki 37



Slika 36

Jeklo z 0,057 % Sb, 0,15 % Sn, 0,28 % Cu, oksidirano 6^h, 1110° C, jedkano po Dickensonu; 200 × povečano

a) stopnja obogatitve arzena je za red velikosti manjša od obogatitve bakra, antimona in kositra (v primerih zelo majhne vsebnosti teh treh v jeklu celo za dva reda velikosti). Maksimalna obogatitev z arzenom je precej večja od njegove topnosti v avstenitu na temperaturi oksidacije in privede v določenem delu obogatene plasti do fazne pre-

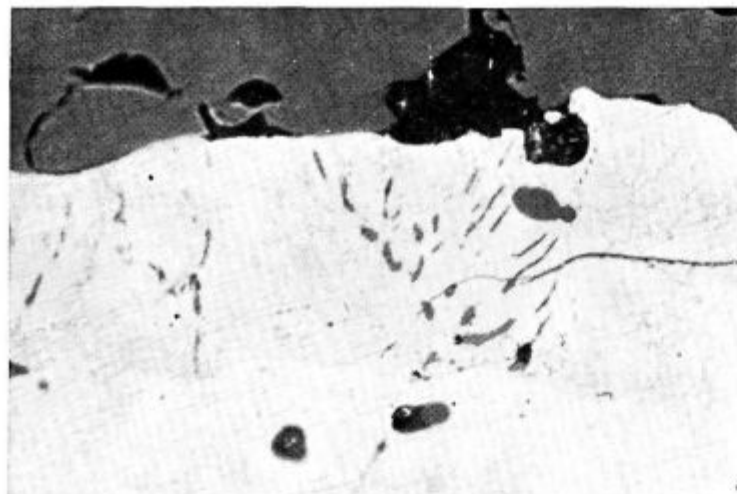
mene $\gamma \rightarrow \alpha$. Visoka koncentracija arzena v nekaterih primerih se zelo približuje oni, ko se v sistemu železo-arzen pojavi na temperaturi oksidacije tekoča faza. Obogatitve z arzenom so velikostnega reda 10. V nekaterih točkah smo izmerili maksimalne obogatitve blizu 100.

b) Stopnje obogatitve antimona, kositra in bakra so velikostnega reda 100. V primeru, ko so bile količine antimona in kositra v jeklu zelo majhne, so bile stopnje obogatitve nad 1000.

c) Vsebnost železa v kovini obogateni z bakrom, antimonom in kositrom je sorazmerno nizka. V jeklu, ki je vsebovalo precej silicija (1,32 % Si) smo opazili, da je vsebnost železa v bogati bakrovi fazi mnogo večja. Mikroskopske preiskave kažejo, da prisotnost silicija v jeklu neposredno zavira nastanek bogate bakrove faze (16).

d) Vsebnost arzena je v kovini obogateni z bakrom, antimonom in kositrom le malo večja od one v osnovni kovini. Podobna ugotovitev velja tudi za delež bakra, antimona in kositra v kovini bogati z arzenom.

e) S primerjavo poskusnih ugotovitev pridemo lahko do sklepa, da ima temperatura oksidacije bolj močan vpliv na sestavo faz bogatih z antimonom, bakrom in kositrom kot njihova vsebnost



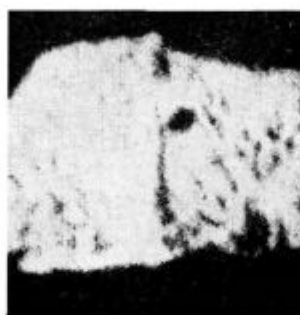
a) optična mikrografija, polirano



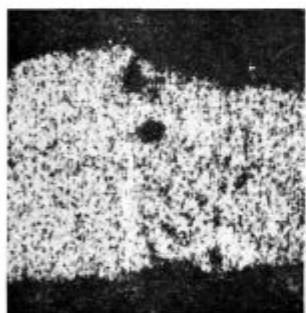
b) elektronska slika



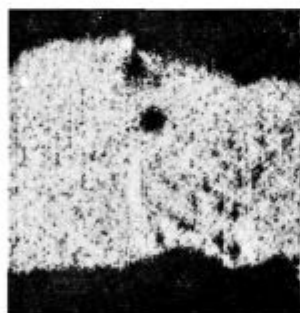
c) Fe, $K\alpha_1$



d) Cu, $K\alpha_1$



e) Sb, $L\alpha$



f) Sn, $L\alpha$

Slika 39

Mikrografija in scanning slike obogatene cone vzorca jekla z 0,057 % Sb, 0,15 % Sn in 0,28 % Cu, oksidirano 8^h, 1045° C; 500× povečano

v jeklu. Le-ta pa določa volumen teh faz. Pri arzenu je opaziti, da raste obogatitev predvsem z vsebnostjo v jeklu. Opaziti je tudi, da povečanje temperature oksidacije privede do relativnega zmanjšanja vsebnosti bakra v obogateni coni na račun relativnega povečanja vsebnosti kositra in antimona.

Kvantitativen popis pojava na osnovi danes zbranih podatkov še ni zanesljiv, čeprav smo lahko predvsem v primeru arzena in bakra postavili nekaj enostavnih odnosov.

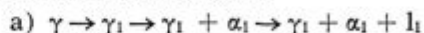
Iz tabele 2 smo izbrali tri karakteristične sestave: a, f, g faz bogatih z antimonom, bakrom in kositrom ter sestavili podobne zlitine — »modele«. S termično in diferencialno termično analizo smo ugotovili, da je tališče sestave a) približno 735° C; zlitina f) se tali približno pri 690° C, zlitina g) pa je pokazala reakciji taljenja pri temperaturah 450° C in 650° C.

Čeprav obstajajo razlike med procesom nastajanja teh sestav v obogateni plasti med procesom oksidacije in med »statičnim modelom«, lahko iz teh podatkov sklepamo, da so tališča posameznih faz obogatene kovine mnogo pod temperaturo toplega preoblikovanja jekla. Z višanjem relativne vsebnosti kositra in antimona se znižuje tudi tališče nastalih faz, kar je povsem v skladu z razmerami, ki jih opisuje ternarni sistem Cu-Sb-Sn.

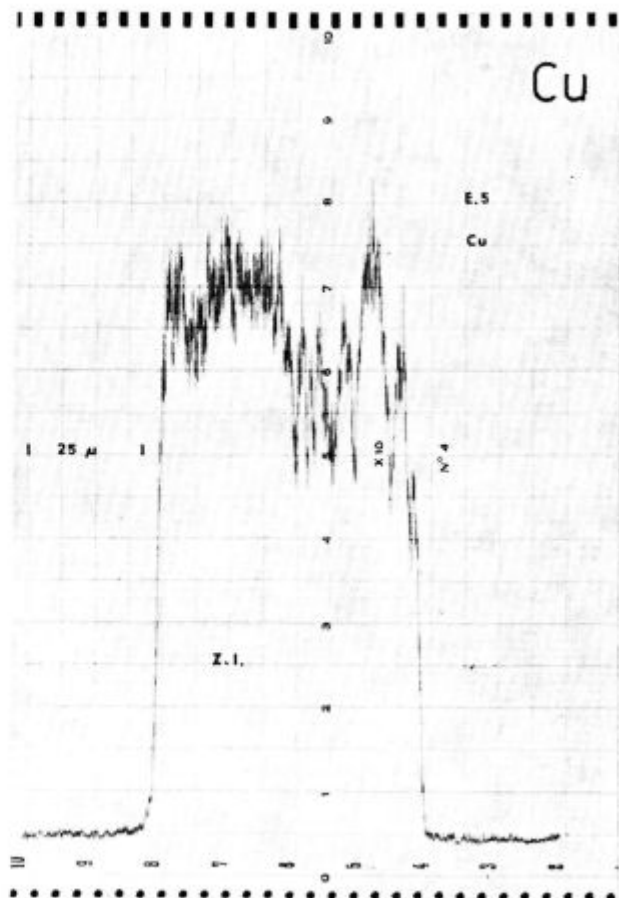
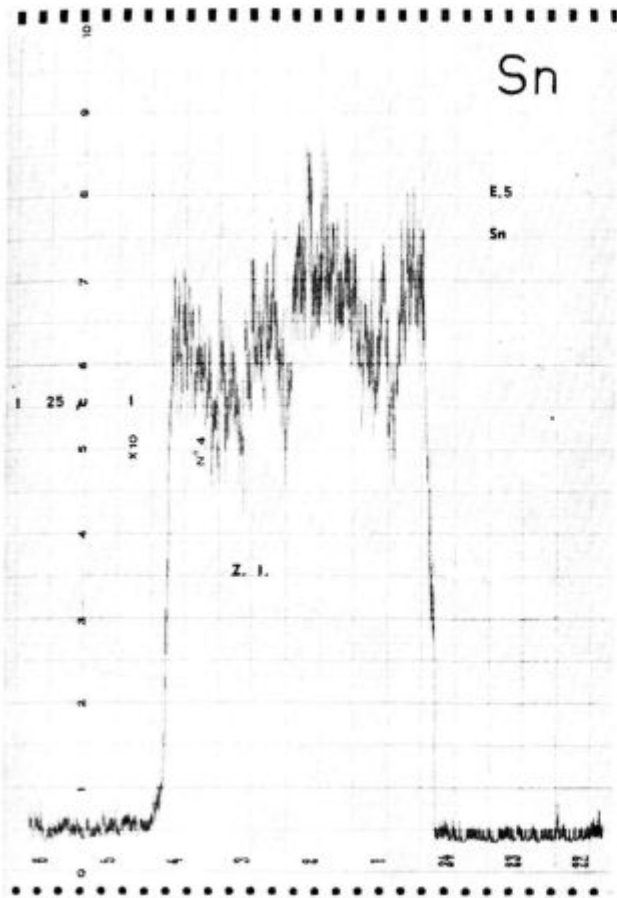
Interakcije med bakrom in arzenom v obsegu kot je to primer z antimonom in kositrom ni. Verjetno pa je, da v sestavah, ki vsebujejo baker in arzen, nastaja tekoča kovina na osnovi bakra samo na temperaturah blizu tališča bakra.

4. MEHANIZEM NASTANKA IN RASTI OBOGATENE PLASTI

Z analizo zbranih podatkov smo ugotovili, da lahko vse primere nastanka in rasti obogatenih plasti opišemo s shemami, ki odgovarjajo trem različnim mehanizmom:



Ta shema velja za nastanek in rast obogatene plasti v jeklih legiranih z alfa-genimi elementi arzenom, antimonom in kositrom, posamično ali pa v medsebojnih kombinacijah v odsotnosti bakra. Sestavlja jo najprej obogatitev v avstenitu (γ_1), nato transformacija dela obogatene plasti ($\alpha_1 + \gamma_1$), nadaljnja obogatitev privede lahko do nastanka tekoče faze (l_1). Končna sestava obogatene plasti v smeri oksida proti osnovni kovini: talina, obogateni ferit, obogateni avstenit. Dočim je sestava taline po vsej verjetnosti homogena, pa



a) profil kositra

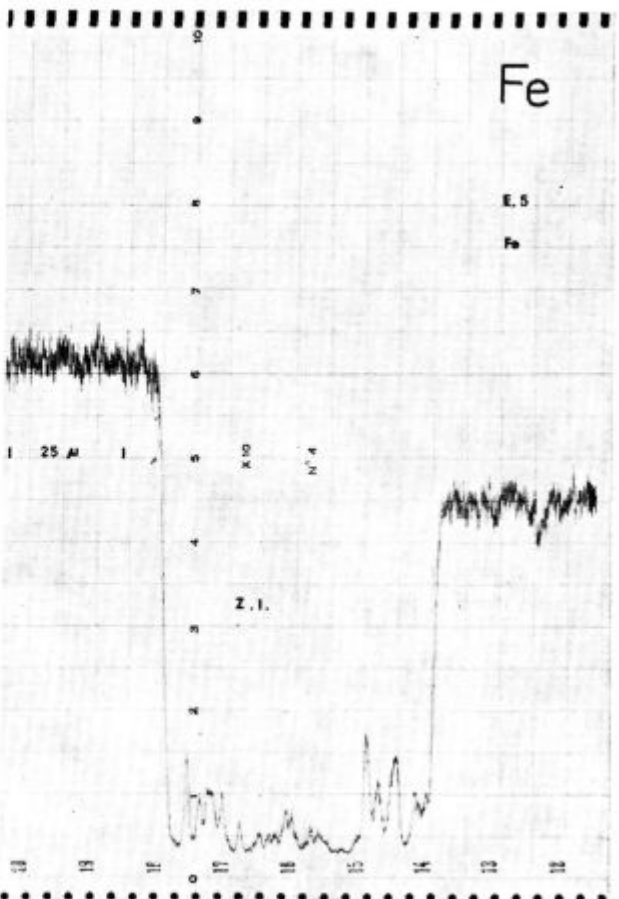
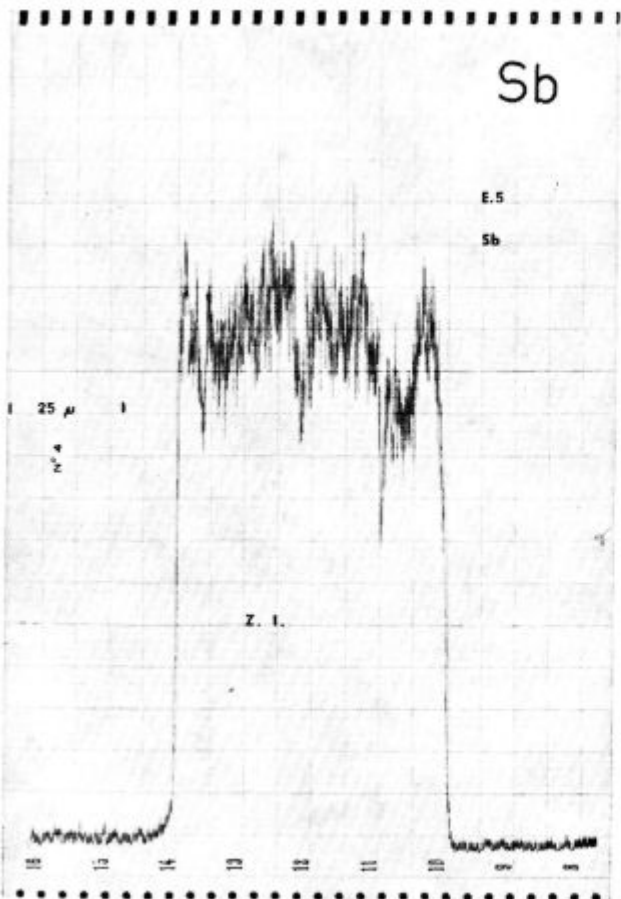
Slika 40

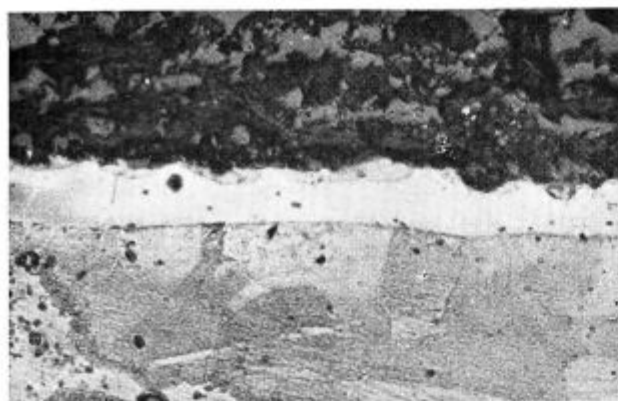
b) profil bakra

Profil koncentracij železa in oligoelementov v obogateni
 coni jekla z 0,057 % Sb, 0,15 % Sn in 0,28 % Cu, oksidirano
 8^h, 1045° C

c) profil antimona

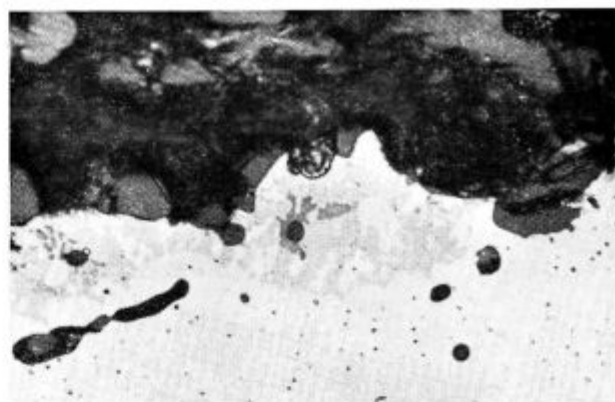
d) profil železa





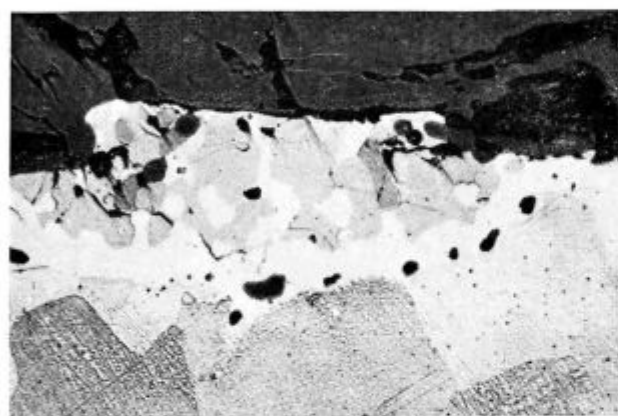
Slika 41

Jeklo z 0,069 % As, 0,080 % Sb, 0,14 % Sn, 0,27 % Cu, oksidirano 18^h, 955° C, jedkano po Dickensonu; 200 × povečano



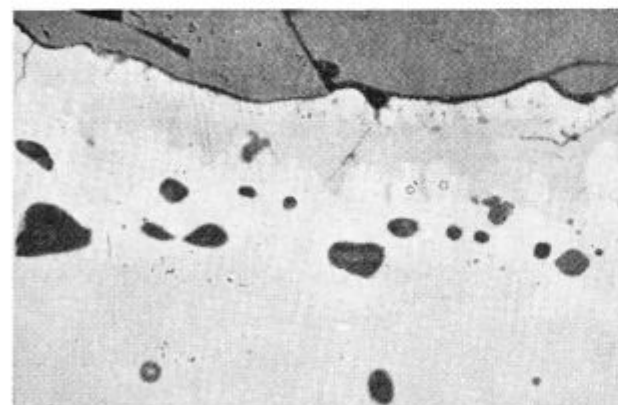
Slika 44

Jeklo z 0,058 % As, 0,065 % Sb, 0,067 % Sn, 0,03 % Cu, oksidirano 7,5^h, 1095° C, polirano; 500 × povečano



Slika 42

Jeklo z 0,058 % As, 0,065 % Sb, 0,067 % Sn, 0,03 % Cu, oksidirano 8^h, 1050° C, jedkano po Dickensonu; 500 × povečano

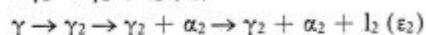


Slika 43

Jeklo z 0,069 % As, 0,080 % Sb, 0,14 % Sn, 0,27 % Cu, oksidirano 7,5^h, 1110° C, polirano; 500 × povečano

smo v avstenitu in feritu dokazali gradiente v koncentraciji posameznih elementov. Krivulje, ki smo jih dobili z analizo z radioaktivnimi tracerji, kažejo značilno obliko difuzije v ustreznih binarnih sistemih. Z našimi poskusi nismo mogli di-

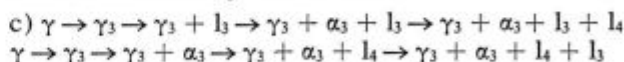
rektno dokazati nastanka tekoče faze tega tipa, čeprav smo registrirali zelo visoke obogatitve z arsenom.



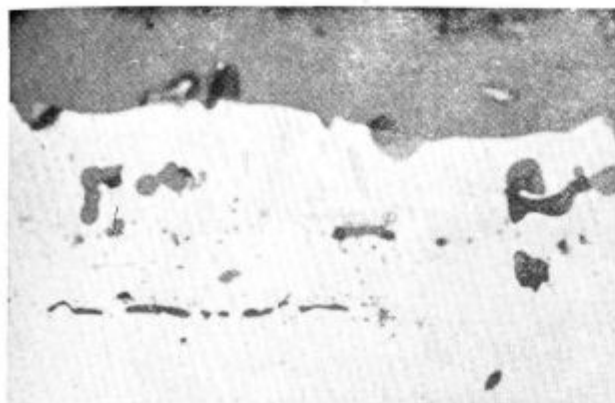
Prvi zapis velja za jeklo s samim bakrom. V primeru, ko je temperatura oksidacije pod tališčem bakra, se izloča baker v trdni fazi ϵ_2 , nad tališčem pa v obliki tekoče faze l_2 . Enaka shema velja tudi za primer jekla legiranega z bakrom, v dvojni ali trojni kombinaciji z antimonom in kositrom. Sestavlja jo obogatitev v avstenitu, izločanje trdne (ϵ_2) ali tekoče faze (l_2), v odvisnosti od temperature oksidacije in sestave jekla.

V tej reakciji narašča množina trdne (ϵ_2) ali staljene faze (l_2) s trajanjem oksidacije. Sestava pa je odvisna predvsem od temperature oksidacije. Tekoča (trdna) kovina je v kontaktu z avstenitom, (γ_2), katerega sestava se malo razlikuje od sestave osnovne kovine.

Druga shema velja za reakcijo v jeklih, v katerih je antimona in kositra glede na količino bakra, da bi nastala pri temperaturi oksidacije le dvofazna obogatena plast. Reakcija pove, da se višek antimona in kositra koncentrira v avstenitem in feritnem delu med osnovno kovino in bogato bakrovo fazo. Ta shema je delno porabna tudi za kombinacijo arsen-baker.



Ta tip reakcije je značilen za jekla, ki vsebujejo arsen in baker ter za jekla z bakrom, arsenom, antimonom in kositrom. Končna sestava obogatene plasti je v smeri od meje z oksidom: tekoča kovina bogata z bakrom, antimonom in kositrom, tekoča faza bogata z arsenom (verjetno nastaja samo iz α_3 in takoj reagira s tekočo fazo l_3), obogateni ferit in obogateni avstenit. Do končne sestave pridemo lahko po dveh poteh v odvisnosti od medsebojnega razmerja oligoelementov v jeklu.



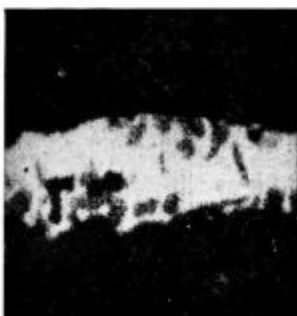
a) optična mikrofografija, polirano



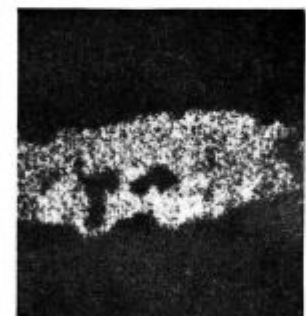
b) Fe, $K\alpha_1$



c) elektronska slika



d) Cu, $K\alpha_1$



e) Sb, $L\alpha$



f) Sn, $L\alpha$



g) As, $K\alpha_1$

Slika 45

Mikrofografija in scanning slike obogatene cone vzorca jekla z 0,069 % As, 0,080 % Sb, 0,14 % Sn in 0,27 % Cu, oksidirano 8^h, 1045° C; 500× povečano

Naše ugotovitve v splošnem potrjujejo Salterjeva dognanja o zmanjšanju topnosti bakra v avstenitu, če so prisotni antimon, kositer ali arzen. Vendar je način, kako ti elementi vplivajo na količino bakra v avstenitu, različen. Arzen se zbira prioriteto v železovi matici, od koder izriva baker; ostala dva pa ga odtegujeta iz železove matice, ker tvorita z njim po sestavi zelo širok interval trdnih ali tekočih zlitin. Prenasičeni avstenit, ki je igral v mehanizmu Melforda pomembno vlogo, se v dejanskih pogojih oksidacije zreducira samo na zelo ozko področje, ki ga ne moremo identificirati. To je ozek pas, v katerem potekajo reakcije tvorbe ferita (α_3) ali tekoče faze (I_2 , I_3) med procesom oksidacije trdnega jekla.

5. ZAKLJUČKI

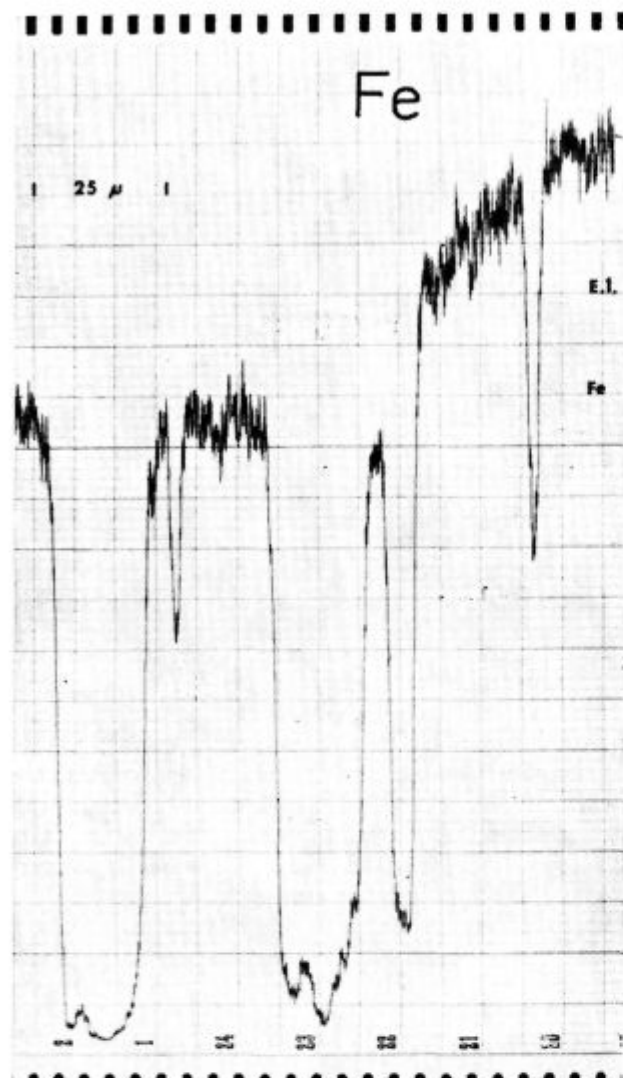
1. Med površinsko oksidacijo trdnega jekla se baker, arzen, antimon in kositer v množini, ki odgovarja masi oksidirane jekla, zbera v ozkem prostoru na meji kovina-oksidi. V pogojih regularne in nemotene oksidacije je njena hitrost mnogo večja od difuzije teh elementov v osnovno kovino. Zato nastane na meji z oksidom zlitina, katere sestava in lastnosti se bistveno ločijo od lastnosti jekla. Baker je element, ki v kombinaciji z ostalimi najbolj vpliva na izoblikovanje površine kovine pod oksidom.

2. Vsi trije alfa geni elementi: As, Sb, Sn se v odsotnosti bakra bogate v železovi matici na podoben način in na istem kraju. V prisotnosti bakra se koncentrirata antimon in kositer v kovini bogati z bakrom na strani oksida. Arzen pa se v večini zbere v železovi matici med bogato bakrovo fazo in osnovno kovino. Antimon in kositer se zbereta (opazno) v železovi matici le, če ju je v jeklu toliko, da je bogata bakrova faza pri dani temperaturi že nasičena z njima.

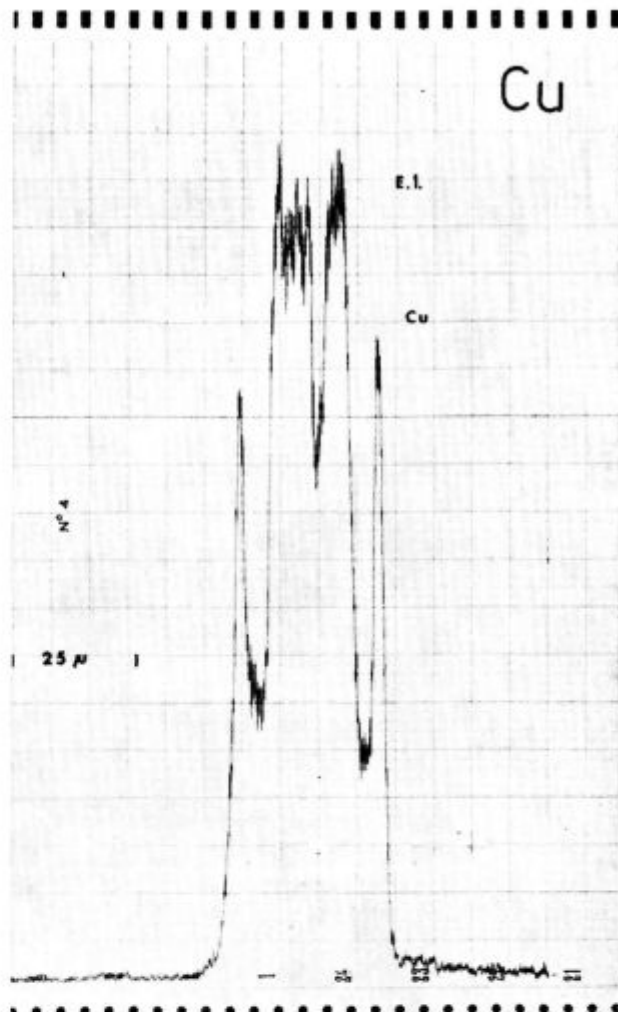
3. Stopnja obogatitve je pri arzenu velikostnega reda 10, pri ostalih pa 100 in lahko doseže celo 1000, če je njihova vsebnost v jeklu zelo majhna (nekaj 0,001 %). Maksimalne vsebnosti arzena nastopajo na meji med bogato bakrovo fazo in z arzenom obogateno železno matico. Dočim je vsebnost arzena v obogateni plasti v vseh primerih izrazita funkcija oddaljenosti od meje z oksidom, oziroma z bogato bakrovo fazo, pa je to primer pri antimonu in kositru le, če ni prisotnega bakra.

V skupni kombinaciji se vsebnost antimona, kositra in bakra zelo malo spreminja z oddaljenostjo od oksida. Skokoma pa pade na meji z avstenitom oziroma feritom.

4. Nastanek in rast obogatene plasti lahko opišemo v obliki reakcij, ki ponazorjujejo tri različne mehanizme v odvisnosti od sestave jekla in temperature oksidacije. Poznavanje faznih diagramov ter podatkov o difuzijah v teh večkomponentnih sistemih je eden od predpogojev za vsak še bolj enostaven matematičen popis pojava.



a) profil železa



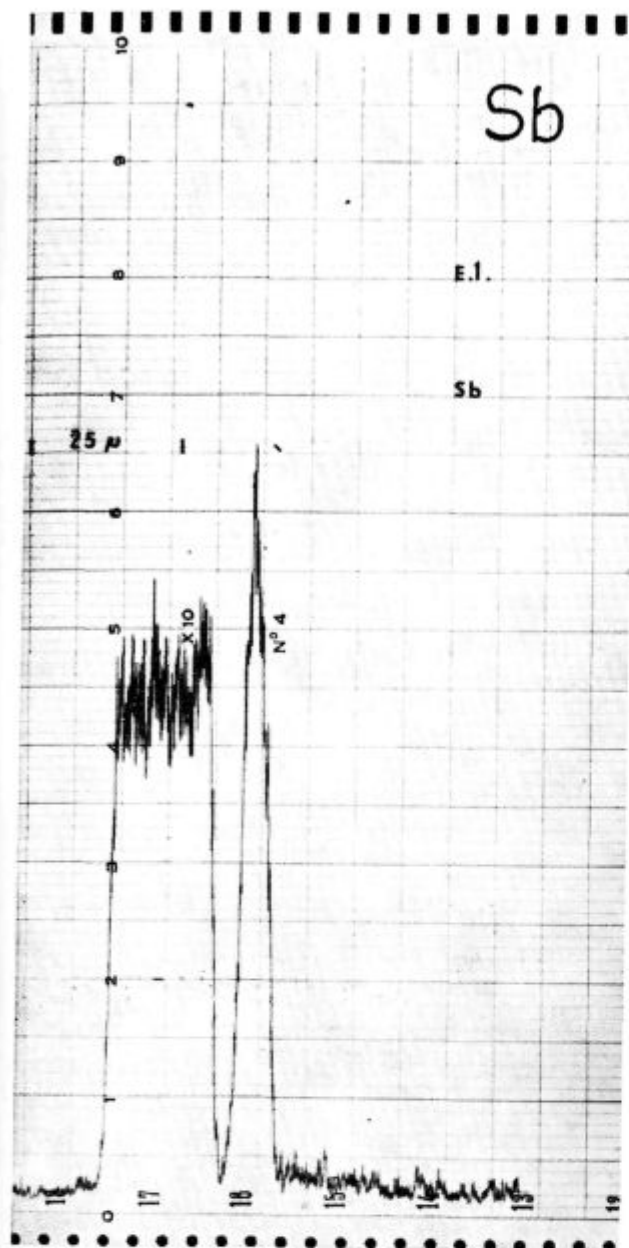
b) profil bakra

5. V številnih statističnih analizah oligoelementov v rudah, grodljih in jeklih sta pogosto podana arzen in antimon v skupni vsoti. Morda je s stališča skupnega nastopanja v nekaterih rudah ali pa s stališča kemične analize taka informacija praktična. Za oceno posledic, ki jih lahko povzročijo v tehnološki praksi zgoraj opisani pojavi, pa je za metalurga mnogo pomembnejša vsota $Sb + Sn$. Zato bi bilo priporočljivo doslej ustaljeni zapis vsote $As + Sb$ ločiti na posamezna elementa. To tem bolj, ker je baker stalno prisoten.

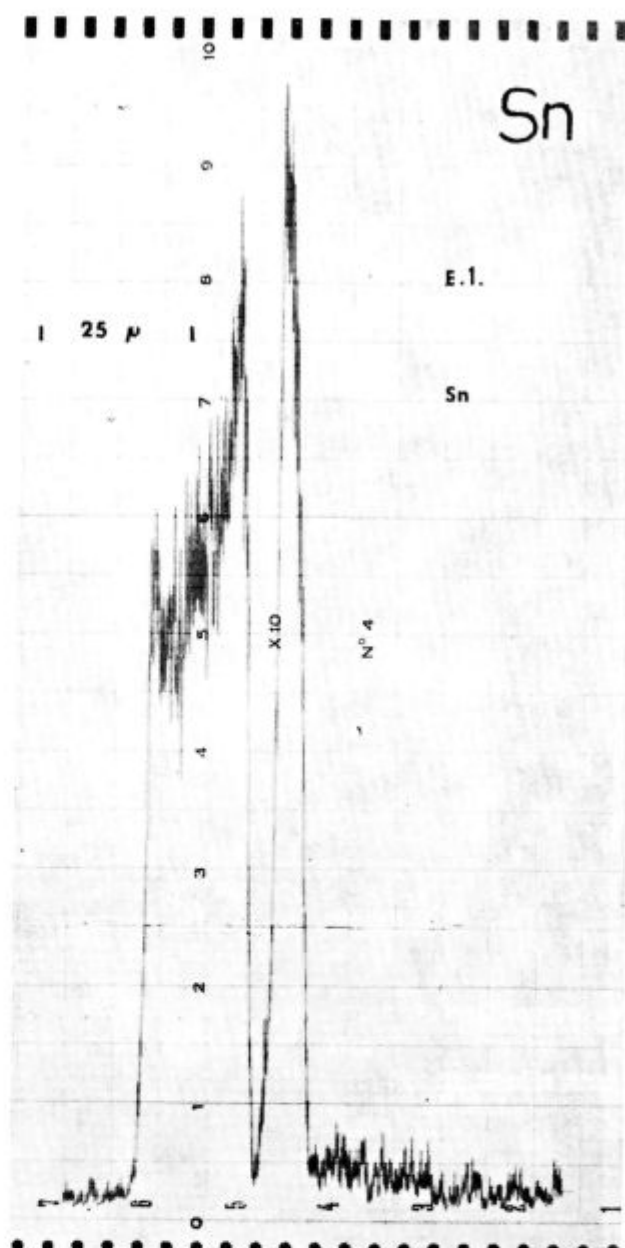
Zahvaljujemo se dipl. ing. P. Kraljiču iz TH Hannover za nekatere analize na mikrosondi.

Literatura

- Kolokvij o oligoelementih Portorož, junij 1967, v tisku
- K. Born: »Die Entstehung von Oberflächenfehlern bei der Warmverarbeitung von Stahl durch Kupfer und Zinnverunreinigungen; Stahl und Eisen, 73, 1953
- C. Rekar, R. Brifah: Baker, arzen in antimon v rudah, železu in jeklu, RMZ, 4, 1958, 3, 1959
- S. L. Gertsman, H. P. Tardif: Iron Age 169, N. 7, 1952
- H. Bucholtz in R. Pusch: Stahl und Eisen, 73, 1953
- V. N. Svečnikov, V. N. Gridnev: O polimorfnyh prevračeniyah železa v splavah železa s myšjakom i surmoj, Metallurg, N. 1, 1938
- J. I. Čajka: O vlijanii uslovij okislenija na kinetiku rosta sloja myšjakovistogo ferrita v uglerodistoj stali s primesju myšjaka, FMM, t. 7, vyp. 3, 1959
- N. I. Sandler, E. A. Levikov, M. A. Kotkis: Vlijaniye primesi myšjaka na okisljaenost stali i železa, FMM, t 1, vyp. 3, 1955
- D. S. Kanarkovsky, T. M. Ravickaja: Diffuzionye processa v stali soderžaščej myšjak. IAN, SSSR, OTN, Metallurgija i topivo, N 4, 1959
- F. Vodopivec: Disertacija na univerzi v Parizu, 1962
- D. A. Melford: Surface Hot Shortness in Mild Steel, JISI, vol. 200, april 1962
- D. A. Melford: Influence of antimony and arsenic on surface hot shortness in Copper containing mild steel, JISI, 1966, vol. 204, N. 5
- W. J. M. Salter: Effects of alloying elements on solubility and surface energy of copper in mild steel, JISI, may 1966, vol. 204, N. 5
- O. Kubaschewski, B. E. Hopkins; Oxidation of Metals and Alloys, London, 1962
- J. Moreau, M. Cagnet: The Scaling of Billets: Metal treatment and Drop Forging, september 1957.
- A. R. Cox, I. M. Winn: Scaling of plain and complex copper steels, JISI, 1965, vol. 203, Nr. 2

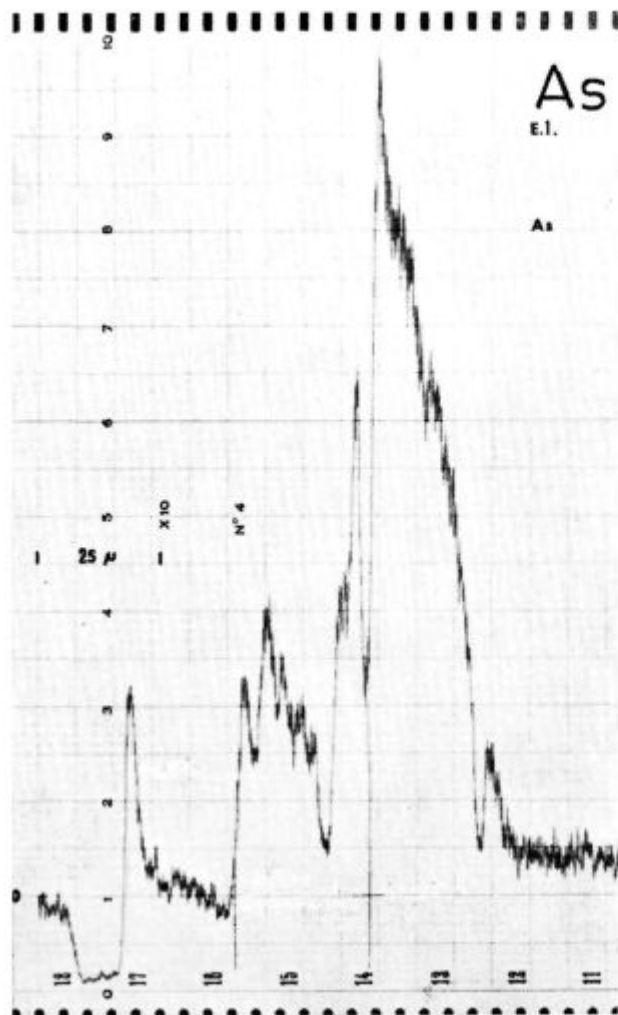


c) profil antimona



d) profil kositra

Slika 46
 Profil koncentracij železa in oligoelementov v obogateni
 coni jekla z 0,069 % As, 0,080 % Sb, 0,14 % Sn in 0,27 % Cu,
 oksidirano 8^h, 1045° C



e) profil arzena.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluss von Sb, As, Cu und Sn auf die Bildung der angereicherten Schichte bei der Oxidation von Weicheisen.

In dieser Arbeit werden die morphologischen und topologischen Charakteristiken der angereicherten Schichte, welche bei der oberflächiger Oxidation von Weicheisen, legiert mit As, Sb, Cu und Sn, entstanden ist beschrieben. Von den Zusammensetzungen mit nur einem Oligoelement sind wir zu denen mit mehreren Kombinationen dieser Elemente übergegangen. Die gesamten Versuche wurden in einer Wasserdampfatmosfera durchgeführt die eine normale Oxidation ermöglichte.

Bei der Anwesenheit vom Kupfer im Stahl konzentrieren sich Sb und Sn in der Metallschichte gleich neben dem Oxid. Arsen sammelt sich hauptsächlich in der Eisenrundmasse zwischen der an Kupfer reichen Fase und dem Grundmetall.

Die Anreicherungsstufe ist am grössten bei Kupfer, Zinn und Antimon (Reihengrösse 100) während bei Arsen für eine ganze Reihengrösse kleiner ist. Wir stellten auch

fest, dass die Zusammensetzung der einzelnen Phasen welche in der Angereicherten Schichte entstanden sind vor allem von der Temperatur abhängig ist, ihr Volumen aber von der Stahlzusammensetzung und der Oxydationsbedingungen. Die Entstehung und das Wachsen der angereicherten Schichte beschrieben wir mit den Reaktionen welche auch die verschiedenen Mechanismen, abhängig von der Stahlzusammensetzung und der Oxydationstemperatur darstellen.

Die physikalisch chemischen Studien welche Salter (13) an verschiedenen Legierungen verfertigt hat, können erfolgreich an die dynamischen Prozesse welches auch die selektive Oxydation des Weicheisens darstellt, appliziert werden.

SUMMARY

Article is describing morphological and topological characteristics of enriched layers formed at the surface oxidation of low carbon steel alloyed with arsenic, antimony, copper and tin. At the beginning we took steels with only one trace element and gradually switched to the steels with various combinations of trace elements. Tests were carried out in steam, which enables the regular oxidation. It was found out that alphasgenic elements (Sn, Sb, As) in absence of copper get enriched in iron matrix in a similar way and on the same spot. When copper is present the tin and antimony are concentrated in the metal rich on copper and along the oxide. In majority of cases arsenic is concentrated between phase rich on copper and basic metal. The degree of enriching is the highest when working with copper, tin and antimony (range of size 100) while when working with arsenic it is approximately ten times smaller. It was also found out that the composition of phases formed in enriched layer depends on temperature mainly while the volume of the phase depends on composition and conditions of oxidation. Formation and growth of enriched layer were described by reactions which illustrate different mechanisms depending on composition of steel and temperature of oxidation. Studies made on different alloys by Salter () can be successfully applied on dynamic process which is represented by selective oxidation of low carbon steel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны морфологические и топологические особенности обогащенных слоев образованных при окислении поверхности мягкой стали легированной с As, Sb, Sn и Cu. Исследования образцов стали с содержанием с одним и в комбинации этих элементов проведены в водяном паре обеспечивая регулярный ход окисления. Обогащение As, Sb и Sn в основной массе Fe происходит почти одинаково в присутствии и без присутствия Cu. As концентрируется главным образом между богатой фазы Cu и основным металлом. Sb и Sn отлагаются в богатом Cu металле при окислении. Степень обогащения сильнее при Cu, Sn и Sb а слабее при As. Установлено что состав фаз в обогащенном слое зависит от температуры а ихний объем от состава стали и условий окисления. Образование и рост обогащенного слоя описаны при помощи реакций которые указывают на различные механизмы в зависимости от состава стали и температуры окисления. Физико-химические исследования которые провезел Salter (13) с различными сплавами можно успешно применить при этом селективном окислении мягкой стали.

Študij tvorbe oksidnih produktov in njihovo izločanje v žlindro

Na vzorcih šarž izdelanih v laboratorijski indukcijski peči smo zasledovali parametre, ki bi dovolili jasnejši vpogled v obseg izluženja opeke iz talilnika in v kinetiko tvorbe oksidnih komponent v talini kot rezultat različne dezoksidacijske tehnologije. Za vrednotenje parametrov smo uporabili rezultate mikroanalize izolatov, analize skupnega kisika, vsebnosti Si in topnega Al ter tehnološkega vpliva časa jemanja vzorcev po raztaljenju in vpliva različne dezoksidacijske tehnologije.

UVOD

Da bi nekoliko pojasnili razmerja med oksidnimi komponentami v nekovinskih vključkih in ugotovili kinetiko reakcij med komponentami ognjeodporne obloge in taline oziroma kinetiko izločanja teh komponent iz taline, smo si napravili sledeči program:

— v laboratorijski indukcijski peči s korundnim talilnikom je izdelati večje število nizkoogljičnih šarž, katere bi

a) dezoksidirali z Al takoj po raztalitvi,

b) iz nedezoksidirane taline bi v določenih časovnih razmikih jemali vzorce z malo kokilico, v kateri je Al žica v prebitku,

— iste poskuse bi izvedli tudi v talilniku SiO_2

— vzorce bi jemali od trenutka raztaljenja vložka do preboda v časovnem razmiku po 5 minut tako, da bi imeli od vsake šarže tri vzorce za analizo izolata na komponente Al_2O_3 , SiO_2 , za analizo skupnega kisika, topnega aluminija in analizo osnovnih elementov v izdelanem jeklu.

Prvi pogoj je, da je vložek za indukcijsko peč mehki in nesilicirani odpadek EM-Darby in da pride pri izdelavi šarž iz obloge talilnika v talino le Al_2O_3 in SiO_2 .

Menimo, da bomo v tem primeru imeli opraviti pri dobljenih rezultatih vzorcev, v trenutku raztaljenja — vendar po dodatku aluminija — le z dezoksidacijskimi produkti Al_2O_3 oziroma produkti vmesnih oksidnih faz $\text{FeO} \cdot \text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Po raztaljenju bo pa prišla z naraščanjem časa — zlasti v vzorcih nepomirjene taline, vzeti s kokilico z Al žico — do izraza tudi količina oksidnih komponent iz gonje odporne obloge talilnika.

Realizacija tega programa bi odprla možnost zasledovanja vpliva kvalitete obloge talilnika in časa po taljenju vložka na količino in sestavo

osnovnih oksidnih komponent v nekovinskih vključkih, ev. primerjave teh razmerij z onimi v velikih jeklarskih ponvah, ter možnost razlage intenzitete pojava oksidnih komponent iz obloge v talini ter intenzitete njih izločanja iz taline v žlindro.

1. IZDELAVA POSKUSNIH ŠARŽ

V indukcijski peči kapacitete 80 KW smo izdelali po 7 zelo nizkoogljičnih šarž v SiO_2 - in Al_2O_3 -talilniku. Vložek za mehke šarže je bil poprečne sestave — 0,06 % C, 0 % Si, 0,2 % Mn, 0,032 % S, 0,017 % topnega Al, 0,018 % skupnega O_2 . Analiza izolata je pokazala 0,004 % SiO_2 in 0,022 % Al_2O_3 .

Šarže smo izdelali v Al_2O_3 -talilniku pri zdržnosti 63 šarž in v SiO_2 -talilniku pri zdržnosti 18 šarž.

V tabelah 1 in 2 prikazujemo kemično sestavo posameznih šarž. Časovni razmiki vzemanja vzorcev se nekoliko razlikujejo od prvotnega programa, vendar dovoljujejo v osnovi zasledovanje posameznih komponent. Nekaj vzorcev je bilo vzeti iz obeh talilnikov takoj po raztaljenju vložka brez dodatka Al, pri vseh drugih pa smo dodali Al v talino oziroma v kokilico, kakor je omenjeno v opombi tabel 1 in 2.

Na splošno ugotavljamo, da narašča vsebnost Al_2O_3 v nekovinskih vključkih s časom po raztaljenju hitreje ter močneje v korundnem kot v kvarcovem talilniku, da je pa količina SiO_2 v vključkih večja v kvarcovem talilniku; v obeh talilnikih se SiO_2 do približno 5 minut po raztaljenju zmanjšuje, po tem času pa narašča (sliki 1, 2). Moramo pa pripomniti, da je ta ugotovitev le splošna, kajti vrednosti pripadajo v osnovi različni dezoksidacijski tehnologiji, torej tudi različnim razmerjem med oksidnimi komponentami v talini in oksidnimi komponentami iz obloge talilnika v trenutku dezoksidacije. To pa zahteva podrobnejšo analizo dobljenih rezultatov.

1.1 SiO_2 -talilnik

Na sliki 3 prikazujemo vpliv časa po raztalitvi vložka na Al_2O_3 v vključkih, pri čemer smo ločili ta razmerja za vzorce brez dodatka aluminija, za vzorce vzete iz predhodno z 0,29 % Al dezoksidirane taline, in za vzorce, katere smo vzeli po določenem času iz nepomirjene taline z malo kokilico, v kateri je bila Al žica v količini 0,15 in 0,4 %.

