

1.020.

# ŽELEZARSKI ZBORNIK

## VSEBINA

Kunc Peter, Železarna Jesenice	Stran
REGRESIJSKA ANALIZA VPLIVOV VLAGALNIH PARAMETROV NA SPECIFICNO PORABO TOPLO- TE IN STORILNOST MARTINOVKE	161
Babšek Franc, Železarna Jesenice	
SIMULACIJA OGREVANJA SLABOV V POTISNIH PECEH	169
Rodič Alenka, Rodič Jože, Železarna Ravne	
BRZOREZNA JEKLA	177
Rode Boštjan, Železarna Ravne	
ANALIZA STATISTIČNE PORAZDELITVE NA ELEKTRONSKEM RACUNALNIKU	189
Uranc Franc, Železarna Ravne	
ŽILAVOST ORODNIH JEKEL	205
Matitz Jože, Železarna Ravne	
DOMACE EKSOTERMNE MASE V JEKLOLIVAR- NI. METODE KONTROLE IN IZBOLJSANJE IZ- PLENA	215
Grzina Jože, Železarna Ravne	
POVEČANJE PRODUKTIVNOSTI S PESKOMETOM PRI IZDELOVANJU JEKLENE LITINE	221
Goršek Martin, Železarna Store	
TOPLOTNA PREVODNOST ŽELEZOVIIH LITIN	225
Lenasi Stane, Železarna Ravne	
STATISTIČNA ANALIZA LIVARSKIH SUROVIN	235

1967 · LETO I **3**



## VSEBINA

	Stran
Mag. Kunc Peter, dipl. inž., Železarna Jesenice <b>Regresijska analiza vplivov vlagalnih parametrov na specifično porabo toplote in storilnost martinovke</b> . . . . .	161
DK: 536.68 : 669.183.7 ASM/SLA : D2a; W 18r; S12j	
Babšek Franc, dipl. inž., Železarna Jesenice <b>Simulacija ogrevanja slabov v potisnih pečeh</b> . . . . .	169
DK: 621.785.1 : 621.783.223.2 ASM/SLA : F21b; F23; 6-66 W2oh	
Rodič A., dipl. inž., Rodič J., dipl. inž., Železarna Ravne <b>Brzorezna jekla</b> . . . . .	177
DK: 669.14.018.252.3 : 620.18 : 621.785 ASM/SLA : TSm; M21c; J	
Rode Boštjan, dipl. inž., Železarna Ravne <b>Analiza statistične porazdelitve na elektronskem računalniku</b> . . . . .	189
DK: 519.28 : 681.142 ASM/SLA : S12; U4k	
Uranc Franc, dipl. inž., Železarna Ravne <b>Žilavost orodnih jekel</b> . . . . .	205
DK: 669.14.018.25 : 539.5 : 620.174/.175 ASM/SLA : TSb; Q1; Q2; Q5; Q6	
Matitz Jože, Železarna Ravne <b>Domače eksotermne mase v jeklolivarni. Metode kontrole in izboljšanje izplena</b> . . . . .	215
DK: 621.746 : 658.526 ASM/SLA: E22n; E25n; ADm; 17—13	
Grzina Jože, Železarna Ravne <b>Povečanje produktivnosti s peskometom pri izdelovanju jeklene litine</b> . . . . .	221
DK: 621.744.4 ASM/SLA: E19	
Goršek Martin, inž., Železarna Štore <b>Toplotna prevodnost železovih litin</b> . . . . .	225
DK: 536.24 : 669.13 ASM/SLA: P11h; C1r	
Lenasi Stane, dipl. inž., Železarna Ravne <b>Statistična analiza livarskih surovin</b> . . . . .	235
DK: 621.742.4 : 519.24/28 ASM/SLA: E18; o12	

## CONTENTS

	Page
Mag. Kunc Peter, dipl. inž., Železarna Jesenice <b>Regression Method of Charging Parameters Influence on Heat Consumption and Production Rate of Open Hearth Furnace . . . . .</b>	161
DK: 536.68 : 669.183.7 ASM/SLA : D2a; W 18r; S12j	
Babšek Franc, dipl. inž., Železarna Jesenice <b>Slab Furnace Simulation . . . . .</b>	169
DK: 621.785.1 : 621.783.223.2 ASM/SLA : F21b; F23; 6-66 W2oh	
Rodič A., dipl. inž., Rodič J., dipl. inž., Železarna Ravne <b>High Speed Tool Steels . . . . .</b>	177
DK: 669.14.018.252.3 : 620.18 : 621.785 ASM/SLA : TSm; M21c; J	
Rode Boštjan, dipl. inž., Železarna Ravne <b>Statistical Distribution Analysis on Digital Com- puter . . . . .</b>	189
DK: 519.28 : 681.142 ASM/SLA : S12; U4k	
Uranc Franc, dipl. inž., Železarna Ravne <b>Impact Strenght of Tool Steels . . . . .</b>	205
DK: 669.14.018.25 : 539.5 : 620.174/.175 ASM/SLA : TSb; Q1; Q2; Q5; Q6	
Matitz Jože, Železarna Ravne <b>Domestic Exothermic Feeding Materials in Steel Foundry Methods of Control and Yield Improve- ment . . . . .</b>	215
DK: 621.746 : 658.526 ASM/SLA: E22n; E25n; ADm; 17—13	
Grzina Jože, Železarna Ravne <b>Sandthrwer . . . . .</b>	221
DK: 621.744.4 ASM/SLA: E19	
Goršek Martin, inž., Železarna Store <b>Heat Conductivity of Ferrous Alloys . . . . .</b>	225
DK: 536.24 : 669.13 ASM/SLA: P11h; CIr	
Lenasi Stane, dipl. inž., Železarna Ravne <b>Statistical Analysis of Foundry Raw Materials . . . . .</b>	235
DK: 621.742.4 : 519.24/28 ASM/SLA: E18; o12	

## **Regresijska analiza vplivov vlagalnih parametrov na specifično porabo toplote in storilnost martinovke**

*Na storilnost in specifično porabo toplote vpliva veliko število faktorjev. Vplivni faktorji pa so povezani tudi med seboj, kar še bolj zamota eksplicitno izražanje iskanih funkcij. Posebna statistična metoda — regresijska analiza omogoča, da moremo izraziti množico vplivov neodvisno drug od drugega v dokaj poenostavljeni matematični obliki. V članku je obravnavana raziskava pri martinovkah v Zelezarni Jesenice.*

### **UVOD**

Ekonomičnost pridobivanja jekla v martinovkah je že zelo točno podana, če imamo dva podatka in sicer: storilnost in specifično porabo toplote.

Oba pokazatelja izražata vplive niza faktorjev. Nekateri raziskovalci upoštevajo pri svojih raziskavah tudi štirideset različnih vplivov. Po velikosti ti različni faktorji ne delujejo enako. Večkrat lahko vpliv enega ali drugega faktorja pri posameznih martinovkah zanemarimo. Včasih pa pri raziskavah upoštevamo le nekaj najvplivnejših, ker si tako skrajšamo delo in vendar zajamemo še vedno dovolj veliko število vplivnih faktorjev.

Prav zaradi tako velike množice različnih vplivov in »samovoljne« izbire vplivnih faktorjev, je primerjanje optimalnih parametrov med različnimi martinovkami zelo problematično, včasih pa celo nemogoče. Kar je za eno peč nujnost, da dosežemo ugodno storilnost in specifično porabo, to na drugi peči komaj kaj vpliva in obratno. Podatki, ki jih navajajo posamezni avtorji, lahko povsem točno veljajo za obravnavano peč, ne moremo pa si z njimi pomagati pri neki drugi peči, tako da bi kar prenesli nekaj pogojev, ostale pa prezrli, čeprav so pri prejšnji peči tako majhni, da bi jih lahko zanemarili. Edini izhod iz te zadrege je stalno spremljanje procesa v lastnih martinovkah in eksperimentiranje na teh pečeh. Končna pokazatelj, to sta storilnost martinovke in specifična poraba toplote na tono proizvedenega jekla, pa kažeta koliko smo napredovali mi in koliko drugi.

Vplivni faktorji pa so povezani tudi med seboj, kar še povečuje težave pri eksplicitnem izražanju posameznih vplivov. Spreminjanje enega faktorja lahko povzroči nujno spremembo drugega faktorja pa bi lahko iz tega sklepali, da prvi faktor sploh ne vpliva na storilnost in specifično porabo toplote, ali pa bi ta vpliv precenili.

Pri obravnavanju takih problemov imamo na razpolago posebno matematično disciplino, ki omogoča izluščiti vplive posameznih faktorjev. Imenujemo jo regresijska analiza. Zal je ta metoda zelo dolgovezna in postane elegantna šele pri uporabi elektronskih računskih strojev. Vse operacije, ki so v bistvu zelo enostavne, opravijo elektronski računalniki zelo hitro in poljubno natančno. Natančnost je omejena edino z natančnostjo vložnih podatkov, zato je potrebno osnovne podatke izbirati zelo skrbno in razumno. Pri nepravilnih osnovnih podatkih bi lahko naredili sicer matematično pravilne, dejansko pa neuporabne zaključke o optimalnih pogojih.

### **IZBIRA VPLIVNIH PARAMETROV IN MARTINOVK**

V jeklarni smo za obdelavo podatkov izbrali dve martinovki: »V«, ki ima imenski vložek 80 ton in »A«, ki ima imenski vložek 60 ton. Po zmogljivosti predstavljata v martinarni sredino in zgornjo mejo. Obe peči pa si ležita tudi diametralno nasproti, tako da smo lahko preučevali tudi vpliv lokacije. Lokacija namreč bistveno vpliva na hitrost zakladanja mrzlega vložka in delež tekočega grodlja.

Za vplivne faktorje pri regresijski analizi smo izbrali naslednje parametre:

- številka šarže po zadnjem generalnem mrzlem popravilu
- število voz oziroma korit starega železa
- skupni vložek
- proizvodnja peči v eni šarži
- vlagalni čas
- količina ogljika v prvi predprobi
- razlika med količinama ogljika v prvi predprobi in končni probi
- dovod goriva med zakladanjem in prvo polovico taljenja
- delež mrzlega in
- delež tekočega grodlja.

Za vsako martinovko smo obdelali 420 šarž. Pri peči »V« smo upoštevali šarže v obdobju pred in po mrzlem remontu, pri peči »A« pa v obdobju med dvema mrzlima remontoma.

Vplivne faktorje imenujemo tudi neodvisne spremenljivke. Po vrsti imajo naslednji fizikalni pomen:

$X_1$ (l)	številka šarže po zadnjem mrzlem popravilu
$X_2$ (kg)	masa skupnega vložka
$X_3$ (l)	število voz starega železa
$X_4$ (kg)	proizvodnja martinovke v eni šarži
$X_5$ (kg)	masa skupnega grodlja
$X_6$ (kg)	masa tekočega grodlja
$X_7$ (%/100)	delež ogljika v prvi predprobi
$X_8$ (%/100)	razlika v deležu ogljika
$X_9$ (enota planimetra)	poraba goriva v času od začetka zakladanja do preboda
$X_{10}$ (enota planimetra)	poraba goriva v času od preboda do začetka zakladanja
$X_{11}$ (enota planimetra)	skupna poraba goriva na šaržo, za čas od preboda do preboda
$X_{12}$ (h)	vlagalni čas
$X_{13}$ (h)	čas od začetka zakladanja do preboda
$X_{14}$ (h)	skupni čas od preboda do preboda
$X_{15}$ (enota planimetra)	dovod goriva v času zakladanja in prvi polovici taljenja, v poprečju na časovno enoto.

Osnovna zahteva pri statistični obdelavi je ta, da ostanejo vrednosti v izvorni obliki in jih šele v končnem rezultatu izrazimo v ustreznih enotah. Tako so vrednosti za  $X_9$ ,  $X_{10}$ ,  $X_{11}$  in  $X_{15}$  odčitane na planimetru in jih je treba na koncu pomnožiti s konstanto planimetra, da dobimo količino goriva oziroma toplote.

Storilnost in specifična poraba toplote sta izračunani z ozirom na neto in bruto čas. Tako dobimo še štiri parametre, ki jih v statistiki imenujemo odvisne spremenljivke. Te pa imajo naslednji fizikalni pomen:

$Y_1$ (kg/h)	neto storilnost
$Y_2$ (kg/h)	bruto storilnost
$Y_3$ (kcal/kg)	neto specifična poraba toplote
$Y_4$ (kcal/kg)	bruto specifična poraba toplote.

Vse vrednosti so izračunane z elektronskim računalnikom natančno do enic pri masnih enotah (kg), specifični porabi toplote (kcal/kg), procentih (%/100) in enotah z dimenzijo (l), pri časovnih enotah pa do stotinke ure. Čas je podan v decimalnem sistemu.

### REGRESIJSKA ANALIZA

Podatki vseh 420 šarž za posamezno peč so v IBM - elektronskem računalniku razvrščeni po velikosti v 14 razredov s po 30 šaržami. Število

razredov je dovolj veliko, da lahko določimo tudi krivuljno odvisnost med vrednostmi  $X_i$  in  $Y_j$ . Srednja vrednost vsakega razreda pa je z ozirom na veliko število šarž prav tako dovolj reprezentativna in je verjetnost slučajne vrednosti zelo majhna.

Nekaj zanimivih regresij je obdelanih bolj podrobno:

#### Število voz $X_3$

Pri številu voz je potrebno poudariti, da štejejo 3 korita za en voz. Storilnost za martinovko »V« je podana v odvisnosti od števila voz z naslednjo enačbo:

$$Y_1 = 10330 + 15,1 X_3 - 1,39 X_3^2$$



Odvisnost je zelo izrazita, kar lahko vidimo tudi na diagramu 1. Pri zmanjšanju števila voz od 32 na 10 se poveča storilnost za 0,98 t/h, torej skoraj za 10%. Pripravi vložka je potrebno posvetiti posebno pozornost. Za vsak voz, ki odpade zaradi bolj zgoščenega nakladanja, je pri istem tempu zakladanja na eno korito oziroma voz, povečana storilnost za 0,043 t/h. Vprašanje ekonomskega računa je, koliko ljudi se izplača imeti na pripravi vložka.

Specifična poraba toplote v odvisnosti od števila voz je podana za peč »V« z enačbo:

$$Y_3 = 1379 + 0,088 X_3 + 0,1124 X_3^2$$

Tudi tu optimum še ni dosežen. Specifična poraba močno narašča z večanjem števila voz.

#### Vlagalni čas $X_{12}$

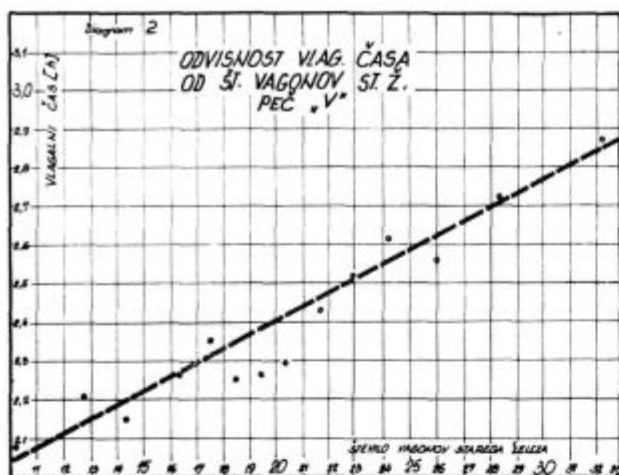
Število voz je ozko povezano z vlagalnimi časom. Korelacijska enačba med časom zakladanja  $X_{12}$  in številom voz  $X_3$  je naslednja:

$$x_{12} = 0,4012 + 0,03624 x_3$$

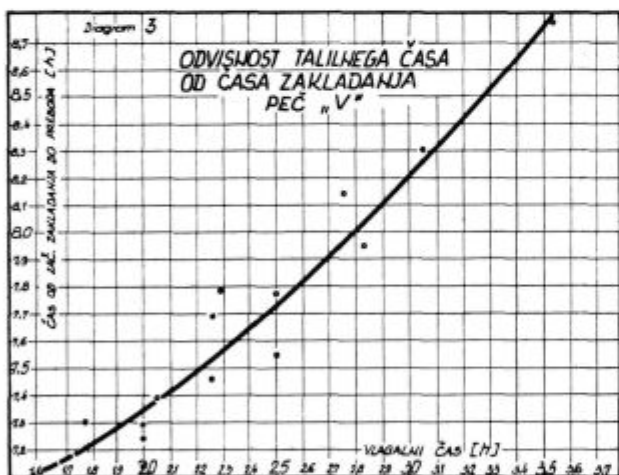
pri čemer je:

$$\begin{aligned} X_{12} &= x_{12} + 2,0 \\ X_3 &= x_3 + 20 \end{aligned}$$

Odnosnosti so podane tudi v diagramu 2.

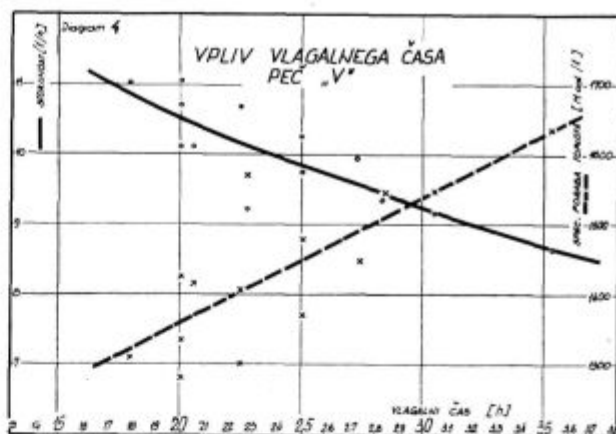


Raziskana je bila tudi odvisnost med vlagalnimi in neto časi. Korelacija med tema dvema vrednostima je zelo tesna in ima krivuljni značaj. Pri krajših vlagalnih časih ne pridobimo toliko na neto času šarže, kot pridobimo pri daljših vlagalnih časih. Ta zaključek, ki ga daje enačba je tudi povsem logičen, čeprav je v spodnjem delu le delno presenetljiv. Diagram 3 prav lepo kaže, da še daleč ni dosežen optimalni čas. Potrebni so krajši vlagalni časi, da bi prišli do optimuma.



Že zelo groba ocena kaže, da pri neto času toliko pridobimo, kolikor krajši je vlagalni čas. Pri vlagalnem času 3,5 h je neto čas šarže 8,75 h, pri vlagalnem času 2,5 h pa »le« še 7,75 h, torej za eno uro krajši vlagalni čas prinese tudi za enak iznos krajši neto čas. Pri nižjih vrednostih raziskane intervala pridobimo nekoliko manj. Ob skrajšanju vlagalnega časa za še 0,54 h, torej na vlagalni čas 2,0 h pridobimo na neto času le 0,4 h itd.

Zelo ozka povezava med neto in vlagalnim časom se vidi tudi na diagramu 4, ki ponazarja storilnost v odvisnosti od vlagalnega časa. Na dlani je, da je vlagalni čas odločujoč za storilnost peči.



Martinovka »V« kot naprava ima daleč večje zmogljivosti, kot pa jih določajo delovni pogoji pred pečo.

### Grodelj

Pri grodlju je treba upoštevati tudi dejstvo, da je pri večjem vložku grodlja tudi večji skupni vložek, ker je količina starega železa več ali manj konstantna. Navidezno povečanje storilnosti je zato bolj rezultat povečanja vložka.

Bolj zanimiva pa je odvisnost storilnosti in specifične porabe toplote od deleža tekočega grodlja. Tu pa moramo pri interpretaciji tega vpliva upoštevati tudi to, da se pri večjem deležu tekočega grodlja rahlo večja tudi skupna masa vložka in to, da se pri večjem deležu tekočega grodlja nekoliko skrajšajo vlagalni časi.

Vpliv tekočega grodlja na storilnost peči »V« je podan z enačbo:

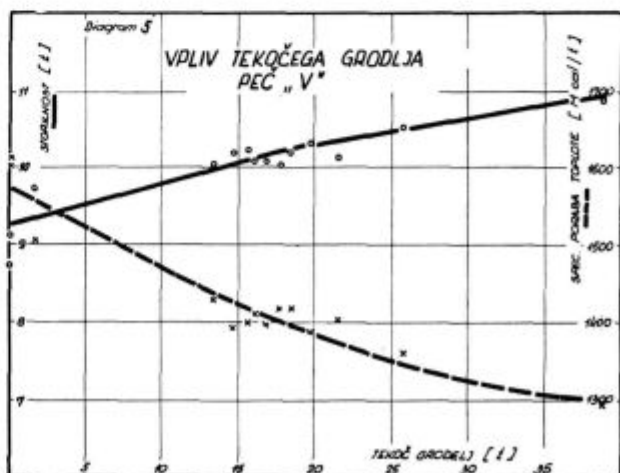
$$Y_1 = 9535 + 16,173 X_6 + 0,6539 X_6^2$$

Prav tako je vpliv tekočega grodlja podan tudi za specifično porabo toplote:

$$Y_3 = 1574 - 11,87 X_3 + 0,1245 X_3^2$$

pri tem je v obeh enačbah vstavljena vrednost za tekoči grodelj  $v$  (t).

Specifična poraba toplote pri samo mrzlem grodlju (diagram 5) je zelo visoka in znaša



1574 kcal/kg jekla, pade pa na 1298 kcal/kg pri 39 t tekočega grodlja, torej za celih 276 kcal/kg. Prihranek je vzpodbuden in še nakazuje izboljšanje ob izboljšanjem delu plavžev. V organizaciji dela na plavžu in v martinarni bo glede gospodarstva s tekočim grodljem treba še marsikaj urediti.

Martinovka »A« ima veliko večji delež tekočega grodlja, saj ga dobi povprečno na šaržo kar 21.356 kg. Ob povprečnem vložku 59.070 kg znese pri peči »A« delež tekočega grodlja celo 36,2 %. Nasprotno pa ima peč »V« veliko nižji delež tekočega grodlja in znaša le 15.670 kg, kar znese pri skupnem vložku 80.586 kg le 19,4 %.

### Dovod toplote

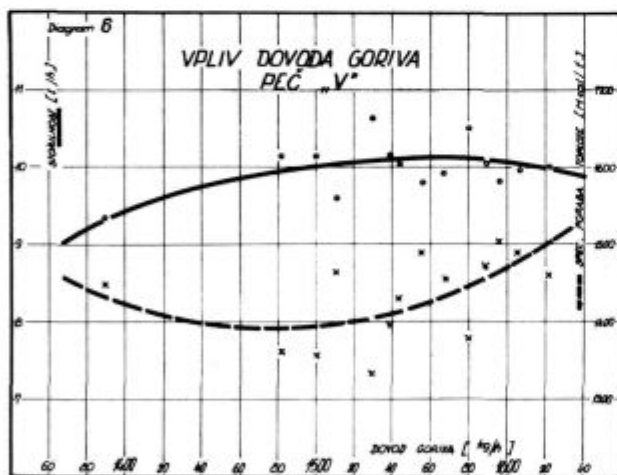
Dovajanje toplote v posameznih fazah taljenja je odločujočega pomena za specifično porabo goriva in tudi za storilnost martinovke. Podatki, ki jih tu obdelujemo, dajejo predvsem sliko dogajanj v začetku taljenja, pa sem zato raziskal samo dovod goriva v fazi zakladanja in prvi polovici taljenja. Podatki pod  $X_{15}$  dajejo za vsako šaržo povprečno vrednost dovajanja mazuta v enoti časa omenjenega intervala.

Korelacijska enačba med storilnostjo in dovodom goriva je za peč »V« naslednja:

$$Y_1 = 8934 + 31,06 x_{15} + 0,205 x_{15}^2$$

pri tem pa je  $x_{15} = X_{15} - 500$

V diagramu je vrisana tudi krivulja za specifično porabo toplote, ki pa ima naslednjo matematično obliko:



$$y_3 = 1486 - 3,91 x_{15} + 0,0403 x_{15}^2$$

Za storilnost doseže krivulja maksimum pri  $X_{15} = 576$  točk ali 1555 kg mazuta/h in znaša 10.110 kg jekla/h. Za specifično porabo toplote pa ima krivulja minimum pri  $X_{15} = 549$  točk ali 1482 kg mazuta/h. Pri večanju porabe goriva nad to vrednost se sicer veča storilnost, toda zelo počasi, medtem ko specifična poraba toplote hitro narašča. Pri manjšanju dovoda goriva se storilnost še bolj znižuje, ponovno pa se povečuje specifična poraba toplote.

Diagram 6 kaže, da je optimalno področje za vodenje procesa pri intenzivnosti dovajanja goriva med 549 in 576 točkami oziroma med 1482 do 1555 kg mazuta/h v času zakladanja in prvi polovici taljenja.

### REGRESIJSKE ENAČBE

V prejšnjem poglavju sem podal nekaj korelacij med spremenljivko  $x_i$  in  $Y_j$ . Pri tem so dani samo diagrami za  $y_1$  in  $y_3$ , ostali za  $y_2$  in  $y_4$  pa so vsi izpuščeni. Predaleč nas bi vodilo, če bi v tem članku obravnavali analize med vsemi petnajstimi  $X_i$  in štirimi  $Y_j$ .

Iz diagramov lahko vidimo, da so spremembe storilnosti in specifične porabe toplote lahko hitre ali počasne, pozitivne ali negativne, skoraj linearne ali močno ukrivljene itd.

Kljub veliki statistični verjetnosti zaradi velikega vzorca, pa rezultati ne kažejo prave vrednosti spremembe storilnosti in specifične porabe toplote pri spremembi posameznih faktorjev.

Faktorji  $X_i$ , ki vplivajo na storilnost in specifično porabo toplote so med seboj povezani, prejšnja izvajanja pa to zvezo zanemarjajo. Poglejmo samo nekaj šarž in primerjajmo število voz, vlagalni čas in količino tekočega grodlja. Pri večjem deležu tekočega grodlja imamo manjše število voz in tako tudi krajši vlagalni čas. Med vlagalnim časom in deležem tekočega grodlja je torej neka zveza. Veliko bolj pa se stvari zamotajo, če povečani delež tekočega grodlja poveča tudi skupni vložek. Pri tem lahko ostane vlagalni čas konstanten, ker je število voz starega železa in mrzlega grodlja ista in se je povečala le količina tekočega grodlja in za prav toliko tudi skupni vložek v tisti šarži.

Vpliv posameznih faktorjev je lahko le navidezno pozitiven, ker k temu pripomorejo ostali, ki so s tem pozitivno korelirani. Število voz recimo vpliva tako, da je pri večjem številu voz storilnost manjša. Vprašanje je, če je to res, saj vemo, da večje število voz podaljša tudi vlagalni čas in ker je to izrazito pozitivno korelirana količina s številom voz in še bolj izrazito negativno korelirana s storilnostjo.

Krivuljna odvisnost storilnosti in specifične porabe toplote od posameznih faktorjev ostane tako tudi po upoštevanju medsebojnih korelacij še nadalje krivuljna. Premakne se le optimum. Ti premiki niso veliki in lahko dobljene vrednosti vzamemo kot osnovo za optimizacijo posameznih vlagalnih faktorjev.

Izrazito negativno ali pozitivno korelirana števila sem obdelal z metodo večkratnih korelacij. Pri tej metodi lahko vplive posameznih faktorjev izoliramo od vplivov ostalih, čeprav so med njimi trdne zveze. V končnem iznosu nastopajo vse spremenljivke samo v linearnih zvezah. Funkcijo lahko pišemo v obliki:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_n x_n$$

Odvisnost  $y_1$  od posameznih  $x_i$  je tudi dovolj očitna, saj je potrebno le zadržati ostale  $x_i$  konstantne pa imamo med  $y$  in določenim  $x_i$  v najčistejši obliki. Enačba ima v statistiki posebno ime — posplošena regresijska enačba. Če dobimo za katerikoli koeficient  $b$  izrazito pozitivno ali negativno vrednost vemo, da to predstavlja korelacijo med  $y$  in odgovarjajočim  $x_i$ , ki ni posledica korelacij med tem  $x_i$  in ostalimi  $x_i$ , ker je vpliv teh  $x_i$  upoštevan v ostalih členih.

Pri izbiri vplivnih faktorjev sem se omejil samo na najvplivnejše. Z ozirom na linearno odvisnost v regresijski enačbi so neprimerni za obdelavo vsi faktorji z izrazito krivuljnim značajem, ki pa bi v linearni zvezi skoraj ne pokazali spremembe. Taka je na primer odvisnost storilnosti od razlike ogljika pri prvi predprobi in končni probi. Iskal sem samo faktorje:  $X_1$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  in  $X_{12}$ .

Pri enačbi ne morem uporabljati absolutnih vrednosti, temveč moram tvoriti relativne vrednosti po enačbi:

$$x_i = X_i - X_1$$

pri tem pomeni  $X_1$  srednjo vrednost vseh 420 šarž. Ko tako dobim vse  $x_i$  moram vsakega pomnožiti z ostalimi  $x_i$  in tvoriti vsote. Te vsote omogočajo izračun koeficientov  $b_1, b_2 \dots b_6$ . Regresijska enačba za storilnost martinovke »V« ima obliko:

$$y_1 = 0,516 x_1 - 18,956 x_3 + 0,123 x_4 + 0,0304 x_5 + 0,0265 x_6 - 755,34 x_{12}$$

Vpliv številke šarže je presenetljiv, saj bi komaj pričakovali, da bi storilnost peči z njeno starostjo naraščala. Pri zbiranju podatkov za peč »V« sem upošteval 2 periodi — pred in po generalnem remontu, od katerih je bila prva zajeta od številke 232 do končne 340, druga pa od začetka do številke 333. Ker je »šla« prva serija nekoliko slabše od druge, je rezultat — pozitivna računsko korelacija utemeljena. Prispevek k storilnosti pa ni kaj velik, saj bi pri številki šarže, ki je za 100 enot višja od povprečne vrednosti, bila storilnost večja le za 51,6 kg/h.

Število voz je rahlo negativno korelirano s storilnostjo peči. Pri peči »V« so vozovi prelahki pa zato z različnim številom voz nekaj izgubimo na storilnosti. Ta padec storilnosti je večji kot pri spremembi starosti peči, saj je pri razliki desetih voz, kar naj bi bilo maksimalno možno število, ta diferenca 190 kg/h.

Zelo velik vpliv ima na storilnost peči proizvodnja na eno šaržo, oziroma vložek. Zaradi razmeroma tesne korelacije med  $X_4$  in  $X_2$  lahko vstavimo tudi  $X_2$ , če upoštevamo korelacijski odnos. Pri povečanem vložku, ki bi dal za 10 ton večjo proizvodnjo povprečne šarže, bi storilnost porasla za 1230 kg/h. To pa je že velik korak k povečanju storilnosti martinovke. Seveda ne moremo vstaviti v zgornji enačbi večjih vrednosti za  $X_4$ , ker bi pri večjih vrednostih izračunani koeficient 0,123 ne veljal več.

Pri grodlju v obdelanem področju ni dosežen maksimum. Optimalna vrednost leži pri višjih deležih grodlja pa je zato korelacija pozitivna. Pri 10-tonskem povečanju skupnega ali pa samo tekočega grodlja bi dobili povečano storilnost za 304 kg/h oziroma 261 kg/h.

Korelacija storilnosti z vlagalnim časom v tej enačbi ni tako ostra kot kaže to prvotni diagram. Pri skrajšanju vlagalnega časa za 1 uro pridobimo na storilnosti 757 kg/h. Odvisnost ni tako velika, ker so diferencirani ostali vplivi — predvsem število voz in tekoči grodelj.

Regresijska enačba za specifično porabo toplote pri martinovki »V« ima obliko:

$$y_3 = -0,0754 x_1 - 0,219 x_3 - 0,0237 x_4 + 0,0026 x_5 - 0,0013 x_6 + 137,12 x_{12}$$

Značilno za to enačbo je nasprotni predznak močno koreliranih faktorjev. Pri slabo koreliranih faktorjih ostane predznak isti kot pri prejšnji enačbi.

Številka šarže po zadnjem mrzlem remontu zmanjšuje porabo toplote na enoto proizvedenega jekla. To je tako kakor prej pri storilnosti posledica različnega delovanja martinovke v dveh serijah.

Za negativno korelacijo s proizvodnjo peči na eno šaržo lahko rečemo le, da je proti pričakovanju visoka. Pri 10-tonskem povečanju vložka bi se znižala specifična poraba toplote skoraj za 237 Mcal/t. Ura prihranka na vlagalnem času bi prinesla še za nadaljnjih 138 Mcal/h nižjo specifično porabo toplote.

Tekoči grodelj je pri tem vzorcu vplival na specifično porabo toplote razmeroma malo, kar je lahko posledica vlivanja grodlja ob ne najbolj primernem času.

Za martinovko »A« sem dobil obliko regresijske enačbe z naslednjimi koeficienti:

$$y_1 = -0,335 x_1 + 13,31 x_3 + 0,159 x_4 - 0,0105 x_5 - 0,0157 x_6 - 684,48 x_{12}$$

Pri tej peči sem zajel eno samo serijo, zato sem dobil tudi pričakovano negativno korelacijo za storilnost peči in število šarž po mrzlem remontu. Prispevek pri mlajši peči pa tudi tu ni velik. Pri 100 šaržah mlajše peči je storilnost večja le za 33,5 kg/h.

Presenetljiva je korelacija s številom voz. Zaradi rahle zveze lahko tudi to korelacijo vzamemo kot komaj opazno in je njen pozitiven značaj lahko posledica zanemarjenih vplivov. Vsekakor pa je vpliv števila voz pri tej peči razmeroma majhen.

Z večanjem deleža grodlja lahko na tej martinovki še nekoliko povečamo storilnost. Tekočega grodlja pa je že skoraj preveč in bi z njegovim večanjem storilnost le upadla.



Vlaga čas je močno negativno koreliran. Pri skrajšanju vlagalnega časa za 1 uro bi pridobili na storilnosti kar 684 kg/h.

Regresijska enačba za specifično porabo toplote pri martinovki »A« ima obliko:

$$y_3 = 0,1529 x_1 + 4,083 x_3 - 0,0337 x_4 - 0,00082 x_5 - 0,0052 x_6 + 62,52 x_{12}$$

Značilno za to enačbo je večanje specifične porabe toplote pri starejši peči in daljšem zakladanju. Število voz kaže rahlo pozitivno korelacijo. Skupni grodelj in tekoči grodelj sta negativno korelirana. Odvisnost teh dveh pa je razmeroma majhna. Velik vpliv na specifično porabo toplote pa ima proizvodnja peči na eno šaržo, saj znaša prihranek pri 10-tonskem povečanju vložka kar 337 Mcal/t.

Vrednosti, ki jih dobimo za posamezne koeficiente v omenjenih regresijskih enačbah, so določene za šarže, ki imajo vrednosti za posamezne veličine v povsem določenem območju. Ekstrapolacije za vrednosti izven območja osnovnega vzorca niso dopustne brez posebnih dodatnih analiz.

Vse vrednosti so relativne in jih je treba prišteti oziroma odšteti od srednjih vrednosti v tabeli 1.

Tabela 1 — Srednje vrednosti

Spremenljivke	»V«	»A«
x <sub>1</sub> (l)	196	226
x <sub>2</sub> (kg)	80.586	59.070
x <sub>3</sub> (l)	20	22
x <sub>4</sub> (kg)	76.322	55.405
x <sub>5</sub> (kg)	45.627	30.082
x <sub>6</sub> (kg)	15.670	21.356
x <sub>7</sub> (0,01 ‰)	106	92
x <sub>8</sub> (0,01 ‰)	94	74
x <sub>9</sub> (Gcal/šaržo)	109	64,4
x <sub>10</sub> (Gcal/šaržo)	11	7,9
x <sub>11</sub> (Gcal/šaržo)	120	72,3
x <sub>12</sub> (h)	2,41	2,38
x <sub>13</sub> (h)	7,70	7,02
x <sub>14</sub> (h)	8,92	8,19
x <sub>15</sub> (kg/h)	1.543	991
y <sub>1</sub> (kg/h)	10.015	7.986
y <sub>2</sub> (kg/h)	8.774	7.014
y <sub>3</sub> (Mcal/t)	1.431	1.173
y <sub>4</sub> (Mcal/t)	1.581	1.321

#### OPTIMALNI DOVOD GORIVA KOT FUNKCIJA VLAGALNEGA ČASA

Hitrejše zakladanje zahteva večjo dobavo toplote in obratno počasnejše zakladanje manjšo dobavo toplote. Za ugotovitev konkretnih vrednosti pri posameznih pečeh sem si pomagal z re-

gresijsko analizo razvrščenih vrednosti z oziroma na posamezne časovne intervale. Rezultati teh raziskav so v tabeli 2.

Tabela 2

Vlaga čas	Optimalni dovod goriva
1,00	1.790
1,25	1.730
1,50	1.670
1,75	1.610
2,00	1.560
2,25	1.500
2,50	1.440

#### REZULTATI PREIZKUSOV

Martinovka »V« dela bistveno slabše od martinovke »A« pa so zato na osnovi regresijskih enačb bili izbrani optimalni pogoji za peč »V«. Skušali smo skrajšati vlagalne čase vsaj za 1 uro. V času zakladanja in v prvi polovici taljenja smo kurili po tabeli 2. Povečali smo delež tekočega grodlja, skušali smo znižati število korit. Ostale parametre smo prepustili slučajnostnim vplivom.

Srednje vrednosti te preizkusne serije, ki je imela 29 šarž so podane v tabeli 3.

Tabela 3

x <sub>1</sub> (l)	88
x <sub>2</sub> (kg)	80.334
x <sub>3</sub> (l)	18
x <sub>4</sub> (kg)	75.594
x <sub>5</sub> (kg)	45.186
x <sub>6</sub> (kg)	23.510
x <sub>7</sub> (0,01 ‰)	99
x <sub>8</sub> (0,01 ‰)	83
x <sub>9</sub> (Gcal/šaržo)	93
x <sub>10</sub> (Gcal/šaržo)	9
x <sub>11</sub> (Gcal/šaržo)	102
x <sub>12</sub> (h)	1,41
x <sub>13</sub> (h)	6,38
x <sub>14</sub> (h)	7,52
x <sub>15</sub> (kg/h)	1.680
y <sub>1</sub> (kg/h)	11.855
y <sub>2</sub> (Mcal/t)	1.228

Rezultati te preizkusne serije so zelo vzpodbudni. Storilnost se je povečala za 18 ‰, specifična poraba pa je padla za 14 ‰.

#### ZAKLJUČEK

Raziskave so pokazale, da je regresijska analiza primerna metoda za obravnavanje problemov, kot je npr. zakladanje martinovk. Za zadovoljivo sklepanje pa moramo imeti na razpolago dovolj velik vzorec.

Slaba stran te metode je v tem, da zahteva za racionalno delo elektronski računalnik, kar pa je pri sedanjem razvoju komaj še slabost, saj se elektronski računalniki vse bolj širijo in jih bodo v kratkem tudi pri nas imela vsa malo večja podjetja.

Prednost te metode je predvsem v tem, da nam omogoča z najmanjšim možnim številom raziskav na aktivnih agregatih doseči optimalne pogoje.

#### Literatura

1. G. Udny Yule and M. G. Kendall: An Introduction To The Theory of Statistic. Fourteenth Edition, Hafner Publishing Company.
2. W. J. Dixon and F. J. Massey: Introduction To Statistical Analysis. Second Edition, McGraw-Hill Book Company.
3. K. A. Brownlee: Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering. John Wiley & Sons.
4. O. A. Mihajlov: Matematičeskaja statistika i linejnoje programirovanije v črnoj metalurgii.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Regressionsanalyse die angemessene Methode zur Behandlung von Problemen ist, wie z. B. das Beschicken der Martinöfen. Um einen zufriedenstellenden Beschluss zu fassen, müssen wir ein genügend grosses Muster zur Verfügung haben.

Die schlechte Seite dieser Methode besteht darin, dass sie für rationelles Arbeiten eine elektronische Rechenmaschine erfordert, was bei der jetzigen Entwicklung

kaum noch eine Schwäche ist, da sich die elektronischen Rechenmaschinen immer mehr einführen und auch bei uns in Kürze jedes ein wenig grössere Unternehmen diese besitzen wird.

Die Vorteile dieser Methode sind vor allem darin, dass sie uns mit der geringstmöglichen Anzahl von Untersuchungen an aktiven Aggregaten optimale Bedingungen zu erreichen ermöglicht.

#### SUMMARY

It was shown by research work that the regression analysis suits the problem treating well, for instance open hearth charging. For fair decision making, sample big enough should be available.

Bad part of this method is demand for digital computer which on the other side at the present stage of

development hardly represents obstacle any more, since the use of digital computers is spreading swiftly and could expect them to be installed in our middle size companies in near future.

The advantage of this method is primarily in being able to attain optimum conditions with the smallest number of tests on active facilities.

# ŽELEZARNA RAVNE

Tovarna plemenitih jekel  
Ravne na Koroškem  
Slovenija - Jugoslavija



Naša livarna jeklene litine je največja in najmodernejša v državi. Sedanja proizvodnja znaša 10.000 ton jeklenih ulitkov, toda čez nekaj let se bo letna proizvodnja povzpela na 15.000 ton.

Proizvajamo velike in srednje serije lahkih (1 do 6 kg), ter srednjetežkih (7 do 50 kg) jeklenih ulitkov na malih in velikih kaluparskih strojih. Težke serijske ulitke (50 do 5.000 kg) izdelujemo s pomočjo peskometala. Z ročnim formanjem izdelujemo posamezne ulitke kosovne teže do 20.000 kg.



Iz strojne kaluparnice

## Simulacija ogrevanja slabov v potisnih pečeh

Vsi pojavi pri ogrevanju jekla v valjarniških potisnih pečeh, kakor tudi v drugih agregatih so prehodni pojavi. Teoretsko se približati rešitvi teh problemov, je preveč komplicirano za vsakdanjo prakso. Grafične metode so mnogo hitrejše, vendar tudi zamudne in toge. V modernem času so tudi probleme te vrste programirali na elektronski računalnik in dobili še boljše rešitve. To je smotrno posebno takrat, kadar je treba dobiti točno rešitev v kratkem času ali pa odgovore zelo pogosto.

### UVOD

Kljub temu, da je ogrevanje jekla za valjanje že star proces, se vedno znova pojavlja zahteva po boljšem spoznavanju in analizi tega procesa. Zelja in nujnost, da bi čim natančneje ugotovili temperaturno razdelitev v ogretem jeklu, glede na najrazličnejše pogoje ogrevanja v industriji, je privedla mnoge ljudi, da so teoretično in praktično iskali čim bolj splošno rešitev.

Diferencialna enačba, ki opisuje prehodne pojave ogrevanja, je znana že iz začetka 19. stoletja. Številni matematiki so našli že mnogo rešitev, ki pa so uporabne samo za posebne primere. Znanje matematike, s katerim razpolaga povprečni inženir, je premajhno, da bi lahko reševal problem ogrevanja po tej poti.

Analiza procesa ogrevanja slabov v potisni peči, kot posebni primer uporabe omenjene enačbe, postavlja velike zahteve tako pred konstrukterja kot uporabnika peči. Poleg drugega hočemo, da nam peč da kar največ »pravilno ogretega« materiala v enoti časa. Temperatura v peči je omejena z življenjsko dobo obzidave, temperaturo nataljevanja slabov in termičnimi napetostmi v materialu. Poleg tega je material pravilno ogret samo takrat, kadar ima površina predpisano temperaturo in je temperaturni gradient pod neko določeno mejo. Z drugimi besedami, razlika med najvišjo in najnižjo temperaturo v jeklu na koncu ogrevanja ne sme biti prevelika. Iz opisanega sledi, da nas pri ogrevanju slabov zanima mnogo več kot samo temperatura površine. Hočemo opazovati tudi kako se spreminjajo temperature v notranjosti materiala. Da to ugotovimo, lahko postavimo na različne točke v slab merilnike temperature in jih zapisujemo ob določenem času. (RATE OF HEAT ABSORPTION OF STEEL, BY FRED S. BLOOM — ASSOCIATION IRON and STEEL ENGINEERS — SEPTEMBER 1954).

Druga možnost je, da najdemo način in to izračunamo.

V naslednjih odstavkih bom na kratko opisal teoretično rešitev diferencialne enačbe, samo tako daleč, kolikor jo daje vsak učbenik visokošolske matematike. Opisal bom znano Schmidtovo grafično metodo, ker je še danes aktualna, kadar moramo napraviti dobro izračunano oceno in metodo izračuna, ki sloni na končnih diferencah in je potem nadaljevanje Schmidtove metode. Metoda končnih diferenc je dobila poseben pomen zaradi svoje elastičnosti pri uporabi elektronskih računalnikov. Nemogoče je podati kakršnekoli detajle o programih, ki so bili napisani za digitalni elektronski računalnik niti v podrobnosti interpretirati dobljene rezultate. Poskušal bom pokazati razliko med eksplicitno in implicitno metodo končnih diferenc in vsaj z nekaj primeri grafično ilustrirati rezultate simuliranja potisne peči z elektronskim računalnikom.

### TEORETIČNA REŠITEV ZA SLAB NESKONČNE DEBELINE OGREVAN Z ENE STRANI

Slab neskončne debeline, ki ima prvotno enakomerno temperaturo po vsem prerezu, potisnemo v medij s konstantno temperaturo  $T_a$ . Predpostavljamo, da na kontaktu med slabom in okolico ni nobenega toplotnega upora in temperatura površine slaba v trenutku naraste na vrednost  $T_a$ . Fourierjeva diferencialna enačba za prevajanje toplote v eni smeri se reducira na

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} \quad (1)$$

Fourier je pokazal, da je rešitev te enačbe za telo, ki ima enakomerno temperaturo in doživi nenadno temperaturno spremembo na površini, predstavljena z eksponencialno funkcijo

$$e^{-px} e^{qx}$$

V tem izrazu sta  $p$  in  $q$  konstanti,  $t$  je čas,  $x$  pa razdalja od površine. Če je to izhodišče, lahko postavimo vrsto enačb, ki opisujejo spremembo temperature s časom in razdaljo. Mora pa enačba vsebovati eksponencialni člen in zadostiti vsem robnim pogojem.

Splošna enačba tega tipa je

$$T = C_1 + C_2x + C_3e^{-px}e^{qx} \quad (2)$$

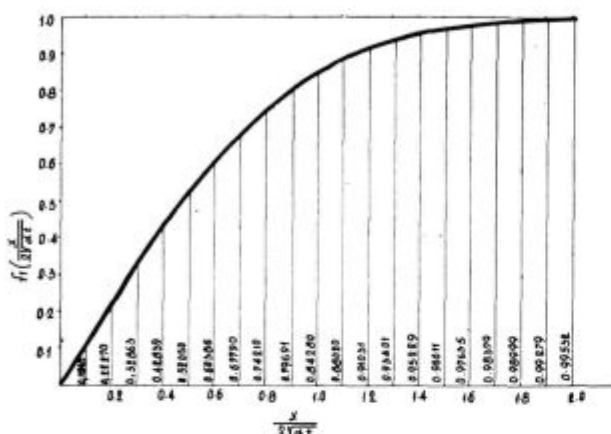
Kjer so  $C_1$ ,  $C_2$  in  $C_3$  konstante.

Schack daje za opisane robne pogoje modifirano enačbo

$$T = C_1 + C_2x + C_3 \int_{z=0}^z \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} dz \quad (3)$$

kjer spoznamo izraz  $\int_0^z \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} dz$  kot verjetnosti

integral ali Gaussov integral napake, ki ima vrednosti med 0 in 1 (glej sliko 1).



Slika 1

Robni pogoji pa so

$$\begin{aligned} \text{za } x > 0 \quad t = 0 \quad T &= T_0 \\ \text{za } x = 0 \quad t = 0 \quad T &= T_a \\ \text{za } x = 0 \quad t \neq 0 \quad T &= T_a = C_1 \end{aligned}$$

$T_a$  je temperatura površine slaba takoj nato, ko je slab prišel v stik z okolico. Za  $x > 0$  in  $t = 0$  ima slab svojo prvotno temperaturo  $T_0$ .

$$T_{t=0} = C_1 + C_2x + C_3 = T_0 \quad (4)$$

To pa je res samo takrat, kadar je  $C_2 = 0$ , kjer bi se morala sicer temperatura  $T_0$  spreminjati z  $x$ , predpostavili pa smo, da je enakomerna. Tako dobimo:

$$\begin{aligned} T_0 &= C_1 + C_3 \\ \text{ali} \\ C_3 &= T_0 - T_a \end{aligned}$$

Če ta izraz postavimo v enačbo (3) dobimo

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \cdot \int_0^{x/2\sqrt{\alpha t}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} dz$$

ali v krajši obliki

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \cdot f_1\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (5)$$

kjer je  $f_1(x/2\sqrt{\alpha t})$  oznaka za vrednost Gaussovega integrala napake v odvisnosti od brezdimenzijske skupine  $x/2\sqrt{\alpha t}$  (glej sliko 1).

Enačbo (5) lahko napišemo tudi v drugi obliki

$$\frac{T_a - T}{T_a - T_0} = f_1\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (6)$$

S pomočjo enačbe (6) lahko izračunamo temperaturo  $T$  v vsaki razdalji  $x$  in ob vsakem času  $t$ .

Na kratko sem podal eno možnih rešitev diferencialne enačbe (1). Za drugačne robne pogoje so rešitve bolj komplicirane, v določenih primerih pa analitične rešitve sploh ni mogoče najti. Zato v novejšem času uporabljamo numerične metode in elektronske digitalne računalnike.

## GRAFICNO DOLOČANJE CASOVNE RAZDELITVE TEMPERATURE

Za mnoge praktične primere je v literaturi težko najti rešitve za časovno razdelitev temperature, ker je izračun predolg ali pa matematično preveč zahteven. Že leta 1924 je E. Schmidt v delu »Foppls Festschrift« razvil za take primere grafično metodo. Vzemimo slab, ki je neskončno širok in ima končno debelino. Splošno so odnosi med temperaturo in časom določeni z diferencialno enačbo (1). Temperatura v katerikoli točki v slabu je funkcija časa in oddaljenosti.

Slab razdelimo na več enakih plasti debeline  $\Delta x$  in jih opazujemo v enakih časovnih intervalih  $\Delta t$ . Pri konstantni razdalji točke od ene površine slaba, ki naj znaša  $x$ , označim z  $\Delta T_t$  narastek temperature v časovnem intervalu  $\Delta t$ . Pri konstantni vrednosti za  $t$  pa označimo spremembo temperature z globino  $x$  kot  $\Delta T_x$ .

Enačbo (1) lahko napišemo takole:

$$\frac{\Delta T_t}{\Delta t} = \alpha \frac{\Delta^2 T_x}{\Delta x^2} \quad (7)$$

$$\text{ali} \quad \Delta T_t = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot \Delta^2 T_x \quad (8)$$

Na sliki 2 je slab razdeljen na posamezne plasti v debelini  $\Delta x$ . Naj  $T_{n,m}$  označuje temperaturo v  $n$ -ti plasti od površine in po  $m$  časovnih intervalih, torej po času  $m \cdot \Delta t$ . Če vzamemo  $x$  konstanten, je izražena sprememba temperature v odvisnosti od časa v plasti, ki je oddaljena  $m \cdot \Delta x$  od površine z izrazom:

$$\Delta T_t = T_{n,m+1} - T_{n,m} \quad (9)$$

Če pa vzamemo  $t$  konstanten je izražena sprememba temperature z razdaljo:

$$\Delta T_x = T_{n+1,m} - T_{n,m} \quad (10)$$

in za izraz razlike dveh razlik dobimo:

$$\Delta^2 T_x = \Delta(\Delta T_x) = (T_{m+1,m} - T_{n,m}) - (T_{n,m} - T_{n-1,m}) \quad (11)$$

Če pa te izraze vstavimo v enačbo (8) dobimo:

$$T_{n,m+1} - T_{n,m} = \alpha \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} [ (T_{n+1,m} - T_{n,m}) - (T_{n,m} - T_{n-1,m}) ] \quad (12)$$

Vedno je mogoče izbrati debelino plasti in časovni interval tako, da je

$$d \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \frac{1}{2} \quad (13) \quad (\text{za konstantne fizikalne lastnosti})$$

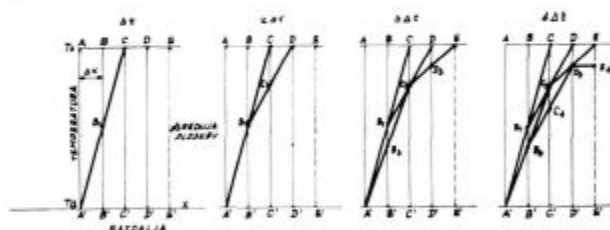
in tako reduciramo enačbo (12) v izraz

$$T_{n,m+1} = \frac{1}{2} (T_{n+1,m} + T_{n-1,m}) \quad (14)$$

Enačba (14) je osnova grafične metode in kaže, da je temperatura katerekoli točke ob kateremkoli času aritmetična sredina dveh temperatur pri  $\pm \Delta x$  v predhodnem časovnem intervalu.