Tabela 1 — Kemične sestave šarž in vključkov iz SiO₂-talilnika

Št. vzorca	čas min	C	Si	Mn	S	Al (top)	ΣO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	O ₂
1	0.2	0.03	—	0.05	0.027	0.006	0.041	0.048	0.004	0.006	—	0.003	0.028
1a	1-2	0.03	—	0.07	0.030	0.004	0.059	0.028	0.02	0.07	0.013	0.0045	0.042
1b	8-9	0.015	0.04	0.04	0.028	0.064	0.074	0.11	0.003	0.08	0.014	0.004	0.076
2	0.2	0.03	—	0.04	0.029	0.004	0.039	0.044	0.005	0.009	—	0.0006	0.028
3	1-2	0.025	—	0.05	0.025	0.005	0.061	0.033	0.014	0.075	0.018	0.0035	0.048
4	8-9	0.034	0.02	0.05	0.027	0.069	0.086	0.13	0.002	0.06	0.018	0.004	0.082
5	12	0.03	0.05	0.05	0.027	0.38	0.055	0.095	0.0038	0.009	—	0.0007	0.049
6	17	0.032	—	0.05	0.027	0.23	0.061	0.12	0.002	0.009	—	0.0007	0.059
7	22	0.032	0.1	0.05	0.028	0.24	0.065	0.13	0.001	0.022	—	0.0013	0.066
8	5	0.031	—	0.05	0.025	0.28	0.063	0.10	0.004	0.005	—	0.038	0.062
9	10	0.034	0.05	0.05	0.026	0.35	0.056	0.11	0.002	0.005	—	0.007	0.051
10	15	0.035	0.03	0.04	0.027	0.26	0.059	0.12	0.002	0.005	—	—	0.058
11	0.2	0.03	—	0.08	0.03	0.075	0.053	0.10	0.002	0.005	—	0.0007	0.049
12	5.2	0.026	0.03	0.17	0.028	0.20	0.041	0.07	0.0046	0.0022	—	0.0018	0.036
13	10.2	0.034	0.02	0.08	0.026	0.14	0.073	0.095	0.0056	0.09	—	0.0011	0.071
14	1	0.042	—	0.08	0.028	0.063	0.041	0.065	0.0038	0.003	—	0.0025	0.035
15	6	0.038	0.13	0.07	0.027	0.25	0.041	0.07	0.0038	0.003	0.0013	0.0018	0.036
16	11	0.041	0.06	0.05	0.026	0.12	0.080	0.12	0.0095	0.005	0.0032	0.0011	0.063
17	0.2	0.041	—	0.1	0.025	0.086	0.063	0.095	0.004	0.022	0.004	0.006	0.054
18	5.2	0.042	0.04	0.08	0.025	0.24	0.027	0.075	0.001	0.004	—	0.001	0.036
19	10.2	0.042	0.026	0.05	0.025	0.13	0.07	0.12	0.0075	0.009	0.004	0.0013	0.063

Opomba:

čas - min: čas jemanja vzorca po raztaljenju
 Pri vzorcih 1, 1a, 2, 3 — brez dodatka Al

Pri vzorcih 1b, 4—10: dod. Al 0.15—0.40 % v kokilco, pri ostalih vzorcih 0.29 % v talino
 Elementi in spojine v %.

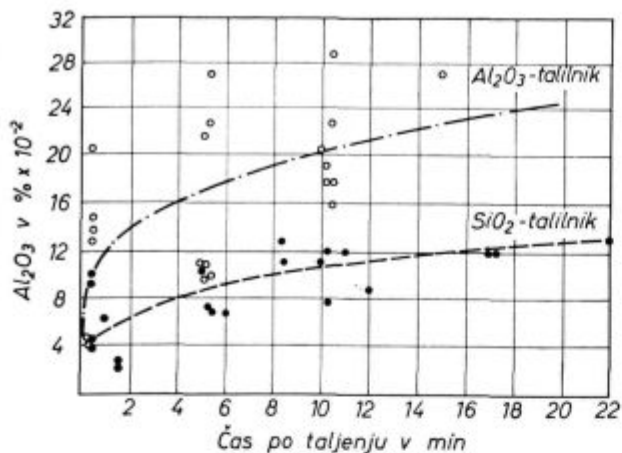
Tabela 2 — Kemične sestave šarž in vključkov iz Al₂O₃-talilnika

Št. vzorca	čas min	C	Si	Mn	S	Al (top)	ΣO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	O ₂
26	0.1	0.021	—	0.08	0.023	0.006	0.042	0.047	0.004	0.009	—	0.003	0.027
27	5.1	0.024	—	0.08	0.024	0.082	0.061	0.10	0.001	0.0045	—	0.0006	0.048
28	10.1	0.028	—	0.08	0.027	0.061	0.109	0.19	0.002	—	—	0.0006	0.091
29	0.1	0.03	—	0.07	0.023	0.004	0.039	0.041	0.005	0.011	—	0.004	0.026
30	5.1	0.024	—	0.06	0.026	0.14	0.06	0.11	0.002	0.004	—	0.0006	0.055
31	10.1	0.024	—	0.06	0.024	0.095	0.088	0.18	0.003	—	—	0.0006	0.086
32	0.2	0.03	—	0.09	0.026	0.05	0.081	0.15	0.001	0.009	—	0.0006	0.073
33	5.2	0.029	—	0.08	0.026	0.13	0.060	0.11	—	—	—	0.0003	0.053
34	10.2	0.024	—	0.06	0.024	0.056	0.093	0.18	0.002	—	—	0.0006	0.086
35	0.2	0.033	—	0.1	0.026	0.052	0.071	0.13	—	0.0045	—	0.0006	0.062
36	5.2	0.035	—	0.1	0.024	0.15	0.053	0.10	—	—	—	0.0009	0.0048
37	10.2	0.036	—	0.09	0.025	0.10	0.086	0.16	0.002	0.0045	—	0.0006	0.0077
38	0.2	0.027	—	0.07	0.023	0.09	0.077	0.14	0.002	0.0045	—	—	0.068
39	5.2	0.023	—	0.05	0.023	0.19	0.113	0.20	—	—	—	—	0.108
40	10.2	0.025	—	0.04	0.023	0.16	0.118	0.23	—	0.009	—	—	0.110
41	0.2	0.025	—	0.08	0.025	0.09	0.113	0.21	0.002	0.008	—	0.0009	0.102
42	5.2	0.023	—	0.05	0.023	0.16	0.141	0.25	—	0.014	—	0.0003	0.121
43	10.2	0.022	—	0.05	0.025	0.13	0.143	0.29	—	0.009	—	0.0003	0.140
44	5	0.023	—	0.06	0.023	0.21	0.110	0.22	—	—	—	0.0003	0.104
45	10	0.032	—	0.06	0.023	0.13	0.107	0.21	—	—	—	—	0.099
46	15	0.021	—	0.04	0.023	0.12	0.128	0.27	—	0.0055	—	—	0.129

Opomba:

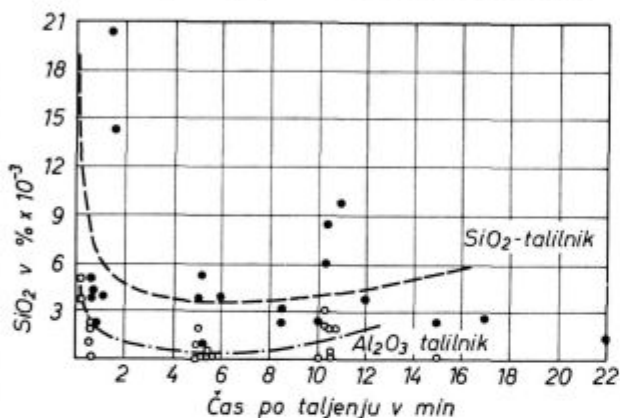
čas - min: čas jemanja vzorca po raztaljenju
 Pri vzorcih 26, 29 brez dodatka Al

Pri vzorcih 27, 28, 30—37: dod. Al 0.12—0.21 % v talino; pri vzorcih 38—46 dod. Al 0.24 % v kokilco.
 Elementi in spojine v %.



Slika 1

Vpliv časa po taljenju na količino Al_2O_3 v vključkih



Slika 2

Vpliv časa po taljenju na količino SiO_2 v vključkih

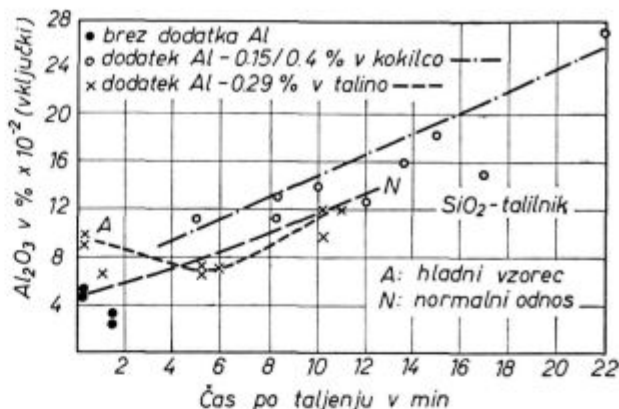
Po analizi teh rezultatov smemo sklepati, da raste količina Al_2O_3 s časom pri obeh tehnologijah dezoksidacije. V vzorcih vzeti takoj po taljenju, opazimo višje vrednosti Al_2O_3 , zato domnevamo, da je temperatura taline po taljenju prenizka.

Opazimo, da se s povečano količino topnega Al znatno zmanjša predvsem SiO_2 v vključkih, pri čemer kažejo spet odstopanje od splošne odvisnosti rezultati vzorcev, vzeti iz prehladne taline (slika 4).

Vpliv časa na obnašanje SiO_2 v vključkih v vzorcih brez in z dodatkom Al je prikazan na sliki 5. V vzorcih brez dodatka Al narašča SiO_2 , v vzorcih z dodatkom 0,29% Al v talino takoj po raztalitvi pa je opaziti do ca. 5 minut po raztaljenju neko znižanje SiO_2 , nato spet narašča ta oksidna komponenta v vključkih; stalno zniževanje SiO_2 v vključkih pa beležimo pri dodatku 0,4% Al žice v malo kokilico.

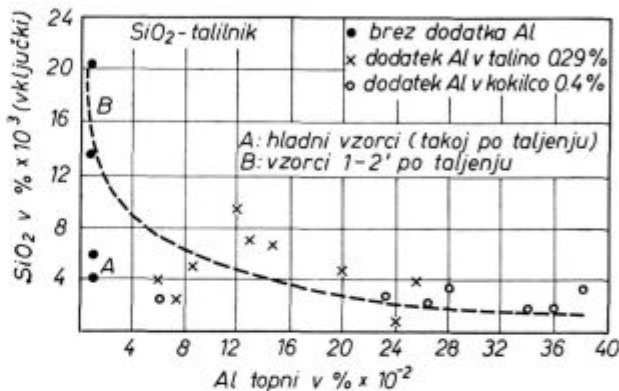
Slika 6 prikazuje skupni vpliv teh posameznih oksidnih komponent na skupni kisik. Odstopanja predstavljajo vzorci, vzeti iz hladne taline. Na splošno ugotavljamo, da se skupni kisik zmanjšuje, če narašča delež topnega Al v talini.

Vpliv časa po raztaljenju na skupni kisik je prikazan na sliki 7. S podaljšanjem časa narašča



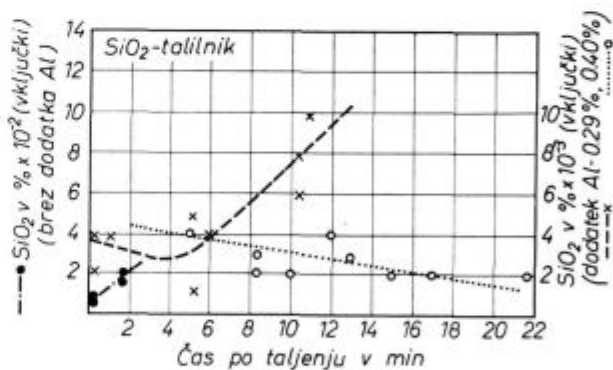
Slika 3

Vpliv časa po taljenju na količino Al_2O_3 v vključkih pri različnih načinih dezoksidacije z Al



Slika 4

Vpliv topnega Al na količino SiO_2 v vključkih pri različnih načinih dezoksidacije z Al

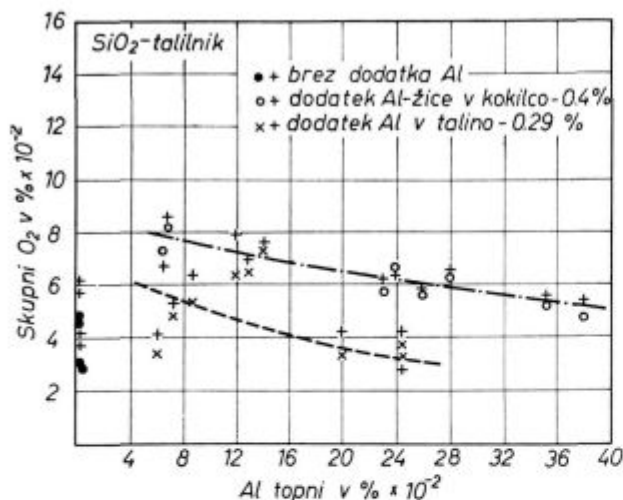


Slika 5

Vpliv časa po taljenju na količino SiO_2 v vključkih z ali brez dodatka Al

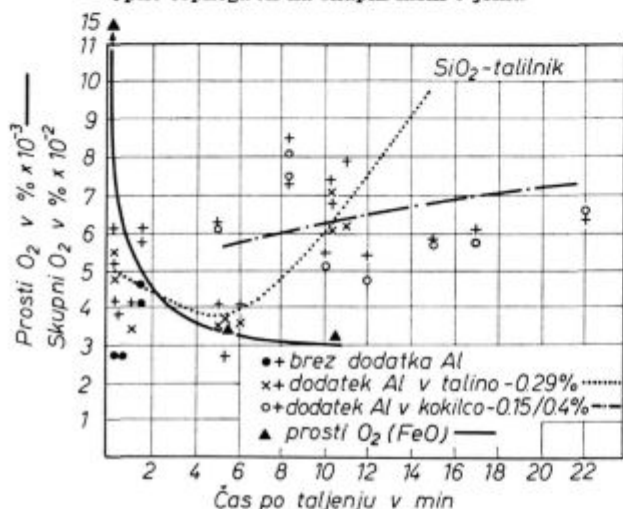
skupni kisik; izjema so takoj po raztaljenju vzeti vzorci. Na splošno je v vzorcih vzeti iz predhodno dezoksidirane taline kisik nižji, kot v onih iz nepomirjene taline in naknadno dezoksidiranih v kokilici.

Tipična odvisnost vsebnosti topnega aluminija od časa po raztalitvi vložka pri enakem dodatku aluminija v talino je prikazana na sliki 8. S podaljšanjem časa se vsebnost aluminija zmanjšuje neodvisno od dezoksidacijske prakse.



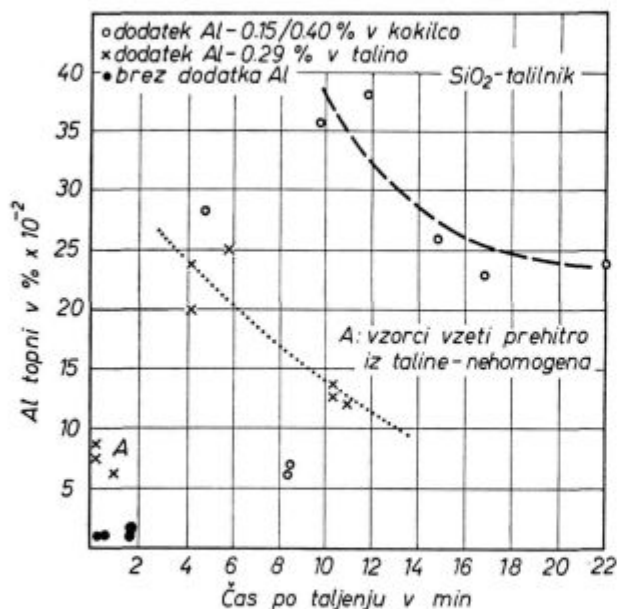
Slika 6

Vpliv topnega Al na skupni kisik v jeklu



Slika 7

Vpliv časa po taljenju na kisik v jeklu pri različnih dezoksidacijah



Slika 8

Vpliv časa po taljenju na topni Al v jeklu

1.1.1 Mehanizem dezoksidacije

Vsa prikazana razmerja kot jih dovoljujejo analiza izolata in analiza skupnega kisika ter topnega aluminija na eni strani, na drugi pa časovni vpliv in različna dezoksidacijska tehnologija, zahtevajo podrobno analizo.

V osnovi je bil sestavljen vložek v trenutku raztaljenja — kot je razvidno iz vzorcev št. 1, oziroma 1a in 3 — iz približno 0,004 % SiO_2 , 0,045 % Al_2O_3 , 0,003 % Cr_2O_3 in 0,007 % FeO kot silikati s skupnim kisikom 0,039 do 0,041 %. Približna količina prostega O_2 kot ($\text{FeO} + \text{MnO}$) znaša 0,010 do 0,015 %. Če primerjamo to analizo z analizo vložka pred raztaljenjem, ugotovimo, da se je vsebnost topnega aluminija v času raztaljenja zmanjšala od 0,017 % na 0,005 %; SiO_2 je praktično nespremenjen; Al_2O_3 se je povečal. Izguba aluminija za $(0,017 - 0,005) = 0,012$ % prinese v talino $0,012 \times 1,9 = 0,022$ % Al_2O_3 , iz vložka samega pa pride še približno 0,022 % Al_2O_3 . Skupno nastane torej v trenutku raztaljenja vložka 0,044 % Al_2O_3 , po analizi izolata ga je pa poprečno 0,045 %.

Po navedeni kalkulaciji smemo sklepati, da so vključki sestavljeni v glavnem iz oksidnih komponent, ki prihajajo v talino iz samega vložka, delno nastanejo zaradi dezoksidacijske zmožnosti aluminija v vložku, ni pa oksidne komponente iz ognjeodpornega materiala. Sklepati smemo, da takoj po raztaljenju vložka praktično ni nikakega izločanja oksidnih komponent iz taline v žilindro.

5 do 6 minut po raztaljenju, z dodatkom 0,29 % aluminija za dezoksidacijo taline, dobimo v vzorcih poprečno 0,22 % topnega aluminija. Ta količina je v ravnotežju z 0,004 % prostega kisika. Razlika $(0,015 - 0,004) = 0,011$ % O_2 reagira z Al in tvori 0,023 % Al_2O_3 .

Zaradi odgora Al nastane $(0,29 - 0,22) = 0,07$ % $\times 1,9 = 0,13$ % Al_2O_3 . Razlika Al_2O_3 $(0,13 - 0,023) = 0,107$ % je nastala zaradi delnega odgora aluminija zaradi cirkulacije taline, predvsem pa zaradi redukcije SiO_2 , ki pride v talino iz talilnikove obloge.

Kolikšen je delež SiO_2 iz ognjeodporne obloge talilnika nam povedo rezultati vzorci 1 do 2 minuti po raztaljenju iz nepomirjene taline in brez dodatka Al žice v kokilco. Po rezultatih tabele 1 vidimo, da znaša SiO_2 0,014 do 0,02 %. Po rezultatih vzorcev št. 26 in 29 iz Al_2O_3 -talilnika pa sklepamo, da je delež SiO_2 v vključkih 0,004 do 0,005 % oziroma enak kot v vzorcih št. 1 in 2 v SiO_2 -talilniku. Upravičeno sklepamo, da je pri poprečno 0,017 % SiO_2 v vzorcih, 1 do 2 minuti po raztaljenju, približno $(0,017 - 0,004) = 0,013$ % SiO_2 prišlo v času 1 do 2 minut po raztaljenju iz SiO_2 talilnikove obloge.

Na osnovi teh rezultatov, kakor tudi glavnih vplivnih faktorjev, ki odločajo o intenziteti izločanja oksidne komponente iz talilnikove obloge smo sestavili obrazec, ki dovoljuje do neke mere kalkulirati delež glavne oksidne komponente, ki je prišla v talino iz talilnikove obloge.

$$X = K \times (C + 1)^2 \times \sqrt{t/100} \%$$

X — delež SiO₂, ki pride v talino po določenem času

C — čas po raztaljenju vložka v minutah

t — temperatura v °C

K — konstanta z vrednostjo $5,08 \times 10^{-4}$

Po tem obrazcu znaša delež SiO₂ iz opeke v talini v času 1 minute po raztaljenju 0,002 ‰, v času 2 minut 0,018 ‰, v času 4 minut 0,05 ‰.

Če v začetno kalkulacijo nastanka posameznih oksidnih komponent vstavimo delež SiO₂ iz obloge talilnika 5 do 6 minut po raztaljenju vložka, je mehanizem tvorbe Al₂O₃ sledeč:

V 5 do 6 minutah pride iz talilnikove obloge 0,072 ‰ SiO₂; skupno z 0,004 ‰ SiO₂ iz vložka in redukcije skupne količine SiO₂ do vrednosti 0,003 ‰ (vzorci št. 12, 15, 18) nastane $1,13 \times 0,073 = 0,082 \%$ Al₂O₃. Delež Al₂O₃, ki nastane zaradi zračne oksidacije Al — cirkulacija taline — znaša: $0,13 - (0,082 + 0,023) = 0,025 \%$ (tabela 3a).

Delež izločanja Al₂O₃ po 5 do 6 minutah znaša:

$$\frac{(0,13 + 0,045) - 0,072}{0,175} \times 100 = 58 \%$$

Na osnovi te kalkulacije bi znašal Si kot element v talini v času 5 do 6 minut po raztaljenju okrog 0,035 ‰; stvarno ga ugotavljamo od sledov do 0,1 ‰. Na osnovi navedenega domnevamo, da je redukcija SiO₂ z Al že v zelo kratkem času popolna.

Kalkulirani delež izločanja komponent Al₂O₃ iz taline v žlindro je večji kot ga dovoljuje pri enakih kalkulacijah mehanizem dezoksidacije ob zasledovanju obnašanja tvorbe in izločanja Al₂O₃ iz stoječe taline v SM oziroma E-peči.

V času 10 do 11 minut po raztaljenju vložka so razmerja naslednja: Količina topnega aluminija se zmanjša od 0,29 ‰ na 0,11 — 0,14 ‰, povprečno 0,12 ‰, pri čemer se tvori $1,9 \times (0,29 - 0,12) = 0,323 \%$ Al₂O₃.

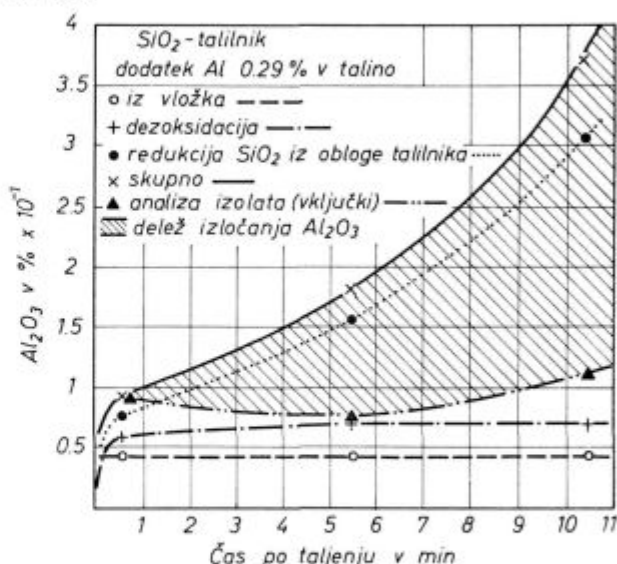
Pri dezoksidaciji nastane $2,1 \times (0,015 - 0,006) = 0,010 \%$ Al₂O₃.

Iz talilnikove obloge pride v tem času 0,25 ‰ SiO₂, iz vložka imamo 0,004 ‰ SiO₂, redukcija z Al pa se izvede do količine 0,007 ‰. Pri redukciji SiO₂ z Al nastane okrog 0,28 ‰ Al₂O₃. Skupno se tvori 0,368 ‰ Al₂O₃. Po analizi izolata v vzorcih št. 13, 16, 19 je povprečna količina Al₂O₃ 0,115 ‰. Delež izločanja Al₂O₃ v času do 11 minut znaša torej:

$$\frac{(0,368 - 0,115) \times 100}{0,358} = 68 \%$$

Zaradi redukcije SiO₂ z aluminijem nastane okrog 0,1 ‰ Si, v talini pa dobimo 0,026 ‰ Si. Menimo, da je izločanje SiO₂ zaradi cirkulacije taline hitrejše kot redukcija SiO₂ z aluminijem.

Navedeno nepopolno stopnjo redukcije povzroča verjetno zelo visoka količina SiO₂ iz talilnikove obloge.



Slika 9

Al₂O₃ v odvisnosti od časa po taljenju pri dezoksidaciji taline z 0,29% Al (SiO₂-talilnik)

V tabeli 3a in sliki 9 prikazujemo medsebojna razmerja tvorbe in izločanja Al₂O₃, kakor jih kaže zgoraj navedena kalkulacija iz mehanizma dezoksidacije.

Tabela 3a — Dezoksidacija taline z dodatkom 0,29 ‰ Al

Čas po raztal. min.	Al ₂ O ₃ iz vložka ‰	Al ₂ O ₃ dezoksidacija ‰	Al ₂ O ₃ zrač. oksid. ‰	Al ₂ O ₃ reduk. SiO ₂ ‰	Al ₂ O ₃ skup. ‰	Al ₂ O ₃ izolat ‰	Delež izločanja ‰
0,2/2	0,045	0,017	0,025	0,010	0,097	0,017	—
5,2/6	0,045	0,023	0,025	0,082	0,175	0,072	58
10/11	0,045	0,019	0,024	0,280	0,368	0,115	68

Mehanizem dezoksidacije vzorcev z 0,4 ‰ Al žice v kokilici: 10 minut po raztalitvi vložka je količina topnega aluminija 0,35 ‰ v ravnotežju z 0,002 ‰ prostega kisika. Razlika $(0,015 - 0,002) = 0,013 \%$ O₂ reagira z Al in tvori 0,027 ‰ Al₂O₃. Pri skupnem odgoru Al $(0,4 - 0,35) = 0,05 \%$ Al nastane 0,095 ‰ Al₂O₃. V tem deležu je 0,027 ‰ dezoksidacijskega produkta. Delež SiO₂ iz talilnika je po 10 minutah okoli 0,25 ‰, 0,005 ‰ SiO₂ pride iz vložka. Če bi se izvajala redukcija z Al do količine 0,002/0,003 ‰ SiO₂ (analiza izolata), bi nastalo:

$$[(0,25 + 0,005) - 0,0025] \times 1,13 = 0,286 \%$$
 Al₂O₃.

Pri skupnem odgoru okoli 0,095 ‰ Al₂O₃ nastane oziroma bi lahko našli v izolatu največ $(0,095 + 0,015) = 0,110 \%$ Al₂O₃; iz tega sledi, da po 10 minutah ni prišlo iz talilnikove obloge s talino v kokilico 0,25 ‰ SiO₂, temveč znatno manj. Ver-

jetni delež SiO_2 v talini v trenutku, ko s kokilico vzamemo vzorec, ustreza sledeči kalkulaciji:

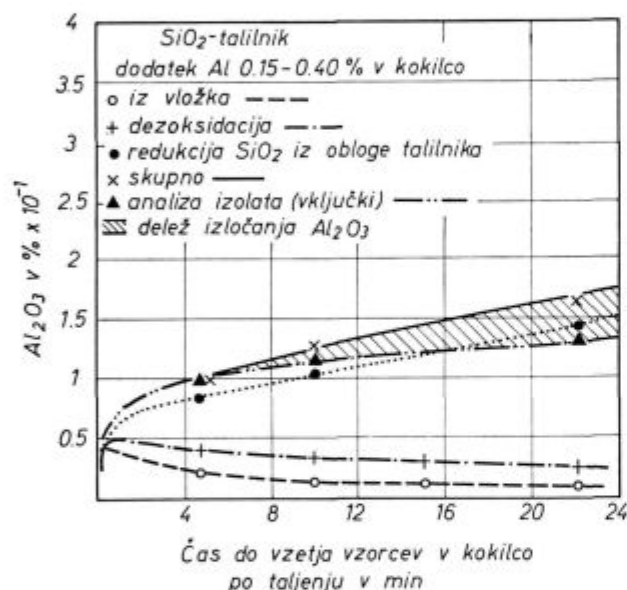
$$[(X + 0,005) - 0,002] \times 1,13 = (0,110 - 0,02 - 0,027) = 0,063\% \text{ Al}_2\text{O}_3.$$

$X = \text{SiO}_2\% = 0,052\%$ in Si v talini naj bi bil $0,024\%$.

Po tej kalkulaciji znaša torej delež izločanja komponent SiO_2 , ki pridejo iz talilnikove obloge v času 10 minut, okoli 75% . Konkretna vsebnost Si v talini znaša po 10 minutah od sledov do $0,05\%$. V talini v kokilici se izvrši redukcija SiO_2 z Al, pri tem nastane:

$$[(0,052 + 0,005) - 0,0025] \times 1,13 = 0,062\% \text{ Al}_2\text{O}_3.$$

Skupno nastane v talini v kokilici: $0,062 + 0,025 + 0,015 + 0,02 = 0,122\% \text{ Al}_2\text{O}_3$. V izolatu dobimo okoli $0,11\%$; iz tega sledi, da znaša kalkulacijski delež izločanja komponent Al_2O_3 okoli 8 do 9% . Objektivno vzeto pa je nemogoče zaznati delež izločanja v času 3 do 4 sekund, ko je vzorec taline v kokilici še tekoč.

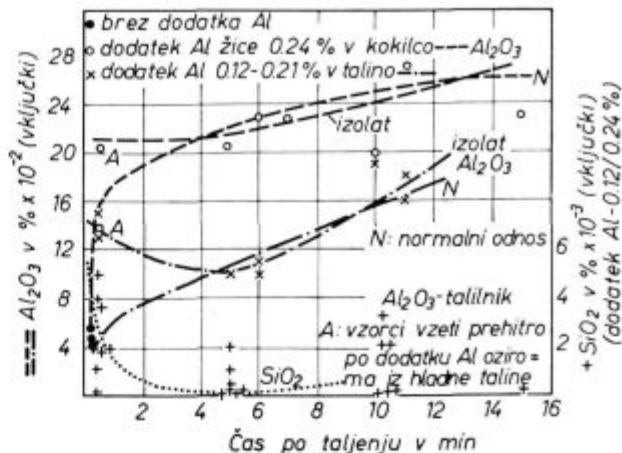


Slika 10
 Al_2O_3 v odvisnosti od časa po taljenju pri dezoksidaciji vzorca v kokilici z Al (SiO_2 -talilnik)

V tabeli 3b in na sliki 10 prikazujemo medsebojna razmerja med posameznimi izviri določenih količin komponent Al_2O_3 in vpliv časa na navedena razmerja:

Tabela 3b — Dezoksidacija vzorcev v kokilici z dodatkom $0,15-0,4\%$ Al žice

Čas po raztal.	Al_2O_3 iz vložka %	Al_2O_3 dezoksidacija %	Al_2O_3 zrač. oksid. %	Al_2O_3 reduk. SiO_2 %	Al_2O_3 skup. %	Al_2O_3 izolat %	Delež izločanja %
5	0,02	0,025	0,02	0,033	0,098	0,10	—
10	0,015	0,025	0,02	0,062	0,122	0,11	9
15	0,014	0,025	0,023	0,066	0,124	0,12	3
22	0,012	0,025	0,022	0,103	0,162	0,13	19

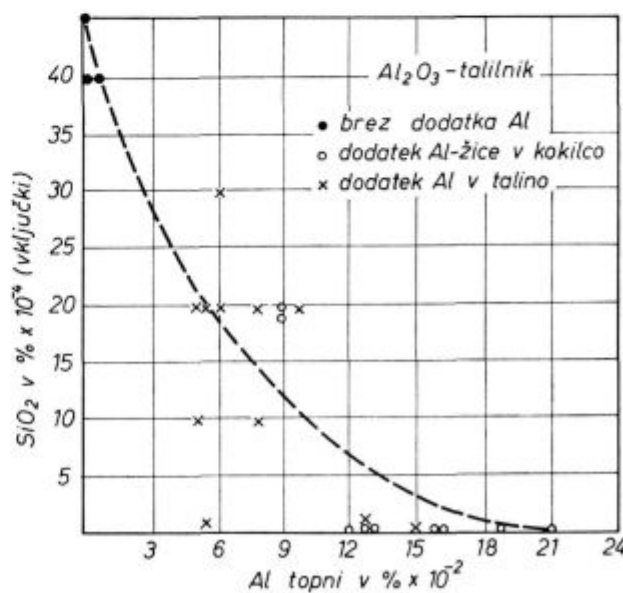


Slika 11
 Al_2O_3 in SiO_2 v vključkih v odvisnosti od časa po taljenju pri različnih tehnoloških postopkih

1.2 Al_2O_3 — talilnik

Vpliv časa oziroma tehnološke prakse dezoksidacije na vsebnosti Al_2O_3 v vključkih je prikazan na sliki 11. V vzorcih, vzeti takoj po dodatku Al oziroma takoj po raztalitvi, dobimo vrednosti Al_2O_3 , ki odstopajo od splošno verjetnega razmerja. Ugotavljamo, da v obeh primerih različne dezoksidacije taline narašča Al_2O_3 s časom po raztalitvi vložka, medtem ko do ca. 6 minut po raztaljenju količina SiO_2 v vključkih naglo pada, nato pa ima tendenco postopnega naraščanja.

S povečano količino topnega Al v talini se zmanjšuje vsebnost SiO_2 v vključkih; za prakso je zanimiva ugotovitev, da je možno pričakovati okoli $0,004\%$ SiO_2 pri približno $0,014$ do $0,016\%$ topnega aluminija. Z znatno večjimi količinami topnega aluminija je možno reducirati SiO_2 v vključkih do praktično nepomembnih količin (slika 12). Pri vzorcih talin, izdelanih v Al_2O_3 talil-

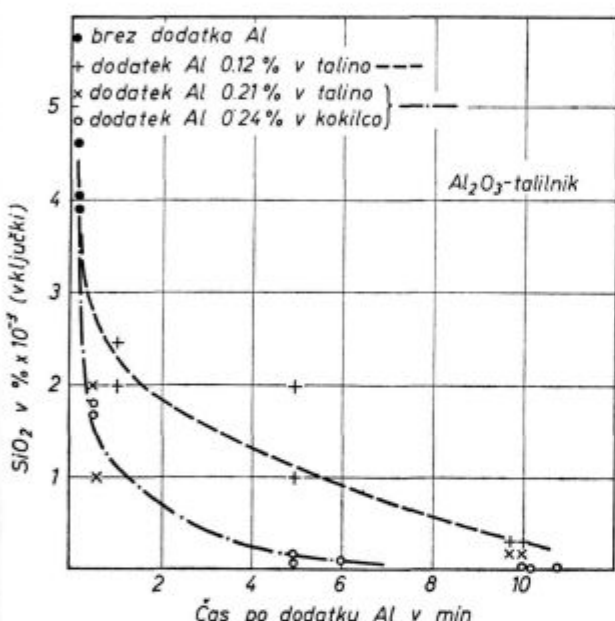


Slika 12
 SiO_2 v vključkih v odvisnosti od topnega Al v talini

niku ni zaslediti takšnih razlik v količinah SiO_2 , kakršne opazimo pri izdelavi šarž v čistem kvarcnem talilniku.

Vpliv časa na skupno vsebnost kisika v vključkih je v osnovi podoben pri obeh talilnikih. Vsebnosti kisika v vzorcih, vzetih prehitro po taljenju oziroma prehitro po dodatku aluminija v talino, so večje, kot po 6 minutah, ko je bila talina bolj vroča in bolj homogena; v nadaljnjem času se skupni kisik povečuje, vendar hitreje v vzorcih, dezoksidiranih z dodatkom aluminija v talino takoj po raztalitvi, kot v vzorcih dezoksidiranih z Al žico v kokilici. Na splošno je pri obeh načinih dezoksidacije več skupnega kisika v izdelavi šarž v korundnem talilniku, kot v SiO_2 -talilniku.

Vpliv časa na vsebnosti SiO_2 v vključkih pokaže slika 13.



Slika 13

SiO_2 v vključkih v odvisnosti od časa po dezoksidaciji z Al

Pri praktično enakem dodatku aluminija v obeh dezoksidacijskih praksah zasledimo večjo intenziteto redukcije SiO_2 , če sledi dodatek aluminija v kokilico.

1.2.1 Mehanizem dezoksidacije

Za izdelavo šarž v korundnem talilniku smo imeli za vložek čiste valjarniške odpadke EM-Darby, podobnega sestava kot v kislem talilniku.

Po raztaljenju brez dodatka aluminija je bilo topnega aluminija okoli 0,006%, SiO_2 v vključkih 0,004%, okoli 0,045% Al_2O_3 in skupnega O_2 med 0,037 do 0,042%. V času taljenja se je torej topni aluminij zmanjšal od 0,017 na 0,006%, prosti O_2 pa povečal na povprečno 0,039—(0,21 + 0,002 + 0,001) = 0,015%. Dezoksidacijo taline smo izvedli z dodatkom 0,12 do 0,25% Al.

V času 0,1 do 0,2 minute po raztaljenju je bila pri vzorcih brez dodatka aluminija vsebnost topnega aluminija 0,004 do 0,006%, pri vzorcih z dodatkom 0,21% aluminija pa okoli 0,05%.

Povečanje topnega aluminija na samo 0,05% da slutiti, da je čas po dodatku Al za homogenizacijo Al v talini prekratek. Kljub temu pa je v času 0,2 minute po raztaljenju vložka talina praktično brez SiO_2 .

Po 6 minutah je talina homogenizirana, vsebnost topnega aluminija znaša povprečno 0,14%. Zaradi skupnega odgora aluminija nastane $1,9 \times (0,21 - 0,14) = 0,13\%$ Al_2O_3 , 0,14% topnega Al je v ravnotežju z 0,005% prostega O_2 , zato je nastalo zaradi dezoksidacije okoli $2,1 \times (0,015 - 0,005) = 0,02\%$ Al_2O_3 , 0,004% Al_2O_3 nastane zaradi redukcije 0,003% SiO_2 , 0,045% Al_2O_3 pride iz vložka, torej skupno 0,175%.

Vprašamo se kolikšen delež Al_2O_3 pride iz talilnikove obloge? Poslužili smo se v ta namen rezultatov analize izolata, podobno kot pri SiO_2 -talilniku, ki se tičejo iz nepomirjene taline v mali kokilici vzetih vzorcev, v katerih je bilo 0,24% Al žice. V takoj po raztaljenju vzeti vzorci smo ugotovili 0,09% topnega Al. Okoli 5 minut po raztaljenju je bilo v vzorcih povprečno 0,18% topnega Al in 0,23% Al_2O_3 .

Iz navedenih razmerij lahko sklepamo, da znaša pri odgoru Al žice nastali Al_2O_3 okoli $1,9 \times (0,24 - 0,18) = 0,12\%$. Iz vložka pride 0,045% Al_2O_3 , torej znaša skupna količina $0,045 + 0,120 = 0,165\%$ Al_2O_3 . V izolatu dobimo povprečno 0,23% Al_2O_3 . Če ne upoštevamo izločanja Al_2O_3 iz taline v času 5 minut po raztaljenju, znaša razlika, ki bi ustrezala deležu Al_2O_3 iz talilnikove obloge okoli $0,23 - 0,165 = 0,065\%$.

5 do 6 minut po raztaljenju vložka pride torej v talino 0,065% Al_2O_3 iz ognjeodporne talilnikove obloge.

Proti prejšnji kalkulaciji za vzorce, vzete iz dezoksidirane taline, bi torej nastalo okoli 6 minut po raztaljenju skupno $0,065 + 0,175 = 0,240\%$ Al_2O_3 . V izolatu ga je 0,10 do 0,11%, torej znaša obseg izločanja v času 6 minut okoli 56%.

V navedenem obrazcu za kalkulacijo deleža izlužene oksidne komponente iz obloge $X = K \times (\dot{C} + 1)^2 \times \sqrt{t/100}$ ima za Al_2O_3 — talilnik konstanta K vrednost $3,2 \times 10^{-4}$.

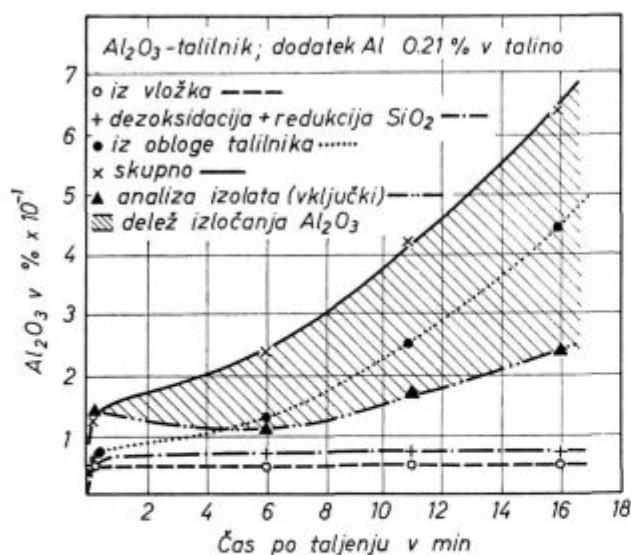
Iz tega obrazca sledi, da znaša delež Al_2O_3 iz obloge talilnika po 6 minutah okoli 0,062%, po 11 minutah okoli 0,186%, po 16 minutah okoli 0,370%.

V trenutku raztaljenja znaša ta delež 0,0013%.

V tabeli 4a in na sliki 14 prikazujemo razmerja med količinami, izviri Al_2O_3 in vplivom časa nanje.

Če zasledujemo mehanizem dezoksidacije vzorcev jekla, vzeti iz nepomirjene taline in dezoksidiranih v mali kokilici z Al žico, ugotovimo sledeče:

11 minut po raztaljenju pride v talino iz obloge talilnika 0,186% Al_2O_3 , iz vložka 0,045% Al_2O_3 ,



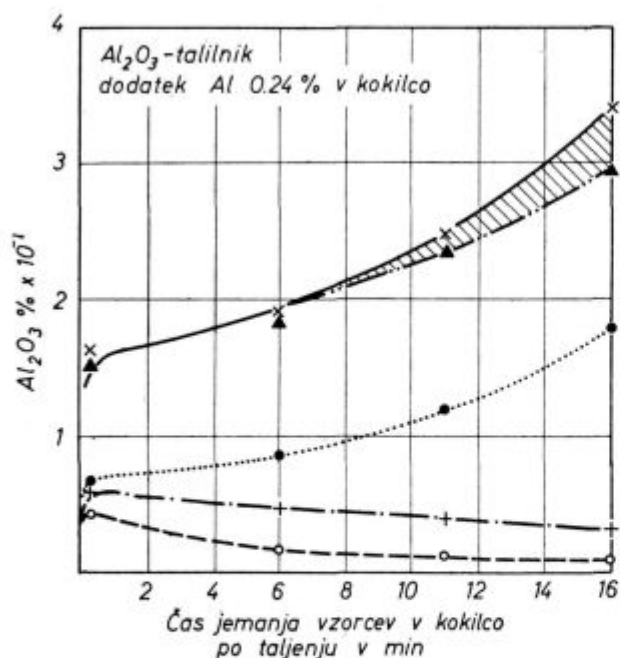
Slika 14

Al_2O_3 v odvisnosti od časa po taljenju pri dezoksidaciji z 0,21 % Al (Al_2O_3 -talilnik)

skupaj 0,231 %. Pri deležu izločanja 61 % v 11 minutah ostane v talini $0,39 \times 0,231 = 0,09$ % Al_2O_3 .

V vzorcu jekla je 0,15 % topnega Al. Razlika (0,24—0,15) = 0,09 % Al reagira s kisikom v 0,17 % Al_2O_3 . Skupaj se tvori $0,09 + 0,17 = 0,26$ % Al_2O_3 . V izolatu je 0,21 do 0,29 %, v poprečju 0,25 % Al_2O_3 , torej znaša delež izločanja Al_2O_3 v talini v kokilici okoli 4 %.

Zadevni rezultati vseh vzorcev, ki so bili porirjeni z Al žico v kokilici, so navedeni v tabeli 4b in prikazani na sliki 15.



Slika 15

Al_2O_3 v odvisnosti od časa po taljenju pri dezoksidaciji vzorca v kokilici z Al (Al_2O_3 -talilnik) (legenda ista kot v sliki 14)

Tabela 4a — Dezoksidacija taline z 0,21 % Al

Čas po raztal. min.	Al_2O_3 iz vložka %	Al_2O_3 dezok. red. SiO_2 %	Al_2O_3 talilnik %	Al_2O_3 zrač. oksid. %	Al_2O_3 skup. %	Al_2O_3 izolat %	Delež izločanja %	Al topni %
0,1/0,2	0,045	0,018	0,003	0,077	0,143	0,145	—	0,05
5/6	0,045	0,020	0,065	0,110	0,240	0,100	57	0,14
10/11	0,045	0,025	0,186	0,179	0,435	0,170	61	0,10
16	0,045	0,025	0,370	0,179	0,619	0,230	64	0,095

Tabela 4b — Dezoksidacija vzorcev v kokilici z 0,24 % Al žice

Čas po raztal. min.	Al_2O_3 iz vložka %	Al_2O_3 dezok. red. SiO_2 %	Al_2O_3 talilnik %	Al_2O_3 zrač. oksid. %	Al_2O_3 skup. %	Al_2O_3 izolat %	Delež izločanja %	Al topni %
0,2	0,045	0,024	0,003	0,098	0,17	0,17	—	0,09
5/6	0,02	0,03	0,035	0,122	0,200	0,200	—	0,17
10/11	0,018	0,026	0,073	0,123	0,260	0,250	4	0,14
16	0,016	0,025	0,134	0,165	0,340	0,300	12	0,14

1.2.2 Možnost uporabe laboratorijskih rezultatov za kalkulacijo vzdržnosti industrijskih jeklarskih ponev

Če zasledujemo stvarne vzdržnosti 30 t korundne ponve za določene obratovalne pogoje (izdelane šarže z 0,27/0,3 % C, temperature šarže poprečno 1610° C, debelina opeke 125 mm), ugotovimo, da je po 42 minutah skupnega livnega časa izluženih okoli 0,10/0,11 % Al_2O_3 , torej praktično enak delež kot po 7 do 8 minutah rafinacijskega časa taline v korundnem talilniku.

Če ohranimo razmerja med livnimi faktorji v navedenem obrazcu, potem bo vrednost nove konstante za izluženje opeke iz industrijsko uporabne korundne ponve:

$$K = 1,6 \times 10^{-5}$$

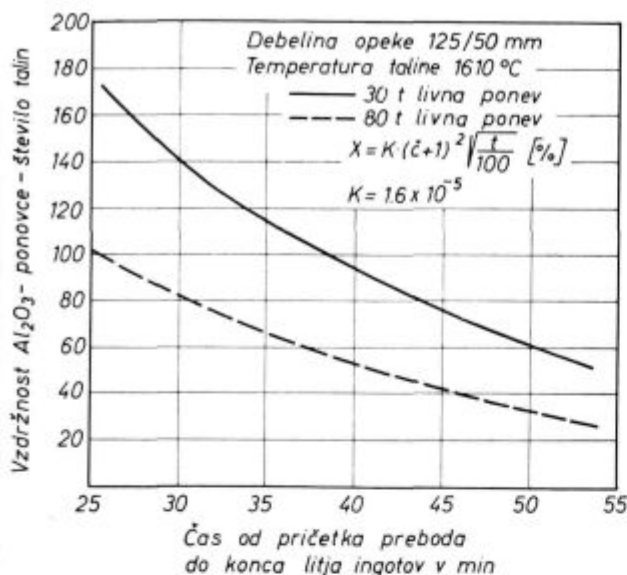
Pri 42 minutah livnega časa in temperaturi šarže 1610° C bo delež opeke v talini konkretno:

$$X = 1,6 \times 10^{-5} \times (42 + 1)^2 \times \sqrt{16,1} = 0,12 \%$$

$$Al_2O_3 \text{ v deležu opeke pa je } 85 : 100 \times 0,12 = 0,1 \%$$

Če upoštevamo kalkulirane vrednosti konstante in dimenzij korundne ponve z debelino korundne opeke pred uporabo 125 mm, po končani vzdržnosti okoli 50 mm, lahko kalkuliramo vzdržnost livne ponve za različno dolge livne čase in temperature tako, kot smo prikazali za 80 in 30 t korundno jeklarsko ponev na sliki 16.

Primerjava podobnih razmerij med SiO_2 talilnikom in stvarnim obnašanjem vzdržnosti šamotne jeklarske ponve daje v navedenem obrazcu vrednost konstante $K = 3,17 \times 10^{-5}$. Po tej kalku-



Slika 16
Vzdržnost Al_2O_3 -ponovce v odvisnosti od časa vlijanja

laciji bi vzdržala 30 t šamotna ponev pri skupnem livnem času 42 minut, debelini opeke 125 oziroma 50 mm, približno 31 šarž.

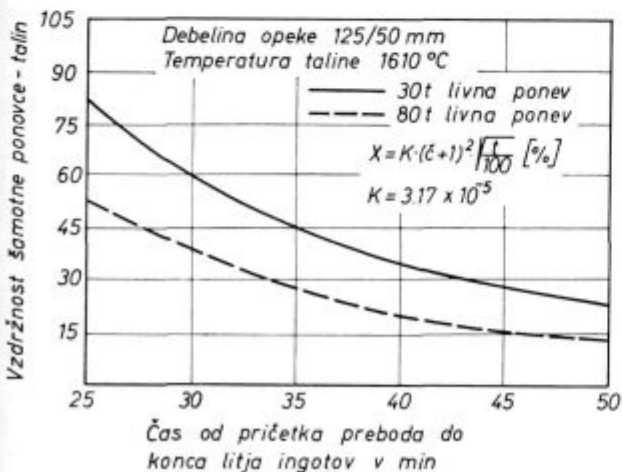
Praktično je ta številka nemara previsoka, ker se opeka neenakomerno obrablja. Kalkulirane vzdržnosti 30 in 80 t šamotne ponve pokaže slika 17.

Po teh razglabljanjih bi dejali, da sledi delež izluženja opeke v prvih 3 minutah po prebodu, to je polnjenju ponve, obrazcu, ki ga daje zasledovanje rezultatov vzorcev iz v indukcijski peči izdelanih talin.

Delež izlužene šamotne opeke bo:

$X = 5,08 \times 10^{-4} \times (3 + 1)^2 \times \sqrt{16,1} = 0,032 \%$.
 SiO_2 , ki pride z opeko v talino, bo $65/100 \times 0,032 = 0,021 \%$.

Zaradi močne cirkulacije taline v času preboda menimo, da bo delež izločanja komponent SiO_2 podoben kot v talinah, izdelanih v kislem talilniku indukcijske peči, to je okoli 64%. Po tej verjet-



Slika 17
Vzdržnost šamotne ponovce v odvisnosti od časa vlijanja

nosti ostane v talini do pričetka litja v kokile okoli $36/100 \times 0,021 = 0,008 \%$ komponent SiO_2 .

Spričo ugotovitve 0,002 do 0,004% SiO_2 v vključkih, če je vsebnost topnega Al v talini nad 0,018% in do 0,012% SiO_2 pri šaržah, ki imajo le sledove topnega aluminija, se nam zdi verjetna zgoraj navedena kalkulacijska vrednost SiO_2 v šarži pred pričetkom litja v kokile. Kolikor še ostane SiO_2 ($0,132 - 0,021$) = 0,111% v preostalih 39 minutah livnega časa, je verjetno pretežno v žlindri, saj ima žlindra v mirno stoječi talini v ponvi največji delež pri izluženju opeke.

Podobna kalkulacija za korundno ponev kaže sledeča razmerja: 3 minute po prebodu bo izluženi delež opeke:

$X = 3,2 \times 10^{-4} \times (3 + 1)^2 \times \sqrt{16,1} = 0,021 \%$.

Z opeko pride v talino $85/100 \times 0,021 = 0,017 \%$ Al_2O_3 . Ob deležu izločanja okoli 61% v času preboda, kakor smo računali v prejšnjih poglavjih za komponente Al_2O_3 v korundnem talilniku indukcijske peči, ostane pred pričetkom litja v kokile v talini približno $39/100 \times 0,017 = 0,006 \%$ Al_2O_3 . Preostala količina Al_2O_3 ($0,09 - 0,017$) = 0,073% v nadaljnjih 39 minutah livnega časa je verjetno predvsem v žlindri.

Spričo neznatne intenzitete izločanja bogatih komponent SiO_2 v naslednjem času, ko v ponvi sami ni nikakega gibanja taline, medtem ko je obseg izločanja bogatih komponent Al_2O_3 tudi v mirni talini precejšen, kar je odvisno od sestave oksidnih vključkov in temperature taline, smemo sklepati, da bi moral biti v vključkih taline iz kisle ponve delež oksidnih komponent večji kot iz korundne.

POVZETEK

Izdelali smo večje število šarž s približno 0,03% C v indukcijski peči zmogljivosti 25 kg s SiO_2 in Al_2O_3 -talilnikom. Za vložek smo uporabili čiste valjarniške odpadke nizkoogljicne, nesilicirane in z aluminijem pomirjene kvalitete EM Darby.

V časovnih razmikih od 0,1 do 22 minut smo jemali vzorce jekla, s katerimi smo izdelali analize izolatov, skupnega kisika in vsebnosti topnega Al. V bistvu smo uporabili dve dezoksidacijski praksi:

- dezoksidacije taline takoj po raztaljenju vložka z enkratnim dodatkom Al,
- dezoksidacijo nepomirjene taline, ki smo jo jemali v določenih časovnih presledkih z malo kokilico, v kateri je bila Al žica.

Rezultate vzorcev smo mogli uporabiti delno za ugotavljanje vpliva časa in temperature na količino izluženih oksidnih komponent iz talilnikove obloge, delno pa, upoštevaje tehnološke parametre izdelave šarž, za kalkulacijo deleža izločanja komponent Al_2O_3 in SiO_2 iz taline.

Po skupnih rezultatih in verjetnem mehanizmu dezoksidacije smo sestavili obrazec za kalkulacijo verjetnega deleža opeke izlužene iz talilnikove obloge.

$X = K \times (C + 1)^2 \times \sqrt{t/100}$ (%)

K — константа, odvisna od kvalitete opeke in načina, kako je izpostavljena ognjeodporna obloga izluženju (indukcijska peč, močna cirkulacija med prebodom, mirno stoječa talina).

Iz rezultatov sledi, da vpliva dodatek Al žice v kokilici na popolno dezoksidacijo taline že v času 0,1 minute in da more Al reducirati komponente SiO₂ v talini do praktično minimalnih količin že

v času 1 do 2 minut. Prvi pogoj teh razmerij je dovolj visoka vsebnost topnega Al.

Zasledovanje in vrednotenje rezultatov vzorcev jekla, izdelanega v SiO₂-talilniku, omogoča predvsem ugotovitev, da je delež izločanja SiO₂-komponent zaradi stalne cirkulacije taline, celo večji kot pri Al₂O₃-komponentah. Ta ugotovitev pa ne more veljati, če talina miruje.

ZUSAMMENFASSUNG

Wir schmolzen eine grössere Anzahl von Chargen mit 0,03 % C im Induktionsofen von 25 kg Fassungskapazität im SiO₂- bzw. Al₂O₃-Schmelzraum. In Zeitabständen nahmen wir Stahlproben und fertigten die Analysen der Isolate, des Gesamtsauerstoffes und des löslichen Al an. Wir verwendeten zwei Desoxydationsarten mit Al und zwar sofort nach dem Erschmelzen und mit Al in der kleinen Kokille bei der Probenentnahme aus dem unberuhigten Schmelzgut.

Nach den Resultaten und wahrscheinlichem Mechanismus der Desoxydation haben wir eine Formel zur Berechnung des wahrscheinlichen Anteils der Steine, welche aus dem Schmelzriegel ausgespült werden, aufgestellt:

$$X = K \times (C + 1)^2 \times \sqrt{t/100} \quad (\%)$$

In der Gleichung bedeutet:

X — Anteil des SiO₂, der nach einer bestimmten Zeit in das Schmelzgut kommt

K — Konstante, abhängig von der Qualität der Steine und der Art, wie die feuerfeste Auskleidung der Abnützung ausgesetzt ist (Induktionsofen, starke

Zirkulation während des Abstiches, ruhig stehendes Schmelzgut)

C — Zeit nach der Schmelzung des Einsatzes in Minuten

t — Temperatur in Graden C

Aus den Resultaten folgert, dass der Zusatz von Al-Draht in die Kokille auf die vollständige Desoxydation schon in der Zeit von 0,1 Minuten einwirkt und dass Al die Komponenten des SiO₂ im Schmelzgut bis zu den praktisch minimalen Mengen schon in der Zeit von 1 bis 2 Minuten reduzieren kann. Die erste Bedingung dafür ist eine genügend hohe Menge von schmelzbarem Al.

Die Verfolgung und die Wertung der Resultate der Proben von Stahl, erzeugt im SiO₂-Schmelzriegel, ermöglicht vor allem die Feststellung, dass der Anteil der Ausscheidung von SiO₂-Komponenten wegen der ständigen Zirkulation des Schmelzgutes sogar grösser ist als bei den Al₂O₃-Komponenten. Diese Feststellung kann aber keine Geltung haben, wenn das Schmelzgut ruht.

SUMMARY

A series of melts with approximately 0.03 % of carbon has been prepared in an induction furnace of 25 kg capacity and lined with SiO₂ or Al₂O₃.

Samples were taken in regular intervals and analysis of inclusions, total oxygen and soluble aluminum was determined.

Desoxydation with aluminum was carried out in two ways: aluminum was added after melting down and aluminum was added in the mould when taking samples of rimming steel.

The following relationship for the rate of refractory lining disengaged was proposed according to experimental results and supposed mechanism of desoxydation:

$$x = k \times (c + 1)^2 \times \sqrt{t/100} \quad (\%)$$

x = rate of SiO₂ in the melt from the lining

k = constant dependant on the quality of lining and

on the process operation (induction furnace, extent stirring during tapping, resting melt)

c = time in minutes after melting down the charge

t = temperature, °C.

The following conclusions could be drawn: complete desoxydation takes place after 0.1 minute when aluminum wire is added to the mould and secondly, aluminum can reduce practically all SiO₂ after 1 or 2 minutes when soluble fraction of aluminum is sufficiently high.

Evaluation of research data for the steels melted in acid crucible makes it possible to conclude that the permanent stirring of the melt causes even stronger elimination of SiO₂ components than of Al₂O₃ components from the melt. This finding is, however, not applicable to the resting melt.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования в индукционной печи мощности 25 кг. выплавлено большое количество плавков с содержанием прибл. 0.03 % C, футеровка ванны SiO₂ или Al₂O₃. Для анализа продуктов раскисления, определения кислорода в образованных оксидах и расплавленного Al, были, в определенных временных интервалах, взяты образцы стали. Употреблены два способа раскисления: с Al непосредственно по расплавлению стали и с Al в кокилье во время отбора образца из кипящей стали.

На основании полученных результатов и учитывая возможный механизм раскисления, предложено уравнение для вычисления возможной доли футеровки выделенной из ванны:

$$X = K \times (C + 1)^2 \times \sqrt{t/100} \quad (\%)$$

где — X — доля SiO₂ переходящая после определенного времени

в плавку, K — постоянная величина зависящая от качества кирпича и от условий под какими находится износ жаростойкой футеровки (индукционная печь, интенсивность циркуляции плавки во время выпуска, спокойно находящаяся плавка). C — время по расплавлению загрузки в мин-ах; t — темп-а плавки в град-ах Ц.

Исследованием доказано, что полное раскисление плавки с Al в кокилье закончено в течении 0.1 мин., а также что Al раскисляет компоненты SiO₂ на минимальное количество в течении 1—2 мин., под условием, что в расплаве достаточное количество растворенного Al. Обнаружено, что доля выделенной компоненты SiO₂, вследствие циркуляции плавки значительно больше чем компонент Al₂O₃. Это не замечено когда плавка находится в спокойном состоянии.

Statistično planiranje in vrednotenje metalurških raziskav

ANALIZA VARIANCE S PROGRAMI NA RAČUNALNIKU ZUSE Z-23

Z razvojem metod matematične statistike, predvsem pa z razširjanjem uporabe elektronskih računalnikov se uveljavljajo specialne metode vrednotenja in obdelave rezultatov v kontroli kvalitete. Poseben pomen in ekonomsko-tehnično učinkovitost nudijo take metode pri planiranju raziskav.

Članek opisuje statistično metodo analize variance. Za več variant te metode so izdelani programi na elektronskem računalniku ZUSE Z-23.

Namen članka je prikazati metodo analize variance v taki obliki, da bo pristopna najširšemu krogu tehnično-strokovnih kadrov v proizvodnji, kontroli in raziskavah. S tem naj bi članek prispeval svoj delež vsklajevanju raziskovalno-razvojnega dela z najmodernejšimi metodami in splošni razširitvi uporabe matematično statističnih metod ter elektronskih računalnikov v reševanju tehničnih problemov.

S tem namenom je članek napisan v obliki preprostega navodila za planiranje nalog, pripravo podatkov in tolmačenje rezultatov. Izračun analize variance z uporabo računalnika je tako vsakomur dostopen. Za poglobitev znanja in študij teoretskih osnov je podana literatura.

UVOD

Analiza variance je matematična tehnika, ki ima veliko moč in praktičen pomen pri vrednotenju eksperimentalnih podatkov.

Pri najrazličnejših področjih raziskav je treba večkrat primerjati vzorce, serije, postopke, metode, rezultate in podobno med seboj.

Vzemimo, da proizvajamo en izdelek po dveh različnih tehnoloških procesih. Zanima nas, kako tehnologija vpliva na določeno karakteristiko izdelkov. V ta namen zberemo podatke za karakteristiko izdelkov enega tehnološkega procesa in podatke za isto karakteristiko izdelkov drugega tehnološkega procesa. Statistična metoda z analizo variance nam pove, ali se karakteristika izdelkov pri enem tehnološkem procesu razlikuje od karakteristike pri drugem tehnološkem procesu. Analiza variance nam določi tudi pomembnost razlike.

Primerjava dveh serij in ugotavljanje pomembnosti razlik med parametri posameznih serij je še razmeroma preprosta. Večkrat pa je treba pri

raziskavah primerjati večje sisteme podatkov. Ugotavljanju statistično pomembnih razlik v celotnem sistemu sledi selekcija serij na osnovi medsebojnih primerjav po principu »vsaka z vsako«. To obsežno delo opravlja analiza variance kot posebna metoda matematične statistike, s katero je mogoče kvantitativno ugotoviti variacije v sistemu po njihovih izvorih ali posledicah in jih tudi iz celotnega sistema izdvojati.

Taki problemi nastopajo pri analizah vseh vrst procesov — tehnoloških postopkov, kontrolnih postopkov in znanstveno tehničnih preizkusov.

Če množico podatkov lahko klasificiramo po enem ali po več kriterijih, potem lahko variacije med podatki razdelimo na komponente in te pripišemo posameznim kriterijem klasifikacije. S preizkušanjem pomembnosti teh komponent lahko ugotovimo, kateri od upoštevanih kriterijev so povezani s pomembnim deležem celotne spremenljivosti.

Na primer serija kemijskih analiz različnih vzorcev istega materiala lahko vsebuje razlike, ki so v zvezi z vzorčenjem, lahko pa tudi razlike, ki izvirajo iz same analize. Z analizo variance lahko spremembe zaradi vzorčenja in spremembe zaradi analiziranja ločimo in ocenimo njihovo jakost.

Za izvedbo analize je potrebno podatke povezati v primeren model in jih obdelati z ustrežno matematično tehniko.

Prednosti analize variance so zelo odvisne od dveh odločilnih faktorjev:

- od sistema ureditve podatkov in od logičnosti primerjav,
- od upoštevanja značilnih lastnosti modela.

Uspešnost analize variance najbolj zagotovimo, če že pri planiranju poizkusov izberemo ustrezen model in s tem izkoristimo vse prednosti statistično planiranih raziskav.

Že primerjava dveh serij nam da precej računskega dela, računanje obsežnejšega sistema po metodi analize variance pa je praktično izvedljivo le z uporabo elektronskih računalnikov. Računanje obsežnejše analize variance za več vplivnih faktorjev in za več kombiniranih vplivov je brez uporabe elektronskega računalnika skoraj nesmiselna izguba časa. Brez računalnika je to delo zaradi velikega števila računskih operacij skoraj neizvedljivo ali pa izredno zamudno in izpostavljeno številnim napakam.

Seveda lahko trdimo, da je računanje brez računalnika nesmiselna izguba časa samo, če nam je računalnik dostopen in če imamo za ta računalnik izdelan ustrezen program.

V raziskovalnem oddelku železarne Ravne že več let uporabljamo analizo variance pri vrednotenju rezultatov raziskovalnih nalog. Dosegli smo zelo vzpodbudne uspehe, predvsem, kadar smo po ustreznih modelih za analizo variance raziskavo tudi planirali in izvedli. Če eksperimentiranje ni prirejeno vnaprej določenemu delu za izračun, največkrat ne moremo izkoristiti vseh rezultatov preizkušanja. Tako ostane vedno del dragega eksperimentiranja neizkoriščen. S planiranjem raziskave lahko torej zmanjšamo stroške oziroma obseg eksperimentiranja, ali pa povečamo zanesljivost zaključkov.

Široko uporabnost analize variance v metalurških raziskavah kaže že kratek pregled problemov, ki smo jih s to metodo reševali v železarni Ravne:

- Vpliv peči — jeklarskega agregata na čistost jekla OCR-4 pri določeni tehnologiji;
- Vpliv različnih variant jeklarske tehnologije na čistost jekla OCR-4 pri izdelavi v isti peči;
 - primerjava popolne oksidacije in pretalitse,
 - primerjava različnih načinov dezoksidacije pri postopku popolne oksidacije;
- Vpliv ciklusov toplotne obdelave, geometrije rezila in pogojev rezanja na obstojnost strgarskih nožev iz brzoreznega jekla;
- Vrednotenje metalografskih pregledov in mehanskih poizkusov za različne vrste jekel;
- Vpliv vsebnosti celotnega in kislinotopnega aluminija na velikost zrna pri cementacijskih jeklih;
- Primerjava vsebnosti kislinotopnega aluminija v jeklih EC 80 in EC 100;
- Primerjava dveh vezanih statističnih množic za ugotavljanje pomembnosti razlik čistosti jekla (stopnje vključkov) pri glavi in nogi ingota, ali za ugotavljanje pomembnosti razlike v ogljiku pri litju jekla v dve ponovci.

Precej analiz variance smo izračunali brez računalnika, nato smo se posluževali standardnega programa na računalniku Elliot 803. V letu 1967 smo razvili za svoje potrebe program analize variance na računalniku ZUSE Z-23. Program torej imamo, zato v tem članku ne bomo opisovali poteka izračuna in teoretskih osnov, ampak le praktično uporabo analize variance. Za vse, ki želijo poglobiti svoje znanje in spoznati osnove ter potek izračuna, je na razpolago zelo obsežna literatura.

Avtor analize variance je Fisher, ki je na mednarodnem posvetovanju matematikov v Torontu že leta 1924 prikazal to metodo. Z njo je rešil mnoge probleme, katerih se do takrat raziskovalci niso znali lotiti na primeren in učinkovit način. Prav to je bila ideja in osnova izredno hitrega razvoja statistično planiranih raziskav. Fisher in za njim še mnogi drugi statistiki — matematiki so razvili številne specializirane metode in modele za planiranje eksperimentov.

Pravi razmah je tem metodam omogočila šele široka uporaba elektronskih računalnikov.

Področje uporabnosti analize variance je zelo široko, zato so praktične potrebe narekovale pripravo več različnih programov za izračun analize variance z računalnikom.

ANALIZA VARIANCE ZA 1 VPLIVNI FAKTOR

Oznaka programa »1 D FIXEN MODEL«

Oglejmo si praktičen primer, pri katerem imamo 3 metalurške peči! V vsaki proizvajamo isto vrsto jekla. Zanima nas, če peč s svojimi karakteristikami vpliva na stopnjo nemetalnih vključkov v jeklu. Tu je peč vplivni faktor, za katerega izvršimo analizo variance. Zberemo podatke o stopnjah nemetalnih vključkov za nekaj šarž iz 1. peči, za nekaj šarž iz 2. peči in za nekaj šarž iz 3. peči. Število podatkov je lahko različno za posamezne peči, vendar prevelika razlika ni zaželena. Analiza variance nam bo pokazala, če se 3 skupine podatkov med seboj razlikujejo in kako pomembna je razlika med njimi.

Popolnoma isto bi storili, če imamo še več peči. V tem primeru je bila peč vplivni faktor, lahko pa imamo najrazličnejše vplivne faktorje.

V isti peči lahko isto vrsto jekla izdelamo na različne načine:

- 1. način: popolna oksidacija, dodatek FeSi in majhen dodatek Al
- 2. način: popolna oksidacija, dodatek FeSi in velik dodatek Al
- 3. način: popolna oksidacija, dodatek CaSi
- 4. način: pretalitev

Tu je vplivni faktor način izdelave, oziroma jeklarski tehnološki postopek. Za različne karakteristike izdelkov si lahko izberemo za opazovanje še najrazličnejše vplivne faktorje. V tem poglavju bomo obravnavali le analizo variance za 1 vplivni faktor.

Zbiranje podatkov in priprava za izračun na računalniku

Pri zbiranju podatkov za analizo variance po programu »1 D FIXEN MODEL« je važno, da so posamezni podatki med seboj neodvisni. Torej na velikost katerega koli od zbranih podatkov vpliva le slučaj in opazovani vplivni faktor, ne pa tudi drugi podatki. Kakor bomo videli v praktičnem primeru si v jeklarstvu to lahko zagotovimo s tem, da pri določeni vrsti jekla vsak podatek vzamemo iz druge šarže. Podatki določeni iz iste šarže med seboj namreč niso neodvisni in nam za model analize variance, ki ga v tem poglavju obravnavamo, ne morejo koristiti.

Pripravo zbranih podatkov za računalnik si oglejmo na praktičnem primeru:

1. primer

V Železarni Ravne smo zbrali podatke za vsebnost Al v jeklu ECN 200. Pri tem smo zasledovali velikost zrna ASTM in hoteli ugotoviti, kako vsebnost Al vpliva na velikost zrna. Za vplivni faktor,

Tabela 1 — Podatki vsebnosti Al_{cel} pri posameznih velikostih zrna za 45 šarž jekla ECN 200

Velikost zrna ASTM	PODATKI							
	Vsebnost			Al_{cel} % v jeklu ECN 200				
1	ni podatkov							
2	ni podatkov							
3	0,009	0,009	0,052					
4	0,012	0,015	0,016	0,009	0,023			
Vplivni faktor	5	0,018	0,033	0,033	0,020	0,046	0,045	0,024
		0,019	0,002	0,006	0,018	0,016	0,014	0,021
		0,016	0,023	0,014	0,025	0,027	0,015	0,012
		0,024	0,015	0,007	0,019			
6	0,079	0,033	0,034	0,045	0,020	0,028	0,028	
	0,026	0,011						
7	0,024	0,039	0,042					
8	ni podatkov							

ki je nosilec skupin smo si torej izbrali velikost zrna. Kaj je vplivni faktor in kaj je opazovana karakteristika, je pri analizi variance nepomembno. Vplivni faktor ima le pomen kriterija za razdelitev skupin, nima pa pomena pravega vpliva. Od te izbire je odvisen sistem zbiranja podatkov. (tabela 1)

Za računalnik podatke natipkamo na teleprinterški trak na sledeč način:

```
U8181U ; ECN200 AL-CEL ; 0 E2408E
4' 3' 5' 25' 12'
,009 ,009 ,052
,012 ,015 ,009 ,016 ,023
,018 ,033 ,033 ,02 ,046 ,024 ,019 ,002 ,006
,018 ,016 ,014 ,021 ,016 ,023 ,014 ,027 ,015 ,012
,024 ,015 ,007 ,019
,0179 ,033 ,034 ,045 ,02 ,028 ,026 ,028 ,011
,024 ,039 ,042
3' 10 2,23 5 2,84 1 4,3
```

Oblika pisanja je zelo važna in mora biti izvršena točno po navodilih! Zapis U8181U je vedno isti in se nanaša na program »1D FIXEN MODEL«. Med črkama U in številom 8181 ne sme biti nobenega presledka. V novo vrsto ali po dveh presledkih napišemo podpičje. Za podpičjem sledi besedilo, ki se od primera do primera spreminja in nam služi le zato, da kasneje rezultate lahko spoznamo in razločimo. Besedilo lahko vsebuje največ 50 teleprinterških znakov, priporočljivo pa je, da je čim krajše. Za tem besedilom zopet sledi podpičje, za podpičjem pa presledek ali nova vrsta in nato neko število, npr. 0. Za številom zopet presledek in nato zapis E2408E, ki je prav tako brez presledkov med črkama E in številom 2408. V novo vrsto napišemo najprej število stanj vplivnega faktorja. Ker smo iz določenih razlogov vzeli velikost zrna 6 in 7 ASTM skupaj, je število stanj v našem primeru 4' (apostrof pomeni za ra-

čunalnik celo število). Zaradi poznejšega tolmačenja rezultatov označimo ta stanja s celimi števili.

- 1' stanje z velikostjo zrna 3
- 2' stanje z velikostjo zrna 4
- 3' stanje z velikostjo zrna 5
- 4' stanje z velikostjo zrna od vključno 6 dalje

Za številom stanj vplivnega faktorja pridejo po vrsti število podatkov za stanje 1', število podatkov za stanje 2' itd. Iz tabele 1 res lahko preverimo, da so števila podatkov za 4 stanja

```
3' 5' 25' 12'
```

Potem na teleprinterju v novo vrsto napišemo podatke za stanje 1', nato podatke za stanje 2' itd. Na koncu podatkov moramo s posebnimi števili določiti še, s kakšno statistično pomembnostjo bomo ugotavljali razliko med skupinami podatkov za posamezna stanja vplivnega faktorja. Število 3' pomeni, da smo se odločili za tri različne kriterije pomembnosti. Števila 10, 5 in 1 pomenijo, da so to verjetnosti 90 %, 95 % in 99 %. Razliko do 100 % navadno označimo z grškim α . Torej je pri nas $\alpha = 10, 5$ in 1. Za vsakim α je zapisana vrednost parametra F, ki jo dobimo iz tabele 7. Za vsak α imamo posebno tabelo. V isti tabeli pa se vrednosti F razlikujejo še glede na števili v_1 in v_2 , ki ju imenujemo prostostni stopnji. Tako vrednost F določimo s tremi indeksi.

$F\alpha; v_1, v_2$

Število v_1 je pri analizi variance z 1 vplivnim faktorjem za eno manjše od števila stanj vplivnega faktorja. Torej v našem primeru

$$v_1 = 4 - 1 = 3.$$

Število v_2 pa izračunamo:

$$v_2 = (\text{število vseh podatkov}) - (\text{število stanj})$$

Torej v našem primeru:

$$v_2 = 45 - 4 = 41$$

Poiščimo vrednost za $F_{5; 3, 41}$.

V tabeli 8 za $\alpha = 5$ najdemo:
 — za $v_1 = 3$ in $v_2 = 40$ vrednost 2,84
 — za $v_1 = 3$ in $v_2 = 60$ vrednost 2,76.
 Razlika vrednosti je 0,08. Razlika med obema v_2 pa 20. Zato za razliko 1 pri v_2 ne moremo pričakovati niti 0,01 razlike v vrednostih F. Torej

$$F_{5; 3, 41} = 2,84$$

V drugih primerih bi seveda vzeli res vmesno interpolirano vrednost. (Za točno interpolacijo glej navodila v prilogi.)

Tolmačenje rezultatov

Pripravljen trak s podatki prečita računalnik in s programom »1D FIXEN MODEL« izračuna rezultate, ki jih napiše v sledeči obliki:

```
1 D FIXEN MODEL
ECN200 AL-CEL
3' 0.0233 0.0248
5' 0.0150 0.0052
25' 0.0205 0.0105
12' 0.0290 0.0101
.88976064610-03 3 .29658688110-3 2.37
.51391158210-02 41 .12534428810-03
.60288764610-2 44
ALFA = 10.0
1' 3' 0.003
4' 1' 0.006
3' 2' 0.005
4' 2' 0.024
4' 3' 0.009
ALFA = 5.0
```

Najprej je napisan naslov programa, po katerem je računalnik računal. Nato je napisano besedilo, ki smo ga v podatkih postavili med podpičje. Po vrsti slede za vsa 4 stanja vplivnega faktorja: število podatkov, srednja vrednost in standardna deviacija. Npr.: za stanje 1', to je zrno manjše ali enako 3, smo imeli 3 podatke s srednjo vrednostjo 0,0233 in standardno deviacijo 0,0248. Za temi 4 vrsticami je nekaj presledka, nato pa standardna računška shema za analizo variance. Za nas so morda zanimive vrednosti v 2. koloni. To sta $v_1 = 3$ in $v_2 = 41$. Čisto na desni napiše računalnik vrednost F, ki jo je izračunal. Pri nas je $F = 2,37$. Čim večji je F, tem pomembnejša je razlika med srednjimi vrednostmi. Nato računalnik napiše:

ALFA = 10.0

kar pomeni, da bo ugotovil, če je verjetnost 90 %, da je razlika srednjih vrednosti posledica različnih stanj vplivnega faktorja. V našem primeru računalnik res odkrije take razlike srednjih vrednosti. Katere so te razlike in kako so velike nam pove v treh kolonah. V 1. koloni je vedno število stanja, ko ima opazovana karakteristika (pri nas vsebnost Al) večjo srednjo vrednost od srednje vrednosti v stanju, katero označuje število v 2. koloni. V koloni 3, pa je razlika med tema dvema srednjima vrednostima. V našem primeru piše najprej

1' 3' 0,003

To pomeni, da je srednja vrednost pri stanju 1' večja od srednje vrednosti pri stanju 3', razlika med njima pa je 0,003. Torej je 90 % verjetnost, da je razlika srednjih vrednosti v stanju 1' (zrno do vključno 3) in stanju 3' (zrno 5) posledica različnih stanj vplivnega faktorja (vsebnosti Al).

V celoti je računalnik napisal 5 razlik, ki so posledice različnih stanj vplivnega faktorja. Vidimo, da je potrebno največ Al v stanju 4, to je za velikost zrna 6 ali več. Za zrno 5 je potrebno več Al kot za zrno 4 in manj Al kot za zrno 6 ali 7. Za vse trditve pa je verjetnost 90 %, da so pravilne. Naslednji izpis računalnika je ALFA = 5.0. Ker za njim ne sledi ničesar več ni 95 % verjetnosti, da je razlika srednjih vrednosti posledica različnih stanj vplivnega faktorja. Pri izpisu lahko nastopi tudi primer

ALFA = 10.0 (ali 5.0)

ALFA = 5.0 (ali 1.0)

da med dvema zaporednima izpisoma ALFA ni drugega kot prazen prostor. To pomeni, da ni 90 % (ali 95 %) verjetnosti, da je razlika med dvema srednjima vrednostima posledica različnih stanj vplivnega faktorja. Pač pa je 90 % (ali 95 %) verjetnost, da se od 0 pomembno razlikuje vsaj en izraz oblike

$$C_1 \bar{X}_1 + C_2 \cdot \bar{X}_2 + C_3 \cdot \bar{X}_3 + C_4 \cdot \bar{X}_4 \quad (1)$$

kjer je

$$C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 0 \quad (2)$$

Izraz (1) imenujemo pri pogoju (2) kontrast srednjih vrednosti. Razlika je le poseben primer kontrasta za $C_1 = 1$, $C_2 = -1$, $C_3 = 0$ in $C_4 = 0$. Kontrastov je že med 4 srednjimi vrednostmi toliko, kolikor je točk v 3 dimenzionalnem prostoru, zato v praksi ne moremo odkriti vseh, omejimo se le na razlike.

2. primer

Kot primer obdelan na računalniku vzemimo še vsebnost Al v jeklu EC 80 in jeklu EC 100. Zanima nas, če je vsebnost Al v teh dveh jeklih pomembno različna. Za jeklo EC 80 smo zbrali podatke za 91 šarž. Za jeklo EC 100 pa podatke za 52 šarž. Podatke pripravimo na teleprinterskem traku v obliki, ki smo jo že opisali:

U8181U

; AL-TOP EC 80: 100; 0 E2408E

2' 91' 52'

sledi 91 podatkov za Al v EC 80

sledi 52 podatkov za Al v EC 100

3' 10 2,74

5 3,91

1 6,84

Ker smo napisali najprej 91 podatkov za vsebnost Al v EC 80 računalnik označi jeklo EC 80 kot stanje 1' vplivnega faktorja, jeklo EC 100 pa kot stanje 2' vplivnega faktorja.

Izpis rezultatov je sledeč:

1 D FIXEN MODEL

AL-TOP EC 80:100

91' 0.0145 0.0091

52' 0.0307 0.0164

.127167638₁₀-02 1 .127167638₁₀-02 8.46

.212027398₁₀-01 141 .150374040₁₀-03

.224744161₁₀-01 142

ALFA = 10.0

2' 1' 0.006

ALFA = 5.0

2' 1' 0.006

ALFA = 1.0

2' 1' 0.006

Ker je tudi pod ALFA = 1.0 napisano 2' 1' 0.006 je 99 % verjetnost, da je v jeklu EC 100 (stanje 2') več Al-top kot v jeklu EC 80 (stanje 1').

ANALIZA VARIANCE ZA 2 VPLIVNA FAKTORJA

Oznaka programa »2 D FIXEN MODEL«

To je metoda, ki istočasno določi vpliv dveh faktorjev na določeno lastnost proizvoda. Tako nam ni treba dvakrat zbirati podatkov. Zato pa moramo zbirati podatke na čisto poseben način. Brez predhodnega točnega plana ne moremo zbrati potrebnega števila podatkov, ali pa bodo nekateri podatki odveč.

Plan zbiranja podatkov

Najprej izberemo stanje za 1. vplivni faktor. Recimo, da jih je r. Označimo jih z A₁, A₂ . . . A_r. Nato izberemo stanje 2. vplivnega faktorja. Teh naj bo t. Označimo jih z B₁, B₂ . . . B_t. Za vsako kombinacijo obeh vplivnih faktorjev moramo zbrati enako število podatkov. Recimo, da smo se odločili za n podatkov, ki jih imenujemo ponovitve, ker pripadajo isti kombinaciji vplivnih faktorjev.

Zbrati moramo torej rtn podatkov. Pripravimo si tabelo v katero bomo vpisovali podatke. Imamo 2 možnosti za obliko tabele. Prva možnost je v tabeli 2.

Tabela 2 — Plan zbiranja podatkov za majhno število stanj in veliko število ponovitev.

	A ₁				A ₂				A _r			
	B ₁	B ₂	...	B _t	B ₁	B ₂	...	B _t	B ₁	B ₂	...	B _t
1												
2												
.												
.												
.												
n												

To tabelo uporabimo, če imamo majhno število stanj 2. vplivnega faktorja in veliko število ponovitev. V nasprotnem primeru pa rajši uporabimo tabelo 3.

Tabela 3 — Plan zbiranja podatkov za veliko število stanj in majhno število ponovitev

	A ₁		A ₂		A _r	
	1	2	1	2	1	2
B ₁	1		1		1	
	2		2		2	
	.		.		.	
	.		.		.	
B ₂	1		1		1	
	2		2		2	
	.		.		.	
	.		.		.	
B _t	1		1		1	
	2		2		2	
	.		.		.	
	.		.		.	

V članku ing. Pratnekarja: »Raziskave obstojnosti brzoreznih jekel« sta prikazani tabeli za jekli Elomax in BRC-3, po katerih so bili zbrani podatki. Pri nožih iz jekla BRC-3 sta bili opazovani 2 karakteristiki in sicer obrabna obstojnost T in širina obrabe VB. Vplivni faktorji so bili termična obdelava, cepilni kot γ , naklonski kot λ in hitrost rezanja v. Če si izberemo za 1. vplivni faktor termično obdelavo, za 2. vplivni faktor pa cepilni kot γ , dobimo obliko tabele 2. Prvi vplivni faktor ima 5 stanj (podatkov za ciklus 1290° C + 560° C in $\lambda = +4^\circ$ tu ne vzamemo zraven), drugi vplivni faktor pa ima 3 stanja. Število ponovitev je 21 (3 × 7), ker nas trenutno ne zanimajo hitrosti rezanja. Lahko pa si izberemo za 2. vplivni faktor namesto kota γ hitrost rezanja, za 1. vplivni faktor pa kombinacije ciklusa toplotne obdelave s koti λ in γ . Tako bi dobili 18 stanj za 1. vplivni faktor in 3 stanja za 2. vplivni faktor, ter 7 ponovitev. Če sliko 17 v članku ing. Pratnekarja gledamo na ta način, vidimo primer zbranih podatkov po tabeli 3. So še druge možnosti za izbor 2 vplivnih faktorjev izmed štirih. Tabela na sliki 17 je bila vnaprej planirana, zato se da z njo izvršiti veliko primerjav.

Pri zbiranju podatkov moramo upoštevati še naslednje. Za preizkušanje velikega števila nožev smo morali uporabiti več obdelovancev. Ti obdelovanci so bili sicer iz iste vrste jekla in celo iz iste šarže, vendar se lahko med seboj razlikujejo po trdoti. Če bi tako preizkušali nože po vrsti najprej vse enako termično obdelane na istem obdelovancu, potem pa vse drugače termično obdelane na drugem obdelovancu, bi bile lahko razlike v obrabi posledica spremembe trdot obdelovanca, ne pa posledica toplotne obdelave. Tako bi si ves poizkus pokvarili in lahko dobili zgrešene zaključke. Temu se izognemo s slučajno določenim vrstnim redom preizkušanja nožev. Vse nože za preizkus označimo z zaporednimi števili med 100 in 1000. Potem vzamemo slučajni vrstni red števil

po tabeli 4. Tabela uporabimo tako, da določimo poljubno mesto v tabeli: npr. 80. vrsta, 19. kolona in dobimo številko 9. Od te številke gremo v tabeli poljubno desno, levo, navzgor ali navzdol in odčitamo še 2 številki, tako da dobimo 3-mestno število. Če gremo v desno, dobimo številki 7 in 9. Skupaj torej število 979. Nož s to zaporedno številko preizkušamo najprej. Če noža s številko 979 ni, vzamemo naslednje 3 številke v desno, t. j. 256 in preizkušamo nož s številko 256 pri pogojih po shemi. Tako nadaljujemo, da dobimo vrstni red nožev za preizkušanje:

979, 256, 808, 340, 608, ...

Če noža s kakšno številko ni, potem to število enostavno v zaporedju izpustimo. Nove člene v zaporedju lahko dobimo v kateri koli smeri od zadnje številke zadnjega člena zaporedja. Tako za 608 lahko sledi katero koli od števil 899 (desno), 385 (navzgor) ali 044 (navzdol). Seveda zadnje število odpade, ker smo označili nože s števili med 100 in 1000. Sploh je v tabeli slučajnostnih števil izbira precej prosta, le da ne preskakujemo števil brez potrebe.

Podobno lahko uporabimo tudi druge tabele slučajnostnih števil. S tem, da smo nože za preizkušanje razvrstili po tabeli slučajnostnih števil,

$$\begin{array}{lll} 3' & 10 & F_{10}; r-1, rt(n-1) & F_{10}; t-1, rt(n-1) & F_{10}; (r-1)(t-1), rt(n-1) \\ & 5 & F_5; r-1, rt(n-1) & F_5; t-1, rt(n-1) & F_5; (r-1)(t-1), rt(n-1) \\ & 1 & F_1; r-1, rt(n-1) & F_1; t-1, rt(n-1) & F_1; (r-1)(t-1), rt(n-1) \end{array}$$

Pri tem je r število stanj 1. vplivnega faktorja, t število stanj 2. vplivnega faktorja, n pa je število ponovitev. Števila F_a, γ_1, γ_2 dobimo v tabelah 7—9.

Tabela 4 — Slučajna števila'

Kolone Vrste	0—4	5—9	10—14	15—19	20—24	25—29	30—34	35—39	40—44	45—49	50—54	55—59	60—64	65—69	70—74	75—79	80—84	85—89	90—94	95—99	
0	54463	22662	65905	70639	79365	67382	29085	69831	47058	08186	59391	58030	52098	82718	87024	82848	04190	96574	90464	29065	
1	15389	85205	18850	39226	42249	90669	96325	23248	60933	26927	99567	76364	77204	04615	27062	96621	43918	01896	83991	51141	
2	85941	40756	82414	02015	13858	78030	16269	65978	01385	15345	10363	97518	51400	25670	98342	61891	27101	37855	06235	33316	
3	61149	69440	11286	88218	58925	03638	52862	62733	33451	77455	86859	19558	64432	16706	99612	59798	32803	67708	15297	28612	
4	05219	81619	10651	67079	92511	59888	84502	72095	83463	75577	11258	24591	36863	55368	31721	94335	34936	02566	80972	08188	
5	41417	98326	87719	92294	46614	50948	64886	20002	97365	30976	95068	88628	35911	14530	33020	80428	39936	31855	34334	64865	
6	28357	94070	20652	35774	16249	75019	21145	05217	47286	76305	54463	47237	73800	91017	36239	71824	83671	39892	60518	37092	
7	17783	00015	10806	83091	91530	36466	39981	62481	49177	75779	16874	62677	57412	13215	31369	62233	80827	73917	82802	84420	
8	40950	84820	29881	85966	62800	70326	84740	62660	77379	90279	92494	63157	76593	91316	03505	72389	96363	52887	01087	66091	
9	82995	64157	66164	41180	10089	41757	78258	96488	88629	37231	15669	56689	35682	40844	53256	81872	35213	09840	34471	74441	
10	96754	17676	55659	44105	47361	34833	86679	23930	53249	27083	99116	75486	84989	23476	52967	67104	39495	39100	17217	74073	
11	34367	88040	53364	71726	45690	66334	60332	22554	90600	71113	15696	10703	65178	90637	63110	17622	53988	71087	84148	11670	
12	06318	37403	49927	57715	50423	67372	63116	48888	21505	80182	97720	15369	51269	69620	03388	13699	33423	67453	43269	56720	
13	62111	52820	07243	79931	89292	84767	85693	73947	22278	11551	11666	13841	71681	98000	35979	39719	81899	07449	47985	46967	
14	47534	09243	67879	00544	23410	12740	02540	54440	32949	13491	71628	73130	78783	75691	41632	09847	61547	18707	85489	69944	
15	96614	75993	84460	62846	59844	14922	48730	73443	48167	34770	40501	51089	99943	91843	41995	88931	73631	69361	05375	15417	
16	24856	03648	44898	09351	98795	18644	39765	71058	90368	44104	22518	55576	98215	82068	10798	86211	36584	67466	69373	40054	
17	96887	12479	80621	66223	86085	78285	02432	53342	42846	94771	75112	30485	62173	02132	14878	92879	22281	16783	86352	00077	
18	90801	21472	42615	77408	37390	76766	52615	32141	30268	18106	80327	02671	98191	84342	90813	49268	95441	15496	20168	09271	
19	55165	77312	83666	36028	28420	70219	81369	41943	47366	41067	60251	45548	02146	05597	48228	81366	34598	72856	66762	17002	
20	75884	12952	84318	95108	72305	64620	91318	89872	45375	85436	57430	82270	10421	05540	43648	75888	66049	21511	47676	33444	
21	16777	37116	58550	42958	21460	43910	01175	87894	81378	10620	73528	39559	34434	88596	54086	71693	43132	14414	79949	85193	
22	46230	43877	80207	88877	89380	32992	91380	03164	98656	59337	25991	65959	70769	64721	86413	33475	42740	06175	82758	66248	
23	42902	66892	46134	01432	94710	23474	20423	60137	60609	13119	78388	16638	09134	59880	63806	68076	48472	39318	35434	24057	74739
24	81007	00333	39693	28039	10154	95425	39220	19774	31782	49037	12477	09965	96657	57994	59439	76330	24596	77515	09577	91871	
25	68089	01122	51111	72373	06902	74373	96199	97017	41273	21546	83266	32883	42451	15579	38155	29793	40914	65990	16255	17777	
26	20411	67081	89950	16944	93054	87687	87236	77054	33848	76970	80876	10237	39515	79152	74798	39357	09054	73579	92359		
27	58212	13160	06468	15718	82627	76999	05999	58680	96739	63700	37074	65198	44785	68624	98336	84481	97610	78735	46703	98265	
28	70577	42866	24969	61210	76046	67699	42054	12696	93758	03283	83712	06514	30101	78295	54656	85417	43189	60048	72781	72606	
29	94522	74358	71659	62038	79643	79169	44741	05437	39038	13163	20287	56862	69727	94443	64936	08366	27227	05158	50326	59566	
30	42626	86819	85651	88678	17401	03252	99547	32404	17918	62880	74261	32592	86538	27041	65172	85532	07571	80609	39285	65340	
31	16051	33763	57194	16752	54450	19031	58580	47629	54132	60631	64081	49863	08478	96001	18888	14810	70545	89755	59064	07210	
32	08244	27647	33851	44705	94211	46716	11738	55784	95347	72655	05617	75818	47750	67814	29575	10526	66192	44464	27058	40467	
33	59497	04392	09419	89964	51211	04894	72882	17805	21896	83864	26793	74951	95466	74307	13330	42664	85515	20632	05497	33625	
34	97155	16428	40293	09985	58434	01412	69124	82171	59058	82859	65988	72850	48737	54719	52056	01596	03845	35067	03134	70322	

smo izključili vpliv obdelovanca, ali še bolj splošno rečeno časovni vpliv in vpliv zaporedja preizkušanja. Po določenem času se obdelovanec toliko ostruži, da ga je treba zamenjati z drugim, ki ima lahko toliko različne lastnosti, da bi te privedle do sistematske napake preizkušanja. V splošnem pri vseh poizkusih vpliva čas, ker se z njim menjajo razni pogoji, ki jih ne upoštevamo. Zato je vedno priporočljivo vrstni red meritev določiti s tabelo slučajnih števil.

Priloga 1 — Priprava podatkov za računalnik in tolmačenje rezultatov

Ko smo podatke zbrali v tabelo 2 ali tabelo 3, nam preostane le še, da jih napišemo na teleprinterški trak. Oblika je podobna kot pri analizi variance za 1 vplivni faktor. Napišemo po vrsti:

U8181U

; oznaka podatkov

1' ime 1. vplivnega faktorja

2' ime 2. vplivnega faktorja; 0 E2408E

r' t' n'

podatki iz tabele 2 ali 3 napisani po stolpcih. Najprej prvi stolpec, potem drugi itd.

Kolone Vrste	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-89	90-94	95-99
35	98409	66162	95763	47420	20792	61527	20441	39435	11859	41567	27366	42271	44300	73399	21105	03280	73457	43093	05192	48657
36	45476	84882	65109	96597	25930	66790	66706	61203	53634	22557	56760	10909	98147	34736	33863	95256	12731	66598	50771	83665
37	89300	69700	50741	30329	11658	23166	05400	66669	48708	03887	72880	43338	93643	58904	59543	23943	11231	83268	65938	81581
38	50051	95137	91631	66315	91428	12275	24616	68091	71710	33258	77888	38100	03062	58103	47961	83841	25878	23746	55903	44115
39	31753	85176	31310	89642	98364	02306	24617	09609	83942	22716	28440	07819	21580	51459	47971	29882	13990	29226	23608	15873
40	79152	53829	77250	20190	56535	18760	69942	77448	33278	48805	63525	94441	77033	12147	51054	49955	58312	76923	96071	05813
41	44560	38750	83635	56540	64900	42912	13953	79149	18710	68618	47606	93410	16359	89033	89696	47231	64498	31776	05383	39902
42	68328	83378	63369	71381	39564	05615	42451	64559	97501	85747	52669	45030	96279	14709	52372	87832	02735	50803	72744	88208
43	46939	38689	58625	08342	30459	85863	20781	09284	26333	91777	16738	60159	07425	62369	07515	82721	37875	71153	21315	00132
44	83544	86141	15707	96556	23068	13782	08467	89469	93842	55349	59348	11695	45751	15865	74739	05572	32688	20271	65128	14551
45	91621	00881	04900	54224	46177	55309	17852	27491	89415	23466	12900	71775	29845	60774	94924	21810	38636	33717	67596	82521
46	91896	67126	04151	03795	59077	11848	12630	98375	52068	60142	75086	23537	49939	33595	13484	97588	28617	17979	70749	35234
47	55761	62515	21108	80830	02263	29303	37204	96926	30506	09808	99495	51434	29181	09993	38190	42553	68922	52125	91077	40197
48	85156	87689	95493	88842	00664	55017	55539	17771	69448	87530	26075	31671	45386	36583	93459	48599	52022	41330	60651	91321
49	07521	56898	12236	60277	39102	62315	12239	07105	11844	01117	13636	93596	23377	51133	95126	61496	42474	45141	46660	42338
50	64249	63664	39652	40646	97306	31741	07294	84149	46797	82487	32647	31282	03345	89593	69214	70381	78285	20054	91018	16742
51	26538	44249	04050	48174	65570	44072	40192	51153	11397	58212	16916	00041	80236	55023	14253	76582	12092	86533	92426	37655
52	05845	00512	78630	55328	18116	69296	91705	86224	29503	57071	66176	34047	21005	27137	03191	48970	64825	22394	39622	79085
53	74897	68373	67359	51014	33510	83048	17056	72506	82949	54600	46299	13335	12180	16861	38043	59922	62675	63631	37020	78195
54	20872	54570	35017	88132	25730	22626	86723	91691	13191	77212	22847	47839	45385	23289	47526	54098	45683	55849	51575	64689
55	31432	96156	89177	75541	81355	24480	77243	76690	42507	84362	41851	54160	92320	69936	34803	92479	33399	71160	64777	83378
56	66890	61505	01240	00660	05873	13568	76082	79172	57913	93448	28444	59497	91586	95917	68553	28639	06455	34174	11130	91994
57	48194	57790	79970	33106	86904	48119	52503	24130	72824	21627	47520	62378	98855	83174	13088	16561	68559	26679	06238	51254
58	11303	87118	81471	52936	08555	28420	49416	44448	04269	27029	34978	63271	13142	82681	05271	08822	06490	44984	49307	62717
59	54374	57325	16947	45356	78371	10563	97191	53798	12693	27928	37404	80416	69035	92980	49486	74378	75610	74976	70056	15478
60	64852	34421	61046	90849	13966	39810	42699	21753	76192	10508	32400	65482	52099	53676	74648	94148	65095	69597	52772	71551
61	16309	20384	09491	91588	97720	89846	30376	76970	23063	35894	89262	86332	51718	70663	11623	29834	79620	73002	84886	03591
62	42587	37065	24526	72602	57589	98131	37292	05967	26002	51945	86866	09127	98021	03871	27789	58444	44832	36505	40672	30180
63	40177	98590	97161	41682	84533	67588	62036	49967	01990	72308	90814	14833	08759	74645	05046	94056	99094	65091	32663	73040
64	82309	76128	93965	26743	24141	04838	40254	26065	07938	76236	19192	82756	20553	58466	55376	88914	75096	26119	83898	43816
65	79788	68243	95732	04257	27084	14743	17520	95401	55811	76099	77585	52593	56612	95766	10019	29531	73064	20953	53523	58136
66	40538	79000	89559	25026	42274	23489	34502	75508	06059	86682	23757	16364	05096	03192	62386	45389	85332	18877	55710	96459
67	64016	73598	18609	73150	62263	33102	45205	87440	96767	67042	45989	96257	23850	26216	23309	21526	07425	50254	19455	29315
68	49767	12691	17903	93871	99721	79109	09425	26904	07419	76013	92970	94243	07316	41467	64837	52406	23225	51553	31220	14032
69	76974	55108	29795	08404	82684	00497	51126	79935	57450	55671	74346	59596	40088	98176	17896	86900	20249	77753	19099	48885
70	23854	08480	85983	96025	50117	64610	99425	62291	86943	21541	87646	41309	27636	45153	29988	94770	07255	70908	05340	99751
71	68973	70551	25098	78033	98573	79848	31778	29555	61446	23037	50099	71038	45146	06146	55121	99429	43169	66259	97786	59180
72	36444	93600	65350	14971	25325	00427	52073	64280	18847	24768	10127	46900	46984	75348	04115	33624	68774	60013	35515	62556
73	03003	87600	07391	11594	21196	00781	32550	57158	58887	73041	67995	81977	18984	64091	02785	27762	42529	97144	80407	64524
74	17540	26188	36647	78386	04558	61463	57842	90382	77019	24210	26304	80217	84934	82657	69291	35397	98714	35104	08187	48109
75	38916	55809	47982	41968	69760	79422	80154	91486	19180	15100	81994	41070	56642	64091	31229	02595	13513	45148	78722	30144
76	64288	19843	69122	42502	48508	28820	59933	72998	99942	10515	59537	34662	79631	89403	65212	09975	06118	86197	58208	16162
77	86809	51564	38040	39418	49915	19000	58050	16899	79952	57849	51228	10937	62396	81460	47331	91403	95007	06047	16846	64809
78	99800	99566	14742	05028	30033	94889	53381	23656	75787	59223	31089	37995	29577	07828	42272	54016	21950	86192	99046	84864
79	92345	31890	95712	08279	91794	94066	49337	88674	35355	12267	38207	97938	93459	75174	79460	55436	57206	87644	21296	43395
80	90363	65162	32245	82279	79256	80834	06088	99462	56705	06118	88666	31142	09474	89712	63153	62333	42212	06140	42694	43671
81	64437	32242	48431	04835	39070	59702	31508	60935	22390	52246	53665	56134	67582	92557	89520	33452	05134	70628	27612	33738
82	91714	53662	28373	34333	55791	74758	51144	18827	10704	76803	89807	74530	38004	90102	11693	90257	05500	79920	62700	43325
83	20902	17646	31391	31459	33315	03444	55743	74701	58851	27427	18682	81038	85662	90915	91631	22223	91588	80774	07716	12548
84	12217	86007	70371	52281	14510	76094	96579	54853	78339	20839	63571	32579	63942	25371	09234	94592	98475	76884	37635	33608
85	45177	02863	42307	53571	22532	74921	17735	42201	80540	54721	68927	56492	67799	95398	77642	54913	91853	08424	81450	76229
86	28325	90814	08804	52746	47913	54577	47525	77705	95330	21866	56401	63186	39389	88798	31356	89235	97036	32341	33292	73757
87	29019	28776	56116	54791	64604	08815	46049	71186	34650	14994	24333	95603	02359	72942	46287	95382	08452	62862	97869	71775
88	84979	81533	56219	67062	26146	82567	33122	14124	46240	92973	17025	84202	95199	62272	06366	16175	97577	99304	41587	03686
89	50371	26347	48513	63915	11158	25563	91915	18431	92978	11591	02804	80253	52133	20224	68034	50865	57868	22343	55111	03607
90	53422	06825	69711	67950	64716	18003	49581	45378	99878	61130	08298	03879	20995	19850	73090	13191	18963	82244	78479	99121
91	67453	35651	89316	41620	32048	70225	47597	33137	31433	51445	59883	01785	82403	96062	03785	03468	12970	64896	39336	30030
92	07294																			

U818IU

; BRC-3 T $\lambda = 0$

1' TOPL. OBD.