Premica, ki je potegnjena skozi vrednosti za temperaturo pri  $(n-1) \Delta x$  in  $(n+1) \Delta x$  preseka vertikalno črto za oznako plasti v točki, ki je aritmetična sredina prejšnjih temperatur; pri  $(n-1) \Delta x$  in  $(n+1) \Delta x$ .

Celotno metodo je mogoče zasledovati na sliki 2, kjer je prikazan vsak časovni interval posebej.



Slika 2

Vzemimo simetričen slab, ki ima začetno temperaturo  $T_0$  in nenadoma obe površini ohladimo na temperaturo  $T_a$ . Pojavi se toplotni tok v smeri  $x$ . Ker je material homogen, je razdelitev temperatur okrog srednice simetrična in lahko opazujemo samo eno polovico slaba. Polovica slaba, ki jo opazujemo, je razdeljena na enakomerne plasti  $x$ .

$$\begin{aligned} \text{Za } x = 0 \quad t = 0 \quad T &= T_0 \\ x > 0 \quad t = 0 \quad T &= T_a \end{aligned}$$

Po preteku časa  $t$  je temperatura v ploskvi  $B-B'$  aritmetična sredina med  $T_0$  in  $T_a$ , to je  $B_1$ . Temperatura v ravninah  $C, D$  in  $E$  pa ostane v tem časovnem intervalu nespremenjena. V drugem časovnem intervalu pade temperatura pri  $C$  v ploskvi  $C-C'$  na vrednost  $C_2$ , temperatura v točkah  $D$  in  $E$  pa ostane nespremenjena.

V tretjem časovnem intervalu pade temperatura v ploskvi  $B-B'$  od  $B_1$  na  $B_3$  in temperatura v točki  $D$  na vrednost  $D_3$ .

V tem intervalu ostane temperatura v središčni ploskvi nespremenjena, ker je aritmetična sredina

vrednosti pri  $\pm \Delta x$  od središčne ploskve, ki pa sta obe pri  $T_0$ . V četrtem intervalu pade temperatura v ploskvi  $C-C'$  od vrednosti  $C_2$  na  $C_4$ , temperatura v središču  $E_4$  pa je srednja vrednost dveh identičnih vrednosti  $D_3$  pri  $\pm \Delta x$  od središčne ploskve in leži zato na vodoravni črti. Ta proces lahko nadaljujemo v neskončnost, pri tem pa vsaka vodoravna črta čez središčnico predstavlja dva časovna intervala.

### ČASOVNA RAZDELITEV TEMPERATURE PRI DOLOČENI POVRŠINSKI TOPLOTNI UPORNOSTI

Primeri, pri katerih bi površina slaba v trenutku sledila spremembam temperature okolice, so mogoči le teoretično. S podobno grafično metodo je mogoče najti rešitev tudi takrat, kadar obstaja določen toplotni prehodni koeficient, ki povzroča temperaturni padec med okolico s temperaturo  $T_a$  in površino s temperaturo  $T_f$ . Če napravimo toplotno bilanco na površini materiala dobimo:

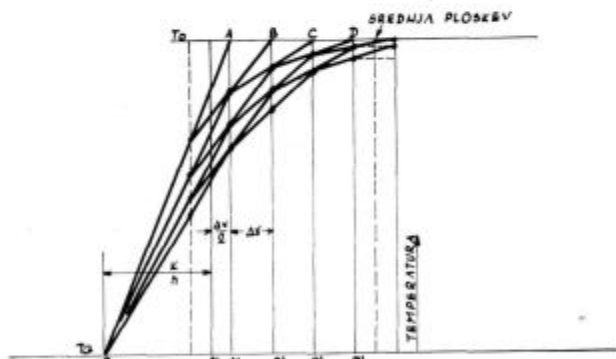
$$k \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = h (T_a - T_f) \quad (15)$$

$k$  — toplotna prevodnost  
 $h$  — toplotno prehodni koeficient

Temperaturni gradient na površini je tako podan z izrazom

$$\left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \frac{T_a - T_f}{k/h} \quad (16)$$

Vsaka črta, ki v koordinatnem sistemu  $T-x$  preseka površino mora imeti naklon  $(T_a - T_f) / (k/h)$ .



Slika 3

Na sliki 3 je slab razdeljen na plasti debeline  $\Delta x$ , vendar pa so razporejene tako, da je površina na polovični razdalji plasti. Vzrok za to bo razviden iz konstrukcije. Izhodišče  $o$  pa je postavljeno v razdalji  $k/h$  od površine, na temperaturi  $T_a$ .

Črta iz izhodišča  $o$  skozi površino ima naklon  $(T_a - T_f) / (k/h)$ .

Če na levo od površine narišemo črto v razdalji  $\Delta x/2$  lahko uporabimo Schmidtovo metodo in vsak

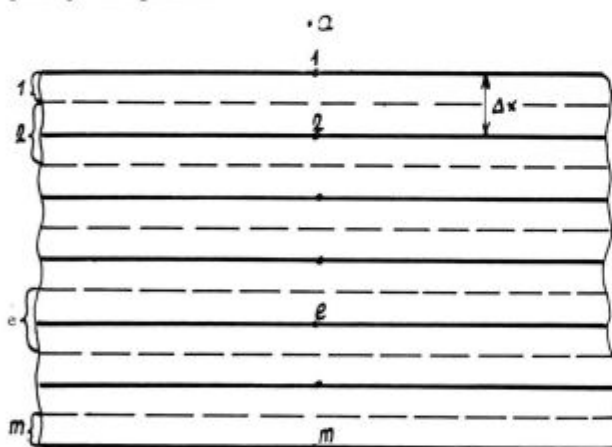
drugi časovni interval predstavimo s črto, ki seka površino s pravilnim naklonom. Tako je površina mesto vseh  $T_f$ .

Konstrukcijo nadaljujemo dokler ne preseka mo srednjo ploskev s črto, ki je narisana k črti za  $\Delta x/2$  na desno od sredine. Ker so plasti premaknjene  $\Delta x/2$  na desno, je črta, ki leži za  $\Delta x/2$  na desno od srednice zrcalna slika ploskve, ki leži  $\Delta x/2$  na levo od sredine. S to približno metodo lahko proučujemo tudi primere, ko toplotni tok ni simetričen in bi nas matematična obdelava privedla do kompliciranih izrazov. Do tega pride takrat, kadar sta površini na različnih temperaturah, ali pa če temperature doživljajo ciklične spremembe. Prav tako je Schmidt obdelal nekaj kompleksnih problemov, npr.: toplotni tok s sestavljeno steno iz različnih materialov.

## SIMULIRANJE POTISNE PEČI Z ELEKTRONSKIM RAČUNALNIKOM

### Eksplicitna metoda

V naslednjem se bomo omejili na enodimenzionalno analizo ogrevanja slabov, z uporabo eksplisitne metode končnih diferenc. Na sliki 4 smatramo po dogovoru, da so v točkah od 1 do  $m$  (nodah) koncentrirane vse fizikalne lastnosti pripadajočih plasti.



Slika 4

Če slab potiskamo v peč, ki ima občutno višjo temperaturo, je temperatura točke  $e$  odvisna od toplotne izmenjave med pečnim prostorom in površino slaba, od fizikalnih lastnosti materiala, položaja te točke in časa, če čas merimo od neke začetne točke. Nadalje pa so fizikalne lastnosti materiala odvisne od temperature.

Sprememba temperature v točki  $e$  po času je splošno opisana takole:

$$\frac{dT}{dt} = K \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{c_e} \cdot k_e \cdot \varnothing_s \cdot \varnothing_m \quad (17)$$

kjer pomeni:

$K$  — konstanta

$x$  — oddaljenost točke od površine

$\varnothing_s$  in  $\varnothing_m$  — toplotni tok na zgornjo in spodnjo površino

$c_e$  — specifična toplota

$k_e$  — toplotna prevodnost

Za določen material pa velja:

$$c_e = f_1(T)$$

$$k_e = f_2(T)$$

in na splošno sta tudi  $\varnothing_s$  in  $\varnothing_m$  funkciji mnogih spremenljivk, med katerimi je najvažnejša temperaturna razlika med pečnim prostorom in temperaturo jekla. Analitično rešitev za ta problem je mogoče najti samo v določenih primerih, z numerično metodo končnih diferenc pa lahko najdemo rešitev za vsak primer posebej.

Vzemimo enostransko ogrevanje in postavimo, da je  $\varnothing_m = 0$

Če točka  $a$  predstavlja pečni prostor, potem je enačba za toplotno izmenjavo med  $a$  in  $1$ :

$$Q = h \cdot A \cdot (T_a - T_1) \Delta t \quad (18)$$

$Q$  — količina toplote v Kcal

$A$  — presek v  $m^2$

$h$  — toplotno prehodno število v  $Kcal/m^2, h^0 C$

$T_a$  — temperatura pečnega prostora  $^0C$

$T_1$  — temperatura površine slaba  $^0C$

$\Delta t$  — časovni interval  $h$

Nadalje je količina prevajane toplote med točko  $1$  in  $2$  podana z:

$$Q_1 = \frac{k_1}{\Delta x} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \Delta t \quad (19)$$

$k_1$  — toplotna prevodnost prvega sloja  $Kcal/m, ^0C h$

$\Delta x$  — debelina plasti v  $m$

Absorbirana toplota v prvi plasti z debelino

$$\frac{\Delta x}{2} \text{ je: } Q_{a,1} = Q - Q_1 \quad (20)$$

$$\text{in } Q_{a,1} = A \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot c_1 \cdot \rho \cdot (T_1 - T_1) \quad (21)$$

$c_1$  — specifična toplota plasti  $1 Kcal/^0C kg$

$\rho$  — specifična teža  $kp/m^3$

$T_1$  — temperatura točke  $1$  ob času  $t ^0C$

$T_1$  — temperature točke  $1$  ob času  $t + \Delta t ^0C$

Za prevajanje toplote med nadaljnjimi točkami v notranjosti materiala lahko napišemo enačbe:

$$Q_2 = \frac{k_2}{\Delta x} \cdot A \cdot (T_2 - T_3) \quad (22)$$

in splošno:

$$Q_e = \frac{k_e}{\Delta x} \cdot A \cdot (T_e - T_{e+1}) \quad (23)$$

Splošna enačba za absorbirano toploto v plasti je:

$$Q_{a,e} = A \cdot \Delta x \cdot c_e \cdot \rho \cdot (T_e - T_e) \quad (24)$$

Pri tem pa predpostavljamo, da se  $A$  ne spreminja, da so plasti enake debeline (razen prve in zadnje)  $\Delta x$  in kar je posebno važno, da opazovanje omejimo na tako kratek čas  $\Delta t$ , da so izvajanja dovolj natančna.

Iz enačb 19, 20 in 21 lahko izvedemo:

$$A \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot c_1 \cdot \rho (T'_1 - T_1) = h \cdot A (T_a - T_1) \Delta t - k_1 \cdot A (T_1 - T_2) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (25)$$

$$\frac{\Delta x^2 \cdot c_1 \cdot \rho}{2 \cdot \Delta t \cdot k_1} (T'_1 - T_1) = \frac{h \cdot \Delta x}{k_1} (T_a - T_1) - (T_1 - T_2) \quad (26)$$

Uvedemo nove spremenljivke:

$$N_1 = \frac{h \cdot \Delta x}{k_1}$$

$$\alpha_1 = \frac{k_1}{\rho \cdot c_1}$$

$$M_1 = \frac{\Delta x^2}{\alpha_1 \cdot \Delta t}$$

in dobimo enačbo:

$$N_1 (T_a - T_1) - (T_1 - T_2) = \frac{M_1}{2} (T'_1 - T_1) \quad (27)$$

sledi:

$$T'_1 = \frac{2N_1 T_a + T_1 (M_1 - 2N_1 - 2) + 2T_2}{M_1} \quad (28)$$

Iskana temperatura  $T'_1$  je izražena eksplicitno s samimi znanimi veličinami. Če uvedemo za

$$F_{a,1} = \frac{2N_1}{M_1}$$

$$F_{1,1} = \frac{M_1 - 2N_1 - 2}{M_1}$$

$$F_{2,1} = \frac{2}{M_1}$$

dobimo enačbo:

$$F_{a,1} \cdot T_a + F_{1,1} \cdot T_1 + F_{2,1} \cdot T_2 = T'_1 \quad (29)$$

Pri tem pa mora biti izpolnjen pogoj:

$$F_{a,1} + F_{1,1} + F_{2,1} = 1$$

Pogoj za stabilnost metode je, da nobeden od koeficientov ni enak 0.

Ker  $F_{2,1}$  in  $F_{1,1}$  ne moreta biti nič je torej pogoj:

$$F_{1,1} > 0$$

$$\frac{M_1 - 2N_1 - 2}{M_1} > 0$$

$$M_1 > 2N_1 + 2$$

$$\text{ali} \quad \Delta t < \frac{\Delta x^2}{\alpha_1 \cdot 2 (N_1 + 1)} \quad (30)$$

Enačba 30 daje prvi pogoj za določitev časovnega intervala. Toplotno bilanco napravimo na vseh plasteh in pišemo splošno:

$$A \cdot \Delta x \cdot c_e \cdot \rho (T'_e - T_e) = \frac{k_e}{\Delta x} \cdot A (T_{e-1} - T_e) \Delta t - \frac{k_e}{\Delta x} \cdot A \cdot (T_e - T_{e+1}) \quad (31)$$

sledi:

$$T_{e-1} - 2T_e + T_{e+1} = M_e (T'_e - T_e) \quad (32)$$

postavimo faktorje:

$$F_{e-1,e} = \frac{1}{M_e}; \quad F_{e,e} = \frac{M_e - 2}{M_e}; \quad F_{e,e+1} = \frac{1}{M_e}$$

$$F_{e-1,e} + F_{e,e} + F_{e,e+1} = 1$$

pogoj za stabilnost je:

$$F_{e,e} > 0$$

$$M_e > 2$$

Iz izvajanja za prvo plast smo dobili pogoj za stabilnost:

$$M_1 > 2N_1 + 2$$

Torej bomo izbrali večjega od obeh. Ker  $N_1$  ne more biti negativen, (pri ogrevanju je  $h$  pozitiven) je vedno  $M_1 > M_e$  in lahko ohranimo prvotne pogoje za stabilnost metode.

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{\alpha_1 \cdot 2 (N_1 + 1)}$$

Metoda pa bo tem točnejša čim krajši časovni interval bomo izbrali. S krajšim intervalom pa se povečuje število ponovitev za določen čas ogrevanja  $t$  in s tem tudi strojni čas na elektronskem računalniku. Opisana eksplicitna metoda končnih diferenc je zelo primerna, če je na razpolago digitalni elektronski računalnik. Ker po tej metodi rabimo za izračun temperature  $T'_m$  ob času  $t + \Delta t$ , temperature  $T_{m-1}$ ,  $T_m$ ,  $T_{m+1}$  ob času  $t$ , predpostavili pa smo, da na spodnji površini nimamo toplotne izmenjave, zadostimo temu pogoj, da je

$$T_{m+1} = T_m$$

Metoda nam omogoča, da upoštevamo toplotno prevodnost in specifično toplotno funkcijo temperature, saj moramo za vsak časovni interval ponoviti izračun za vsako plast. Metoda je splošna, ker izračune lahko opravimo za vse materiale, za katere poznamo fizikalne lastnosti in njihovo odvisnost od temperature. Za popolno simulacijo pa moramo poznati tudi matematični model, po katerem lahko določamo toplotno prehodna števila. Po eksplicitni metodi smo napravili nekaj



kratkim programov, zelo izpopolnjen program, ki se je uporabljal predvsem pri konstituiranju potisnih peči pa smo napisali na osnovi implicitne metode končnih diferenc.

### Implicitna metoda končnih diferenc



Slika 5

Če pogledamo sliko 5 in enačbo (21) ter izvajanja omejimo ona enoto površine, namesto  $d_i \cdot \rho$  pa vstavimo vrednost  $c_{v,s}$  (volumska specifična toplota) dobimo:

$$Q_{a,s} = \frac{\Delta x}{2} \cdot c_{v,s} \cdot (T_s^* - T_s) \quad (33)$$

in postavimo toplotno kapaciteto:

$$C_s = \frac{\Delta x}{2} \cdot c_{v,s} \quad (34)$$

Na isti način lahko napišemo izraz za toplotno kapaciteto za drugo mejno plast:

$$C_m = \frac{\Delta x}{2} \cdot c_{v,m} \quad (35)$$

Iz slike 5 vidimo, da je

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot c_{v,e} \cdot \Delta x + \frac{1}{2} \cdot c_{v,e+1} \cdot \Delta x \quad (36)$$

označimo z

$$U_e = \frac{k_e}{\Delta x}$$

in napravimo toplotno bilanco za prvo plast

$$C_s \cdot \frac{\Delta T_s^*}{\Delta t} = U_1 (T_s^* - T_1^*) + \varnothing_s^* \quad (37)$$

je oznaka za časovno povprečje (glej kasneje) za e — to plast

$$C_e \cdot \frac{\Delta T_e^*}{\Delta t} = -U_{e+1} (T_e^* - T_{e+1}^*) - U_e (T_e^* - T_{e-1}^*) \quad (38)$$

in zadnjo plast

$$C_m \cdot \frac{\Delta T_m^*}{\Delta t} = -U_m (T_m^* - T_{m-1}^*) + \varnothing_m^* \quad (39)$$

Iz enačbe (38) dobimo,

$$C_e \cdot \frac{(T_e^* - T_{e'}^*)}{\Delta t} = -U_{e+1} (T_e^* - T_{e+1}^*) - U_e (T_e^* - T_{e-1}^*)$$

$$T_e^* \frac{C_e}{\Delta t} + T_e^* U_{e+1} + T_e^* U_e = T_{e'}^* \cdot \frac{C_e}{\Delta t} + \dots$$

$$T_e^* \left( \frac{C_e}{\Delta t} + U_{e+1} + U_e \right) = T_{e'}^* \cdot \frac{C_e}{\Delta t} + \dots$$

$$\left| \frac{C_e}{\Delta t} + U_{e+1} + U_e \right| > 0$$

Za vsako točko izračunamo

$$\Delta t < \left| \frac{C_e}{U_{e+1} + U_e} \right|$$

in vzamemo najmanjši izračunani  $\Delta t$ , kar v matematični obliki pišemo takole

$$\Delta t \leq \tau = \min \left| \frac{C_e}{(U_{e+1} + U_e)} \right|$$

$$e = 0, m + 1$$

Pri tem pa vzamemo  $U_0$  in  $U_{m+1} = 0$  vzamemo, da je

$$T_e^* = \frac{T_e^{\lambda} + T_e^{\lambda+1}}{2}$$

in označimo s  $T_e^{\lambda}$  pa temperaturo v točki e po preteku časa

$$\sum_{n=1}^{\lambda} \Delta t_n$$

z  $T_e^{\lambda+1}$  temperaturo v točki e po preteku časa

$$\sum_{n=1}^{\lambda+1} \Delta t_n$$

Enačbe (37, 38 in 39) lahko razvijemo naprej

$$C_s \cdot \frac{\Delta T_s^*}{\Delta t^{\lambda+1}} = -U_1 (T_s^* - T_1^*) + \varnothing_s^*$$

$$\Delta T_s^* = T_s^{\lambda+1} - T_s^{\lambda}$$

$$C_s \frac{\Delta T_s^*}{\Delta t^{\lambda+1}} = -U_1 \left( \frac{T_s^{\lambda+1} + T_s^{\lambda}}{2} - \frac{T_1^{\lambda+1} + T_1^{\lambda}}{2} \right) + \frac{\varnothing_s^{\lambda+1} + \varnothing_s^{\lambda}}{2}$$

$$\frac{C_s \cdot T_s^{\lambda+1}}{\Delta t^{\lambda+1}} - \frac{C_s \cdot T_s^{\lambda}}{\Delta t^{\lambda+1}} = -U_1 \cdot \frac{T_s^{\lambda+1}}{2} - U_1 \frac{T_s^{\lambda}}{2} + U_1 \frac{T_1^{\lambda+1}}{2} + U_1 \frac{T_1^{\lambda}}{2} + \frac{\varnothing_s^{\lambda+1}}{2} + \frac{\varnothing_s^{\lambda}}{2}$$

$$\left(\frac{C_s}{\Delta t^{\lambda+1}} + \frac{1}{2} U_1\right) T_s^{\lambda+1} - \frac{1}{2} \cdot U_1 \cdot T_1^{\lambda+1} - \frac{1}{2} \theta_s^{\lambda+1} = \left(\frac{C_s}{\Delta t^{\lambda+1}} - \frac{1}{2} \cdot U_1\right) \cdot T_s^{\lambda} + \frac{1}{2} U_1 T_1^{\lambda} + \frac{1}{2} \theta_s^{\lambda} \quad (40)$$

Na enak način dobimo iz enačb 38 in 39 izraza:

$$\left[\frac{C_e}{\Delta t^{\lambda+1}} + \frac{1}{2} (U_e + U_{e+1})\right] T_e^{\lambda+1} - \frac{1}{2} U_e T_{e-1}^{\lambda+1} - \frac{1}{2} U_{e+1} T_{e+1}^{\lambda+1} = \left[\frac{C_e}{\Delta t^{\lambda+1}} - \frac{1}{2} (U_e + U_{e+1})\right] T_e^{\lambda} + \frac{1}{2} U_e T_{e-1}^{\lambda} + \frac{1}{2} U_{e+1} T_{e+1}^{\lambda} \quad (41)$$

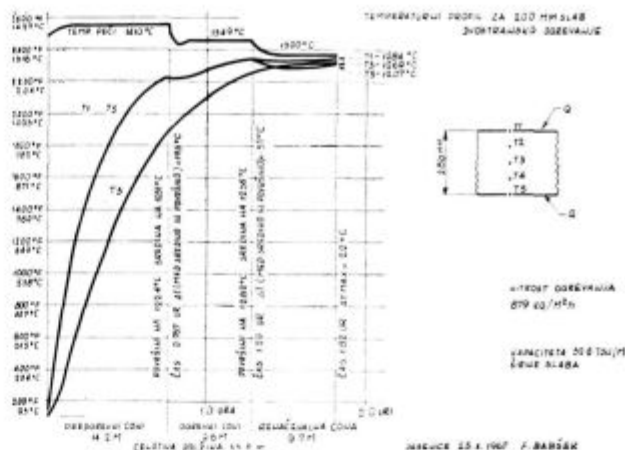
$$\left(\frac{C_m}{\Delta t^{\lambda+1}} + \frac{1}{2} U_m\right) T_m^{\lambda+1} - \frac{1}{2} U_m T_{m-1}^{\lambda+1} - \frac{1}{2} \theta_m^{\lambda+1} = \left(\frac{C_m}{\Delta t^{\lambda+1}} - \frac{1}{2} U_m\right) T_m^{\lambda} + \frac{1}{2} U_m T_{m-1}^{\lambda} + \frac{1}{2} \theta_m^{\lambda} \quad (42)$$

Enačbe dobljene na ta način tvorijo sistem nehomogenih linearnih enačb, ki ga rešujemo s pomočjo matric. Matrico, ki jo dobimo iz tega sistema enačb, imenujemo tridiagonalno matrico. Reševanje sistema in matric ne bom obravnaval.

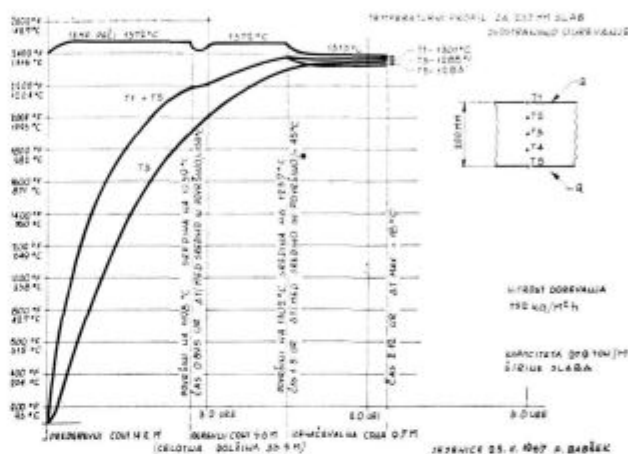
### Razlike med eksplicitno in implicitno metodo končnih diferenc

Pri eksplicitni metodi smo dobili odvisnost temperature  $T_e^{\lambda+1}$  od  $T_e^{\lambda}$ ,  $T_{e-1}^{\lambda}$  in  $T_{e+1}^{\lambda}$  in smo lahko iskano temperaturo direktno izračunali. Pri implicitni metodi pa nastopa temperatura  $T_e^{\lambda+1}$  na levi strani enačbe, skupaj z  $T_{e-1}^{\lambda+1}$  in  $T_{e+1}^{\lambda+1}$  in moramo zato reševati sistem nehomogenih linearnih enačb. Prednosti implicitne metode (I. T. Anderson, J. M. Botjee and W. K. Koffel: »Comparison of the Implicit and Explicit Methods for Finite Difference in Heat — Transfer Calculations« Transactions of ASME, November 1961 str. 561) so naslednje:

Stabilnost metode ni odvisna od dolžine časovnega intervala, zato lahko občutno zmanjšamo strojni čas na elektronskem računalniku. V pogledu točnosti rezultatov pa sta metodi enakovredni.



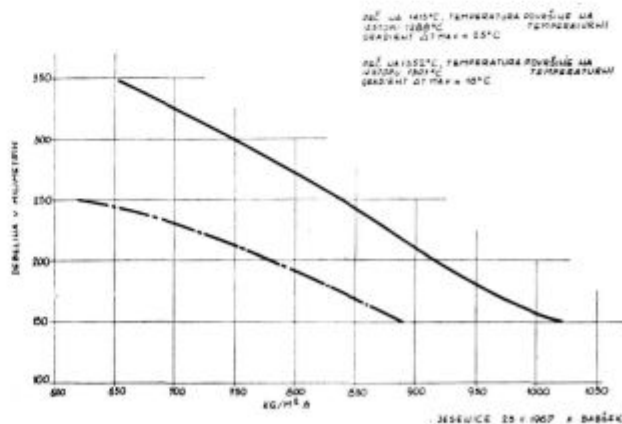
Slika 6



Slika 7

### Zaključek

Slika 6 in 7 prikazujeta končno interpretacijo simuliranja potisne petconske peči za ogrevanje slabov. Ogrevanje je simetrično v predgrevnih in ogrevnih conah. Zgornja krivulja predstavlja predpostavljen potek temperature v peči, v diagram pa so vrisane temperature zgornje in spodnje povr-



Slika 8

šine. Zanimivo je, da v izenačevalni coni, kjer imamo enostransko ogrevanje, pade temperatura spodnje površine pod temperaturo sredine.

Na sliki 8 sta prikazani dve krivulji, ki predstavljata kapaciteto neke peči na osnovi boljšega ali slabšega izenačevanja temperature slaba. Za tako zvezo je bilo izdelanih mnogo temperaturnih profilov.

Na ta način lahko brez peči zasledujemo ogrevanje raznih jekel pri različnih pogojih v pečeh. Konstruktor lahko določa dolžino peči in posa-

meznih con ter pri tem zagotovi dobro pregret material, ki je tudi pravilno temperaturno izenačen. Uporabnik peči lahko ugotovi možne kapacitete za jekla različnih kvalit in dimenzij ter eksperimentira s pečjo, ki jo je nadomestil matematični model. Zanimivo je, da se na modelu kažejo težave za ogrevanje materiala povsod tam, kjer so nanje naleteli tudi v praksi. Z novimi metodami se odpirajo velike možnosti za boljše konstrukcije, boljše izkoriščanje kapacitet in bolj ekonomično obratovanje.

## ZUSAMMENFASSUNG

Alle Erscheinungen bei der Erwärmung von Stahl in Walzwerks-Stossöfen, so wie auch an anderen Aggregaten sind vorübergehende Erscheinungen. Damit wir uns theoretisch der Lösung dieser Probleme nähern würden, war zu kompliziert für die alltägliche Praxis. Die graphischen Methoden sind viel schneller, jedoch aber auch langwierig

und starr. In der modernen Zeit wurden auch Probleme dieser Art auf dem Elektronenrechner programmiert und man erhielt noch bessere Lösungen. Das ist zweckmässig besonders dann, wenn man die genaue Lösung in kurzer Zeit finden muss oder es notwendig ist, die Antworten sehr oft zu bekommen.

## SUMMARY

Heating of slabs in slab furnace or in any other heating facility is transient phenomenon. For day to day practice it is too complicated to find theoretical solution of such problems.

Graphical methods are faster but also too tedious and rigid. Nowadays the problems of this kind are programmed on computer and better results are obtained. It makes sense particularly when exact answer is needed very fast or very often.

## Brzorezna jekla

### I. del: ZNACILNOSTI METALOGRAFIJE BRZOREZNIH JEKEL

Brzorezna jekla so visoko legirana orodna jekla, ki se po svojih lastnostih močno razlikujejo od vseh drugih vrst jekel. Lastnosti orodij so v veliki meri odvisne od pogojev vroče predelave, toplotne obdelave in od mikrostrukture jekla. Zato članek v prvem delu obravnava metalografske značilnosti brzoreznih jekel.

#### Uvod

Brzorezna jekla predstavljajo med orodnimi jekli posebno skupino, ki se po svojih lastnostih razlikuje od vseh drugih vrst jekel.

Vsa brzorezna jekla so visoko legirana in močno kaljiva. Kalimo jih na zraku, v olju ali v termalni kopeli z visoke temperature v bližini tališča oziroma solidus temperature. Zaradi visoke kalilne temperature jih moramo ogrevati v solnih kopelih.

Najbolj značilna lastnost in glavna odlika brzoreznih jekel je njihova sposobnost, da obdržijo veliko trdoto do visokih temperatur.

Brzorezno jeklo se je prvič pojavilo leta 1900 in izzvalo pravo senzacijo na področju orodnih jekel. Jeklo Taylorja in Whita se je s skoraj nespremenjeno sestavo 18% W — 4% Cr — 1% V ohranilo do današnjih dni kot standardno. V desetletjih razvoja so se okrog tega osnovnega tipa razvila številna druga brzorezna jekla.

V tabeli 1 so navedena brzorezna jekla, ki jih izdeluje Železarna Ravne. Poleg smernih sestav je

navedena tudi oznaka po sistemu legiranja. V tej oznaki označujejo zaporedne številke povprečne odstotke volframa — molibdena — vanadija in kobalta. Odstotek kroma se v tej oznaki ne navaja, ker je v vseh brzoreznih jeklih približno enak — okrog 4%.

Že po kemijski sestavi teh jekel lahko pričakujemo heterogeno strukturo. Zato je metalografija brzoreznih jekel zelo zanimiva in kontrola mikrostruktur v tekoči kontroli zelo pomembna.

Poleg zbiranja izkušenj s tekočo kontrolo kvalitete brzoreznih jekel izvaja Železarna Ravne obširne raziskave na področju spoznavanja značilnosti, vzrokov nastajanja in posledic

- razporeditve karbidnih izcej,
- velikosti karbidov,
- velikosti in enakomernosti avstenitnega zrna.

V fizikalnem pogledu in po značilnih lastnostih so si vse vrste brzoreznih jekel zelo podobne, tako da njihove metalografske lastnosti in značilnosti lahko obravnavamo v splošni obliki.

Oglejmo si nekaj metalografskih osnov brzoreznih jekel, ki nam bodo olajšale obravnavanje posameznih problemov v nadaljevanjih tega članka.

#### Lito stanje

Brzorezna jekla imajo zaradi velikega deleža legiranih elementov razmeroma široko temperaturno območje strjevanja. Za molibdensko brzorezno jeklo tipa 6—5—2 (Č.7680 — BRM-2) nava-

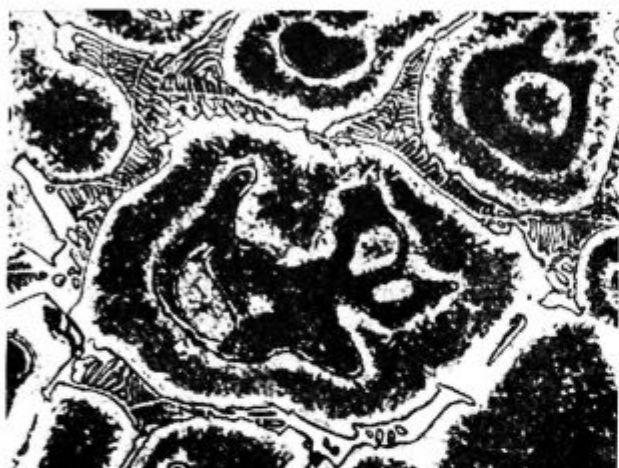
Tabela 1

Legirni tip jekla W — Mo — V — Co	Oznaka jekla		Smerna kemijska sestava					
	Železarna Ravne	J U S CB 0.002	C	Cr	W	Mo	V	Co
12 — 1 — 2	BRW-2	Č.6882	0,85	4	12,5	0,8	2	—
18 — 0 — 1	<b>BRW</b>	<b>Č.6880</b>	0,75	4	18	—	1	—
18 — 1 — 2 — 5	<b>BRC</b>	<b>Č.6980</b>	0,75	4	18	0,7	1,6	5
18 — 1 — 2 — 10	<b>BRC-3</b>	<b>Č.9782</b>	0,75	4	18	0,8	1,6	9,5
2 — 9 — 1	BRM-1	Č.7880	0,85	4	2	8,5	1,5	—
6 — 5 — 2	<b>BRM-2</b>	<b>Č.7680</b>	0,85	4	6,5	5	2	—
6 — 5 — 2 — 5	BRCMo	Č.9780	0,85	4	6,5	5	2	5
12 — 1 — 4	BRW-1	Č.6881	1,3	4	12	1	4	—
12 — 1 — 4 — 5	BRCV	Č.9781	1,3	4	12	1	4	5
10 — 4 — 3 — 10	BRU	Č.9783	1,25	4	10,5	4	3	10,5

Opomba: Prednostno tipizirana jekla so debelo tiskana.  
Posebno tipizirana jekla so normalno tiskana.  
Netipizirana jekla so kurzivno tiskana.

jajo razni avtorji razliko med likvidus in solidus temperaturo 110 — 140° C. Prehod prek tako širokega območja strjevanja povzroča močno izcejanje med litjem blokov ali ulitkov brzoreznega jekla. Torej nehomogenosti v strukturi teh jekel izvirajo pretežno že od pogojev strjevanja in jih zato ne moremo preprečiti. V vseh fazah tehnologije pa si prizadevamo, da bi nehomogenosti zmanjšali s čim bolj enakomerno porazdelitvijo strukturnih faz.

Prvi solidus vsebuje najmanjši odstotek ogljika. Zaradi izločanja maloogljičnega solidusa se odstotek ogljika v preostali tekoči fazi povečuje. Obenem z zniževanjem temperature med strjevanjem se nenehno spreminja kemijska sestava. Ob koncu preostane še ledeburitni evtektik, ki se strdi zadnji in v litem stanju v obliki mreže obkroža nehomogena primarna zrna (slika 1).



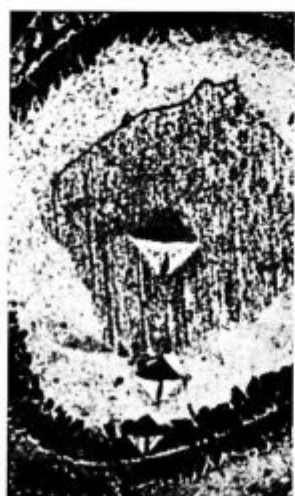
Slika 1

0,04 mm

Nehomogenost in plastoviti sestav primarnih zrn se posebno izraža v litem brzoreznem jeklu po kaljenju brez predhodnega žarjenja (slika 2). Takoj naj omenimo, da smo tak postopek upora-



0,1 mm



0,04 mm

Slika 2

bili namenoma za čim bolj izrazit prikaz plastovitosti primarnih zrn. Pri normalni toplotni obdelavi se tak način nikoli ne uporablja, saj je tudi pri litih orodjih iz brzoreznih jekel kaljenje brez predhodnega žarjenja velika napaka.

Na sliki 2 se posamezne plasti močno razlikujejo tudi po trdoti, kar kažejo vtiski merjenja mikrotrdot. V jedru je trdota najmanjša zaradi najmanjšega odstotka ogljika. Mikrostruktura je pretežno sorbitna in ima po kaljenju trdoto okrog 35 HRC, po popuščanju pa okrog 30 HRC. Zrna obkroža ledeburitna mreža. Njena trdota skoraj ni odvisna od toplotne obdelave in znaša okrog 65 do 67 HRC. Prehodna plast med jedrom in ledeburitno mrežo je po kaljenju pretežno sestavljena iz različnih deležev martenzita in zaostalega avstenita. Trdota te prehodne plasti je po kaljenju okrog 58 — 60 HRC in se pri popuščanju največkrat nekoliko poveča zaradi premene zaostalega avstenita v martenzit.

S kaljenjem in popuščanjem ne moremo izboljšati homogenosti primarnih zrn, ker ne moremo zmanjšati mikroizcej.

Izoblikovanje ledeburitne mreže je v veliki meri odvisno od pogojev litja, predvsem od temperature litja, od velikosti ingota, položaja v ingotu, od načina ohlajevanja itd. Ledeburitna mreža in oblika ledeburitnega evtektika ima odločilen vpliv na stopnjo enakomernosti strukture v vseh tehnoloških fazah vroče predelave in toplotne obdelave. Nekaj značilnih oblik ledeburitnega evtektika kažejo slike 3 — 6.

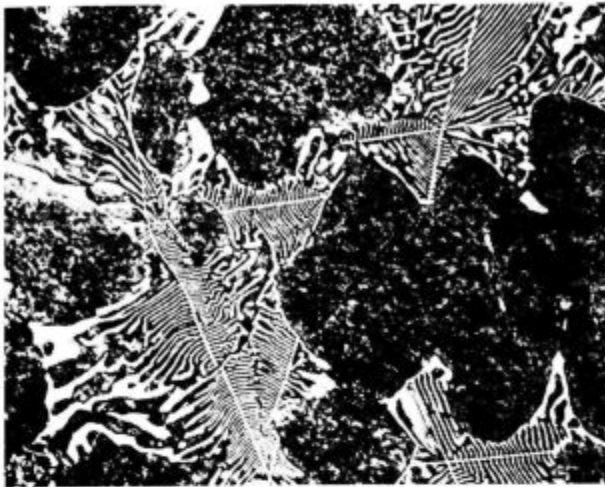
#### Zarjeno stanje

Z dobrim žarjenjem se že v litem brzoreznem jeklu doseže pomembno izboljšanje homogenosti v notranjosti primarnih zrn. Mikroizceje, posebno plastovite razlike koncentracij ogljika, se pri žarjenju z difuzijo vsaj delno izenačijo. Primarne ledeburitne mreže pa z žarjenjem ni mogoče spremeniti. Mikrostrukturo litega žarjenega brzoreznega jekla kaže slika 7.



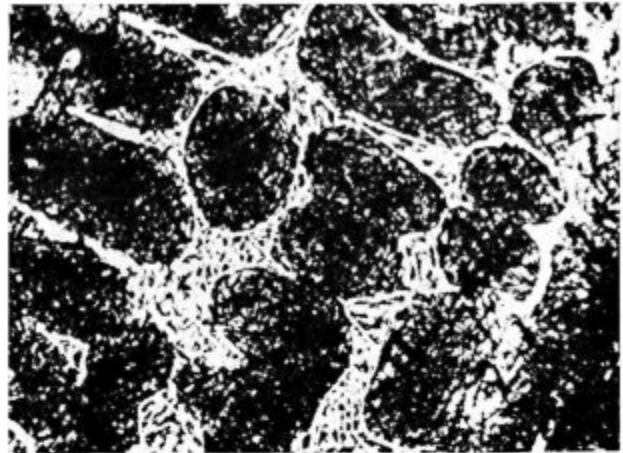
0,04 mm

Slika 3



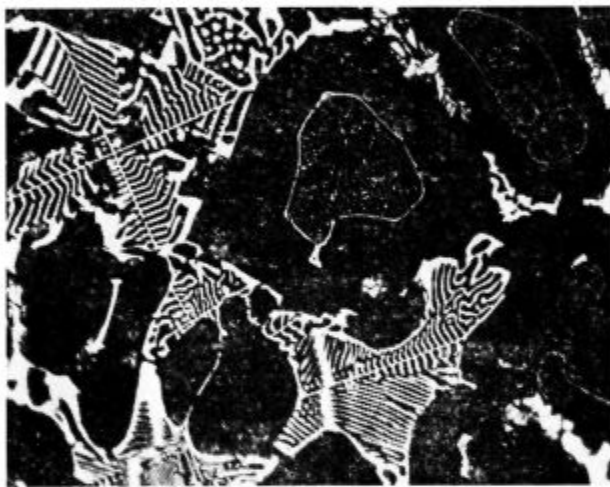
Slika 4

0,04 mm



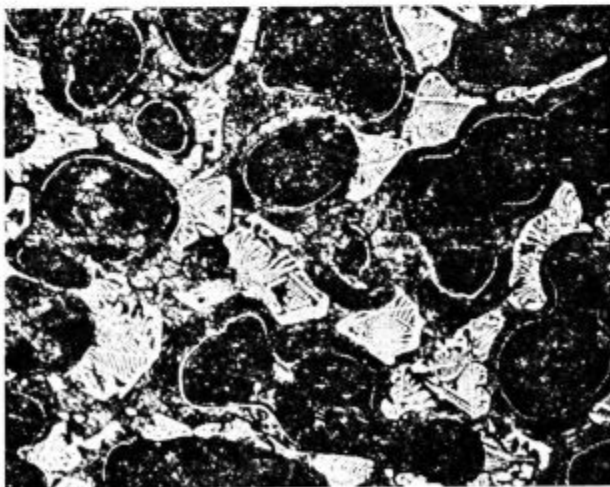
Slika 7

0,1 mm



Slika 5

0,04 mm



Slika 6

0,04 mm

Pri normalni temperaturi žarjenja brzoreznega jekla ne moremo pričakovati, da bi z difuzijo mogli pomembno izenačevati makroizceje. Nehomogenosti strukture in kemijske sestave po preseku in višini blokov so odvisne od temperature litja, pogojev litja in ohlajevanja, predvsem pa od velikosti in oblike blokov.

Pomembno izboljšanje homogenosti lahko dosežemo predvsem s pravilno in učinkovito plastično deformacijo v vročem — s kovanjem in valjanjem. Prav posebno pri brzoreznem jeklu velja ugotovitev, da ni edini namen vroče predelave preoblikovanje do določene dimenzije, ampak tudi kvalitno izboljšanje jekla. Zaželena je čim večja stopnja plastične deformacije, pri čemer pa ne smemo pozabiti, da so izceje in ledeburitne mreže tem bolj grobe, čim večja je teža in velikost ingota. Ob najugodnejših pogojih strjevanja je treba doseči najugodnejšo kombinacijo začetnega formata ingota (odločilen je presek in konstrukcija kokile) in stopnje predelave s kovanjem in valjanjem. Tudi orodje pri kovanju in kalibracija pri valjanju pomembno vplivata na doseganje čim bolj enakomernih karbidnih izcej po preseku palic. Plastičnost brzoreznih jekel je slaba in ni lahko doseči globoke deformacije.

Pri vroči predelavi se mreže ledeburitnega eutektika pod vplivom udarcev kladiva ali pritiska valjev pri plastični deformaciji razbijajo in delci ledeburitnih primarnih karbidov se v odvisnosti od jakosti deformacij premeščajo. Mreže se deformirajo in trgajo, dokler se karbidna zrna ne razporedijo v vzdolžne trakove ali v karbidna zrna, ki so enakomerno razsejana po vsem preseku. Ta proces stopnjevanja enakomernosti glede razporeditve karbidnih izcej kažejo slike 8 — 11.

Stopnja enakomernosti v razporeditvi karbidnih izcej je pri brzoreznih jeklih ena izmed odločilnih zahtev v kvalitetnih prevzemnih pogojih. Za ocenjevanje te stopnje enakomernosti je v literaturi več primerjalnih tabel.

Železarna Ravne je izdala svojim jeklom prilagojeno primerjalno tabelo z desetimi stopnjami.



Slika 8

0,1mm



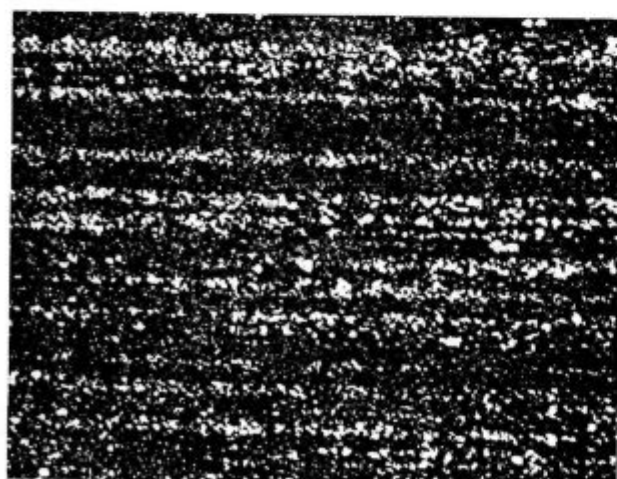
Slika 11

0,1mm



Slika 9

0,1mm



Slika 10

0,1mm

Po tej tabeli se ocenjuje le razporeditev karbidov, ne upošteva pa se različnih količin in velikosti karbidov pri posameznih vrstah brzoreznih jekel. Po tabeli železarne Ravne ustreza:

- slika 8 stopnji 9,
- slika 9 stopnji 6,
- slika 10 stopnji 4,
- slika 11 stopnji 2.

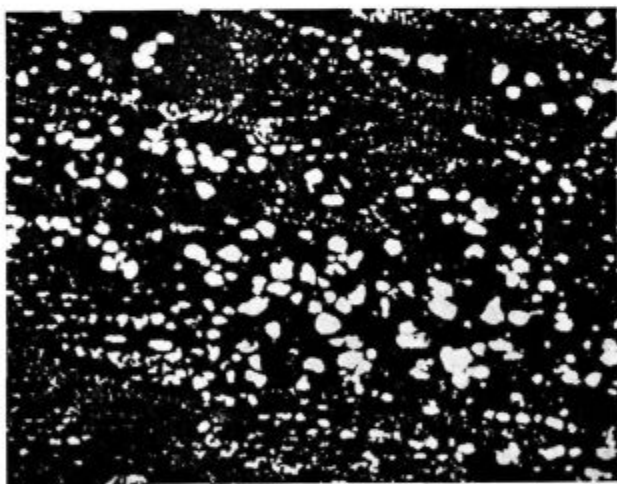
Omejitve po tej tabeli so odvisne od dimenzije in namenjene uporabe jekla. Določijo se sporazumno ob naročilu.

Vplivu razporeditve karbidnih izcej na mehanične in tehnološke lastnosti pripisujejo precej velik pomen. Verjetno vpliva neenakomerna razporeditev najbolj na občutljivost orodij pri toplotni obdelavi in na žilavost orodij, manj pa na rezalno sposobnost. Nekateri se bolj boje ostankov mrež, drugi pa trakaste razporeditve. Glede na taka različna mnenja so tudi zahteve v kvalitetnih pogojih za prevzem jekla zelo različne. Lahko rečemo, da je neposredni vpliv razporeditve karbidnih izcej na lastnosti brzoreznih jekel še dokaj nedokazan. Različna mnenja se več opirajo na bolj ali manj logična sklepanja in domneve kakor pa na rezultate objektivnih in sistematičnih raziskav. Mnenje o izredni škodljivosti karbidnih mrež, o katerih ne bi smelo biti po mnenju nekaterih niti sledov, vedno bolj izgublja svojo logično osnovo in upravičenost. V zadnjih letih se zelo razširja uporaba litih orodij iz najkvalitetnejših brzoreznih in super brzoreznih jekel. Ta imajo tako velik delež legirnih elementov in tako visok odstotek ogljika v sestavi, da so skoraj nepredelovalna. Zato je litje orodij iz nekaterih od njih skoraj edina možnost uporabe. Ugotavljajo odlične lastnosti takih orodij, vemo pa iz opisanih osnov, da imajo popolnoma sklenjeno karbidno mrežo ledeburitnega evtektika.

V železarni Ravne raziskujemo odvisnost enakomernosti razporeditve izcej od dimenzij in stop-

nje predelave ter vpliv razporeditve na nekatere lastnosti. O teh raziskavah bomo poročali v eni od naslednjih številčk Zelezarskega zbornika.

Za izboljšanje enakomernosti karbidnih izcej so različni raziskovalci predlagali več posebnih postopkov in sprememb v tehnologiji (predsferoidizacijsko žarjenje, cepljenje, vibracije med litjem ipd.). Noben od predlogov se ni posebno uveljavil. Predsferoidizacijsko žarjenje ingotov na visoki temperaturi je dalo pri raziskavah odlične rezultate glede enakomernosti razporeditve. S tem postopkom se da skoraj popolnoma odstraniti ostanke karbidne mreže. Praktična uporabnost postopka je bila že po izvedbi zaradi izredno visoke temperature in dolgih časov zelo dvomljiva. Postopek ima še eno slabo stran: enakomerna razporeditev se doseže s pomočjo difuzije, pri tem pa nastanejo groba karbidna zrna. Pri tem nastaja vprašanje, kaj je bolj škodljivo za lastnosti orodij, karbidne mreže ali grobi karbidi. Raziskave, ki bodo opisane v nadaljevanju tega članka, so pokazale zelo škodljivi vpliv grobih karbidov na lastnosti orodij. Ne samo pri posebnih postopkih, ampak tudi pri redni proizvodnji se je treba izogibati dolgim časom ogrevanja brzoreznih jekel pri visokih temperaturah. Tako namreč nastajajo grobi karbidi, kakršne kaže slika 12 za primerjavo s slikama 10 in 11 pri enaki (100-kratni) povečavi.



Slika 12

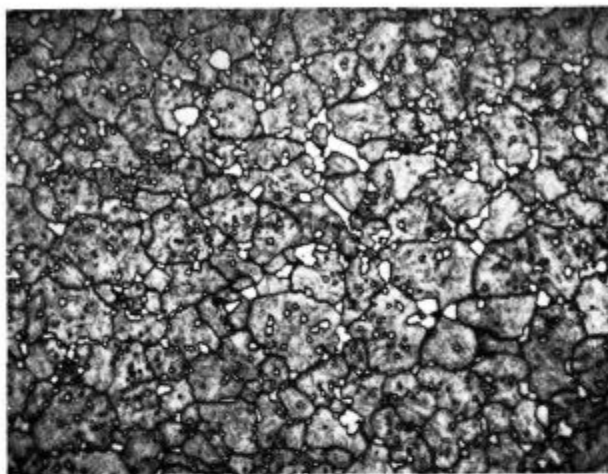
0,1mm

#### Kaljeno stanje

Značilne mikrostrukture v kontroli po kaljenju

Pri kaljenju se med avstenitizacijo delež sekundarnih karbidov raztaplja v avstenitu. Po ohladitvi s kalilne temperature nastane martenzitna struktura s precejšnjim deležem zaostalega avstenita in neraztopljenimi karbidi. Primarni karbidi ostanejo vedno neraztopljeni, delež preostalih neraztopljenih sekundarnih karbidov pa je odvisen od kalilnih pogojev — temperature in časa.

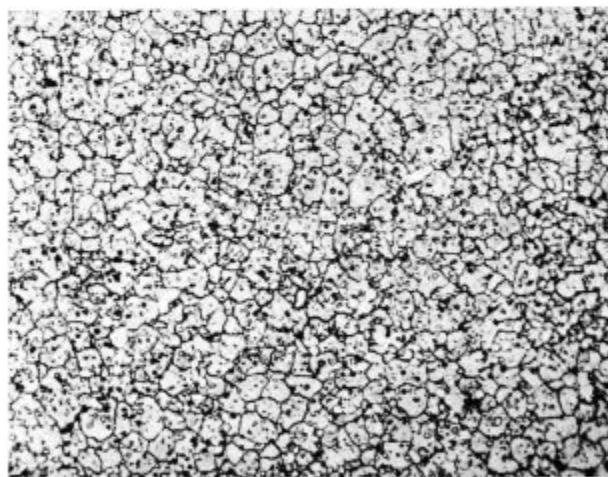
Po količini neraztopljenih karbidov in velikosti avstenitnega zrna lahko v kaljenem stanju z metalografskim pregledom dobro presojava pravilnost kalilnih pogojev. S primernim jedkanjem se v kaljenem stanju meje avstenitnega zrna zelo jasno izražajo. Velikost zrna je odvisna predvsem od temperature in časa avstenitizacije.