2' CEP. KOT ; 0 E2408E

5' 3' 21'

400 627 482

. 672 1215 1384

3' 10 1,96 2,32 1,7

5 2,4 3,02 1,97

1 3,38 4,68 2,52

Podatki od 400 do 1384 so napisani po vrsti, najprej 1. stolpec (glej sliko 17 omenjenega članka) z 21 podatki pretvorjenimi v sekunde, nato 2. stolpec z 21 podatki, 12. stolpec z 21 podatki, nato so izpuščeni 3 stolpci ($\lambda = +4^0$), sledi 16. stolpec z 21 podatki, 17. stolpec z 21 podatki in 18. stolpec z 21 podatki.

Računalnik s programom »2D FIXEN MODEL« prečita podatke in na teleprinterju natipka naslednje rezultate:

2 D FIKSEN MODEL

BRC-3 T $\lambda = 0$

1' TOPL. OBD.

2' CEP. KOT

.140263320₁₀+08 4 .350658300₁₀+07 5.78

.718289330₁₀+08 2 .359144665₁₀+08 59.24

.849229600₁₀+07 8 .106153700₁₀+07 1.75

.181864852₁₀+09 300 .606216173₁₀+06 1.00

.276212413₁₀+09 314

ALFA = 10.0

1'

4' 1' 639.492

4' 2' 460.921

4' 3' 430.508

2'

2' 1' 291.543

3' 1' 1126.781

3' 2' 835.238

INTERAKCIJE

ALFA = 5.0

1'

4' 1' 639.492

4' 2' 460.921

4' 3' 430.508

2'

2' 1' 291.543

3' 1' 1126.781

3' 2' 835.238

ALFA = 1.0

1'

4' 1' 639.492

2'

3' 1' 1126.781

3' 2' 835.238

Najprej računalnik napiše standardno shemo analize variance za 2 vplivna faktorja. V prvi koloni so vsote kvadratov, v drugi so prostostne stopnje, v tretji srednji kvadrati in v četrti izračunane vrednosti za F. Prvi F se nanaša na stanje 1. vplivnega faktorja (pri nas je to toplotna obdelava), drugi F se nanaša na stanja 2. vplivnega faktorja (cepilni kot γ), tretji F se nanaša na kombinacije stanj obeh vplivnih faktorjev (ali kratko na interakcije), četrti F pa je vedno enak 1. Izračunane vrednosti F nam merijo, kako pomembna so za spremembe opazovane karakteristike izdelka stanja obeh vplivnih faktorjev, vsakega posebej in obeh skupaj. V našem primeru vidimo, da so najpomembnejša stanja 2. vplivnega faktorja, ko je $F = 59.24$. Dosti manj pomembna so stanja 1. vplivnega faktorja, čeprav, kot bomo videli, tudi njih ne smemo zanemarjati. Razlika med kombinacijami obeh vplivnih faktorjev je najmanj pomembna.

Nadaljnji izpis računalnika je čisto podoben izpisu v primeru analize variance za 1. vplivni faktor. Razlika je le v tem, da za izpisom ALFA najprej sledi samo število 1', ki pomeni, da sledijo razlike srednjih vrednosti za stanja 1. vplivnega faktorja. V našem primeru pomeni (glej izpis iz računalnika) 4' 1' 639.492, da je razlika med srednjo vrednostjo obstojnosti za 4. ciklus toplotne obdelave in 1. ciklus toplotne obdelave 639.492 sekund ali 10 min. 39 sek.

Pred razlikami srednjih vrednosti obstojnosti za različne γ kote pa stoji sama številka 2', ker smo izbrali kot γ za 2. vplivni faktor. Na koncu izpisa pod ALFA = 10.0 je še zapis INTERAKCIJE, ki pomeni 90 % verjetnost, da je razlika med srednjimi vrednostmi obstojnosti pri različnih kombinacijah toplotne obdelave in kota γ (to je med srednjimi vrednostmi stolpcev) posledica kombiniranega vpliva obeh faktorjev. Za višji verjetnostni nivo ALFA = 5.0 odpade izpis INTERAKCIJE, za še višji verjetnostni nivo ALFA = 1.0 pa tudi nekatere razlike med srednjimi vrednostmi tako za stanje 1. vplivnega faktorja, kot tudi za stanja 2. vplivnega faktorja. Z 99 % verjetnostjo trdimo le še, da je obstojnost večja pri 4. ciklusu toplotne obdelave kot pri 1. ciklusu toplotne obdelave in da je pri kotu $\gamma = 15^0$ obstojnost večja kot pri kotih $\gamma = 10^0$ in $\gamma = 6^0$. V primerih izračuna analize variance lahko za izpisom ALFA takoj sledi 2', kar pomeni, da ni pomembnih razlik med stanji 1. vplivnega faktorja. Lahko pa imamo le 1', kar pomeni, da so le razlike v stanjih 1. vplivnega faktorja. Nastopijo lahko tudi drugi primeri izpisa, ki so opisani že v poglavju analize variance za en vplivni faktor.

Manjkajoči podatki

Včasih zaradi nesreče, napak ali neuspelega poizkusa v shemi za analizo variance z dvema

vplivnima faktorjema manjkajo podatki v eni ali več celicah. V takih primerih ni mogoče normalno uporabiti opisane računске metode. Na osnovi teoretskih osnov metode so ta problem rešili s posebnim postopkom za oceno manjkajočih vrednosti.

Če manjka samo en podatek lahko oceno te vrednosti izračunamo s pomočjo formule:

$$X = \frac{aT + bB - S}{(a-1)(b-1)}$$

kjer pomeni:

- a — število stanj prvega vplivnega faktorja
- b — število stanj drugega vplivnega faktorja
- T — vsota vrednosti za prvi vplivni faktor, pri katerem manjka podatek
- B — vsota vrednosti za drugi vplivni faktor, pri katerem manjka podatek
- S — vsota vseh vrednosti

To vrednost vnesemo v tabelo in normalno izvršimo analizo variance, pri čemer pa moramo izvršiti dve modifikaciji:

- prostostni stopnji za napako in vsoto moramo zmanjšati za eno,
- vsoto kvadratov za prvi vplivni faktor moramo zmanjšati za sledeči popravek:

$$\frac{[B - (a - 1) X]^2}{a(a - 1)}$$

PRIMERJAVA DVEH VEZANIH STATISTIČNIH MNOŽIC

Oznaka programa »VS«

Imamo dve statistični množici podatkov, ki smo jih dobili pri dveh različnih stanjih vplivnega faktorja. Vsi podatki niso med seboj neodvisni, temveč tvorijo podatki iz ene množice s podatki iz druge množice pare. Par tvorita vedno dva podatka, ki smo jih dobili pri nekem skupnem stanju množice neopazovanih vplivnih faktorjev in pri različnih stanjih opazovanega vplivnega faktorja.

Za primer vzemimo določevanje stopnje nemetalnih vključkov v jeklu. Za vsako šaržo izberemo 1 ingot in določimo stopnjo nemetalnih vključkov posebej v glavi in posebej v nogi ingota. Podatka za isti ingot tvorita par. Neopazovani vplivni faktorji so šarže, ingot, sestava itd. Opazovani vplivni faktor pa je mesto v ingotu. Ta ima 2 stanji: glava in noga. Prvo množico tvorijo vsi podatki za glave ingotov, drugo množico pa tvorijo vsi podatki za noge ingotov. V tem primeru nas zanima, če je stopnja nemetalnih vključkov pri glavi drugačna kot pri nogi.

V splošnem označimo podatke iz ene množice z $X_{1,1} X_{1,2} \dots X_{1,m}$

ustrezne podatke iz druge množice pa z $X_{2,1} X_{2,2} \dots X_{2,m}$

Razlike med podatkom iz istega para označimo z

$$X_1, X_2 \dots X_n$$

npr.: $X_n = X_{1,n} - X_{2,n}$

Priprava podatkov za računalnik in tolmačenje rezultatov

Podatke natipkamo na teleprinterski trak v naslednjem vrstnem redu:

U1040U

n' $X_{1,1} X_{1,2} \dots X_{1,m} X_{2,1} X_{2,2} \dots X_{2,m}$

Z0+1E

Med črkama U in številom 1040 ne sme biti presledka. Za izrazom U1040U natipkamo najprej število parov, nato vse podatke iz ene množice in nato vse podatke iz druge množice. Paziti moramo, da podatkom ne zamenjamo vrstnega reda, ker so vezani v parih. Izraz Z0+1E (Z nič plus 1E) stoji vedno na koncu traku, da se računalnik ustavi, ko prečita podatke. Tudi tu ne sme biti presledkov znotraj izraza.

Program VS za računalnik nam da naslednje rezultate:

X_1 .

X_2 .

$n-1$ t_{n-1}

ki pomenijo

$$X_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{1,i} \dots \text{srednja vrednost prve množice}$$

$$X_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{2,i} \dots \text{srednja vrednost druge množice}$$

$t_{n-1} \dots$ izračunana vrednost statističnega parametra t

$n-1 \dots$ število prostostnih stopenj za t

V tabeli 5 za t poiščemo tabelarično vrednost za $n-1$ prostostnih stopenj pri verjetostnem nivoju 95% ($\alpha = 5$). Če je izračunani t večji od tabelaričnega, je 95% verjetnost, da je razlika srednjih vrednosti posledica različnih stanj opazovanega vplivnega faktorja. Podobno lahko ugotovimo tudi za druge verjetnostne nivoje. Vrednosti parametra t podaja tabela 5.

Tabela 5 — Vrednosti parametra »t«

Prostostne stopnje ν	$\alpha = 10\%$ P = 90%	$\alpha = 5\%$ P = 95%	P = 1% P = 99%
1	6,31	12,71	63,66
2	2,92	4,30	9,92
3	2,35	3,18	5,84
4	2,13	2,78	4,60
5	2,02	2,57	4,03
6	1,94	2,45	3,71
7	1,90	2,36	3,50
8	1,86	2,31	3,36
9	1,83	2,26	3,25
10	1,81	2,23	3,17
11	1,80	2,20	3,11
12	1,78	2,18	3,06
13	1,77	2,16	3,01
14	1,76	2,14	3,00
15	1,75	2,13	2,95
16	1,75	2,12	2,92
17	1,74	2,11	2,90
18	1,73	2,10	2,88
19	1,73	2,09	2,86
20	1,72	2,09	2,84
21	1,72	2,08	2,83
22	1,72	2,07	2,82
23	1,71	2,07	2,81
24	1,71	2,06	2,80
25	1,71	2,06	2,79
26	1,71	2,06	2,78
27	1,70	2,05	2,77
28	1,70	2,05	2,76
29	1,70	2,05	2,76
30	1,70	2,04	2,75
60	1,67	2,00	2,66
100	1,66	1,98	2,63
∞	1,64	1,96	2,38

4. Primer

V jeklarni vlivamo jeklo določene vrste v dve ponovci. Zanima nas, če je vsebnost ogljika v jeklu odvisna od ponovce. Za 12 šarž zberemo podatke v parih.

Tabela 6

Šarža	% C	
	1. ponovca	2. ponovca
1	0,41	0,40
2	0,39	0,37
3	0,44	0,41
4	0,45	0,44
5	0,40	0,41
6	0,47	0,45
7	0,48	0,42
8	0,44	0,44
9	0,44	0,40
10	0,46	0,49
11	0,46	0,42
12	0,44	0,41

U1040U 12' 0,41 0,39 0,44 0,45 0,40 0,47 0,48 0,44
0,44 0,46 0,46 0,44 0,40 0,37 0,41 0,44 0,41 0,45
0,42 0,44 0,40 0,49 0,42 0,41 Z0+1E

Računalnik po programu VS (vezane serije) izračuna naslednje rezultate:

0,44000₁₀—00 (pomeni 0,44)
0,42173₁₀—00 (pomeni 0,42173)
11' 2,61

Torej je $t_{11} = 2,61$. Pogledamo v tabele za t in vidimo, da izračunana vrednost leži med tabelaričnima za verjetnostni nivo $P = 95\%$ in verjetnostni nivo $P = 99\%$ pri 11 prostostnih stopnjah. Tako je verjetnost 95%, da je razlika v vsebnosti ogljika posledica različnih ponovc, ne moremo pa tega trditi z 99% verjetnostjo. Take razlike večkrat imenujemo polpomembne ali negotove. Z večjim številom podatkov bi ugotovili, ali je razlika pomembna ali nepomembna.

PRILOGA:

Izračun vmesnih vrednosti parametra F

V tabelah 7, 8 in 9 so podane vrednosti parametra F za verjetnosti 90, 95 in 99%. Uporaba teh tabel je bila že opisana v praktičnih primerih za nekatere ν_1 in ν_2 neposredno. Zato si pogledjmo, kako si pomagamo, če katerega od ν -jev ni v tabeli, ali če manjkata oba. Za primer vzemimo, da v tabeli ni vrednosti za ν_1 , ki leži med $\nu_1' < \nu_1 < \nu_1''$.

Označimo:

$$\Delta F = F\alpha; \nu_1', \nu_2 - F\alpha; \nu_1'', \nu_2 \quad [3]$$

Potem je v primeru $\nu_1 > 120$ (torej $\nu_1'' = \infty$)

$$F\alpha; \nu_1, \nu_2 = F\alpha; \nu_1', \nu_2 - \frac{\Delta F \cdot (\nu_1 - \nu_1')}{\nu_1} \quad [4]$$

V primeru $\nu_1 < 120$ pa je

$$F\alpha; \nu_1, \nu_2 = F\alpha; \nu_1', \nu_2 - \frac{\Delta F \cdot \nu_1''}{\nu_1'' - \nu_1'} \cdot \frac{\nu_1 - \nu_1'}{\nu_1} \quad [5]$$

Prav podobno bi izračunali vrednost F, če v tabeli ni vrednosti za ν_2 . V obrazcih le zamenjamo vlogi ν_1 in ν_2 .

Primer: $F_{5; 3,48} = ?$

V tabeli za $\alpha = 5$ poiščemo vrednosti:

$$F_{5; 3,40} \text{ in } F_{5; 3,60}$$

Dobimo 2,8387 in 2,7581.

Torej je $\Delta F = 2,8387 - 2,7581 = 0,0806$

$$F_{5; 3,48} = 2,8387 - \frac{0,0806 \cdot 60}{60 - 40} \cdot \frac{48 - 40}{48} = 2,8387 - 0,04 = 2,7987$$

V primeru, ko v tabeli ni nobenega od ν -jev, je račun daljši.

Naj bo $v_1' < v_1 < v_1''$ in $v_2' < v_2 < v_2''$
 kjer so v_1', v_1'', v_2' in v_2'' vrednosti iz tabele.

Najprej izračunamo dve vrednosti $F_{\alpha}; v_1, v_2'$ in
 $F_{\alpha}; v_1, v_2''$ potem pa iz teh dveh vrednosti še $F_{\alpha};$
 v_1, v_2

Primer: $F_{10; 36, 360} = ?$

$$v_1' = 30 \quad v_1'' = 40$$

$$v_2' = 120 \quad v_2'' = \infty$$

Po obrazcu [5] izračunamo $F_{10; 36, 120} = F_{10; 30, 120}$

$$= \frac{\Delta F \cdot 40}{40 - 30} \cdot \frac{36 - 30}{36}$$

$$\Delta F = F_{10; 30, 120} - F_{10; 40, 120} = 1,4094 - 1,3676 = 0,0418$$

$$F_{10; 36, 360} = 1,4094 - 0,0418 \cdot \frac{2}{3} = \underline{\underline{1,3815}} \text{ in}$$

$$F_{10; 36, \infty} = F_{10; 30, \infty} - \frac{\Delta F \cdot 40}{40 - 30} \cdot \frac{36 - 30}{36}$$

$$\Delta F = F_{10; 30, \infty} - F_{10; 40, \infty} = 1,3419 - 1,2951 = 0,0468$$

$$F_{10; 36, \infty} = 1,3419 - 0,0468 \cdot \frac{2}{3} = \underline{\underline{1,3107}}$$

Po obrazcu, ki je podoben obrazcu [4], le da
 v_1 in v_2 zamenjata vlogi, izračunamo iz podčrtanih
 vrednosti še vrednost:

$$F_{10; 36, 360} = F_{10; 36, 120} - \frac{\Delta F \cdot (360 - 120)}{360}$$

$$\Delta F = F_{10; 36, 120} - F_{10; 36, \infty} = 1,3815 - 1,3107 = 0,0708$$

$$F_{10; 36, 360} = 1,3815 - \frac{0,0708 \cdot 2}{3} = \underline{\underline{1,3343}}$$

Tabela 7 — Kritične vrednosti parametra F za $\alpha = 10\%$

$v_1 \backslash v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	39.864	49.500	53.593	55.833	57.241	58.204	58.906	59.439	59.858	60.195	60.705	61.220	61.740	62.002	62.265	62.529	62.794	63.061	63.328
2	8.5263	9.0000	9.1618	9.2434	9.2926	9.3255	9.3491	9.3668	9.3805	9.3916	9.4081	9.4247	9.4413	9.4496	9.4579	9.4663	9.4746	9.4829	9.4913
3	5.5383	5.4624	5.3908	5.3427	5.3092	5.2847	5.2662	5.2517	5.2400	5.2304	5.2156	5.2003	5.1845	5.1764	5.1681	5.1597	5.1512	5.1425	5.1337
4	4.5448	4.3246	4.1908	4.1073	4.0506	4.0098	3.9790	3.9549	3.9357	3.9199	3.8955	3.8689	3.8443	3.8310	3.8174	3.8036	3.7896	3.7753	3.7607
5	4.0604	3.7797	3.6195	3.5202	3.4530	3.4045	3.3679	3.3393	3.3163	3.2974	3.2682	3.2380	3.2067	3.1905	3.1741	3.1573	3.1402	3.1228	3.1050
6	3.7760	3.4633	3.2888	3.1808	3.1075	3.0546	3.0145	2.9830	2.9577	2.9369	2.9047	2.8712	2.8363	2.8183	2.8000	2.7812	2.7620	2.7423	2.7222
7	3.5894	3.2574	3.0741	2.9605	2.8833	2.8274	2.7849	2.7516	2.7247	2.7025	2.6681	2.6322	2.5947	2.5753	2.5555	2.5351	2.5142	2.4928	2.4708
8	3.4579	3.1131	2.9238	2.8064	2.7265	2.6683	2.6241	2.5893	2.5612	2.5380	2.5020	2.4642	2.4246	2.4041	2.3830	2.3614	2.3391	2.3162	2.2926
9	3.3603	3.0065	2.8129	2.6927	2.6106	2.5509	2.5053	2.4694	2.4403	2.4163	2.3789	2.3396	2.2983	2.2768	2.2547	2.2320	2.2085	2.1843	2.1592
10	3.2850	2.9245	2.7277	2.6053	2.5216	2.4606	2.4140	2.3772	2.3473	2.3226	2.2841	2.2435	2.2007	2.1784	2.1554	2.1317	2.1072	2.0818	2.0554
11	3.2252	2.8595	2.6602	2.5362	2.4512	2.3891	2.3416	2.3040	2.2735	2.2482	2.2087	2.1671	2.1230	2.1000	2.0762	2.0516	2.0261	1.9997	1.9721
12	3.1765	2.8068	2.6055	2.4801	2.3940	2.3310	2.2828	2.2446	2.2135	2.1878	2.1474	2.1049	2.0597	2.0360	2.0115	1.9861	1.9597	1.9323	1.9036
13	3.1362	2.7632	2.5603	2.4337	2.3467	2.2830	2.2341	2.1953	2.1638	2.1376	2.0966	2.0532	2.0070	1.9827	1.9576	1.9315	1.9043	1.8759	1.8462
14	3.1022	2.7265	2.5222	2.3947	2.3069	2.2426	2.1931	2.1539	2.1220	2.0954	2.0537	2.0095	1.9625	1.9377	1.9119	1.8852	1.8572	1.8280	1.7973
15	3.0732	2.6952	2.4898	2.3614	2.2730	2.2081	2.1582	2.1185	2.0862	2.0593	2.0171	1.9722	1.9243	1.8990	1.8728	1.8454	1.8168	1.7867	1.7551
16	3.0481	2.6682	2.4618	2.3327	2.2438	2.1783	2.1280	2.0880	2.0553	2.0281	1.9854	1.9399	1.8913	1.8656	1.8388	1.8108	1.7816	1.7507	1.7182
17	3.0262	2.6446	2.4374	2.3077	2.2183	2.1524	2.1017	2.0613	2.0284	2.0009	1.9577	1.9117	1.8624	1.8362	1.8090	1.7805	1.7506	1.7191	1.6856
18	3.0070	2.6239	2.4160	2.2858	2.1958	2.1296	2.0785	2.0379	2.0047	1.9770	1.9333	1.8868	1.8368	1.8103	1.7827	1.7537	1.7232	1.6910	1.6567
19	2.9899	2.6056	2.3970	2.2663	2.1760	2.1094	2.0580	2.0171	1.9836	1.9557	1.9117	1.8647	1.8142	1.7873	1.7592	1.7298	1.6988	1.6659	1.6308
20	2.9747	2.5893	2.3801	2.2489	2.1582	2.0913	2.0397	1.9985	1.9649	1.9367	1.8924	1.8449	1.7938	1.7667	1.7382	1.7083	1.6768	1.6433	1.6074
21	2.9609	2.5746	2.3649	2.2333	2.1423	2.0751	2.0232	1.9819	1.9480	1.9197	1.8750	1.8272	1.7756	1.7481	1.7193	1.6890	1.6569	1.6228	1.5862
22	2.9486	2.5613	2.3512	2.2193	2.1279	2.0605	2.0084	1.9668	1.9327	1.9043	1.8593	1.8111	1.7590	1.7312	1.7021	1.6714	1.6389	1.6042	1.5668
23	2.9374	2.5493	2.3387	2.2065	2.1149	2.0472	1.9949	1.9531	1.9189	1.8903	1.8450	1.7964	1.7439	1.7159	1.6864	1.6554	1.6224	1.5871	1.5490
24	2.9271	2.5383	2.3274	2.1949	2.1030	2.0351	1.9826	1.9407	1.9063	1.8775	1.8319	1.7831	1.7302	1.7019	1.6721	1.6407	1.6073	1.5715	1.5327
25	2.9177	2.5283	2.3170	2.1843	2.0922	2.0241	1.9714	1.9292	1.8947	1.8658	1.8200	1.7708	1.7175	1.6890	1.6589	1.6272	1.5934	1.5570	1.5176
26	2.9091	2.5191	2.3075	2.1745	2.0822	2.0139	1.9610	1.9188	1.8841	1.8550	1.8090	1.7596	1.7059	1.6771	1.6468	1.6147	1.5805	1.5437	1.5036
27	2.9012	2.5106	2.2987	2.1655	2.0730	2.0045	1.9515	1.9091	1.8743	1.8451	1.7989	1.7492	1.6951	1.6662	1.6356	1.6032	1.5686	1.5313	1.4906
28	2.8939	2.5028	2.2906	2.1571	2.0645	1.9959	1.9427	1.9001	1.8652	1.8359	1.7895	1.7395	1.6852	1.6560	1.6252	1.5925	1.5575	1.5198	1.4784
29	2.8871	2.4955	2.2831	2.1494	2.0566	1.9878	1.9345	1.8918	1.8568	1.8274	1.7808	1.7306	1.6759	1.6465	1.6155	1.5825	1.5472	1.5090	1.4670
30	2.8807	2.4887	2.2761	2.1422	2.0492	1.9803	1.9269	1.8841	1.8490	1.8195	1.7727	1.7223	1.6673	1.6377	1.6065	1.5732	1.5376	1.4989	1.4564
40	2.8354	2.4404	2.2261	2.0909	1.9968	1.9269	1.8725	1.8289	1.7929	1.7627	1.7146	1.6624	1.6052	1.5741	1.5411	1.5056	1.4672	1.4248	1.3769
60	2.7914	2.3932	2.1774	2.0410	1.9457	1.8747	1.8194	1.7748	1.7380	1.7070	1.6574	1.6034	1.5435	1.5107	1.4755	1.4373	1.3952	1.3476	1.2915
120	2.7478	2.3473	2.1300	1.9923	1.8959	1.8238	1.7675	1.7220	1.6943	1.6524	1.6012	1.5450	1.4821	1.4472	1.4094	1.3676	1.3203	1.2646	1.1926
∞	2.7055	2.3026	2.0838	1.9449	1.8473	1.7741	1.7167	1.6702	1.6315	1.5987	1.5458	1.4871	1.4206	1.3832	1.3419	1.2951	1.2400	1.1686	1.0000

Literatura

1. G. W. Snedecor. Statistical methods, 5. izd., Iowa State University Press, Ames, 1965, Iowa, USA
2. C. A. Bennet, N. L. Franklin. Statistical analysis, John Wiley, London 1963
3. N. L. Johnson, F. C. Leone. Statistics and experimental design, Vol. II, John Wiley, London 1964
4. O. L. Davies. Statistical methods in research and production, Oliver and Boyd, London 1961
5. E. B. Wilson. An introduction to scientific research, McGraw-Hill, New York 1952
6. A. E. Waugh. Statistical Tables and problems, III. izd., McGraw-Hill, New York 1952
7. W. Volk. Applied statistics for engineers, McGraw-Hill, New York 1958
8. W. J. Youden. Statistical methods for chemistry, John Wiley, London 1951
9. R. L. Anderson, T. A. Bancroft. Statistical theory in research, McGraw-Hill, New York 1952
10. R. A. Fisher. Statistical methods for research workers, Oliver and Boyd, Edinburgh 1925—1950
11. J. Rodič. Metode matematične statistike, skripta seminarja I, II in priročnik I, II, Metalburo Zagreb 1964

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Entwicklung von Methoden der mathematischen Statistik, vor allem aber mit der Verbreitung der Verwendung von elektronischen Rechnern bekommen spezielle Methoden der Wertung und Verarbeitung der Resultate der Qualitätskontrolle besondere Geltung. Eine besondere Bedeutung und wirtschaftlich-technische Wirksamkeit bieten solche Methoden bei der Planung der Untersuchungen.

Der Artikel beschreibt die statistische Methode der Varianzanalyse. Für mehrere Varianten dieser Methode sind Programme auf dem elektronischen Rechner ZUSE Z-23 ausgearbeitet worden.

Der Zweck des Artikels ist, die Variantenmethode in solcher Form zu zeigen, dass sie dem breitesten Kreise des technischfachmännischen Personals in der Erzeugung, in

der Kontrolle und in den Forschungen zugänglich sein wird. Damit sollte der Artikel seinen Anteil in der Übereinstimmung der Untersuchung- und Entwicklungsarbeit mit den modernsten Methoden und der allgemeinen Verbreitung der Verwendung von mathematisch-statistischen Methoden und der elektronischen Rechner bei der Lösung der technischen Probleme beigetragen haben.

In diesem Sinne ist der Artikel in der Form der einfachen Anleitung zur Aufgabenplanung, die Vorbereitung der Unterlagen und der Erklärung der Resultate geschrieben worden.

Die Berechnung der Varianzanalyse mit Verwendung des elektronischen Rechners ist so jedem zugänglich. Zur Vertiefung der Kenntnisse und Studium der theoretischen Grundlagen wurde die Literatur angeführt.

SUMMARY

Advanced methods of mathematical statistics and availability of computers offer a possibility for a special treatment of results in quality control. These methods are very effective when planning the research work.

The article describes the statistical method for analysis of variances. For several modifications of this method a program for computer ZUSE Z-23 has been prepared.

The purpose of this article is to present the method in such a form that could be used by people in production, control and research. Therefore, the article promotes the application of mathematical statistics and computers for the solution of technical problems.

Instructions for planning, data collection and evaluation of results are presented in a simple manner. For the advanced study a list of references is given.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

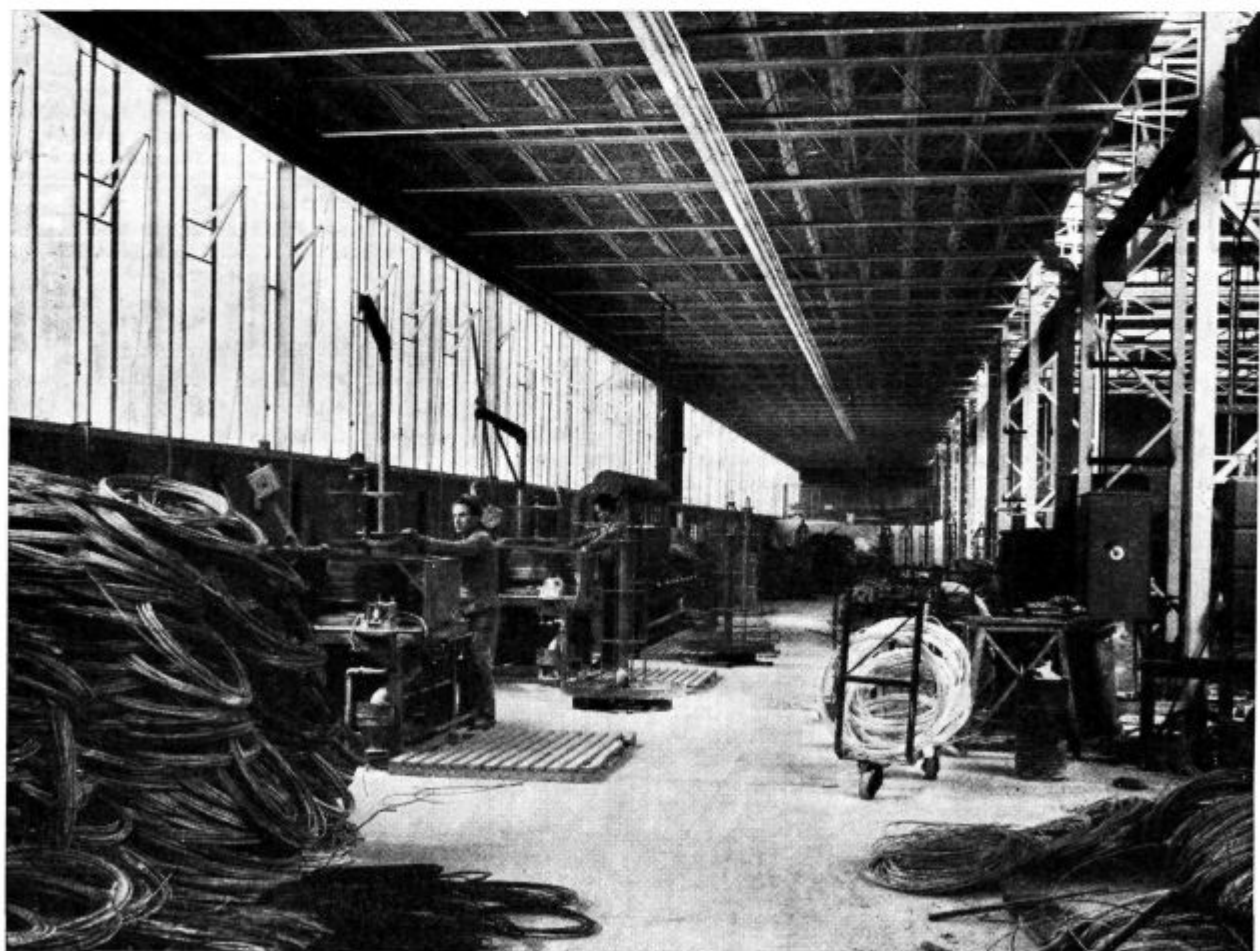
С развитием методов математической статистики, особенно с расширением употребления электронных счётчиков возникли специальные методы оценки и обработки результатов качественного контроля. Особое значение и экономическо-технический эффект представляют эти методы при планировании исследований.

В статье описан статистический метод анализа дисперсии. Для несколько вариантов этого метода выработаны программы при помощи счётчика.

Цель статьи представить метод анализа дисперсии в форме доступной широкому кругу техников-специалистов в производстве, контроле и исследовании и согласовать работы исследования и развития с методами математической статистики применением электронных счётчиков при решении технических проблем.

Поэтому статья написана в форме простой инструкции для планирования задач, приготовления данных и объяснения результатов. Вычисление анализа дисперсии с употреблением счётчика таким образом каждому доступно. Для расширения знания и изучения теоретических основ приведена необходимая литература.

„Jeklovlek Železarne Ravne“



Raziskave obstojnosti brzoreznih jekel

V katalogih za orodna jekla sta podana le kemijski sestav in toplotna obdelava za različne vrste brzoreznih jekel, medtem ko vzdržljivost in geometrija rezalnega roba nista znani. V ta namen so bile v železarni Ravne izvedene obširne raziskave vzdržljivosti brzoreznih jekel elomax in BRC-3 v odvisnosti od toplotne obdelave in geometrije rezalnega roba. Posebnost raziskav je tudi statistično vrednotenje rezultatov, ki se je v tej vrsti raziskav prvič uporabilo.

1. UVOD

V katalogih proizvajalcev orodnih jekel navadno ni za kupca najvažnejših podatkov, to je vzdržljivosti in najprimernejše geometrije rezalnega roba orodij iz brzoreznih jekel.

Železarna Ravne kot proizvajalec orodnih jekel že nekaj let intenzivno raziskuje kvaliteto brzoreznih jekel. Sirina raziskovalnega dela na tem področju je že prerasla okvire domačih raziskav, zato so raziskave domačih jekel vključene v jugoslovanski projekt raziskav obdelovalnosti.

Na tem področju je raziskovalna dejavnost v državnem merilu na nezavidljivi višini, saj JUS standard ne predpisuje metod in pogojev, po katerih naj raziskave potekajo. V članku bo opisanih nekaj metod preizkušanja rezalne obstojnosti orodja, za katere je že izdelan in preizkušen program raziskav. Železarna Ravne je v svojih raziskavah obstojnosti domačih brzoreznih jekel uvedla novost s statističnim vrednotenjem rezultatov in z uporabo metod statistično planiranih raziskav. Posamezne statistične metode in njihova izvajanja bodo opisana v posameznih člankih, zato se bomo v tem delu omejili le na osnovne informacije o teh metodah in na tolmačenja, ki smo jih dosegli z analizo eksperimentalnih rezultatov.

Rezultati dosedanjih raziskav niso imeli name na samo reševati probleme slabe vzdržljivosti, ampak naj bi dajali trdnejšo programsko osnovo za nadaljevanje raziskovalnega dela po izbrani in preizkušeni metodiki.

* **Opomba:** Pri planiranju raziskave in matematično-statistični obdelavi rezultatov sta sodelovala Jože Rodič, dipl. inž. in Boštjan Rode, dipl. inž. Uporabljene metode in uporabo elektronskega računalnika opisuje njun članek v tem zvezku.

2. OSNOVNE LASTNOSTI BRZOREZNIH JEKEL

Orodna jekla so vsa tista legirana in nelegirana jekla, ki se uporabljajo za izdelavo raznih orodij ter se lahko kalijo in popuščajo.²

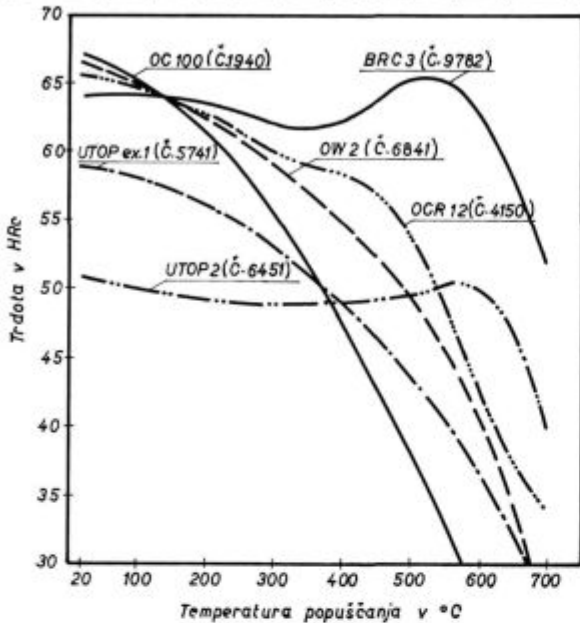
Pojav brzoreznih jekel je pri mehanski obdelavi omogočil povečanje hitrosti rezanja in preseka odrezka. S tem se je močno povečala produktivnost in ekonomičnost mehanske obdelave. Brzorezna jekla so v strojni industriji napravila pravi preobrat, tako v tehniki odrezavanja kakor tudi v konstrukciji obdelovalnih strojev, od katerih so se začele zahtevati povsem drugačne karakteristike.

Orodja iz brzoreznega jekla lahko uporabljamo za obdelavo pri velikih hitrostih rezanja zato, ker obdržijo svojo trdoto in odpornost na obrabo v širokem temperaturnem območju segrevanja orodja med obdelavo. Med obdelavo lahko temperatura naraste celo do slabo rdečega žara in pri tem trdota ne pade pod vrednost, ki je potrebna za rezanje. Na sliki 1 je prikazana popuščna obstojnost brzoreznih jekel v primerjavi z drugimi orodnimi jekli. Značilna lastnost brzoreznih jekel je prav pojav sekundarne trdote. Slika 2 prikazuje spremembe trdote pri delovnih temperaturah. Te lastnosti brzoreznih jekel so v glavnem odvisne od dodatnih legiranih elementov — kroma, volframa, vanadija, molibdena in kobalta, velik vpliv na opisane lastnosti ima tudi količina drobnih karbidov, ki so enakomerno porazdeljeni po osnovni masi. Če sam karbid železa — cementit poveča odpornost proti obrabi, vpliv kompleksnih in posebnih karbidov volframa, molibdena in vanadija pa te lastnosti še povečajo². To je na eni strani zaželena lastnost, po drugi strani pa krhki karbidi v večjih količinah zmanjšujejo žilavost in tako kvarno vplivajo na uporabnost brzoreznih jekel za nekatera posebna orodja.

Od karakterističnih lastnosti jekel prihaja posebno do izraza trdota v rdečem žaru. To lastnost preizkušamo in ocenjujemo s tako imenovano žarobstojnostjo. Žarobstojnost je odločilna pri grobi obdelavi, ker se orodje močno segreje. Več metod preizkušanja obdelovalnosti in obstojnosti orodij je prav v zvezi s to lastnostjo. Taki preizkusi so:

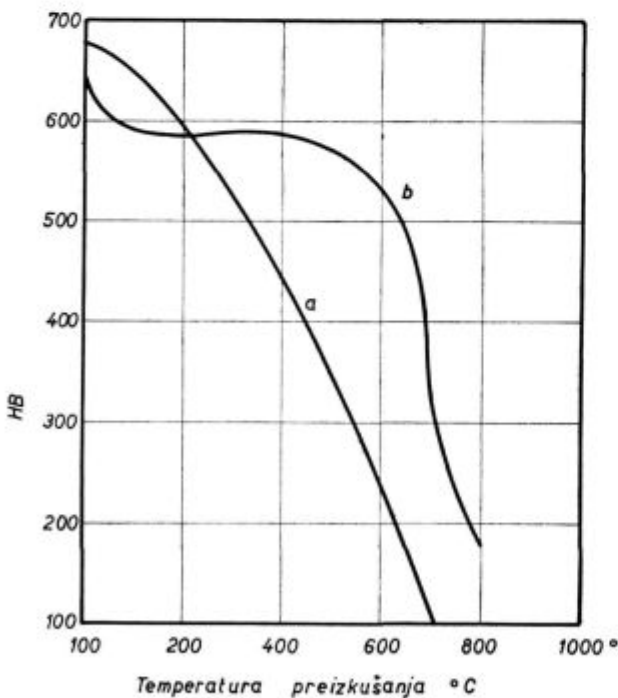
- preizkus temperaturne obstojnosti pri rezanju,
- preizkus obstojnosti poti rezanja,
- preizkus s stopnjevano hitrostjo rezanja.

Kvaliteta	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	W %	Mo %	V %	Co %	Kaljenje sred.
OC 100	1	0,25								800°C voda
OW 2	1,2	0,25				1,4		0,2		800°C voda
OCR 12	2	0,25		12						960°C olje
UTOP ex.1	0,55	0,25	0,6	1	1,7		0,3	0,2		840°C olje
UTOP 2	0,3	0,25		2,5		9		0,4		1150°C olje
BRC 3	0,75	0,25		4		18	1	1,5	10	1300°C olje



Slika 1

Popuščna obstojnost brzoreznih jekel v primerjavi z ostalimi orodnimi jekli



Slika 2

Trdota orodnih jekel pri visokih temperaturah:
a) ogljikovo orodno jeklo, b) brzorezno jeklo

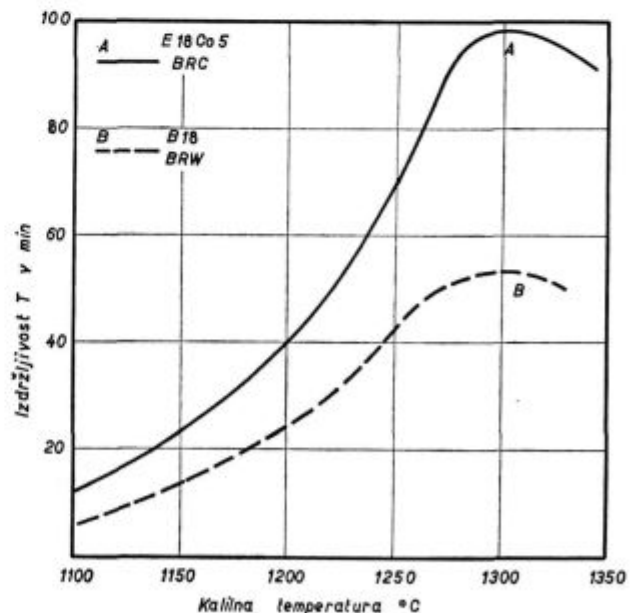
Za fino obdelavo in pri dobrem hlajenju orodja sta odločilni lastnosti prava obraba in visoka trdota. Od brzoreznih jekel se vse pogosteje zahteva dobra dimenzijska obstojnost, ker se določene vrste orodja po toplotni obdelavi sploh ne brusijo več.

2.1 Toplotna obdelava brzoreznih jekel in vpliv kaljenja na obstojnost orodij

Obstojnost trdote pri povišani temperaturi in odpornost proti obrabi zagotavlja pravilno razmerje legirnih elementov v sestavi jekla in pravilna toplotna obdelava orodja. S toplotno obdelavo se zagotovi najboljše obstojnost in delovni učinek izbranega orodja. Le ob pravilni toplotni obdelavi so legirani dodatki učinkovito izkoriščeni.

Pri toplotni obdelavi brzoreznega jekla je treba računati z razmeroma slabo toplotno prevodnostjo, zato je treba orodja zelo počasi ogrevati, da preprečimo nastanek razpok. Pri počasnem in dolgotrajnem ogrevanju na visokih temperaturah izpostavljam orodje nevarnosti razogljčenja. Zato se prav pri toplotni obdelavi brzoreznih orodij poslužujemo večstopenjskega predgrevanja in ogrevanja v solnih kopelih. S tem zagotovimo ugodno izenačevanje temperature po preseku in z intenzivnostjo ogrevanja v solnih kopelih skrajšamo potrebne čase, dosežemo možnost najboljše regulacije temperatur in preprečevanje razogljčenja.

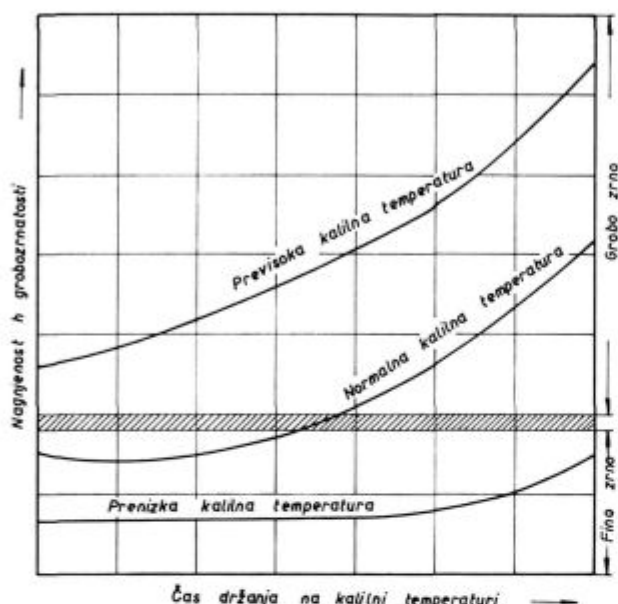
Povečevanje kalilne temperature povečuje obstojnost orodja, obstojnost doseže svoj maksimum, nato pa začne zaradi pregretja in zmanjšanja žilavosti obstojnost hitro padati. Orientacijsko je prikazana odvisnost med obstojnostjo in temperaturo kaljenja na sliki 3.



Slika 3

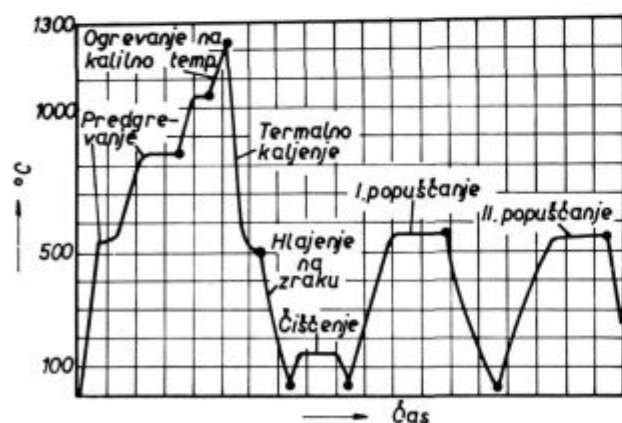
Odvisnost obstojnosti in temperature kaljenja

Temperatura kaljenja in čas ogrevanja orodja na kalilni temperaturi je v neposredni zvezi s porastom zrna. Na sliki 4 je prikazan vpliv temperature in časa na zrnatost kaljene strukture brzo-reznega jekla. Za boljši pregled celotne toplotne obdelave brzo-reznih jekel je na sliki 5 shematično prikazan ciklus normalne toplotne obdelave. Toplotna obdelava je le na kratko opisana, ravno toliko, da poudarimo njeno pomembnost pri obstojnosti orodij. Med raziskavami smo ugotavljali vpliv toplotne obdelave s kaljenjem in popuščanjem.



Slika 4

Vpliv temperature in časa na zrnatost kaljene strukture



Slika 5

Shema ciklusa normalne toplotne obdelave brzo-reznih jekel

Temelj našega raziskovalnega programa je predstavljalo dejstvo, da so primerjave obstojnosti orodij iz različnih vrst brzo-reznih jekel neosnovane, če orodja niso optimalno toplotno obdelana in ostanejo sposobnosti jekla neizkoriščene. Torej je raziskovanje medsebojnih primer-

jav brzo-reznih jekel, ki naj bi olajšalo in zagotovilo pravilno izbiro jekel prezgodnje, vse dokler za posamezne vrste jekel in za določena orodja ne ugotovimo najboljše toplotne obdelave in najboljše geometrije orodja.

Zato smo v našem programu posvetili vso pozornost preizkušanju celotnega območja možnih kombinacij toplotne obdelave.

Prav te rezultate preizkušanja vpliva toplotne obdelave na obstojnost orodja lahko kasneje uporabimo tudi za medsebojne primerjave različnih vrst jekel.

3. METODE PREIZKUŠANJA OBDELOVALNOSTI MATERIALOV IN OBSTOJNOSTI ORODIJ

Metode raziskav oziroma postopki preizkušanja obdelovalnosti in obstojnosti orodij še niso standardizirani. Prav tako še ni predpisan enoten kriterij za vrednotenje obdelovalnosti oziroma obstojnosti. Vzrokov za tako stanje je več. Najvažnejši so cenenost in enostavnost eksperimentalnega postopka, nato pa splošni kriteriji, ki bi dali zanesljivo vrednost obdelovalnosti nekega materiala. Poseben problem je tudi definicija pojma obdelovalnosti, ki še ni splošno določen. Nekatere dežele so že pripravile osnove za enotno vrednotenje obrabe, tako ZDA standard za obstojnost orodij »Life Test of Sigle — Point Tools« in v Nemčiji priporočila za enotne kriterije preizkušanja:

Stahl und Eisen Prüfblätter

- 1160 — 52 Zerspanungsversuche: Allgemeines und Grundbegriffe
- 1161 — 52 Temperaturstandzeit Versuch
- 1162 — 52 Verschleissstandzeit Versuch
- 1164 — 52 Einstechverschleiss Versuch
- 1166 — 52 Versuch mit ansteigender Schnittgeschwindigkeit
- 1168 — 52 Schnittkraftversuch
- 1178 — 52 Spanausbildung

Rezultati preizkusov, ki se izvajajo po kriterijih, ki jih predpisujejo standardi ali priporočila, se lahko med seboj primerjajo. Vendar bi pri vsem tem veljalo pripomniti, da sodobne raziskave težijo k izpopolnitvi metod, zato bodo kmalu sledile spremembe standardov in priporočil.

Preizkusi obdelovalnosti se izvajajo za določanje obdelovalnosti obdelovancev in za določanje rezalnih sposobnosti orodnih materialov ter ugotavljanja načina obrabe orodja. Najbolj znane metode preizkušanja so:

- preizkus temperaturne obstojnosti,
- preizkus obstojnosti poti rezanja,
- preizkus obrabne obstojnosti,

- zarezno obrabni preizkus,
- preizkus rezalnih sil,
- izgled odrezkov,
- preizkus z radioaktivnim merjenjem obrabe orodja,
- preizkus z vzdolžnim nihanjem orodja.

Namen predpisanih metod je zagotoviti enotne pogoje preizkušanja, ker se le v tem primeru lahko pride do primerjalnih rezultatov. Kratkoročne preizkusne metode težijo k enotnemu označevanju obdelovalnosti in rezalne vzdržljivosti, ter k čim manjši porabi orodja, materiala in časa in k sigurnosti rezultatov.

3.1 Pojem obdelovalnosti

S pojmom obdelovalnost označujemo lastnost obdelovanca, ki se da lažje ali težje izoblikovati z rezalnim orodjem v želeno obliko. Obdelovalnost je toliko boljša, kolikor daljša je obstojnost rezalnega roba na orodju, čim krajši je čas odrezavanja določenega volumna materiala, čim boljša je kakovost površine obdelovanca, čim manjša je poraba energije in čim bolj ugodno je oblikovanje odrezkov. Najvažnejše spremljevalke, ki vplivajo na obdelovalnost in obstojnost orodja so: rezalna hitrost, presek odrezka (pomik, globina), geometrija rezalnega roba, material orodja, hladilno sredstvo, togost obdelovalnega stroja in različni drugi vplivi. Znatno vpliv na obdelovalnost imajo tudi lastnosti in stanje obdelovanca.

Npr.: trdota, natezna trdnost, razteznostne lastnosti, žilavost, kemični sestav, mikrostruktura, vrsta hladne obdelave, oblika in razsežnost obdelovanca, togost obdelovanca. Iz naštetih vplivov se vidi, da bi se s primernimi preizkusi dalo dobiti več kriterijev za obdelovalnost in obstojnost orodij. Iz praktičnih razlogov, najvažnejši je enostavnost merjenja, so primerni samo nekateri.

Npr. obstojnost rezalnega roba orodja, velikost sil na orodju, kvaliteta površine.

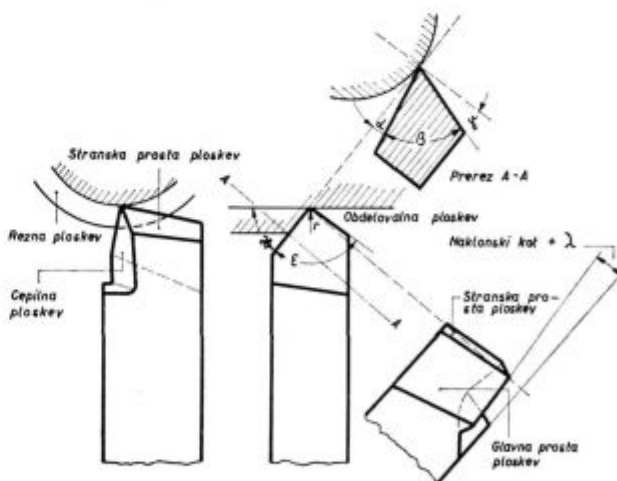
V večini primerov je obstojnost orodja najenostavnejša merjena veličina. Obstojnost rezalnega roba, merjena v časovnih enotah, je čas dejanskega dela orodja od brušenja do otopitve pod dani pogoji dela. Rezalni rob je med rezanjem različno obremenjen. V splošnem razlikujemo: obremenitev orodja zaradi trenja, ki nastane pri cepljenju odrezka od osnovnega materiala, med cepilno ploskvijo orodja in odrezkom ter obdelovancem in prosto ploskvijo noža. Pri tem je lahko kritična temperaturna obstojnost ali obrabna obstojnost. O temperaturni obstojnosti govorimo takrat, kadar rezalne sposobnosti rezalnega roba noža odpovejo zaradi povečanja temperature. Obrabna obstojnost pa je obstojnost, ki jo določuje obraba oziroma otopitev rezalnega roba, medtem ko je vpliv temperature nepomemben, npr. obdelava bakra, aluminija in njihovih zlitin in struženje navojev ter obdelava jekel pri majhnih rezalnih hitrostih.

3.2 Preizkus temperaturne obstojnosti pri rezanju

Preizkus temperaturne obstojnosti je kratkotrajni preizkus obstojnosti orodja. Po naravi je najbližji običajnemu struženju. Zato je v praksi ta preizkus najbolj razširjen. Čeprav je preprost, dovoljuje preizkušanje vrste pogojev, kot so: vpliv temperature kaljenja in popuščanja na obstojnost, vpliv geometrije rezalnega roba, vpliv pomika in globine na obstojnost orodja itd.

Merilo za obstojnost je čas struženja, v katerem orodje popolnoma otopi. Čas struženja je dejanski čas rezanja. Znak za popolno otopitev orodja je pojav svetle pege na obdelovancu. Čas struženja merimo v minutah in ga označujemo s T.

Preizkus toplotne obstojnosti se največ uporablja za ugotavljanje obdelovalnosti vseh vrst jekel in litin ter za določanje obstojnosti vseh vrst orodnih in brzoreznih jekel. Pri preizkusu temperaturne obstojnosti določujemo obstojnost orodja, tako da stružimo obdelovanec v vzdolžni smeri. Za preizkus obdelovalnosti moramo imeti enak orodni material, za preizkus vzdržljivosti ali obstojnosti pa enak obdelovalni material z zelo enakomernimi lastnostmi. Za orodni material se lahko uporabljajo vse vrste brzoreznih jekel, za katera želimo določiti rezalno obstojnost. Preizkušajo se lahko tudi vse vrste orodij iz karbidnih trdin, oksidne keramike in drugih trdih materialov. Za preizkušanje obstojnosti brzoreznih jekel se morajo uporabljati noži iz celega. Nož mora imeti po celem preseku in dolžini enako strukturo. Oblika noža je dana po JUS K.C1.010 slika 6 sledečih dimenzij in oblike:



Slika 6
Oblika noža po JUS K.C1.010

- Presek noža za kosmačenje 20×20 mm
- Presek noža za fino struženje 12×12 mm
- Koti na rezalnem robu:

Prosti kot	$\alpha = 8^\circ$
Cepilni kot	$\gamma = 10^\circ$
Celni ali vrhnji kot	$\varepsilon = 90^\circ$
Nastavni kot	$\kappa = 60^\circ$
Nagibni kot	$\lambda = \kappa 4^\circ$

Polmer konice noža
za kosmačenje $r = 1,0 \text{ mm}$
za fino struženje $r = 1,0 \text{ mm}$
globina struženja za kosmačenje
 $a = 2 \text{ mm}$ in pomik $s = 0,5 \text{ mm/vrt.}$
globina struženja za fino struženje
 $a = 1 \text{ mm}$ in pomik $s = 0,1 \text{ mm/vrt.}$

Pri preizkusu toplotne obstojnosti je potrebno določiti čase obstojnosti $T(\text{min.})$ vsaj za 3 do 4 različne hitrosti v (m/min). Rezalne hitrosti moramo izbrati tako, da so časi vzdržljivosti v mejah med 10 in 60 minut. Čas obstojnosti je čas dejanskega rezanja nabrušenega noža do otopitve. Otopitev, ki jo spoznamo s pojavom svetle pege, nastane na že obdelani površini obdelovanca ali na rezalni ploskvi, odvisno od tega, ali se prej obrabi konica noža ali rezalni rob (prosta ploskev). Otopelost orodja se vidi tudi iz povečanega premera obdelovanca in spremembe oblike odrezkov. Za vsako rezalno hitrost je treba napraviti več ponovitev. Število ponovitev zavisi od trošenja rezultatov. V nobenem primeru ni dovoljen zaključek preizkušanja samo iz enega preizkusa!

Rezultati preizkusa se vnašajo v dvojno logaritmično koordinatno mrežo. Merili za obe koordinatni osi sta enaki. Na absciso nanašamo rezalno hitrost v (m/min) na ordinato pa obstojnost T (minut). Nanesene točke v dvojno logaritmični mreži običajno ležijo na premici. Če srednje vrednosti nanesenih točk za vsako hitrost v »v. T« diagramu ne tvorijo premice, se morajo preizkusi nadaljevati. Premica je podana z enačbo:

$$v \cdot T^n = C \quad (1)$$

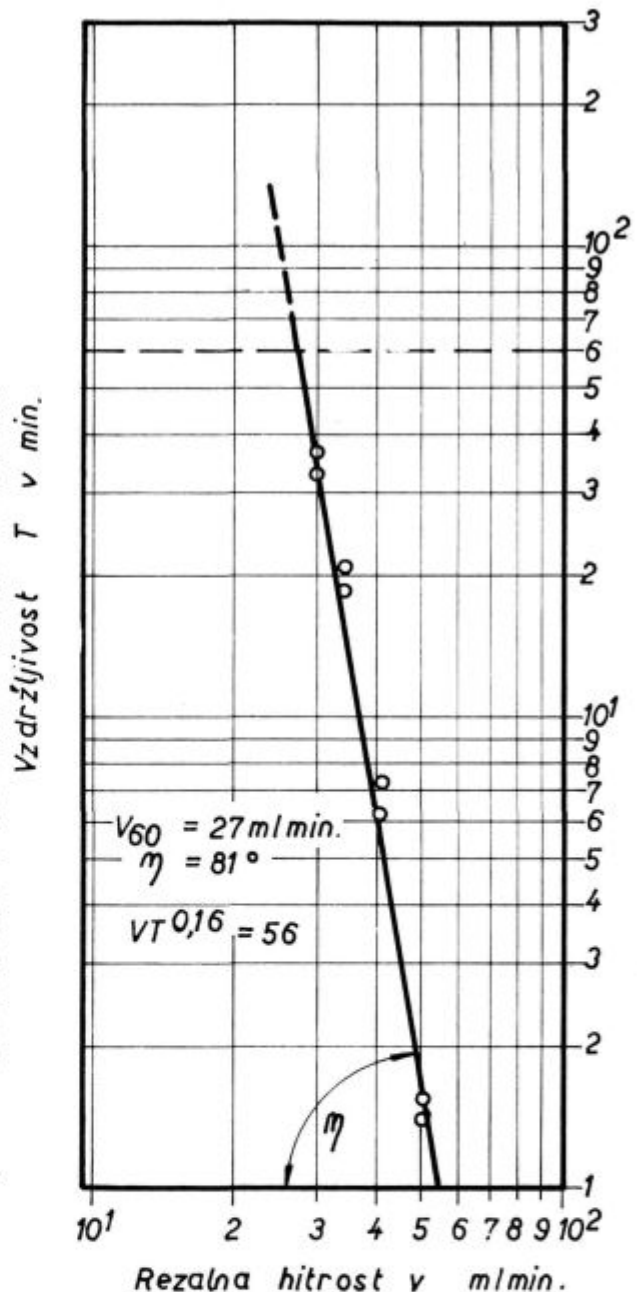
kjer je C = vrednost na abscisni osi pri $T = 1 \text{ min.}$, n = koeficient nagiba premice, ki je podan z enačbo: (glej sliko 7)

$$n = \frac{1}{\text{tg} \eta} \quad (2)$$

Kot rezultat preizkusa lahko jemljemo rezalno hitrost v_{60} (m/min), to je hitrost, pri kateri nož vzdrži 60 minut neprekinjenega rezanja pri konstantnih delovnih pogojih. Hitrost v_{60} je neposredno odvisna od kota η , ali po formuli (1) za enačbo premice v v-T diagramu, v katero je treba vstaviti znane vrednosti za n in C . Očitno je, da je v obeh primerih premica točno določena.

T-v premica je osnova za vrednotenje obdelovalnosti obdelovancev in obstojnosti orodja.

Večji nagibni kot premice pomeni, da majhne spremembe v hitrosti močno vplivajo na obstojnost. Iz tega sledi, da temperatura odločilno vpliva na obstojnost. Položna karakteristika pomeni, da je obraba proste ploskve odločilni faktor za obstojnost orodja.



Slika 7
v-T diagram

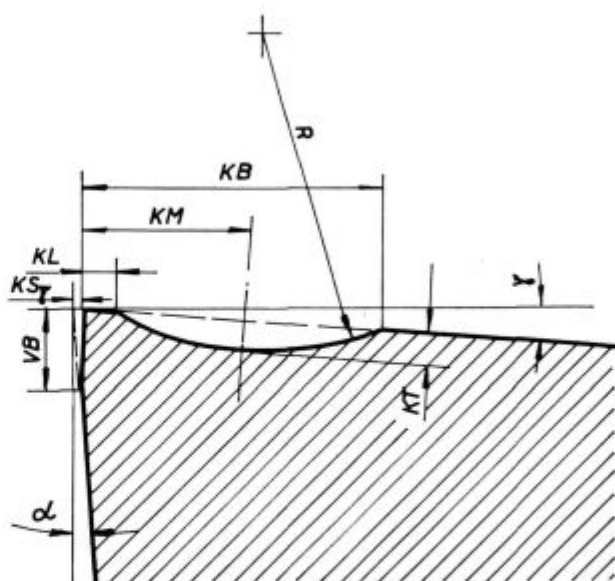
Iz slike 7 se jasno vidi, da majhne spremembe hitrosti malo vplivajo na obstojnost. Vrednosti za »n« ležijo med 0,05 in 0,4, večinoma pa med 0,1 in 0,15. Z nekoliko prakse si tudi lahko iz nagiba premice razlagamo obdelovalnost različnih materialov. Opozoriti moramo še na važno ugotovitev, ki se neposredno ne vidi iz diagrama v-T. Na nagib premice v v-T diagramu vpliva tudi razmerje globine in pomika. Obstojnost orodja ni enaka pri vseh razmerjih $\frac{a}{s}$, čeprav je produkt za vsa razmerja enak.

To pravilo je pomembno za določanje najboljših pogojev obdelave.

3.3 Preizkus obstojnosti poti rezanja

Preizkus obstojnosti poti rezanja je temperaturno obstojnostni preizkus z močno povečano rezalno hitrostjo. Ker je merjenje vzdržljivosti noža v minutah netočno, merimo pot, ki jo napravi nož od začetka rezanja do otopitve. Vsi ostali pogoji: obdelovalni stroj, orodje in pogoji dela so enaki kot pri preizkusu temperaturne obstojnosti. Rezultat preizkusa je premica v L-v diagramu, iz katerega določimo rezalno hitrost v_{100} (m/min), pri kateri nož vzdrži 100 m dolgo rezalno pot.

Preizkus obstojnosti poti rezanja je kratkotrajen preizkus. Njegova prednost je v majhni porabi časa in materiala, vendar se preizkus zaradi močno povečanih rezalnih hitrosti oddaljuje od dejanskih pogojev obdelave. Rezultati zato nimajo take praktične vrednosti, kot jo imajo pri preizkusu temperaturne obstojnosti. Zbirnik podatkov in rezultatov je podoben kot pri preizkusu temperaturne obstojnosti. Razlika je le v merilu obstojnosti.



Slika 8
Meritve obrabe strugarskega noža

3.4 Preizkus obrabne obstojnosti

Preizkus obrabne obstojnosti zasleduje vrsto in velikost obrabe proste ploskve »VB« v mm, merjene od rezalnega roba. Vpliva temperature v tem preizkusu ne upoštevamo. Preizkus obrabne obstojnosti je namenjen za vrednotenje obdelovalnosti neželeznih kovin in nekovinskih obdelovancev.

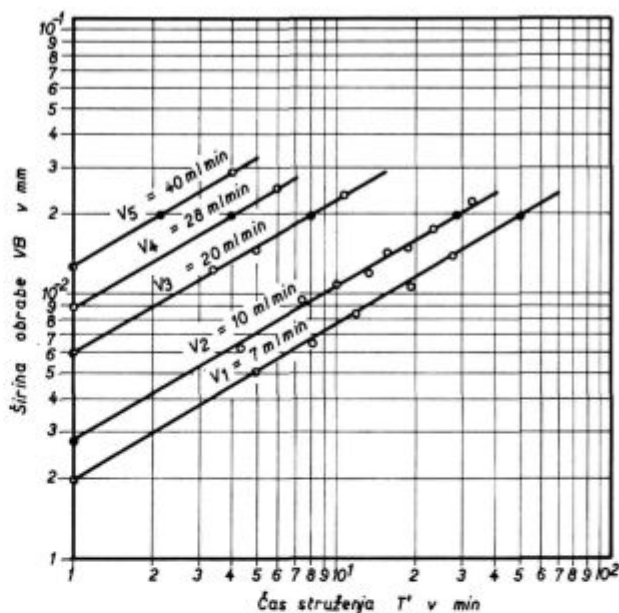
Orodje lahko izbiramo med vsemi vrstami brzoreznih jekel in karbidnih trdin. Preizkus dovoljuje tudi preizkušanje obdelovalnosti vseh vrst litin in konstrukcijskih jekel.

Kriterij za obstojnost je velikost obrabe na prosti ploskvi noža, ki jo merimo v določenih časovnih presledkih pri vzdolžnem struženju. Oblika orodja je enaka kot pri preizkusu temperaturne obstojnosti. Pri izvajanju preizkusa moramo izbrati vsaj 3 ali 4 različne hitrosti v m/min.

Rezalne hitrosti moramo po možnosti izbrati tako, da je širina obrabe $VB \approx 0,2$ mm po 5 do 30 minutah struženja. Meja za velikost obrabe $VB = 0,2$ mm, ki jo podaja Stahl Eisen Prüfblatt 1162-52 za jeklene obdelovance, je za grobe preizkuse preozka.

Iz rezultatov preizkusov, katere smo izvršili, predlagamo vsaj $VB = 0,4$ mm za kosmačenje in $VB = 0,2$ mm za fino struženje. Za obdelovance iz bakra, aluminija in njihovih zlitin pa $VB = 0,1$ mm. Širina obrabe na prosti ploskvi se meri od prvotnega rezalnega roba (slika 8). Pri vsaki meritvi se določi srednja vrednost obrabe. Prvo meritev obrabe VB opravimo po dveh minutah struženja, nato pa vsake 3 minute. Pri vsakem merjenju moramo nož sneti iz vpenjalne glave. Paziti moramo, da ima nož po vsakem vpenjanju vedno enak položaj.

Rezultate merjenih širin obrabe na prosti ploskvi v določenih časovnih presledkih vnašamo v dvojno logaritmično koordinatno mrežo. Na absciso nanašamo čas T' v minutah, na ordinato pa širino obrabe VB v mm. Točke za vsako rezalno hitrost ležijo navadno na premici (slika 9).

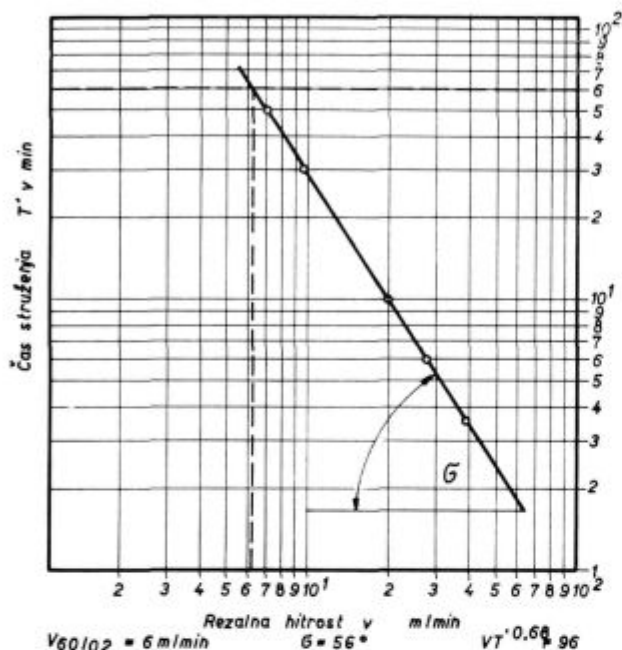


Slika 9
VB-T' diagram

Za vsako od premic oziroma rezalnih hitrosti se za širino obrabe $VB = 0,4$ oziroma $VB = 0,2$ mm določi pripadajoči čas struženja T' (min). Dobljene točke (polni krožec) vnesemo v dvojno logaritmično koordinatno mrežo, kjer na absciso na-

našamo rezalne hitrosti v m/min, na ordinato pa pripadajoče čase obstojnosti za $VB = 0,4$ ali $VB = 0,2$ mm.

Premica v T' -v diagramu (slika 10) je določena z enačbo $vT^m = K$, kjer je K konstanta, ki jo dobimo, če v enačbo vstavimo za $T' = 1$ min., m pa je koeficient naklona premice, ki je podan z enačbo:



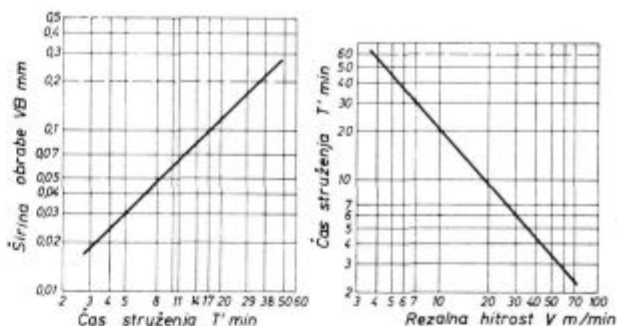
Slika 10
 T' - v diagram

$$m = \frac{1}{\operatorname{tg} \sigma} \quad (3)$$

Rezultat vrednotenja pri obrabno obstojnostnem preizkusu je rezalna hitrost $v_{60,0,4}$ (m/min). Hitrost $v_{60,0,4}$ je rezalna hitrost, pri kateri nastane v času $T' = 60$ min., širina obrabe $VB = 0,4$ mm.

Rezultat je lahko tudi vrednost enačbe $vT^m = K$, v katero moramo vstaviti znane vrednosti za m in K . V obeh primerih je premica nedvoumno določena.

S premicama v logaritmичnem diagramu $VB-T'$ in T' -v (slika 11) je obrabna obstojnost za vsako vrsto brzoreznega jekla popolnoma določena. Iz nagiba premice ocenimo obrabni učinek obdelovanca in karakteristiko obrabljanja orodja. Čim večji je nagib premice v T' -v diagramu, tem večji je obrabni učinek obdelovanca oziroma obrabljenost orodja. Vrednosti za m so med 0,3 in 1,2. Pogoji preizkušanja so podobni dejanskim delovnim pogojem, zato se rezultati lahko neposredno prenesejo na potrebe prakse.



Slika 11
Zbirnik podatkov za preizkus obrabne obstojnosti

4.1 Laboratorijski preizkusi obstojnosti brzoreznih jekel elomax Č.4882 in BRC-3 Č.9782

Praktične preizkuse obstojnosti brzoreznih jekel smo izvedli v laboratoriju raziskovalnega oddelka v železarni Ravne za vrsto jekla elomax in BRC-3.

Namen temperaturno obstojnostnega preizkusa je bil določiti optimalno toplotno obdelavo in najboljše geometrijo rezalnega roba, pri kateri bo dosežena maksimalna obstojnost. Pri obeh jeklih elomax in BRC-3 so bili noži kaljeni pri treh različnih temperaturah in popuščani na dve ali tri različne popuščne temperature. Pri vsaki veji toplotne obdelave smo preizkušali vpliv treh različnih cepilnih kotov γ (pri BRC-3 tudi vpliv dveh nagibnih kotov λ) na obstojnost strgarskih nožev. Za nože, ki so dali pri temperaturno obstojnostnem preizkusu maksimalne rezultate (največje v_{60}), smo izvedli tudi obrabno obstojnostni preizkus. Namen zadnjega je bil določiti za obe jekli karakteristično obliko obrabljanja.

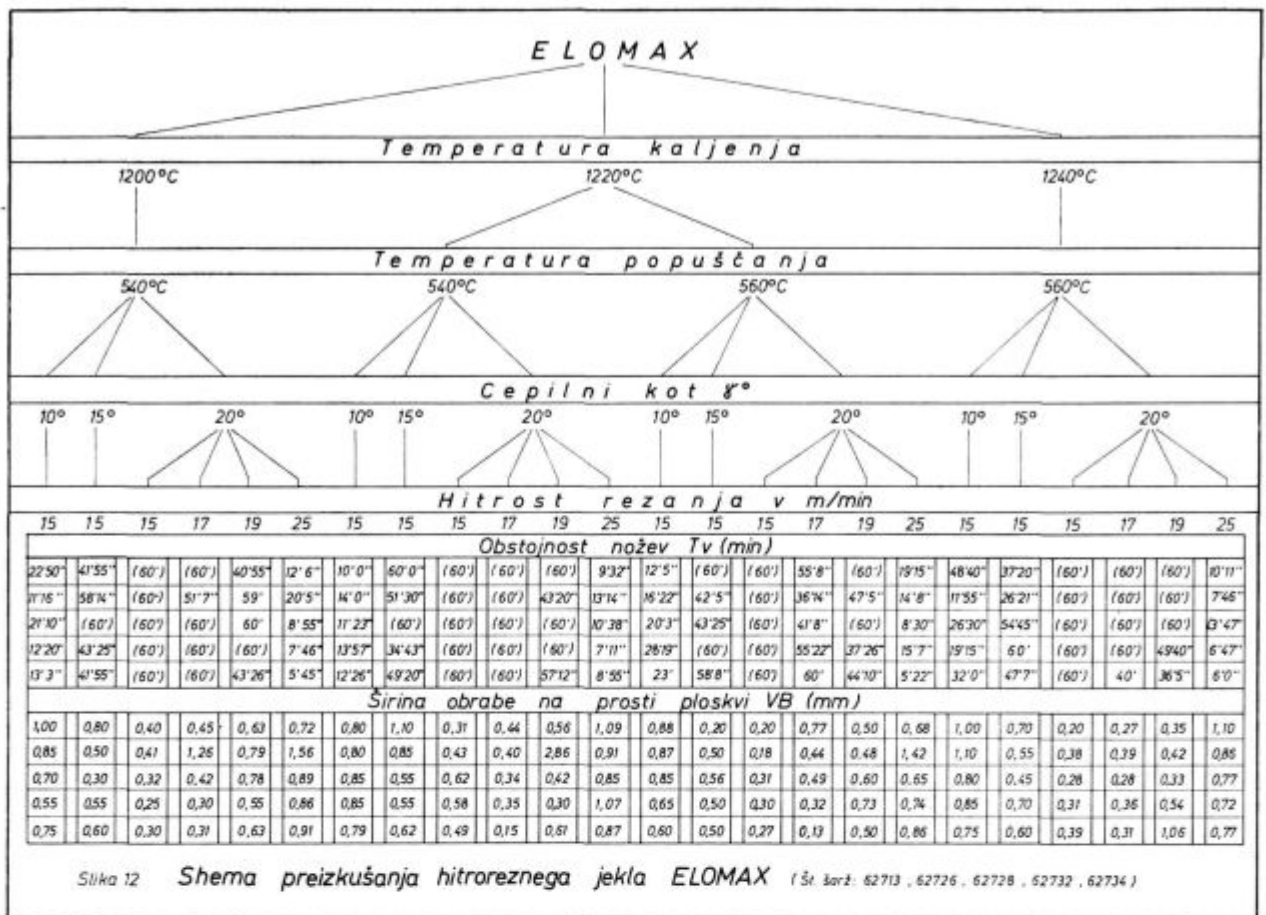
Z uporabo metod statističnega vrednotenja poizkusov smo prišli z najmanjšim obsegom eksperimentiranja do sigurnih zaključkov.

Pri jeklu elomax so bili poizkusi namenjeni tudi upravičevanju modifikacij v kemijski sestavi. Zato glavni namen preiskav z jeklom elomax ni bil v doseganju visokih obstojnosti nožev in absolutnem vrednotenju, ampak predvsem na osnovi rezultatov petih preizkusnih šarž razviti in praktično prikazati metodo medsebojnih primerjav in vrednotenja, pri katerih bi bili subjektivni faktorji pri ocenjevanju čimbolj odpravljani. Izkazalo se je, da je to s statističnimi metodami in smiselnim planiranjem preizkušanja in zadovoljevanjem zahtev slučajnosti dobro izvedljivo.

4.2 Opis eksperimentalne opreme in poizkusnih pogojev

Za izvajanje opisanih preizkusov smo uporabili prirejeno eksperimentalno stružnico prvomajska TES 3/250/1500 s PIV menjalnikom za brezstopenjsko menjavanje hitrosti.

Obrabo na prosti in cepilni ploskvi smo merili na univerzalnem merilnem mikroskopu »wego« s prirejenim komparatorjem.



Slika 12
Shema preizkušanja brzoreznega jekla elomax

Strugarski noži elomax in BRC-3 so bili najprej grobo brušeni, nato pa še na dokončno geometrijo fino brušeni.

Za grobo brušenje je bila uporabljena segmentna brusilna plošča SWATY DB 46 L 6 V, za fino brušenje pa skledasta brusilna plošča D 60 K 8 V. Pri obeh brušenjih je bil vzdolžni in prečni pomik ročen. Opisana izbira brusilnih plošč ni bila določena s preizkusi, ampak se je v praksi izkazala za dobro. Ugotavljanje optimalnih pogojev brušenja in ostrenja nožev bo predmet prihodnjih raziskav.

Obstojnost strugarskih nožev smo preizkušali na obdelovancih iz poboljšane krom-molibdenovega jekla. Za preizkušanje nožev elomax so bili obdelovanci iz jekla za poboljšanje vrste Č.4737 poboljšani na 94 do 105 kp/mm². Obdelovanci za preizkušanje brzoreznega jekla BRC-3 pa so bili iz jekla Č.4736, poboljšani na 84 do 89 kp/mm².

V prvem primeru so bili obdelovanci iz celega preseka s premerom Ø 180 mm in dolžine 1400 mm v drugem preizkusu pa levi zunanji premera Ø 160 mm s premerom luknje Ø 70 mm ter dolžine 1300 mm. Cevasta oblika obdelovanca je ugodnejša, ker je struktura materiala enakomernejša in s tem trosenje rezultatov zaradi enakomernejše trdote manjše.

Vpliv sprememb v strukturi materiala obdelovanca zmanjšamo s slučajno razvrstitvijo preizkušanih nožev po tabeli slučajnostnih števil². S poznejšo statistično analizo eksperimentalnih rezultatov dobimo zanesljivo statistično povprečje.

5. Preizkusi obstojnosti strugarskih nožev iz jekla elomax

Pri ugotavljanju vpliva toplotne obdelave in geometrije rezalnega roba orodja je bilo na razpolago 28 nožev iz petih šarž brzoreznega jekla elomax.

Iz sheme preizkušanja (slika 12) se vidi, da smo samo pri kalilni temperaturi 1220°C preizkušali dve temperaturi popuščenja 540°C in 560°C, pri ostalih dveh kalilnih temperaturah pa samo po eno. Vzrok za tak razpored je metalurškega značaja.

Popuščna obstojnost, dosežena s kaljenjem pri 1200°C, je zaradi nepopolnega kaljenja majhna in zato je bila trdota s popuščenjem na 560°C že toliko nižja od ostalih nožev, da bi to lahko pomembno vplivalo na obstojnost. Temperatura popuščenja 560°C je bila torej v tem primeru za kalilno temperaturo 1200°C previsoka in ni prišla v poštev zaradi nezadostne trdote nožev.

Kalilna temperatura 1240°C je na zgornji meji kalilnega območja. Večja količina in večja stabilnost zaostalega avstenita zahtevata višjo temperaturo popuščanja, da se izvrši premena zaostalega avstenita v martenzit. Zahtevano trdoto smo dosegli šele pri 560°C ali z večkratnim ponavljanjem popuščanja na 540°C. Kalilna temperatura 1220°C je v sredini kalilnega območja in zato najsigurnejša za doseg zahtevanih trdot. Te so zadovoljive pri temperaturi popuščanja 540°C in 560°C.

Po toplotni obdelavi nožev smo vsem nožem izmerili trdoto in s statistično analizo pomembnosti razlik v trdotah za posamezne pogoje toplotne obdelave po metodi dveh nevezanih serij ugotovili, da so bile te razlike eksperimentalnih serij statistično nepomembne.

5.1 Izvedba preizkusa temperaturne obstojnosti

Prvotni namen raziskav jekla elomax je bil preizkusiti vpliv kotov ostrenja na obstojnost nožev. Poudarek je bil na cepilnem kotu γ .

Iz sheme preizkušanja brzoreznega jekla elomax (slika 12) je razvidno, da se je pri temperaturno obstojnostnem preizkusu raziskoval vpliv treh različnih cepilnih kotov poleg že omenjene toplotne obdelave. Na shemi preizkušanja so zbrani tudi vsi časi izdržljivosti T v minutah in izmerjene širine obrabe na prosti ploskvi VB v mm po končanem preizkusu oziroma času T . Vsi preizkusi so bili omejeni na eno uro, kar pomeni, da so bili po 60 minutah prekinjeni. Taki prekinjeni preizkusi so v tabeli podani v oklepaju (60'). Za optimalni kot $\gamma = 20^\circ$ so bili izvedeni poizkusi za štiri različne hitrosti s po petimi ponovitvami.

Za statistično vrednotenje rezultatov je nujno zbiranje v obliki, kakor jo prikazuje shema slike 12. Taka oblika da tudi prikladno preglednost nad opravljenimi poizkusi. To velja posebno, če preizkušamo več nožev hkrati.

5.2 Statistično vrednotenje rezultatov z analizo variance za elomax

5.21 Vpliv toplotne obdelave in cepilnega kota γ pri hitrosti $v_1 = 15$ m/min.

Pri tej analizi smo ugotavljali vpliv ciklusa toplotne obdelave, pri čemer smo upoštevali sledeče variante:

- 1' — kaljenje 1200°C + popuščanje 540°C
2-krat po 1 uro
- 2' — kaljenje 1220°C + popuščanje 450°C
2-krat po 1 uro
- 3' — kaljenje 1220°C + popuščanje 560°C
2-krat po 1 uro
- 4' — kaljenje 1240°C + popuščanje 560°C
2-krat po 1 uro

Za vsak cikel toplotne obdelave so bili preizkušeni noži s koti $\gamma = 10^\circ$, $\gamma = 15^\circ$ in $\gamma = 20^\circ$ pri konstantni rezalni hitrosti $v_1 = 15$ m/min.

Zaradi prekinitve poizkusov po 60 minutah rezanja, ki je bila pri pogojih preizkušanja nujna, je zmanjšana občutljivost medsebojnih primerjav. Ker dejanske izdržljivosti takih nožev (nad 60 minut) niso poznane in jih računalnik pri analizi upošteva kot enake.

Vse analize variance so bile izvršene za tri nivoje statistične gotovosti

$\alpha = 10\%$ (kar pomeni statistično gotovost 90%)

$\alpha = 5\%$ (kar pomeni statistično gotovost 95%)

$\alpha = 1\%$ (kar pomeni statistično gotovost 99%)

Tabelarične kritične vrednosti F za

$$v_1 = 3; v_2 = 48; F_{\alpha=5} = 2,9$$

$$F_{\alpha=1} = 4,2$$

$$v_1 = 2; v_2 = 48; F_{\alpha=5} = 3,2$$

$$F_{\alpha=1} = 5,1$$

$$v_1 = 6; v_2 = 48; F_{\alpha=5} = 2,3$$

$$F_{\alpha=1} = 3,2$$

Iz rezultatov analize variance je razvidno, da pri opisanih pogojih preizkušanja (prekinitve preizkusov!) in navedenem obsegu preizkušanja vpliv cepilnega kota γ močno prevladuje nad ostalimi preizkušanimi vplivi.

Vpliv toplotne obdelave na čas obstojnosti je statistično nepomemben.

Analiza vpliva cepilnega kota kaže, da je statistično pomembna (z 99% gotovostjo) že vsaka razlika kota za 5° . Največje čase izdržljivosti daje največji od preizkušenih kotov (to je $\gamma = 20^\circ$).

Rezultati analize variance za čas obstojnosti T — elomax

Izvor	Vsote kvadratov	Prostostne stopnje	Srednji kvadrati	Frač.	Pomembnost
Ciklus toplotne obdelave	$0,4351 \times 10^6$	3	$0,1450 \times 10^6$	0,67	Nepomembna
Cepilni kot γ	$0,6520 \times 10^8$	2	$0,3260 \times 10^8$	149,69	Pomembna $\alpha = 1$
Medsebojni vplivi	$0,2462 \times 10^7$	6	$0,4104 \times 10^6$	1,88	Nepomembna
Napaka	$0,1045 \times 10^8$	48	$0,2178 \times 10^6$	1,00	

5.22 Vpliv rezalne hitrosti na čas obstojnosti

Preizkušanje vpliva rezalne hitrosti

$v_1 = 15$ m/min.

$v_2 = 17$ m/min.

$v_3 = 19$ m/min.

$v_4 = 25$ m/min.

na čas obstojnosti T pri opisanih pogojih toplotne obdelave in konstantnem cepilnem kotu $\gamma = 20^\circ$ kaže, da med hitrostima v_1 in v_2 ter v_2 in v_3 ni pomembne razlike v času obstojnosti niti na nivoju statistične gotovosti 90 %.

Pač pa je že z gotovostjo 99 % pomembna razlika med v_1 in v_3 , v_2 in v_4 , v_3 in v_4 ter vsaka večja razlika. Iz te analize lahko zaključimo, da sprememba rezalne hitrosti za 2 m/min. še ne vpliva pomembno na čas obstojnosti.

5.23 Vplivi na širino obrabe

Istočasno z merjenjem časa smo za vsak nož izmerili še širino obrabe na prosti ploskvi VB.

Tako smo dobili enako primerjalno tabelo kot za čas T tudi za širino VB. Ker so bili preizkusi po 60' prekinjeni, so razlike večje, kot bi sicer bile, če bi preizkuse nadaljevali. Analiza variance je dala naslednje rezultate:

glede na ciklus toplotne obdelave je pri konstantni rezalni hitrosti $v_1 = 15$ m/min. najmanjša obraba pri kaljenju 1220°C in popuščanju 560°C . Z 99 % statistično gotovostjo lahko trdimo, da je kombinacija: kaljenje 1220°C + popuščanje 560°C boljše od kombinacije: kaljenje 1220°C + popuščanje 540°C . Le z 90 % statistično gotovostjo lahko trdimo, da je kombinacija — kaljenje 1220°C + popuščanje 540°C boljše od kombinacije 1240°C + popuščanje 560°C . Drugih pomembnih razlik med ciklusi toplotne obdelave pri danih pogojih preizkušanja ni.

Za razlike zaradi različnih cepilnih kotov γ , vlejajo isti zaključki kot pri obstojnosti T .

Za preizkušane različne rezalne hitrosti z 99 % gotovostjo trdimo, da je pri $v_1 = 15$ m/min., $v_2 = 17$ m/min. manjša obraba kot pri $v_4 = 25$ m/min. S 95 % gotovostjo lahko še trdimo, da je tudi obraba pri $v_3 = 19$ m/min. večja kot pri $v_2 = 17$ m/min. To nas navaja na misel, da je razlika hitrosti 2 m/min. kljub prejšnjim trditvam le še pomembna pri obstojnosti nožev.

Tudi pri tem moramo namreč upoštevati v zaključkih določeno rezervo zaradi precejšnjega števila prekinjenih poizkusov.

5.3 Izvedba preizkusa obrabne obstojnosti

Preizkus obrabne obstojnosti smo izvedli za nože, ki so bili kaljeni pri 1220°C in popuščani na 560°C , ker so imeli ti najvišjo vrednost $v_{60} = 18,6$ m/min. Potek preizkusa je bil že opisan. Odvisnost obrabe proste ploskve od časa struženja smo določili za tri različne hitrosti. Koti na nožu so enaki kot pri temperaturno obstojnostnem preizkusu. Vsi pogoji preizkušanja, pomik, globina rezanja, premer obdelovanca morajo biti vpisani v ustrezno tabelo, ki si jo lahko preizkuševalec sam predpiše.

Za vsako rezalno hitrost smo uporabili tri enako nabrušene in toplotno obdelane nože. Rezultati preizkusa so grafično prikazani na slikah 13, 14, 15 in 16.

Karakteristične oblike obrabljanja nožev med obrabno obstojnostnim preizkusom bodo opisane za obe vrsti brzoreznih jekel elomax in BRC-3. Značilna je »S« krivulja v linearni koordinatni mreži VB-T (glej sliko 14).

5.4 Zaključki preizkušanja nožev iz jekla elomax

Pri preizkusih z brzoreznim jeklom elomat smo ugotovili, da spremembe kalilnih temperatur v predpisanih mejah ne vplivajo bistveno na obstojnost rezalnega roba.

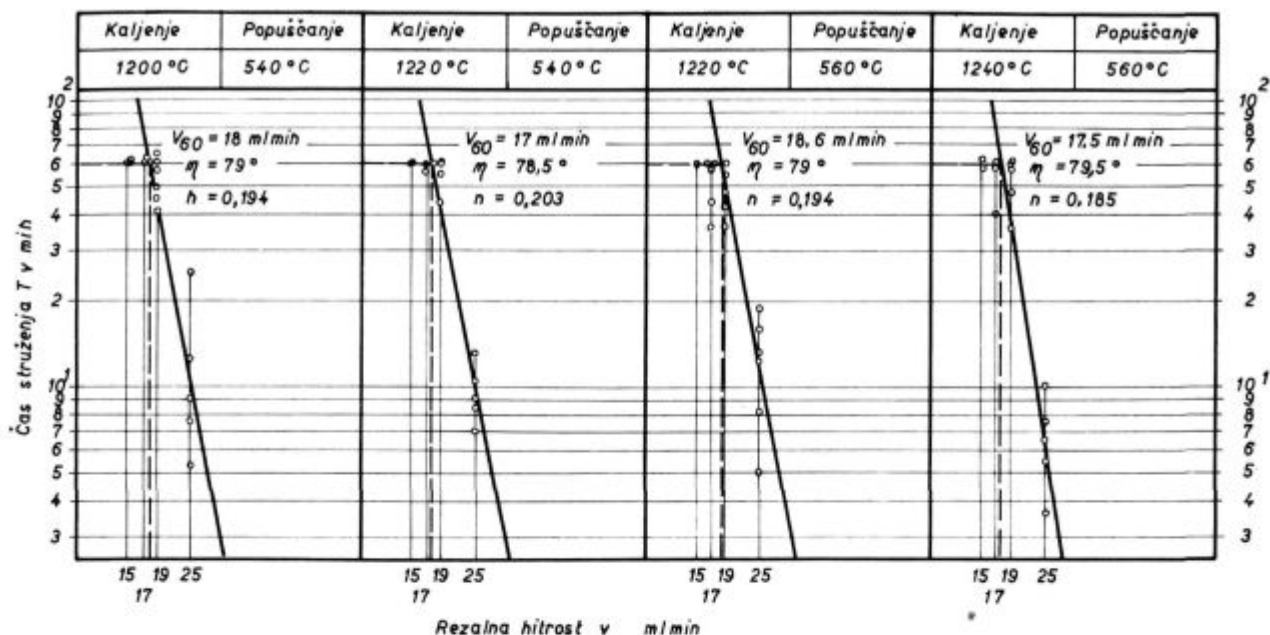
Zaključki razprav mnogih avtorjev soglašajo v trditvi, da orodja iz brzoreznih jekel zahtevajo večje kote kot orodja iz karbidnih trdin. Kolikšni so najugodnejši koti, pa ni vedno jasno in v katalogih podajajo precej nepopolna priporočila. Izvršeni preizkusi z jeklom elomax jeklom so delno rešili to neznanko ali vsaj pokazali pot z nadaljnjimi poizkusi.

Sprememba kota $\gamma = 10^\circ$ na kot $\gamma = 20^\circ$ je povečala obstojnost nožev za več kot 50 %. V praksi se večkrat uporablja prvi kot. Iz slike 22 tudi vidimo, da je bilo precej preizkusov pri cepilnem kotu $\gamma = 20^\circ$ prekinjenih. V nadaljnjih preizkusih bi bilo potrebno povečati rezalne hitrosti na $v_1 = 22$ m/min., $v_2 = 25$ m/min. in $v_3 = 28$ m/min., po potrebi pa še $v_2' = 29$ ali $v_3' = 31$ m/min. Mnogo sigurnejši bi tudi bili rezultati preizkusov, če se ne bi omejili na prekinitev preizkusa po 60 min., ampak po 90 minut, kar pa je vprašanje praktičnih možnosti in dimenzij obdelovanca. Povečanje časa preizkušanja od $T = 60$ minut na $T = 90$ minut predlagamo zato, ker $T = 60$ minut sovpadajo s točko v_{60} v T-v diagramu. Večji razpon časov preizkušanja bi bil tudi zaželen pri statističnem vrednotenju rezultatov.

6. PREIZKUSI OBSTOJNOSTI STRUGARSKIH NOŽEV IZ JEKLA BRC-3 (Č. 9782)

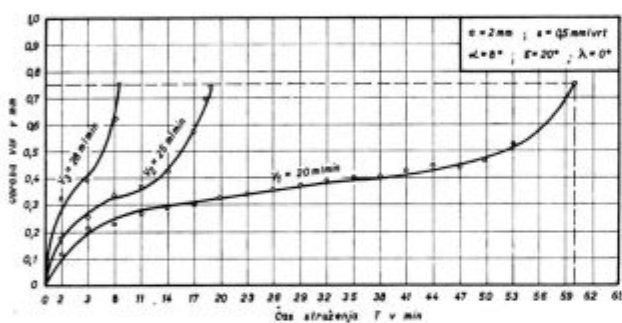
Pri ugotavljanju obstojnosti strugarskih nožev BRC-3 je bil potek podoben kakor pri nožih elomax. Poizkus je bil obsežnejši in na osnovi izkušenj pri preizkušanju jekla elomax vnaprej natančneje planiran. Na razpolago je bilo 80 nožev, vsi noži so bili iz ene šarže jekla, kar daje ugotavljanju vpliva toplotne obdelave večjo gotovost. Noži so bili kaljeni na treh različnih temperaturah in za vsako temperaturo kaljenja popuščani pri dveh različnih temperaturah popuščanja.

Iz sheme (slika 17) je razvidno, da smo ugotavljali obstojnost nožev za cepilne kote $\gamma = 6^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\gamma = 15^\circ$ pri hitrostih $v_1 = 25$ m/min., $v_2 = 21$ m/min. in $v_3 = 28$ m/min.