Slika 13

0,04mm

Slika 13 kaže normalno mikrostrukturo kaljenega brzoreznega jekla z razmeroma enakomerno velikostjo zrna in minimalnim ostankom neraztopljenih sekundarnih karbidov. Tako kaljeno jeklo je dobro popuščno obstojno in ima dobre rezalne sposobnosti, če ga pravilno popustimo.



Slika 14

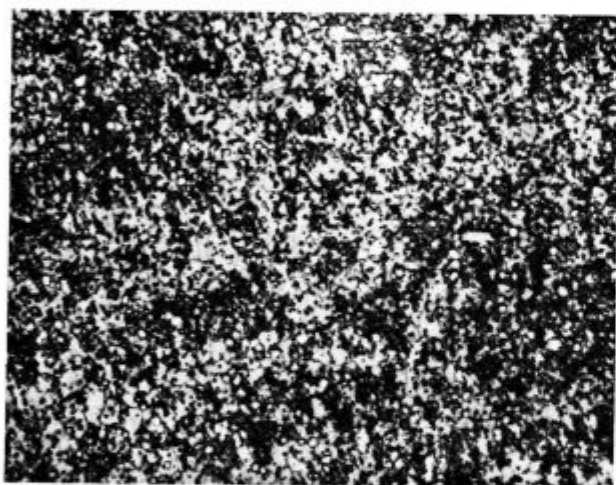
0,04mm

Na sliki 14 je prikazana mikrostruktura s finejšim avstenitnim zrncom, ki omogoča boljše žilavost orodja. Zaradi precejšnjega deleža neraztopljenih sekundarnih karbidov ni izkoriščen celoten delež legirnih elementov v jeklu z raztapljanjem v osnovi med avstenitizacijo. Tako jeklo ima na račun boljše žilavosti slabšo popuščno obstojnost. S primerjavo mikrostruktur na slikah 13 in 14



lahko nedvomno sodimo, da je zadnja mikrostruktura pripadala jeklu, kaljenemu z nižje temperature, ali pa je bil potopni čas v solni kopeli na kalilni temperaturi krajši.

Nižjo kalilno temperaturo, finejše avstenitno zrno, a s tem večji delež neraztopljenih finih karbidov izberemo normalno pri kaljenju finejših orodij, posebno če so izpostavljena neenakomernim in sunkovitim obremenitvam ali pa, če imajo tanke debeline in neugodno obliko s hitrimi spremembami preseka. S takimi ukrepi ne smemo pretiravati, ker dobimo s tem prenizko temperaturo ali s prekratkim potopnim časom kaj hitro nepravilno — »podkaljeno« mikrostrukturo z neizraženimi mejami avstenitnih zrn in zelo velikim deležem neraztopljenih finih karbidov (slika 15). Od orodja, ki ima po kaljenju tako mikrostrukturo, ne moremo pričakovati lastnosti, kakršne pripisujemo brzoreznim jeklom.



Slika 15

0,04 mm

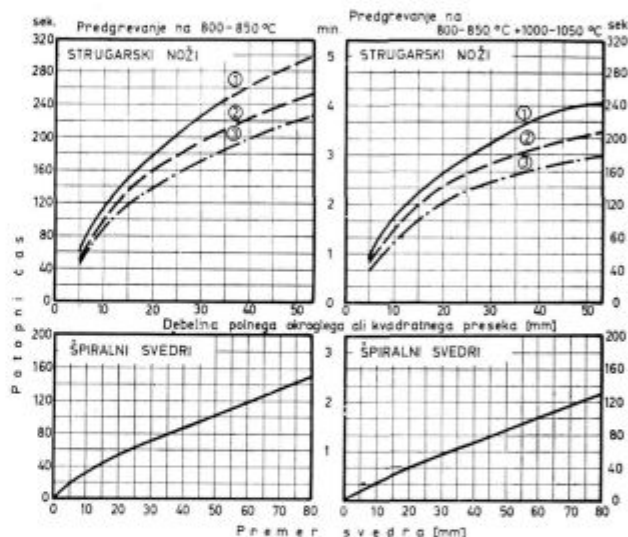
S previsoko kalilno temperaturo in s predolgim potopnim časom lahko brzorezno jeklo pokvarimo, tako da ga s ponovno toplotno obdelavo ni mogoče več popraviti. Čim višja je kalilna temperatura, tem večja je velikost avstenitnega zrna. Takoj ko se raztopi v avstenitni osnovi celotna količina sekundarnih karbidov, začne avstenitno zrno zelo hitro naraščati in postaja grobo, neenakomerno. Za preprečevanje takih napak in nepopravljive škode moramo upoštevati omejitve kalilnih temperatur, ki jih za posamezne vrste brzoreznih jekel priporoča proizvajalec (npr. tabela 2). Pri tem moramo upoštevati, da se kalilne temperature na zgornji meji navedenega območja uporabljajo le za orodja preprostih oblik, namenjena grobi obdelavi. Pri takih pogojih dela je zaradi močnega segrevanja rezila odločilna popuščna obstojnost in obstojnost trdote ter rezalne sposobnosti do visokih delovnih temperatur.

Tabela 2 — Kaljenje brzoreznih jekel

	Temperatura kaljenja v °C za groba in preprosta orodja	za finejša orodja kompliciranih oblik
BRW-2	1240—1270	1210—1240
BRW	1260—1290	1230—1260
BRC	1270—1300	1240—1270
BRC-3	1280—1310	1250—1280
BRM-1	1180—1220	1170—1200
BRM-2	1200—1240	1170—1200
BRCMo	1210—1250	1180—1210
BRW-1	1240—1270	1210—1240
BRCV	1250—1280	1220—1250
BRU	1220—1270	1190—1240

Zelo važna je natančna kontrola potopnih časov — t. j. časov ogrevanja v solni kopeli na kalilni temperaturi (tabela 3).

#### Potopni časi za kaljenje v solni kopeli



#### Pripomba:

Diagram daje le splošne napotke. Potopni čas je odvisen od teže vložka, toplotne kapacitete kopeli in karakteristik peči

Krivulja ① BRC, BRC-1, BRC-2, BRC-3, BRCV  
BRW, BRW-1, BRW-2, BRU

Krivulja ② BRM-1, BRM-2, BRCMo

Krivulja ③ BRM, BRW-3

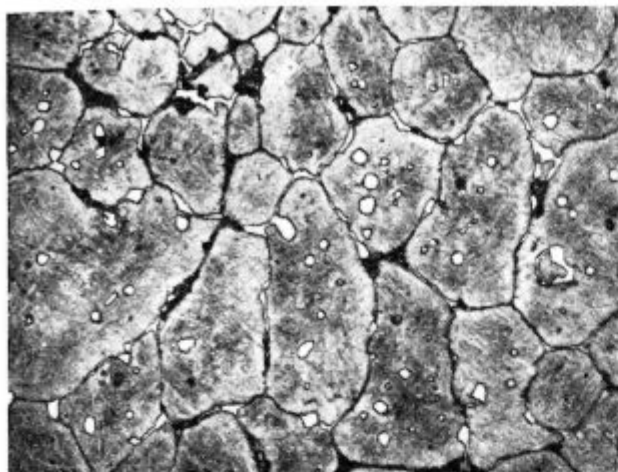
Poglejmo si nekaj značilnih mikrostruktur, ki so posledica napak pri kaljenju. Take napake so lahko:

- previsoka temperatura,
- predolg čas,
- kombinacija obeh napak.

#### Znaki pregretja pri kaljenju v mikrostrukturi

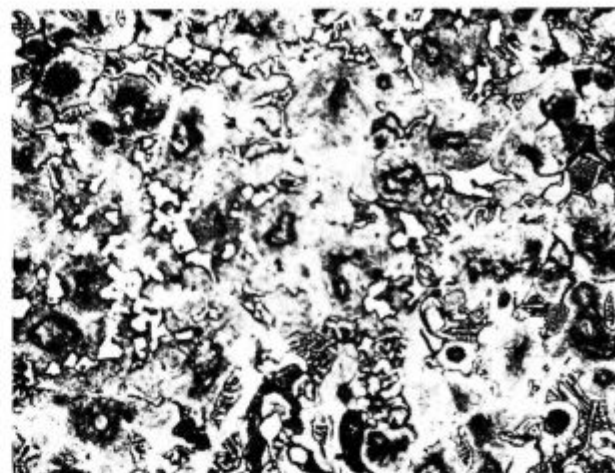
Slike 16 — 21 prikazujejo stopnjevanje posledic pregretja pri kaljenju zaradi previsoke temperature in predolgega časa.

Mikrostruktura na sliki 16 je nedvomni znak pregretja zaradi grobega zrna, praktično popolne odsotnosti sekundarnih karbidov in zbiranja kar-



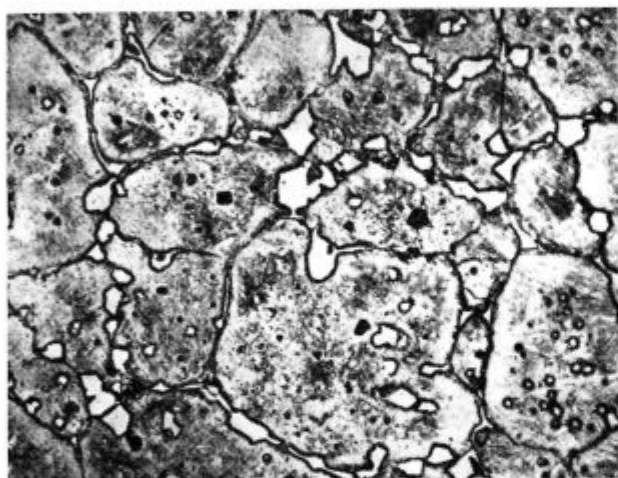
Slika 16

0,04 mm



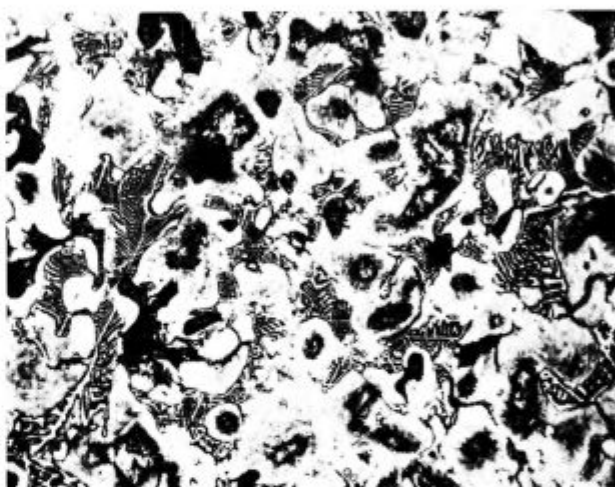
Slika 19

0,04 mm



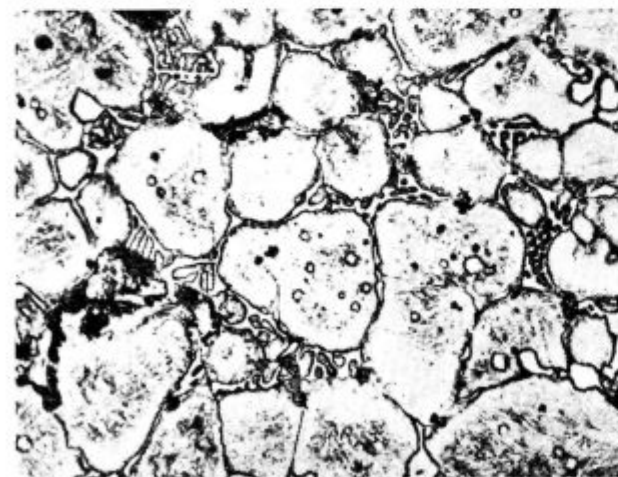
Slika 17

0,04 mm



Slika 20

0,04 mm



Slika 18

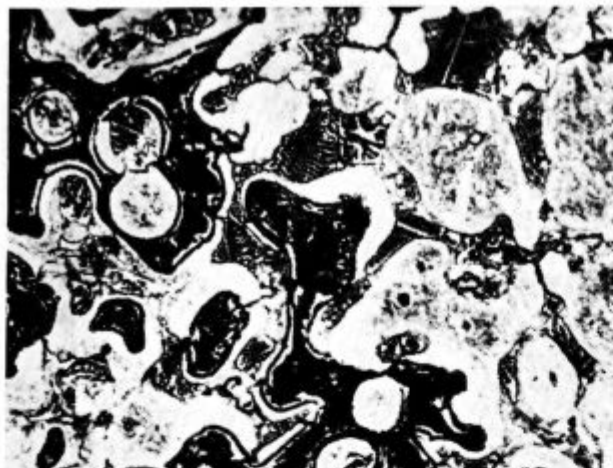
0,04 mm

bidov v obliki sklenjene mreže po mejah zrn. Taka oblika mreže nastane lahko le z delnim nataljevanjem ledeburitnega evtektika. Na stičiščih zrn se pojavljajo zaradi nataljevanja ledeburitnega evtektika večje ploskve — oglati karbidi na sliki 17.

Grobo zrno je lahko posledica predolgega potopnega časa na kalilni temperaturi. Kakor hitro pa se pojavijo na stičiščih zrn oglati karbidi ali pa še jasnejši znaki nataljevanja ledeburitnega evtektika, je to jasen znak previsoke temperature kaljenja. Do pojavov nataljevanja pride lahko le s preokračitvijo solidus temperature v posameznih plasteh mikroizcej.

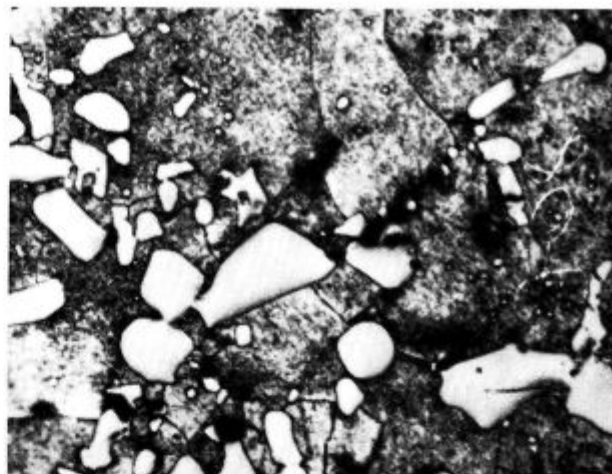
Se jasnejši znak pregretja s pojavom taljenja izcejanih plasti z evtektno sestavo je pojav značilne rebraste oblike ledeburitnega evtektika na slikah 18 — 21. Na sliki 18 jasno vidimo, kako rebrasti evtektik nastaja iz grobih ledeburitnih karbidov.

Na slikah 19 — 21 je bilo pregretje tako močno, da je prišlo do splošnega taljenja večjih plasti v tolikšni meri, da meja zrn praktično ni več videti.



Slika 21

0,04 mm



Slika 22

0,04 mm

Tako jeklo je prežgano in popolnoma uničeno. Take mikrostrukture s toplotno obdelavo ni več mogoče popraviti.

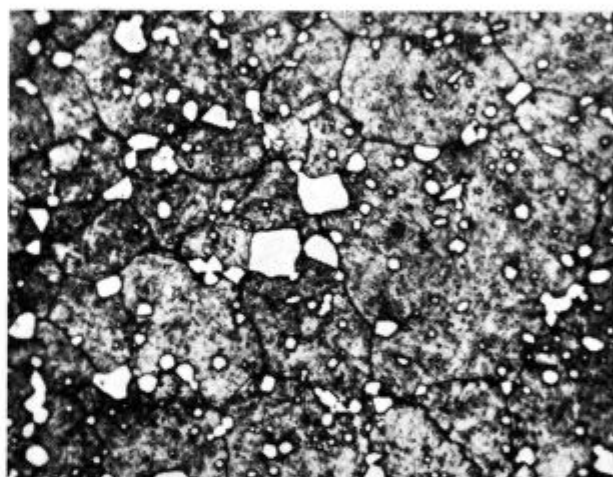
Primerjava mikrostruktur nam omogoča zanimive zaključke. Če bi primerjali mikrostrukturi na slikah 17 in 18, bi sodili, da sliki 17 ustreza nekoliko nižja temperatura in daljši čas, sliki 18 pa krajši čas in višja temperatura. Do teh sklepov pridemo zato, ker je v prvem primeru zrno bolj grobo, v drugem primeru pa ledeburitni evtektik kaže jasnejše posledice taljenja. Podobno lahko sklepamo, da je bila v primeru slike 19 temperatura višja, čas pa lahko krajši, kakor v primeru na sliki 18.

Vse to so za toplotno obdelavo zelo pomembni zaključki.

#### Grobi in oglati karbidi

Že na sliki 12 so bili prikazani grobi karbidi v žarjenem stanju. Še pogosteje srečamo pri metalografskih pregledih grobe karbide v kaljenem stanju. Vedno ni mogoče sklepati z gotovostjo o njihovem izvoru. Vsekakor je to nezaželena strukturna napaka, ki pa je lahko posledica nepravilnega ogrevanja pri vroči predelavi ali pa posledica napak pri kaljenju.

Slike 22 — 25 prikazujejo nenormalne karbide v kaljenem stanju. Karbidi v teh primerih se razlikujejo po velikosti in obliki. Na sliki 22 vidimo zelo grobo zrno in zelo grobe karbide, od katerih so nekateri okrogli, drugi pa podolgovati, niso pa preveč oglati. Za take karbide ni mogoče z gotovostjo trditi, da so posledica nepravilnega kaljenja. Lahko so bili taki že pred kaljenjem zaradi posledic nepravilnosti med vročo predelavo. V takem primeru lahko nastane grobo zrno tudi pri pravilnem kaljenju. Posebno zanimivo je pri tej mikrostrukturi nakazano združevanje sosednjih karbidov, kar lahko privede do karbidnih zrn izrednih velikosti.



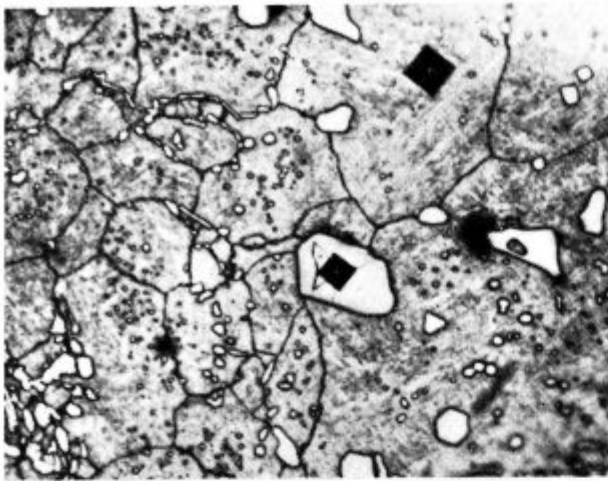
Slika 23

0,04 mm



Slika 24

0,04 mm



Slika 25

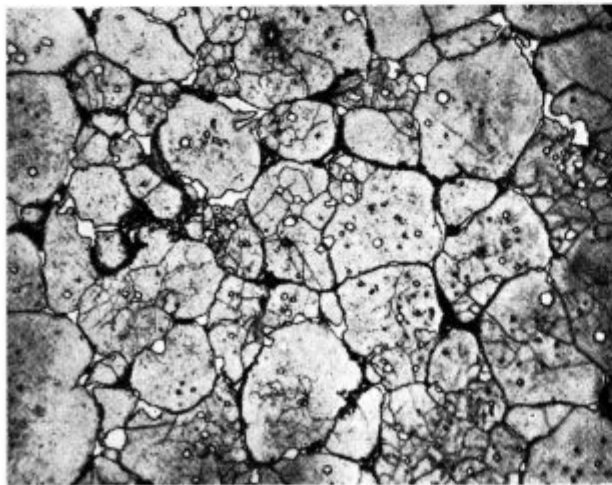
0,04 mm

Tudi v primeru mikrostrukture na sliki 23 ne moremo povsem gotovo sklepati o izvoru grobih karbidov. Včasih namreč tudi pri normalnem kaljenju dobimo grobo in neenakomerno avstenitno zrno zaradi grobih in neenakomerno razporejenih karbidov po vroči predelavi in žarjenju.

Na slikah 24 in 25 s precejšnjo gotovostjo lahko trdimo, da je pri kaljenju prišlo do pregretja jekla. To sodimo v primeru slike 24 zaradi izredno oglatih karbidov po mejah in na stičiščih zrn, v primeru slike 25 pa zaradi zelo grobega in neenakomernega zrna in verig karbidnih zrn po mejah nekaterih avstenitnih zrn.

»Podzrno«

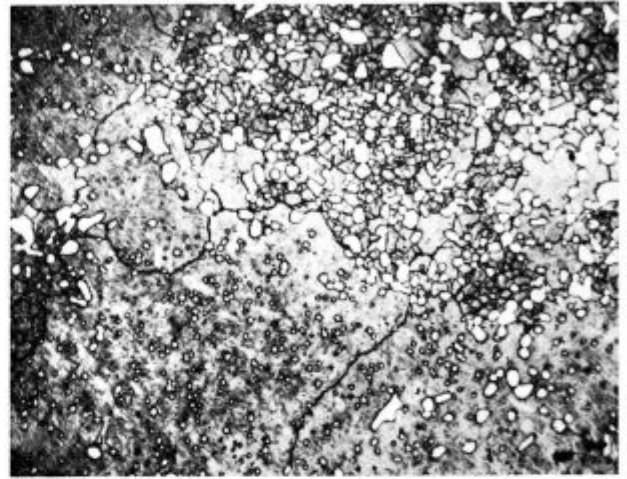
Posebna vrsta nenormalnosti v mikrostrukturi kaljenega brzoreznega jekla je pojav tako imenovanega podzrna. V notranjosti jasno izraženih grobih zrn pregretega brzoreznega jekla se pojavljajo meje finih zrn, kakor kaže slika 26.



Slika 26

0,04 mm

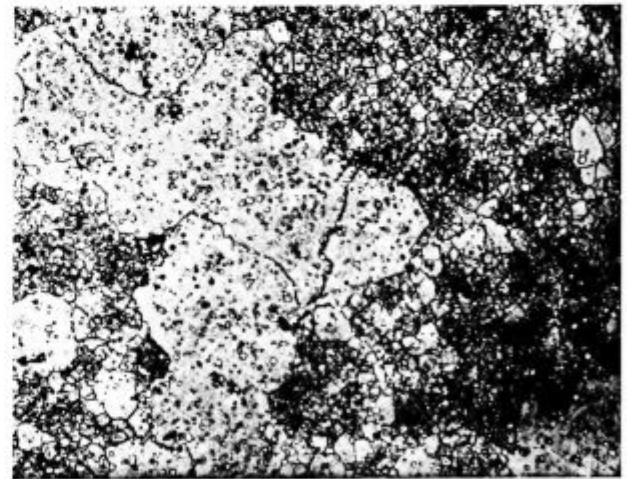
Neke vrste podzrno se pojavlja tudi v zvezi z neenakomerno razporeditvijo karbidov. V področjih mikrostrukture z večjim številom karbidov je zrno fino, kjer pa karbidov ni toliko, ni ovir za rast zrna in avstenitno zrno je izredno grobo. Tak primer mikrostrukture prikazuje slika 27.



Slika 27

0,04 mm

Podzrno v podobni obliki se pojavlja tudi v zvezi s pojavom »naftalinskega preloma« in pri dvakratnem kaljenju brez vmesnega žarjenja. V takih primerih so posamezna zelo groba zrna obkrožena s področji zelo finih zrn (slika 28). V tem primeru ni razporeditev karbidov vzrok neenakomernega zrna in tudi drugih znakov pregretja ni.



Slika 28

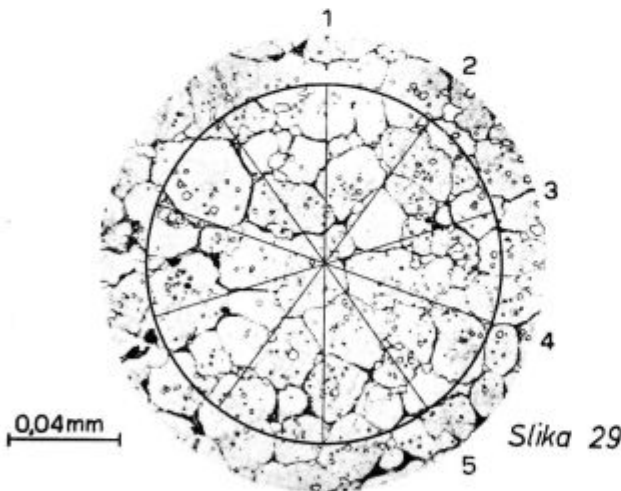
0,04 mm

Podzrno v takih in drugačnih oblikah se lahko pojavlja še kot posledica drugih vplivov. To je razmeroma zapleten pojav, ki ga bomo posebej obravnavali v enem od nadaljevanj.

### *Metalografsko določevanje velikosti avstenitnega zrna*

Določevanje velikosti avstenitnega zrna z mikroskopom pri povečavi 500-krat ali večji je izredne važnosti za kontrolo toplotne obdelave. Ocenjevanje zrnatosti prelomov na oko lahko odkrije precejšnje napake (pregreto in prežgano jeklo), za splošno oceno pravilnosti kaljenja pa je preveč nezanesljivo. Prenizko kaljene strukture skoraj ni mogoče opaziti na oko, ker je prelom največkrat prav tako fino zrnat kakor pri pravilnem kaljenju.

Tudi standardne metalografske metode za ocenjevanje velikosti zrna so premalo občutljive za majhne razlike velikosti in neenakomernosti zrna. Že majhne razlike so lahko dragoceno opozorilo za pravočasno odpravljanje manjših nepravilnosti. Zaradi tako velike važnosti in omenjenih značilnosti se za ocenjevanje velikosti finega avstenitnega zrna skoraj izključno uporablja posebna metoda po Snyder - Graffu. Indeks velikosti zrna SG je povprečno število zrn, ki jih preseka daljica naravne dolžine 0,005 col. Z upoštevanjem povečave se na medlici mikroskopa uporabi ustrezno merilo. Za določitev srednje vrednosti SG se priporoča 5 ali 10 štetij na različnih mestih metalografskega obrusa. V tekoči kontroli je zelo praktično na medlici vgravirano merilo z daljicami za štetje zrn v petih različnih smereh, kar prikazuje slika 29.



Za orodja finejših vrst je indeks velikosti zrna navadno SG 14 — 20, za bolj groba orodja pa SG 10 — 14.

Velikost avstenitnega zrna je v postopku kaljenja odločilen kontrolni kriterij. V dobavne pogoje za kakovost jekla pa proizvajalec omejeitev velikosti avstenitnega zrna ne more sprejeti, ker je ta mnogo bolj odvisna od pogojev kaljenja kakor od kakovostnega stanja jekla.

### **Popuščeno stanje**

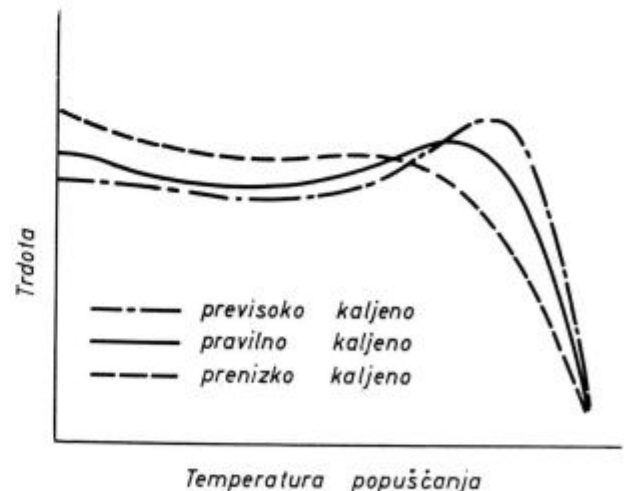
Popuščanje normalnega in normalno kaljenega brzoreznega jekla daje fino martenzitno strukturo z minimalno količino zaostalega avstenita. V strukturi je določena količina primarnih in sekundarnih karbidov, tistih, ki se med avstenitizacijo niso raztopili, ali pa so se pri popuščanju izločili. V taki fini, pravilno popuščeni mikrostrukturi se meja zrn normalno ne vidi.

Brzorezno jeklo ima v kaljenem stanju precejšnjo količino zaostalega avstenita (normalno okrog 20 %), ki se pri prvem popuščanju spremeni v martenzit. Ta ne sme ostati nepopuščen, zato je nujno potrebno brzorezna jekla vedno dvakrat popuščati.

Vse nepravilnosti predhodnih faz tehnološkega postopka povzročajo nenormalnosti v popuščenem stanju. Vse nenormalnosti pa je v mikrostrukturi popuščenega jekla najtežje ugotoviti. S popuščanjem lahko v precej širokih mejah spreminjamo trdoto kaljenega jekla, ne moremo pa s popuščanjem popravljati napak kaljenja in dosegati normalnih mehanskih in tehnoloških lastnosti z defektnim jeklom. Tako npr. krhkosti pregretega brzoreznega jekla ne odpravimo, četudi pri popuščanju močno znižamo trdoto.

Pri popuščanju brzoreznih jekel se pojavlja značilni efekt »sekundarne trdote« v temperaturnem območju okrog 550°C. Vrh sekundarne trdote v krivulji popuščanja se ob zniževanju kalilne temperature znižuje in obenem pojavlja pri nižji temperaturi popuščanja (glej sliko 30).

Pojav sekundarne trdote pripisujejo spremeni zaostalega avstenita v martenzit in izločanju sekundarnih karbidov. Čim višja je kalilna temperatura, tem večja je količina zaostalega avstenita po kaljenju, tem večji je delež raztopljenih karbidov in



Slika 30: Popuščne krivulje (shema)

obenem tudi večja popuščna obstojnost martenzitne osnove zaradi večje vsebnosti legirnih elementov.

Pri enaki trdoti v popuščenem stanju dobimo lahko tako različne mikrostrukture in s tem posredno mehanske ter tehnološke lastnosti, da se prav lahko prepričamo, kako majhno vrednost ima

merjenje trdote v popuščenem stanju kot kriterij za oceno pravilnosti toplotne obdelave. Do enake trdote lahko pridemo v postopku toplotne obdelave po različnih »poteh« — dobrih in slabih.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Schnelldrehstähle unterscheiden sich nach ihren Eigenschaften stark von der übrigen Stahlsorten. Die Eigenschaften der Werkzeuge sind zum Grossteil von den Bedingungen der heissen Verarbeitung, der Wärmebehandlung und der Mikrostruktur des Stahles abhängig. Deswegen behandelt der Artikel im ersten Teile die metallographischen Eigenheiten der Schnelldrehstähle.

Es sind die Charakteristiken der Mikrostruktur in gegossenem Zustand mit Aufzeigung der verschiedenen Formen des Ledeburiteutektikums aufgezeigt.

Die Mikrostruktur des Stabstahles im weichgeglühten Zustande ist vom Verarbeitungsgrad in der Wärme abhängig. Es sind die verschiedenen Gleichmässigkeitsstufen in der Karbidverteilung aufgezeigt. Das Auftreten von

Grobkarbiden ist nur erwähnt, weil dieses Problem genauer in den Forsetzungen behandelt wird.

Die metallographische Kontrolle der Schnelldrehstähle zeigt nach dem Härten gut die Unregelmässigkeiten, deswegen sind die typischen Beispiele der richtigen und defekten Mikrostrukturen aufgezeigt.

Der Erfolg des Anlassens ist von der richtigen Wahl der Anlassstemperatur abhängig, die Defekte der Mikrostrukturen sind aber in der Hauptsache die Folge von Unregelmässigkeiten der vorgehenden technologischen Phasen.

Im zweiten und dritten Teil werden die Folgerungen aus den Untersuchungen der Ursachen und Bedingungen des Entstehens grober Karbide und ihre Folgen auf die mechanischen und technologischen Eigenschaften beschrieben.

## SUMMARY

Upon their characteristics high speed steel differ completely from all other kinds of steel. Characteristics of tools depend a great deal on conditions of hot working, heat treatment and microstructure of steel. Therefore the first part of the article deals with metallographic characteristics of high speed steels.

Characteristics of microstructures in as-poured condition and different forms of ledeburite eutetic are shown.

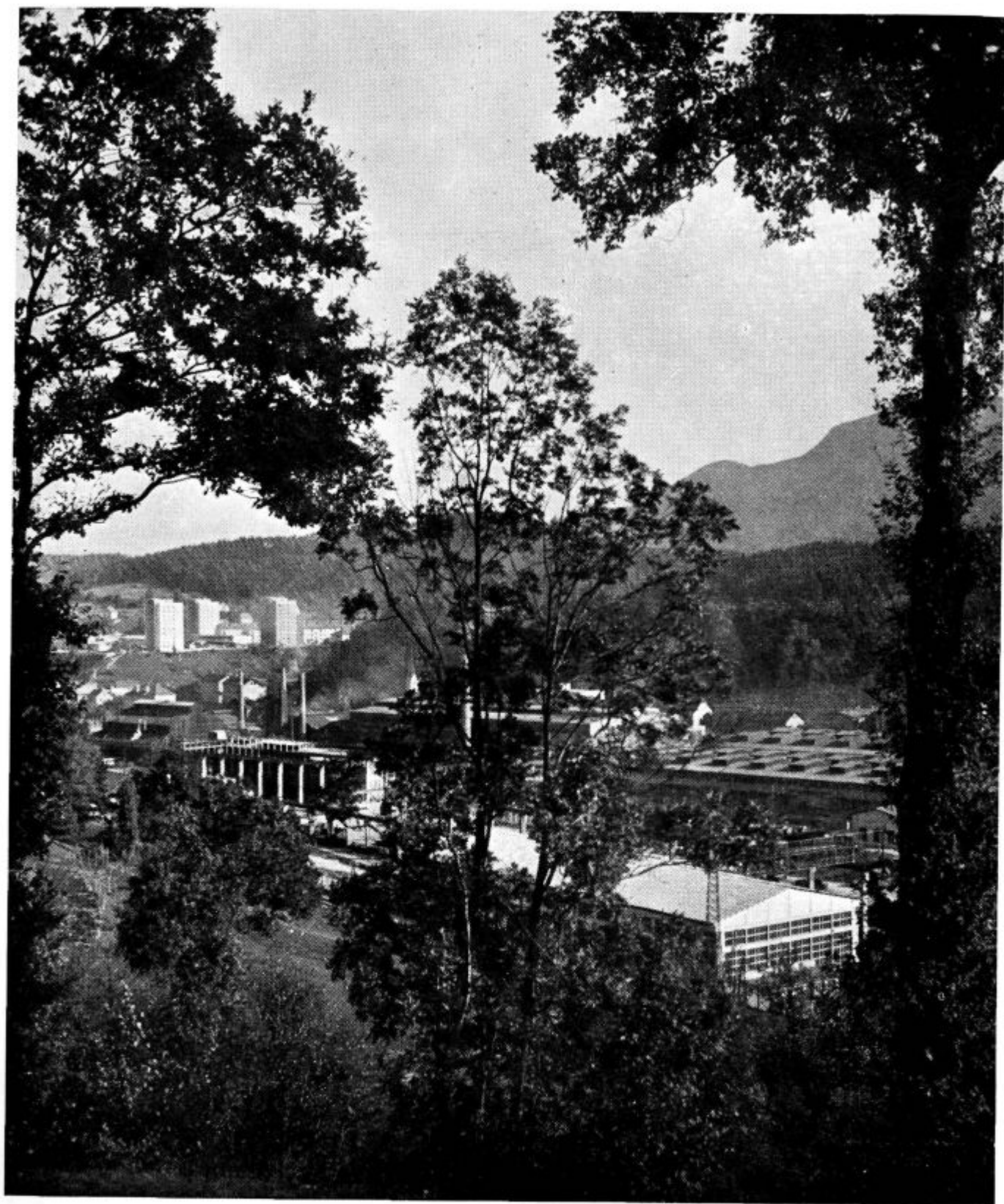
Microstructure of soft annealed rod steel depends on degree of hot deformation. Different degrees of carbides uniformity are shown. Phenomenon of coarse carbides is

mentioned only, since further discussion of this problem is to be continued later.

Defects of high speed tool steels can be well discovered by metallographic control and therefore typical examples of correct and incorrect microstructures are shown.

Success of tempering depends on correct tempering temperature, while defects of microstructure result mainly as a consequence of previous incorrect technology.

In second and third part the reasons and conditions for coarse carbide forming and their influence on mechanical and technological properties will be described.



# ŽELEZARNA RAVNE

## Analiza statistične porazdelitve na elektronskem računalniku

Članek obravnava normalno porazdelitev. Pri testiranju normalnosti je podana praktična metoda za izračun količine  $\chi^2$ . Metoda je uporabna za izračun na elektronskem računalniku.

V članku se opis priprave podatkov in tolmačenje rezultatov nanaša na program za analizo porazdelitve, izdelan na računalniku Zuse Z-23.

### UVOD

Metode matematične statistike so namenjene objektivnemu prikazovanju in tolmačenju raznih pojavov, ki so izpostavljeni številnim vplivom. Ti vplivi so v zvezi s surovinami, stroji, napravami, z ljudmi itd. Zaradi teh vplivov je vsak proces, vsak izdelek s svojimi lastnostmi in vsako merjenje izpostavljeno nihanju, ki je v odvisnosti od jakosti vplivov — ustaljenosti ali točnosti — večje ali manjše.

Absolutne točnosti — npr. izdelave delov s točno enakimi merami brez razlik — sploh ni mogoče doseči. Četudi pri meritvi ugotovimo enake mere, bi nam natančnejše merjenje pokazalo razlike.

Nekatere od teh vplivov, ki povzročajo nihanja, smatramo za dovoljene, druge pa za nedovoljene. Naloga analize porazdelitve je prav to, da nam pove, kakšne so lastnosti procesa ali izdelka, s kakšnim povprečjem lahko računamo in kakšna nihanja moramo normalno pričakovati. Pri tej analizi moramo ugotoviti, ali so nihanja normalna — dovoljena ali nenormalna — nedovoljena.

Normalna nihanja so tista, ki jih povzročajo vplivi, katerih ne moremo poznati in kontrolirati. Take vplive imenujemo slučajne in torej tudi nihanja, ki jih ti vplivi povzročajo, pripisujemo slučaju. Z analizo porazdelitve želimo nihanja le podrobneje spoznati in ugotoviti njihove meje — prirodne tolerance.

Če ugotovimo, da je porazdelitev nenormalna, pravimo, da nihanje povzročajo nedovoljeni — neslučajni vplivi. To so vsi tisti, ki jih na kakršen koli način lahko identificiramo (in jih tudi moramo identificirati!), kontroliramo, odpravimo in v bodoče preprečimo, ali pa vsaj zmanjšamo jakost njihovega vpliva. Nekatere vplive bi lahko ugotavljali in merili, pa bi včasih bilo to predrago ali zaradi določenih vzrokov neizvedljivo. V takih primerih nečemo podrobno poznati in kontrolirati

teh vplivov in jih želimo pripisati kar slučajnim vplivom ter jih s tekočo statistično kontrolo držati v nekih razumnih in dovoljenih mejah.

Naloga statistične analize porazdelitve je le v tem, da s primernimi metodami ugotavlja normalnost porazdelitve, da opozarja na pojave nedovoljenih nihanj pod vplivom nedovoljenih faktorjev ter da ugotavlja vse karakteristike porazdelitve. Naloga strokovnjaka pa je, da rezultate statistične analize izkoristi in pravilno ukrepa. Iz zbranih podatkov najlaže naredimo analizo porazdelitve s pomočjo elektronskega računalnika. Za to pa je treba sestaviti poseben program, po katerem računalnik računa. V železarni Ravne smo tak program razvili ob podatkih za različne mešanice livarskih peskov. Praktično uporabo rezultatov tega programa podaja članek inž. Lenasija: Statistična analiza livarskih surovin.

Glavni namen članka je na primeru analize porazdelitve pokazati uporabnost računalnika pri reševanju praktičnih problemov. Zato so podana podrobna navodila za pripravo podatkov in tolmačenje rezultatov.

Za razumevanje programa so v članku na praktičnih primerih razloženi osnovni statistični parametri in lastnosti normalne porazdelitve.

### OSNOVNI STATISTIČNI PARAMETRI

Vzemimo 2 primera, od katerih je vsak značilen za eno metodo statistične obravnave.

1. *Primer:* Pri raztržnem preizkusu desetih žic smo ugotovili ob porušitvi sledeče sile v kp;

262  
259,5  
258,5  
258  
259,5  
258,5  
258,5  
259,5  
270  
265

Vrednosti označimo po vrsti s črkami  $X_1, X_2, \dots, X_{10}$ , pri čemer naj  $X_i$  pomeni poljubno od desetih vrednosti.

2. *Primer:* Izmerili smo po Rockwellu trdote za 203 probe brzoreznega jekla v popuščnem stanju. Natančnost meritev je 0,5 HRC. Zato je



npr. vrednost 64,5 HRC v resnici ena od vrednosti v razredu od 64,25 do 64,75 HRC in predstavlja v tem primeru sredino razreda oz. območja.

Pri meritvah beležimo s frekvenco  $f_i$  pogostost pojavljanja posameznih vrednosti, ki pripadajo določenemu območju — razredu. Meje razredov, sredine razredov in frekvence so za primer podane v tabeli 1.

Tabela 1

i	Razred (HRC)	Sredina razreda	$f_i$	$Kf_i$	$f_i \%$	$Kf_i \%$
1	62,75—63,25	63	3	3	1,5	1,5
2	63,25—63,75	63,5	10	13	5	6,5
3	63,75—64,25	64	59	72	29	35,5
4	64,25—64,75	64,5	63	135	31	66,5
5	64,75—65,25	65	46	181	22,5	89,0
6	65,25—65,75	65,5	19	200	9,5	98,5
7	65,75—66,25	66	3	203	1,5	100

Izračunajmo za naša dva primera osnovne statistične parametre:

#### Aritmetična srednja vrednost

V statistiki nas najprej zanima aritmetična srednja vrednost množice števil. Za 1. primer to izračunamo po obrazcu za aritmetično sredino  $n$  števil  $X_1, X_2, \dots, X_n$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad [2.1.1]$$

V našem prvem primeru je  $n = 10$  in je aritmetična srednja vrednost

$$\bar{X} = \frac{262 + 259,5 + \dots + 265}{10} = 260,9 \text{ (kp)}$$

V praksi  $\bar{X}$  imenujemo kar srednja vrednost. Obrazec [2.1.1] lahko pišemo še v drugi, skrajšani obliki:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad [2.1.2]$$

V 2. primeru srednjo vrednost izračunamo po obrazcu

$$\bar{X} = \frac{f_1 X_1 + f_2 X_2 + \dots + f_k X_k}{n} \quad [2.1.3]$$

$k$  = število razredov, v našem drugem primeru 7  
 $n$  = število vseh meritev, v našem drugem primeru 203  
 $X_1, X_2, \dots, X_k$  so sredine razredov 63; 63,5; ... 66  
 $f_1, f_2, \dots, f_k$  so frekvence posameznih razredov  
 $f_1 + f_2 + \dots + f_k = n$

[2.1.4]

V našem drugem primeru so to števila 3, 10, ..., 3, ki so navedena v tretji koloni tabele 1.

Za 2. primer dobimo

$$\bar{X} = \frac{3 \cdot 63 + 10 \cdot 63,5 + \dots + 3 \cdot 66}{203} = 64,5$$

Obrazec (2.1.3) lahko pišemo tudi v obliki

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k f_i X_i \quad [2.1.5]$$

Za računanje brez strojev so še drugi obrazci, ki pa jih ne bomo navedli, ker imamo skoraj vedno na razpolago računske stroje. Posebno pripraven je olivetti — divisuma 24, ki po obrazcu [2.1.3] računa brez prekinitve.

#### Standardna deviacija

Poleg aritmetične sredine nas v statistiki zanima še odstopanje od te aritmetične sredine oz. srednje vrednosti. Naj bo  $\bar{X}$  aritmetična srednja vrednost števil

$$X_1, X_2, \dots, X_n$$

Izračunajmo razlike

$$X_i - \bar{X} \text{ za } i = 1, 2, \dots, n$$

in jih kvadrirajmo

$$(X_i - \bar{X})^2 \text{ za } i = 1, 2, \dots, n$$

Aritmetično srednjo vrednost množice kvadratov razlik označimo s  $\sigma^2$  in jo imenujemo varianca.

$$\sigma^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad [2.2.1]$$

Za 1. primer je po vstavljanju vrednosti  $X_i$  in izračunane vrednosti  $\bar{X}$

$$\sigma^2 = \frac{1,1^2 + 1,4^2 + \dots + 4,1^2}{10} = 13,24 \text{ (kp}^2\text{)}$$

Bolj zanimiva je vrednost  $\sigma$ , ker ima enako dimenzijo kakor  $X$ . Vrednost imenujemo standardna deviacija ali povprečni odklon. Iz obrazca (2.2.1) sledi obrazec za  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [2.2.2]$$

Za naš 1. primer je  $\sigma = \sqrt{13,24} = 3,64 \text{ (kp)}$

V 2. primeru, ko nastopajo frekvence, imamo obrazec

$$\sigma^2 = \frac{f_1 (X_1 - \bar{X})^2 + f_2 (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + f_k (X_k - \bar{X})^2}{n} \quad [2.2.3]$$

kjer imajo  $k$ ,  $n$ ,  $f_i$  in  $X_i$  isti pomen kot v obrazcu [2.1.3]

Izračunajmo najprej za 2. primer

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{3 \cdot (63 - 64,5)^2 + 10 \cdot (63,5 - 64,5)^2 + \dots + 3 \cdot (66 - 64,5)^2}{203} \\ &= \frac{3 \cdot 1,5^2 + 10 \cdot 1^2 + \dots + 3 \cdot 1,5^2}{203} = 0,314 \text{ (HRC}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\sigma = \sqrt{0,314} = 0,56 \text{ (Rc)}$$

Hitro lahko dokažemo, da lahko varianco  $\sigma^2$  in zato tudi  $\sigma$  izračunamo na drug način, če uporabimo že izračunano srednjo vrednost  $\bar{X}$ .

$$\sigma^2 = \frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{n} - \bar{X}^2 \quad [2.2.5]$$

V 2. primeru pa bi uporabili obrazec

$$\sigma^2 = \frac{f_1 X_1^2 + f_2 X_2^2 + \dots + f_k X_k^2}{n} - \bar{X}^2 \quad [2.2.6]$$

Obrazca [2.2.5] in [2.2.6] sta pripravna za elektronski računalnik.

### Median

Statistično zanimiva je tudi vrednost, ki je po velikosti v sredini urejene množice. To vrednost imenujemo median  $M$ . V primeru da imamo sodo število vrednosti v množici, je  $M$  enak aritmetični sredini srednjih dveh vrednosti. Uredimo množico iz 1. primera po velikosti.

258 (kp)  
258,5  
258,5  
258,5  
259,5  
259,5  
259,5  
259,5  
262  
265  
270

$$M = \frac{259,5 + 259,5}{2} = 259,5 \text{ (kp)}$$

Če imamo liho število vrednosti v množici kot v 2. primeru, je median kar srednji element urejene množice.

V drugem primeru bi uredili množico tako, da bi vsako sredino razreda pisali tolikokrat, kolikor je frekvenca pripadajočega razreda. V tem primeru bi dobili median  $M = 64,5 \text{ Rc}$ .

### Razpon

Zelo preprost parameter neke množice vrednosti je razpon. To je razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo množice. Razpon označimo z  $R$

Za standardno deviacijo dobimo obrazec

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k f_i (X_i - \bar{X})^2} \quad [2.2.4]$$

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad [2.4.1]$$

V prvem primeru je  $X_{\min} = 258 \text{ kp}$  in  $X_{\max} = 270 \text{ kp}$

$$R = 12 \text{ (kp)}$$

### Koeficient variacije

Množico vrednosti, ki jo opazujemo s statističnim očesom, karakterizira tudi razmerje standardne deviacije in srednje vrednosti, izraženo v odstotkih. To razmerje imenujemo koeficient variacije in ga označimo s črko  $V$ .

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100 \% \quad [2.5.1]$$

V 1. primeru je

$$V = \frac{3,54}{260,9} \cdot 100 \% = 1,4 \%$$

V 2. primeru je

$$V = \frac{0,56}{64,5} \cdot 100 \% = 0,87 \%$$

Za koeficient variacije je značilno, da nima fizikalne enote. Zato za dve različni množici vrednosti lahko primerjamo koeficient variacije, ki ponazarja relativno trosenje. Iz te primerjave v 1. in 2. primeru bi lahko rekli, da je množica v 2. primeru manj raztrosena okoli srednje vrednosti kot množica v 1. primeru, čeprav je ta množica manjša po številu.

### POPULACIJA

V nadaljnjem se bomo omejili na množice vrednosti, ki so slučajno izbrane iz neke osnovne množice, ki jo bomo imenovali populacija. Populacijo tvorijo npr. vse možne trdote brzoreznega jekla v popuščenem stanju. V 2. primeru so iz te populacije res slučajno izbrane 203 trdote, ker vnaprej pri meritvi ne vemo, kakšno vrednost bomo dobili.

Populacije so vedno množice z velikim ali celo neskončnim številom elementov.

### Primer normalno porazdeljene populacije

Populacijo naj tvorijo debeline pločevine, ki jo dobimo iz valjarske proge pri enakih proizvodnih pogojih.

3. Primer: Izmerimo 160 debelin pločevine, kar pomeni, da smo izbrali 160 elementov iz populacije. Izbor je bil slučajen. Dobili smo vrednosti, ki so navedene v tabeli 2 v enotah 0,01 mm.

Pri velikem številu vrednosti na prvi pogled kaj malo opazimo. Celo najmanjšo in največjo vrednost precej časa iščemo:

$$\begin{aligned} X_{\max} &= 190 \\ X_{\min} &= 159 \\ R &= X_{\max} - X_{\min} = 31 \text{ (0,01 mm)} \end{aligned}$$

Natančnost meritev je 0,01 mm in lahko smatramo izmerjene vrednosti kot sredine razredov s širino 0,01 mm.

Naredimo tabelo, kjer so vse vrednosti  $X_i$  (sredine razredov) urejene po velikosti in zraven navedemo še frekvence razredov (tab. 2').

Tabela 2 Enota 0,01 mm

171	177	175	177	174	174	173	183	183	178
179	178	176	167	171	174	175	177	173	172
169	176	178	182	175	172	177	177	179	167
168	173	167	178	175	167	160	177	182	179
168	176	177	176	168	168	171	183	168	175
175	159	162	173	181	179	166	177	178	170
167	167	171	184	173	176	175	167	167	174
181	181	172	173	178	182	173	166	174	188
168	177	170	165	164	176	181	189	168	175
179	187	168	171	173	190	169	177	170	161
165	181	179	185	170	178	178	183	169	173
173	186	172	177	172	164	168	182	184	185
173	179	181	185	173	173	173	187	179	175
173	170	177	178	184	185	174	177	180	183
167	181	168	171	189	178	177	179	170	176
182	185	179	182	173	170	173	170	173	190

Tabela 2'

i	$X_i$	$f_i$	i	$X_i$	$f_i$
1	159	1	16	175	9
2	160	1	17	176	8
3	161	1	18	177	14
4	162	1	19	178	10
5	162	1	20	179	10
6	164	2	21	180	1
6	165	2	22	181	7
7	166	2	23	182	6
8	167	9	24	183	5
9	168	10	25	184	3
10	169	3	26	185	5
11	170	7	27	186	1
12	171	6	28	187	2
13	172	6	29	188	1
14	173	17	30	189	2
15	174	6	31	190	2

To praktično naredimo tako, da v neurejeni tabeli po vrsti iščemo enake vrednosti in jih štejemo. Vsako vrednost, ki smo jo šteli, sproti prečrtamo. Če na koncu ostanejo še neprečrtane vrednosti, ustrezne frekvence popravimo.

Ker je podatkov še preveč, jih združimo v širše razrede.

Širino razreda označimo z  $r$ .

Izbrali bomo  $r = 3$  enote oz. 0,03 mm.