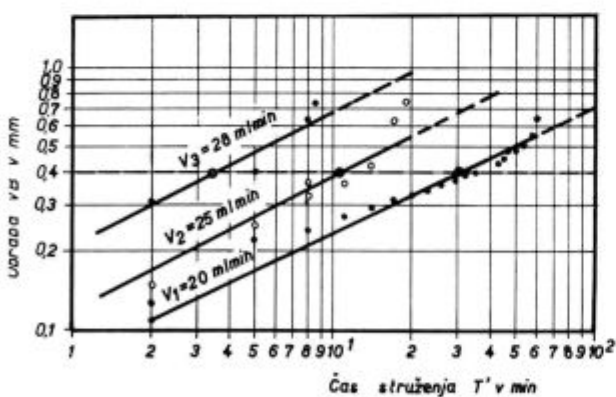
Slika 13

Vpliv toplotne obdelave na vzdržljivost strugarskih nožev elomax



Slika 14

Odvisnost obrabe proste ploskve od časa struženja za jeklo elomax

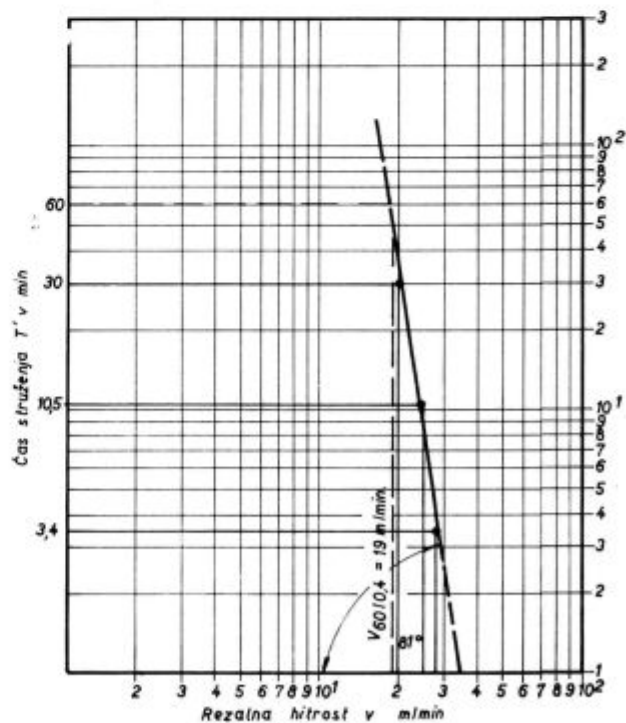


Slika 15

Odvisnost obrabe proste ploskve od časa struženja v dvojno logaritmični koordinatni mreži

Za nože, ki so bili kaljeni na 1290°C in popuščani na 560°C , smo ugotavljali tudi vpliv nagibnega kota $\lambda = 0$ in $\lambda = +4^\circ\text{C}$ (glej sliko 6).

Iz pregleda sheme ne moremo dati nikakršnih zaključkov, pač pa nam to omogoča statistično vrednotenje rezultatov. Z analizo variance smo ugotovili, kako vplivajo na obstojnost različni ciklusi toplotne obdelave, kako cepilni kot γ in kako nagibni kot λ . Omejili se bomo samo na zaključke posameznih analiz, ker bi podrobnejše opisovanje izračunavanj presegalo okvir tega članka.



Slika 16

Določitev $v_{60,0,4}$ za elomax
 $v_{60,0,4} = 19$ m/min., $\sigma = 81^\circ$ m = 0,18

BRC-3 (šarža C)

Temperatura kaljenja

1270°C

1290°C

1310°C

Temperatura popuščanja

600°C

540°C

560°C

560°C

600°C

540°C

Naklonski kot λ

0°

0°

0°

+4°

0°

0°

Cepilni kot γ°

6°

10°

15°

6°

10°

6°

10°

15°

6°

10°

15°

6°

10°

15°

Obstojnost nožev „T“

Hitrost rezanja	$V_s = 25 \text{ m/min}$	1	6'40"	7'32"	22'24"	6'12"	6'35"	10'40"	11'13"	9'7"	9'8"	9'20"	18'2"	(1h)	7'20"	21'10"	41'45"	7'11"	10'00"	1'5"
		2	10'27"	7'4"	33'35"	4'15"	9'55"	22'15"	10'47"	9'00"	13'56"	18'00"	(1h)	(1h)	7'25"	25'00"	(1h)	8'12"	11'20"	11'2"
		3	8'2"	8'34"	35'50"	6'28"	9'9"	18'55"	5'42"	9'57"	8'27"	8'58"	49'00"	(1h)	9'40"	17'25"	(1h)	9'4"	16'30"	9'16"
		4	6'14"	7'30"	11'15"	7'40"	8'10"	19'55"	5'38"	9'25"	11'38"	13'55"	44'2"	(1h)	6'42"	18'25"	50'41"	6'40"	12'50"	18'8"
		5	8'55"	12'14"	12'30"	7'12"	9'18"	14'16"	5'48"	7'3"	17'55"	8'42"	38'5"	(1h)	10'18"	24'20"	40'12"	8'15"	16'3"	19'10"
		6	6'45"	13'18"	11'30"	3'50"	7'40"	9'48"	9'16"	12'11"	9'55"	14'25"	50'00"	(1h)	7'55"	37'11"	36'18"	5'41"	9'6"	1'1"
		7	6'42"	15'3"	15'20"	6'5"	8'32"	13'7"	7'5"	9'18"	10'32"				(1h)	16'14"	58"	6'00"	10'35"	10'36"
Hitrost rezanja	$V_s = 21 \text{ m/min}$	1	8'40"	10'23"	28'25"	15'25"	17'3"	(1h)	18'30"	39'4"	(1h)	12'50"	(1h)	(1h)	10'28"	25'00"	(1h)	24'50"	25'12"	(1h)
		2	10'32"	14'52"	30'25"	23'32"	15'55"	45"	30'17"	15'7"	(1h)	30'15"	(1h)	(1h)	13'7"	36'12"	(1h)	19'10"	48'1"	(1h)
		3	17'20"	11'51"	22'50"	17'32"	22'23"	(1h)	10'28"	23'25"	(1h)	13'00"	39'47"	(1h)	14'52"	27'00"	(1h)	33'40"	36'20"	(1h)
		4	10'42"	15'55"	27'15"	16'14"	34'46"	(1h)	11'56"	26'31"	(1h)	31'15"	(1h)	(1h)	20'41"	28'00"	(1h)	21'10"	35"	(1h)
		5	13'41"	16'27"	33'5"	17'5"	25'55"	19'30"	16'35"	22'13"	38'33"	12'39"	26'55"	(1h)	11'16"	22'5"	(1h)	25'6"	40'5"	34'18"
		6	9'50"	15'32"	25'7"	15'18"	23'35"	(1h)	15'00"	19'46"	(1h)	14'55"	(1h)	(1h)	15'42"	28'10"	59"	19'20"	28'6"	(1h)
		7	7'46"	13'58"	(1h)	16'56"	20'15"	24'51"	20'27"	14'32"	48'5"				16'11"	25'10"	(1h)	18'20"	26'7"	25'00"
Hitrost rezanja	$V_s = 28 \text{ m/min}$	1	2'10"	13'10"	11'27"	8'12"	2'55"	17'4"	3'30"	9'40"	9'22"	10'44"	17'15"	18'40"	2'47"	8'50"	13'10"	4'50"	11'20"	10'10"
		2	2'10"	4'27"	15'11"	12'00"	8'35"	9'12"	2'12"	2'50"	6'54"	6'57"	5'00"	28'50"	2'38"	7'40"	10'18"	4'41"	10'5"	18'10"
		3	3'45"	3"	12'52"	5'6"	7'9"	12'7"	3'55"	6'46"	3'50"	7'10"	21'50"	22'30"	4'50"	5'12"	15'9"	8'10"	9'50"	7'50"
		4	2'40"	5'6"	31'40"	5'7"	8'00"	16'24"	5'00"	8'12"	27'5"	9'00"	4'25"	12'2"	3'50"	10'1"	24'5"	3'11"	12'5"	7'20"
		5	3'45"	8'30"	10'30"	7'30"	4'45"	19'12"	4'40"	5'55"	16'25"	5'5"	21'40"	21'55"	4'5"	9'00"	16'18"	5'9"	11'48"	11'12"
		6	4'3"	7'42"	17'12"	6'12"	5'16"	15'19"	4'4"	6'46"	34'30"	8'00"	4'25"	15'00"	5'25"	7'42"	19'10"	6'00"	9'00"	20'15"
		7	2'32"	4'12"	15'20"	8'3"	15'30"	17'5"	3'23"	9'00"	25'12"				3'18"	11'5"	11'25"	3'15"	8'20"	23'4"

Širina obrabe na prosti ploskvi „VB“

Hitrost rezanja	$V_s = 25 \text{ m/min}$	1	0,96	0,67	0,75	0,72	0,77	1,10	0,53	0,43	0,93	0,63	0,59	0,40	0,59	0,58	0,67	0,74	0,83	0,73
		2	0,83	0,45	0,75	0,75	0,82	1,18	0,59	0,35	1,30	0,58	0,50	0,45	0,55	0,34	0,27	0,62	0,73	0,80
		3	0,84	0,46	0,87	0,92	0,63	0,60	0,64	0,39	0,73	0,79	0,96	0,58	0,15	0,42	0,34	0,73	0,39	0,62
		4	0,83	0,6	0,93	0,82	0,64	0,75	1,03	0,56	0,67	0,81	0,52	0,46	0,85	0,5	0,71	0,82	0,79	0,73
		5	0,7	0,62	0,61	0,73	0,76	0,71	0,57	0,60	0,67	0,75	0,62	0,48	1,43	0,71	0,52	0,92	0,99	0,75
		6	0,75	0,71	0,76	0,59	0,85	1,52	1,12	0,60	0,77	0,55	0,75	0,42	0,74	0,80	0,71	0,58	0,71	0,75
		7	0,68	0,71	0,91	0,83	0,91	0,85	0,92	0,70	0,69				0,56	0,67	0,81	0,69	0,66	0,66
Hitrost rezanja	$V_s = 21 \text{ m/min}$	1	0,56	0,68	0,95	0,87	0,65	0,44	0,55	0,64	0,53	1,55	0,44	0,33	0,50	0,71	0,47	0,62	0,77	0,40
		2	1,62	0,66	1,10	0,87	0,49	0,81	1,15	0,63	0,47	2,55	0,23	0,25	0,78	0,82	0,69	0,75	0,82	0,56
		3	0,81	0,63	0,94	0,84	0,92	0,75	0,50	0,88	0,60	0,78	1,00	0,26	0,72	0,66	0,40	0,66	0,81	0,51
		4	0,80	0,71	0,87	0,76	0,60	0,43	1,02	0,72	0,50	0,92	0,52	0,24	1,12	0,72	0,60	0,58	0,71	0,34
		5	0,70	0,80	0,91	0,82	0,47	0,58	0,63	1,57	0,90	0,89	0,81	0,28	0,50	0,66	0,70	0,77	0,85	0,76
		6	1,75	0,73	0,75	0,71	0,74	0,58	0,72	0,71	0,33	0,73	0,27	0,40	0,50	0,73	0,81	0,82	0,72	0,70
		7	0,53	0,64	0,51	0,62	0,62	0,76	0,94	0,84	0,78				0,33	0,82	0,50	0,79	0,88	0,68
Hitrost rezanja	$V_s = 28 \text{ m/min}$	1	0,62	1,03	0,73	0,64	0,68	0,73	0,82	0,73	0,75	0,57	0,57	0,74	0,63	0,66	0,86	0,82	1,12	0,83
		2	0,90	0,67	0,70	0,86	0,63	0,64	1,10	0,92	0,74	0,66	0,95	0,54	0,72	0,73	1,35	0,13	0,98	0,70
		3	0,75	0,50	0,62	0,71	0,70	0,82	0,44	0,57	0,96	0,40	0,55	0,75	0,74	0,72	0,66	0,70	0,74	0,52
		4	0,89	0,62	0,78	0,76	0,60	0,86	0,54	0,46	0,71	0,71	0,75	0,62	0,92	0,68	0,71	0,73	0,39	0,59
		5	0,81	0,71	0,69	0,66	0,94	0,83	0,70	0,83	0,57	0,78	0,80	0,65	1,25	0,88	0,71	0,81	0,81	0,82
		6	0,79	0,83	0,75	0,59	1,32	0,83	0,63	0,55	0,75	0,56	0,57	0,54	0,51	0,95	0,51	0,71	0,75	0,85
		7	0,86	0,91	0,81	0,73	0,71	0,82	0,71	0,92	0,73				0,61	0,69	0,77	0,66	0,83	0,91

Slika 17 Shema preizkušanja hitroreznega jekla BRC-3-C (Št. šarže: 12456)

Slika 17 Shema preizkušanja brzoreznega jekla BRC-3

6.1 Analiza variance za rezultate preizkušanja rezalne obstojnosti T in širine obrabe VB pri jeklu BRC-3

Vse analize obstojnosti in obrabe strugarskih nožev so bile izvršene za 3 nivoje statistične gotovosti:

- $\alpha = 10$ (90 % gotovost)
- $\alpha = 5$ (95 % gotovost)
- $\alpha = 1$ (99 % gotovost)

6.11 Čas rezalne obstojnosti T v odvisnosti od toplotne obdelave in cepilnega kota

Pri tej analizi smo ugotavljali vpliv ciklusa toplotne obdelave, cepilnega kota γ in nagibnega kota λ na obstojnost strugarskih nožev. Pri tem smo upoštevali sledeče variante toplotne obdelave:

- 1' kaljenje 1270° C + popuščenje 600° C 2 × po 1^h
- 2' kaljenje 1270° C + popuščenje 540° C 2 × po 1^h
- 3' kaljenje 1290° C + popuščenje 560° C 2 × po 1^h (pri $\lambda = 0$)
- 4' kaljenje 1310° C + popuščenje 600° C 2 × po 1^h
- 5' kaljenje 1310° C + popuščenje 540° C 2 × po 1^h

Pri vseh teh variantah toplotne obdelave je bil kot $\lambda = 0$.

Pri kaljenju 1290° C in popuščenju 560° C smo posebej primerjali dva različna nagibna kota $\lambda = 0^\circ$ in $\lambda = +4^\circ$. Za vsak cikel toplotne obdelave in za vsak nagibni kot λ so bili noži preizkušeni s koti $\gamma = 6^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\gamma = 15^\circ$ ter pri treh različnih hitrostih $v_1 = 25$ m/min., $v_2 = 21$ m/min. in $v_3 = 28$ m/min.

Čas preizkušanja je bil tudi tukaj omejen in po 60 minutah prekinjen.

Analiza variance za obstojnost je pokazala, da sta najboljši kombinaciji kaljenje 1290° C + popuščenje 560° C; $\lambda = +4^\circ$, $\gamma = 15^\circ$ in kaljenje 1310° C + popuščenje 600° C; $\lambda = 0^\circ$; $\gamma = 15^\circ$. Med obstojnostjo v teh dveh kombinacijah ni statistično pomembne razlike. Pri vseh ostalih (razen ene) kombinacijah se obstojnost od navedenih dveh pomembno razlikuje z 99 % gotovostjo. Izjema je kombinacija — kaljenje 1290° C + popuščenje 560° C; $\lambda = +4^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, ki jo zato smatramo kot tretjo najboljšo kombinacijo glede obstojnosti.

6.12 Širina obrabe

Pri primerjavi širine obrabe VB na prosti ploskvi ni statistično pomembnih razlik pri raz-

- kaljenje 1270° C + popuščenje 600° C $\lambda = 0^\circ$ $\gamma = 6^\circ$
- kaljenje 1270° C + popuščenje 600° C $\lambda = 0^\circ$ $\gamma = 15^\circ$
- kaljenje 1290° C + popuščenje 560° C $\lambda = +4^\circ$ $\gamma = 6^\circ$
- kaljenje 1310° C + popuščenje 540° C $\lambda = 0^\circ$ $\gamma = 10^\circ$

Z 99 % gotovostjo trdimo le še, da je razlika pomembna proti obstojnosti v 1 in 3 napisani kombinaciji, zato ti dve smatramo za najslabši in to dejstvo pripisujemo vplivu cepilnega kota. Vpliv različnih rezalnih hitrosti na širino obrabe ni pomemben, vsaj ne pri razlikah v hitrosti do 7 m v min. Tudi tukaj je potrebno pripomniti, da so

ličnih ciklusih toplotne obdelave in različnih cepilnih kotih.

6.13 Vpliv nagibnega kota λ

Z analizo variance za vpliv nagibnega kota pri toplotni obdelavi kaljenje 1290° C + popuščenje 560° C in treh cepilnih kotih $\gamma = 6^\circ$, 10° in 15° smo primerjali še vpliv nagibnega kota $\lambda = 0^\circ$ in $\lambda = +4^\circ$.

Rezultati kažejo, da je obstojnost pri $\lambda = +4^\circ$ (99 % gotovost) večja od obstojnosti pri $\lambda = 0^\circ$. Vpliv cepilnih kotov γ je enak kot pri že opisani analizi variance. Obstojnost se povečuje s povečevanjem cepilnega kota. Z analizo vpliva nagibnega kota smo še ugotovili, da je sprememba kota λ zelo pomembna tako kot sprememba kota γ .

Rezultati analize variance v primerjavi širine obrabe VB pri $\lambda = +4^\circ$ in $\lambda = 0^\circ$ kažejo, da sprememba nagibnega kota λ ne vpliva pomembno na širino obrabe.

Spet pa z 99 % gotovostjo lahko trdimo, da je obraba manjša pri cepilnem kotu $\gamma = 15^\circ$ kot pri cepilnem kotu $\gamma = 6^\circ$. Z 90 % gotovostjo tudi lahko trdimo, da je obraba pri cepilnem kotu $\gamma = 10^\circ$ manjša kot pri $\gamma = 6^\circ$.

6.14 Vpliv rezalne hitrosti

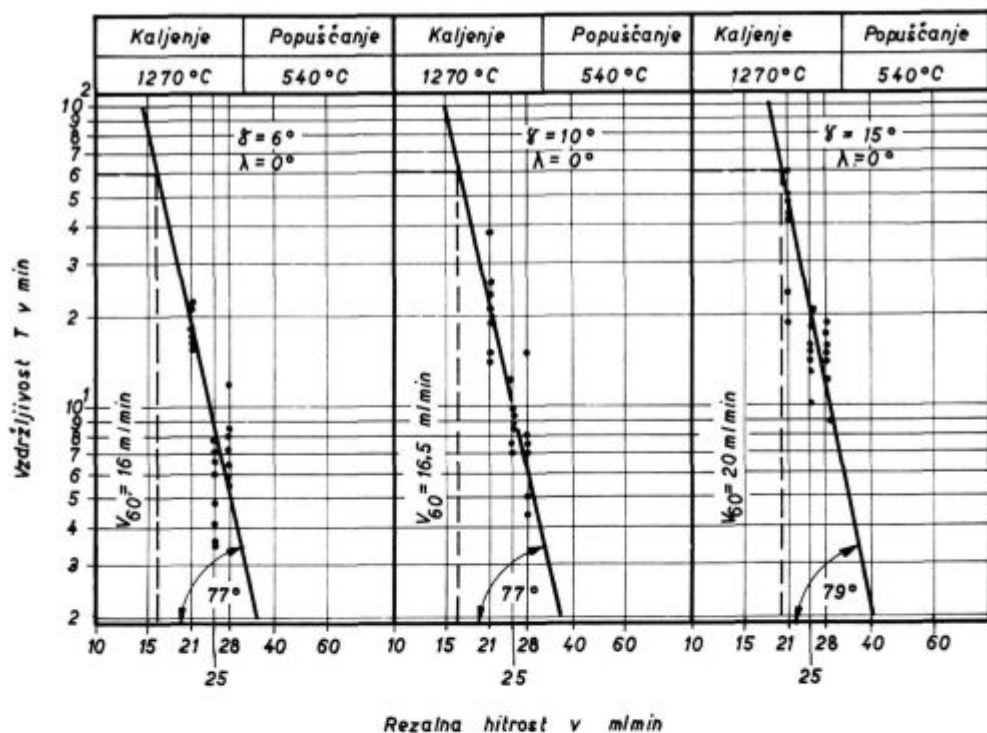
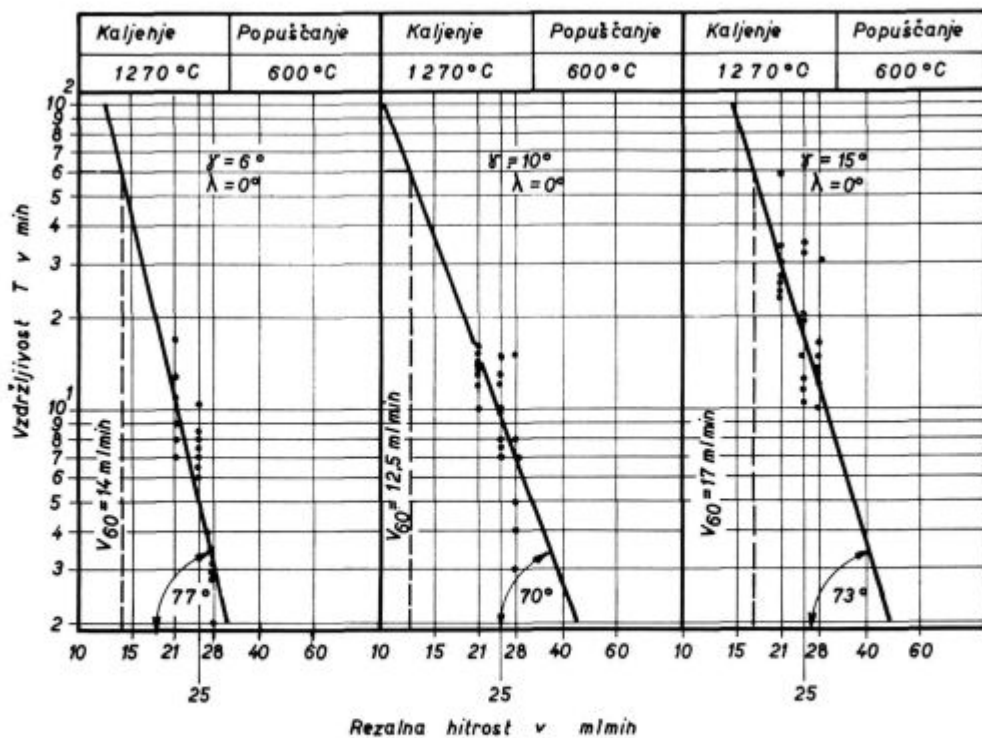
Preizkušali smo tudi vpliv rezalne hitrosti na obstojnost strugarskih nožev. Vzeli smo za preizkus tri različne rezalne hitrosti, $v_1 = 25$ m/min., $v_2 = 21$ m/min., $v_3 = 28$ m/min.

Rezultati analize variance kažejo, da z 99 % gotovostjo lahko trdimo, da se obstojnosti pri treh rezalnih hitrostih pomembno razlikujejo. Največja je obstojnost pri najmanjši rezalni hitrosti, kar je popolnoma razumljivo. Važnejši je zaključek, da že sprememba hitrosti za 3 oz 4 m/min. pomembno vpliva na obstojnost noža. V tej analizi variance smo na enak način kot čase obstojnosti T primerjali tudi širino obrabe VB. Izkazalo se je, da je obraba najmanjša pri kombinaciji toplotnega ciklusa: kaljenje 1290° C + popuščenje 560° C s koti $\lambda = +4^\circ$ in $\gamma = 15^\circ$, kjer je bila tudi največja obstojnost.

Z 90 % gotovostjo lahko trdimo, da je obraba pri tej kombinaciji pomembno manjša le od obrabe pri kombinacijah:

bili poizkusi po 60 minutah prekinjeni, zato obstaja možnost, da bi bili rezultati delno spremenjeni, če bi se poizkusi nadaljevali.

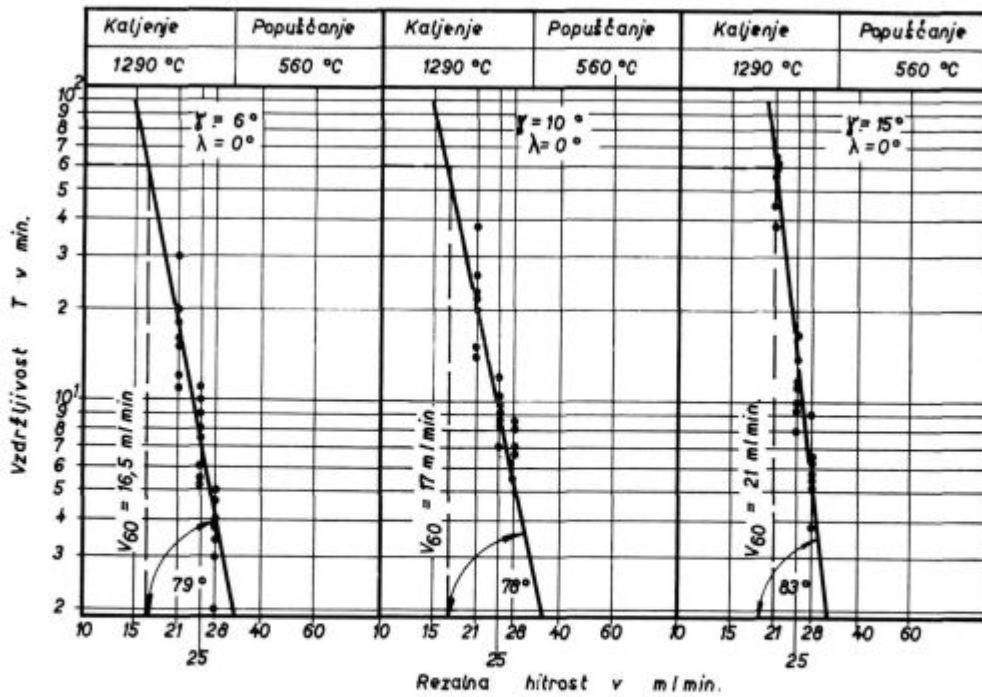
Za grafičen prikaz izvršenih preizkusov in za določitev v_{60} smo v dvojno logaritmično koordinatno mrežo T-v diagrama vnesli vse rezultate obstojnosti (slike 18—23).



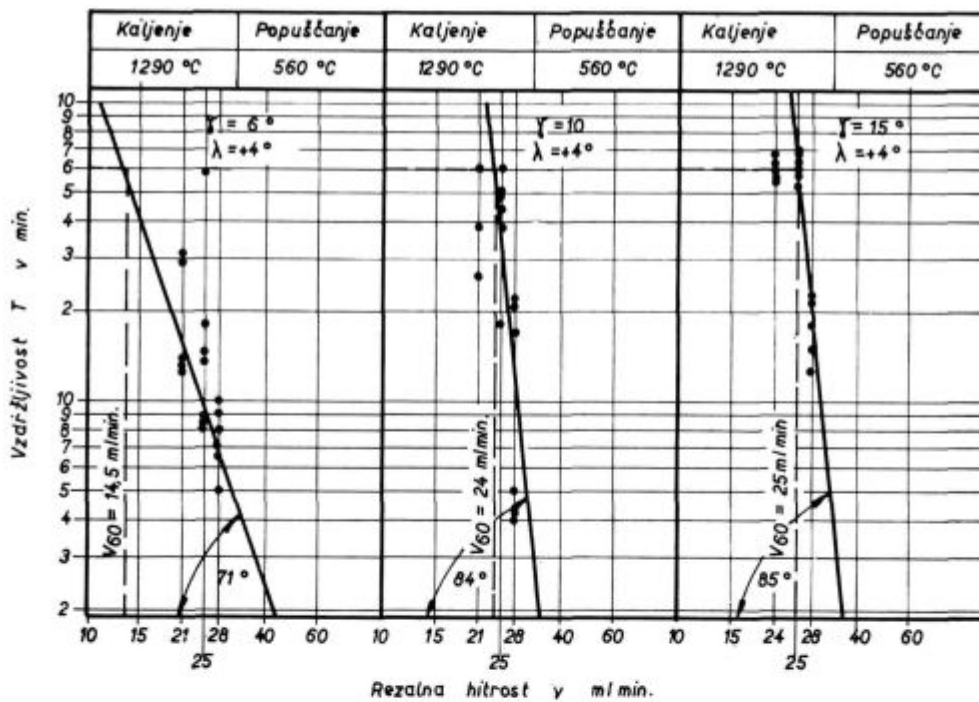
Iz vseh premic v T-v diagramu oziroma določenih v_{60} se vidi, da je največja $v_{60} = 25$ m/min. pri kalilni temperaturi 1290°C, popuščni temperaturi 560°C, nagibnemu kotu $\lambda = +4^\circ$ in cepilnemu kotu $\gamma = 15^\circ$. Grafičen prikaz rezultatov se popolnoma ujema s statističnim vrednotenjem, kar samo povečuje zanesljivost zaključkov.

6.15 Preizkus obrabne obstojnosti za brzorezno jeklo BRC-3

Na sliki 24 je v linearni mreži VB-T' diagrama narisana karakteristična krivulja obrabe za tri različne hitrosti $v_1 = 25$ m/min., $v_2 = 28$ m/min. in $v_3 = 30$ m/min. Do nenormalnega trošenja rezultatov je prišlo pri rezalni hitrosti $v_3 = 30$ m/min.



Slika 20



Slika 21

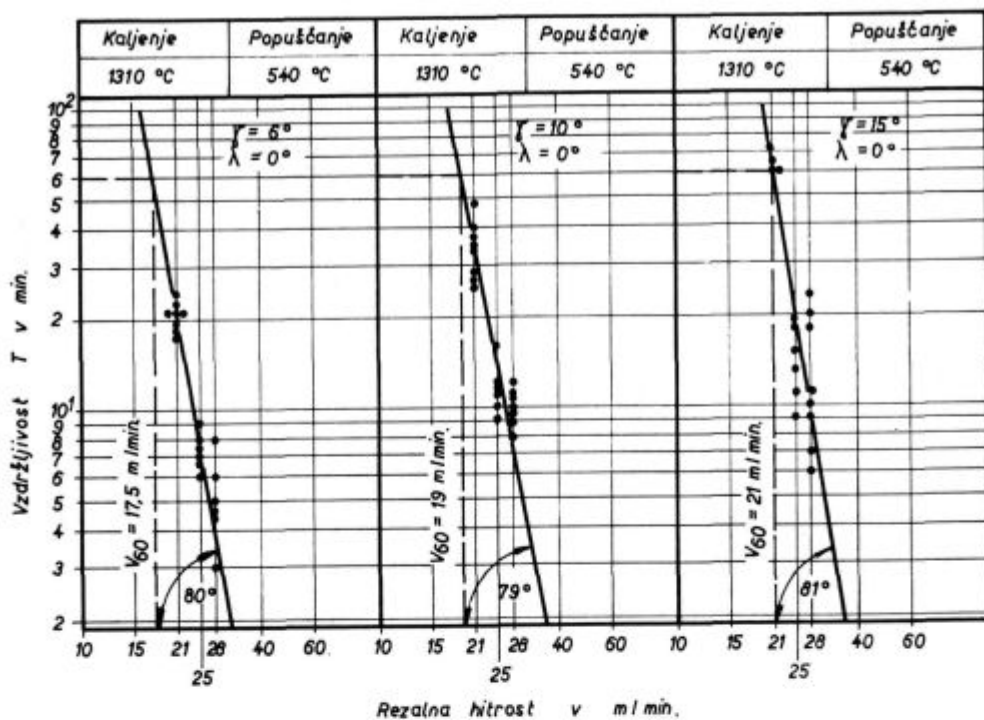
Temu je verjetno vzrok prevelika rezalna hitrost.

Za določitev $v_{60,0.4}$ je potrebno rezultate preizkusa vnesti v dvojno logaritmično koordinatno mrežo v - T diagrama (slika 25). Tako dobimo hitrost 20 m/min.

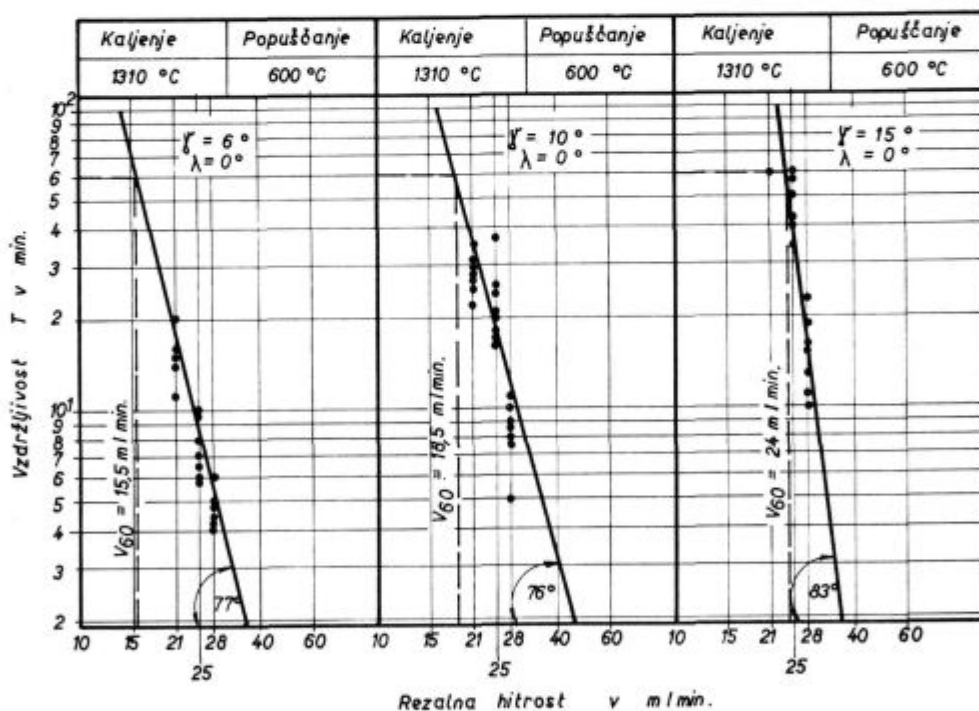
6.16 Nekaj dodatnih preizkusov

Za nazoren prikaz vpliva cepilnega kota γ smo z dodatnimi poizkusi ugotovili odvisnost obstoj-

nosti od cepilnega kota γ , ki ga prikazuje slika 26. S spremembo geometrije bi lahko zelo povečali obstojnost strugarskih nožev in drugih orodij. Pri spremembi geometrije je mišljena najprimernejša geometrija rezalnega roba in oblika lomilca ostružkov, ki je obvezen pri večjih cepilnih kotih. Raziskave naj bi šle v prihodnje nekoliko bolj v to smer. Z brušenjem nožev na »fazo« se bodo verjetno dosegale še večje obstojnosti kot pri bru-



Slika 22



Slika 23

Slika 18, 19, 20, 21, 22, 23

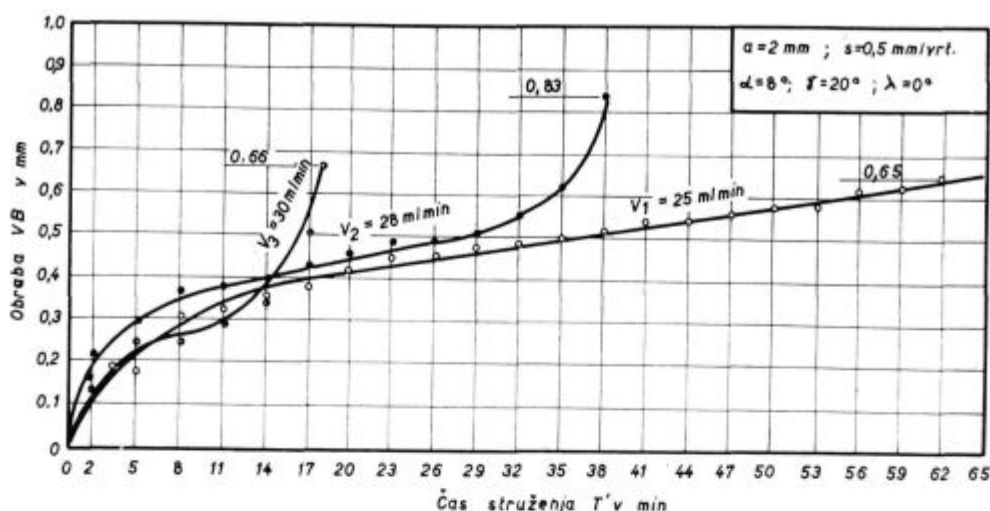
Vpliv cepilnega kota γ na vzdržljivost strgarskih nožev BRC-3 pri dani toplotni obdelavi

šenju brzoreznic strgarskih nožev v geometrijo, ki jo danes normalno predpisujejo. Opravljeni preizkusi so torej zadostili nekaterim neznankam, še več pa jih je ostalo nenakazanih. Te bo še treba s preizkusi rešiti, če hočemo, da bodo rezalna orodja popolnoma izkoriščena.

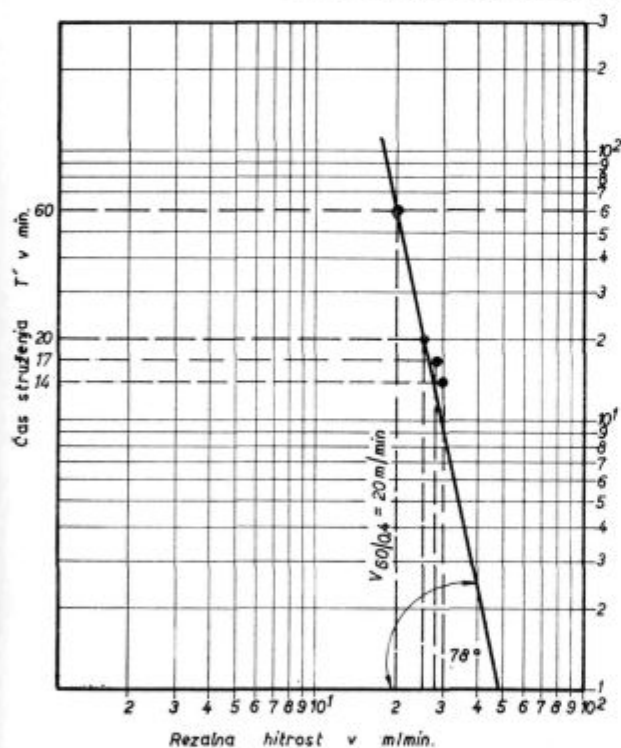
6.2 Zaključki preizkušanja BRC-3 jekla

Če zberemo v grobem rezultate analiz variance za BRC-3 in upoštevamo območje preizkušanja, ugotovimo:

- Najboljši je ciklus toplotne obdelave kaljenje 1290° C + popuščanje 560° C

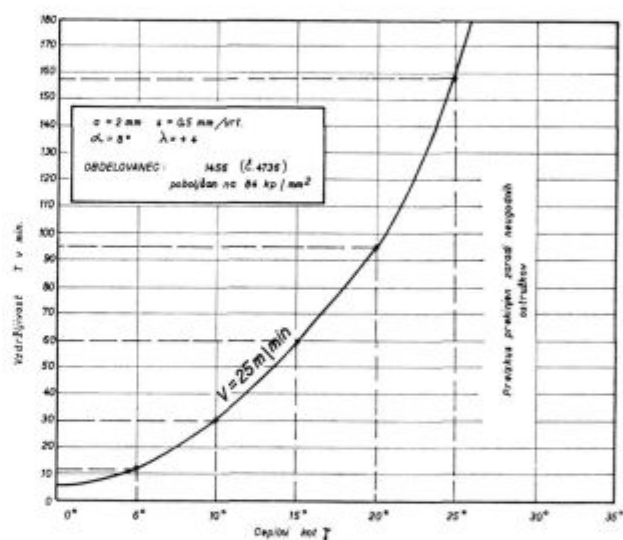


Slika 24
Odpisnost obrabe proste ploskve od časa struženja za jeklo BRC-3



Slika 25
Določitev $v_{60/0,4}$ za RRC-3; $v_{60/0,4} = 20 \text{ m/min.}$, $\sigma = 78^\circ$, $m = 0,2$

- Nagibni kot $\lambda = +4^\circ$ je boljši (povprečno povečanje obstojnosti za 35 %) od nagibnega kota $\lambda = 0$.
- Najboljši je največji cepilni kot $\gamma = 15^\circ$.
- Pri manjši rezalni hitrosti je obstojnost večja.
- Pri nižjih kalilnih temperaturah daje boljše rezultate nižje popuščanje, pri višjih kalilnih temperaturah pa višje popuščanje. Ta pojav je tudi iz metalurškega vidika popolnoma logičen.



Slika 26
Vpliv cepilnega kota γ na vzdržljivost strugarskih nožev BRC-3 pri konstantni rezalni hitrosti $v = 20 \text{ m/min}$

- Vpliv kalilnih temperatur na obstojnost nožev je pomemben le pri večjih cepilnih kotih.

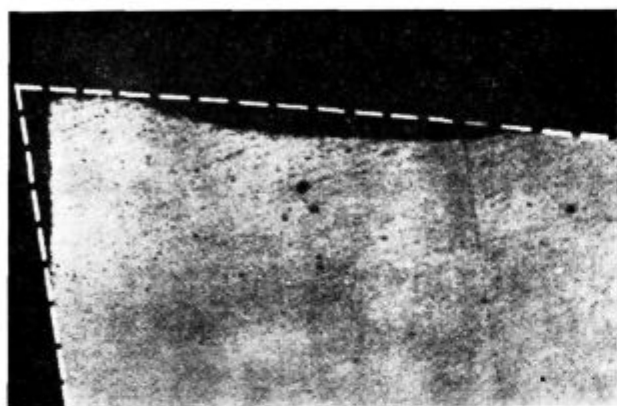
Nujno je, da se v prihodnjih preizkusih posveti nagibnemu kotu λ več pozornosti. Preizkusi bi se morali izvesti vsaj še za dva večja nagibna kota $\lambda = 8^\circ$ in $\lambda = +12^\circ$.

7. OBRABA STRUGARSKIH NOŽEV IZ BRZO-REZNIH JEKEL ELLOMAX in BRC-3

Obraba orodja določa (če se rezalni rob ne zlomi) trajanje ostrine na rezalnem robu ali obstojnost T med dvema brušenjema noža. Vzroki za neuporabnost orodja so zelo različni. Obrabljene nože je treba zamenjati ali na novo nabrusiti iz naslednjih vzrokov.

- Obrabljeni nož lahko moti proces dela ali škoduje funkciji obdelovalnega stroja.
- Nož izgubi rezalno sposobnost.
- Obraba na rezalnem robu je tolikšna, da lahko pričakujemo uničenje noža.
- Zaradi obrabe noža ni mogoče obdelovati obdelovanca v mejah dopustnih odstopkov.
- Kvaliteta površine obdelovanca ne ustreza zahtevam.

Od vseh naštetih vzrokov smo v preizkusih jemali za kritični faktor izgubo rezalne sposobnosti. Obraba je bila najobčutnejša na tistih mestih noža, ki so v neposrednem dotiku z obdelovancem oziroma odtekajočimi odrezki. To je obraba na prosti ploskvi in obraba na cepilni ploskvi. Najpogostejši primer je bilo istočasno obrabljanje na prosti in cepilni ploskvi, vendar je bila v večini primerov obraba na cepilni ploskvi vzrok za lom konice noža (slika 27). Vzrok obrabe proste plos-



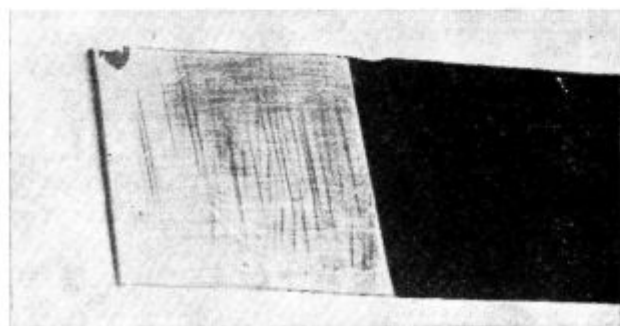
Slika 27

Tipičen primer obrabe strgarskih nožev iz brzoreznih jekel

kve je v trenju med prosto ploskvijo in obdelovancem. Obraba cepilne ploskve pa se pripisuje trenju med cepilno ploskvijo in ostružki.

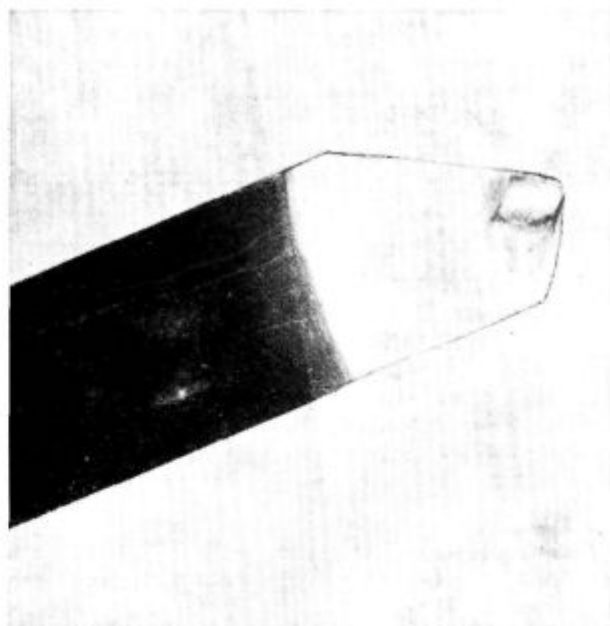
Najpogostejši vzroki otopitve orodja so bili:

- plastična deformacija orodja zaradi temperaturnih vplivov;
- izkrhanost, ki je posledica vplivov utripajoče sile odrezka in nihanj, ki prekoračijo nihanje upogibno trdnost orodja;



Slika 28

Obraba proste ploskve



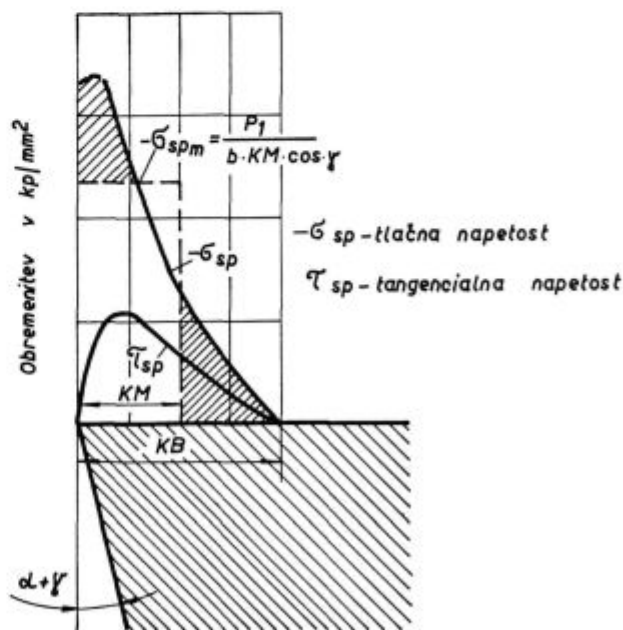
Slika 29

Obraba cepilne ploskve

- izguba snovi v obliki mikroskopsko majhnih delcev, ki odhajajo deloma z odrezki, deloma pa ostanejo privarjeni na površini obdelovanca.

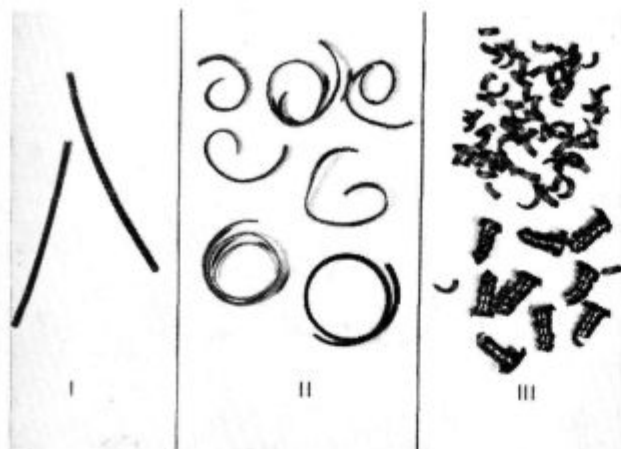
Sliki 28 in 29 prikazujeta obrabo proste in cepilne ploskve. Iz slike 29 vidimo, da rob izdolbine na cepilni ploskvi ne sovпада z rezalnim robom, ampak je odmaknjen od rezalnega roba za ca 0,3 mm. Omenjeni pojav bo potrebno za brzorezna jekla še podrobneje raziskati.

Vzrok za nastanek sorazmerno široke »faze« pri strgarskih nožih iz jekla elomax in BRC-3 je



Slika 30

Diagram obremenitve strgarskega noža (po Kottwinkel Stahl Eisen 1958 sl. 1685)



Slika 31
Karakteristične oblike ostružkov od začetka rezanja do zatoptitve noža

verjetno utrditev rezalnega roba zaradi velikih pritiskov, ki se pojavijo med rezanjem. Na sliki 30 so prikazane obremenitve strgarskega noža med delom. Veliki pritiski imajo podoben učinek kot hladno kovanje, za katerega vemo, da izboljšuje mehanske lastnosti predmeta. Bistvenih razlik v globini izdolbine pri različnih cepilnih in nagibnih kotih ni bilo opaziti, vendar se je opazila tendenca, da večji cepilni koti zmanjšujejo KT (slika 8) in povečujejo KB. Ta pojav si lahko razlagamo tako, da veliki cepilni in nagibni koti zmanjšujejo koeficient trenja med odrezkom in cepilno ploskvijo. Manjše trenje ima za posledico manjše razvijanje toplote, ta pa manjšo plastično deformacijo cepilne ploskve in zato manjše odnašanje delcev cepilne ploskve.

Zelo velike razlike so nastopile v obliki ostružkov pri vseh preizkušanih nožih. Takoj na začetku struženja so bili ostružki ravni (oblika I na sli-

ki 31) in globine izdolbine KT so se dolgi ostružki spremenili v lepo tekoče spiralske ostružke (oblika II. na sl. 31). Proti koncu preizkusa, tik pred popolno otopelostjo, ko površina izdolbine ni več gladka in je cepilna ploskev na torni površini že žarela v temnordečem žaru, so se ostružki zelo na drobno lomili (oblika III. na sliki 31).

Pri dosedanjih raziskavah smo analizirali le rezultate meritev na prosti ploskvi. V prihodnje bo treba analizirati tudi obrabo na cepilni ploskvi in vpliv poteka obrabe na porušitev rezalnega roba.

Metodično zasledovanje obrabe na cepilni ploskvi noža je bilo nemogoče, ker nimamo primernega merilnega instrumenta za merjenje izdolbenja na cepilni ploskvi.

Smoter prihodnjih preizkusov naj bi bil, da dobimo kompleksen kriterij za obrabo orodij in obdelovalnosti jekel.

Literatura

1. J. Rodič: Matematična statistika, Metode 1 in 2; Izdaja, Metalbiro, Zagreb 1964.
2. J. Rodič: Matematična statistika, Upute 1, 2 in 3; Izdaja, Metalbiro, Zagreb 1964.
3. J. Rodič: Alatni čelici; Izdaja, Metalbiro, Zagreb 1963.
4. P. Puhar: Tehnologija odrezavanja I. del; Strojniški vestnik, Ljubljana 1964.
5. T. Pratnekar: Diplomsko delo; Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1965.
6. M. Kronenberger: Grundzüge der Zerspanungslehre I. del; Springer — Verlag Berlin 1954.
7. E. Siehel: Handbuch der Zerspanungslehre I. del; Springer — Verlag Berlin 1955.
8. DIN-Normen: Stahl — Eisen Prüfblätter; Beuth — Vertrieb GMBH Berlin 30, 1952.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen der Beständigkeit von Drehmessern aus Schnellschneidestählen wurden für die Stähle Elomax und BRC-3 durchgeführt.

Der Zweck der Untersuchungen war die Bestimmung der optimalen Wärmebehandlung, das bedeutet die Bestimmung der Härtungs- und Anlasstemperatur der günstigsten Geometrie der Schneidekanten. Bei der Untersuchung der günstigsten Geometrie der Schneidekante haben wir die verschiedenen Spaltwinkel, beim Stahl BRC-3 aber auch noch die verschiedenen Neigungswinkel untersucht.

Die Betonung der Untersuchungen der Schnelldrehstähle lag nicht nur auf der Feststellung der günstigsten Geometrie der Messer und der optimalen Wärmebehandlung, sondern auch auf der statistischen Wertung der gewonnenen Resultate. Zu diesem Zwecke war es notwendig, die Resultate angemessen zu sammeln.

Für beide Sorten der Schnelldrehstähle ist charakteristisch, dass die Wärmebehandlung im Bereich der Unter-

suchungen nicht wesentlich auf die Beständigkeit der Messer einwirkt. Man kann daraus nur schliessen, dass höhere Härtetemperaturen auch höhere Anlasstemperaturen erfordern. Diese Feststellung ist auch vom metallurgischen Standpunkt aus bewiesen.

Wesentliche Unterschiede in der Messerbeständigkeit zeigen sich bei verschiedenen Spaltwinkeln. Für beide Sorten von Schnellschneidestählen Elomax und BRC-3 gilt es, dass eine Vergrößerung des Spaltwinkels die Beständigkeit vergrößert. Eben so hat der Neigungswinkel eine wesentliche Einwirkung auf die Schneidebeständigkeit, da die Änderung des Neigungswinkels von 0° auf +4° die Messerbeständigkeit um 35 % erhöhte.

Aus den durchgeführten Untersuchungen ist es ersichtlich, dass die richtige Auswahl des Spaltwinkels wichtig ist. In den zukünftigen Untersuchungen wäre es aber notwendig, mehr Aufmerksamkeit dem Neigungswinkel zu widmen.

SUMMARY

Cutting characteristics of Elomax and BRC-3 high speed steel were tested.

The tests were made in order to find out the optimal conditions for heat treatment and the optimal geometry of cutting edge. Experiments were conducted under different back rake angle and also by different side cutting edge angle when testing BRC-3 steel.

The results obtained were evaluated by the methods of statistical analysis.

Various conditions of heat treatment did not influence essentially the duration of cutting tools. When higher tem-

peratures of quenching were used also higher tempering temperatures were required.

Basic differences in their duration were experienced with different back rake angles. Bigger back rake angle increased the duration of Elomax and BRC-3 high speed steel. Side cutting edge has also significant influence on the cutting performance. The change of side cutting edge angle from 0 to +4° causes an increase of duration for 35%.

From the point of experimental facts it is clear that the best choice of back rake angle is of extreme importance. In further study of their duration more attention will be paid to the influence of side cutting edge angle.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания стойкости токарных ножей из быстрорежущей стали были выполнены на сталях марок Elomax и BRC-3. Цель испытания определить оптимальную температурную обработку т. е. определить температуры закалки и отпуска а также самую подходящую геометрию режущей кромки. При этом испытанию изменяли угол резания а при стали марки BRC-3 также угол наклона. Основной мотив испытания была статистическая обработка и оценка полученных результатов. Поэтому было необходимо полученные результаты целесообразно собрать.

Для обеих марок стали достопримечательно, что температурная обработка в интервале испытания не влияла значительно на прочность ножей. Можно вывести заключение, что более высо-

кая температура закалки требует повышение температуры отпуска. Это определение доказано также со стороны металлургической точки зрения. Существенная разница стойкости ножей появляется в случае различных углов резания. Для обеих марок быстрорежущей стали Elomax и BRC-3 следует правило, что с увеличением угла резания увеличивается устойчивость. Также угол наклона имеет значительное влияние на стойкость, напр. изменением угла наклона с 0° на +4° увеличилась стойкость ножей за 35%.

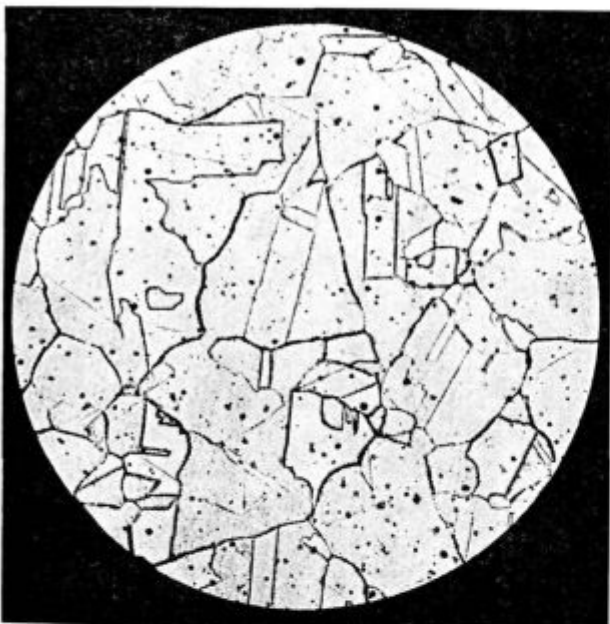
На основании выполненных испытаний можно заключить что важную роль играет правильный выбор угла резания. В следующих испытаниях надо посвятить больше внимания углу наклона.

Domači uporabni materiali za visoke temperature

Elektrouporovni materiali na osnovi Cr-Ni ter Cr-Al zlitin imajo široko območje uporabe v industriji ter ostali potrošnji. Domača predstavnik teh zlitin — proizvoda Železarne Ravne — Ravnin in Ravnal pokrivata celotno področje uporabe do najvišjih temperatur. Pri vgradnji in eksploataciji teh materialov je treba veliko pazljivosti kakor tudi kompleksno poznavanje celotne elektrotplotne problematike. Le pri izpolnitvi cele vrste zahtev lahko pričakujemo optimalno življenjsko dobo grelnih elementov.

SPLOŠNO

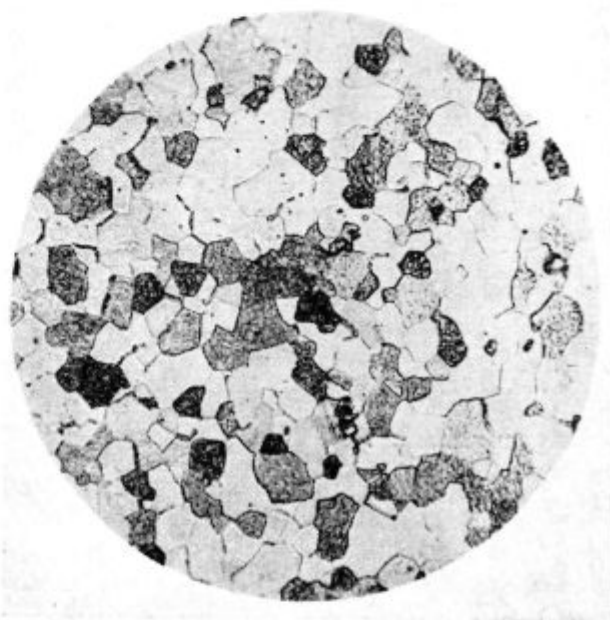
Ze v tridesetih letih — kmalu po prvi svetovni vojni — so se uporabni materiali za visoke temperature na bazi CrNi tako izpopolnili, da so postali splošno uporabni tako v Evropi kot v Ameriki.



Mikrostruktura Ravnin-a

Dobre lastnosti Cr-Ni zlitin so v tem, da se dajo lahko oblikovati ter nimajo v vsem temperaturnem območju uporabe nobenih kristalnih premen. Struktura je avstenitna. Zlitina ni krhka, določeno krhkost povzroča v Cr-Ni uporabnih materialih prevelik odstotek Si. Odpornost proti ognju je zelo dobra, saj je natezna trdnost še pri 1000°C

precejšnja in mnogo višja kot pri ostalih uporabnih materialih. Obstojnost Cr-Ni materialov na visokih temperaturah je zasnovana na zaščitni plasti kromovih in kobaltovih oksidov, s katerimi se material obda ob prvem segrevanju in ki so temperaturno zelo odporni. Specifična ohmska upornost



Mikrostruktura Ravnala

omenjenih zlitin se giblje okrog 1 [ohm mm²/m], vendar je precej odvisna od temperature; specifična upornost se pri 1000°C poveča celo za več kot 25%.

Predstavniki te skupine uporabnih materialov za visoke temperature so materiali z označbo RAVNIN. Ti obsegajo štiri vrste materialov, odvisno od velikosti in medsebojnega razmerja legur Cr in Ni. Tipičen in najbolj uporabljan je RAVNIN 2, za katerega je v nadaljnjem tekstu prikazanih več lastnosti in navodil za uporabo.

Druga skupina uporabnih materialov za visoke temperature — skupina RAVNAL-ov — so zlitine Cr-Al. To je feritni uporabni material, kakršnega je v prvotni obliki l. 1926 patentiral H. Kantzow in kakršnega je pet let kasneje začel proizvajati švedski Kanthal iz Hallstahammarja. Ta skupina omogoča uporabo grelnega uporabnega materiala do temperature ca. 1300°C. RAVNAL-i so za 15%

lažji od Cr-Ni zlitin RAVNIN-a, specifična ohmska upornost (1,35—1,40 ohma mm²/m) pa je za 20 do 35 % večja. Za svojo visoko temperaturno obstojnost se imajo RAVNAL-i zahvaliti površinski oksidacijski plasti iz pretežno Al₂O₃, ki štiti notranjost grelnega elementa pred nadaljnjim razkrojem. Trdnost RAVNAL-ov pri visokih temperaturah je manjša kot pri Cr-Ni zlitinah, zato jim pri navi-

janju v grelni element dajemo ustrezno manjši premer spirale kot npr. pri RAVNIN-u.

Slaba stran Cr-Al zlitin je v njih krhkosti in slabi zmožnosti deformacij, kar je posledica povečanja kristalov po večkratnem segrevanju in ohlajanju. S posebnimi tehnološkimi merami ali pa z dodajanjem karbidov in oksidov lahko do določene meje zmanjšamo njih nagnjenost h krhkosti.

Primerjalna tabela

Označba ZR	JUS	Werkstoff No	DIN	Kanthal
RAVNIN 2	Č. 4561	Nr 1.4860	NiCr 30/20	Nikrotal 40
RAVNAL 1	Č. 4905	Nr 1.4905	CrAl 20/5	Kanthal DS
RAVNAL 2	Č. 4961	Nr 1.4774	CrAl 30/5	Kanthal A

Tabela 1: Povprečna analiza

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Ti	P + S max.
RAVNIN 2	0,20	1,80	1,20	21,0	30,0	—	—	0,055
RAVNAL 1	0,06	0,70	0,35	22,8	—	4,5	0,8	0,030
RAVNAL 2	0,06	0,70	0,35	22,8	—	5,5	0,8	0,030

Tabela 2: Fizikalne lastnosti

Lastnosti	Enota	RAVNIN 2	RAVNAL 1	RAVNAL 2
Maksimalna temperatura grelnega elementa	deg C	1100	1150	1250
Specifična ohmska upornost pri 20° C	Ω mm ² /m	1,04 ± 0,05	1,35 ± 0,05	1,40 ± 0,05
Specifična masa	kg/dm ³	7,9	7,3	7,2
Specifična toplota	J/deg kg	575	630	630
Toplotna prevodnost	W/m deg	13,0	13,0	13,0
Emisijski količnik žarčenja		*0,80—0,95	*0,80—0,95	*0,80—0,95
Temperatura taljenja	deg C	1370	1505	1505
Natezna trdnost pri 20° C	kp/mm ²	60—70	65—75	65—75
Meja plastičnosti	kp/mm ²	30—40	50—55	50—55
Razteg	%	40—45	28—33	28—33
Kontrakcija	%	70—75	64—69	64—69
Trdota HB		130—150	200—260	200—260
Magnetne lastnosti		nemagnetno	magnetno	magnetno
Struktura		avstenit	ferit	ferit
Obdelava in deformacija		dobra	slabša	slabša

* Pri temperaturah 400—1000° C; raste s temperaturo

Tabela 3: Natezna trdnost v toplem [kp/mm²]

[deg C]	600	700	800	900	1000	1100	1200	1250
RAVNIN 2	9,50	4,50	2,00	0,85	0,40	0,15	—	—
RAVNAL 1	4,00	1,50	0,60	0,25	0,10	0,03	0,01	—
RAVNAL 2	4,00	1,50	0,60	0,25	0,10	0,03	0,01	0,006

Tabela 4: Linearni koeficient raztezka [$10^{-6} \text{ deg}^{-1} \text{ C}$]

[deg C]	0—100	0—300	0—500	0—700	0—900	0—1100	0—1200
RAVNIN 2	16,5	17,1	17,7	18,3	19,1	19,9	—
RAVNAL 1	13,4	14,2	14,9	15,8	16,7	17,8	18,9
RAVNAL 2	13,4	14,2	14,9	15,8	16,7	17,8	18,9

Tabela 5: Temperaturni faktorji F_t ohmskih upornosti

F_t	[deg C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
RAVNIN 2		1,029	1,067	1,096	1,125	1,154	1,173	1,192	1,212	1,231	1,251	1,270
RAVNAL 1		1,005	1,008	1,013	1,020	1,032	1,046	1,056	1,062	1,067	1,070	1,073
RAVNAL 2		1,002	1,006	1,011	1,017	1,027	1,036	1,042	1,048	1,052	1,055	1,057

PROIZVODNI PROGRAM

Današnji proizvodni program Železarne Ravne za uporabne grelnne materiale obsega materiale na osnovi Cr-Ni — RAVNIN-e ter materiale na osnovi Cr-Al — RAVNAL-e. Tehnologija zajema pridobivanje zgornjih zlitin ter njih kompletno plastično predelavo do končnih proizvodov — vlečene žice. Zelo komplicirana tehnologija se prične pri taljenju zlitine v visoko frekvenčnih pečeh ter se nadaljuje preko litja taline v ingote, njihovega kovanja pod strogo določenimi pogoji do toplega valjanja ter hladnega vlečenja z medfazno termično in mehansko obdelavo. Opravljajo se številne kontrole proizvodnega procesa z namenom, da bi dosegli čimmanjše razsipanje kvalitete končnega izdelka.

Proizvajamo vlečeno grelnno žico od maksimalnega premera \varnothing 6 mm do najdrobnejših debelin. Danes se praktično povsod po svetu uporabne žice proizvajajo v dimenzijah, ki sledijo aritmetični vrsti; tak je tudi naš program. Diferenca aritmetične vrste je spremenljiva: pri velikih premerih je velika, pri majhnih pa majhna, npr.: 5,00 do 4,75 — 4,50 ... 2,60 — 2,50 — 2,40 ... 0,65 — 0,60 do 0,55 itd.

Tolerance vlečene žice so v skladu s H 11.

PODROČJE UPORABE

Proizvodni program uporabne žice za visoke temperature, kot je prikazan v zgornjih tabelah v kvalitetah RAVNIN in RAVNAL, pokriva potrebe celotne elektro toplote, ki zajema prtevorbo električne energije v toplotno na osnovi uporabnih greln do temperatur 1000—1250° C. Najširša področja uporabe RAVNIN-ov in RAVNAL-ov so predvsem:

- v kovinski industriji,
- v keramični industriji,
- v industriji stekla
- ter v industriji gospodinjskih aparatov.

Naprave, v katere so vgrajena uporabna grelna iz materialov Železarne Ravne, so:

kalilne, žarilne, popustne peči vseh konstrukcij, ogrevne peči za trdne, tekoče in plinaste medije,

grelnne in kuhalne plošče, likalniki, potopni grelci itd.

ter močnostni upori v elektrotehniki.

Ob upoštevanju navodil o uporabi nadomestujejo RAVNIN-i in RAVNAL-i — proizvodi Železarne Ravne — v celoti prej uvožene grelnne materiale, ki smo jih poznali pod imeni, kot npr.: cekas I, cekas II, kanthal DSD, kanthal DST, fekral, kromal, smit 10, RCA, megapyr, kanthal A itd.

IZDELAVA GRELNIH ELEMENTOV

Osnovna oblika grelnnega elementa iz uporabne žice je spirala. Taka oblika grelna se je rodila iz težnje, da se zmanjša velikost in skoncentrira toplotna moč v manjši prostor. Kako ta oblika grelna vpliva na lastnosti naprave in na življenjsko dobo grelnnega materiala samega, je razvidno iz sledečih poglavij. Tu si bomo ogledali, kako se spirala izdelava in na kaj je potrebno pri tem paziti.

Spirale običajno navijamo v hladnem, le v izrednih primerih navijamo spirale iz RAVNAL-a pri temperaturi 100—200° C, npr. pri zelo majhnem razmerju med premerom spirale in debelino žice (razmerje 3). Pri navijanju spiral ločimo dva osnovna načina navijanja: navijanje spiral iz žice premera pod 1 mm ter navijanje spiral iz žice premera nad 1 mm.

a) Navijanje spirale iz žice debeline pod 1 mm

Take spirale navijamo strojno na posebnih navijalnih strojih-avtomatih, ki samodejno izdelujejo kompletne spirale. Stroj navija spiralo ovoj do ovoja, zato jo je potrebno pred uporabo raztegniti na zahtevano dolžino. Kakor je razvidno iz posebnega odstavka o geometriji spirale — grelnnega elementa, je priporočljiv tak razmak med ovoji, ki je enak enkratni do dvakratni debelini žice, zato je potrebno spiralo navito ovoj do ovoja, raztegniti za enkratno do dvakratno dolžino. Hlad-

no spiralo raztegnemo samo toliko, da se sosednji ovoji ne dotikajo, nato jo segrejemo običajno tako, da jo priključimo na izvor napetosti. Tako segreto spiralo (temperatura naj bo nižja od 1000° C, šele raztegnemo na končno dolžino. Tak način izdelave spirale ima več prednosti: spirali lahko damo točno dolžino, ker se več ne skrči, kar bi se zgodilo, če bi jo raztegnili hladno. Ovoji spirale se pri toplem postopku enakomerno razporedijo po celi dolžini, kar je zelo važno za vzdržljivost naprave. Pri neenakomerni razporeditvi ovojev dobimo lokalna povišanja temperature, kar ima za posledico skorajšnje pregorete žice na teh mestih. Tretja ugodna prednost toplega raztegovanja spirale pa je v tem, da lahko spirala, ki se segreva v čistem zraku, lepo oksidira po površini žice, kar je tudi važno za njeno dolgo življenjsko dobo. Pri opisanem segrevanju spirale je potrebno paziti na varnost dela. Podloga, na kateri raztegujemo, mora biti neprevodna za električni tok.

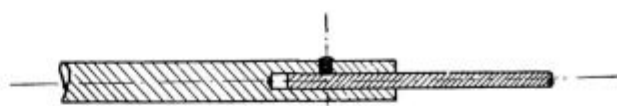
b) Navijanje spirale iz žice debeline nad 1 mm

Spirale iz večjih debelin grelne žice imajo kljub okvirnim zahtevam po določeni geometriji (ki so podane v poglavju o življenjski dobi grelne žice) tako raznolike parametre, da se jih ne izplača serijsko izdelovati tako kot spirale manjših dimenzij (za gospodinjke aparate itd.). Materialna vrednost takih spiral je tudi mnogo večja in njihova funkcija toliko pomembnejša, zato zahteva njihova izdelava vso skrbnost in natančnost. Navijamo jih na običajnih stružnicah na trn, ki je vpet med glavo delovnega vretena in med konus konjička. Navijamo lahko ovoj do ovoja ali pa že z zahtevano strmino ovoja. Ker so spirale teh dimenzij izdelane za velike moči (tudi več deset kW, bi bilo njih raztegovanje v toplem zelo nerodno in problematično. Zato izkoristimo lepo možnost stružnice, ki nam omogoča s pomočjo supporta navijanje s podajanjem, torej navijanje z zahtevano strmino navoja. Tako lahko navijamo vse dimenzije spiral poljubnih dolžin, saj ima stružnica običajno delovno vreteno votlo in skozenj potisnemo vsako navito dolžino spirale v posebno korito, ker lahko spirala lepo rotira. Paziti je treba, da navijamo z enakomerno zatezalno silo, kar dosežemo z lesenim vodilom, ki ga vpnemo v support stružnice. Grelna žica se ne sme nikjer drgniti po kovinskih delih, da ne bi nastale odrgnine in risi na njeni površini. Čeljusti vpenjalne glave zato podložimo s trdim lesom, da se ne poškoduje že navita spirala.

Priključni konci grelnih spiral

Priključki grelnih spiral se izvedejo ojačano, da se zmanjša temperatura spojnega mesta med spiralo in električnim vodnikom. Priključek naj ima približno trikratni presek žice, iz katere je spirala. Pri drobnih premerih žice izvedemo tak priključek preprosto tako, da na koncu spirale dvojno ali trojno žico zavijemo v čvrst vodnik.

Paličast priključek take spirale je izveden tako, da je palica, ki ima vrezan navoj, uvita v spiralo kot vijak in privarjena po ovogh na spiralo.



Spirale z večjimi premeri grelne žice imajo samo paličaste priključke. Na enem kraju ima palica izvrtino vzdolž osi, v katero se vstavi konec spirale. Pod stiskalnico ali v primežu se votli del palice tako deformira, da čvrsto drži vstavljen konec spirale. Skozi bočno izvrtino se nato oba spojna komada zavarita. Spojni komadi naj bodo praviloma iz istega materiala, kot je grelna žica, lahko pa so tudi iz specialnih konstrukcijskih jekel, kot npr.: prokron 10, prokron 19, prokron 20, vendar le tam, kjer priključki niso izpostavljeni maksimalni temperaturi, sicer se zaradi difuzijskih pojavov življenjska doba grelne žice na tem mestu zmanjša.

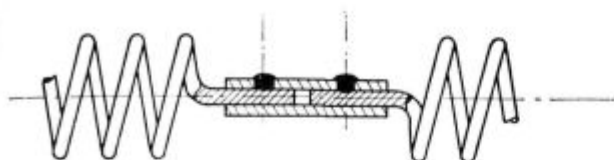
Varjenje RAVNIN-a in RAVNAL-a

RAVNIN-i in RAVNAL-i se dajo variti električno in avtogeno. Električno varjenje se naj vrši pod zaščitno atmosfero argona, helija ali vodika, če imamo volframove elektrode. Električno pa lahko varimo tudi z grafitnimi elektrodami premera ca. 4 mm, odvisno od debeline varjenca; pri manjši debelini varjenca elektrodo ošilimo. Dodajanje materiala običajno ni potrebno; dovolj je, če stalimo oba dela varjenca. Variti je potrebno hitro, da se material ne naogljjiči. Boljše je varjenje z enosmernim tokom, ker je obločni plamen bolj stabilen. Pri tem varjenju naj bo grafitna elektroda priključena na minus pol. Velikost električnega toka naj bo prilagojena debelini varjenca, kot sledi:

Premer žice [mm]	Tok [A]
ca. 1,0	30—50
2,0	50—75
3,0	75—100
4,0	100—125
5,0	125—150

RAVNIN-e in RAVNAL-e lahko varimo tudi avtogeno z elektrodami iste sestave, kot je grelna žica sama. Variti je potrebno hitro in sigurno. Varimo lahko z golimi elektrodami. V tem primeru je potrebno čimprej odstraniti žilindro, da se ohrani odpornost grelnega elementa proti ognju. Avtogeno varjenje je predvsem prikladno takrat, ko še varjenec ni bil segret na 700—800° C. Pri pregorelih grelnih elementih je potrebna velika mera opreznosti, ker so posebno RAVNAL-i v tem stanju

krhki in je vsaka deformacija v hladnem nedopustna. Tak element iz kvalitete RAVNAL-a je potrebno segreti na 600–800°C in ga pri tej temperaturi naravnati na obliko, v kateri ga bomo zavarili. Prekinjena konca grela zavarimo tako, kot je prikazano na spodnji skici.



ZIVLJENJSKA DOBA GRELNE ŽICE

Življenjska doba grelnega uporabnega materiala je popolnoma odvisna od okoliščin, v katerih opravlja svojo funkcijo pretvornika energije. Nanjo bistveno vplivajo konstrukcija in temperatura peči, možnosti sevanja, površinska obremenitev, število vklopov in izklopov, konstrukcija spiral, nosilni material, pečna atmosfera itd. Kako vplivajo naštetih parametri grelnih elementov in peči na življenjsko dobo ali vzdržljivost materiala, je prikazano v naslednjih odstavkih. Preden pa preidemo k tem specifičnim razmotrivanjem, je potrebno, da si ogledamo merilne metode, preko katerih je ob določenih pogojih možno priti do podatkov, ki so osnovno merilo za vzdržljivost ali življenjsko dobo. V glavnem obstajata dve merilni metodi:

a) Merilna metoda po predlogu essenskega elektro toplotnega inštituta.

Metoda je priznana predvsem v kontinentalnem delu Evrope. Merilo vzdržljivosti je število vklopov, pri katerih se spirala iz žice debeline 0,4 mm v času 2 minut segreje na konstantno temperaturo 1050°C, nato pa se 2 minuti ohlaja. Ker je trajanje meritve pri novejših materialih lahko zelo dolgotrajno (preko 10.000 vklopov), so dopustne meritve tudi pri višjih temperaturah spirale (1250°C). Število vklopov intermitence 50 % se šteje do pregretja spirale; računa se s povprečjem najmanj 5 preizkušencev.

b) Merilna metoda po ameriškem ASTM sistemu (American Society for Testing Materials).

Grelna žica dolžine 300 mm ter premera 0,645 do 0,81 mm je prosto obešena med dva kontakta. Med poizkusom je napetost izvora električne energije konstantna. Intermitenca 50 % je ista kot pri evropski metodi. ASTM se uporablja predvsem v Ameriki in Angliji. Švedi (Kanthal) so aplicirali ASTM metodo na premer žice 0,7 mm ter delajo preizkuse običajno pri 1200°C.

Rezultati raznih merilnih metod se med seboj ne morejo primerjati, ker je v samih metodah mnogo specifičnosti; pri poizkusih s konstantno napetostjo dobimo na primer pri različnih materialih različne temperature. Danes se opaža tendenca, da bi naj bila temperatura merilo za

vzdržljivost grelne žice. Predlaga se ona temperatura, pri kateri bi bila življenjska doba gorenja 100 ur.

1. Vpliv formiranja

Vsi danes poznani metalurški ogrevni materiali bazirajo svojo obstojnost pri visokih temperaturah na oblikovanju zaščitnega sloja na površini žice. Ta v splošnem oksidni sloj je obstojen pri zelo visokih temperaturah ter ščiti material v notranjosti prereza žice pred nadaljnjo oksidacijo. Pri RAVNIN-u sestavljajo oksidacijsko plast kromovi, železovi ter kobaltovi oksidi ($\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CoO}$), pri RAVNAL-u pa poleg naštetih predvsem še aluminijev oksid (Al_2O_3) in sicer več kot 95 % celotne sestave. Zelo važno za življenjsko dobo grelnega elementa je, da se mu pri prvem segrevanju na visoko temperaturo omogoči pravilno formiranje oksidacijskega sloja. Najlepše se oblikuje sloj v oksidacijski atmosferi, to je na zraku. Redukcijska atmosfera, ki sicer pozneje z minimalnim učinkom naogljčenja ne vpliva bistveno na življenjsko dobo, je v času formiranja ogrevnega materiala uničujoča. Nujno je torej treba pri prvem segrevanju peči ali naprave omogočiti grelnim elementom dober dostop svežega zraka.

2. Vpliv temperature

Razne merilne metode kakor tudi vsakdanja praksa kažejo s svojimi rezultati, da velja za vse grelne materiale ista funkcijska odvisnost življenjske dobe od temperature elementa. Funkcija je eksponentialna; s presenetljivo majhnim odstopanjem med grelnimi materiali z Raven in nemškimi ter švedskim kanthalom je eksponent 16. Enačba je sledeča:

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} \right)^{16}$$

pri čemer je:

t_1 — relativna življenjska doba pri temperaturi ϑ_1 [°C]

t_2 — relativna življenjska doba pri temperaturi ϑ_2 [°C]

Zastrašujoči eksponent, ki je elektrotehnikom poznan tudi iz dognanj o življenjski dobi žarilnih nitk v žarnicah, dobi polno vrednost, če ga preračunamo v %. Zakon pravi, da se življenjska doba grelne žice zmanjša na polovico, če se temperatura elementa poviša za 4,5 %. Procent se zelo dobro ujema s podatkom iz literature, da se namreč življenjska doba razpolovi pri temperaturi grelnega elementa ca. 1000°C ob njenem povišanju za 50°C. Zaradi tako velike občutljivosti grelnega materiala na temperaturo je potrebna velika mera pazljivosti pri dimenzioniranju grel, posebej pa še pri njih nameščanju. Vsako lokalno pregretje materiala iznad povprečka ima za posledico skorajšnje uničenje grelne žice na tem mestu. Odnos

Tabela 6: Izbor grelnega materiala z ozirom na pečno atmosfero

Atmosfera	Material	Maks. temp. [°C]	Opomba
Zaščitni plin	RAVNAL 2	1100	Zaščitni plin mora biti brez žvepla
	RAVNIN 2	1050	
Vodik	RAVNIN 2	1250	Vodik mora biti suh
Vodik vlažen	RAVNAL 2	1350	Na grelih se ne sme nabirati kondenzat
	RAVNAL 1	1250	
	RAVNIN 2	1050	
Plavžni plin	RAVNIN 2	1150	Velja za čisti plin
Para	RAVNIN 2	1000	
Ogljikov dioksid	RAVNAL 1	1050	
Ogljikov monoksid	RAVNIN 2	950	
	RAVNAL 2	1100	
Plini z žveplom in vodikom	RAVNAL 2	1100	
	RAVNAL 1	1050	
	RAVNIN 2	700	
Klor, brom, fluor	RAVNIN 2	max. 250	Halogeni so pri visoki temperaturi zelo agresivni

vzdržljivosti oziroma življenjskih dob med posameznimi materiali pri normalnih pogonskih okoliščinah ter pri enaki temperaturi je naslednji:

RAVNIN 2	100 %
RAVNAL 1	ca. 400 %
RAVNAL 2	ca. 500 %

Iz teh relativnih podatkov sledi, da lahko uporabljamo RAVNAL 1 in RAVNAL 2 za precej višje temperature kot RAVNIN 2. Skrajne temperature grelnih elementov za posamezne materiale pri normalnih pogojih (v zraku) so za:

RAVNIN 2	1100° C
RAVNAL 1	1150° C
RAVNAL 2	1250° C

3. Vpliv atmosfere

Atmosfera peči, to je ozračje v peči, s katerim pride grelni material v neposredni dotik, igra važno vlogo v življenju grelnih spiral. Različni sestavni deli atmosfere različno reagirajo s površinskim oksidnim slojem uporabne žice. Nekateri plini povečujejo obstojnost oksidov, drugi pa jo zmanjšujejo. Njih vpliv se najlepše vidi iz spodnje tabele, kjer so za posamezne materiale podane maksimalne temperature grelnih elementov. Iz tabele 6 je tudi razvidno, kdaj se posamezni materiali sploh lahko uporabljajo.

4. Vpliv površinske obremenitve

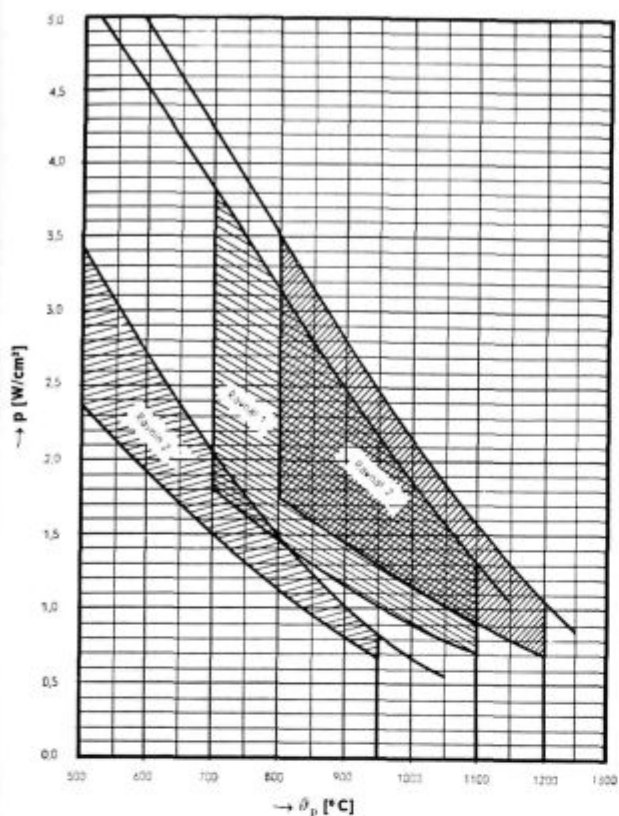
Površinska vatna obremenitev grelnega elementa je v neposredni povezavi s temperaturo spirale, zato je določitev pravilne površinske obremenitve za vzdržljivost materiala odločilna. Za vrednosti površinskih obremenitev je v literaturi mnogo podatkov; običajno se podajajo v odvisnosti od materiala in pečne temperature. Ti podatki izhajajo kot povprečje točnejših računov in merjenj za posamezne vrste peči in naprav. V diagramih

maksimalnih in normalnih površinskih obremenitev za industrijske peči so podane vrednosti za RAVNIN 2, RAVNAL 1 ter RAVNAL 2 v odvisnosti od temperature peči. Podani razponi površinskih obremenitev izhajajo iz različnih konstrukcij namestitve spiral oziroma samih peči. Kako vpliva konstrukcija namestitve grelnih elementov na povečanje dejanske površinske obremenitve in preko teh na povečanje temperature spiral, je podrobneje prikazano v poglavju o izračunu industrijskih peči v odstavku o temperaturnih razmerah v peči. Vsekakor je pri izbiri površinske obremenitve potrebna velika mera pazljivosti; pri določanju te velikosti se največkrat greši. Načelo, uporabljati čim nižje vrednosti, govori seveda v prid vzdržljivosti oziroma življenjski dobi, vendar je težko dosegljivo tako iz čisto elektrotehniškega gledišča (velike in dolge spirale z velikim presekom grelne žice) kakor tudi s stališča ekonomične konstrukcije peči (prevelike notranje površine). Iz nasprotujočih si zahtev posameznih elementov celotne naprave izhajajo torej podane normalne vrednosti površinskih obremenitev kot kompromis. Orientacijski podatki površinskih obremenitev za nekatere druge naprave so podani v naslednji tabeli:

Tabela 7: Okvirni podatki površinskih obremenitev grelne žice

Grelna naprava	Površ. obr. [W/cm ²]
1. Industrijske peči	1,5—3
2. Laboratorijske peči	2—3
3. Kuhalne plošče	4—6
4. Električni lonci in čajniki	4—6
5. Sušilci rok in feni	5—10
6. Potopni in pretočni grelci vode	10—30

Maksimalna in normalna površinska obremenitev grelne žice za industrijske peči



p [W/cm²] — površinska obremenitev
 θ_p [°C] — temperatura peči

5. Vpliv konstrukcije grelnega elementa

Življenjska doba raste z debelino grelnega vodnika, kakor to kaže diagram o vplivu debeline spirale na njeno življenjsko dobo. Zaradi tega uporabljamo debelejše premere grelnih žic predvsem tam, kjer se zahteva boljša vzdržljivost in kjer so grelni elementi podvrženi vsem vplivom, ki zmanjšujejo njihovo življenjsko dobo. Za industrijske peči se na primer priporoča, naj ima grelna žica debelino večjo od 3 mm.

Da bi se dosegla približno enaka življenjska doba pri manjših premerih, je potrebno pri le-teh zmanjšati maksimalno temperaturo grelne žice, kot kaže tabela 8.

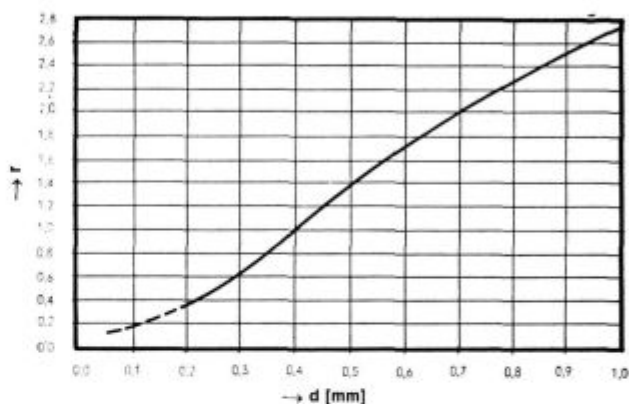
Važen vpliv na vzdržljivost grelnih elementov ima tudi sama geometrija grela, kot na primer

Tabela 8: Maksimalne temperature grelnih materialov [°C]

Material	d [mm] 0,15—0,4	d [mm] 0,41—0,95	d [mm] 1,0—3,0	d [mm] > 3,0
RAVNIN 2	850— 950	950—1000	1000—1050	1100
RAVNAL 1	900—1000	1000—1050	1050—1100	1150
RAVNAL 2	925—1050	1050—1150	1150—1200	1250

premer spirale ter strmina navoja spirale. Zaradi slabšanja mehanske trdnosti materiala s porastom temperature obstaja namreč nevarnost, da se spirala seseda oziroma ovoji prevrnejo. Posebno občutljive so ležeče spirale, posebno še, če so zaprte v dno. Običajno se ne kontrolira temperatura tako zaprte spirale, zato se dogajajo v tem delu peči najpogostejše poškodbe spiral. V sledeči tabeli so navedeni orientacijski podatki, kakšni naj bodo premeri spiral D mm v odvisnosti od premera grelne žice d mm, materiala ter temperature. Viseče spirale imajo lahko nekaj večje premere od spodaj podanih.

Vpliv debeline spirale na njeno življenjsko dobo



r — razmerje življenjskih dob
 d — debelina spirale

Tabela 9: Geometrija grelnih spiral

Material	d [mm]	$\theta_s < 1000^\circ \text{C}$	$\theta_s > 1000^\circ \text{C}$
RAVNAL	$d < 1$	$D = (5-12) d$	$D = (5-8) d$
	$d > 1$	$D = (5-14) d$	$D = (5-10) d$
RAVNIN	$d < 1$	$D = (5-8) d$	$D = (5-6) d$
	$d > 1$	$D = (5-10) d$	$D = (5-7) d$

Strmina navoja s mm, to je razmak med sosednjima ovojema, mora biti:

- za ležeče spirale $s \geq 2 d$
- za viseče spirale $s \geq 1 d$

6. Vpliv nosilne konstrukcije

Nosilna konstrukcija grelnih spirali je oni del peči, s katerim pridejo grelni elementi v neposreden dotik. Ločimo konstrukcije za obešanje spirali ter konstrukcije, na katerih spirala leži. Pri slednji je predvsem važno, da omogoča grelnemu elementu čim ugodnejše sevanje v prostor peči (glej tabelo sevalnih faktorjev k_2). Podporna opeka mora biti tako izdelana, da leži spirala v prerezu vedno le na dveh točkah, ki zagotavljata najmanjše deformacijske obremenitve spiralnega kolo-barja.

V življenju grelne spirale igra material, iz katerega je narejena nosilna konstrukcija, tj. proti ognju odporen material, veliko vlogo. Neposreden dotik površin spirale in površin nosilne konstrukcije ustvarja vedno ugodne pogoje kemičnim, termičnim in električnim razkrojevalnim reakcijam. Pri slabo izbrani kombinaciji obeh materialov in ob premajhnem upoštevanju temperature grelne žice je obstojnost le-te zelo ogrožena. V naših tržnih razmerah ni velike izbire pri nabavi za ta namen posebno izdelane negorljive opeke, zato se pač vgrajuje v peči material, ki je na razpolago. Vendar se je treba pri tem zavedati, da ni grelni material tisti, ki je kriv pogostnih defektov peči, marveč je to material nosilne konstrukcije. Mnoge raziskave so pokazale, da grelnemu materialu RAVNIN in RAVNAL najbolj odgovarja proti ognju odporen nosilni material po spodnji tabeli.

Tabela 10: Nosilni materiali

Temperatura spirale °C	Nosilni material
do 1000	Samotna opeka z min. 45 % Al_2O_3
1000—1200	Silimanitna opeka z min. 65 % Al_2O_3
Preko 1200	Korundna opeka z min. 70 % Al_2O_3

Zelo važno je, da opeka ne vsebuje alkalnih ali železooksidnih primesi, ki rade tvorijo zelo reaktivno žlindro. Posebno občutljiv je RAVNAL, ki zahteva v svojem materialu čim večji odstotek Al_2O_3 .

Poleg velike obstojnosti pri visokih temperaturah je pri nosilnih proti ognju odpornih materialih za električne uporabne peči zelo važna velika specifična upornost. Zelo čisti materiali na bazi MgO in Al_2O_3 imajo specifične upornosti pri običajni temperaturi reda velikosti 10^{14} do 10^{12} ohm cm: pri $1000^\circ C$ padejo vrednosti že za več milijonkrat: od 10^7 do 10^5 ohm cm. Zato je treba paziti, da se grelne spirale priključujejo tako, da ne pride med dvema sosednjima utoroma do maksimalne napetosti. Tako zmanjšamo možnost preboja, ki je sicer redka, vendar težka okvara.

II.

ELEKTRO TOPLOTNI IZRACUN

Elektro toplotni izračun grelnega elementa

Osnovna naloga grelnega elementa, to je uporabne grelne žice, je ta, da pretvarja električno energijo v toplotno. Pretvorba se vrši s popolnim izkoristkom. Pri določeni dimenziji grelnega elementa se običajno postavlja zahteva, da naj grelni element oddaja določeno toplotno moč P [kcal/h, W, kW] ob definirani napetosti izvora električne energije U [V]. Iz tako postavljenega problema takoj sledi, kakšna mora biti upornost R ohm celokupnega grelnega elementa:

$$R = \frac{U^2}{P} [\text{ohm}]$$

Skupna upornost pa je odvisna od premera grelne žice d [mm], njene dolžine l [m] ter od specifične upornosti materiala ρ [ohm mm²/m]:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{4l}{\pi d^2} [\text{ohm}]$$

Pri izračunu upornosti grelnega elementa je treba paziti, da se upošteva specifična upornost pri temperaturi, ki jo bo imela grelna žica ob nor-

malnih obratovalnih pogojih naprave. Iz dosedanjih sklepanj je razvidno, da lahko izbiramo pri določeni moči grelnega elementa poljubne dimenzije grelne žice, saj dobimo ob drobnem premeru ter kratki žici isto upornost grela, kot če imamo debelo žico z veliko dolžino. Z uvedbo nove veličine, to je s površinsko obremenitvijo p [W/cm²], pa se široke možnosti izbire dimenzij bistveno zmanjšajo. Pri majhnem premeru žice ter majhni dolžini bo seveda površinska obremenitev velika, pri obilnem premeru in veliki dolžini pa bo površinska obremenitev majhna. Zavedati se moramo važnosti pravilne določitve površinskih obremenitev (glej diagram normalnih in maksimalnih površinskih obremenitev za industrijske peči ter podatke o površinski obremenitvi v poglavju o življenjski dobi grelnih elementov), ker te ne vplivajo le na vzdržljivost vgrajenega materiala, temveč posega s potenco 4/3 v stroške za grelni material, s približno isto potenco pa v celotno investicijo, saj potrebujemo za namestitev večje količine grelnega materiala tudi večjo peč.

Površinska obremenitev p [W/cm²] je definirana kot moč P [W] na enoto površine celotnega grelnega elementa S [cm²]:

$$p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi dl} [\text{W/cm}^2]$$

Iz gornjih osnov sta izpeljani temeljni enačbi za dimenzioniranje grelnega elementa:

$$d = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot \pi^2 \cdot U^2 \cdot \rho}{4 \cdot P^2 \cdot p}} \text{ [mm]}$$

$$l = \frac{P}{10 \cdot \pi \cdot d \cdot p} \text{ [m]}$$

pri čemer je:

P [W] — moč grelnega elementa,

ρ [ohm mm²/m] — specifična upornost materiala pri temperaturi uporabe,

U [V] — napetost na grelnem elementu,

p [W/cm²] — površinska obremenitev grelnega elementa,

d [mm] — debelina žice grelnega elementa,

l [m] — razvita dolžina grelnega elementa.

Običajno navijamo grelno žico v spiralo. Odnos med posameznimi merami spirale je naslednji:

$$l = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1} - d \text{ [mm]}$$

pri čemer je:

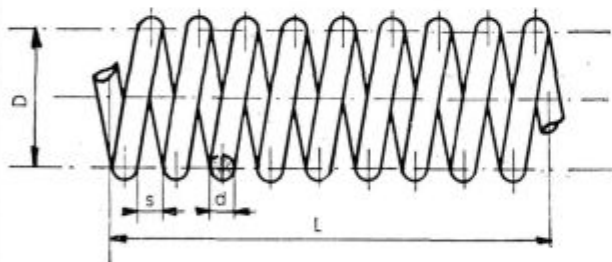
s [mm] — strmina navoja spirale,

D [mm] — srednji premer spirale,

l [m] — razvita dolžina spirale,

L [m] — dolžina navite spirale,

d [mm] — premer grelne žice.



Vse zgornje osnovne relacije med električnimi in geometrijskimi dimenzijami so prikazane v diagramih (določitev parametrov spirale). Uporabnost teh diagramov je splošna; v veliko pomoč so pri preračunavanju industrijskih peči, kjer je potrebno upoštevati razpoložljiv prostor za namestitve spirale, njih debelino, premer, dolžino, strmino navoja, razdelitev na segrevalne cone, razdelitev na faze, na pravilno površinsko obremenitev ter na zahtevano skupno moč naprave. Med naštetimi faktorji je toliko možnih kombinacij, da je potrebno izvršiti niz zamudnih računskih operacij, preden dobimo vsestransko ugodno rešitev. S pomočjo diagramov tako rešitev kmalu dosežemo, ker lahko izhajamo ali iz geometrije prostora ali pa iz zahtevanih elektro toplotnih razmer.