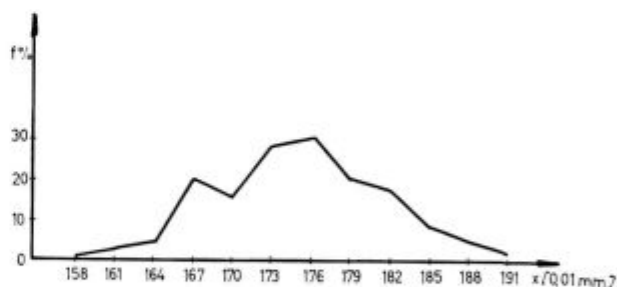
Odločimo se, da bo prvi razred vseboval debeline od 1,565 mm do 1,595 mm, drugi razred od 1,595 mm do 1,625 mm itd. po 0,03 mm. Ker je natančnost meritev le 0,01 mm, bo vsaka vrednost s tem v točno določenem razredu. Sredine razredov pa so sedaj

$$158, 161 \dots 191 \quad (0,01 \text{ mm})$$

Naredimo tabelo, kjer so podane frekvence razredov tudi v odstotkih in še kumulativne frekvence, ki so označene s  $K_f$ . Poglejmo na praktičnem primeru izračun kumulativnih frekvenc. Peta kumulativna frekvenca  $K_{f_5}$  je vsota frekvenc prvih petih razredov:

$$\begin{aligned} K_{f_5} &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = \\ &= 1 + 3 + 4 + 21 + 16 = 45 \end{aligned}$$

V zadnjem stolpcu so te frekvence izračunane tudi v odstotkih. Kumulativne frekvence v odstotkih dobimo na enak način s seštevanjem frekvenc posameznih razredov, ki so izražene v odstotkih. Po podatkih iz tabele 3 narišemo diagram tako, da na os  $x$  naneseemo sredine razredov, v smeri osi  $y$  pa pripadajoče višine, ki ustrezajo frekvenčam razredov. Dobimo poligonsko krivuljo, ki jo kaže slika 1.

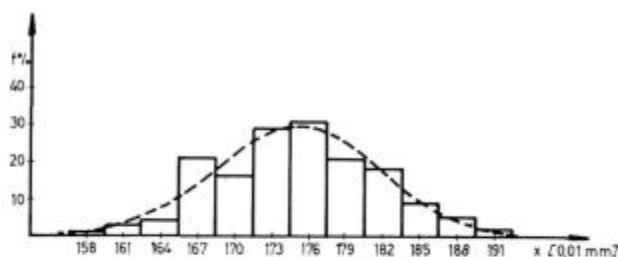


Slika 1

Druga možnost za prikaz porazdelitve je na sliki 2. Nad intervalom na osi  $x$ , ki ponazori določen razred, narišemo pravokotnik z višino, ki je sorazmerna frekvenci razreda.

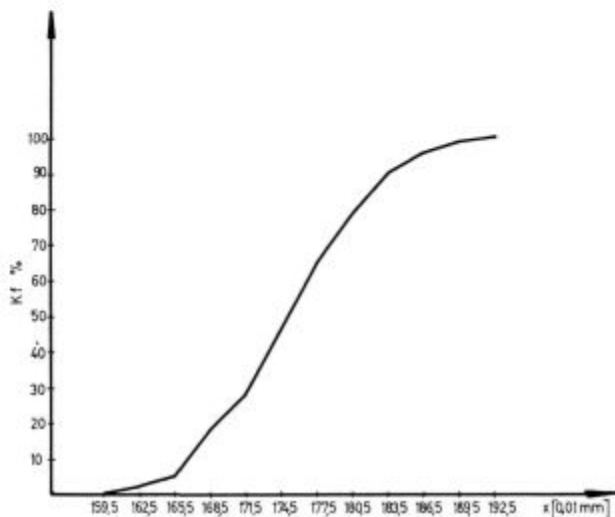
Dobimo stopničasto sliko, ki jo imenujemo histogram. Črtkasto krivuljo na sliki bomo razložili kasneje.

Narišemo tudi diagram (slika 3), kjer na os  $y$  nanašamo kumulativne frekvence v odstotkih. Za to uporabimo zadnjo kolono tabele 3. Pri določevanju ordinate naneseemo vrednost  $K_{f_i}$  % vedno na zgornjo mejo razreda  $i$ . Npr. 28,1 % nad točko  $X = 171,5$



Slika 2

Iz tega diagrama ugotovimo, koliko odstotkov izmerjenih vrednosti je manjših od določene vrednosti. Npr. 28,1 % izmerjenih debelin je manjših od 1,715 mm.



Slika 3

Po formuli [2.1.3] izračunamo za ta primer srednjo vrednost s podatki iz tabele 3.

Tabela 3

i	Razred od — do enota (0,01 mm)	Sredina razreda $X_i$	Frekvenca		Kumulativna frekvenca	
			$f_i$	$f_i \%$	$Kf_i$	$Kf_i \%$
1	156,5—159,5	158	1	0,6	1	0,6
2	159,5—162,5	161	3	1,9	4	2,5
3	162,5—165,5	164	4	2,5	8	5,0
4	165,5—168,5	167	21	13,1	29	18,1
5	168,5—171,5	170	16	10,0	45	28,1
6	171,5—174,5	173	29	18,1	74	46,2
7	174,5—177,5	176	31	19,4	105	65,5
8	177,5—180,5	179	21	13,1	126	78,7
9	180,5—183,5	182	18	11,3	144	90,0
10	183,5—186,5	185	9	5,6	153	95,6
11	186,5—189,5	188	5	3,1	158	98,7
12	189,5—192,5	191	2	1,3	160	100,0
Vsota			160	100,0		

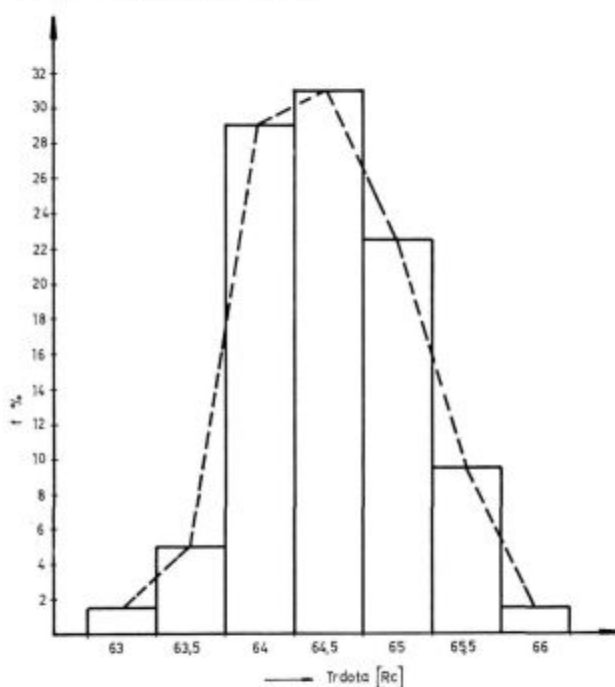
$$X = \frac{1}{160} (158 \cdot 1 + 161 \cdot 3 + \dots + 191 \cdot 2) = 175,12 \text{ (0,01 mm)}$$

Po obrazcu [2.2.6] bi najlažje izračunali standardno deviacijo s pomočjo računskega stroja (npr. Olivetti divisuma 24), ker že poznamo  $X$ .

$$\sigma = 6,49 \text{ (0,01 mm)}$$

Pri histogramu našega primera opazimo neko posebno obliko stopnic. Z večjim številom meritev bi dobili še bolj simetrično obliko histograma, še bolj bi se stopnice ujemale s črtkasto krivuljo.

Podobno obliko histograma dobimo tudi pri drugih meritvah neke fizikalne količine proizvodov iz istega proizvodnega procesa. V drugem primeru, ko smo izbrali podatke trdot za 203 probe brzoreznega jekla v popuščnem stanju, bi iz tabele 1 dobili histogram na sliki 4, kjer je vrisana tudi poligonska krivulja.



Slika 4

### Normalna krivulja

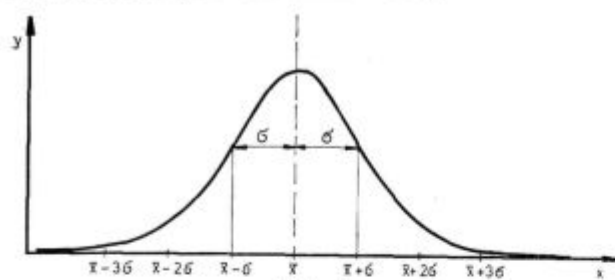
#### Ordinate normalne krivulje

Slavni matematik K. F. Gauss je odkril krivuljo, ki se stopnicam oz. poligonski krivulji v praktičnih primerih najbolj približa. To krivuljo imenujemo Gaussovo ali normalno. V koordinatnem sistemu  $x, y$  ima krivulja naslednjo obliko:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \right)^2} \quad [3.2.1]$$

$\pi = 3,14159 \dots$  število iz geometrije  
 $e = 2,71828 \dots$  osnova naravnih logaritmov  
 $\bar{x}$  = srednja vrednost  
 $\sigma$  = standardna deviacija

Enačba [3.2.1] v splošnem zavisi od  $\bar{X}$  in  $\sigma$ , ki imata lahko poljubne vrednosti. V koordinatnem sistemu  $x, y$  ima krivulja obliko zvona. Obe strani krivulje se približujeta osi  $x$ , kakor hitro se malo oddaljimo od vrednosti  $\bar{X}$ .



Slika 5

Oblika krivulje je odvisna od vrednosti  $\sigma$ , njen položaj pa od vrednosti  $\bar{X}$ . Vrednost  $\bar{X}$  le določa, kje je vrh krivulje. Če spremenimo  $\bar{X}$ , se krivulja pomakne v levo ali desno, oblika pa se ji ne spremeni. Krivulja je simetrična na navpično os skozi točko  $\bar{X}$ . Višina krivulje je  $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$  in je torej obratno sorazmerna s  $\sigma$ . Krivulja se od leve proti desni vedno hitreje dviga do točke, ki je na diagramu 5 označena z razdaljo  $\sigma$  od osi simetrije. To je prevojna točka. Od prevojne točke dalje se krivulja vedno bolj počasi dviga do vrha. Simetrično na os simetrije leži druga prevojna točka, ki je tudi za  $\sigma$  oddaljena od osi simetrije. Širina krivulje v prevojnih točkah je torej  $2\sigma$ . Zato za večje  $\sigma$  dobimo širše in nižje krivulje, za manjše  $\sigma$  pa višje in ožje krivulje. Matematično se da dokazati, da je ploščina med krivuljo in osjo  $x$  vedno enaka 1.

Ploščina enega pravokotnika v histogramu je  $f_i \cdot r$ . Ploščina vseh pravokotnikov skupaj je zaradi enačbe [2.1.4] enaka

$$f_1 r + f_2 r + \dots + f_k r = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) r = n \cdot r$$

$n$  = število meritev  
 $r$  = širina razreda

Za primer 160 debelin pločevine, ki smo jih razdelili v razrede s širino 0,03 mm, je  $n \cdot r = 160 \cdot 0,03 = 4,8$  (mm)

Dimenzija nas ne sme motiti, ker smo za višine pravokotnikov vzeli frekvence, ki nimajo enote.

Da dobimo krivuljo, ki bo imela med seboj in osjo  $x$  isto ploščino, kot je ploščina histograma, moramo  $y$  v obrazcu [3.2.1] pomnožiti z  $n \cdot r$ .

Označimo splošno

$$f = n \cdot r \cdot y \quad [3.2.2]$$

y iz obrazca [3.2.1]

V našem tretjem primeru je  $n \cdot r = 4,8$  (mm). Črtkasta krivulja v histogramu tega primera (slika 2) ima ordinate, izračunane iz obrazca

[3.2.2]. Ker se histogram po obliki približuje normalni krivulji, pravimo, da so debeline pločevine normalno porazdeljene. Populacija, iz katere smo izbrali 160 vrednosti, ima normalno porazdelitev. Prav tako ima tudi populacija 2. primera praktično normalno porazdelitev. Tudi to se vidi iz histograma za ta primer (slika 4). Torej so trdote brzoreznega jekla v popuščnem stanju normalno porazdeljene.

V obrazcu [3.2.1] pišemo

$$\frac{X - \bar{X}}{\sigma} = t \quad [3.2.3]$$

Dobimo funkcijo, ki je odvisna sedaj od spremenljivke  $t$ .

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} = \frac{\varphi(t)}{\sigma} \quad [3.2.4]$$

S  $\varphi(t)$  smo označili vse razen faktorja  $\frac{1}{\sigma}$ . Ta funkcija  $\varphi(t)$  je tabelirana za različne vrednosti spremenljivke  $t$ . (Glej tabelo 4).

Sedaj združimo obrazca [3.2.2] in [3.2.4] v praktično uporaben obrazec.

$$f = \frac{n \cdot r}{\sigma} \cdot \varphi(t) \quad [3.2.5]$$

Iz tega obrazca izračunamo teoretične frekvence za posamezne razrede. Za  $X$  v obrazcu [3.2.3] vzamemo sredino razreda in dobimo vrednost  $t$ , ki je brez dimenzije. Poiščemo  $\varphi(t)$  v tabeli in nato izračunamo po obrazcu [3.2.5] teoretično absolutno frekvenco. Paziti je treba, da pri računu vzamemo isto enoto za  $X, \bar{X}, \sigma$  in  $r$ . Teoretično frekvenco v odstotkih si izračunamo na sledeč način:

$$f\% = \frac{r}{\sigma} \varphi(t) \cdot 100\% \quad [3.2.6]$$

Če ima razred za širino enoto, nam torej enačba [3.2.1] za  $y$  normalne krivulje pove, koliko odstotkov vseh vrednosti populacije, ki ima normalno porazdelitev, leži v določenem razredu z enoto širine. Naredimo sedaj primerjalno tabelo med teoretičnimi in stvarnimi frekvencami v našem tretjem primeru. V tabeli je naveden tudi postopen račun teoretičnih frekvenc najprej po obrazcu [3.2.6], nato še po obrazcu [3.2.5]. Teoretične absolutne frekvence so zaokrožene na cela števila.

Vidimo, da se stvarne frekvence dobro ujemajo s teoretično izračunanimi. Za razliko lahko krivimo slučaj. Pri večjem številu meritev bi bile razlike v splošnem vedno manjše.

Tabela 4 — Ordinate normalne porazdelitve  $\varphi(t)$

t	,00	,01	,02	,03	,04	,05	,06	,07	,08	,09
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	0,3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	0,3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	0,3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3725	3712	3697
0,4	0,3683	3868	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	0,3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	0,3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	0,3123	3101	3079	3156	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	0,2897	2874	2850	2827	2903	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	0,2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	0,2179	2155	2131	2107	2093	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	0,1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	0,1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	0,1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	0,1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	0,1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0,0940	925	909	893	878	863	848	833	818	804
1,8	0,0790	775	761	748	734	721	707	694	681	669
1,9	0,0656	644	632	620	608	596	584	573	562	551
2,0	0,0540	529	519	508	498	488	478	468	459	449
2,1	0,0440	431	422	413	404	396	387	379	371	363
2,2	0,0355	347	339	332	325	317	310	303	297	290
2,3	0,0283	277	270	264	258	252	246	241	235	229
2,4	0,0224	219	213	208	203	198	194	189	184	180
2,5	0,0175	171	167	163	158	154	151	147	143	139
2,6	0,0136	132	129	126	122	119	116	113	110	107
2,7	0,0104	101	99	96	93	91	88	86	84	81
2,8	0,0079	77	75	73	71	69	67	65	63	61
2,9	0,0060	58	56	55	53	51	50	48	47	46
3,0	0,0044	43	42	40	39	38	37	36	35	34
3,1	0,0033	32	31	30	29	28	27	26	25	25
3,2	0,0024	23	22	22	21	20	20	19	18	18
3,3	0,0017	17	16	16	15	15	14	14	13	13
3,4	0,0012	12	12	11	11	10	10	10	9	9
3,5	0,0009									
4,0	0,0001									

Tabela 5

Sredina razreda $X_i$	$X_i - \bar{X}$	$\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} = t$	$\varphi(t)$	Frekvence			
				teoretična $f_i$ % po (3.2.6)	dejanska $f_i$ %	teoretična $f_i$ po (3.2.5)	dejanska $f_i$
158	-17,12	-2,64	0,0122	0,6	0,6	1	1
161	-14,12	-2,18	0,0371	1,7	1,9	3	3
164	-11,12	-1,71	0,0925	4,3	2,5	7	4
167	-8,12	-1,25	0,1826	8,4	13,1	14	21
170	-5,12	-0,79	0,2920	13,5	10,0	22	16
173	-2,12	-0,33	0,3778	17,5	18,1	28	29
176	0,88	0,14	0,3951	18,3	19,4	29	31
179	3,88	0,60	0,3332	15,4	13,1	25	21
182	6,88	1,06	0,2275	10,5	11,3	17	18
185	9,88	1,52	0,1275	5,8	5,6	9	9
188	12,88	1,98	0,0562	2,6	3,1	4	5
191	15,88	2,45	0,0198	0,9	1,3	1	2

V vsakdanjem življenju odkrijemo ogromno populacij, ki so normalno porazdeljene. Normalna porazdelitev je razvidna že iz histograma, ki ga naredimo za primer iz populacije. Lahko pa naredimo še poseben test, ki nam z želeno sigurnostjo zagotovi pravilnost naše predpostavke, da je porazdelitev normalna. Ta test bomo spoznali na strani 199.

### Ploščina pod normalno krivuljo

Celotna ploščina je enaka 1, kar smo že ugotovili. Zanima nas, koliki del ploščine leži med dvema ordinatama za 2 poljubni vrednosti  $X_1$  in  $X_2$ . Uvedimo novo spremenljivko  $t$  po obrazcu [3.2.3]

$$t = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

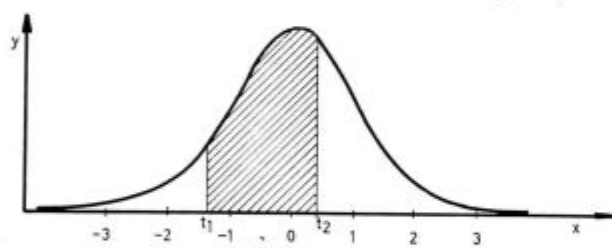
Za  $X_1$  in  $X_2$  dobimo vrednosti  $t_1 = \frac{X_1 - \bar{X}}{\sigma}$  in

$$t_2 = \frac{X_2 - \bar{X}}{\sigma}$$

Vrednosti  $\bar{X}$ ,  $\bar{X} \pm \sigma$ ,  $\bar{X} \pm 2\sigma$ ,  $\bar{X} \pm 3\sigma$ , ... imajo ustrezne  $t$  vrednosti  $0$ ,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ , ...

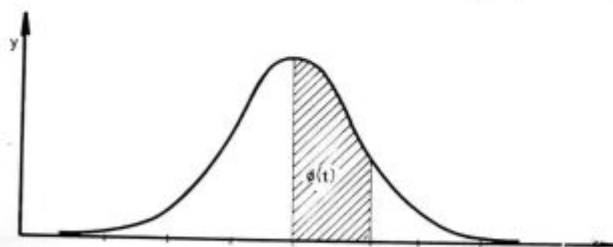
Os simetrije gre skozi točko  $t = 0$ , prevojni točki pa ležita nad točkama  $t = \pm 1$ .

Na sliki 6 je označena ploščina, ki jo iščemo.



Slika 6

Ker je normalna krivulja simetrična, je potrebno le, da poznamo obrazec za ploščino od ordinate vrednosti  $t = 0$  pa do ordinate poljubne točke  $t$ . Vrednost te ploščine označimo s  $\Phi(t)$ . (Slika 7)

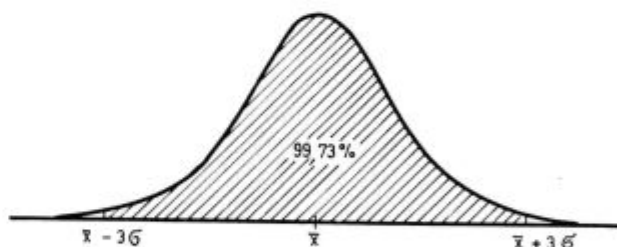
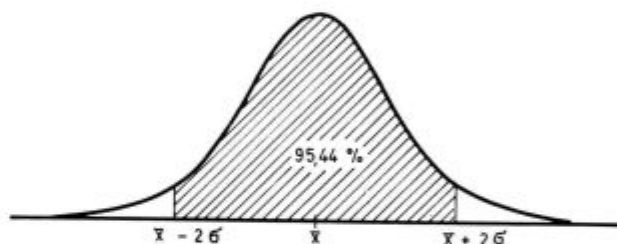
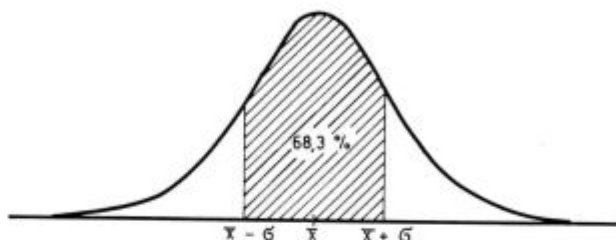


Slika 7

Za vrednosti funkcije  $\Phi(t)$  imamo tabelo 6. Ploščino med  $t_1$  in  $t_2$  izračunamo tako, da seštejemo  $\Phi(t_2)$  in  $\Phi(-t_1)$ . Argument  $-t_1$  smo vzeli zato, ker je funkcija  $\Phi$  tabelirana le za pozitivne vrednosti. Če bi bila tudi točka  $t_1$  na desni strani

od 0, potem sprememba znaka ne bi bila potrebna, pač pa bi morali vrednost  $\Phi(t_1)$  odšteti od vrednosti  $\Phi(t_2)$ . Najbolje si to predstavljamo na sliki 6.

Sedaj nas zanimajo ploščine, ki so simetrične na os skozi  $t = 0$  in je  $t_1$  negativen,  $t_2$  pozitiven, po velikosti pa sta enaka. Ploščina ima vrednost  $2\Phi(t_2)$ . Za  $t_2$  je 1, 2, 3 narišemo ustrezne ploščine  $2\Phi(t_2)$ . Na sliki 8 smo namesto  $2\Phi(t_2)$  pisali vrednosti v odstotkih, to je  $2\Phi(t_2) \cdot 100\%$ .



Slika 8

Ploščina pod normalno krivuljo med ordinatama za  $X_1$  in  $X_2$  nam pove odstotke vseh vrednosti populacije, ki leže v mejah med  $X_1$  in  $X_2$ . Naredimo tabelo, ko so meje  $X_1$  in  $X_2$  simetrične na vrednost  $\bar{X}$  in imajo medsebojno razdaljo  $2\sigma$ ,  $4\sigma$  in  $6\sigma$ . Vrednosti  $t$  za te meje so  $\pm 1$ ,  $\pm 2$  in  $\pm 3$ . V tabeli 6 podajamo teoretični odstotek vseh vrednosti populacije, ki leže v določenih mejah, in pa odstotek vseh vrednosti, ki leže v istih mejah, v našem drugem in tretjem primeru.

Tabela 7 nam za meje  $\bar{X} \pm \sigma$  pove, da v povprečju lahko med 1000 slučajno izračunanimi vrednostmi iz populacije pričakujemo 683 vrednosti znotraj mej  $\bar{X} \pm \sigma$  in 317 zunaj teh mej. Ali

Tabela 6 — Ploščine pod normalno krivuljo  $\Phi(t)$

t	,00	,01	,02	,03	,04	,05	,06	,07	,08	,09
0,0	0,0000	0040	0080	0120	0160	0199	0239	0279	0319	0359
0,1	0,0398	0438	0478	0517	0557	0596	0636	0675	0714	0753
0,2	0,0793	0832	0871	0910	0948	0987	1026	1064	1103	1141
0,3	0,1179	1217	1255	1293	1331	1368	1406	1443	1480	1517
0,4	0,1554	1591	1628	1664	1700	1736	1772	1808	1844	1879
0,5	0,1915	1950	1985	2019	2054	2088	2123	2157	2190	2224
0,6	0,2257	2291	2324	2357	2389	2422	2454	2486	2517	2549
0,7	0,2580	2611	2642	2673	2704	2734	2764	2794	2823	2852
0,8	0,2881	2910	2939	2967	2995	3023	3051	3078	2106	3133
0,9	0,3159	3186	3212	3238	3264	3289	3315	3340	3365	3389
1,0	0,3413	3438	3461	3485	3508	3531	3554	3577	3599	3621
1,1	0,3643	3665	3686	3708	3729	3749	3770	3790	3810	3830
1,2	0,3849	3869	3888	3907	3925	3944	3962	3980	3997	4015
1,3	0,4032	4049	4066	4082	4099	4115	4131	4147	4162	4177
1,4	0,4192	4207	4222	4236	4251	4265	4279	4292	4306	4319
1,5	0,4332	4345	4357	4370	4382	4394	4406	4418	4429	4441
1,6	0,4452	4463	4474	4484	4495	4505	4515	4525	4535	4545
1,7	0,4554	4564	4573	4582	4591	4599	4608	4616	4625	4633
1,8	0,4641	4649	4656	4664	4671	4678	4686	4693	4699	4706
1,9	0,4713	4719	4726	4732	4738	4744	4750	4756	4761	4767
2,0	0,4772	4778	4783	4788	4793	4798	4803	4808	4812	4817
2,1	0,4821	4826	4830	4834	4838	4842	4846	4850	4854	4857
2,2	0,4861	4864	4868	4871	4875	4878	4881	4884	4887	4890
2,3	0,4893	4896	4898	4901	4904	4906	4909	4911	4913	4916
2,4	0,4918	4920	4922	4925	4927	4929	4931	4932	4934	4936
2,5	0,4938	4940	4941	4943	4945	4946	4948	4949	4951	4952
2,6	0,4953	4955	4956	4957	4959	4960	4961	4962	4963	4964
2,7	0,4965	4966	4967	4968	4969	4970	4971	4972	4973	4974
2,8	0,4974	4975	4976	4977	4977	4978	4979	4979	4980	4981
2,9	0,4981	4982	4982	4983	4984	4984	4985	4985	4986	4986
3,0	0,4987	4987	4987	4988	4988	4989	4989	4989	4990	4990
3,1	0,4990	4991	4991	4991	4992	4992	4992	4992	4993	4993
3,2	0,4993	4993	4994	4994	4994	4994	4994	4995	4995	4995
3,3	0,4995	4995	4996	4996	4996	4996	4996	4996	4996	4997
3,4	0,4997	4997	4997	4997	4997	4997	4997	4997	4997	4998
3,5	0,4998									
4,0	0,49997									
4,5	0,499997									
5,0	0,4999997									

Tabela 7

t	Meje $\bar{X} \pm t\sigma$	Teoretično $2 \Phi(t) \cdot 100$	2. primer % od n = 203	3. primer % od n = 160
1	$\bar{X} \pm \sigma$	68,3 %	80 %	65 %
2	$\bar{X} \pm 2\sigma$	95,44 %	97 %	95,6 %
3	$\bar{X} \pm 3\sigma$	99,73 %	100 %	100 %

Odstotek je za tretji primer izračunan iz tabele 2' pred združitvijo v razrede.

drugače povedano, da je verjetnost, s kakršno neka vrednost iz populacije leži v mejah  $\bar{X} \pm \sigma$ , enaka 68:317, kar je več kot 2:1. Tako za meje  $\bar{X} \pm 3\sigma$  dobimo verjetnost 27:10.000, da leži vrednost iz populacije zunaj mej  $\bar{X} \pm 3\sigma$ . To tudi

pomeni, da le eno vrednost od 370 vrednosti lahko pričakujemo zunaj mej  $\bar{X} \pm 3\sigma$ . Odstopanje za  $\pm 3\sigma$  od srednje vrednosti zato imenujemo prirodna toleranca.

Lastnosti populacije, ki ima normalno porazdelitev, so naslednje:

— Majhna odstopanja od srednje vrednosti se pojavljajo pogosteje kot večja, ker ima normalna krivulja zvonasto obliko.

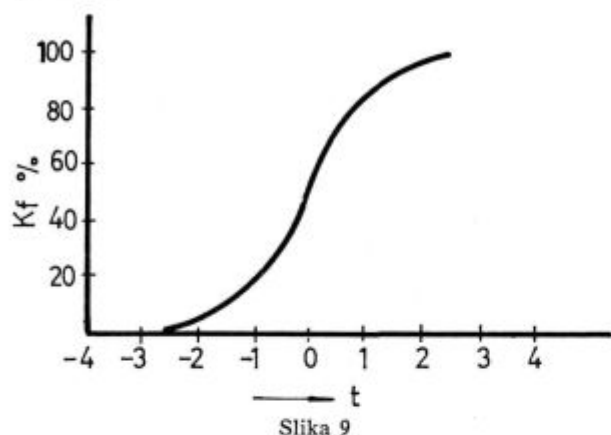
— Zelo velika odstopanja se pojavljajo redko ali z majhno verjetnostjo, ker se krivulja tesno prilega osi x že pri malo večjem t.

— Pozitivni in negativni odkloni iste velikosti se pojavljajo enako pogosto, ker je krivulja simetrična.



### Kumulativna krivulja in verjetnostna mreža

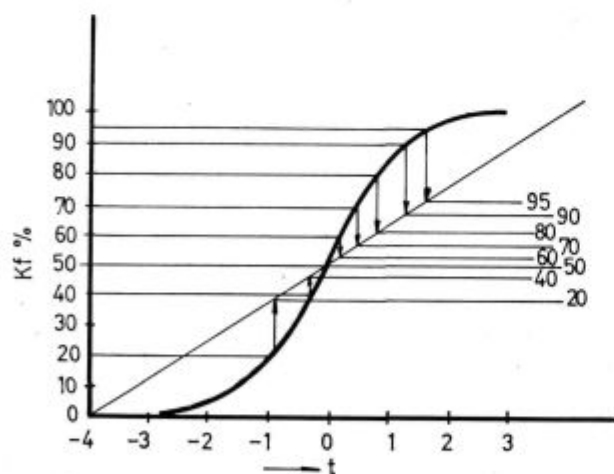
V koordinatnem sistemu naj bodo na osi X spet pozitivne in negativne vrednosti spremenljivke  $t$ . Na osi  $y$  pa bomo merili ploščino pod normalno krivuljo v odstotkih. Tako dobimo kumulativno krivuljo normalne porazdelitve. (Slika 9)



Slika 9

Vrednost ordinate kumulativne krivulje v točki  $t$  je enaka ploščini pod normalno krivuljo od  $-\infty$  do  $t$ . Zaradi nepraktičnega risanja kumulativne krivulje sta Daves in Beckel izdelala grafičen postopek, ki prevede kumulativno krivuljo v premico, če skalo na osi  $y$  spremenimo na sledeč način:

Skozi izhodišče potegnemo premico, ki seka kumulativno krivuljo v točki za  $t = 0$ . Ordinate s krivulje vertikalno prenesemo na premico in tako dobimo novo skalo na osi  $y$ . Le vrednost 50 ostane na svojem mestu. (slika 10)



### Konstrukcija mreže verjetnosti

Slika 10

Tako nastalo mrežo imenujemo verjetnostna mreža. Vidimo, da je verjetnostna mreža v sredi bolj gosta, proti vrhu in navzdol pa se razširi.

(Verjetnostno mrežo izdelujejo v inozemstvu prav kot logaritemsko mrežo ali milimetrski papir.

Pri nas je še ne tiskajo, zato je Železarna Ravne za svoje potrebe naročila posebno tiskanje verjetnostne mreže pri Mariborski tiskarni.)

Na levi strani mreže je označena skala v odstotkih, na desni pa so vrednosti, imenovane probit ( $t + 5$ ), ki jih izračunamo iz tabele 7, tako da vrednost v procentih iz tabele delimo z 2 in prištejemo 50 %.

Na primer:  $t = 2$ , Probit  $t + 5 = 7$

$95,44 : 2 = 47,72 + 50 = 97,72$  %. Probit 7 ima to ordinato. (Glej sliko 11.)

Na os  $x$  nanese vrednosti, ki v dani populaciji nastopajo, tako da skala obsega vse možne vrednosti. S pomočjo verjetnostne mreže je mogoče:

- ugotoviti, ali je opazovana porazdelitev normalna, ali pa se vsaj dovolj približuje normalni,
- na grafični način določiti srednjo vrednost in standardno deviacijo,
- rešiti probleme določanja ali ocenjevanja toleranc.

Uporabimo verjetnostno mrežo:

Najprej na spodnjem robu mreže označimo vrednosti, ki določajo sredine razredov. Na zgornjih mejah razredov nanese vrednosti za kumulativne frekvence v odstotkih iz tabele 3. Dobimo točke, katerih razpored se da še kar dobro zvezati s premico. Pri tem je važno, da se točke ujemajo s premico predvsem v sredini mreže, medtem ko so odstopanja točk od premice na zgornjem in spodnjem koncu manj pomembne zaradi razvlečenosti mreže.

Iz tako dobljene premice bomo dobili vse ostalo, kar nas pri analizi porazdelitve zanima. Najprej določimo srednjo vrednost. Iz točke na premici z ordinato 50 % potegnemo navpičnico na os  $x$ , kjer odčitamo srednjo vrednost  $\bar{X} = 175,2$  (0,01 mm)

Standardno deviacijo pa določimo takole:

Iz vrednosti probit 4 na desnem robu mreže potegnemo vodoravno črto do premice, od tod pa navpičnico do osi  $x$ . Razlika med  $\bar{X}$  in tako odčitano vrednostjo  $X$  je standardna deviacija. V našem primeru 6,5 (0,01 mm)

Iz tega načina za določitev standardne deviacije ugotovimo, da se pri vsaki spremembi  $\sigma$  (pri istem  $\bar{X}$ ) v verjetnostni mreži premica zavrti okrog točke s koordinatama  $\bar{X}$  in 50 %. Povečanje standardne deviacije napravi premico bolj položno. Zmanjšanje standardne deviacije pa napravi premico bolj strmo.

Prav enostavno je s pomočjo kumulativne premice v mreži verjetnosti določiti odstotek vrednosti iz populacije, ki so večje oz. manjše od dane vrednosti  $x$ . Iz te vrednosti na osi  $x$  potegnemo navpičnico do kumulativne premice, odtod pa vodoravno črto do osi  $y$ , kjer odčitamo kumulativno frekvenco. Za  $X = 180$  dobimo v prikazanem primeru na osi  $y$  vrednost 77 %. To pomeni, da je 77 % izmerjenih pločevin tanjših od 1,8 mm. Lahko

gremo tudi obratno od vrednosti kumulativne frekvenca na os x. Tako določimo meje, zunaj katerih leži 1% vseh vrednosti. Od kumulativne frekvenca 99,5% potegnemo vodoravno črto do premice in od tod navpično na os x. V našem primeru dobimo vrednost 192 za zgornjo mejo. Enako izhajamo iz kumulativne frekvenca 0,5% in dobimo vrednost za spodnjo mejo 158,3. Torej ima 99% pločevin debelino med 1,583 mm in 1,92 mm. Ker imamo na desnem robu skalo  $t + 5$ , lahko neposredno in hitro določimo meje  $\bar{X} \pm t\sigma$ . Za  $t = 2$  izhajamo iz točk probit 3 in 7 do premice in nato na os x, kjer v našem primeru dobimo vrednosti  $X_1 = 162,1$  in  $X_2 = 188,1$ . To so meje intervala širine  $4\sigma$ . Podobno bi določili meje prirodne tolerance  $\bar{X} \pm 3\sigma$ .

### TEST $\chi^2$

Za populacijo lahko predpostavimo določeno teoretično porazdelitev. Tako smo v 3. primeru predpostavili, da so debeline pločevin normalno porazdeljene. Teoretične in stvarne frekvenca se v tem primeru res malo razlikujejo (tabela 5.). Razlike lahko smatramo za slučajne. V splošnem je seveda težko reči, kdaj so razlike le slučajne in kdaj pomembne. Za to imamo poseben kriterij, ki ga imenujemo test  $\chi^2$  (hi kvadrat). Pri tem testu izračunamo vse razlike med teoretičnimi in stvarnimi frekvencami, ki jih kvadriramo, kvadrate delimo s pripadajočimi teoretičnimi frekvencami in vse skupaj seštejemo. Dobljeno vrednost imenujemo  $\chi^2$ .

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f_i')^2}{f_i'} \quad [4.1]$$

$f_i$  so teoretične frekvenca

$f_i'$  so stvarne frekvenca

Ker je to vsota k sumandov, pravimo, da ima  $\chi^2 k - 1$  prostostnih stopenj. Lahko se zgodi, da moramo teoretične frekvenca izračunati iz ne-teoretičnih parametrov, zato je število prostostnih stopenj za toliko manjše, kolikor parametrov smo pri izračunu upoštevali.

V tabeli 8 najdemo za različne nivoje verjetnosti in za različno število prostostnih stopenj teoretične vrednosti za  $\chi^2$ . Če se odločimo za 95% gotovost in je izračunana vrednost  $\chi^2$  manjša od vrednosti v tabeli za  $P = 95\%$ , v praksi lahko zaključimo, da ima populacija porazdelitev, ki smo jo predpostavili. Obratno, če je izračunana vrednost večja od tabelarične vrednosti iz kolone za  $P = 95\%$ , lahko s 95%-no gotovostjo trdimo, da populacija nima predpostavljene porazdelitve.

### Test $\chi^2$ za normalno porazdelitev

V primeru, ko predpostavimo normalno porazdelitev, je praktična metoda za izračun  $\chi^2$  sledeča:

Tabela 8

Vrednosti  $\chi^2_{\alpha}$

Prostostne stopnje v	Verjetnost P					
	0,5 %	2,5 %	95 %	97,5 %	99 %	99,5 %
1	0,393 · 10 <sup>-4</sup>	0,982 · 10 <sup>-3</sup>	3,84	5,02	6,36	7,88
2	0,0100	0,0506	5,99	7,38	9,21	10,6
3	0,0717	0,216	7,81	9,35	11,3	12,8
4	0,207	0,484	9,49	11,1	13,3	14,9
5	0,412	0,831	11,1	12,8	15,1	16,7
6	0,676	1,24	12,6	14,4	16,8	18,5
7	0,989	1,69	14,1	16,0	18,5	20,3
8	1,34	2,18	15,5	17,5	20,1	22,0
9	1,73	2,70	16,9	19,0	21,7	23,6
10	2,16	3,25	18,3	20,5	23,2	25,2
11	2,60	3,82	19,7	21,9	24,7	26,8
12	3,07	4,40	21,0	23,3	26,2	28,3
13	3,57	5,01	22,4	24,7	27,7	29,8
14	4,07	5,63	23,7	26,1	29,1	31,3
15	4,60	6,26	25,0	27,5	30,6	32,8
16	5,14	6,91	26,3	28,8	32,0	34,3
17	5,70	7,56	27,6	30,2	33,4	35,7
18	6,26	8,23	28,9	31,5	34,8	37,2
19	6,84	8,91	30,1	32,9	36,2	38,6
20	7,43	9,59	31,4	34,2	37,6	40,0
21	8,03	10,3	32,7	35,5	38,9	41,4
22	8,64	11,0	37,9	36,8	40,3	42,8
23	9,26	11,7	35,2	38,1	41,6	44,2
24	9,89	12,4	36,4	39,4	43,0	45,6
25	10,5	13,1	37,7	40,6	44,3	46,9
26	11,2	13,8	38,9	41,9	45,6	48,3
27	11,8	14,6	40,1	43,2	47,0	49,6
28	12,5	15,3	41,3	44,5	48,3	51,0
29	13,1	16,0	42,6	45,7	49,6	52,3
30	13,8	16,8	43,8	47,0	50,9	53,7
* Up	—	—	1,64	1,96	2,33	2,58

\* Za  $v > 30$  se uporablja približna formula:

$$\chi^2 \cong \frac{1}{2} (\sqrt{2v-1} + Up)^2$$

Iz danih vrednosti izračunamo srednjo vrednost  $\bar{X}$  po obrazcu [2.1.1]. Standardno deviacijo pa ocenimo z vrednostjo  $S$ , ki jo izračunamo po obrazcu:

$$S = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad [4.1.1]$$

Nato vse vrednosti razdelimo v 16 razredov. V 1. razredu so vse vrednosti manjše od  $\bar{X} - 3,5 S$ . V 16. razredu pa vse vrednosti večje od  $\bar{X} + 3,5 S$ . Vmes je 14 razredov z enako širino po 0,5 S. Imamo 15 mej 16 razredov.

$\bar{X} - 3,5 S; \bar{X} - 3 S; \bar{X} - 2,5 S; \bar{X} - 2 S; \bar{X} - 1,5 S; \bar{X} - S; \bar{X} - 0,5 S; \bar{X}; \bar{X} + 0,5 S; \bar{X} + S; \bar{X} + 1,5 S; \bar{X} + 2 S; \bar{X} + 2,5 S; \bar{X} + 3 S; \bar{X} + 3,5 S.$

Določimo stvarne frekvence, ki povedo, koliko vrednosti leži v vsakem razredu, in jih označimo z  $f_1, f_2, \dots, f_{16}$

Da določimo teoretične frekvence, uvedemo novo spremenljivko na znan način

$$t = \frac{X - \bar{X}}{S}$$

Dobimo naslednje meje razredov za t:

-3,5; -3; -2,5; -2; -1,5; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5

Iz tabele za ploščino pod normalno krivuljo dobimo ploščine nad vsakim od 16 razredov. To so vrednosti:

- 0,0002
- 0,0011
- 0,0049
- 0,0166
- 0,0440
- 0,0919
- 0,1498
- 0,1915
- 0,1915
- 0,1498
- 0,0919
- 0,0440
- 0,0166
- 0,0049
- 0,0011
- 0,0002

Vzemimo, da imamo danih n vrednosti, iz katerih smo izračunali  $\bar{X}$  in S. Teoretično frekvenco razreda dobimo tako, da pripadajočo ploščino pomnožimo z n. Le tako je tudi vsota vseh teoretičnih frekvenc enaka številu danih vrednosti n.

Teoretične frekvence označimo z  $f_1, f_2, \dots, f_{16}$

Recimo, da je danih 167 vrednosti. Potem je npr.:

$$f_5 = 0,044 \cdot 167 = 7,348 \text{ vrednosti.}$$

Razreda, ki sta enako oddaljena od srednje vrednosti, imata enaki teoretični frekvenci. To pa ne velja za stvarne frekvence.

Začetni razredi (in zaradi simetrije tudi končni) imajo teoretične frekvence zelo majhne. To bi zaradi obrazca [4.1], kjer so  $f_i$  v imenovalcu, naredilo  $\chi^2$  prevelik. Zato združimo toliko začetnih (in ustreznih končnih) razredov v en razred, da je vsota pripadajočih frekvenc večja od naprej izbranega števila H, ki je večje od 5. Število sumandov k v obrazcu [4.1] je tako vedno manjše od 16. Ker pri računu vrednosti  $\chi^2$  upoštevamo X in S, izračunana iz podatkov, pri tem izgubimo 2 prostostni stopnji, zato je število prostostnih stopenj le še k-3.

Oglejmo si vse to na primeru iz livarne: V februarju 1967 smo za določeno mešanico livarskega peska izmerili naslednjih 19 vrednosti za propustnost;

120	100	115	110	105	120	120	70
130	125	135	95	145	140	165	140
145	140	130					

Srednja vrednost:  $\bar{X} = 123,7.$

Ocena za standardno deviacijo:  $S = 21,78.$

Za n = 19 je 16 teoretičnih frekvenc

- 0,004
- 0,021
- 0,093
- 0,315
- 0,836
- 1,746
- 2,850
- 3,638
- 3,638
- 2,850
- 1,746
- 0,836
- 0,315
- 0,093
- 0,021
- 0,004

Recimo, da smo si izbrali  $H = 5,01$ . Združiti moramo prvih 7 razredov, da je vsota frekvenc večja od H. Frekvenca tako nastalega razreda je  $0,004 + 0,021 + 0,093 + 0,315 + 0,836 + 1,746 + 2,850 = 5,865$

Prav tako združimo zadnjih 7 razredov v en razred s frekvenco 5,865. Ostaneta nam še 2 razreda v sredini. V celoti imamo tako 4 razrede s teoretičnimi frekvencami

$$f_1 = 5,865 \quad f_2 = 3,638 \quad f_3 = 3,638 \quad f_4 = 5,865$$

Meje 4- razredov so:

$$\bar{X} - 0,5 \cdot S = 112,8$$

$$\bar{X} = 123,7$$

$$\bar{X} + 0,5 \cdot S = 134,6$$

Določimo še stvarne frekvence za 4 razrede. V 1. razredu ali manjših od 112,8 je 5 od danih vrednosti. V 2. razredu med 112,8 in 123,7 so 4 vrednosti. V 3. razredu med 123,7 in 134,6 so 3 vrednosti in v 4. razredu ali večjih od 134,6 je 7 vrednosti.

Torej je

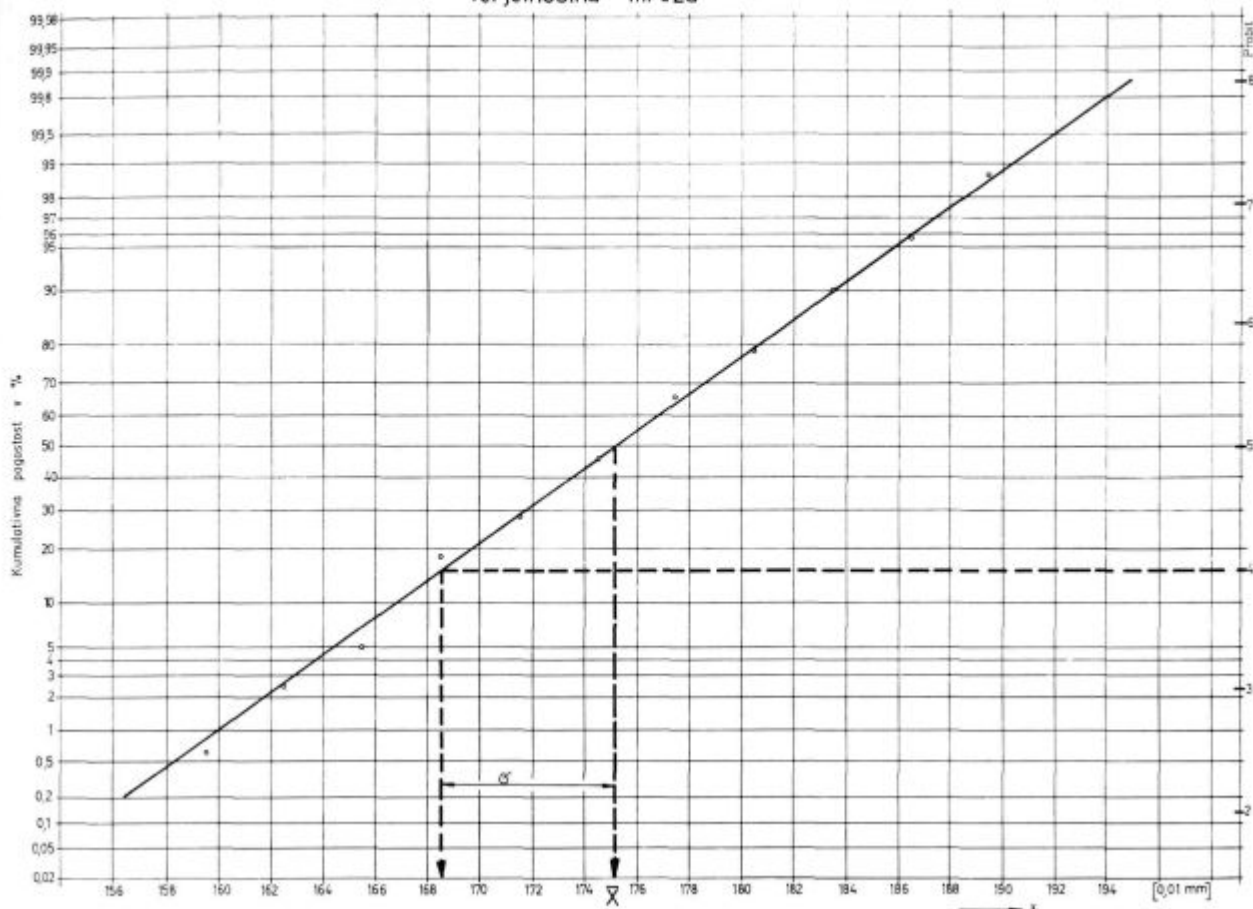
$$f_1 = 5 \quad f_2 = 4 \quad f_3 = 3 \quad f_4 = 7$$

Izračunajmo  $\chi^2$  po obrazcu [4.1]

$$\frac{(5,865 - 5)^2}{5,865} + \frac{(3,638 - 4)^2}{3,638} + \frac{(3,638 - 3)^2}{3,638} + \frac{(5,865 - 7)^2}{5,865} = 0,496$$

Ker je  $k = 4$  ima  $\chi^2 k - 3 = 1$  prostostno stopnjo. Poglejmo tabelo 8 za  $\chi^2$ . V praksi navadno primerjamo izračunano vrednost z vrednostjo iz tabele za  $P = 95\%$ . Če je izračunana vrednost

### Verjetnostna mreža



Slika 11

večja od tabelarične, smatramo porazdelitev za nenormalno, v nasprotnem primeru pa kar za normalno. Po tem kriteriju je porazdelitev v našem primeru normalna, čeprav tega ne moremo trditi z veliko gotovostjo. (Če bi za primerjavo uporabili podrobnejšo tabelo še za druge verjetnosti P, bi ugotovili, da ima naša trditev v tem primeru komaj nekaj več kot 50 % gotovost.)

#### Uporaba računalnika zuse Z-23 za analizo porazdelitve, priprava podatkov in tolmačenje rezultatov

Za računalnik Z — 23 smo izdelali program, ki za dane podatke izračuna vrednost  $\chi^2$ , kot smo to storili za propustnost livarskega peska na strani 200.

Podatke natipkamo na teleprinterski trak v naslednjem vrstem redu in obliki:

*; MESANICA S-2 JULIJ 1966 PROPUSTNOST  
V SVEZEM;*

130 130 125 120 125 115 135 118 120 105 115 110 130 118  
118 125 115 120 115 115 125 115 120 100 125 120 120 118  
125 135 130 125 130 120 118 120 130 125 120 125 128 130  
125 115 120 98 115 118 105

*; MESANICA S-2 AVGUST 1966 PROPUSTNOST  
V SVEZEM;*

110 110 112 125 128 125 130 125 120 120 135 135 130 130  
110 118 110 115 125 120 115 130 118 115 110 130 125 120

*; MESANICA R-1 OKTOBER 1966 VLAGA;*

6,5 7,6 9,5 7,25 7,75

Zo + 1 E

V začetku podatkov med dve podpičji napišemo naslov analize, na katero se podatki nanašajo npr.:

*; Mešanica S-2 julij 1966 propustnost v svežem;*  
Paziti moramo, da je pred tem tekstom natančno eno podpičje in za tekstom natančno eno podpičje.

Takoj za 2. podpičjem moramo narediti presledke ali novo vrsto in nato sledijo števila. Na koncu podatkov imamo dve možnosti:

— nadaljujemo s tekstom (spet med dvema podpičjema) za naslednji primer in nato s števili za ta primer, ali pa

— končamo z zapisom Zo + 1 E (Z nič plus ena E), ko nimamo več nobenega primera za izračun.

Oglejmo si najprej rezultate za primer: »Mešanica S-2 JULIJ 1966 propustnost v svežem«:

**;MESANICA S-2 JULIJ 1966 PROPUSTNOST V SVEZEM;**

$N = 50'$   
 $X = 120.280$   
 $S = 8.104$   
 $V = 6.738$   
 $X + 3 S = 144.592$   
 $X - 3 S = 95.968$

$PS. = 3'$   $HI KV. = 16.181$

87.864	91.916	0
91.916	95.968	0
95.968	100.020	4.000
100.020	104.072	0
104.072	108.124	4.000
108.124	112.176	4.000
112.176	116.228	16.000
116.228	120.280	32.000
120.280	124.332	0
124.332	128.384	22.000
128.384	132.436	14.000
132.436	136.488	4.000
136.488	140.540	0
140.540	144.592	0
144.592	148.644	0
148.644	152.696	0

**;MESANICA S-2 AVGUST 1966 PROPUSTNOST V SVEZEM;**

$N = 33'$   
 $X = 121.091$   
 $S = 7.899$   
 $V = 6.523$   
 $X + 3 S = 144.789$   
 $X - 3 S = 97.393$

$PS. = 3'$   
 $HI KV. = 7.373$

**NORMAL**

**;MESANICA R-1 OKTOBER 1966 VLAGA;**

$N = 5'$   
 $X = 7.720$   
 $S = 1.106$   
 $V = 14.327$   
 $X + 3 S = 11.038$   
 $X - 3 S = 4.402$

Takoj za tekstem sledi

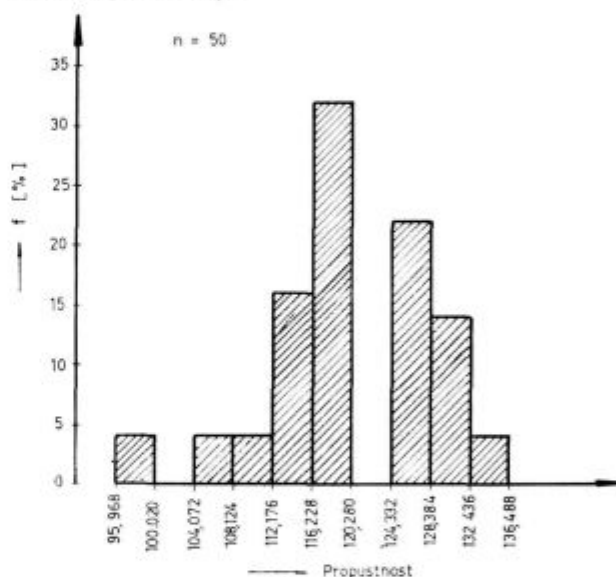
$N = 50'$ .

To pomeni, da je vseh vrednosti 50. Ker je število celo, ga je računalnik opremil z apostroфом za razliko od decimalnih števil. Nato sledijo vrednosti statističnih parametrov  $X$  (označeno le z  $X$ ),  $S$ ,  $V$ , zgornje meje  $X + 3 S$  in spodnje meje  $X - 3 S$ . Nato računalnik izpiše vse vrednosti, ki so manjše od spodnje meje  $X - 3 S$  in vse vrednosti, ki so večje od zgornje meje  $X + 3 S$ . V tem primeru ni bilo takih vrednosti. Za tem sledi število prostostnih stopenj (oznaka  $PS.$ ). Vrednost  $\chi^2$  (oznaka  $HI KV.$ ) računalnik izračuna po obrazcu [4. 1], pri tem pa prej združi razrede z majh-

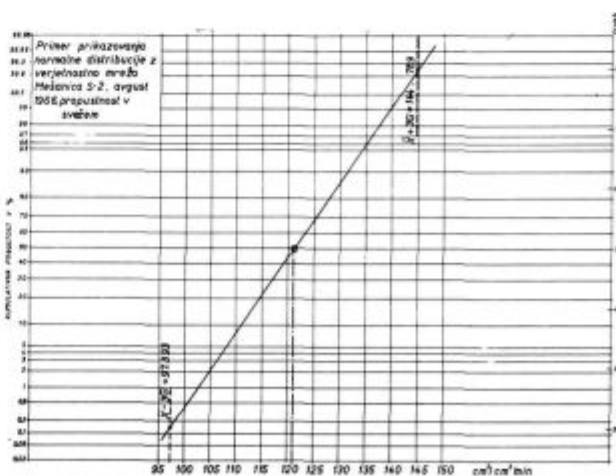
nimi teoretičnimi frekvencami, kot smo to storili v primeru na strani 200.

Izračun  $\chi^2 = 16,181$  primerja računalnik s teoretičnim  $\chi^2$  za 3 prostostne stopnje pri nivoju  $P = 95 \%$ .

Ce je izračunana vrednost večja od tabelarične, to pomeni, da s 95 % gotovostjo lahko trdimo, da je predpostavka o normalni porazdelitvi populacije napačna. V našem primeru torej vrednosti propustnosti v svežem niso normalno porazdeljene. Zato računalnik izpiše meje za 16 razredov in pripadajoče stvarne frekvence v odstotkih. Spodnja meja prvega razreda je sicer  $-\infty$ , a jo računalnik izpiše kot  $\bar{X} - 4 S$ , ker mu je to lažje storiti. Upošteva pa za 1. razred res vse vrednosti, manjše od  $\bar{X} - 3,5 S$ , ne glede na vrednost  $X - 4 S$ . Podobno računalnik izpiše tudi zgornjo mejo 16. razreda kot  $\bar{X} + 4 S$  namesto  $\infty$ . Upošteva pa v 16. razredu tudi vse vrednosti, ki so večje od  $\bar{X} + 4 S$ . Po teh rezultatih je lahko narisati histogram frekvenc v odstotkih za razrede s podanimi mejami. Tak histogram nam da zelo nazorno sliko porazdelitve (slika 12.).



Slika 12



Slika 13

Če je izračunani  $\chi^2$  manjši od tabelarnega za  $P = 95\%$ , računalnik izpiše besedo *NORMAL*, kakor v primeru za »mešanico S-2 avgust 1966 propustnost v svežem«.

V takem primeru je priporočljivo porazdelitev prikazati v verjetnostni mreži. To lahko hitro narišemo, tako da v mrežo vnesemo pri  $\text{probit} = 8$  vrednost zgornje meje  $\bar{X} + 3S$  in pri  $\text{probit} = 2$  vrednost spodnje meje  $\bar{X} - 3S$ . Obe točki povežemo s premico (glej sliko 13).

V primeru, ko imamo manj kot 17 podatkov, ne moremo izvršiti testa normalnosti. Računalnik

v tem primeru izpiše le vrednosti za osnovne statistične parametre. To vidimo v tretjem primeru rezultatov za mešanico R-1, ko je bilo v oktobru 1966 zbranih 5 podatkov.

#### Literatura

1. J. Rodič: Matematična statistika  
— Metode I., II.  
— Priručnik za praktično uporabo I., II.  
Metalburo Zagreb 1964
2. A. Zanella: Programi di calcolo automatico nel controllo della qualità e nella programmazione degli esperimenti, AICOM maj 1962, str. 10, 11.

### ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel ist die statistische Methode der Verteilungsanalyse beschrieben. An praktischen Beispielen ist das Wesen der statistischen Grundparameter angeführt. Besonders ausführlich ist das Wesen der normalen Verteilung und ihre Verwendung ausgelegt.

Beschrieben ist der Test  $\chi^2$  für beliebige Verteilung und die besondere Methode zur Berechnung des  $\chi^2$ , wenn wir die Normalverteilung testieren wollen. Diese Methode

ist zur Berechnung auf der elektronischen Rechenmaschine verwendbar.

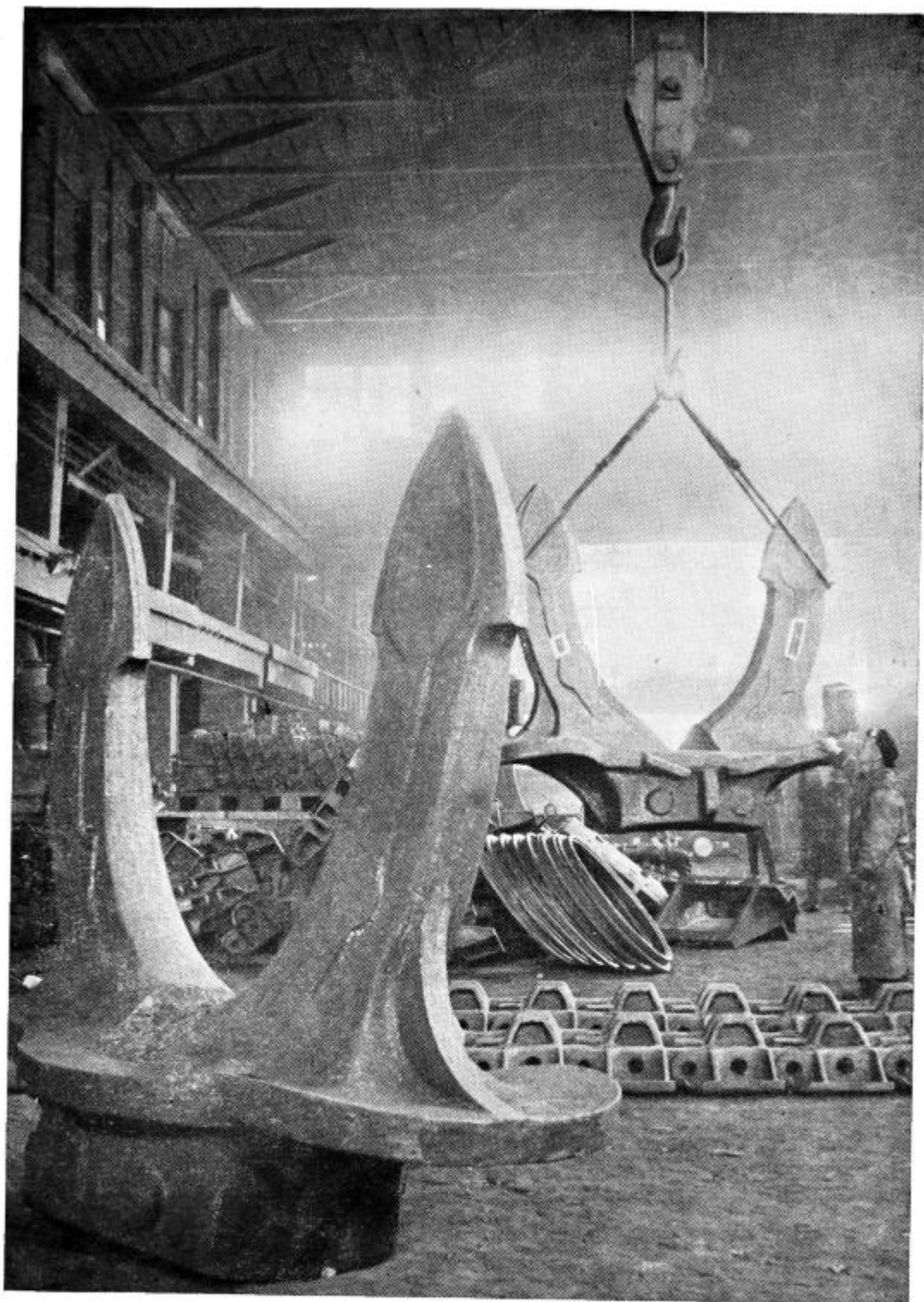
Für das Programm auf der elektronischen Rechenmaschine ZUSE Z-23 die alle statistischen Parameter ausrechnet und den Test  $\chi^2$  durchführt, ist im Artikel die ausführliche Beschreibung der Datenvorbereitung und Auslegung der Resultate — alles auf praktischen Beispielen der Zelezarna Ravne.

### SUMMARY

Statistical distribution analysis is described. Terms of basic statistical parameters are introduced on the basis of practical cases. The use and essentiality of normal distribution is especially described in detail.

Test  $\chi^2$  for random distribution and special method for  $\chi^2$  computation, when testing the normality on digital computer is described.

For program to be run on digital computer Zuse Z-23 which computes all statistical parameters and tests  $\chi^2$  the data preparation and results interpretation is described in detail. All the practical cases are taken from Ravne Steel Mill.



Ulitki — lopate težkih sider za ladje

## Žilavost orodnih jekel

### I. OBCUTLJIVOST RAZNIH METOD ZA DOLOČANJE ŽILAVOSTI ORODNIH JEKEL

Članek podaja v prvem delu kratek pregled metod, ki se uporabljajo za določevanje žilavosti orodnih jekel. Poseben poudarek je v primerjavah občutljivosti različnih metod preizkušanja. S tem je določeno potrebno število ponovitev pri posameznih poizkusih za določeno statistično zanesljivost rezultatov.

V drugem delu je prikazana uporabnost posameznih metod za preizkušanje žilavosti glede na vrsto orodnega jekla in njegovo uporabo. V večini primerov so statične metode preizkušanja primernejše od udarnih.

Za določanje žilavosti konstrukcijskih jekel se poslužujemo navadno udarno upogibnih preizkusov, ki se opravljajo na strojih charpy in izod. Natančnost preizkusa se lahko poveča z manjšim, lažjim nihalom in z večjo globino ter ostrino zareze na probi. Ta metoda določanja žilavosti se uporablja tudi za orodna jekla, so pa rezultati precej manj zanesljivi kot pri konstrukcijskih jeklih in so tudi vrednosti za žilavost manjše. Žilavost orodnih jekel se določa še z zvojnimi preizkusi, s statičnimi udarnimi, statičnimi upogibnimi preizkusi ter s preizkusi žilavosti ostrine in preizkusi na večkratno udarjanje. Posebno za preizkušanje orodnih jekel potrebujemo občutljivo metodo merjenja žilavosti, zato so ravno z orodnimi jekli dobljeni podatki o natančnosti in občutljivosti raznih načinov določanja žilavosti.

#### Udarno upogibni preizkus

Žilavost se določa na udarni upogibni način večinoma z napravo charpy ali izod, redkokdaj z rotirajočo udarno napravo guillery. Lažje je preizkušati pri visokih in nizkih temperaturah na charpy nihalu kot na izodovem udarnem stroju.

Trosenje vrednosti je pri določanju žilavosti na charpy kladivu in sploh z udarnim upogibnim preizkusom večje pri milejši zarezi. Največje je trosenje, če uporabljamo probe brez zarez.

Za preizkušanje zelo žilavih jekel se pri raziskovanjih uporabljajo probe, zarezane s treh strani. Z zarezami od strani se izognemu delu za **krčenje, stiskanje** na stranskih ploskvah in povečamo prečne natezne napetosti.

Navadni Charpyjev preizkus se pri orodnih jeklih precej slabo obnese: če imamo probe z normalno DVM zarezo, so vrednosti za porušno delo tako majhne, da je premajhna razločevalna spo-

sobnost. Če pa vzamemo probe brez zarez, je zelo veliko trosenje rezultatov, vendar se v praksi uporabljajo za določevanje žilavosti orodnih jekel probe brez zarez.

Prednost udarnega upogibnega preizkusa pred drugimi metodami določevanja žilavosti je možnost izvajanja pri visokih in nizkih temperaturah, zato se poizkuša na razne načine povečati natančnost preizkusa in določiti s statističnimi metodami gotovost pri rezultatih preizkušanja.

V ZDA<sup>1</sup> so začeli preizkušati orodna jekla s probami, ki imajo le zelo plitvo in milo zarezo, tako da ni velikih koncentracij napetosti. Zareza je v obliki zaokrožitve s **polmerom 12,7 mm**. Da je to optimalna vrednost (1/2 in.) so ugotovili s preizkušanjem prob, ki so imele zarez s polmeri 3,175 mm, 6,35 mm, 12,7 mm in 25,4 mm. Dimenzije prob so bile pri tem 11,4 × 11,4 × 51,3 mm<sup>3</sup>.

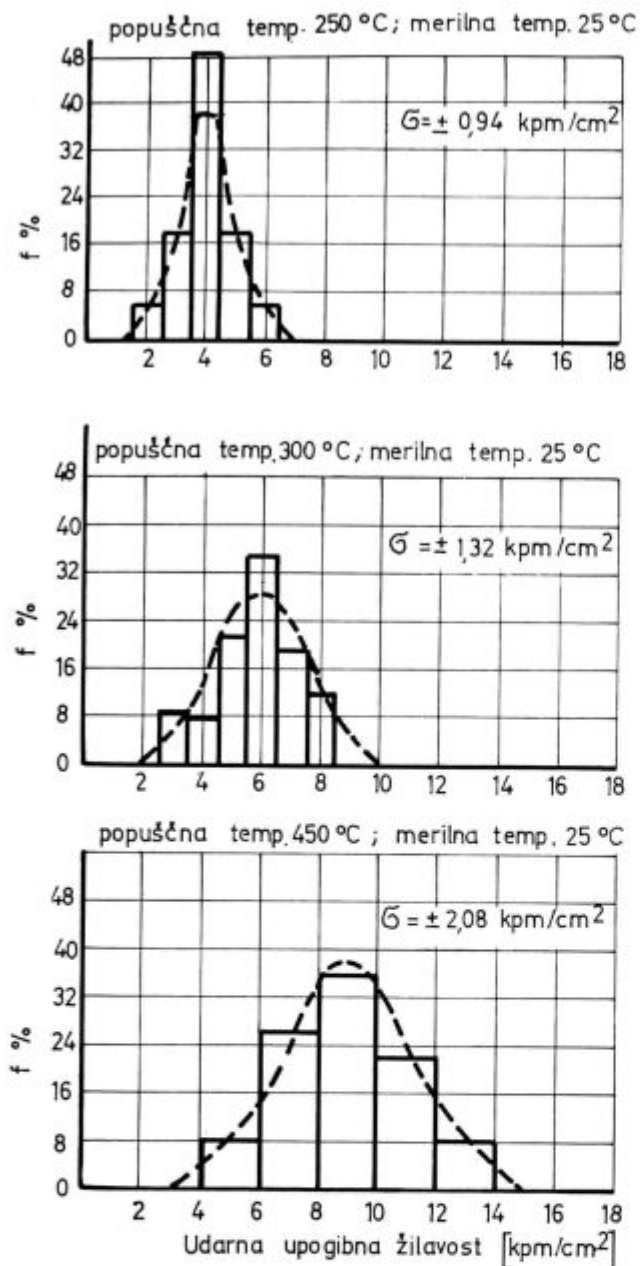
Zareze so izbrusili v smeri pravokotno na vzdolžno os probe, in da bi se odstranile raze od brušenja, so zarez še spolirali. Poudarjajo, da je poliranje zarez brezpogojno potrebno, prav tako je zelo važno centriranje prob pri preizkušanju: razdalja od sredine zarez do ene podpore se lahko razlikuje le za 0,025 mm od razdalje centra zarez do druge podpore.

Udarno delo se je močno zvečalo z večjim polmerom zaokrožitve zarez pri orodnih jeklih, ki se kalijo na zraku, in jeklih za delo v vročem, kot so utop Mo-1, utop 2, utop 3 in pri jeklih, ki so odporna proti obrabi. Pri jeklih, ki se kalijo v olju (npr. merilo) pa je z večjim polmerom zarez povečanje dela za zlom le majhno. Z višjo preizkuševalno temperaturo se poveča delo, potrebno za zlom probe.

Ugotovili<sup>1</sup> so, da se dajo na osnovi rezultatov udarne upogibne žilavosti, dobljenih na probah z zarezo polmera 12,7 mm **ločiti med seboj različna orodna jekla** in da se lahko **določijo optimumi toplotne obdelave**.

Pri statističnem določevanju občutljivosti tj. uporabnosti udarnega upogibnega preizkusa za orodna jekla so uporabili<sup>2</sup> probe 10 × 10 × 55 mm<sup>3</sup>. Vzeli so po pet paralelnih prob (enako toplotno obdelanih) in so dobili žilavost od 2 do 9 kpm/cm<sup>2</sup>. Enako kot v praktični uporabi in z zvojnimi udarnimi preizkusom so tudi tu dobili pri jeklih tipov OCR-12 special, OCR-12, OW-1 zelo nizko žilavost (predvsem pri nižjih popuščnih temperaturah), večjo žilavost pa sta pokazali jekli tipa merilo in merilo ekstra.





Slika 1

Pogostost nastopanja posameznih vrednosti udarne upogibne žilavosti za jeklo tipa C.3840 — merilo<sup>1</sup>

Slika 1 kaže pregled nad trosenjem vrednosti za udarno upogibno žilavost pri petdesetih paralelnih probah brez zarez iz orodnega jekla tipa merilo ekstra. Standardni odklon je z višjo temperaturo popuščanja večji in znaša pri 250°C  $\pm 0,94$  kpm/cm<sup>2</sup>, pri 300°C  $\pm 1,32$  kpm/cm<sup>2</sup> in pri 450°C je  $\pm 2,08$  kpm/cm<sup>2</sup>. Z višjo popuščno temperaturo se dobi tudi večja srednja vrednost za žilavost, kot lahko vidimo iz diagramov. Poveča se od 4,03 kpm/cm<sup>2</sup> za popuščno temperaturo 250°C na 9,03 kpm/cm<sup>2</sup> za popuščno temperaturo 450°C. Tako lahko rečemo, da se večja standardni odklon z naraščanjem srednje vrednosti.

S statističnimi metodami so ugotovili<sup>2</sup>, da pet paralelnih prob ne zadostuje za razločevanje posameznih orodnih jekel in za določanje območja krhkosti. Za relativno napako  $\pm 10\%$  in statistično gotovost 99% je potrebnih 30 do 40 paralelnih prob pri preizkušanju jekla tipa merilo — ekstra. Podobne številke veljajo za ostala orodna jekla z žilavostjo 2—9 kpm/cm<sup>2</sup>. V obratni praksi udarni upogibni preizkus z zarezo ali nezarezo proba ni zadovoljiv za orodna jekla, ker zahteva preveč prob. To kaže na majhno občutljivost metode.

#### Žilavostni preizkus z večkratnim udarjanjem, žilavost ostrine

Način preizkušanja z udarjanjem je precej podoben udarnemu upogibnemu preizkusu (Charpy) in preizkusu na žilavost ostrine. Nekateri trdijo<sup>3</sup>, da je to najbolj občutljiva metoda za določanje žilavosti krhkih trdih jekel. Znani so nam podatki za brzorezno jeklo 18-4-1. Naprava za določanje odpornosti na udarjanje ima sledeče glavne dele:

- nihalo z utežmi,
- primež za probo,
- merilno ploščo z razdelitvijo višine v centimetrih.

Nihalo se spušča z vedno večje višine, dokler ne nastopi zlom probe. Odpornost proti udarcem se potem določi iz višine nihala ob končnem udarcu (ko nastopi zlom) in teže uteži. Rezultat se podaja navadno v gcm. Probe so imele mere: dolžina 50,8 mm in premer 3,8 mm. Pri preizkusu na žilavost ostrine<sup>4</sup> je proba v obliki rezila: udarjani del je zbrušen pod kotom 45°.

#### Statični upogibni preizkus in primerjava z raztržnim preizkusom

Pri statičnem upogibnem preizkusu ločimo dva načina obremenjevanja:

- sila deluje v eni točki,
- sila deluje v dveh točkah.

Priporočajo<sup>5</sup> uporabo sistema z obremenjevanjem v dveh točkah, ker je pri tem načinu srednji del probe po dolžini enakomerno obremenjen.

Dimenzije prob so pri nemških avtorjih<sup>6</sup>: debelina okrogle probe  $d = 5$  mm ali stranica kvadratne 6 mm, dolžina 100 mm. Razdalje podpor so bile 75 mm (okrogle probe) oz. 70 mm (kvadratne probe). Hitrost obremenjevanja je bila 10 kp/s.

Angleški avtorji<sup>7</sup> uporabljajo probe velikosti  $2,54 \times 5,08 \times 76,2$  mm<sup>3</sup>. Izdelana je tudi posebna naprava za preizkušanje na upogib in ta omogoča izvedbo preizkusov pri povišanih in pri nizkih temperaturah.

Največja merljiva deformacija na napravi je 2,5 mm, za brzorezna jekla pa zadostuje 1 mm.

Z rezultati preizkusa se lahko izvrše krivulje v diagramu napetost — deformacija. Ta krivulja pa ne ponazarja dejanskega napetostnega stanja in zato jo moramo popraviti. Pri jeklih s trdoto 30—55 HRC je natezna trdnost 40—50% upogibne

trdnosti in raztezna meja proporcionalnosti je 72 % upogibne meje plastičnosti. To razliko odpravimo, če nominalno upogibno trdnost reduciramo za 28 %, ali če natezno trdnost pomnožimo s faktorjem 1,5.

Energija za porušitev se dobi iz površine pod krivuljo v diagramu napetost — deformacija.

Rezultati:

- a) iz nekorrigirane krivulje:
  - meja proporcionalnosti,  $\sigma_{spr}$ ,
  - nominalna napetost ob zlomu,  $\sigma_{sm}$ ,
  - celotni upogib,  $f_c$ ,
  - plastični upogib,  $f_p$ ,
  - model elastičnosti, E;
- b) iz korigirane krivulje se dobi še:
  - prava napetost ob zlomu,  $\sigma_m$ ,
  - energija za porušitev, A,
  - procent celotne probe, ki je bil obremenjen nad mejo plastičnosti ob zlomu,
  - trdota po Vickersu se izračuna.

Energija za porušitev se dobi iz površine pod krivuljo napetost — deformacija. Krivuljo razdelimo na tri dele in dobimo:

$$A = \frac{\sigma_{spr} \cdot f_p}{2} + \sigma_{spr} (f_c - f_p) + \frac{(\sigma_m - \sigma_{spr}) (f_c - f_y)}{2}$$

Razmerje  $\frac{f_p}{f_c} = Y$  je merilo za del probe, ki

se ni plastično deformiral in iz tega lahko izračunamo procent vlaken, ki so se plastično deformirala. Ta vrednost Y ni odvisna od dimenzij probe in je premo sorazmerna upogibu.

Za izračun žilavosti lahko potem upoštevamo

faktorje  $\frac{\sigma_{spr}}{\sigma_m}$  (razmerje meje plastičnosti in upogibne trdnosti),  $\frac{\sigma_{spr}}{W}$ , ki je tudi merilo elastične

trdnosti materiala in Y (procent plastično deformiranih vlaken). W je pri tem največja možna meja proporcionalnosti, dosegljiva pri določeni trdoti.

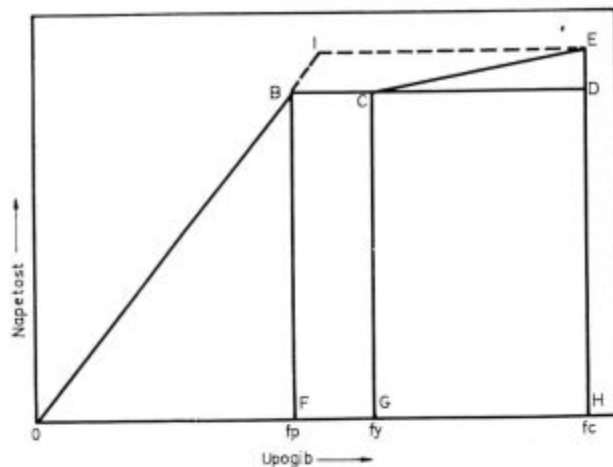
Žilavost po metodi BISRA<sup>8</sup> je dobljena s podatki upogibnega preizkusa tako:

$$Q = \frac{\sigma_v}{\sigma_m} \cdot \frac{\sigma_v}{W} \cdot Y$$

S posebnimi poizkusi so dokazali, da se spreminja Q podobno kot **udarna upogibna žilavost** in velikost površine pod krivuljo v diagramu napetost — deformacija. (Sl. 2)

Pri upogibnem preizkusu, kjer se obremenjuje v dveh točkah, se dobijo večje vrednosti za upogibno delo, vendar rabimo za isto statistično gotovost večje število paralelnih prob kot pri sistemu obremenjevanja v eni točki. Vrednosti za mejo plastičnosti in za trdnost se z večjo razdaljo podpor le malo zmanjšajo.

Za oceno žilavosti se največ uporabljajo podatki o meji plastičnosti, plastičnem upogibu in delu za plastičen upogib.



Slika 2

Vpliv raznih faktorjev na delo za zlom pri statičnem upogibnem preizkusu<sup>9</sup>

Nekateri vzamejo kot merilo plastičnosti kar upogib in tako preizkušajo že izdelovljena orodja (svedre). Naprava za preizkušanje je zelo enostavna: na ročni pogon s polžnim prenosom. Upogib pa se pri raznih brzoreznih jeklih ne razlikuje veliko, zato ta način tudi ni preveč občutljiv. Natančnost statičnega upogibnega preizkusa je statistično ugotovljena. Merilo natančnosti je standardni odklon s, ki ga izračunamo iz končnega števila meritev in je le približek pravemu standardnemu odklonu. Iz standardnega odklona s in števila paralelnih prob N izračunamo območje verjetnosti za pravo srednjo vrednost po formuli:

$$T_s = 2t \cdot \frac{s}{\sqrt{N}}$$

t je faktor, odvisen od števila paralelnih prob in statistične varnosti.

Trosenje je večje pri plastičnem upogibu, plastičnem in celotnem delu kot pri ostalih vrednostih (trdnost, meja plastičnosti, delo za elastičen upogib).

Pri statistični varnosti 95—99 % je potrebno za določanje trdnosti elastičnega upogiba in dela za elastični upogib 6 do 8 paralelnih prob in za celoten upogib ter celotno delo 10 do 20 paralelnih prob.

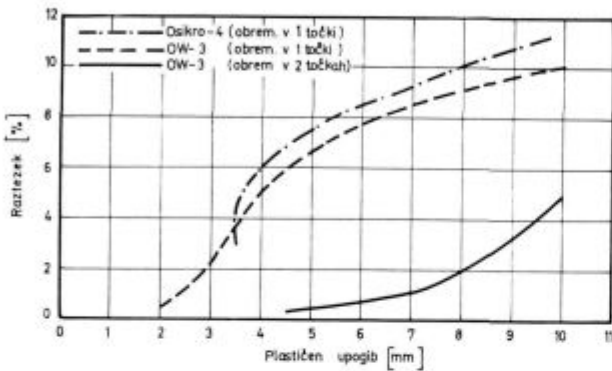
Sprememba razdalje podpor ne vpliva na velikost standardnega odklona.

Odvisnost med rezultati raztrznega in upogibnega preizkusa so ugotavljali<sup>7</sup> na jeklih tipov OW-3 in OSIKRO-4.

Pri raztrznem preizkusu je majhna plastična deformacija in veliko trosenje, zato niso možna natančna merjenja. Če majhna premaknitev prijemališča sile in nepopolnost površine lahko povzroči krhek prelom pri meji plastičnosti ali celo pod njo. Probo za raztržni preizkus so spolirali pod kotom 45° glede na os. Hitrost obremenjevanja so vzeli 2250 kp na minuto. Pri upogibnem preizkusu so vzeli razdaljo zunanjih podpor 50,8 mm in razdaljo notranjih 18,5 mm, hitrost obremenjevanja

nja je bila pri tem 453 kp na minuto. S temi preizkusi so pokazali, da imajo nizkolegirana orodna jekla podobne trdnosti, trdote in meje plastičnosti, močno pa se razlikujejo v duktilnosti.

Razmerje upogibne in raztržne trdnosti ni odvisno od kemijske sestave ali trdote. V območju trdot 30–55 HRC je raztržna trdnost 45–50 % upogibne trdnosti, meja plastičnosti pri raztržnem preizkusu je 88 % upogibne meje plastičnosti in raztezna meja proporcionalnosti je 72 % upogibne meje plastičnosti in 82 % meje 0,2 %. Slika 3 kaže odnos podaljškov in upogibov za OW-3 in OSIKRO-4.



Slika 3

Odnos raztezek — upogib<sup>7</sup> za jekli tipov Č. 6444 — Osikro 4 in Č. 6441 — OW-3

Upogib in raztezek pri obremenjevanju v eni točki se le malo razlikujeta za obe jekli.

Sliki 4 in 5 prikazujeta odvisnost absorbirane energije (žilavosti) od trdote pri raztržnem in upogibnem preizkusu. Značilen je padec žilavosti v območju trdot 48–56 HRC (tj. popuščnih temperatur 200–300° C za OSIKRO-2).

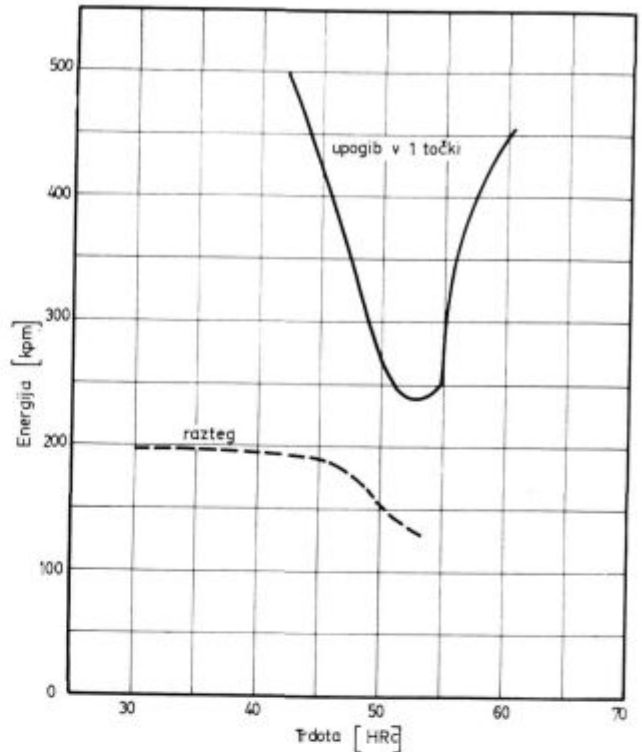
Raztržni preizkus ne da zadovoljivih rezultatov pri trdotah nad 54 HRC, ker je preveliko trošenje in močan vpliv gladkosti površine.

Glede natančnosti raztržnega in upogibnega preizkusa so ugotovili, da so pri raztržnem preizkusu odkloni od srednje vrednosti za trdnost in mejo plastičnosti 1 %, pri redukciji preseka in raztezu pa 10–25 %. Pri upogibnem preizkusu so odkloni za mejo plastičnosti in trdnost 1–5 % in 2–10 % za celoten in plastičen upogib. Vse te številke veljajo za trojno vrednost standardnega odklona, tj. 3 s. Upogibni preizkus nam daje o duktilnosti zanesljivejše podatke kot raztržni, glede trdnosti in meje plastičnosti pa sta oba preizkusa enakovredna. To velja predvsem za nizko legirana jekla.

Pri upogibnem preizkusu je pomembno še to: sistem obremenjevanja v dveh točkah je za krhke materiale uporabnejši kot sistem z obremenjevanjem v eni točki, ker se z njim doseže večji upogib.

### Zvojni žilavostni preizkus

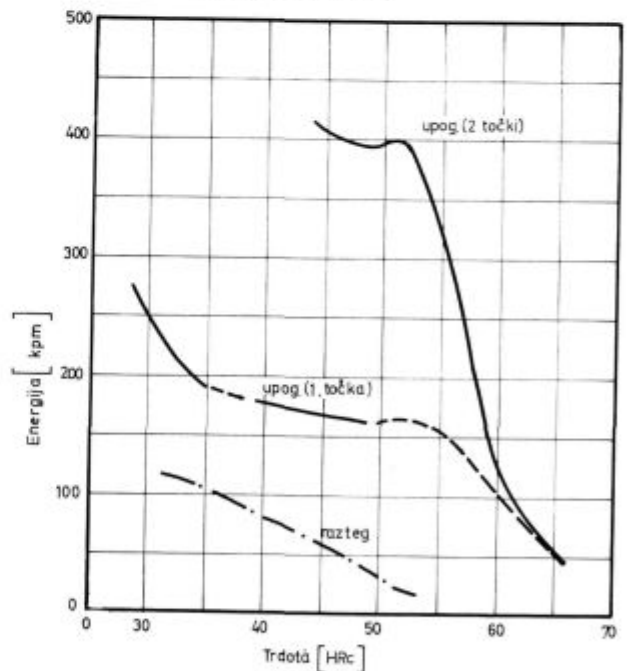
Glede na to, da se pri trdih, krhkih jeklih udarno upogibni žilavostni preizkus z zarezano probo ne obnese najbolje, so vpeljali nov način



Slika 4

Vpliv trdote na energijo<sup>7</sup>, porabljeno pri raztržnem poizkusu za jeklo tipa Č. 6444 — Osikro 4

### Č. 6441 - OW3



Slika 5

Vpliv trdote na porabljeno energijo pri upogibnem preizkusu<sup>7</sup>

preizkušanja, pri katerem je razmerje strižne in normalne napetosti veliko večje in nastopajo zato večje deformacije. Hkrati z deformacijami se po-

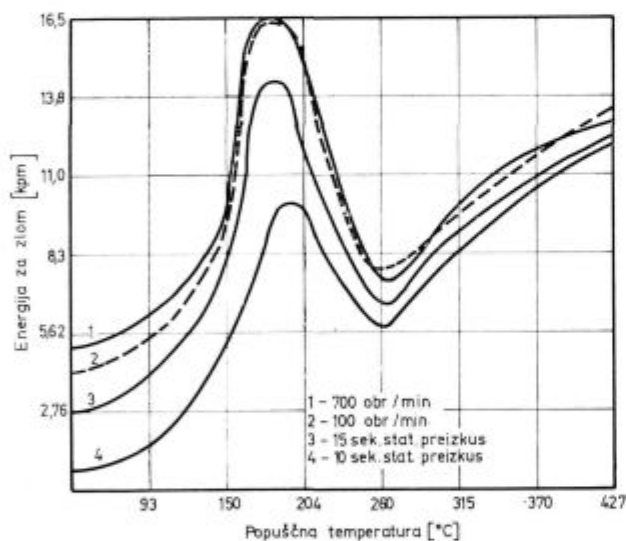
veča tudi razločevalna sposobnost: možnost razlikovanja jekel in rezultatov preizkušanj prob, ki so iz istega jekla, toda različno toplotno obdelane. Ta nov način preizkušanja žilavosti ima tudi prednost zaradi večjega deformacijskega dela. Pri deformaciji sodeluje namreč cela proba, mi pa lahko določimo takšno dolžino in presek, ki nam ustrezata. Pri tem smo omejeni zaradi možnosti prekaljenja in kalilnih deformacij, zato so tudi tu postavljene meje deformacijskemu volumnu in s tem deformacijskemu delu.

Zvojno preizkušanje je lahko statično in udarno. Prednosti statičnega načina preizkušanja:

— dobimo več podatkov, ki nam lahko označujejo žilavost, ker moremo narisati krivuljo napetost — deformacija in iz diagrama lahko dobimo mejo plastičnosti, plastično in elastično deformacijo, plastično in elastično komponento dela za zlom probe;

— dobljene vrednosti za porušno delo bolj sovpadajo kot pri udarnem zvojnem preizkusu, če so probe natančnih mer (toleranca v premeru srednjega dela probe je 0,005 mm). Trosenje je tedaj veliko manjše in zato zadostuje manjše število paralelnih prob.

### Č.1940 - OC100



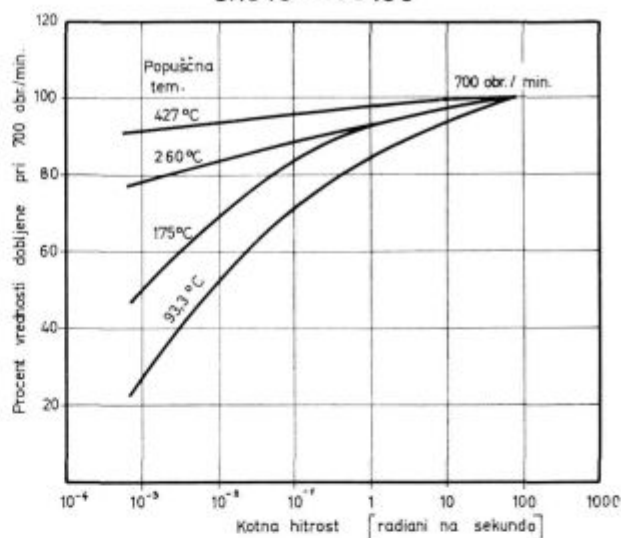
Slika 6

Vpliv popuščanja na porušno delo pri zvojnem poizkusu orodnega jekla tipa Č.1940 — OC-100 za različne hitrosti deformacije<sup>9</sup>

Hiba statičnega zvojnega preizkusa je nujnost izredne natančnosti pri obdelavi površine merilnega dela probe. Udarni zvojni preizkus zahteva večje število paralelnih prob, je pa lažje in hitreje izvedljiv, od prob se zahteva manjša točnost dimenzij.

Vrednosti porušnega dela dobljene s statičnim zvojnem preizkusom se ujemajo z rezultati udarnega zvojnega preizkusa, le nekoliko nižje so (slika 6). Vpliv deformacijske kotne hitrosti je dobro viden iz slike 7, ki kaže odvisnost vrednosti

### Č.1940 - OC100



Slika 7

Vpliv preizkuševalne hitrosti na porušno delo (Č.1940 — OC-100), ki je izraženo v procentih glede na delo pri hitrosti 700 obr/min<sup>9</sup>

za zvojno žilavost od hitrosti preizkušanja in popuščajne temperature (za orodno jeklo OC-100).

Za odkrivanje vpliva kotne hitrosti so se držali teh pogojev:

- udarni zvojni preizkus: 700 obr/min (73 rd/s);
- preizkus z majhno hitrostjo: 100 obr/min;
- statični preizkus: čas trajanja 15 sekund do 10 minut; hitrost znaša 0,1 do 0,001 radiana na sekundo.

Energija vztrajnika je pri prvih dveh načinih 34,5 kpm. S temi poizkusi so dokazali, da je razlika v rezultatih zaradi različnih deformacijskih hitrosti zadosti majhna ter nam zaradi tega ni treba jemati statičnega in udarnega zvojnega preizkusa kot dveh različnih postopkov za določanje žilavosti.

Standardni stroj za preizkušanje udarne zvojne žilavosti je sestavljen iz teh delov: elektromotor, vztrajnik, tahometer, križna glava, prijemni del z vzvodom za osni premik probe. Vztrajnik se požeze z elektromotorjem na določeno hitrost in nato se z vzvodom potisne proba v smeri osi proti vztrajniku, ki s klini zgrabi križno glavo na preizkušancu, katerega zviže ob vzdolžni osi do porušitve.

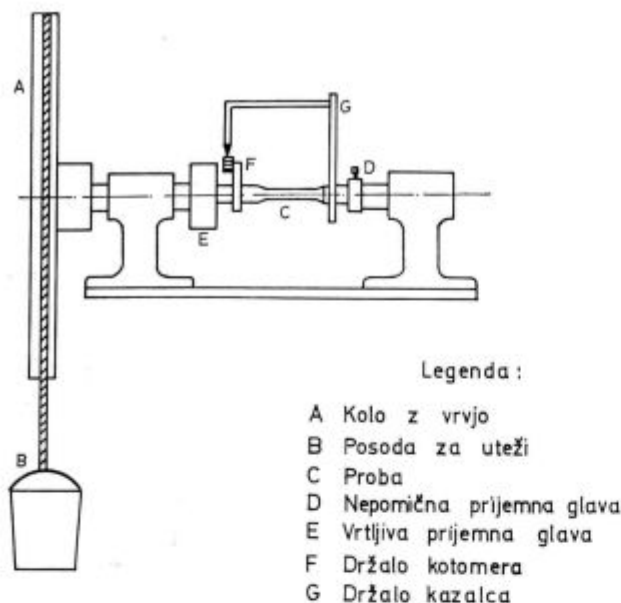
Za statični preizkus se namesto motorčka namesti kolo s premerom 1220 mm in potreben moment za zvoj probe se dobi z utežmi, ki se obešajo na vrv pripeto na obodu kolesa (slika 8). Produkt največjega vrtilnega momenta in zasuka predstavlja »koeficient žilavosti«.

Pri udarnem torzijskem preizkusu se dobi porabljen delo iz zmanjšanja števila obratov vztrajnika:

$$A = \frac{J \cdot \omega_1^2}{2} - \frac{J \cdot \omega_2^2}{2}$$

J ... vztrajnostni moment vztrajnika (kgm<sup>2</sup>)

$\omega$  ... kotna hitrost vztrajnika (rd/s).



Slika 8

Skica stroja za preizkušanje zvojne statične žilavosti\*

Na žilavost (porabljeno delo v kpm) ne vpliva hitrost vztrajnika pač pa dolžina in presek preizkušanca iz določenega jekla.

Pri statičnem preizkusu trosenje praktično ni odvisno od toplotne obdelave, pri zelo nizkih kalilnih temperaturah pa se vendar precej poveča.

Zelo ugodno je, če lahko tudi z udarnim zvojnim preizkusom dobimo krivuljo napetost — deformacija. To lahko dosežemo tako, da preizkušamo z zmanjšano hitrostjo in jo postopno povečujemo, dokler ne nastopi zlom. Pri različnih hitrostih (momentih) dobimo različno deformacijo; tako lahko vnesemo v diagram moment in deformacijo.

Krivulje v diagramih, ki kažejo odvisnost udarne zvojne žilavosti in popuščne temperature, imajo značilno obliko: žilavost ne raste stalno s popuščno temperaturo, temveč nastopa pri določeni popuščni temperaturi maksimum (pri nelegiranih in nizko legiranih jeklih je pri 150—200° C, pri brzo-reznih jeklih je pri 300 do 350° C).

Za določevanje popuščne temperature, pri kateri dosežemo največjo žilavost, nam lahko koristijo raziskave izgleda prelomov prob. Tako so prelomi prob iz jekla OC-100, popuščanega pod 150° C, vedno krhki in potekajo po ravninah, pravokotnih na smer glavnih normalnih napetosti, tj. pod kotom 45° glede na os probe. Pri 150 do 170° C se opazi prehod k strižnemu prelomu.

Poleg ostalega je prednost zvojnega preizkusa pred upogibnim enakomerna porazdelitev napetosti po dolžini probe.

Po ameriških podatkih se glede trajnosti v uporabi najboljše obnesejo orodja, ki so toplotno obdelana na največjo zvojno žilavost.

Natančnost statičnega zvojnega preizkusa so določili na orodnem jeklu »merilo« (Č.3840). Kot

merilo trosenja se vzame standardni odklon in ta nam z določenim številom paralelnih prob da natančnost srednje vrednosti za dano statistično varnost.

Trosenje je večje pri mehanskem merilnem sistemu (kot pri električnem) in pri vrednostih, ki označujejo plastičnost. Standardni odklon se ne spreminja veliko z različno toplotno obdelavo, zato se lahko tvori srednja vrednost. Da se še lahko določi razlika v toplotni obdelavi, mora znati natančnost srednje vrednosti pri meji plastičnosti  $\pm 10$  do 15 kp/mm<sup>2</sup> in pri vrednostih za plastično komponento porušnega dela  $\pm 40$ —50 kpcm. Za statistično varnost dosežemo to natančnost z 8 paralelnimi probami in za varnost 99 % dosežemo to natančnost z 12 paralelnimi probami. Merilo žilavosti sta predvsem meja plastičnosti in plastičnostna komponenta porušnega dela.

Iz dosedanjih preiskav je razvidno, da za enako statistično varnost potrebujemo pri raznih metodah preizkušanja žilavosti različna števila paralelnih preizkušancev. Za orodna jekla velja pri statistični varnosti 95—99 %, da potrebujemo pri statičnem upogibnem preizkusu 10—20, pri udarnem upogibnem 30—40 in pri zvojnem statičnem preizkusu 8 do 12 paralelnih (tj. enako toplotno obdelanih) prob.

## II. METODE, PRIMERNE ZA PREIZKUŠANJE ŽILAVOSTI POSAMEZNIH SKUPIN ORODNIH JEKEL

Žilavost konstrukcijskih jekel se lahko zadovoljivo določa na charpy kladivu, z izod kladivom ali z drugo podobno napravo, ki nam daje možnost določanja udarne upogibne žilavosti. Ne more pa se uspešno kontrolirati žilavosti orodnih jekel s to standardno metodo, razen če si privoščimo (zadosti) veliko število paralelnih prob (enako toplotno obdelane probe iste kvalitete in šarže). Težko se odkrivajo razlike v odvisnosti od kvalitete in toplotne obdelave, ker so vrednosti za porušno delo zelo majhne.

Zato so razvili nove metode določanja žilavosti: statični upogibni preizkus, zvojni (statični, udarni preizkus), preizkus za žilavost ostrine, preizkus na večkratno udarjanje.

Pred izbiro metode za določanje žilavosti smo postavljeni vselej, če imamo delo z orodnimi jekli. Pri tem nam lahko koristijo sledeča izvajanja:

z zvojnimi preizkusom so zvečali deformacijski volumen in razmerje strižnih napetosti proti normalnim. S tem so dosegli predvsem naslednje:

— zaradi večjega deformacijskega volumna je potrebno večje deformacijsko delo in so razlike med kvalitetami bolj očitne,

— zaradi večjega razmerja strižnih napetosti glede na normalne nastopajo večje deformacije, s čimer se tudi poveča razločevalna sposobnost.

Statistično so tudi dokazali, da se za enako zanesljivost srednje vrednosti žilavosti rabi najmanj paralelnih prob pri zvojnem načinu preizkušanja.

Zal pa s tem ne moremo zavreči ostalih metod preizkušanja orodnih jekel na žilavost. Navadno se predpostavlja, da dobimo z nekim žilavostnim preizkusom relativne podatke, ki kažejo enako odvisnost od toplotne obdelave in kvalitete kot rezultati vsakega drugega žilavostnega preizkusa z drugačnim načinom obremenjevanja (z drugačnim razmerjem strižnih napetosti v probi glede na normalne, z drugačno hitrostjo preizkušanja in deformacije). Ta predpostavka pa ne drži vedno, kar so ugotovili z različnimi metodami določanja žilavosti brzoreznih jekel.

Metoda preizkušanja žilavosti naj bi po možnosti ponazarjala obremenitve, ki nastopajo pri orodju v uporabi. Zaželena bi bila naprava, s katero bi lahko preizkušali izgotovljena orodja (svedre, nože).

Žilavost se najbolj splošno označuje kot varnost proti zlomu. Pogosto se vzame tudi pri statičnem upogibnem in statičnem zvojnem preizkusu za merilo žilavosti samo porabljeno porušeno delo, ki ga geometrijsko predstavlja površina pod krivuljo napetost — deformacija. To pa ni dobro, ker nam veliko povesta o žilavem obnašanju jekla tudi oblika krivulje in meja plastičnosti. Ker v uporabi ne želimo plastične deformacije in spremembe oblike orodja, naj bo čim višja meja plastičnosti in s tem čim večje delo za elastično deformacijo. Material naj bo čim bolj trden in čim bolj duktilen — kombinacija teh dveh lastnosti predstavlja žilavost.

Iz tega vidimo, da si želimo metodo preizkušanja, ki nam daje poleg porušnega dela še druge značilke žilavostnega obnašanja materiala. Če to izvajanje navežemo na prej omenjeno željo, da bi s preizkusom ustvarili v probi podobno napetostno stanje, kot nastopa v orodju iz določenega jekla, bomo razumeli, zakaj so vpeljali statični upogibni preizkus za določanje žilavosti.

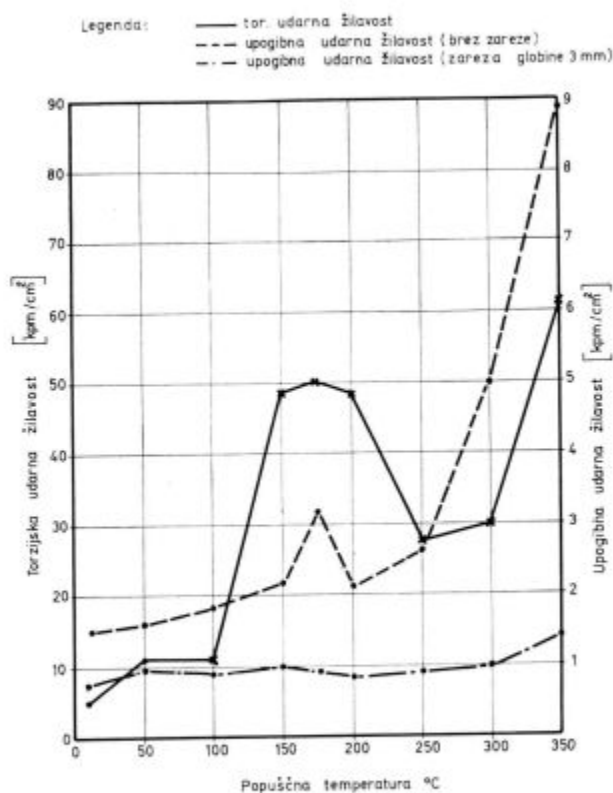
Do sedaj so uporabljali na različnih orodnih jeklih različne preizkuse: nekatera jekla so preizkušali na več načinov, druga na manj; delno je to odvisno tudi od načina obremenjevanja orodij, ki se izdelujejo iz določenega jekla.

### Pregled uporabljenih metod za določevanje žilavosti pri posameznih orodnih jeklih

#### Orodno jeklo OC-100 (Č. 1940)

To jeklo so preizkušali največ na zvojni udarni in upogibni udarni način. Z zvojnimi udarnimi preizkušanjem so<sup>10</sup> ugotovili, da je optimalna žilavost pri popuščnih temperaturah 150—200° C. Podoben rezultat so dobili z udarnim upogibnim preizkušanjem, če so imeli probe brez zarez; z zarezanimi probami se ne dobijo uporabne vrednosti. Zanimivo je, da je porast žilavosti, dobljene z udarnim upogibnim preizkusom z nezarezano probo že pri nižjih popuščnih temperaturah kot porast žilavosti, dobljene z zvojnimi udarnimi preizkusi (slika 9).

Glede zvojne udarne žilavosti v odvisnosti od kalilne temperature<sup>10</sup> so ugotovili, da je najboljša



Slika 9

Zvojna in upogibna udarna žilavost pri raznih temperaturah popuščanja za jeklo Č. 1940 — OC-100<sup>10</sup>

čim nižja možna kalilna temperatura in kratek vtopni čas (ogrevalni čas).

S statičnim upogibnim preizkusom<sup>11</sup> so dobili podobne rezultate kot z udarnim upogibnim. Krivulja upogiba se po obliki ujema s krivuljo upogibnega dela.