Pri izračunu večjih naprav, na primer pri industrijskih pečeh, kjer vložimo tudi več sto kg grelnega materiala, pa je priporočljiva naknadna kon-

trola površinske obremenitve iz parametrov, ki smo jih dobili iz navedenih diagramov. Preko površinske obremenitve je namreč določena druga dimenzija grelnega elementa, to je dolžina l [m], obenem pa je važno tudi njeno točno poznavanje.

$$p = \frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{10 \cdot \pi^2 \cdot U^2 \cdot d^3} \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Drugi elementarni način določitve parametrov spirale je tako imenovana metoda površinske obremenitve. Ta metoda daleč ni tako eksaktna, ker bazira zgolj na izkustvenih podatkih, ki se razlikujejo od naprave do naprave. V diagramu Temperature viseče žice je prikazano, pri kateri površinski obremenitvi in pri kateri debelini žice dobimo določeno temperaturo grelnega elementa, če je ta vodoravno razpeta grelna žica v mirujočem zraku s temperaturo 20° C. Če grelni element oblikujemo kot spiralo in je ta nameščena v neki prostor, dobimo seveda že pri manjših površinskih obremenitvah iste temperature kot sicer. Konstrukcijski faktor c nam pove, s kolikokrat manjšo temperaturo (ϑ_u) moramo računati pri neki napravi, da dobi spirala tako temperaturo (ϑ), kot bi bila razvita in obešena žica v zraku s temperaturo okolice 20° C. Torej je:

$$\vartheta_u = \vartheta \cdot c \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Pri temperaturi (ϑ_u) nato odčitamo za neki premer žice ustrezno površinsko obremenitev, nato pa lahko določimo iz prejšnjih enačb direktno napetost U [V], katero moramo pritisniti na spiralo, da bo imela zahtevano moč P [W]:

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{10 \cdot \pi^2 \cdot d^3 \cdot p}} \text{ [V]}$$

Dolžina grelne žice je pri tem:

$$l = \frac{P}{10 \cdot \pi \cdot d \cdot p} \text{ [m]}$$

Lahko pa tudi direktno računamo, kakšno napetost moramo pritisniti na tekoči meter grelne žice:

$$\frac{U}{l} = \sqrt{40 \cdot \rho \cdot \frac{P}{d}} \text{ [V/m]}$$

Pri tem pa računamo moč iz dolžine, kot sledi:

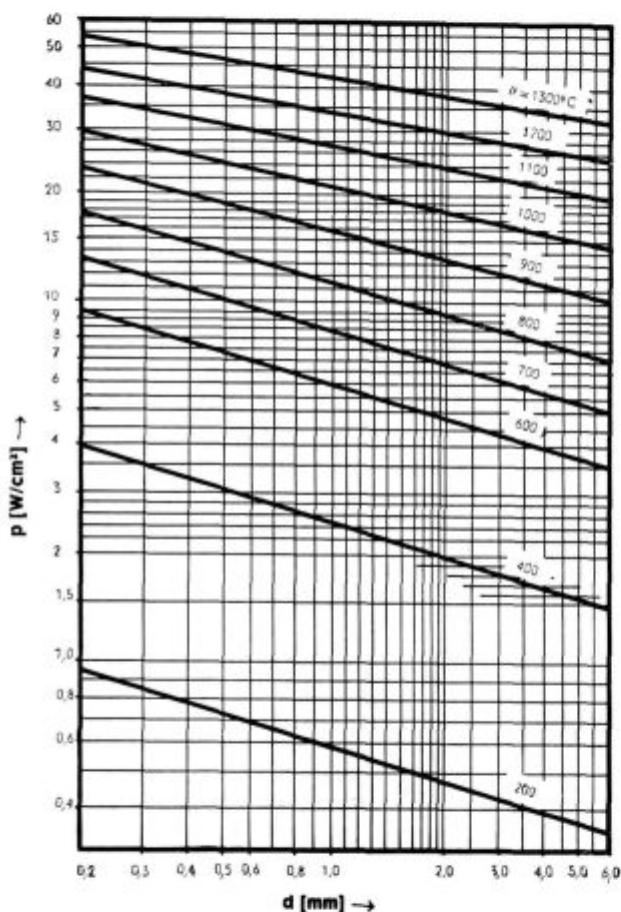
$$P = 10 \cdot \pi \cdot d \cdot p \cdot l \text{ [W]}$$

V splošnem je lahko konstrukcijski faktor večji ali manjši od 1. Večji konstrukcijski faktor dobimo pri forsiranju hlajenja grelnega elementa z zrakom ali z drugim medijem, manjši pa je povsod tam, kjer je odvajanje toplote težje kot pri mirujoči vodoravni grelni žici. V spodnji tabeli je zbranih nekaj izkustvenih podatkov za konstrukcijske faktorje.

Tabela 11: Konstruktivski faktor c

Konstrukcija grelnega elementa	Naprava	Konstruktivski faktor c
Vodoravno obešena žica v mirujočem zraku 20° C		1
Cilindrična spirala v zraku z oporami ali brez njih	Naprave s prosto obešenimi spiralami	0,8—0,9
Grelni element navit na podlago iz proti ognju odpornega materiala	Električne peči za ogrevanje prostorov	0,6—0,7
Grelni element položen v utor	Električni likalniki, kuhalne plošče	0,5
Grelni element obdan s plastjo toplotne izolacije	Električne peči	0,3—0,4

Temperatura viseče grelne žice



p [W/cm²] — površinska obremenitev
 d [mm] — debelina žice

Primer: Določiti je treba spiralo za električno sevalno peč, ki naj seva s temperaturo 920° C. Ustrezna računaska temperatura:

$$\vartheta_u = c \cdot \vartheta = 0,65 \cdot 920 = 600^\circ \text{C}$$

Pri tej temperaturi dobimo iz diagrama za $d = 1,0$ [mm] površinsko obremenitev $p = 5,8$ [W/cm²]. Napetost na enoto dolžine:

$$\frac{U}{l} = \sqrt{40 \frac{p}{d} \cdot \rho} = \sqrt{40 \frac{5,8}{1} \cdot 1,44} = 18,2 \text{ [V/m]}$$

Pri napetosti 220 V potrebujemo:

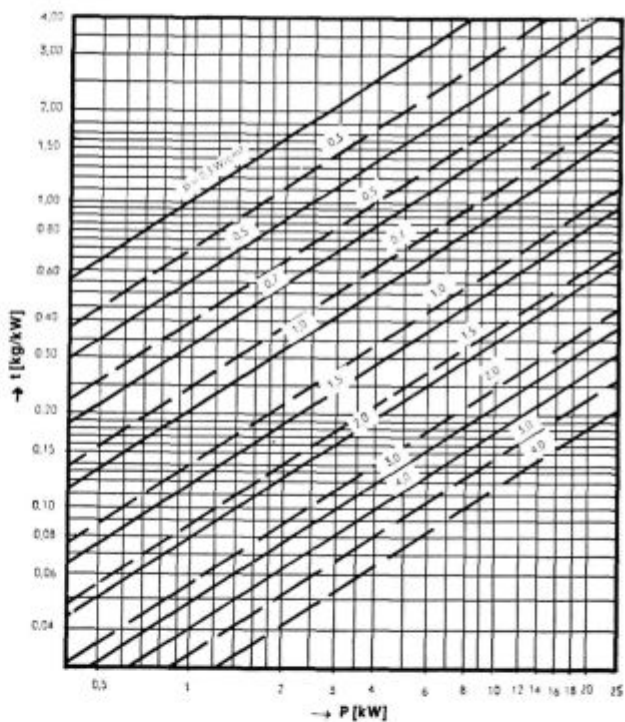
$$l = \frac{220}{18,2} = 12,1 \text{ m žice}$$

Dejanska moč naprave:

$$P = 10 \cdot \pi \cdot p \cdot d \cdot l = 10 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 5,8 \cdot 12,1 = 2100 \text{ W,}$$

kar je primerno za ogrevanje prostora.

Ocenitev količine materiala na enoto moči



$$t = 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2 \cdot \rho}{U^2 \cdot p^4}}$$

———— 220 V
 - - - - 330 V

t [kg/kW] — teža spirale na enoto moči

γ — specifična teža [kg/dm³]

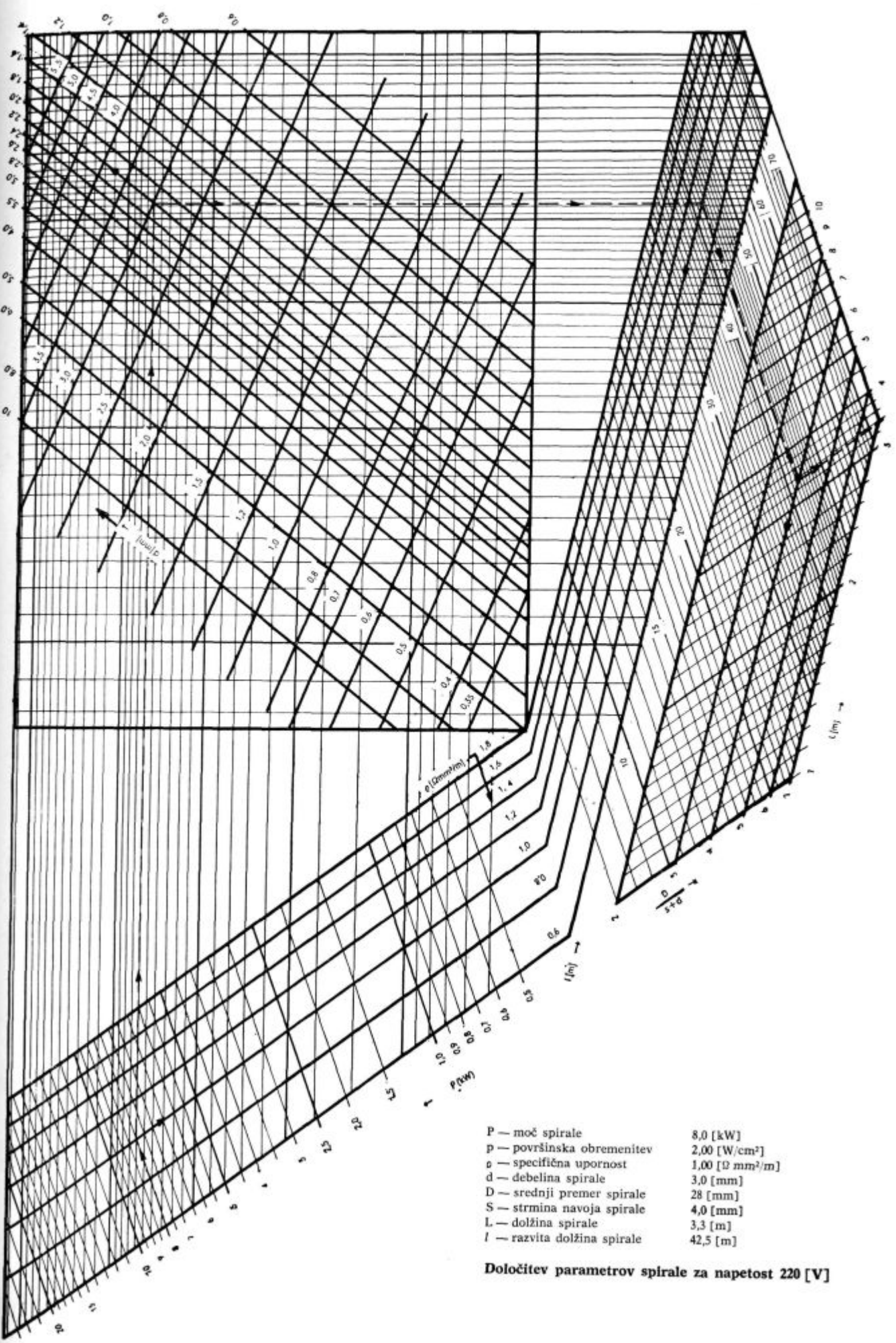
ρ — specifična upornost [Ω mm²/m]

ρ — specifična upornost [Ω mm²/m]

U — napetost [V]

p — površinska obremenitev [W/cm²]

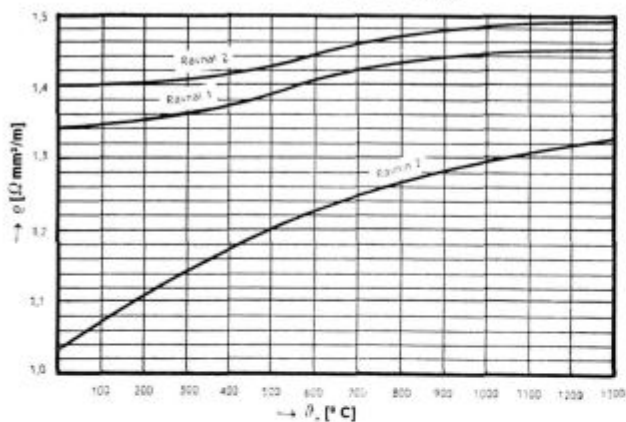
p [W/cm²]



- | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| P — moč spirale | 8,0 [kW] |
| p — površinska obremenitev | 2,00 [W/cm ²] |
| e — specifična upornost | 1,00 [Ω mm ² /m] |
| d — debelina spirale | 3,0 [mm] |
| D — srednji premer spirale | 28 [mm] |
| S — strmina navoja spirale | 4,0 [mm] |
| L — dolžina spirale | 3,3 [m] |
| l — razvita dolžina spirale | 42,5 [m] |

Določitev parametrov spirale za napetost 220 [V]

SPECIFIČNA UPORNOST MATERIALA



IZRAČUN INDUSTRIJSKE PEČI

a) Določitev peči

Prostorsko velikost peči je težko enosmiselno določiti; njeno geometrijo določajo predvsem način ogrevanja, hitrost ogrevanja, enakomernost ogrevanja, velikost in temperatura ogrevanca in druge posebne zahteve kot npr. ogrevanje v zaščitni atmosferi itd. Vse zgornje parametre za določitev peči določa tehnologija, kateri naj služi sama peč. Osnova za projektiranje peči je torej poznavanje tehnološkega procesa; ta bo odločal, ali bomo postavili komorno, globinsko, potisno ali koračno peč ali peč s posebnimi karakteristikami. Prvi gabariti ogrevnega prostora so torej podani z izbranim tipom peči, z velikostjo ogrevanca ter s hitrostjo oziroma temperaturo ogrevanja. Drugače rečeno: peč je določena s kapaciteto (urno tonažo) zagretega materiala.

b) Toplotni izračun peči

Na osnovi postavljene kapacitete peči je možno raziskati toplotne razmere v peči. Tehnologija nam mora podati: srednjo temperaturo ogrevanca, dovoljeno odstopanje od te temperature, enakomernost ogrevanja, to je temperaturno razliko najtoplejšega in najhladnejšega dela, maksimalno hitrost ogrevanja oziroma celoten časovni potek temperature ogrevanca, če je ta posebej zahtevan.

Če se omejimo predvsem na peči, s katerimi ogrevamo predvsem trde materije (kovine), in na one temperature peči, ki leže nad 500° C, ugotovimo, da se praktično vsa toplotna energija iz peči prenaša na ogrevanec s pomočjo sevanja. Procent konvekcije in kontaktnega prevajanja je običajno tako majhen, da je zanemarljiv. Časovni potek takega segrevanja vložka je komplicirana funkcija, kar dokazuje naslednja enačba segrevanja:

$$t = \frac{g \cdot c}{\alpha \cdot \tau} \ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\vartheta_o - \vartheta_k} [\text{sek}]$$

Pri tem pomeni:

t [sek] — čas ogrevanja

c [Ws/kg · deg] — specifična toplota ogrevanca

g [kg/m²] — teža ogrevanca na enoto ogrevne površine

α [W/m² deg] — toplotna prehodnost

τ — koeficient, kot funkcija $\frac{\alpha}{\lambda} x$ — glej sliko!

λ [W/m deg] — specifična prevodnost

x [m] — debelina ogrevanca (gl. en.)

ϑ_o [deg C] — temperatura peči

ϑ_z [deg C] — začetna temperatura ogrevanca

ϑ_k [deg C] — končna temperatura ogrevanca

Pri določeni kvaliteti in geometriji materiala ter pri določenih začetnih in končnih temperaturah ogrevanca lahko vplivamo na čas segrevanja zgolj s temperaturo peči. To je lepo razvidno iz zgornje enačbe, posebno še, če upoštevamo, da je toplotna prehodnost praktično odvisna tudi samo od temperature peči in temperature ogrevanca. Logaritemski del enačbe segrevanja se zelo leno spreminja z njegovim kvociantom, zato lahko pri neki sponirani temperaturi v peči (ϑ_o) poiščemo ono toplotno prehodnost (α), ki nam da po enačbi zahtevan čas segrevanja. Iščemo torej temperature, ki nam dajo zaželeno toplotno prestopnost (α):

$$\alpha = \sigma' \frac{\left(\frac{T_o}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{sr}}{100}\right)^4}{\vartheta_o - \vartheta_{sr}}$$

Pri čemer so:

ϑ_o [deg C] — temperatura peči

T_o [deg K] — temperatura peči

ϑ_{sr} [deg C] — srednja temperatura ogrevanca

T_{sr} [deg K] — srednja temperatura ogrevanca

σ [W/m²deg K] — sevalna konstanta (5,77 w/m² deg K)

E_1, E_2 — emisijski koeficienti peči in ogrevanca

$$\sigma' = \sigma \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1}$$

Upoštevati moramo srednjo temperaturo segretka, ki jo dobimo iz:

$$\vartheta_{sr} = \vartheta_o - \frac{\vartheta_k - \vartheta_z}{\ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\vartheta_o - \vartheta_k}}$$

Pri izračunu toplotne prestopnosti oziroma potrebnih temperatur se lahko poslužimo tudi diagrama (temperaturne razmere v peči), iz katerega lahko z izračunano površinsko obremenitvijo (p) ter srednjo temperaturo ogrevanca ($\vartheta_{sr} = \vartheta_p$)

določimo temperaturo peči ($\vartheta_0 = \vartheta_s$). Upoštevati moramo, da je

$$p = \alpha (\vartheta_0 - \vartheta_{st}) \cdot 10^{-4} \cdot k_0 \text{ [W/cm}^2\text{]}.$$

Pri čemer je:

$k_0 = \frac{\sigma'}{\sigma}$ — korekcijski faktor sevanja za realna telesa.

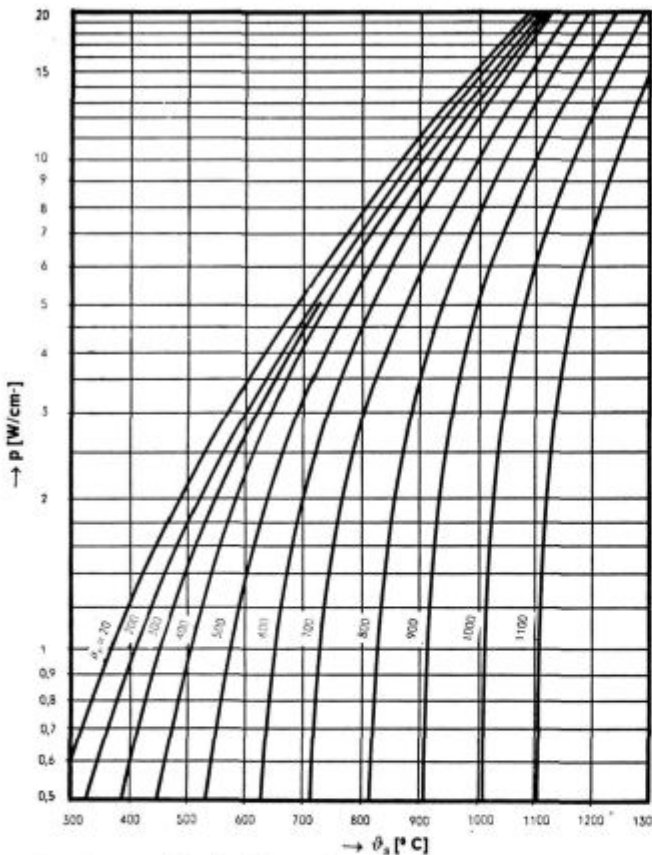
Tako dobljena temperatura (ϑ_0) je srednja vrednost temperaturnega polja v peči, ki oddaja energijo na ogrevanec tako, da se ta segreje na zahtevano temperaturo (ϑ_k) v času t sek. Ta temperatura peči je časovno konstantna vrednost: peč mora imeti ob hladnem vložku enako temperaturo kot ob času, ko je vložek že na zahtevani temperaturi. Predpostavka o konstantni temperaturi peči (ϑ_0) ima za posledico ostre zahteve. Dovolj je pogled na krivulje temperaturnih razmer v peči, ki nam takoj povedo, da bi morali pri konstantni temperaturi peči (ϑ_0) v začetku segrevanja imeti 3- do 15-kratno večjo površinsko moč peči in s tem skupno moč, kot je potrebno ob koncu segrevanja. Mnogokrat tej zahtevi ne moremo ugoditi, posebno ne tam, kjer ogrevamo naenkrat velike mase, npr. v globinskih in velikih komornih pečeh. Zelo ugodne razmere imamo pri pečeh, skozi katere potuje material. Časovni potek temperature zame-

nja tu krajevna razporeditev temperature vzdolž peči. S pravilno razmestitvijo moči ogrevnih površin se lahko zelo dobro približamo zahtevi po časovno (tu krajevno) konstantni temperaturi peči (ϑ_0).

Kadar nimamo možnosti menjati površinske moči ogrevnih površin v takem širokem razponu, da bi obdržali temperaturo peči (ϑ_0) konstantno, dobimo pri hladnem vložku nižjo temperaturo peči: temperatura se sesede, kot pravimo. V splošnem je temperatura peči v vsem intervalu do ϑ_0 določljiva s Stefanovim zakonom (če zanemarimo konvekcijo) oziroma preko krivulj in diagramov, ki govore o temperaturnih razmerah v peči. Izračun ogrevnega časa bi sedaj potekal tako, da se temperaturni interval od najmanjše začetne temperature peči do končne temperature peči ϑ_0 razdeli na primerne odseke ter se za te izračuna posebej toplotna prestopnost in ogrevni čas pri predpostavki, da je v posameznih odsekih temperatura peči konstantna. Seveda moramo v enačbo ogrevanja vstavljati vedno nove začetne temperature ogrevanca (ϑ_s).

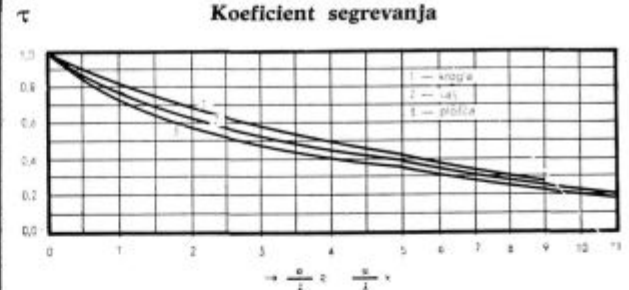
Pripomniti je treba, da je sicer tak izračun pravilen, vendar pa nastopi nova težava, ker pri zmanjšanju temperature peči (ϑ_0) dobimo dodatno oddajanje energije ogrevancu iz akumulirane toplotne energije same mase peči (obzidave, izolirnega materiala). Sprememba temperature peči razdre stacionarne temperaturne razmere v zidovih obzidave.

Temperaturne razmere v peči



p [cm] — površinska obremenitev
 ϑ_p [°C] — temperatura peči (vložka)
 ϑ_s [°C] — temperatura spiral

Koeficient segrevanja



α [W/m² deg] — toplotna prehodnost
 λ [W/m deg] — toplotna prevodnost
 R, x [m] — polmer, debelina ogrevanca
 τ — koeficient segrevanja

$$t = \frac{g \cdot c}{\alpha \cdot \tau} \ln \frac{\vartheta_0 - \vartheta_s}{\vartheta_0 - \vartheta_k} \text{ [sek]}$$

Stacionarnost se je vzpostavila na podlagi notranje temperature (ϑ_0) ter temperature okolice (ϑ_{ok}). Ker imajo industrijske peči običajno velike mase obzidnega materiala, je vpliv oddajanja energije ogrevancu iz obzidave ter kasneje vračanja te energije v obzidavo na čas segrevanja vložnega materiala lahko občuten. Pri hladnem vložku na ta način seveda pridobimo na času segrevanja, ko pa se temperatura vložka približuje svoji končni vrednosti — posebno, če je ta blizu temperaturi peči — pa za ta interval segrevanja porabimo več

časa, ker se del moči peči koristi za segrevanje same peči. Teoretično je izguba večja kot profit ter gre pač na račun rezervnega časa, ki ga dodamo izračunanemu zaradi temperature. Srednja temperatura ogrevanca:

V času ogrevanja t [sek] ter pri konstantni temperaturi peči (ϑ_o) dobimo namreč sledečo temperaturno neenakomernost ogrevanca, ki je podana kot razlika temperatur najtoplejšega in najhladnejšega mesta:

$$\Delta\vartheta = n(1 - \tau)(\vartheta_o - \vartheta_k)$$

Pri tem je n poseben koeficient oblike ter ima naslednje vrednosti:

za ploščo $n = 1,5$

za valj $n = 2,0$

za kroglo $n = 2,5$

Pri uporabi enačb segrevalnega časa in temperaturne neenakomernosti je treba upoštevati, da ne veljajo splošno, temveč samo ob naslednjem pogojju:

$$\frac{at}{X^2} > 0,2 \text{ ali } \frac{at}{R^2} > 0,15$$

pri čemer je

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} [\text{m}^2/\text{s}]$$

Pri segrevanju kovin je zgornji pogoj skoraj vedno izpolnjen, paziti pa je potrebno pri materialih z manjšo prevodnostjo in veliko specifično toploto.

Primer: Kakšen je čas segrevanja jeklene osi debeline 360 mm pri naslednjih podatkih:

začetna temperatura	$\vartheta_z = 20^\circ \text{C}$
končna temperatura	$\vartheta_k = 860^\circ \text{C}$
temperatura peči	$\vartheta_o = 890^\circ \text{C}$
specifična toplota	$c = 580 [\text{Ws}/\text{kg deg}]$
specifična prevodnost	$\lambda = 37 [\text{W}/\text{m deg}]$
specifična teža	$\gamma = 7850 [\text{kg}/\text{m}^3]$
emisijski količnik šamota	$E_1 = 0,75$
emisijski količnik jekla	$E_2 = 0,80$
polmer valja	$R = 0,18 [\text{m}]$

Sevalna konstanta realnih razmer:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1} = \frac{5,77}{\frac{1}{0,75} + \frac{1}{0,80} - 1} E^2 = 3,65 [\text{W}/\text{m}^2 \text{deg}^4]$$

Toplotna prehodnost:

$$\alpha = \sigma \frac{\left(\frac{T_o}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_s}{100}\right)^4}{\vartheta_o - \vartheta_{sr}} = 3,65 \cdot \frac{11,63^4 - 9,13^4}{890 - 640} = 163 [\text{W}/\text{m}^2 \text{deg}]$$

Srednja temperatura ogrevanca:

$$\vartheta_{sr} = \vartheta_o - \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\vartheta_o - \vartheta_k}} = 890 - \frac{890 - 20}{\ln \frac{890 - 20}{890 - 860}} = 640^\circ \text{C}$$

Koeficient τ je dobljen iz diagrama preko:

$$\frac{\alpha}{\lambda} R = \frac{163 \cdot 0,18}{37} = 0,795 \rightarrow \tau = 0,82$$

Segrevalni čas:

$$\tau = \frac{g \cdot c}{\alpha \cdot \tau} \ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_k}{\vartheta_o - \vartheta_z} = \frac{787,5 \cdot 580}{163 \cdot 0,82} \ln \frac{890 - 20}{890 - 860} = 11400 [\text{sek}]$$

$$t = 3,16 [\text{h}]$$

Neenakomernost segrevanja:

$$\Delta\vartheta = n(1 - \tau)(\vartheta_o - \vartheta_k) = 2,0(1 - 0,82)(890 - 860) = 10,8 [^\circ \text{C}]$$

Kontrola veljavnosti zgornjih enačb:

$$a = \frac{\lambda}{c \gamma} = \frac{37}{580 \cdot 7850} = 0,815 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{a \cdot t}{R^2} = \frac{0,815 \cdot 10^{-5} \cdot 0,114 \cdot 10^5}{0,18^2} = 0,286 > 0,15$$

Če si iz diagrama temperaturnih razmer v peči odčitamo površinske obremenitve za pogoj, da je temperatura v peči konstantna, tj. 890°C , dobimo za hladen vložek $p = 11 [\text{W}/\text{cm}^2]$, za vložek s končno temperaturo pa $p = 1,6 [\text{W}/\text{cm}^2]$; se pravi, da mora vsak kvadratni centimeter površine peči mora vsak kvadratni centimeter površine peči sevati moč 11 [W] ali vsak kvadratni meter 110 [kW]. Toliko moči pa ne moremo nikakor spraviti na stene peči. Potrebno je izhajati z nekimi vnaprej določenimi površinskimi obremenitvami (10 do 40 [kW/m²]). Če si izberemo površinsko obremenitev stene peči 22,5 [kW/m²] (2,25 [W/cm²]), bo izračun segrevalnega časa potekal tako, kot je bilo že opisano. Tu navajamo za primer samo rezultate:

$\vartheta_z [^\circ \text{C}]$	$\vartheta_o [^\circ \text{C}]$	$\alpha [\text{W}/\text{m}^2 \text{deg}]$	$t [\text{h}]$
100	530	82	0,34
200	540	104	0,37
300	570	130	0,37
400	600	176	0,37
500	650	235	0,39
600	710	320	0,39
700	770	505	0,39
800	860	590	0,53
860	890	870	0,54

Skupaj $\Sigma 3,69 [\text{h}]$

Vidimo, da se segrevalni čas bistveno ne razlikuje od prej izračunanega (17%), vendar je taka rešitev mnogo racionalnejša, ker je v tem primeru grelni material mnogo bolj izkoriščen. Skupno moč peči dobimo, če pomnožimo vse aktivne površine peči same s ploskovno obremenitvijo. Če so na primer te površine 5 m^2 , bi dobili za prvi primer nemogočo moč $110 \text{ kW/m}^2 \times 5 \text{ m}^2 = 550 \text{ kW}$, za drugi primer pa $22,5 \text{ kW/m}^2 \times 5 \text{ m}^2 = 112,5 \text{ kW}$, kar bi bilo normalno za običajno globinsko peč.

c) Temperaturne razmere v peči

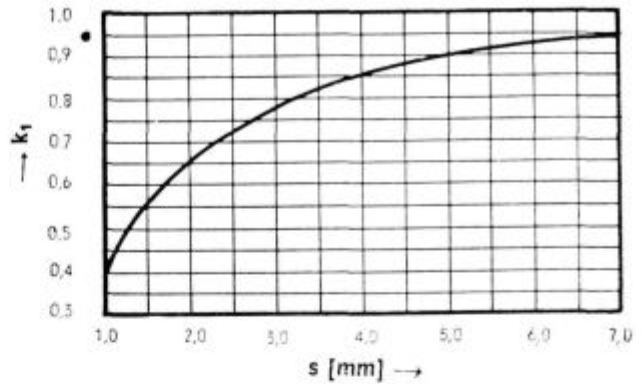
V vsakem realnem prostoru imamo gradientno temperaturno polje, ki je opisano s koordinatami prostora in vrednostjo dotične točke. Čeprav govorimo o temperaturi peči, temperaturi spiral, temperaturi ogrevanca, se moramo zavedati, da so to neke povprečne vrednosti temperatur vseh tistih geometrijskih mest prostora, kjer nas te vrednosti posebno zanimajo: na površini spiral, na površini ogrevanca, na površini obzidave itd. Ker smo navajeni računati z zelo grobimi povprečnimi vrednostmi, bodo tudi metode za njihovo določitev bolj aproksimativne. V toplotnem izračunu peči smo govorili o ogrevnih površinah, ki oddajajo energijo ogrevancu, in smo pri tem mislili na površine sten peči, kjer so nameščeni grelni elementi. Dejansko dobiva ogrevanec energijo z dveh strani: direktno od grelnega elementa — spirale ter indirektno od sten peči. Pri idealni namestitvi spiral na stene oziroma strop peči je delež direktne oddaje energije ca. 65%; procent tako oddane energije pada sorazmerno izgubam skozi stene ter sorazmerno zasenčenosti spiral ter lahko pade pod 10%. Temu primerno se razlikujejo temperature spiral in temperature zidov. Za idealen primer so procentualne razlike obeh temperatur:

- za hladnen vložek ca. 40%
- za vložek s 300°C ca. 20%
- za vložek z 800°C ca. 10%,

kar se nekako ujema z izkustvenim podatkom 50° do 100°C za obešene spirale pri industrijskih pečeh s temperaturami 1000°C do 500°C .

Preden preidemo h konkretnemu izračunavanju temperatur spirale, moramo ugotoviti, kaj pravzaprav predstavlja temperatura ϑ_o («temperatura peči»), s katero smo izračunali segrevalni čas. Kot smo ravnokar videli, je to fiktivna temperatura, pri kateri je sevanje ogrevnih površin enako vsoti iz sevanja spirale in sevanja zidu. Takoj lahko ugotovimo, da je temperatura spirale (ϑ_s) in s tem seveda temperatura zidu nižja od temperature peči ϑ_o . Maksimalna razlika ca. 15% nastane pri hladnem vložku ter se zmanjša na nekaj procentov pri končni temperaturi ogrevanca. Če si postavimo določeno rezervo zaradi vseh aproksimacij v računu, lahko rečemo, da je maksimalna temperatura spirale (ϑ_{so}) pri idealnih sevalnih pogojih enaka fiktivni temperaturi peči (ϑ_o).

Sevalni faktor spirale



k — sevalni faktor
s — strmina navoja

Kakšna pa je temperatura spirale v realnih sevalnih pogojih? Izhajati je treba iz dejstva, da se zaradi navijanja grelnice v spiralo zmanjša aktivna sevalna površina, o čemer govori sevalni faktor spirale k_1 (glej sliko). V spodnji tabeli prikazani sevalni faktor k_2 pa govori o tem, kako smo s samo namestitvijo spiral zmanjšali sevalne možnosti spiralnih površin.

Tabela 12: Sevalni faktor k_2

spirala obešena na cevi	0,85—0,80
spirala vložena v odprte kotne zidove	0,70—0,60
spirala vložena v polodprte utore . . .	0,60—0,45
spirale vložene v priprte utore	do 0,20

Jasno je, da se z zmanjševanjem sevalnih površin obratno sorazmerno povečuje površinska obremenitev grelnega elementa. Če je bila prvotna površinska obremenitev spirale $p \text{ [W/cm}^2\text{]}$ ona vrednost, ki smo jo določili pri samem električnem izračunu, je stvarna površinska obremenitev, ki določa temperaturo spirale in izhaja iz aktivnih sevalnih površin, sledeča:

$$p_a = \frac{p}{k_1 \cdot k_2} \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Prvotna površinska obremenitev (p) je bila izbrana na podlagi temperature peči (ϑ_o) oziroma na podlagi temperature spiral (ϑ_{so}) pri idealnih pogojih. Stvarno temperaturo spirale (ϑ_s) dobimo na podlagi diagrama temperaturnih razmer v peči iz nove površinske obremenitve (p_a) ter temperature peči ($\vartheta_p = \vartheta_o$) oziroma v posebnih primerih temperature vložka. Tako dobljena temperatura spirale (ϑ_s) mora biti vedno manjša od maksimalno dovoljene temperature (ϑ_{max}), ki je določena za vsako vrsto materiala grelnih elementov. Edino ta temperatura je tudi merodajna za ocenitev življenjske dobe grelnice.

Primer:

Strmina navoja spirale $s = 3$ [mm].

Spirala je vložena v odprte kotne zidove.

Električni izračun je dal površinsko obremenitev $p = 1,4$ [W/cm²].

Temperatura peči $\vartheta_o = \vartheta_{90} = 850^\circ\text{C}$.

Zivljenjska doba spirale pri temperaturi $\vartheta_s = 800^\circ\text{C}$ je $t_1 = 1,00$.

Površinska obremenitev aktivnih sevalnih površin spirale:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0,78 \\ k_2 &= 0,75 \end{aligned}$$

$$p_a = \frac{p}{k_1 \cdot k_2} = \frac{1,4}{0,78 \cdot 0,75} = 2,4 \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Iz diagrama temperaturnih razmer v peči odčitamo za temperaturo peči 850°C ter za površinsko obremenitev $p = 2,4$ [W/cm²] temperaturo spirale:

$$\vartheta_s = 910^\circ\text{C}$$

Zivljenjska doba spirale pri temperaturi $\vartheta_s = 910^\circ\text{C}$.

$$t_2 = t_1 \left(\frac{\vartheta_{s1}}{\vartheta_{s2}} \right)^{16} = 1,0 \cdot \left(\frac{800}{910} \right)^{16} = 0,131$$

Zahtevam iz gornjega primera bi zadostil material RAVNAL 1 ali RAVNAL 2, kot je to razvidno iz diagramov za površinske obremenitve spiral industrijskih peči.

d) Izkoristek peči

Običajno je izkoristek definiran s procentualnim kvocientom izgubljene energije (moči) ter koristno uporabljene energije (moči). Posebno pri pečeh, ki ne obratujejo s konstantnim režimom, moramo obračunavati energije, ker se moči s časom spreminjajo. Takšno ocenjevanje izkoristka se najbolje vidi iz sledečega primera:

Primer:

Jekleno os premera 360 mm in dolžine 3 m segrevamo v globinski peči.

Masa ogrevanca $m = 2680$ kg

Temperatura peči $\vartheta_o = 900^\circ\text{C}$

Končna temperatura vložka $\vartheta_k = 860^\circ\text{C}$

Temperatura zunanjih zidov $\vartheta_1 = 95^\circ\text{C}$

Površina vertikalnih zunanjih zidov $S_1 = 10$ m²

Površina horizontalnih zunanjih zidov $S_2 = 3$ m²

Specifična toplota $c = 580$ [Ws/kg deg]

Segrevalni čas $t = 4,2$ [h]

Čas zalaganja $t_{za} = 10$ [min.]

Koristna toplotna energija:

$$Q_k = m \cdot c (\vartheta_k - \vartheta_o) = \frac{2680 \cdot 580 \cdot 840}{3600 \times 1000} = 362 \text{ [kWh]}$$

Specifične površinske izgube zunanjih zidov pri 95°C :

$$p_1 = 745 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$p_2 = 800$ [W/m²] iz diagramov izgub zunanjih sten.

Izgubljena toplotna energija skozi obzidavo:

$$Q_{iz} = S_1 \cdot p_1 \cdot t + S_2 \cdot p_2 \cdot t = 10 \cdot 0,745 \cdot 4,2 + 3 \cdot 0,80 \cdot 4,2 = 41,2 \text{ [kWh]}$$

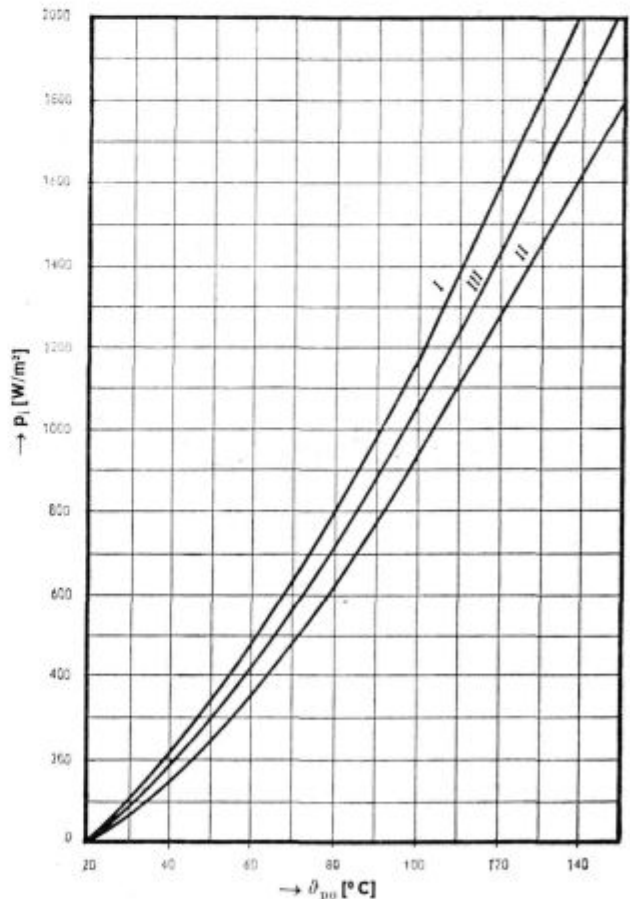
Izgube toplotne energije pri zalaganju:

$$Q_{za} = p_{iz} \cdot S_2 \cdot t_{za} = 110 \cdot 3 \cdot \frac{10}{60} = 55 \text{ [kWh]}$$

p_{iz} — je vzet iz diagrama temperaturnih razmer v peči za primer $\vartheta_p = 20^\circ\text{C}$ in $\vartheta_s = 900^\circ\text{C}$

Izkoristek:

$$\begin{aligned} \eta &= \left(1 - \frac{Q_{iz} + Q_{za}}{Q_k} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(1 - \frac{41,2 + 55,0}{362} \right) \cdot 100 = 73,4\% \end{aligned}$$

Površinske izgube zunanjih sten industrijskih peči

- I — vodoravne navzgor sevajoče površine
- II — vodoravne navzdol sevajoče površine
- III — navpične poševno sevajoče površine
- ϑ_{90} — temperatura površine
- p_i — površinske izgube peči

e) Regulacija temperature

V osnovi ločimo dvoje vrst reguliranja temperature v peči: programsko regulacijo, to je regulacijo, ki diktira časovni potek temperature v peči, ter regulacijo, ki časovno neodvisno omejuje temperaturo v mejah odstopanja. Kot vsaka avtomatska regulacija je tudi ta sestavljena iz vrste členov, ki sestavljajo zaprto verigo: merni, prenosni, regulacijski ter izvršni člen. Regulacija temperature se vrši na podlagi regulacije peči dovedene energije oziroma moči. Nas bosta zanimala predvsem merni ter izvršni člen, medtem ko je regulacijskih elementov toliko kot firm, ki jih proizvajajo.

Merni člen je naprava, ki spreminja vrednost temperature v neko drugo fizikalno veličino. V industrijskih pečeh sta običajno pirometer s termo členom ter optični pirometer. Le pri nizkih temperaturah se uporabljajo uporovni pirometri (termometri). Točnost celotnega regulacijskega sistema je odvisna od mernega člena, vendar je poleg točne transformacije fizikalnih veličin za merni člen bistvene važnosti, da je nameščen tako, da meri

vrednost, ki je najbližja povprečni temperaturi v peči. Kot smo videli, pa imamo v peči temperaturno polje s tolikimi različnimi vrednostmi, kot si jih lahko izmislimo. Nekih splošno veljavnih pravil za pravilno namestitev mernih členov v industrijskih pečeh ni, ker je praktično vsaka peč organska celota zase in je potrebno že pri konstrukciji peči misliti, kam se bodo namestili merni členi. Jasno je, da sama postavitev pirometra ne sme zmotiti temperaturnega polja, ki ga hočemo meriti, zato morajo biti odprtine, v katere je ta nameščen, dobro izolirane in tesnjene. Paziti je treba, da se izognemo najbližjemu sevanju spiral. Če se zamislimo v realne razmere uporovne industrijske peči, vidimo, da diktirajo temperaturo pirometra samega: temperatura spiral, temperatura obzidave, temperatura atmosfere ter temperatura vložka.

Namestiti merni člen tako, da ta meri, celotni sistem pa regulira ono ponderirano temperaturo, ki je najbližja stvarnemu povprečku, pa je seveda tak kompleksni problem, ki je rešljiv le ob dobri meri občutka ter prakse.

Vlečenje grelne žice



Pri tako zastavljenem vprašanju regulacije temperature s pomočjo regulacije moči postane takoj jasno, da z enim mernim členom lahko merimo samo najbolj grobo povprečje in da bo temu členu katerikoli priklopljen regulator uravnaval samo povprečje potrebne moči v peči. Gradientna temperatura polja bo vedno nehomogena, celo še takrat, ko je energetska situacija v peči postala stacionarna, tj. ob koncu segrevalne periode, ko so zahteve po enakomernosti segrevanja največje. Teoretično dobimo homogeno temperaturo polja v prostoru, kjer se izvrši kakršnakoli izmenjava toplotnih energij, le ob pogoju, da se v vsaki točki prostora meri vrednost temperature ter se v odvisnosti od odstopanja te od zahtevane dovaja tej točki ustrezna količina energije. Če apliciramo to na realne razmere v uporovni peči, bi to pomenilo, da je potrebno ves prostor peči razdeliti na čimvečje število con, v katerih se lokalna povprečja preko verige merilnih in izvršnih členov regulirajo zase, seveda na enotno temperaturo peči. Za vsako regulacijsko cono potrebujemo ob kompletni regulacijski enoti tako prirejene grelne elemente, da ti po eni strani ustrezajo geometriji cone, po drugi strani pa omogočijo enostaven priklop na izvor električne energije brez vmesnih elementov direktno na omrežno napetost.

Izvršni element regulacije uravnava dovedeno moč v odvisnosti od temperature. Uravnavanje moči po posameznih conah je lahko različno: ali se odklapljajo delni grelni elementi ali se izvrši preklon trikot-zvezda ali pa kombinirajo razne vzporedne in zaporedne vezave spiral. Pri zasnovi regulacije moči, tj. pri zasnovi izvršnih elementov temperaturne regulacije, je treba upoštevati:

— da se moč spiral spreminja s kvadratom napetosti, na katero so priključene;

— da se temperatura spiral pri hladni peči (vložku) spreminja s četrtem korenem iz moči;

— da je pri topli peči vpliv spremembe moči na temperature spiral malenkosten posebno pri manjših površinskih obremenitvah (glej diagram temperaturnih razmer v peči);

— da je treba stremeti za tem, da se preklon moči izvede na vse grelne elemente, ker se pri tem material obremenjuje enakomerno, kar rezultira pri zmanjšanju moči zmanjšanje površinske obremenitve spiral;

— da se pri vsakem povišanju temperature spirale za 4,5 % zmanjša njena življenjska doba za polovico.

Pri izbiri in nastavitvi regulacijskih enot je treba upoštevati, da se mora temperatura peči počasi približati svoji končni vrednosti: končna vrednost mora biti tangenta na krivuljo časovnega poteka pečne temperature. Vsako hitro približevanje končni vrednosti izziva nevarnost, da bo temperatura peči prekoračila to vrednost, ker ima celoten organizem peči tendenco naraščanja temperature. Vztrajnost v naraščanju ima vzrok v višjih temperaturah spiral in notranje obzidave, kar povzroči tudi pri prekinitvi dovajanja energije v peč še vedno povečanje povprečne temperature peči. Ker pomeni torej končna izravnava temperatur v peči povečanje povprečka, mora to upoštevati regulacija, tako da z zmanjšanjem dovedenih moči pred dosegom končne temperaturne vrednosti izkoristi akumulirano toplotno energijo onih delov peči, ki imajo višjo temperaturo. Za koliko stopinj se dvigne temperatura peči zaradi toplotne vztrajnosti, je praktično neizračunljivo, le poizkus ali izkustvo nam pove, koliko Celzijevih stopinj pred dokončno temperaturo mora regulator izvršiti preklon moči.

ZUSAMMENFASSUNG

I. Im Artikel sind die mechanischen, elektrischen und Wärmeigenschaften der heimischen Elektrowiderstandsmaterialie RAVNIN und RAVNAL aufgezeigt. Der Vergleich dieser Materiale mit ähnlichen von fremden Firmen erzeugten ist aufgestellt. Das Erzeugungsprogramm der Zelezarna Ravne umfasst die Fabrikation von gezogenem Draht aus RAVNIN und RAVNAL von \varnothing 6 mm bis zu den feinsten Dicken und deckt somit den Bedarf der gesamten Elektrowärme, die die Umwandlung der elektrischen in die Wärmeenergie auf Grundlage von Widerstandsheizkörpern bis zu den Temperaturen von 1000—1250° C umfasst.

Die Lebensdauer des Heizdrahtes als Grundmasstab für die Qualität des Materials ist von der Temperatur des Heizelements, Formung des eingebauten Materials, von der Atmosphäre, die das eingebaute Material umgibt, von seiner Oberflächenbelastung, von der Geometrie des Heizkörpers sowie der Zusammensetzung des tragenden Materials abhängig.

II. Die elektrothermische Berechnung der Heizelemente umfasst alle Faktoren, die die Konstruktion des Heizkörpers bestimmen. Durch Diagramme ist die Berechnung sehr erleichtert, weil man ansonsten zur optimalen Lösung nur mittels Versuchen kommen kann. So sind die zeitraubenden Rechenoperationen eventuell nur für die Endberechnung erforderlich.

III. Besonders ist die Berechnung des Industrieofens bearbeitet sowie die spezifischen Temperaturverhältnisse, die hier auftreten. Beim Entwurf der Temperaturregulierung muss berücksichtigt werden, dass die Genauigkeit der regulierten Temperatur neben der qualitativen Regulationsausrüstung und der übrigen spezifischen Elemente der Umwandlung der elektrischen in die Wärmeenergie im grossen Masse von den Regulationskreisen abhängig ist, die das Messglied über den Regulator mit dem Funktionsglied der Regulation verbinden.

SUMMARY

I Mechanical, electrical and heat characteristics of domestic material for electrical resistors Ravnin and Ravnal are described. Comparison is made with similar materials, made by foreign producers. Production program of Ravne Steel Mill includes production of drawn wire of Ravnin and Ravnal from 6 mm diameter down to the finest gauges. This dimension range covers all the design range for facilities transforming electric energy into heat on the basis of resistors up to the temperatures 1000°—1250° C.

Basic criteria for quality of heating wire is life time, which depends on forming of built-in material, atmosphere which surrounds heating element, surface load, geometry of heating element and chemical analysis of carrying material.

II Designing of heating elements should take in account all characteristics of material. Design is simplified by the use of diagrams since otherwise the optimum solution can be found by trial and error method only. This way tedious mathematical operations are needed for final computation only.

III Industrial furnace computation and temperatures in it is worked out separately. When designing temperature automatic control someone should take in account that accuracy of controlled temperature does not depend on quality of control equipment and other specific moments of electric energy transformation into heat only, but to the great extent also on the number of control loops connecting sensing element over controller with controlling element.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны механические, электрические и тепловые свойства домашних сплавов электросопротивления Ravnin и Ravnal; эти свойства сравнены с изделиями зарубежных фирм. Длительность проволоки как основная оценка качества зависит от конструкции и состава тела, от температуры и среды в котором оно находится, от загрузки поверхности и от формы проволоки. Электротепловой расчет элементов нагрева содержит все данные которые определяют конструкцию агрегата. Числовой расчет не

труден при помощи диаграмм иначе необходима практическое испытание. Рассмотрен также пример одной промышленной печи с её тепловыми данными. Надо принять во внимание что точность предвиденной температуры зависит от качества регулирующего механизма и остальных параметров превращения электро-энергии в тепловую. Металлургический завод Zelezarna Ravne (Югославия), производит упомянутую проволоку от малого до поперечного сечения 6 мм.

Odgovorni urednik: Joža Arh, dipl. inž. — Clani: Jože Rodič, dipl. inž., Janez Barborič, dipl. inž., Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Žagar, tehnični urednik

Tisk: ČP »Gorenjski tisk«, Kranj