Statični zvojni preizkus<sup>12</sup> je dal rezultate, ki se ujemajo z onimi, dobljenimi pri udarnem zvojnem preizkusu.

#### Orodno jeklo OC-80 (Č. 1840)

Znani so samo podatki<sup>10</sup> udarne upogibne žilavosti. Vrednosti za žilavost so majhne, vendar se more ločiti maksimum pri 200° C popuščne temperature.

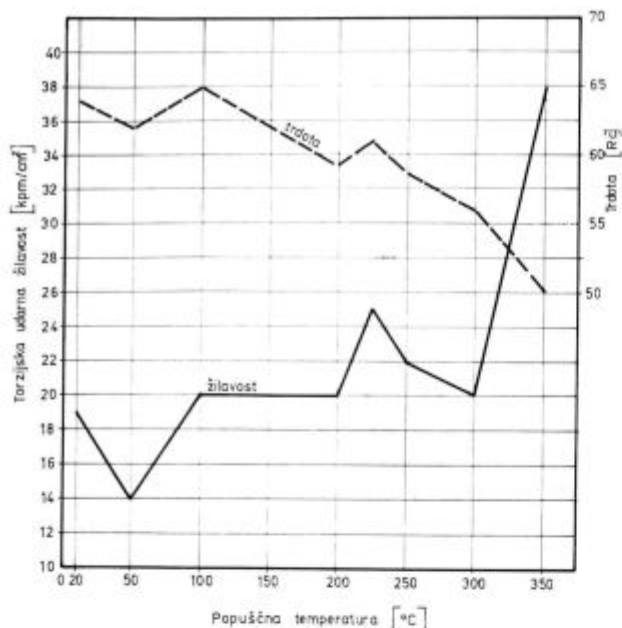
Nelegirana jekla so preizkušali največ z zvojnimi in upogibnim načinom (statično, udarno).

#### OW-1 (Č. 6840)

Znani so iz literature<sup>10</sup> podatki zvojnega udarnega preizkusa. Maksimum žilavosti je pri popuščni temperaturi 225° C, vendar je porast žilavosti tu majhen. (slika 10)

#### OW-3 (Č. 6441)

To jeklo so preizkušali<sup>7</sup> na statični upogibni in raztržni način. Raztezni preizkus se ni obnesel za določanje žilavosti, upogibni preizkus pa je pokazal maksimum pri trdoti 62 HRC (kaljeno z 870° C).



Slika 10

Zvojni udarna žilavost v odvisnosti od popuščenja za jeklo tipa C. 6840 — OW-1. Kaljeno s 780° C v vodi<sup>10</sup>

Upogib narašča nad popuščno temperaturo 250° C in pri tej temperaturi se doseže tudi maksimum meje plastičnosti.

#### OSIKRO-4 (Č. 6444)

Tudi to jeklo so preizkušali<sup>7</sup> na statični upogibni in raztržni način (poleg udarnega upogibnega). Rezultati obeh načinov preizkušanj se ujemajo. Porabljena energija za zlom je zelo nizka pri trdoti okoli 57 HRC (minimum za upogibno žilavost).

#### OCR-4 ex. spec. (Č. 4146)

V literaturi<sup>10</sup> so podatki zvojnega udarnega preizkusa. Maksimum žilavosti se pojavlja pri popuščni temperaturi okoli 175° C (po kaljenju z 840° C v olju (slika 11)).

#### OCR (Č. 4140)

Znani so diagrami<sup>13</sup>, izrisani na osnovi rezultatov zvojnega statičnega in udarnega preizkusa. Oba načina dajeta soglasne vrednosti: maksimum žilavosti je za kalilno temperaturo 840° C pri popuščni temperaturi 175° C.

#### Merilo — ekstra (Č. 6440)

To jeklo se je preizkušalo največ<sup>16</sup> na udarno upogibno žilavost in zvojni statično žilavost. Jekla skupine merilo so preizkušali tudi na statičen vzvojni in upogibni način. Rezultati zvojnega in upogibnega preizkusa se ne ujemajo.

#### OCR-12 (Č. 4150)

Zvojni (udarni) in statični upogibni preizkus sta se največ uporabljala<sup>10, 15</sup> pri raziskavah o žilavem obnašanju tega orodnega jekla. Za OCR-12

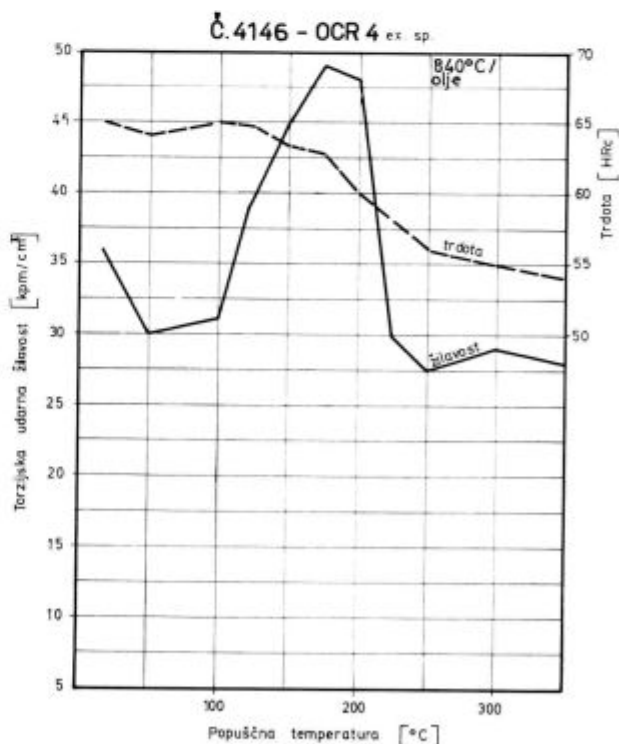
special in OCR-12 ekstra so podatki upogibnih preizkusov. Porušno delo pri zvojnem in upogibnem preizkusu se v odvisnosti od popuščne temperature ne spreminja podobno. Z zvojnim preizkusom so dobili maksimum pri 150—200° C, z upogibnim preizkusom pa se maksimum pojavi pri popuščni temperaturi 400° C (slika 12). Dobi se pa s statičnim upogibnim preizkusom več podatkov kot z udarnim zvojnim.

#### Utop-2 (Č. 6451)

Za to orodno jeklo so znani iz literature<sup>17</sup> podatki udarnega žilavostnega preizkusa, ki daje zadovoljive vrednosti, po katerih se lahko orientiramo pri toplotni obdelavi. Minimum udarne upogibne žilavosti je ravno v območju popuščnih temperatur, ki se največ uporabljajo pri jeklih srednje trdnosti (550—650° C). Pri krajših časih popuščenja so najmanjše žilavosti pri višji temperaturi. Razločiti se da tudi vpliv temperature preizkušanja na žilavost. Ugotovili so lahko, da je vpliv kalilne temperature na žilavost močnejši kot vpliv popuščne temperature. Zaradi enostavnega preizkušanja pri višjih temperaturah je metoda udarnega upogibnega preizkusa še posebno primerna za utopna jekla.

#### BRW (Č. 6880)

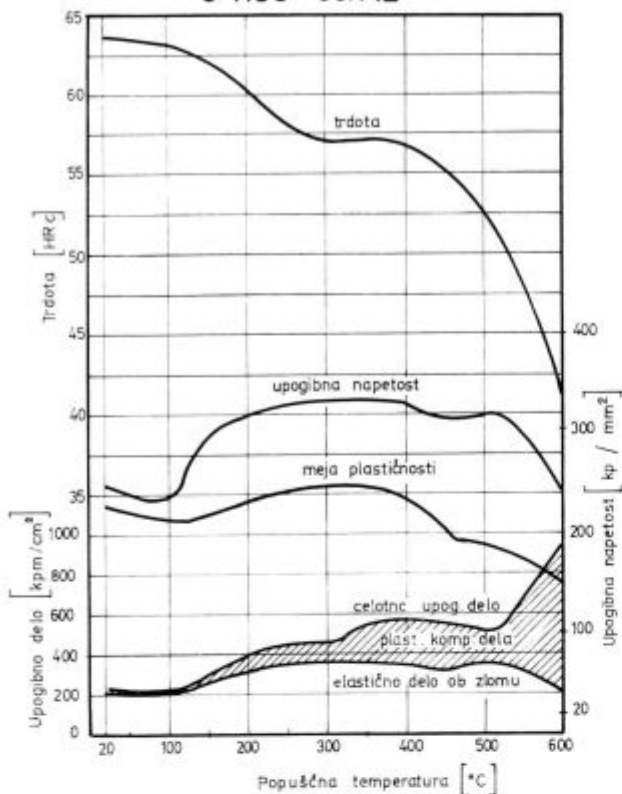
Zvojni (statična, udarna) metoda, statična upogibna metoda in metoda za določevanje žilavosti ostrine (knife-edge) so se uporabljale<sup>3, 4, 10, 13</sup> pri tem jeklu. Maksimumi za statično zvojni žilavost



Slika 11

Zvojni udarna žilavost in trdota v odvisnosti od popuščne temperature<sup>10</sup> za jeklo Č. 4146 — OCR 4 ex. sp.

### Č. 4150 - OCR 12



Slika 12

Statični upogibni preizkus za jeklo Č. 4150 — OCR 12, kaljeno z 950° C in popuščano 2 uri<sup>15</sup>

in maksimum trdote sta pri isti popuščni temperaturi, prav tako sovpadata maksimum zvojne udarne žilavosti in maksimum plastične deformacije pri zvoju. Največje žilavosti se pojavljajo za razne metode preizkušanja pri različnih pogojih toplotne obdelave (popuščnih temperaturah). (Slika 13)

### BRW-2 (Č. 6882)

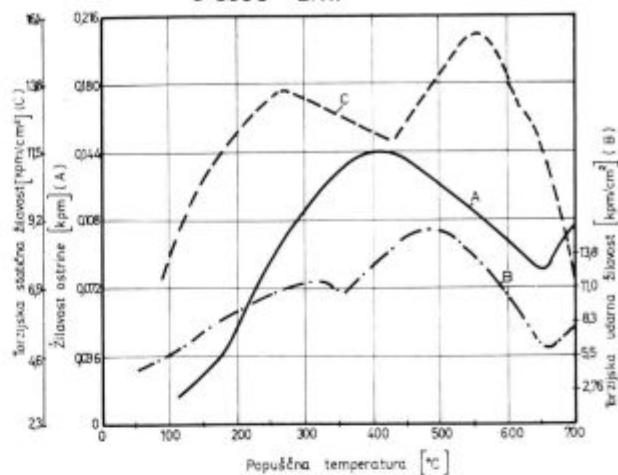
Iz literature znani diagrami<sup>13, 14</sup> se ne ujemajo glede popuščne temperature, pri kateri se pojavlja maksimum zvojne žilavosti. Razlika je posledica<sup>14</sup> različnih deformacijskih volumnov. Tudi to jeklo (kot sploh volframova brzorezna jekla) se preizkuša na vse občutljivejše načine določanja žilavosti: zvojni (statični, udarni), statični upogibni ter način za določanje žilavosti ostrine.

### BRC (Č. 6980)

Zvojni in upogibni statični način preizkušanja žilavosti sta dala pri tem jeklu naslednje rezultate:

Z udarnim zvojnim preizkusom so odkrili<sup>10</sup> maksimum žilavosti pri popuščni temperaturi 500° C. S statičnim upogibnim preizkusom so dobili<sup>15</sup> maksimum žilavosti pri popuščni temperaturi 530° C. Odnos obremenitev — upogib je do popuščne temperature 520° C linearne značaja, pri višjih popuščnih temperaturah pa se že začne plastičen upogib. Elastičen upogib narašča s popuščno temperaturo hitreje pri probah, ki so manjkrat

### Č. 6880 - BRW



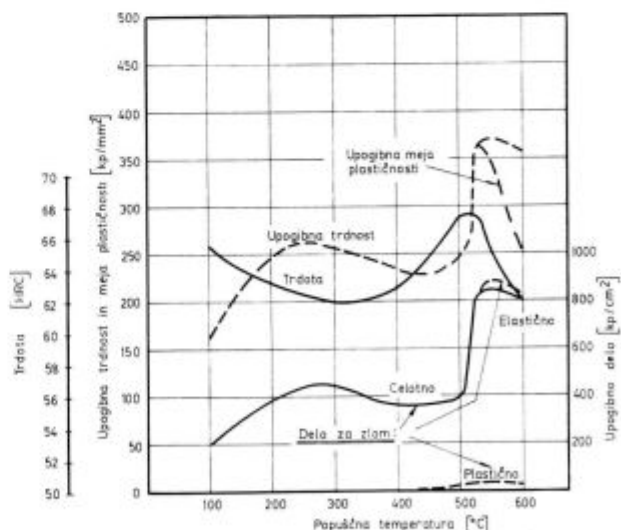
Slika 13

Udarne in statična zvojna žilavost ter žilavost ostrine v odvisnosti od popuščne temperature<sup>4</sup> za jeklo Č. 6880 — BRW

popuščane. Tako se vidi prednost statičnega upogibnega preizkusa, ki nam daje poleg porušnega dela (udarni upogibni preizkus) še upogib, upogibno trdnost, elastično in plastično komponento dela za zlom (slika 14).

### BRM-1 (Č. 7880)

S statičnim upogibnim preizkusom so ugotovili<sup>11, 15</sup> velik porast elastične komponente porušnega dela pri popuščni temperaturi 500° C in pri vseh kalilnih temperaturah. Ta skok izgine le pri višjih kalilnih temperaturah in daljših vtopnih časih. Določiti se da tudi plastična komponenta porušnega dela pri statičnem upogibu: plastična deformacija nastopa pri probah, kaljenih z nižje temperature, že pri nižjih popuščnih temperaturah.



Slika 14

Statični upogibni preizkus jekla Č. 6980 — BRC (Probe 6 × 6 mm<sup>2</sup>, kaljene s 1260° C vtopni čas 120 s. 3 × 2<sup>h</sup> popuščano)<sup>15</sup>



### BRM-2 (Č. 7680)

Znani so rezultati preizkušanja<sup>5, 11</sup> na udarni in statični upogibni način. Pri tem so vzeli iz podatkov statičnega preizkusa kot značilko za žilavost upogib. Upogibna krivulja ima maksimum pri popuščni temperaturi 300° C in pri temperaturah nad 320° C spet narašča žilavost (upogib). Izkušnje potrjujejo te rezultate. Prav tako so ugotovili padec žilavosti (upogiba) pri kalilnih temperaturah nad 1240° C. Po tej metodi (upogibu) lahko preizkušamo tudi izgotovljena orodja (svedre). To je zelo primerno, ker lahko določimo toplotno obdelavo najugodnejše kombinacije trdote in žilavosti na orodjih.

Orodno jeklo BRM-2 so z uspehom preizkušali na statičen upogibni način.

### Literatura

1. Steven G.  
Impact Test for Evaluating Tool Steels  
Metal Progress, 1959, 5
2. Bungardt K., O. Mülders, W. Spyra  
Statistische Auswertung von Zähigkeitsuntersuchungen an ungekerbten Schlagbiegeproben aus Stählen hoher Härte, Stahl und Eisen 77, št. 26
3. Bancroft W. E., W. W. Wight  
The Practical Heat Treatment of High Steel Cutting Tools  
Metal Progress 1948, št. 4, str. 545—555
4. Carr H.  
High Speed Steel, Some Development in Heat Treatment  
Iron and Steel 1950, str. 383—388
5. Hoyle G., E. Ineson  
A Modified Bend Test for Hardened Tool Steels  
Journal of the Iron and Steel Institute, jan. 1959
6. Wilmes S.  
Zähigkeitsuntersuchungen an Schnellarbeitsstählen  
Stahl und Eisen 81, št. 10
7. Hamaker J. C., V. C. Strang, G. A. Roberts  
Bend: Tensile Relationships for Tool Steel at High Strength Levels  
Trans. ASM 49 (1957), str. 550—575
8. B I S R A  
A Bend Test for Hardened Tool Steels  
Summary 124, Prospekt
9. Hoyle G.  
An Improved Model of the Bend Test Apparatus for Testing Hardened Tool Steel  
The British Iron and Steel Research Association, Project M G/L/105
10. Scherer R., H. Kiessler  
Verdrehschlagzähigkeit von Werkzeugstahl  
Stahl und Eisen 63, str. 353—360
11. Weckener H. D.  
Beitrag zur Untersuchung der Zähigkeit bei Schnellarbeitsstählen  
Das Industrieblatt; Stuttgart, Juli 1958
12. Greene O. V., R. D. Stout  
A Study of the Influence of Speed on the Torsion Impact Test  
ASTM, June 26—30, 1939, zv. 39
13. Emmons J. V.  
Some Physical Properties of Hardened Tool Steel  
ASTM, June 22—26, 1931, zv. 31
14. Faller F.  
Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Wärmebehandlung und der Legierung auf die Zähigkeit von Schnellstahl.  
Werkstatt und Betrieb, Oktober 1954
15. Wilmes S., H. R. Pantke  
Zähigkeit von Werkzeugstählen mit hohem Cromgehalt.  
Das Industrieblatt (1962) št. 7
16. Bungardt K., O. Mülders, W. Schmidt  
Die Eignung des statischen Verdrehversuches zur Ermittlung der Zähigkeit sehr harter Stähle.  
Stahl und Eisen 81, št. 10
17. Bungardt K., G. Hoch, O. Mülders  
Einfluss der Wärmebehandlung auf die Zugfestigkeit und Kerbschlagzähigkeit von Warmarbeitsstählen.  
Stahl und Eisen 75, št. 16

### ZUSAMMENFASSUNG

Aufgezeigt sind die Erfahrungen bei Verwendung verschiedener Methoden der Zähigkeitsuntersuchung und die Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse von der Kerbart auf der Probe, die bei der Bestimmung der Schlagbiegezähigkeit verwendet wird. Die Untersuchungsgenauigkeit auf dem Charpy-Hammer wurde statistisch festgestellt. Beschrieben ist die Untersuchungsmethode mit mehrmaligen Schlägen (chock resistance) und die Methode der Bestimmung der Schneidzähigkeit (knife-edge Methode).

Es werden die guten und schlechten Seiten des statischen und schlagartigen Verdrehversuches miteinander verglichen. Es ist soeben auch ein Vergleich zwischen dem statischen Biegeversuch und dem Zugversuch gegeben. Im kurzen werden auch die Versuchs durchführung und die Prüfgeräte für die Bestimmung der Torsionszähigkeit beschrieben.

Im zweiten Teil ist ein Überblick über die verwendeten Verfahren der Zähigkeitsbestimmung bei den einzelnen Schnelldrehstahlarten gegeben.

### SUMMARY

Experiences with different methods of impact strength testing are described as well as dependence of results of notch applied at bending impact strength determination.

Notched bar impact test and shock resistant test are described.

Advantages and disadvantages of static and impact

torsion test are compared. Apparatus and methods for impact strength determination are described briefly.

Statistical data are talking about accuracy of various methods. Special application of these methods is described for comparison of bending test results and tensile test results for tool steels.

## Domače eksotermne mase v jeklo livarni Metode kontrole in izboljšanja izplena

Izboljšanje izplena v jeklo livarni je danes brez dvoma najbolj pereče vprašanje na področju tehnologije napajanja. Eden izmed načinov za izboljšanje je uporaba eksotermnih oblog za napajalnike.

V primerjavi s klasičnim napajalnikom lahko v eksotermnem napajalniku držimo talino dalj časa tekočo; stopnja izkoristka je zato mnogo večja, teža napajalnikov pa manjša.

Pri delu z eksotermnimi napajalniki je važno, da je njihova kalorična vrednost, čas vžiga, temperatura in hitrost izgorevanja prilagojena različnim hitrostim ohlajevanja napajalnikov.

Izboljšanje izplena v jeklolivarni je danes brez dvoma najbolj pereče vprašanje na področju tehnologije napajanja in vlivanja. Ulitek iz jeklene litine potrebuje zaradi sorazmerno visokega volumenskega skrčka jekla močno dimenzionirane in težke napajalnike, kar ima za posledico nizke izplene in s tem tudi visoke proizvodne stroške. Stroški vložka, t. j. tekočega jekla, predstavljajo tako v kalkulaciji lastne cene ulitka kar 25—40 % njene celotne vrednosti. To pa je glede na ostale vrste stroškov daleč najvišja postavka.

Za izboljšanje izplena lahko uporabimo več načinov, kot je npr. točnejše dimenzioniranje napajalnikov (optimalne dimenzije), uporaba hladilnikov, čim lažji vlivni sistem, zmanjševanje izmečka, kala itd. Vendar pa vsi ti načini, kljub temu da dajejo pozitivne rezultate, niso dovolj učinkoviti, da bi lahko z njimi dosegli zelene rezultate. Prvi večji napredek na tem področju je bil dosežen šele z uporabo napajalnikov, ki so bili obloženi z različnimi eksotermnimi ali termoizolacijskimi oblogami.

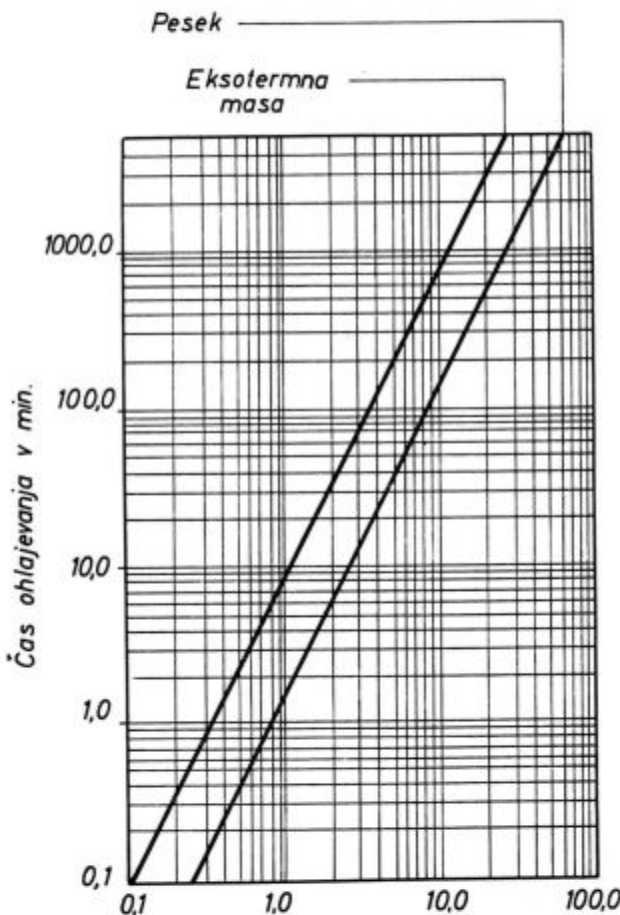
Razlika v delovanju med navadnim (klasičnim) napajalnikom in eksotermnim napajalnikom je naslednja:

Klasični napajalnik za jekleno litino deluje pravilno takrat, kadar se počasneje hladi, kot pa tisti del ulitka, ki ga napaja. Čim večja je razlika med hitrostjo ohlajevanja ulitka in nalitka oz. napajalnika, tem bolj lahko izkoristimo napajalnik in toliko višji je izplen.

Če obložimo klasični napajalnik z eksotermno maso, bo ta s svojim eksotermnim delovanjem

ohlajevanje napajalnika močno zavrla in s tem obdržala napajalnik še dalj časa v tekočem stanju. To pa nam omogoča tudi mnogo večji izkoristek nalitka, kar pomeni, da je eksotermni napajalnik v primerjavi s klasičnim napajalnikom lahko znatno manjši.

Če hočemo ugotoviti dejanske razlike med delovanjem klasičnega in eksotermnega napajalnika, moramo ugotoviti razliko v hitrosti ohlajevanja enega in drugega nalitka.



$$M_{ul} = \frac{V_{ul}}{P_{ul}} \cdot / \text{cm} /$$

Slika 1

Čas ohlajevanja jeklenih ulitkov v odvisnosti od modula ohlajevanja in obložene mase (po Wlodawerju)

Na sliki 1 je prikazana razlika v času ohlajevanja poljubnega jeklenega ulitka glede na to, ali se ta ohlaja obložen z eksotermno maso ali pa s peskom, ter v odvisnosti od njegovega modula ohlajevanja, ki je razmerje med volumnom in površino ulitka.

$$M_{ul} = \frac{V_{ul}}{P_{ul}} \quad (\text{cm}) \quad (1)$$

Kjer je:

$M_{ul}$  = modul ohlajevanja ulitka

$V_{ul}$  = volumen ulitka

$P_{ul}$  = površina ulitka

Modus ohlajevanja lahko uporabimo tudi za dokončno ugotovitev razlike med obema napajalnikoma, če oba napajata ulitek iste oblike dimenzij in teže oz. ulitek z istim modusom ohlajevanja.

Če želimo napajati ulitek s klasičnim napajalnikom, mora biti razmerje modusov ohlajevanja naslednje:

$$M_n = 1,2 \cdot M_{ul} \quad (2)$$

Kjer je:

$M_n$  = modus ohlajevanja klasičnega napajalnika.

Določenemu modusu napajalnika ustrezata seveda določen volumen in površina, kajti od velikosti in medsebojnega razmerja teh dveh vrednosti je odvisna hitrost ohlajevanja nalitka ali: čim večja je površina pri konstantnem volumnu, tem hitrejšje je ohlajevanje.

Če sedaj površino nalitka obložimo z eksotermno maso, bo ohlajevanje približno dvakrat počasnejše, nalitek pa bo dalj časa tekoč. S tem pravzaprav dosežemo povečanje modusa ohlajevanja. Modusovo razmerje med ulitkom in eksotermnim napajalnikom pa dobimo na naslednji način:

$$t_{ex} = 2 \cdot t_p \quad (3)$$

$$M_{ex} = M_p \cdot \sqrt{2} \quad (4)$$

$$M_{ex} = M_p \cdot 1,42 \quad (5)$$

Kjer je:

$t_{ex}$  = čas ohlajevanja pri eksotermni oblogi

$t_p$  = čas ohlajevanja pri peščeni oblogi

$M_{ex}$  = modus ohlajevanja pri eksotermni oblogi

$M_p$  = modus ohlajevanja pri peščeni oblogi.

Na osnovi enačbe 2 in 5 lahko na to postavimo tudi modusovo razmerje med ulitkom in eksotermnim napajalnikom.

$$M_{en} = \frac{1,2 \cdot M_{ul}}{1,42} \quad (6)$$

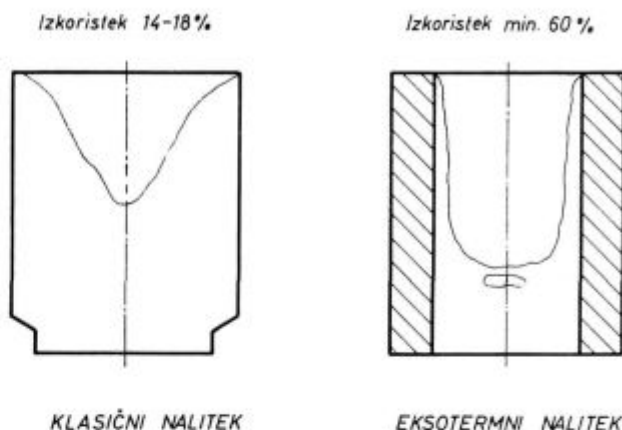
Če je  $M_{ul} = 1$ :

$$M_{en} = 0,845 \cdot M_{ul} \quad (7)$$

Kjer je:

$M_{en}$  = modul eksotermnega napajalnika.

Na ta način dosežemo s pomočjo eksotermnega učinka napajalnikove obloge nekakšno navidezno zmanjšanje površine ulitka. Torej bo hitrost ohlajevanja klasičnega napajalnika in mnogo manjšega eksotermnega napajalnika enaka. Istočasno pa se izkoristek nalitka znatno poveča.



Slika 2  
Izkoristki napajalnikov

Izkoristki znašajo na podlagi dosedanjih empiričnih vrednosti pri klasičnem napajalniku 14 do 18 % in pri eksotermnem napajalniku minimalno 60 % celotnega volumna napajalnika. To je velika razlika v korist eksotermnega napajalnika.

V naslednjem sta podana dva primera iz vsakdanje prakse (glej sliko 3 in 4).

Razlika med klasičnim in eksotermnim nalitkom je zelo očitna in če gornje rezimiramo v obliki tabelarnega pregleda, dobimo naslednje:

	čista teža	surova teža z klas. nap.	surova teža z eksot. nap.	Prihranek tek. jekla na kos.	Prihranek tek. jekla na 1 kg čist. teže
ležaj	184 kg	360 kg	252 kg	108 kg	0,58 kg
zobnik	163 kg	303 kg	226 kg	77 kg	0,47 kg

in primerjava izplenov:

	Izplen pri klas. tehn.	Izplen pri easot. tehn.	Indeks
ležaj	51 %	73 %	141
zobnik	54 %	72 %	133

V praksi imamo poleg ulitkov, ki sta prikazana na gornjih slikah, opravka tudi z drugačnimi ulitki, kot npr. z raznimi ploščami, tankosten-skimi ohišji, masivnimi šabotami itd., zato so tudi možnosti uspešne uporabe eksotermnih mas različne. Učinek eksotermne mase je tem večji, čim bolj masivni in težji so ulitki; pri ulitkih, kot so npr. nosilne konzole za vzmeti in razna druga liti-

#### Klasični nalitek



Teža vlivnega in napajalnega sistema 176 kg

#### Eksotermni nalitek

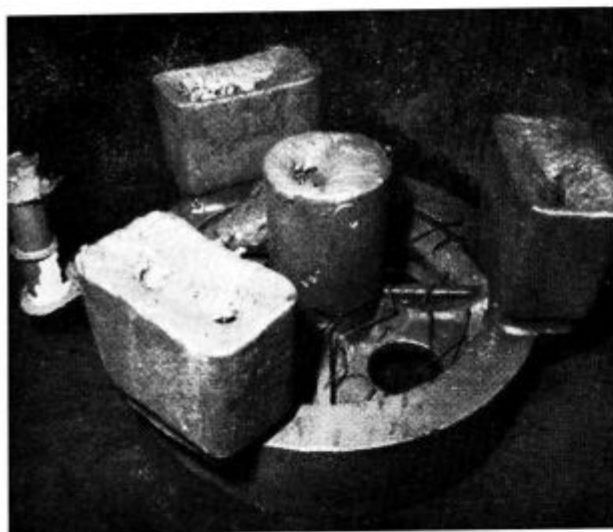


Teža vlivnega in napajalnega sistema 68 kg

Slika 3

Primerjava klasičnih in eksotermnih nalitkov

#### Klasični nalitek



Teža vlivnega in napajalnega sistema 140 kg

#### Eksotermni nalitek



Teža vlivnega in napajalnega sistema 63 kg

Slika 4

Primerjava klasičnih in eksotermnih nalitkov

na za avtomobilsko industrijo, kjer prevladujejo debeline sten 5 do 8 mm in kjer teže redko preokračijo 6 kg po kosu, pa eksotermnih mas sploh ne moremo več uporabljati.

Eksotermna masa mora ustrezati celi vrsti raznih zahtev, ki jih postavlja redna proizvodnja litine.

Kot prvo je treba omeniti sposobnost eksotermne mase, da sprosti čim več toplote, in to vsaj 2000 cal/kg. Temperatura zgorevanja naj bi bila po navedbah tujih avtorjev prav tako okoli 2000° C.

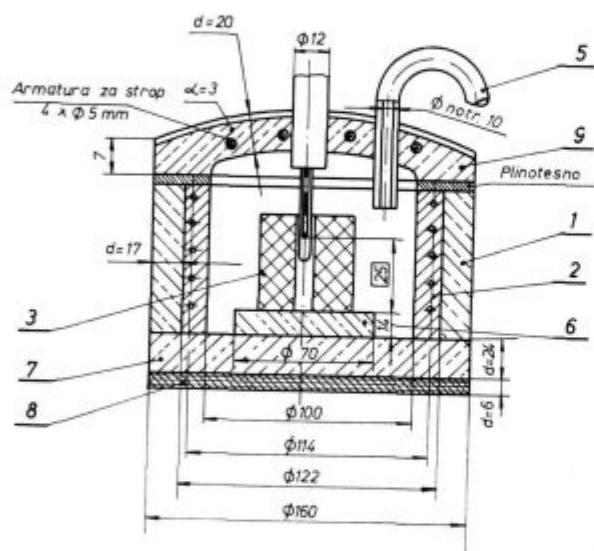
Zelo važna je tudi kemična sestava eksotermne mase. V masi ne smejo biti prisotne snovi, ki povzročajo premočno razvijanje raznih plinov, prav tako ne smejo nastopati reakcije med talino in površino eksotermne obloge, zgorevanje pa mora biti takšno, da obloga tudi po končanem delovanju ohrani svojo obliko t. j. ne sme razpadati.

Kot drugi pogoj za dobro eksotermno maso je treba omeniti še nekatere tehnološke zahteve, kot so: zadostna upogibna trdnost, prepustnost, obli-

kovalnost itd., ter še ena zelo važna lastnost: pravilno tempirani vžig in čas gorenja pri dovolj visoki temperaturi. Slednje je zelo važno zaradi različnih velikosti napajalnikov, ki imajo različne čase ohlajevanja, temu pa je treba prilagoditi vžig in čas gorenja eksotermne obloge.

V praksi se je pokazalo, da nam čas gorenja in temperatura vžiga povesta že zelo veliko o kvaliteti eksotermne mase, zato smo razvili metodo za kontrolo eksotermnih mas, ki nam omogoča, da hitro, enostavno in dokaj zanesljivo ugotovimo kvaliteto eksotermne mase.

Bistvo metode za kontrolo eksotermnih mas pa je sledeče: najprej se izdelata iz eksotermne mase normni skusek  $\varnothing 50$  h = 50 na nabijalnem aparatu »GF«, prav tako kot za preizkušanje peskov in peskovnih mešanic. Skusek se nabije s 5-kratnim udarcem, ter se nato v pečici suši ca 1 uro pri 200° C. V tako izdelan skusek se nato izdelata še izvrtina  $\varnothing 10$  mm. Sam skusek se postavi v pečico (glej sliko 5). To je tesno zaprta pečica s šamotno



1 Stranska šamotna obloga -- b. = 20 mm

2 Grelna tuljava

3 Skusek

4 Termopar Pt - PtRh

5 Plinska cev

6 Podstavek

7 Dno

8 Azbestno dno d = 6 mm

9 Pokrov d = 20 mm

Šamotna masa SK ročno phano - vlaga 2%, sušiti 4-6 ur nato žariti pri 800° 12 ur

Azbest

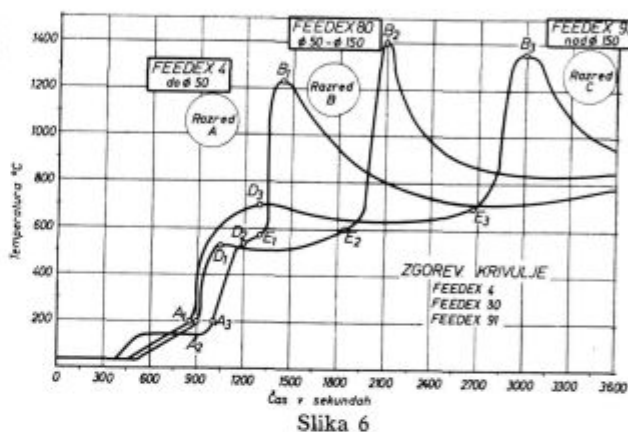
Slika 5

Šema pečice za kontrolo eksotermnih mas

oblogo in električno grelno spiralo. V pokrovu pečice je montirana cev s termoparom, ki ga porinemo v izvrtino skuska. V pokrovu pečice imamo še cev za odvod plinov.

Ce pečico plinotesno zapremo in nato vključimo tok, ki pa mora imeti vedno konstantno jakost in napetost, se prične pečica polagoma segrevati. Ko doseže določeno temperaturo, se eksotermna masa vžge in prične greti. Pri tem pa oddaja toploto in razvija pline. Termopar s pomočjo instrumenta registrira vsako spremembo temperature, pline pa vodimo skozi plinski merilec in na ta način registriramo tudi količino nastalega plina. Če pri vsem tem dogajanju merimo še čas od vklopa pečice do konca zgorevanja in rezultate grafično prikažemo v koordinatnem sistemu, kjer temperaturo nanašamo na ordinato, čas pa na absciso, dobimo krivuljo, iz katere lahko razberemo karakteristike eksotermne mase.

Za prvi poizkus so bile uporabljene eksotermne mase feedex. Na sliki 6 so prikazane krivulje, dobljene pri treh različnih »feedexih«.



Slika 6

Vse tri krivulje se med seboj razlikujejo, imajo pa iste elemente. Ti so na sliki prikazani kot točke A, B, D in E. Vsaka od teh točk pa pomeni spremembo v procesu zgorevanja skuska.

- A — pri tej točki se eksotermna masa vžge in gori zelo intenzivno.
- D — intenzivnost gorenja se zmanjša na minimum in temperatura stagnira.
- E — v tej točki zabeležimo zopet močan vzpon temperature vse do točke B.
- B — pri tej točki doseže temperatura svoj maksimum, gorenje mase pa ponehava, temu sledi nato hiter padec temperature.

Karakteristična razlika med tremi »feedexi« pa je v različnem časovnem intervalu med točkama D in E. Tako vidimo, da je časovni interval — za feedex 4, ki se uporablja za nalitke do  $\varnothing 50$  — majhen, — za feedex 80, (ta se uporablja za nalitke nad  $\varnothing 50$  in  $\varnothing 150$ ) — srednji, — za feedex 91, ki se uporablja za nalitke nad  $\varnothing 150$ , pa velik.

Iz tega sledi, da mora imeti vsaka eksotermna masa sledeče tehnološke karakteristike.

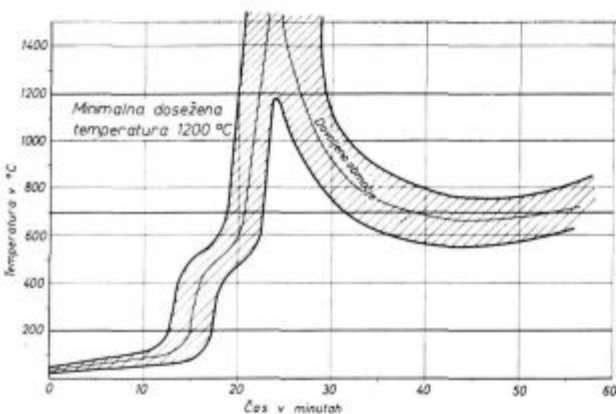
1. točke A, D, E in B morajo biti na pravilni temperaturi,

2. časovni interval D E mora biti prilagojen enemu od treh uporabnostnih razredov, ki so označeni z »A«, »B« in »C«.

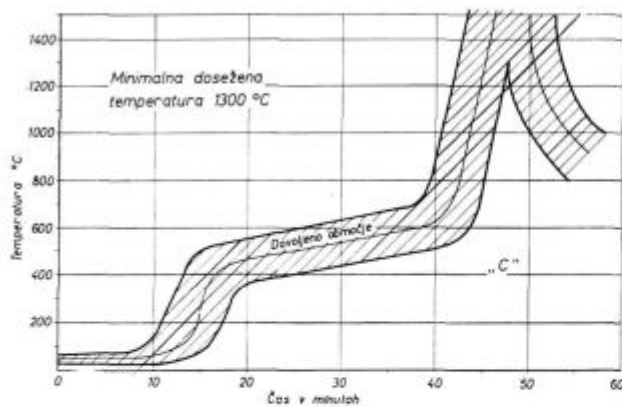
Številni poizkusi v obratu so potrdili gornje predpostavke.

Ce želimo torej ugotoviti, ali je eksotermna masa sposobna za uporabo v proizvodnji, mora glede na uporabnostni razred njena krivulja potekati približno tako, kot je to prikazano na sliki 6.

Povsem jasno je, da moramo pri takem vrednotenju računati tudi na določeno trosenje. Zato so bile testirane velike količine eksotermnih mas feedex; na ta način so bila dobljena takoimenovana »krivuljna območja«, in to za vsak razred posebej. Na slikah 7, 8 in 9 so prikazana krivuljna območja za vse 3 razrede. Vzporedno s temi raziskavami so se vlivali tudi primerjalni ulitki, in to na ta način, da se je za vsako maso ugotovila najprej njena krivulja, nato pa se je ta masa uporabila še na testnem ulitku. Primerjava nastalega lunkeja s krivuljo je povedala vse.

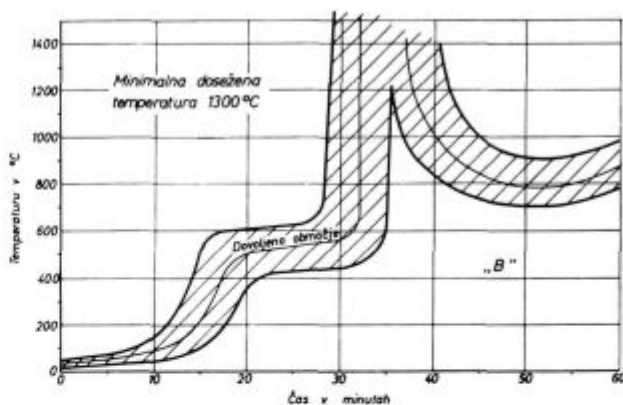


Slika 7

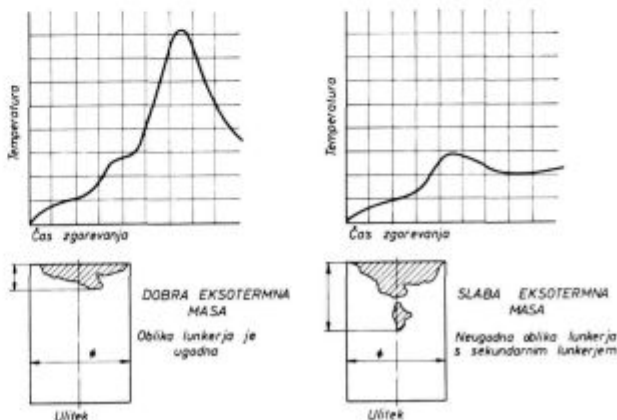


Slika 8

Poleg nekoliko nepomembnih stranskih variant sta se pri tem izkristalizirali predvsem dve skupini eksotermnih mas: ena slaba in neuporabna in druga dobra. Obe s svojimi karakterističnimi oblikami lunkejev in krivulj. Na sliki 10 so prikazane karakteristike obeh mas; razlika je zelo očitna.



Slika 9



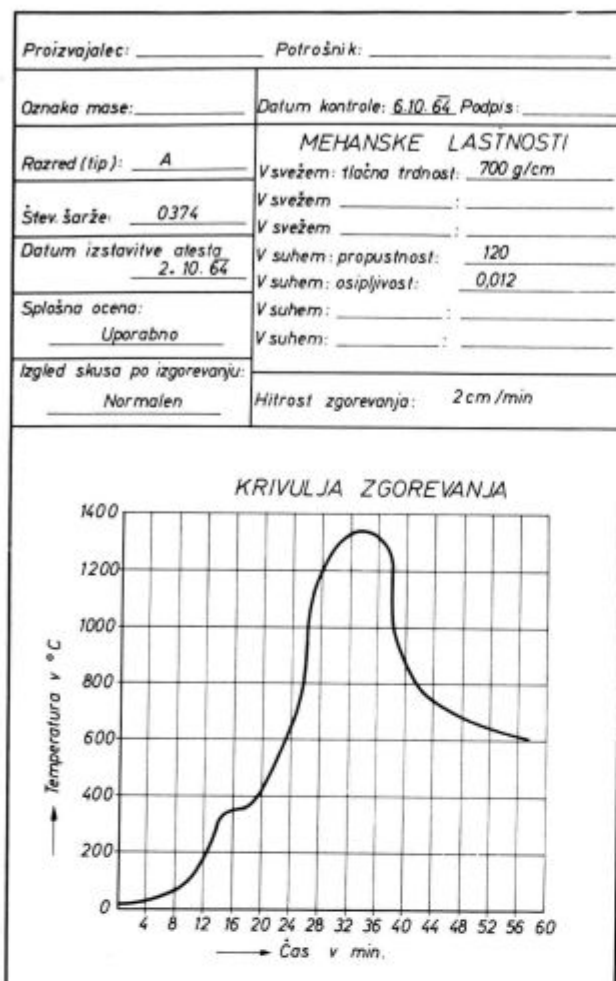
Slika 10

Rezultat teh prizadevanj so tehnični pogoji za prevzem, kontrolo in uporabo eksotermnih mas. To so pravzaprav določbe in normativi za kvalitativni prevzem eksotermnih mas od potrošnika. Proizvajalec pa mora pri tem za vsako šaržo t. j. za vsako mešanico, ki mora imeti garantirano enakomerne lastnosti, izdati atest, s katerim potrjuje, da masa ustreza postavljenim tehničnim pogojem.

Sami tehnični pogoji pa vsebujejo sledeče glavne določbe:

1. splošni del s klasifikacijo eksotermnih mas,
2. krivuljna območja za posamezne razrede,
3. določbe o postopku določevanja krivulje,
4. predpis mehanskih lastnosti eksotermne mase,
5. splošne klavzule o vzorčevanju, izdelavi skuska itd.

Mase, ki so pod takimi pogoji dostavljene kupcu, se nato v laboratoriju kupca kontrolirajo, s tem da se za vsako šaržo, ki jo mora proizvajalec označiti s tekočo številko šarže, ugotovijo krivulje ter ostale mehanske lastnosti. Laboratorij nato preda obratu poročilo o kontroli, ki ga izpiše na posebnem obrazcu — (glej sliko 11). Poročilo vsebuje vse potrebne podatke. Pravilna dobljena krivulja pa se najlažje ugotovi tako, da se na mrežo,



Slika 11



Slika 12

v katero je vrisana krivulja, položi prozorna ploščica iz celuloida ali podobnega materiala, na katero je že vrisano ustrezno krivuljno območje.

Na sliki 12 je za zaključek prikazan še primer, ki ima namen ilustrirati še enkrat razliko med delovanjem klasičnega in eksotermnega napajalnika. Dimenzije ulitkov — kock ter napajalnikov so iste, samo, da je levi napajalnik obložen z eksotermno maso, medtem ko je desni obložen z običajnim formarskim peskom.

Kocka je težka 25 kg, dolžina stranic pa je 160 mm. Ulitek je napajan v obeh primerih z napajalnikom dimenzije  $\varnothing 90$  mm h = 150 mm.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Verbesserung des Ausbringens in der Stahlgießerei ist heute ohne Zweifel die am meisten brennende Frage auf dem Gebiet der Technologie des Aufgiessens. Eine der Verbesserungsarten ist die Verwendung von exothermen Belägen für die Aufgüsse.

Im Vergleich mit dem klassischen Aufguss können wir im exothermen Aufguss die Schmelze länger flüssig halten.

der Grad der Ausbringung ist deswegen viel grösser, das Gewicht der Aufgüsse aber kleiner.

Bei der Arbeit mit exothermen Aufgüssen ist es wichtig, dass ihr kalorischer Wert, die Anbrennzeit, Temperatur und Verbrennungsschnelligkeit den verschiedenen Abkühlungsgeschwindigkeiten der Aufgüsse angepasst sind.

## SUMMARY

Yield improvement in steel foundry is without any doubt the most acute question of feeding technology. One of the improvement ways is exothermic lining of feed hoppers.

Comparatively to classic feed hoppers in exothermic feed hopper it is possible to keep liquid metal longer,

yield is therefore much higher and weight of feed hoppers smaller.

Working with exothermic feed hoppers it is important that their Btu value, time of ignition, temperature and speed of combustion corresponds to different cooling rates of feeding hoppers.

## Povečanje produktivnosti s peskometom pri izdelovanju jeklene litine

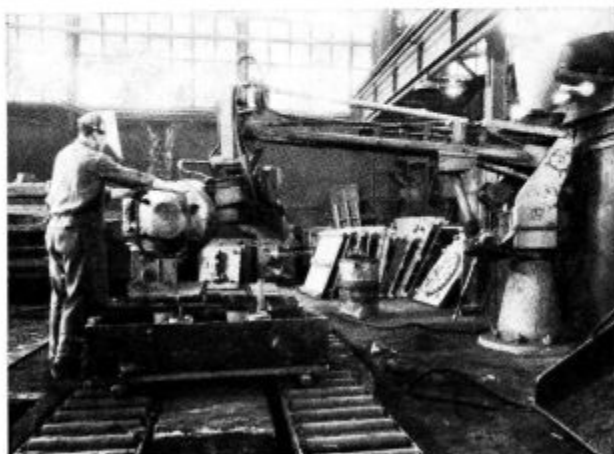
*Izdelava jeklene litine z uporabo peskomet — primerjava peskomet speedslinger kapacitete 30 m<sup>3</sup>/uro s peskometom z ročnim upravljanjem kapacitete 9 m<sup>3</sup>/uro.*

Ker so imele livarne pred II. svetovno vojno izrazit obrtniški način izdelovanja jeklenih ulitkov, je razumljivo, da je tudi livarsko osebje po takratnih livarnah nosilo pečat obrtne miselnosti, kar se je odražalo pri napredku livarstva in izkoristku livarskih zmogljivosti. Po II. svetovni vojni so bile livarne jekla na hitro obnovljene z maloštevilnimi strokovno usposobljenimi, izučeni livarji. Prevzeli so nalogo zagotoviti takratnemu industrijskemu razvoju čim večjo količino jeklenih ulitkov ne glede na kakovostno izdelavo.

Neposredno po vojni so se posamezne livarne razvile v pravi industrijski sestav, izdelava ulitkov pa je ostala na obrtniški stopnji. V tem razdobju so imele livarne zelo pester in vsestranski program, vse do prvih začetkov uvajanja livarskih strojev, upravljanih ročno in polavtomatično. Že v letih 1949, 1950 in 1951 so se konstrukcije livarskih strojev tako razvile, da so postali livarnam nenadomestljivi. Delovne operacije so se zelo skrajšale, storilnost je znatno porasla. Izkoristek stroja pa je bil še vedno odvisen od delovne volje in spretnosti livarja.

Livarski konstrukterji so si zastavili nalogo mehanizirati stroj za formanje, tako da bi ne bil odvisen od delovne volje in spretnosti upravljalca, temveč da bi delno ali povsem avtomatično deloval. Uvideli so, da je kljub mehanizaciji in avtomatizaciji formanja bilo potrebno treba doseči še popolno mehanizacijo drugih delovnih faz: dostavo okvirov in modelnih plošč, izvlačanje modelnih plošč iz form, pokrivanje form, vračanje odpadnega peska ter dovoz peščenih mešanic. Namen vključevanja povsem avtomatičnih naprav za formanje je izločiti človeka iz delovnega takta ter mehanizirati čimveč delovnih operacij. Pri teh avtomatično delujočih napravah naj bi bil človek le še nadzornik.

Železarna Ravne ima v svojem proizvodnem programu tudi izdelovanje jeklenih ulitkov, težkih 0,5 ... 10.000 kg, ki bi jih lahko v večini primerov označili kot kosovne ali maloserijske. Za peskomet je običajna serija 10—15 kosov, največje število enakih ulitkov pa je okoli 800 kosov. Iz tega lahko zaključimo, da se dimenzije okvirov



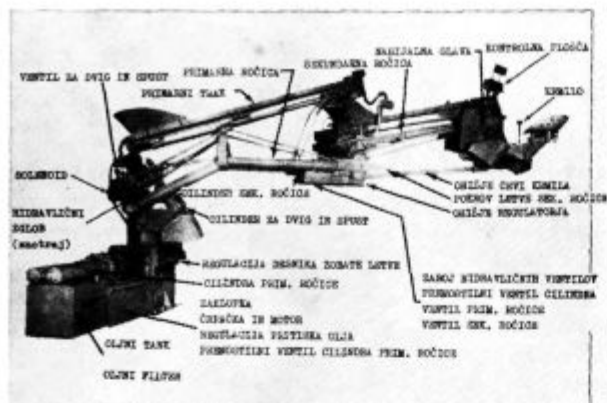
Slika 1

Peskomet kapacitete 9 m<sup>3</sup>/h z ročnim upravljanjem

in modelov hitro menjajo. Za svoj široki program naročil je železarna Ravne še pred kratkim uporabljala peskomet z ročnim upravljanjem, ki je deloval po načelu prenosa peščenih mešanic preko turbinskega rotorja 1500 obratov/minuto in s kapaciteto 9 m<sup>3</sup>/uro. S tem peskometom je bilo mogoče nabijanje okvirov maks. velikosti 2500 × 2500 × 450 mm. Za manipulacijo form v območju nabijanja in izven njega so bile postavljene valjčnice (slika 1), dolge okoli 12 m. Za obračanje, sestavljanje in prenašanje form se je uporabljalo dvoje mostnih dvigal, ki sta istočasno stregli ročnemu formanju ter vsem drugim delom v livarni.

Prav iz teh razlogov je železarna Ravne po dolgotrajnem opazovanju in študiju organizacije livarske tehnike nabavila sodoben peskomet »speedslinger« (slika 2). Ta peskomet nabija peščene mešanice hitreje in enakomerneje od vsakega drugega podobnega stroja, je zanesljiv in izpolnjuje vse zahteve. Peskomet ima hidravlični kontrolni sistem, ki najbolje ustreza delu in vzdrževanju v livarni jekla, kar je važen činitelj. Sistemi in principi so lahko razumljivi celo brez znanja hidravlike. Peskomet ima kontrolni sistem za nabijalno glavo, ki nabija velike količine peščenih mešanic (do 30 m<sup>3</sup>/uro) in hitro polni okvire. Krmilo hitro in lahko giblje glavo, kakor želi upravljalca. Od tega stroja lahko pričakujemo brezhibno delovanje. Z njim je možno formanje okvirov 2000 × 2000 mm na operacijski mizi vrtlji-





Slika 2

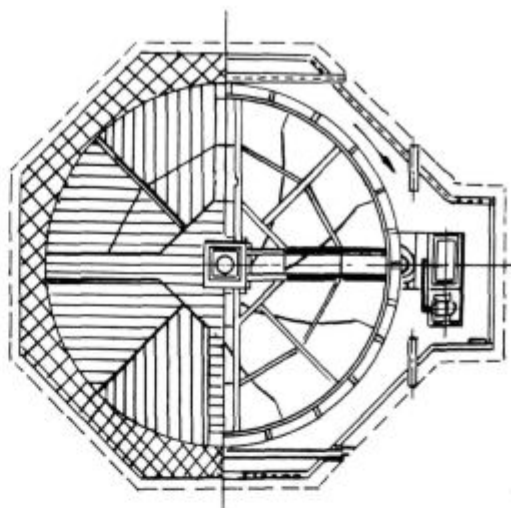
Stacionarni Speedslinger (z ročico za dvig in spust)

vega stroja (slika 3), ali formanje na plošči z maks. dimenzijo okvirov  $4250 \times 3250$  mm.

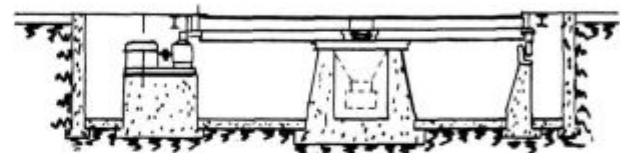
Peskomet, transport in priprava polnilnega ter modelnega peska zahtevajo enakomernejše in boljše lastnosti. Prav to je privedlo livarno jekla v ŽR do tega, da je pričela načrtno urejevati pripravo peska, ki naj zagotovi potrebne količine peska za nemoteno proizvodnjo jeklenih ulitkov. Del povratnega peska se bo obnavljal s suho regeneracijo kapacitete (3000 CFM) 1t/h, del pa se bo uporabil za izdelovanje polnilnih mešanic.

Priprava peska je predvidena s tremi mešalniki speedmullor v eni vrsti. Nad mešalniki je 8 bunkerjev za novi, stari in regenerirani pesek. Doziranje mešalnikov opravlja 8 gumijastih trakov preko časovnih relejev. Nad bunkerji so gumijasti transporterji za prenašanje peska v posamezne bunkerske komore. Prednost takšne namestitve je v tem, da se volumenski dozatorji polnijo, ko mešalniki delajo. Tako je omogočeno neprekinjeno obratovanje z maks. uporabo mešalnika.

Transport veziva poteka avtomatično na pnevmatičen način, doziranje pa z volumenskimi časovnimi releji. Transport livarskega peska od mešalnikov k potrošnim mestom je popolnoma mehaniziran ter poteka pnevmatično in preko gumijastega transporterja. Silosi so nameščeni tik ob peskometu (slika 7 in 7a) in zadostujejo za potrebe dveh izmen. Vrtljiva miza ima premer 6,60 m in je rešetkaste oblike. Sestavljena je iz segmentov ter izenačena z nivojem tal (slika 3). Ima dvojni pogon: 10 kW za hitri pomik ter 2,5 kW za počasni pomik. Na rešetkah so pritrjene 4 valjčne mize (koristna površina  $2,20 \text{ m}^2$ ), ki so razporejene ena proti drugi pod kotom  $90^\circ$  (slika 6, 7 in 7a). Vrtljiva miza ima možnost nastavitve časovnega pomika preko časovnih relejev, ki dajejo takt nabijanju okvirov. Odpadni pesek pada čez rešetke v zbiralnik, ki ga tako imenovani odjemalniki odvajajo preko odvodnega bunkerja na gumijasti trak. Slika 3 nazorno prikazuje celotno napravo. Miza je opremljena s priključkom zraka 6 atm.



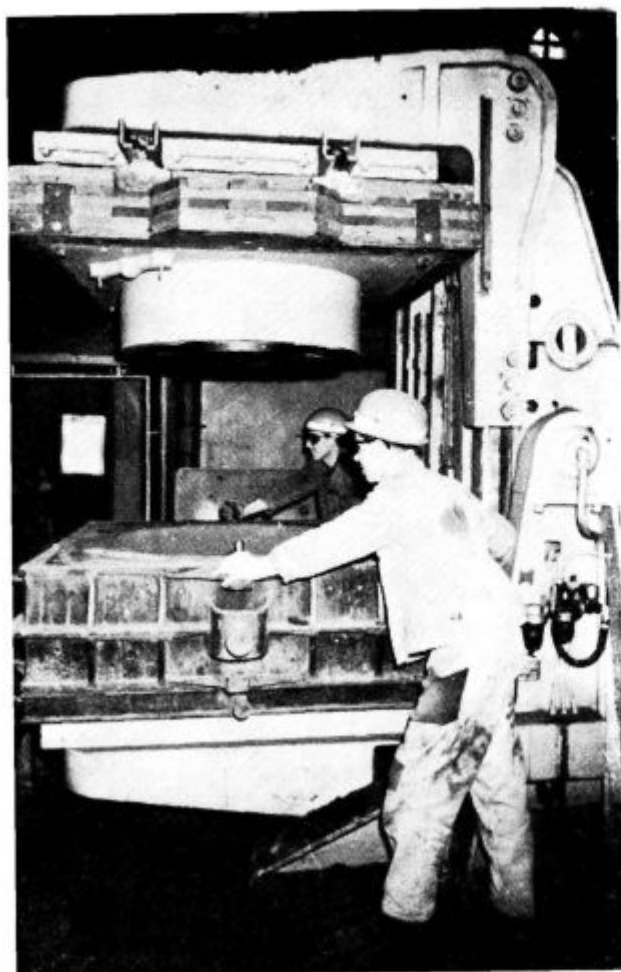
Slika 3  
Vrtljiva miza



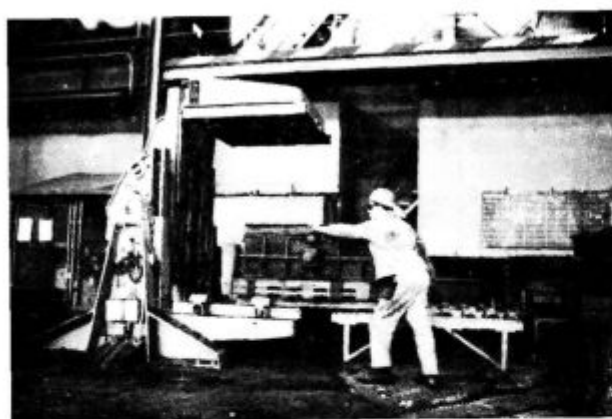
V sestav peskometa spada tudi obračalni in obenem izvlačevalni stroj roll-a-draw, ki obratuje na hidravlični pogon z električnimi napetostmi 220, 380, 440 ali 550 V, 50 ali 60 Hz in na 2 ali 3 faze. Moč obračalnega stroja je 4086 kg (slika 4, 5 in 5a). Celotna dolžina stroja 3369 mm, maks. hod izvlačanja je 762 mm, maks. širina okvira 1676 mm. Zračnost med valji (največja celotna dopustna debelina modelne plošče, hod izvlačanja modela in debelina podložne plošče okvira) je 1752 mm. Najmanjša višina pritrditve je 356 mm. Hidravlično gnan izenačevalnik avtomatično pritrjuje neravne okvire. Konvejer za usmerjanje okvirov v napravo ali iz naprave lahko obrnemo za  $90^\circ$ . Stroj ima posebna vodila na mehanizmu za izvlačanje in avtomatično centriranje obremenitev za obračanje. Celotni hidravlični pogon poganja vgrajena hidravlična enota na električni pogon z motorjem 15 kW. Vsa konstrukcija je jeklena in tehta 6800 kg.

Peskomet (spedslinger) z zmogljivostjo nabijanja peska  $30 \text{ m}^3/\text{uro}$  nabije v dveh izmenah, to je v 16 urah,  $360 \text{ m}^3$  peska. V tem času nabijemo z njim 240 kompletnih form s povprečno prostornino  $1,3 \text{ m}^3$ . V ilustracijo naj navedemo, da je izdelal peskomet z ročnim upravljanjem in zmogljivostjo  $9 \text{ m}^3/\text{uro}$  le 72 kompletnih form ali  $108 \text{ m}^3$  na 16 ur. Čas nabijanja forme s peskomtom je v primerjavi z ročnim formanjem znatno krajši. Posebno velika je razlika pri večjih formah, kjer je volumen nabitega peska večji in potrebujemo za ročno nabijanje tudi do 8-krat več časa kakor za nabijanje s peskomtom. Poprečna produktivnost je za 30% večja.





Slika 4  
Obračalni stroj »Roll-a-draw«

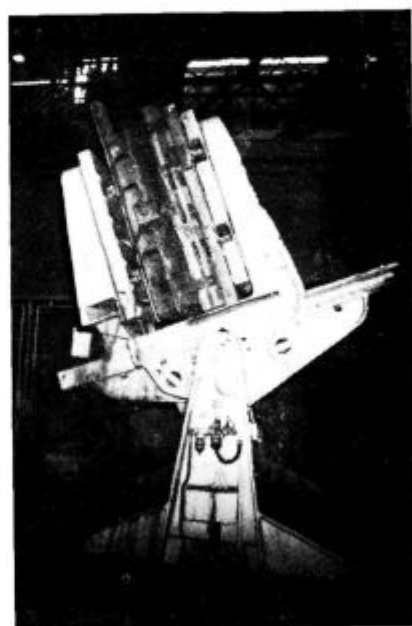


Slika 5  
Obračalni stroj »Roll-a-draw«

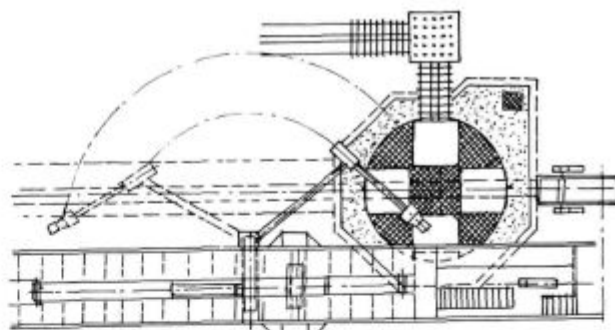
Izdelovanje form s peskometom po novem projektu se od drugih postopkov formanja razlikuje po tem, da je oblaganje modelov oziroma modelnih plošč, polnjenje in nabijanje form združeno v eno operacijo. S takim načinom lahko dosežemo ob pravilnem delu enakomerno trdoto form 80—85 enot po GF. Pri tem je treba paziti na točno in

enakomerno doziranje peska, ker prevelike količine škodujejo trdoti forme. Isto velja za premajhne količine.

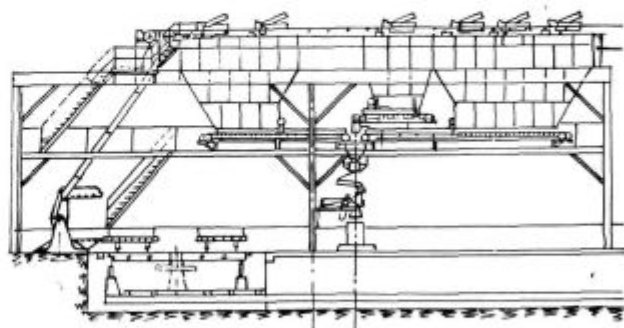
Vsak delavec ima odrejeno mesto in delo, ki ga mora v določenem časovnem razdobju opraviti. Razporeditev delovnih mest je naslednja:



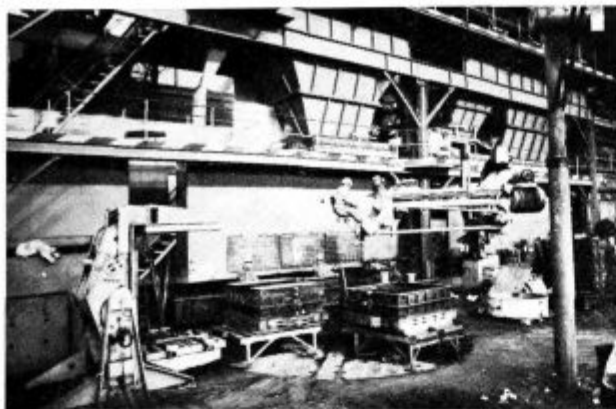
Slika 5.a  
Obračalni stroj »Roll-a-draw«



Slika 6  
Tlorisni pogled na komplet peskomet



Slika 7  
Narisni pogled na komplet peskomet



Slika 7a: Pogled na peskomet

1. operater sedi na glavi peskometu in ga upravlja,

2. oblikovalec sprejema nabito formo in jo očisti, pošlje v obračalni stroj, obrne formo, avtomatično izvleče modelno ploščo ter potisne formo na delovno valjčnico. Ta se v časovnem razdobju avtomatično pomakne za okvir naprej, vrne modelno ploščo nazaj, jo postavi na operacijsko mizo in čaka naslednji cikel.

3. pripravljalec okvirov ima nalogo postavljati okvire na modelno ploščo.

4. pri valjčnih mizah sta 2 moža, ki vstavljata jedra in končno izdelata formo.

Iz strukturnega sestava vidimo, da je formacijsko določenih 5 ljudi za izdelavo form s sodobnim peskometom. Če upoštevamo še težo ulitkov 465 kg kot povpreček enoletnega proizvodnega programa, vidimo, da je produktivnost velika:

- a) povprečna teža ulitka 465 kg,
- b) formacijski sestav 5 mož,
- c) možnost izdelave 120 kompletnih form/8 ur.

Produktivnost =  $120 \text{ form} \times 465 \text{ kg} = 55.800 \text{ kg na } 8 \text{ ur}$

Če tem vrednostim odbijemo 60 odstotkov za pripravo dela, za tekoče vzdrževanje in počitek osebja, je obratovalna zmogljivost 40-odstotna in daje dejansko produktivnost:

$$55.800 \text{ kg} \times 0,40 = 22.320 \text{ kg ali}$$

$$22.320 \text{ kg} : 5 \text{ mož} = 4.464 \text{ kg/delavca/8 ur, t. j.}$$

$$4.464 : 8 \text{ ur} = 558 \text{ kg/delavca/uro}$$

Pri taki opremi je to največja možna produktivnost.

Inozemska literatura navaja, da je peskomet z delno mehanizacijo že pri 15 — 25 odstotnem izkoristku rentabilen.

Približno v enakem razmerju s produktivnostjo so proizvodni stroški. Z delom na malo mehaniziranem peskometu, ki je bil postavljen z nizkimi investicijskimi stroški, si je livarna jekla v železarni Ravne pridobila bogate izkušnje v organizaciji priprave dela in izrabljuje njegove zmogljivosti.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Artikel beschreibt die Bedeutung der Mechanisierung in der Formerei der Giesserei. Es ist der Fortschritt in der Produktivität der Stahlgießerei Ravne mit der Einführung eines modernen Sandstrahlers aufgezeigt.

Es sind beschrieben die Wirkungsart des neuen Sandstrahlers, seine Charakteristik, des Ausbringen und die Zusatzanlagen für die Sandvorbereitung.

## SUMMARY

Article is dealing with importance of mechanisation at forming operation in foundry. The increase of productivity is shown in Ravne foundry by introduction of more

modern sandthrower. Principles of functioning, characteristics, productivity and additional facilities of new sandthrower are described.

## Toplotna prevodnost železovih litin

Opis aparature za merjenje toplotne prevodnosti po Schröderjevi metodi. Toplotna prevodnost sive, melirane in bele ter nodularne litine. Primerjalna tabela in odvisnost toplotne prevodnosti od kemične sestave. Podane so tudi metalografske strukture posameznih vzorcev.

### UVOD

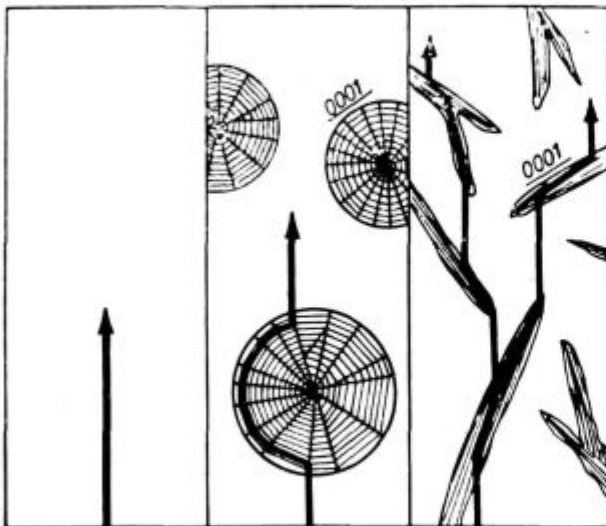
Toplotna prevodnost je fizikalna količina, ki določa, kako se material ogreje v notranjosti, se izenačijo temperaturne razlike in s tem zmanjšajo termične napetosti. Praksa je pokazala, da so termične napetosti posebno problematične pri jeklar-skih in valjčnih kokilah in pri valjih.

Za določevanje toplotne prevodnosti smo izbrali Schröderjevo metodo in v ta namen dali izdelati posebno aparaturo. Merili smo tudi specifično toploto in gostoto zaradi določevanja temperaturne prevodnosti, ki je pomembna pri študiju termičnih napetosti.

Namen naloge je bil, da določimo toplotno in temperaturno prevodnost kokilne litine, valjčne in nodularne litine, da bi lahko za posamezne primere sklepali na velikost termičnih napetosti.

Literatura navaja za posamezne komponente v litinah naslednje vrednosti za toplotno prevodnost<sup>1</sup>:

ferit  $\lambda = 0,18$  cal/cm sek °C = 64,8 Kcal/m h st  
perlit  $\lambda = 0,12$  cal/cm sek °C = 43,2 Kcal/m h st  
cementit  $\lambda = 0,02$  cal/cm sek °C = 7,2 Kcal/m h st



Slika 1

Prenos toplote v litini z nodularnim in lamelarnim grafitom

Čisti grafit (anizotropen) ima toplotno prevodnost v podolžni smeri  $\lambda = 0,42$  cal/cm sek °C in v prečni smeri  $\lambda = 0,27$  cal/cm sek °C.

Zelo dobra prevodnost grafita je vzrok temu, da ima litina z lamelarnim grafitom boljšo toplotno prevodnost kot nodularna litina.

Približne vrednosti toplotne prevodnosti za posamezne tipe litine so:

litina z lamelarnim grafitom

feritna  $\lambda = 0,10$  do  $0,15$  cal/cm sek °C

perlitna  $\lambda = 0,09$  do  $0,12$  cal/cm sek °C

litina z nodularnim grafitom

feritna  $\lambda = 0,08$  do  $0,10$  cal/cm sek °C

perlitna  $\lambda = 0,05$  do  $0,08$  cal/cm sek °C

Nekateri kemični elementi imajo velik vpliv na toplotno prevodnost litine. Naslednja tabela prikazuje vpliv količine silicija na toplotno prevodnost nodularne litine.

% Si	$\lambda$ (cal/cm. sek. °C)
0,65	0,126
1,1	0,117
1,65	0,093
2,0	0,085
2,3	0,071
4,8	0,049
običajna nodularna litina	0,06 — 0,07
običajna litina	
z lamelarnim grafitom	0,12 — 0,13
nelegirana jeklena litina	0,05 — 0,06

Zmotno bi bilo sklepati na sposobnost prevajanja toplote samo z ozirom na en faktor. Podamo lahko samo grobo oceno, da bi na primer imela nodularna litina najboljšo toplotno prevodnost, če bi dosegli naslednje pogoje:

1. feritno osnovo
2. količina silicija naj bo nizka (1,0 do 1,7 %)
- in količina ogljika naj bo od 3,8 do 4 %
3. v litini naj ne bo perlita in nobenih karbidov.

Kot primer vpliva metalografske strukture na toplotno prevodnost za posamezne tipe litine navajamo še podatke po M. Jacobu<sup>2</sup>:

litina z 2,5 % C pri 100° C

$\lambda = 54,7$  Kcal/m, h, st, če vsebuje 82 % ferita

$\lambda = 40,0$  Kcal/m, h, st, če vsebuje 91 % perlita

litina s 3 % C pri 100° C

$\lambda = 54,7$  Kcal/m, h, st, če vsebuje 2,3 % C kot grafit

$\lambda = 40,0 \text{ Kcal/m, h, st}$ , če ni grafita  
 toplotno neobdelana litina s 4,5 % C brez grafita  
 $\lambda = 11,8 \text{ Kcal/m, h, st}$   
 Če pa jo grejemo dve uri na  $1000^\circ \text{C}$ , naraste:  
 $\lambda = 47,3 \text{ Kcal/m, h, st}$   
 Če dodamo litini s 3,5 % C (2,4 % kot grafit)  
 1 % Ni in 1 % Si, pade toplotna prevodnost od  
 $52,1 \text{ Kcal/m, h, }^\circ\text{C}$  na  $40,9 \text{ Kcal/m, h, }^\circ\text{C}$ ; dodatek  
 2...4 % Ni pa zniža toplotno prevodnost na  $35,7$   
 $\text{Kcal/m, h, }^\circ\text{C}$ .

## IZBOR METODE IN OPIS APARATURE ZA MERJENJE TOPLOTNE PREVODNOSTI

Pri izbiri metode za merjenje toplotne prevodnosti smo se odločili za Schröderjevo metodo. Ta metoda je absolutna in toplotno prevodnost merimo pri stacionarnem toplotnem toku.

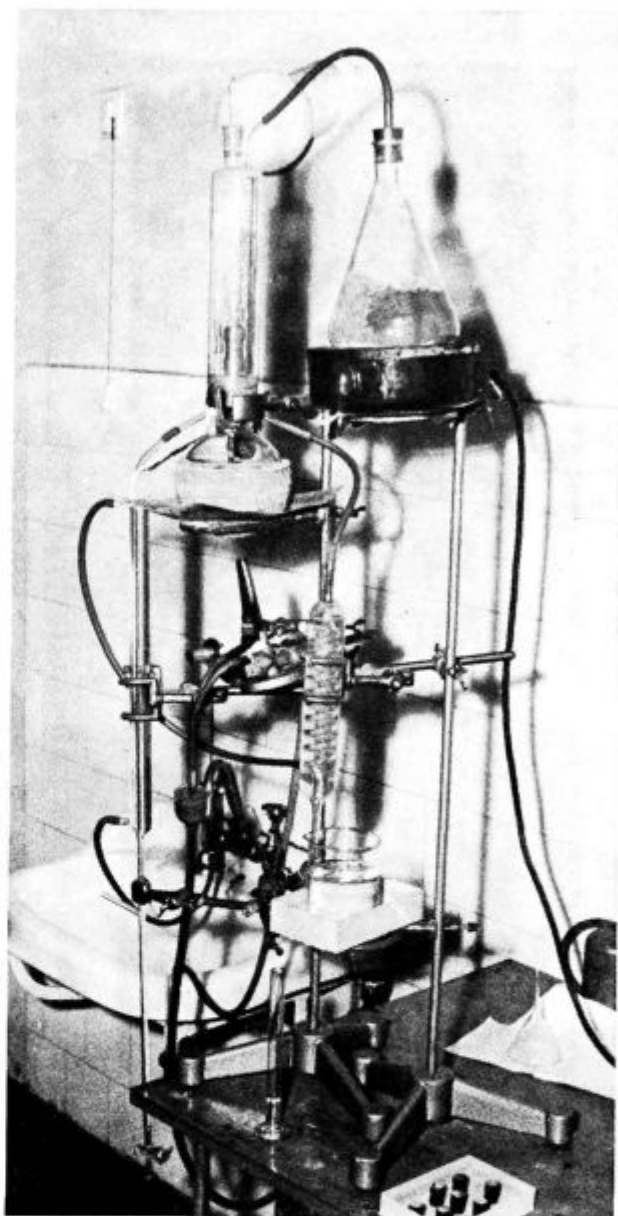
### Opis metode

Specifičnost te metode je v tem, da ne merimo niti temperatur niti količine toplote. Vzorec, ki ima obliko valja in v našem primeru naslednje dimenzije: premer 15 mm, višino 20 mm, držimo na konstantni temperaturi s pomočjo dveh tekočin, ki vreta in katerih vrelišči se v našem primeru razlikujeta za  $21,5^\circ \text{C}$ . Zaradi te razlike v vreliščih teče skozi vzorec toplotni tok, ki ga določimo tako, da merimo, v kakšnem času izpari določena količina tekočine z nižjim vreliščem. V našem primeru smo izmerili čas, v katerem je izparelo 1 ml tekočine.

Metoda je primerna za temperaturna območja, v katerih imajo stabilne tekočine svoja vrelišča. Za eksperimentalno delo se priporočajo temperature od  $20$  do  $200^\circ \text{C}$ , torej pri relativno nizkih temperaturah.

### Opis aparature

V posodi A segrevamo do vrenja destilirano vodo. Paro vodimo do spodnje stene vzorca. Tako ima vzorec na spodnji steni stalno temperaturo  $100^\circ \text{C}$ . Nad vzorcem je posoda B, v kateri je 96 % etilni alkohol, ki ima vrelišče pri  $78,5^\circ \text{C}$ . Toplota, ki gre skozi vzorec, privede etilni alkohol do vrenja in s tem je temperatura zgornje stene vzorca konstantna  $78,5^\circ \text{C}$ ; vzorec pa ima konstantno temperaturno diferenco  $21,5^\circ \text{C}$ . Vzorec se nahaja v gumijasti cevki, ki je nataktnjena na podaljšek spodnje in zgornje posode, ki imata na koncih isti notranji premer, kot je premer vzorca. Na ta način dosežemo, da je vzorec samo s končnima ploskvama v dotiku s spodnjo in zgornjo tekočino. Literatura navaja, da naj se vzorec drži med dvema srebrnima ploščicama, vendar je preizkus pokazal, da para destilirane vode in etilni alkohol nista nagrizla spoliranih površin vzorca. Prednost tega, da vzorec nismo namestili med srebrne ploščice pa je v tem, da smo imeli direktne kontaktne površine.



Slika 2  
 Aparatura za merjenje toplotne prevodnosti

Paro etilnega alkohola se kondenzirajo v hladilniku  $\text{K}_2$ , kondenzat pa se nabira v graduirni posodi m.

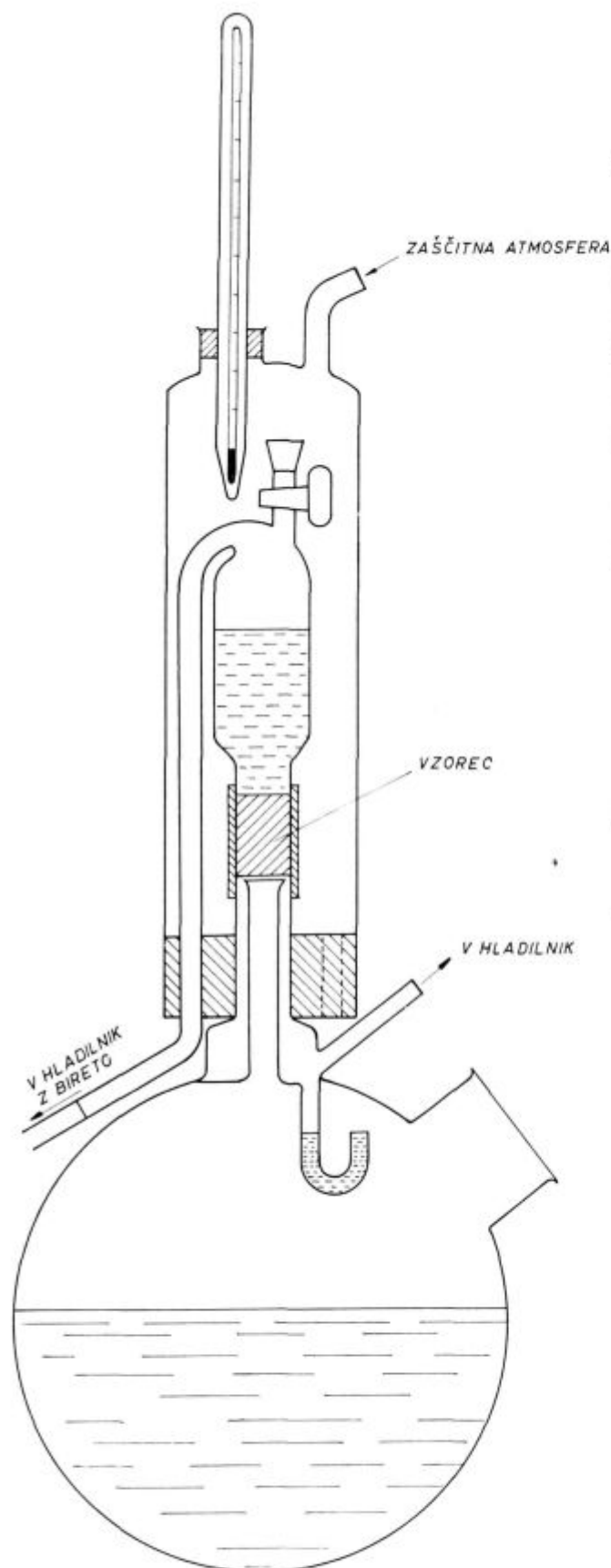
Vzorec in zgornjo posodo obdaja zaščitni plašč, skozi katerega vodimo pare etilnega alkohola. Na ta način smo dosegli naslednje:

a) Toplotne izgube v radialni smeri vzorca so minimalne;

b) Toplotne izgube lahko izračunamo in so pri vsakem poizkusu v časovni enoti enake;

c) Etilni alkohol v posodi nad vzorcem segrevamo do vrelišča in se dovedena toplota skozi vzorec porabi samo kot izparilna toplota.

Toplotne izgube skozi steno v radialni smeri izračunamo po naslednji enačbi:



Slika 3  
Načrt aparature za merjenje toplotne prevodnosti

$$Q = \frac{\lambda \cdot 2\pi \cdot h}{l_n \frac{r_1}{r_2}} \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

Vsako uro izgubimo v radialni smeri skozi gumijasto steno 0,71 Kcal.

### Vzorci in priprava vzorcev

Skupno smo izvršili meritve toplotne prevodnosti in ostalih fizikalnih količin na 27 vzorcih. Vzorci, ki so v tabeli označeni s številkami od 21 do 38, smo pripravili iz prob, ki smo jih ulili v posebne kokile v livarni sive litine. Probe smo ulili v peščeno formo in paralelno v železno kokilo. Na ta način smo dobili različne strukture pri isti kemični sestavi. Ostale vzorce pa smo dali napraviti iz gotovih ulitkov ali standardnih prob.

Pri vzorcih je važno to, da robovi niso posneti, da so površine gladke in da sta končni ploskvi planparalelni. Pred vsako meritvijo smo vzorce na obeh straneh spolirali zaradi že navedenega vzroka.

### Izračun toplotne prevodnosti

Toplotno prevodnost v intervalu  $T_1 - T_2$  lahko izračunamo iz naslednje enačbe:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot t \cdot (T_1 - T_2)}$$

pri čemer pomeni:

$Q$  = izparilna toplota za 1 ml tekočine nad vzorcem

$t$  = čas, da izpari 1 ml tekočine

$(T_1 - T_2)$  = razlika vrelišč obeh tekočin

$d$  = dolžina vzorca

$A$  = presek vzorca

Za izračun toplotne prevodnosti po zgornji enačbi smo iz literature povzeli naslednje podatke:

$$Q_{iz} = 180 \text{ kal/ml}$$

$$T_1 = 100^\circ \text{ C}$$

$$T_2 = 78,5^\circ \text{ C}$$

Pri določevanju toplotne prevodnosti moramo upoštevati, kot sem že omenil, toplotne izgube v radialni smeri vzorca, ki znašajo 0,71 Kcal na uro. Če je bil potreben čas  $t$ , da je izparel 1 ml etilnega alkohola, vidimo, da nam je v tem času ušlo  $0,71 \cdot t$  Kcal skozi steno v radialni smeri in to energijsko izgubo moramo v enačbi za izračun toplotne prevodnosti upoštevati.

Toplotno prevodnost lahko izračunamo tudi na drug način in sicer tako, da izmerimo toplotno prevodnost vzorca, katerega toplotno prevodnost poznamo in potem določimo konstanto aparature.

Na vsakem vzorcu smo napravili večje število meritev. Iz rezultatov smo potem izračunali standardno deviacijo in variacijski koeficient. Iz vrednosti teh dveh količin, ki so podane v tabeli rezultatov, vidimo, da je ponovljivost meritev dobra.

### Temperaturna prevodnost

Temperaturna prevodnost snovi je podana z naslednjo enačbo:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$$

kjer pomeni:

- $c_p$  — specifična toplota (Kcal/kg st)  
 $a$  — temperaturna prevodnost (m<sup>2</sup>/h)  
 $\lambda$  — toplotna prevodnost (Kcal/m h st)  
 $\rho$  — gostota (kg/m<sup>3</sup>)

Za določitev temperaturne prevodnosti smo izmerili specifično toploto in gostoto po običajnih metodah; specifično toploto po mešalni metodi, gostoto pa s piknometrično metodo.

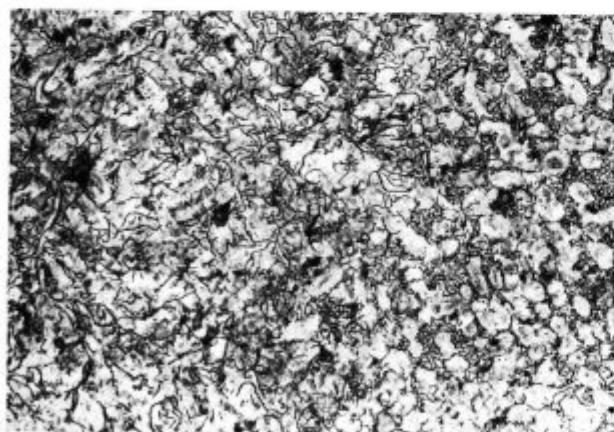
## REZULTATI MERITEV

Vse vzorce smo razdelili v štiri skupine: vzorce iz sive litine, bele in melirane litine, nodularne litine in jekla in vzorce iz litine pločevinskih valjev.

Pod metalografsko strukturo vzorcev so navedene naslednje fizikalne količine:

- $H$  — trdota po Brinellu v HB  
 $\lambda$  — toplotna prevodnost v Kcal/m. h. st  
 $c_p$  — specifična toplota v Kcal/kg. st  
 $\rho$  — gostota v g/cm<sup>3</sup>  
 $a$  — temperaturna prevodnost v m<sup>2</sup>/h  
 $\sigma$  — upogibna trdnost v kg/mm<sup>2</sup>  
 FE — količina fosfidnega eutektika določena po internih tabelah Železarne Štore

### Vzorci sive in kokilne litine



Slika 4

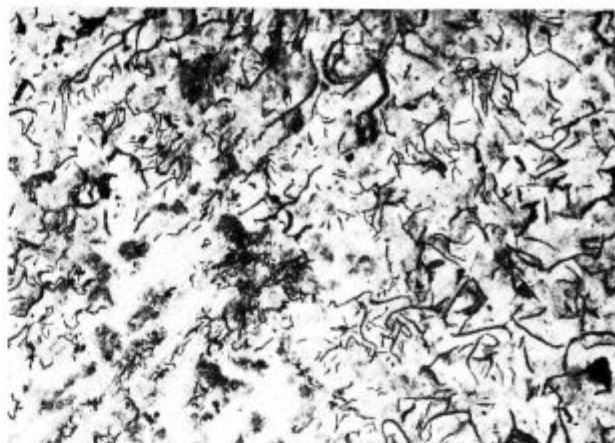
Povečava 40×, nital

Vzorec št. 30; litina za valjčno kokilo, ulito v peščeno formo

$H = 249$ ,  $\lambda = 37,6$ ,  $c_p = 0,102$ ,  $\rho = 7,000$ ,  $a = 0,054$

Kemična analiza: C — 3,54 %; Si — 1,73 %;

Mn — 1,12 %; P — 0,102 %; S — 0,102 %

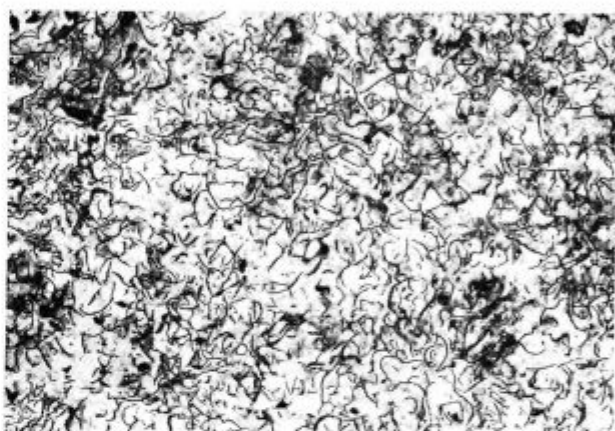


Slika 5

Povečava 40×, nital

Vzorec št. 8; siva litina, vzorec iz Y probe

$H = 215$ ,  $\lambda = 29,7$ ,  $c_p = 0,108$



Slika 6

Povečava 40×, nital

Vzorec št. 35; B-8, št. 15, ulito v peščeno formo

$H = 211$ ,  $\lambda = 45,6$ ,  $\rho = 7,115$

Kemična analiza: C — 3,82 %; Si — 1,68 %;

Mn — 0,63 %; P — 0,096 %; S — 0,084 %



Slika 7

Povečava 40×, nital

Vzorec iz valjčne kokile št. 980, sredina

$H = 168$ ,  $\lambda = 47,8$

Kemična analiza: C — 3,61 %; Si — 1,47 %;

Mn — 1,37 %; P — 0,118 %; S — 0,097 %

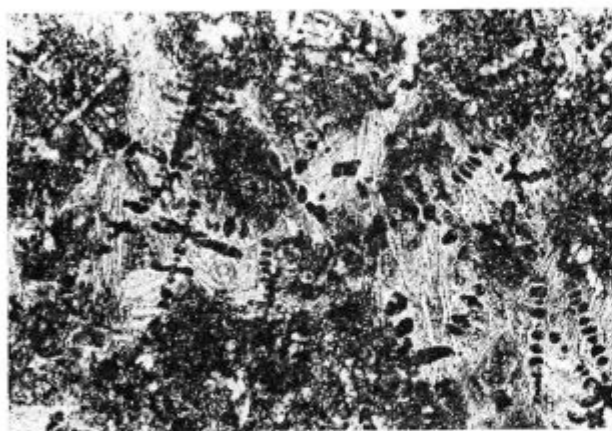
## Vzorci bele in melirane litine



Slika 8  
Povečava 40 $\times$ , nital  
Vzorec št. 22; SL-18, ulito v kokilo  
H = 522,  $\lambda$  = 16,7,  $c_p$  = 0,123,  $\rho$  = 7,563, a = 0,019

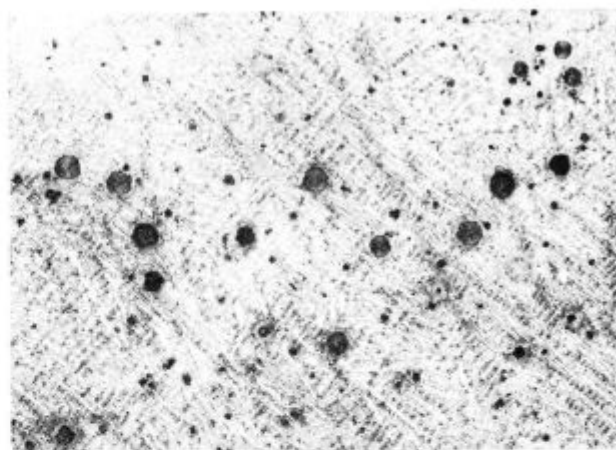


Slika 9  
Povečava 40 $\times$ , nital  
Vzorec št. 29; litina valjčne kokile ulita v kokilo  
H = 492,  $\lambda$  = 16,6,  $c_p$  = 0,119,  $\rho$  = 7,652, a = 0,019  
Kemična analiza: C — 3,54 %; Si — 1,73 %;  
Mn — 1,12 %; P — 0,102 %; S — 0,102 %

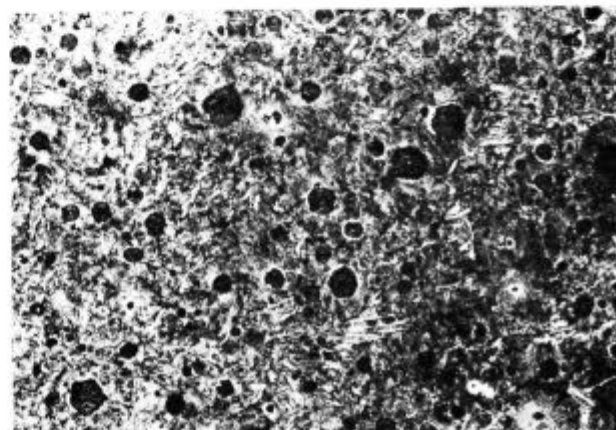


Slika 10  
Povečava 40 $\times$ , nital  
Vzorec št. 27; B-8, št. 13, ulito v kokilo  
H = 383,  $\lambda$  = 19,8,  $c_p$  = 0,113,  $\rho$  = 7,585, a = 0,024  
Kemična analiza: C — 3,64 %; Si — 1,50 %;  
Mn — 0,61 %; P — 0,112 %; S — 0,085 %

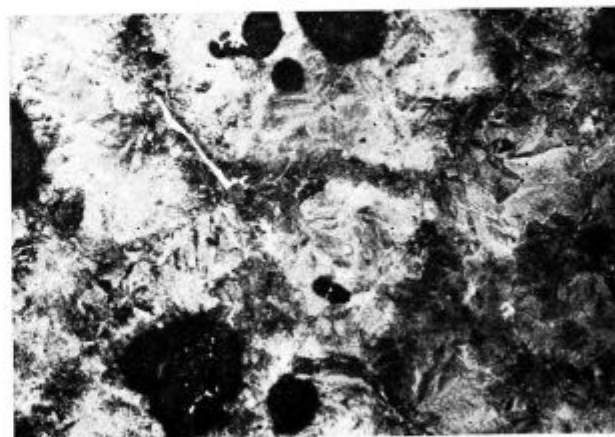
## Vzorci nodularne litine in jekla



Slika 11  
Povečava 40 $\times$ , nital  
Vzorec št. 38; nodularna litina ulita v kokilo  
H = 555,  $\lambda$  = 13,4,  $\rho$  = 7,412  
Kemična analiza: C — 3,89 %; Si — 2,78 %;  
Mn — 0,92 %; S — 0,009 %; Mg — 0,046 %

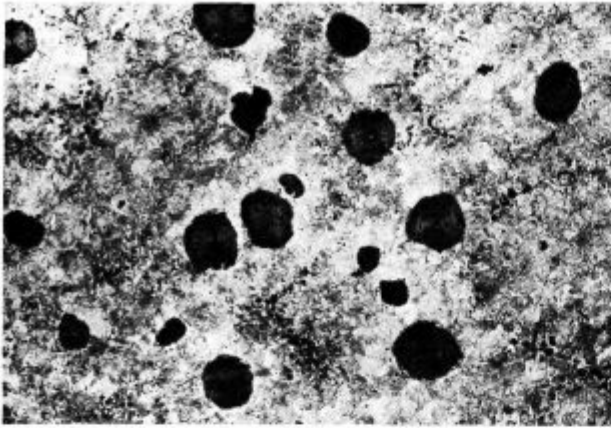


Slika 12  
Povečava 40 $\times$ , nital  
Vzorec št. 37; nodularna litina ulita v peščeno  
formo  
H = 345,  $\lambda$  = 24,7  
Kemična analiza: C — 3,89 %; Si — 2,78 %;  
Mn — 0,92 %; S — 0,009 %; Mg — 0,046 %

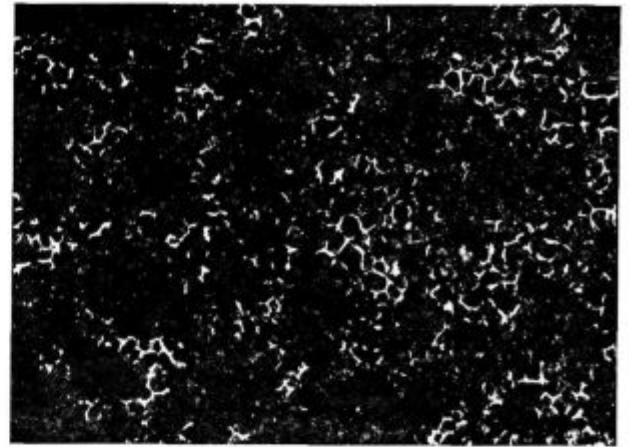


Slika 13  
Povečava 100 $\times$ , nital  
Vzorec C, nodularni valj  
H = 329,  $\lambda$  = 26,5,  $c_p$  = 0,121

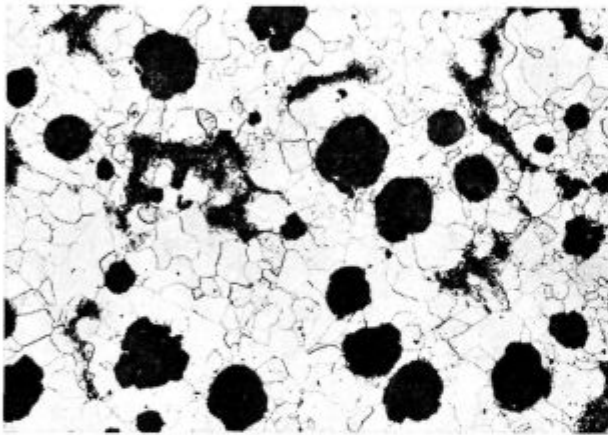




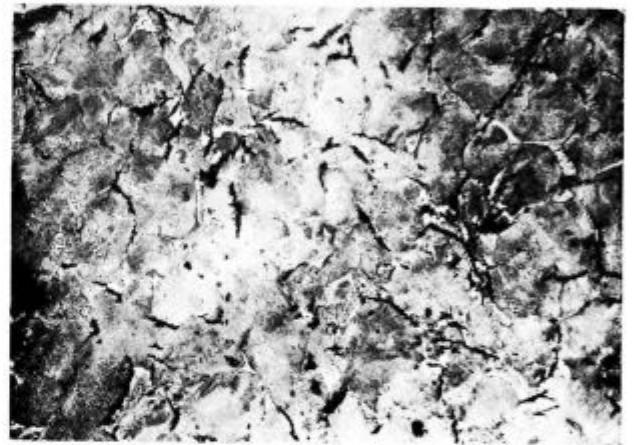
Slika 14  
Povečava 100×, nital  
Vzorec N, normalizirana nodularna litina  
 $H = 313, \lambda = 23,6, c_p = 0,115$



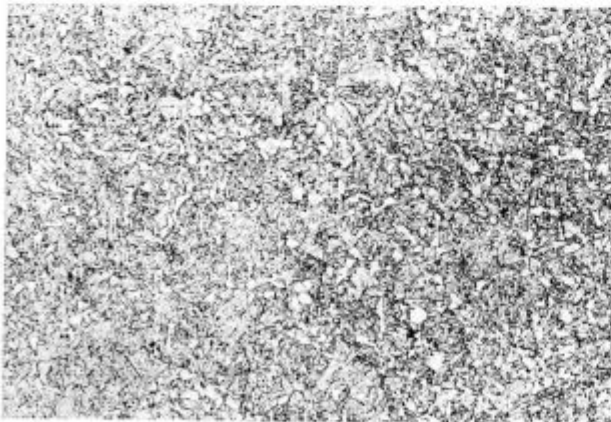
Slika 17  
Povečava 13×, nital  
Vzorec št. 7, valj št. 16778  
Fosfidni evtektik III.



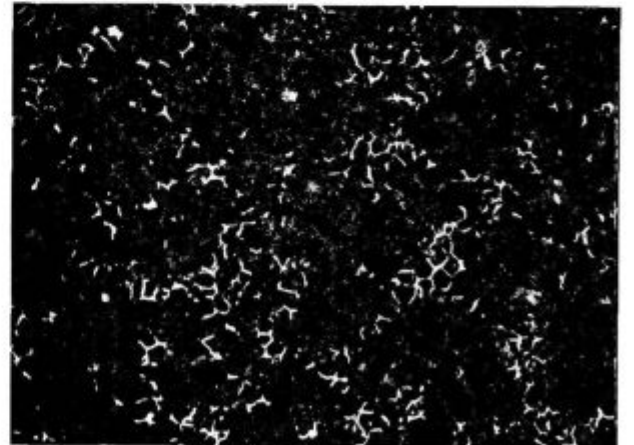
Slika 15  
Povečava 100×, nital  
Vzorec F, feritizirana nodularna litina  
 $H = 187, \lambda = 26,7, c_p = 0,124$



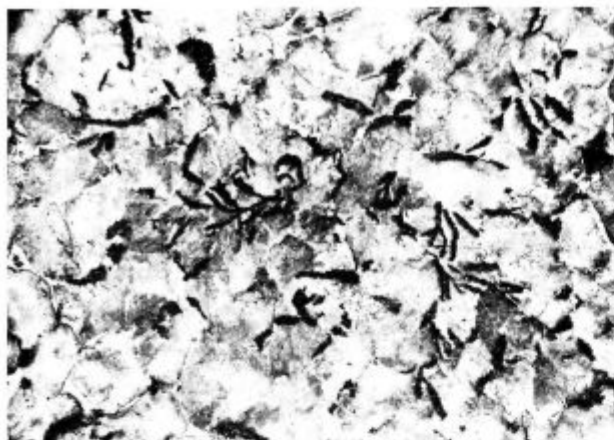
Slika 18  
Povečava 40×, nital  
Vzorec št. 7, valj št. 16778  
 $H = 211, \lambda = 39,7, c_p = 0,122, \rho = 7,433, a = 0,044,$   
 $\sigma = 49,8-57,6$   
Kemična analiza: C — 3,18 ‰; Si — 0,57 ‰;  
Mn — 0,34 ‰; P — 0,480 ‰; S — 0,037 ‰;  
Mo — 0,33 ‰



Slika 16  
Povečava 100×, nital  
Vzorec št. 9, jeklo  
 $H = 274, \lambda = 37,5, c_p = 0,114$



Slika 19  
Povečava 13×, nital  
Vzorec št. 2, valj št. 15770  
Fosfidni evtektik III. — IV.



Slika 20

Povečava 100 $\times$ , nital

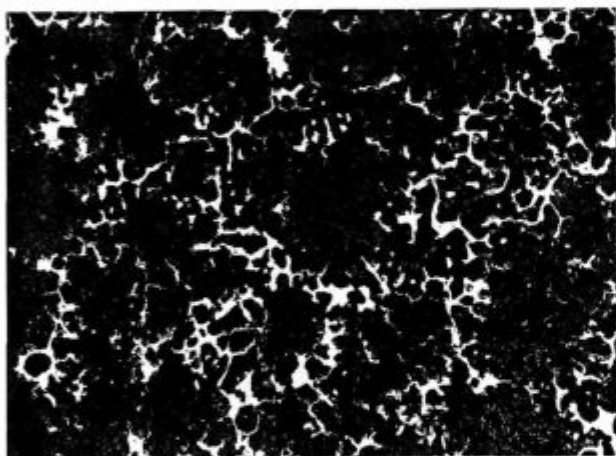
Vzorec št. 2, valj št. 15770

$H = 219$ ,  $\lambda = 36,3$ ,  $c_p = 0,107$ ,  $\rho = 7,559$ ,  $a = 0,048$ ,  
 $\sigma = 48,8-50,7$

Kemična analiza: C — 3,06 ‰; Si — 0,55 ‰;

Mn — 0,24 ‰; P — 0,422 ‰; S — 0,045 ‰;

Mo — 0,27 ‰

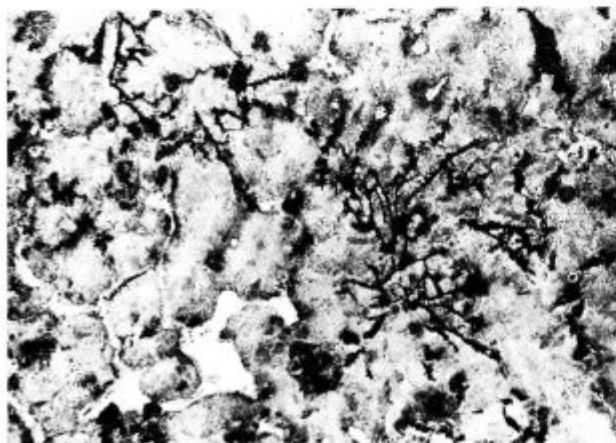


Slika 21

Povečava 13 $\times$ , nital

Vzorec št. 5, valj št. 16320

Fosfidni evtektik V. — VI.



Slika 22

Povečava 100 $\times$ , nital

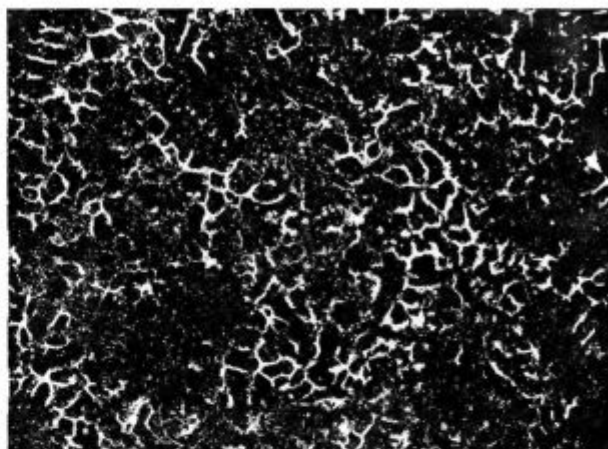
Vzorec št. 5, valj št. 16320

$H = 239$ ,  $\lambda = 28,7$ ,  $c_p = 0,113$ ,  $\rho = 7,302$ ,  $a = 0,036$ ,  
 $\sigma = 35,6-33,8$

Kemična analiza: C — 3,12 ‰; Si — 0,66 ‰;

Mn — 0,19 ‰; P — 0,466 ‰; S — 0,074 ‰;

Mo — 0,29 ‰

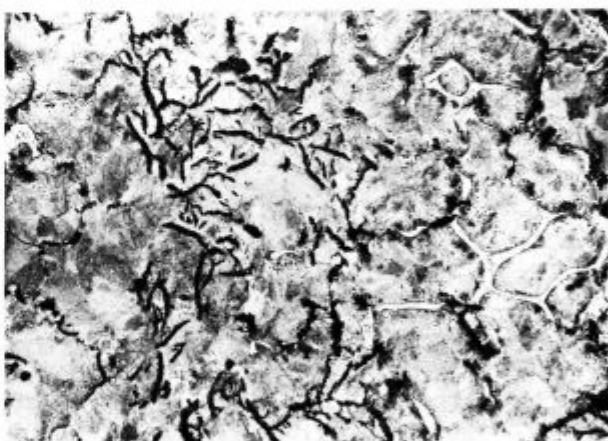


Slika 23

Povečava 13 $\times$ , nital

Vzorec št. 1, valj št. 14211

Fosfidni evtektik VI.



Slika 24

Povečava 100 $\times$ , nital

Vzorec št. 1, valj št. 14211

$H = 215$ ,  $\lambda = 33,9$ ,  $c_p = 0,113$ ,  $\rho = 7,545$ ,  $a = 0,040$

Kemična analiza: C — 3,03 ‰; Si — 0,58 ‰;

Mn — 0,17 ‰; P — 0,455 ‰; S — 0,042 ‰;

Mo — 0,31 ‰

## ZAKLJUČEK

Pregled toplotne prevodnosti izbranih litin in jekla nam kaže jasno razporeditev na naslednje skupine:

A) Najslabšo toplotno prevodnost ima bela in melirana litina (40—100 ‰ bele strukture), in sicer 13—19 Kcal/m, h, °C

B) Sledi nodularna litina s toplotno prevodnostjo od 23 do 28 Kcal/m, h, °C

C) Litina pločevinskih valjev ima toplotno prevodnost od 29—38 Kcal/m, h, °C

Tabela rezultatov

Oznaka vzorca	Kvaliteta vzorca	Trdota HB	Kemična analiza						Upogibna trdnost
			% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mo	
1	Valj št. 14211	215	3,03	0,58	0,17	0,455	0,042	0,31	—
2	Valj št. 15770	219	3,06	0,55	0,24	0,422	0,045	0,27	48,8—50,7
3	Valj št. 15771	215	3,06	0,55	0,24	0,422	0,045	0,27	52,5—54,3
4	Valj št. 15872	215	3,11	0,52	0,20	0,466	0,048	0,27	33,7—37,4
5	Valj št. 16320	239	3,12	0,66	0,19	0,466	0,074	0,29	35,6—33,8
6	Valj št. 16756	219	2,86	0,82	0,31	0,460	0,051	0,37	45,0—46,8
7	Valj št. 16778	211	3,18	0,57	0,34	0,480	0,037	0,33	49,8—57,6
8	Siva litina	215							
9	Jeklo	274							
21	SL — 18; v peščeno formo	244							
22	SL — 18; v kokilo	522							
23	SL — 22; v peščeno formo	272							
24	SL — 22; v kokilo	492							
27	B — 8; št. 13 — v kokilo	383	3,64	1,50	0,61	0,112	0,085		
28	B — 8; št. 13 — v peščeno formo	211	3,64	1,50	0,61	0,112	0,085		
29	Valjčna kokila — v kokilo	492	3,54	1,73	1,12	0,102	0,102		
30	Valjčna kokila — v peščeno formo	249	3,54	1,73	1,12	0,102	0,102		
35	B — 8; št. 15 — v peščeno formo	211	3,82	1,68	0,63	0,096	0,084		
36	B — 8; št. 15 — v kokilo	554	3,82	1,68	0,63	0,096	0,084	% Mg	
37	Nodul. litina ulita v peščeno formo	345	3,89	2,78	0,92	—	0,009	0,046	
38	Nodularna litina ulita v kokilo	555	3,89	2,78	0,92	—	0,009	0,046	
N	Nodularna litina — normalizirana	313							
F	Nodularna litina — feritizirana	187							
C	Nodularni valj	329							
980 — S	Kokila št. 980 — sredina	168	3,61	1,47	1,37	0,118	0,097		
980 — Z	Kokila št. 980 — zunanja površina	134	3,61	1,47	1,37	0,118	0,097		

D) Najboljšo toplotno prevodnost ima siva litina, od 28 Kcal/m, h, °C (siva litina s 15 % cementita) do 51 Kcal/m, h, °C (kokilna litina)

Pri prvi skupini pripisujemo razlike v toplotni prevodnosti količini sive, oziroma bele strukture. Nodularna bela litina ima sicer nekaj kroglic grafita v strukturi, vendar ima najvišji % C in tako najvišjo količino cementita. Podobno je pri merilani sivi litini; male razlike v toplotni prevodnosti se dajo razložiti z različno količino grafita in cementita v strukturi.

Nodularna litina ima zelo majhne razlike v toplotni prevodnosti, čeprav sta osnovna struktura in velikost grafita različna. V primerjavi s pločevinskimi valji, jeklom in sivo litino ima nizko toplotno prevodnost.

Pri pločevinskih valjih se toplotna prevodnost dokaj spreminja, posebno, če upoštevamo soraz-

merno podobno kemično analizo in metalografsko strukturo.

Opozorimo lahko na vpliv C, Si in fosfidnega evtektika na toplotno prevodnost pločevinskih valjev, ki je prikazana na diagramu II.

Siva litina ima največje razlike v toplotni prevodnosti. Najboljšo toplotno prevodnost ima kokilna litina, ki ima tudi zelo velik grafit. Po strukturi sodimo, da ima pri sivi litini na toplotno prevodnost vpliv predvsem količina, velikost in razporeditev grafita. Ze majhne količine cementita v strukturi močno zmanjšajo toplotno prevodnost.

Rezultati meritev so pokazali, da na vrednost toplotne prevodnosti ne moremo sklepati na podlagi kemične analize, kot na primer pri jeklu. Grobo oceno za velikost toplotne prevodnosti lahko podamo le na podlagi metalografske strukture in nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti litine.

Fosfidni evtektik	L (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	t (sek)	$\sigma$ (sek)	V (%)	Toplotna prevodnost Kcal/m. h. st.	Specifična toplota Kcal/kg st	Gostota g/cm <sup>3</sup>	a = (m <sup>2</sup> /h)
VI	19,9	179,5	110,9	0,3	0,2	33,9	0,113	7,547	0,040
III—IV	20,0	179,5	103,5	1,3	1,3	36,3	0,107	7,559	0,048
IV	20,1	176,5	105,2	0,6	0,6	36,5	0,106	7,558	0,048
IV—V	19,95	176,5	104,0	0,8	0,7	36,5	0,122	7,367	0,041
V—VI	20,0	179,5	123,4	0,3	0,3	30,9	0,119	7,302	0,036
V	20,0	181,3	132,7	1,2	0,9	28,7	0,113	7,577	0,034
III	20,0	176,5	95,0	0,8	0,8	39,7	0,122	7,433	0,044
	19,9	179,5	128,1	0,3	0,2	29,7	0,108		
	20,0	176,5	101,7	0,8	0,8	37,5	0,114		
	19,95	169,6	88,4	1,36	1,5	44,2	0,105	7,314	0,059
	20,0	179,5	257,0	3,8	1,5	16,7	0,123	7,563	0,019
	20,0	175,5	96,1	2,2	2,3	39,4	0,104	7,327	0,053
	20,0	179,5	232,7	1,9	0,8	18,2	0,118	7,617	0,021
	19,9	176,5	212,9	2,3	1,1	19,8	0,113	7,585	0,024
	20,0	179,5	93,2	2,3	2,4	39,6	0,106	7,194	0,053
	19,9	179,5	260,4	0,3	0,1	16,6	0,119	7,652	0,019
	19,95	176,5	101,3	0,8	0,8	37,6	0,102	7,000	0,054
	19,9	174,4	82,9	0,12	0,3	45,6		7,115	
	19,6	176,5	244,1	0,4	0,2	17,9		7,565	
	19,85	174,4	166,5	0,2	0,1	24,7			
	19,85	176,5	337,2	2,9	0,9	13,4		7,412	
	19,9	179,5	170,0	2,8	1,6	23,6	0,115		
	19,85	186,2	135,0	0,9	0,7	27,3	0,124		
	19,8	176,5	148,4	0,4	0,3	26,5	0,121		
	20,0	174,4	78,2	0	0	47,8			
	19,8	165,0	73,6	0	0	53,2			

#### Literatura

1. E. Spetzler, A. Vincent: II. Verhalten der Stahlwerkskokilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit im Stahlwerksbetrieb  
Stahl und Eisen 85 (1965) N. 16 (982—996)
2. D. Pavko: Pomen toplotne prevodnosti jekel; Metode za določanje toplotne prevodnosti jekel
3. H. G. Braun: Über Messungen der Wärmeleitfähigkeit fester Stoffe bei hohen Temperaturen  
Gaswärme Band 15, Nr. 5, Mai 1966 (142—155)

4. W. Fiedler, F. Fechter: Entwicklungswege im Walzwerks-  
ofenbau  
Radex-Rundschau 1954 Heft 3 (63—65)
5. Pavko, Seničič, Souvent: Toplotna prevodnost domačih  
vatrostalnih materijala  
(Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, 1966)
6. F. Ro: Handbuch der Giesserei-Technik (1960)  
Giesserei-Technik (1960)
7. E. Siebel: Handbuch der Werkstoffprüfung (1958)
8. Kaye and Laby: Physical and chemical constants (1959)
9. »Hütte«, Inženjerijski priručnik

#### ZUSAMMENFASSUNG

Es ist die Apparatur zur Messung der Wärmeleitfähigkeit beschrieben, die nach der Schröder-Methode aufgebaut ist.

Es wurde die Wärmeleitfähigkeit auf ausgesuchten Mustern aus Grauguss, meliertem Guss, Stahlrohren und Kugelgraphitguss gemessen. Die Muster aus Stahlrohren und meliertem Guss hatten eine Wärmeleitfähigkeit von 13 bis 19 Kcal/m h°C, die Muster aus Kugelgraphitguss von

23 bis 28 Kcal/m h°C und die Muster aus Grauguss 28 bis 51 Kcal/m h°C.

Gesondert wurden noch Messungen von Wärmeleitfähigkeit an Proben aus Blechwalzenguss mit verschiedener Menge von Fosfidentektikum durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit bewegte sich von 21 bis 38 Kcal/mh°C. Es wurde die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der chemischen Analyse und der Menge an Fosfidentektikum aufgezeigt.



Diagram I

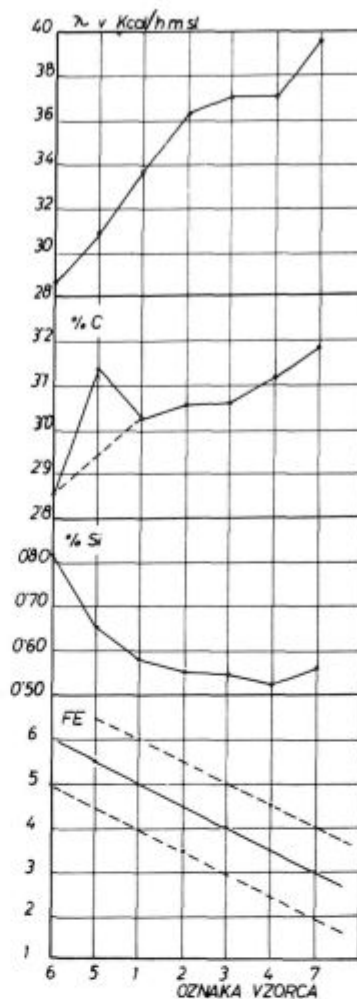


Diagram II.!

### SUMMARY

Apparatus for measuring of heat conductivity built on the basis of Schröder's method is described. Heat conductivity of grey iron, white iron, malleable iron and modular cast iron samples was measured. Heat conductivity of white iron and malleable iron samples have been determined from 13 to 19 kcal/m, h, °C, heat conductivity of modular cast iron from 23 to 28 kcal/m, h, °C and heat conductivity of grey iron from 28 to 51 kcal/m, h, °C.

Heat conductivity of material for rolls for plate mills with different quantities of phosphide eutectic was measured separately. Heat conductivity have been in a range between 29 to 38 kcal/m, h, °C. Dependence between heat conductivity and chemical analysis and quantity of phosphide eutectic is shown.

## Statistična analiza livarskih surovin

### Uvod

Opisana je praktična uporaba metod statistične kontrole in analize statistične porazdelitve pri glavnih lastnostih livarskega peska in nekaterih izdelanih livarskih mešanic. Že na začetku uporabe so te metode privedle do nekaterih pomembnih ugotovitev o stanju kvalitete peskov in izdelanih mešanic. Obravnava se možnost nadaljnje uporabe metod statistične analize pri kontroli in raziskavah livarskih surovin.

Z uvodnimi poizkusi uvajanja statističnih metod smo izbirali najprimernejše načine, s katerimi bi tekoče zasledovali nivo kvalitete in njeno enakomernost ter dobili vedno pravočasna opozorila o nenormalnostih v tehnološkem postopku ali pa v kvaliteti surovin. Ker so te metode dale na drugih področjih že dobre rezultate in po informacijah z uvodnimi poizkusi obetajo uspeh tudi v livarni, smo se odločili, da jih začnemo postopoma uvajati v redni postopek priprave dela, tehnologije in kontrole v livarni.

Začeli smo na področju surovin, ker je to najbolj kritično, obenem pa s stališča razpoložljivih podatkov tudi najprimernejše. V tem članku bodo prikazani praktični primeri in opisan način uporabe metod matematične statistike prav s tega področja.

Laboratorij za preizkušanje livarskih surovin že od začetka svojega obstoja kontrolira dospele peske, veziva in izdelane mešanice. V arhivu laboratorija se nabira velika zaloga podatkov, ki pa doslej ni bila učinkovito izrabljena. Kljub temu, da smo mesečno kontrolirali veliko število izdelanih mešanic, peska in bentonita, nismo vedeli odgovarati na marsikatero važno vprašanje: kako naj utrdimo z dobavitelji surovin primerne prevzemne pogoje, na kakšnem kvalitetnem nivoju je priprava mešanic v livarni, s čim lahko vplivamo na nivo kvalitete mešanic, in kar je najvažnejše, kako določeni nivo kvalitete mešanic in njegovo spreminjanje vpliva na kvaliteto ulitkov. Še večji problem je zagotavljanje enakomernosti na vseh področjih in pregled nad širino naravnih toleranc, ki so odločilne za končno kvaliteto izdelkov.

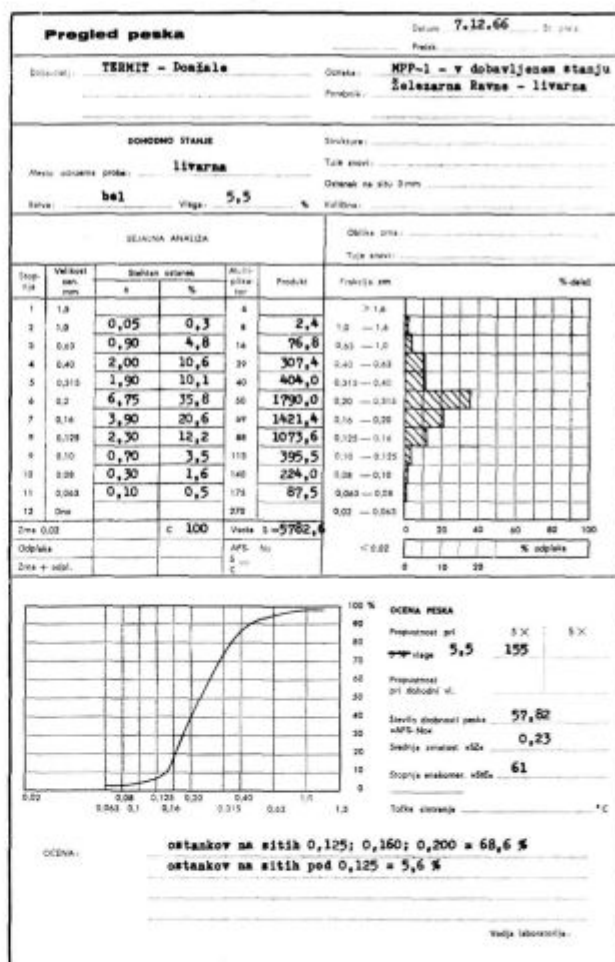
Pogled v knjigo z vpisanimi podatki o lastnostih surovin nam odgovorov na ta vprašanja ni mogel dati. Najbolj kritična je bila stvar ob občasnem pojavljanju izredno slabe kvalitete ulitkov. Ob takih primerih se pojavijo razne površne ocene vzrokov. Ni pa bilo možno objektivno odkriti področij oz. tehnoloških faz, kjer so se pojavile nenormalnosti in pretehtati njihovega vpliva. Z

neosnovanimi ukrepi smo nihanje kvalitete največkrat še povečali in z eventualno rešitvijo problema v eni fazi lahko nepremišljeno povzročili nove probleme v drugih fazah ter s tem v celoti stanje poslabšali.

Za tekoče spremljanje so najprimernejše statistične kontrolne karte. Tehnika uporabe kontrolnih kart bo podrobno opisana v eni od naslednjih števil Zvezarskega zbornika, zato se bomo tu omejili le na najpotrebnejša pojasnila.

### Statistična analiza pranih peskov

Od lastnosti, ki se pri pranih peskih redno določajo, so nas za statistično analizo najbolj zanimali:



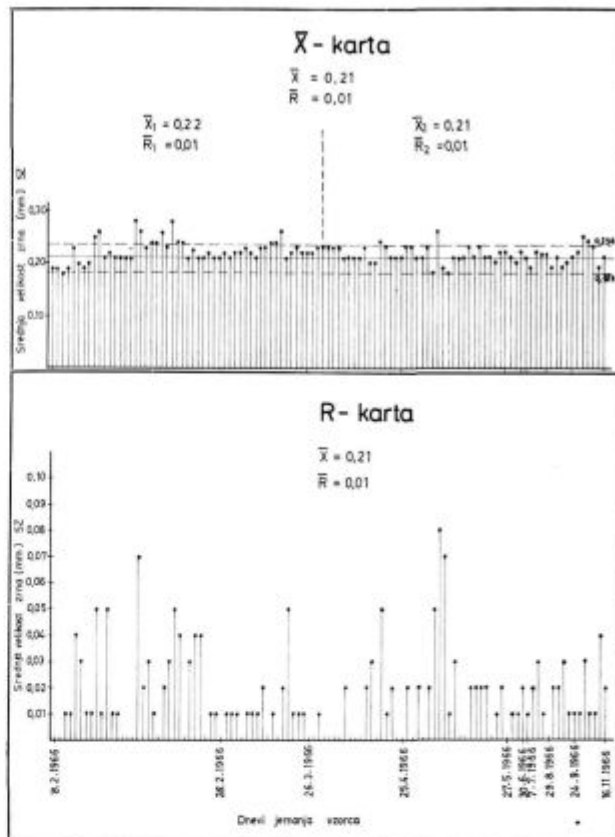
Slika 1  
 Primerek poročila laboratorija za preiskavo livarskih materialov o pregledu dospelega pranege peska.

1. Število zrnatosti (AFS-No)
2. Srednja velikost zrn (SZ)
3. Stopnja enakomernosti (StE)
4. Vsota vseh frakcij na sitih 0,125, 0,160, 0,200 mm
5. Vsota vseh frakcij na sitih pod 0,125 mm
6. Propustnost pri 5 odstotkih vlage

Vse te lastnosti se redno kontrolirajo in za vsak pregled peska se izdela poročilo, ki ga kaže slika 1.

Za statistični pregled je bilo vzeto obdobje leta 1966 od 2. februarja do 16. novembra. Na slikah 2, 3, 4, 5, 6 in 7 so grafični prikazi zgoraj navedenih lastnosti. Tak način prikazovanja imenujemo karte X-R. Na karti X prikazujemo spreminjanje kvalitetnega nivoja kakršnekoli lastnosti.

Prikaz enakomernosti dobimo, če v podoben diagram nanašamo razlike rezultatov, ki jih dobimo iz pregledov dveh zaporednih vzorcev. Tak prikaz imenujemo karta R. Ti diagrami se iz grafičnega prikaza spremenijo v statistično kontrolno karto šele, ko jih opremimo z naravnimi tolerancami t. j. z zgornjo in spodnjo kontrolno mejo. Meje naravnih toleranc izračunamo na osnovi verjetnosti za območje, v katerem pod vplivom slučajnosti pričakujemo vrednosti z 99,73 odstotno statistično gotovostjo. Pojavljanje vrednosti izven teh mej opozarja na nenormalnosti, ki se pojavljajo pod vplivom nedovoljenih faktorjev.



Slika 3  
Karakteristike livarskega peska MPP-1 v obdobju od 8. februarja do 16. novembra 1966. Srednja velikost srna (SZ).

Centralne linije na kartah X smo izračunali na navadnem računskem stroju po znani formuli:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

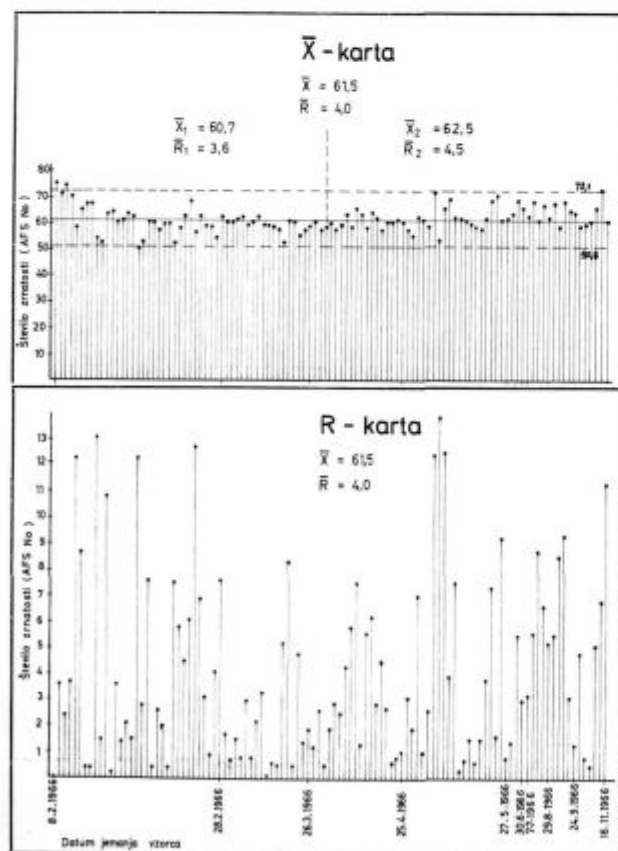
$$\bar{R} = \frac{\sum R}{n-1}$$

Območje naravnih kontrolnih mej je:

$$\bar{X} \pm 2,66\bar{R}$$

Naravne kontrolne meje nam z ozirom na ugotovljeno točnost brez ozira na kakršenkoli predpis ločijo slučajna nihanja od neslučajnih — normalno nedovoljenih. To velja za karto X, ki predstavlja kvalitetni nivo, in enako za karto R, ki predstavlja točnost ali enakomernost. Za ugotovitev eventualne spremembe kvalitetnega nivoja in točnosti procesa smo še vse vrednosti razdelili na dve obdobji in za vsako posebej izračunali vrednosti  $\bar{X}_1$  in  $\bar{X}_2$  ter  $\bar{R}_1$  in  $\bar{R}_2$ . S posebno statistično analizo lahko izračunamo pomembnost razlik srednjih vrednosti dveh ali več serij.

S prikazano statistično analizo smo dobili orientacijo o tem, v kakšnih mejah so se v analiziranem obdobju gibale vrednosti posameznih karakteristik livarskih peskov. Take vrednosti lahko



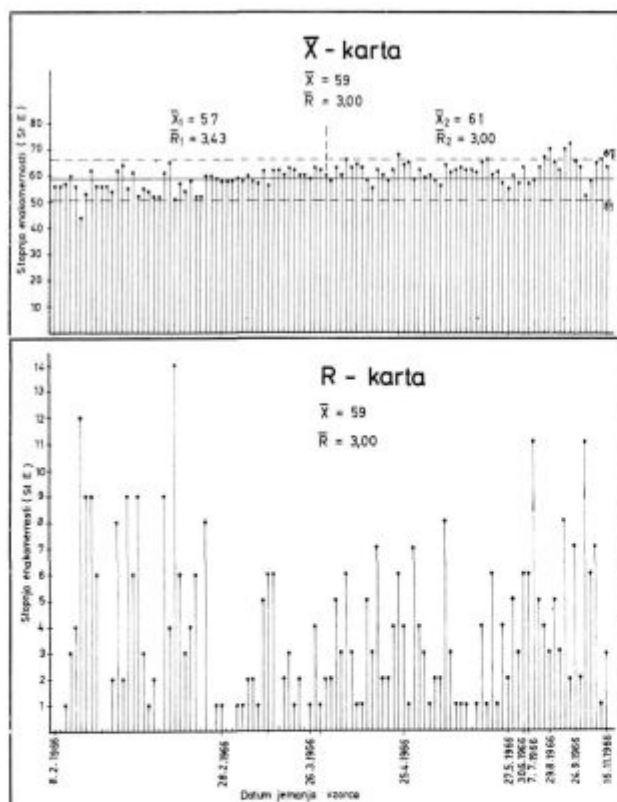
Slika 2  
Karakteristike livarskega peska MPP-1 v obdobju od 8. februarja 1966 do 16. novembra 1966. Število zrnatosti (AFS-No).

tudi v bodoče pričakujemo ob enakih pogojih. S kontrolno karto lahko točno in objektivno analiziramo dejanske možnosti proizvajalca ali dobavitelja surovin pod pogojem, da v njegovem postopku ne dopušča grobih nenormalnosti. Obenem pa sami sebe zavarujemo pred pretiranimi nesmiselnimi zahtevami.

Zanimiv je primer propustnosti: Ko smo na podlagi ocen po občutku zahtevali od dobavitelja, naj bo propustnost peska najmanj  $180 \text{ cm}^3/\text{cm}^3\text{min}$ , nam je obljubil, da bo storil, kar bo možno, da tej naši zahtevi ugotovi. Ta naša zahteva je temeljila na dejstvu, da je med pošiljkami dejansko bilo nekaj takih z zahtevano propustnostjo in smo na podlagi tega sklepali, da je to možno doseči. Vendar se propustnosti niso bistveno spremenile. Če bi prej napravili zgoraj opisano statistično analizo, bi morali to tudi logično pričakovati. Zdaj vemo mi in dobavitelj, da lahko bistveno spremenimo nivo propustnosti samo s temeljito spremembo tehnološkega postopka pri pranju peska. Dokler se to ne zgodi, morajo veljati ugotovljene naravne meje za popolnoma normalne, njim pa se moramo kolikor mogoče prilagoditi.

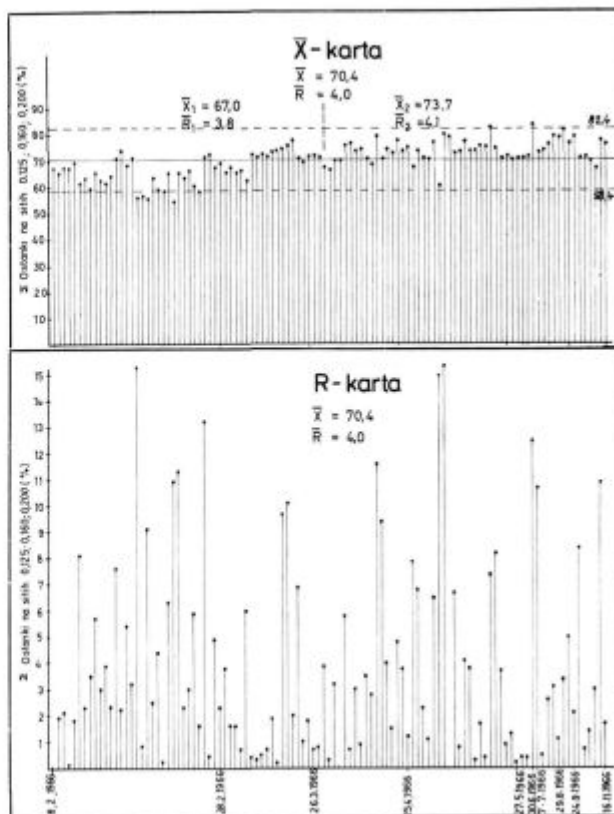
Kaj nam je statistična analiza peskov pokazala?

1. Pri vseh lastnostih opazimo zelo velika nihanja v zajetem časovnem obdobju.



Slika 4

Karakteristike livarskega peska MPP-1 v obdobju od 8. februarja 1966 do 16. novembra 1966. Stopnja enakomernosti (StE).



Slika 5

Karakteristike livarskega peska MPP-1 v obdobju od 8. februarja 1966 do 16. novembra 1966. Ostanek na sitih 0,125, 0,160 in 0,200 mm.

Število zrnatosti (AFS-No) niha v območju od 50,8 do 72,1.

Srednja velikost zrn (SZ) niha od 0,183 do 0,236 mm.

Stopnja enakomernosti (StE) niha od 51 do 67.

Vsota ostankov na sitih 0,125, 0,160 in 0,200 niha od 58,4 do 82,4 %.

Vsota ostankov na sitih pod 0,125 mm niha od 1,3 do 12,9 %.

Propustnost niha od 125,5 do 190,5  $\text{cm}^3/\text{cm}^3\text{min}$ .

2. Razlike med sukcesivnimi vzorci so manjše v sredini analiziranega obdobja, večje pa na začetku in na koncu.

3. Pri nekaterih lastnostih (srednja velikost zrn) opazimo kratka časovna razdobja z zelo enakomernimi rezultati. Ta so ponekod ista za več lastnosti. Iz tega lahko sklepamo, da smo v takih obdobjih dobivali pošiljke z istega odkupnega mesta.

4. Srednje vrednosti so po naši oceni premajhne pri SZ, StE in propustnosti. Prevelike pa so pri AFS-No in vsoti frakcij pod 0,125 mm.

Za bentonite je podobna statistična analiza v delu.



## Statistične analize izdelanih livarskih mešaníc

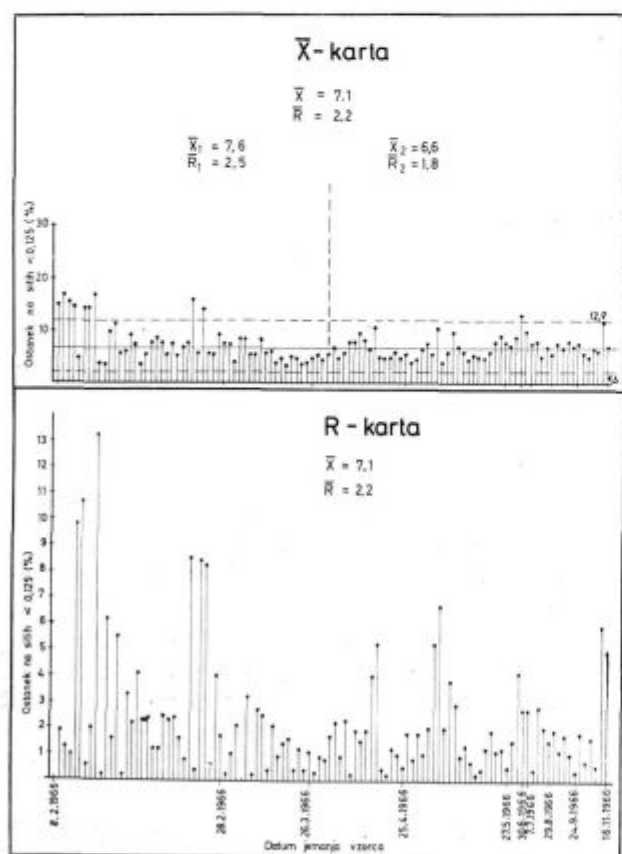
Podatke o lastnostih mešaníc dobivamo enakomerno po časovnih obdobjih in vsak mesec toliko, da jih je dovolj za metodo statistične analize porazdelitve. Obdelava podatkov bi po starem načinu zahtevala preveč časa, zato smo pristopili k uvajanju obdelave podatkov na elektronskem računalniku. Ves matematični del od priprave podatkov do interpretiranja rezultatov je opisan v članku inž. B. Rodeta v tej številki Zelezarskega zbornika. Tu naj se torej dotaknemo le stvari, ki zanimajo livarje.

V livarni uporabljamo več vrst mešaníc, od katerih smo izbrali za interpretacijo naslednje:

1. Mešanico S-1 za formanje na večjih kaluparskih strojih,
2. Mešanico S-2 za formanje na manjših kaluparskih strojih,
3. Mešanico P-1 za formanje na peskometalcu in
4. Mešanico R-1 za ročno formanje form, ki se potem sušijo v peči.

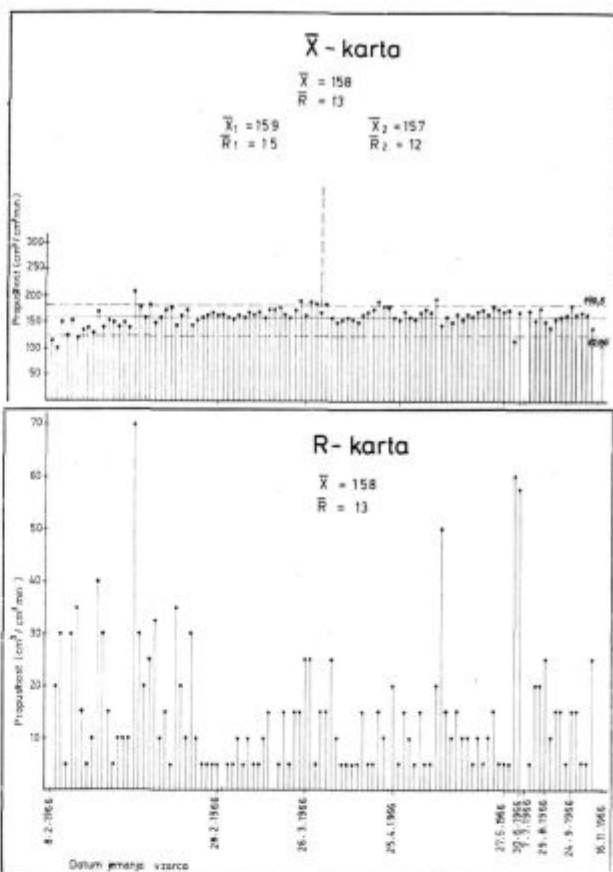
Glavne sestavine vseh navedenih mešaníc so kremenčev pesek, bentonit, dekstrin in voda.

Od lastnosti, ki se redno kontrolirajo, smo vzeli v statistično analizo:



Slika 6

Karakteristike livarskega peska MPP-1 v obdobju od 8. februarja 1966 do 16. novembra 1966. Ostanek na sitih pod 0,125 mm.



Slika 7

Karakteristike livarskega peska MPP-1 v obdobju od 8. februarja 1966 do 16. novembra 1966. Propustnost pri 5 odstotkih vlage.

1. vlago
2. propustnost
3. tekočnost
4. površinsko trdoto
5. tlačno trdnost
6. gostoto

Podatki o vseh vrednostih navedenih lastnosti se natipkajo na teleprinterju programerske mize. S pomočjo perforiranega traku teleprinterja se podatki hitro prenesejo v spomin računalnika. Ta računa in izpiše vse rezultate po vnaprej postavljenem programu. Za našo analizo smo zahtevali sledeče rezultate:

1.  $N$  = število vrednosti  $X$  v grupi
2.  $\bar{X}$  = srednja vrednost vseh  $X$  v grupi
3.  $s$  = standardna deviacija  $\sigma$ , ki jo računalnik izpiše kot  $s$

4.  $V$  = koeficient variacije v % ( $V = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100$ )

5.  $\bar{X} + 3s$  = zgornja meja v grupi
6.  $\bar{X} - 3s$  = spodnja meja v grupi

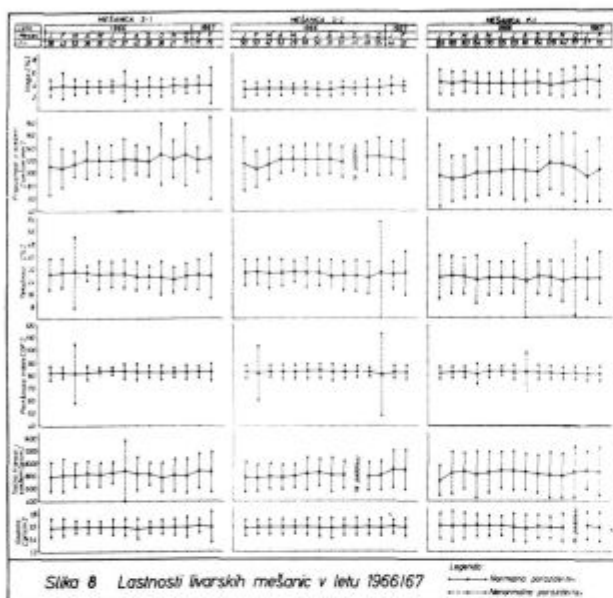
Poleg tega računalnik preveri, če je porazdelitev vrednosti v grupi normalna in to tudi zapiše.

Če ni, jo razdeli na razrede in izračuna frekvence v odstotkih za vsak razred.

Način pričakovanja normalnih in nenormalnih porazdelitev v verjetnostni mreži oziroma v histogramu je opisan v že omenjene članku inž. B. Rodeta.

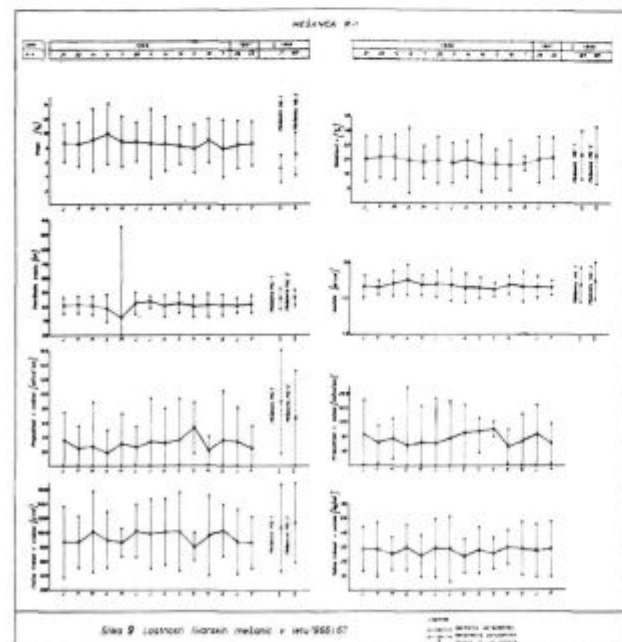
Rezultate teh izračunov za mesečne analize

Centralno linijo za  $\bar{X}$  izračunamo po formuli: statistične porazdelitve pregledno prikazujemo z grafikoni na slikah 8 in 9. Na njih so prikazane mesečne srednje vrednosti posameznih lastnosti,



Slika 8

Lastnosti livarskih mešanic za mokre forme v obdobju leta 1966/67

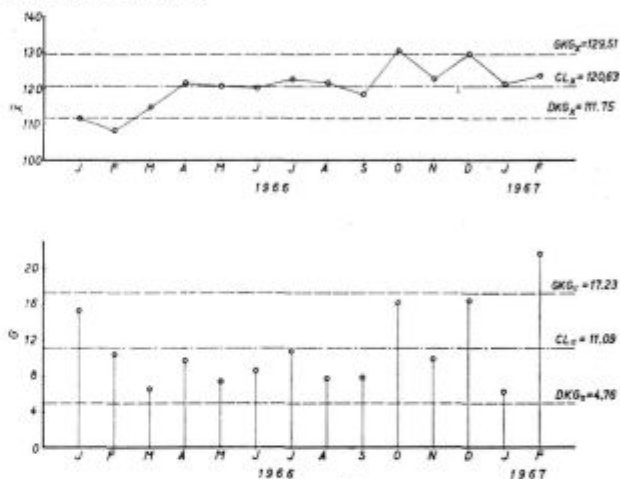


Slika 9

Lastnosti livarskih mešanic za suhe forme v obdobju leta 1966/67

naravne meje na osnovi 99,73 odstotne statistične zanesljivosti in število analiziranih mešanic v mesecu. Pri mešanicah, za katere imamo mesečno premalo podatkov za statistično analizo porazdelitve, je ta izdelana za celo leto (mešanica MG-1 in MG-2). Poleg tega so s črtkanimi razponi označene vse porazdelitve, ki niso normalne po statističnih ocenjevalnih kriterijih.

Rezultati, ki jih da računalnik, tudi dobro služijo za risanje tako imenovanih kart  $\bar{X} - \sigma$ . Medtem ko so diagrami na slikah 8 in 9 samo grafični prikazi, so karte  $\bar{X} - \sigma$  prave statistične kontrolne karte, ki kažejo spreminjanje nivoja in enakomernosti posameznih lastnosti po mesecih. Eno takih kart vidimo na sliki 10. V zgornji del diagrama vnašamo  $\bar{X}$ , v spodnji del pa standardno deviacijo  $\sigma$  za vsak mesec.



Slika 10

Primer karte  $\bar{X} - \sigma$  za propustnost v svežem. Mešanica S-1.

$$CL_{\bar{x}} = \frac{\sum \bar{X}}{n} = \bar{\bar{X}}$$

Spodnjo kontrolno mejo za  $\bar{X}$  izračunamo po formuli:

$$DKG_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - \frac{3}{\sqrt{n}} \cdot \bar{\sigma}$$

Zgornjo kontrolno mejo izračunamo po formuli:

$$DKG_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + \frac{3}{\sqrt{n}} \cdot \bar{\sigma}$$

Centralno linijo za  $\sigma$  izračunamo:

$$CL_{\sigma} = \frac{\sum \sigma}{n} = \bar{\sigma}$$

$$DKG_{\sigma} = \left(1 - \frac{3}{\sqrt{2n}}\right) \cdot \bar{\sigma}$$

$$GKG_{\sigma} = \left(1 + \frac{3}{\sqrt{2n}}\right) \cdot \bar{\sigma}$$

Tako izračunane meje vrišemo v karto  $\bar{X} - \sigma$ . Na enak način kot ga prikazuje slika 10, lahko izdelamo statistične karte za vse ostale lastnosti.

Kaj nam je statistična analiza livarskih mešanic pokazala?

1. Srednje vrednosti lastnosti se po mesecih ne spreminjajo mnogo.

2. Odstopanja od srednjih vrednosti so zelo velika in pri nekaterih lastnostih od meseca do meseca različna. Majhen interval odstopanj kažeta le lastnosti 'površinska trdota' in 'gostota'.

3. Mešanice P-1 imajo večji interval porazdelitve lastnosti kot mešanice S-1 in S-2, čeprav se izdelujejo iz istih surovin. Razlika je v tipu mešalnika in načinu doziranja sestavin. Sklepamo, da je to vzrok razlike v enakomernosti.

4. V nekaterih mesecih se je pojavilo pri nekih lastnostih nenormalno veliko odstopanje v statistični porazdelitvi. To kaže, da so v proces prave mešanice vstopili neki nekontrolirani faktorji, ki so vplivali na neenakomernost lastnosti.

5. Kljub temu, da so srednje vrednosti na zadovoljivem nivoju, upoštevajoč surovine, ki so na voljo, se zaradi velikega nihanja vrednosti lahko ob neugodni kombinaciji pojavi večje število popolnoma neuporabnih mešanic. N. pr. vlaga 6%, propustnost 60 pri mešanici S-1 v februarju 1967. leta. Take mešanice skoraj gotovo povzročijo slabo kvaliteto ulitkov, zato moramo uporabo takih pravočasno preprečiti.

6. Največje nihanje vrednosti opazimo pri mešanicah R-1 za sušene forme. Te mešanice se sestavljajo iz dveh različnih vrst peska in je že to dodatni faktor, ki poveča nihanje lastnosti.

### Zaključki

Že začetne raziskave na področju uvajanja statistične kontrole in analize na področju livar-

skih surovin so pokazale, da bo možno za vsak posamezni problem najti primerno metodo statistične obdelave. Čeprav te začetne analize še ne dajejo direktne korelacije med posameznimi lastnostmi peskov in kvaliteto ulitkov, pomagajo držati glavne surovine na primernem kvalitetnem nivoju in enakomernosti. Namesto nepregledne množice podatkov po knjigah bo odslej laboratorij za preiskavo livarskih materialov izdajal periodična poročila vsem zainteresiranim v pregledni obliki. Poročila o gibanju kvalitete surovin bodo vsebovala:

— analizo porazdelitve vseh glavnih lastnosti surovin,

— primerjavo serij z opozorili o pojavu pomembnih razlik nivoja ali enakomernosti.

Osnova za dnevno kontrolo bodo kontrolne karte  $\bar{X}-R$ . Te karte bodo priložene periodičnim poročilom. Za mešanice, kjer imamo v enem mesecu dovolj podatkov za analizo statistične porazdelitve, bomo vodili mesečne kontrolne karte  $\bar{X}-\sigma$ . Vsak mesec bo dodana k prejšnjim podatkom za  $\bar{X}$  in  $\sigma$  nova vrednost in bo tako omogočena pregledna primerjava po mesecih. Kjer pa v obdobju enega meseca ni dovolj podatkov za analizo porazdelitve (navadno je to pri podatkih o dospelih surovinah), bomo karte  $\bar{X}-\sigma$  izdelali za daljše obdobje.

Tako bodo že izdelane analize statistične porazdelitve za leto 1966 ne glede na to, kakšno stanje so odkrile, služile za dobro primerjavo stanja na startu in poznejših sprememb.

## ZUSAMMENFASSUNG

Es sind einige Arten beschrieben, wie wir aus der unübersehbaren Anzahl der Daten auf dem Gebiete der Giessereirohstoffe mittels statistischer Methoden von Kontrollkarten und der Analyse der statistischen Verteilung übersichtliche und verwendbare Aufstellungen machen. Einige praktische Beispiele sind aus den statistischen Darstellungen der Haupteigenschaften von Giessereisand und der angefertigten Mischungen im Zeitraum von unge-

fähr einem Jahr genommen worden. Diese Darstellungen halfen uns zu bemerkenswerten Feststellungen über den Zustand der gewaschenen Sande und der in der Giesserei angefertigten Mischungen zu kommen. Eine noch grössere Bedeutung haben diese zum Vergleich des Zustandes der Giessereirohstoffe zu Beginn der Einführung von statistischen Methoden mit dem künftigen Zustand, welcher das Resultat von Verbesserungsingriffen sein soll.

## SUMMARY

Some methods are described how out random data multitude in the foundry raw material field, organized and usefull presentations are made by use of statistical methods of control cards and statistical analysis of distribution. Some practical examples are taken from statistical presentation of main characteristics of pure foundry sand and made up mixtures in a period of a year. These present-

tations helped us to come to very important conclusions about incoming washed sands and made up mixtures in the foundry shop.

Statistical methods are giving us powerfull tool with which we are going to improve quality of foundry sands in near future.

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

## Tehnična navodila avtorjem

1. Rokopis mora biti dostavljen v originalu in ne kopija. Pisan mora biti z dvojnimi presledki tako, da se med vrstami lahko napiše nova vrsta in 4 cm robom na levi strani.
2. Clanki naj bodo pisani kratko in jedrnato. Članek mora imeti na začetku kratek rezume. Clanku je treba priložiti izvleček, ki naj obsega približno pol tipkane strani in mora biti napisan v 3 izvodih. Ta izvleček bo natisnjen v nemškem, angleškem in ruskem jeziku. Na koncu članka je treba priložiti tudi podpise k slikam na posebnem papirju. Slike in fotografije je treba zaporedno oštevilčiti s svinčnikom v skladu z besedilom. Številke slik in fotografij je treba izpisati v rokopisu tudi na levem robu zunaj teksta in sicer v višini vrste, v kateri je slika ali fotografija v tekstu navedena. Da se izognemo napakam pri prevajanju, naj avtorji navedejo tehnične izraze tudi v nemškem, angleškem in ruskem jeziku, v kolikor so jim poznani.
3. Citirano literaturo je treba v tekstu označiti z zaporednimi številkami, npr. avtorji 3, 5 (številka zgoraj brez zaklepaja) in jo je na koncu članka tudi treba v celoti navesti z vsemi bibliografskimi podatki, npr.:
  - a) za knjige  
Avtorja navedemo s priimkom, sledi začetnica imena avtorja, naslov knjige, naslovu sledi izdaja (izdajo navajamo vedno v jeziku, v katerem je napisana, npr. 2. izd., 3. Aufl.), nato navedemo del, če je knjiga napisana v več delih, npr.: (D. 1, zv. 3, Teil 3, Bd. 5), sledi mesto izdaje, založba in leto izdaje, npr. Rapat 7 F. Die Edelstähle 5. Aufl. Berlin (Gröttingen) Heidelberg Springer Verlag 1962.
  - b) za revije  
Avtor, naslov članka (v narekovajih), neskrajšani naslov revije, mesto, kjer izhaja revija (v oklepaju), letnik (volume, Jahrgang), leto, strani (prva in zadnja stran), npr.: Stadler, F. »Über das Zegieren von nicht rostenden Stahl«, Neue Hütte (Leipzig) 11 (1966), stran 600—604.
4. Besede, ki naj se tiskajo razprto, naj se tipkajo prav tako razprto. Podčrtati pa je treba tiste besede, ki naj se tiskajo v kurzivi.
5. Obrazce in simbole v besedilu je treba vpisati jasno in čitljivo s črnilom.
6. Uporabljajo naj se uveljavljeni simboli za posamezne veličine po JUS AA 1020 in jih je treba v tekstu sproti tolmačiti.
7. Uporabljajo naj se enote in njih kratice po JUS A. A. 1040.
8. Fotografije morajo biti izdelane na trdem, belem papirju z visokim leskom in morajo biti kontrastne in jasne.
9. Risbe rišemo v taki velikosti, da po predvideni pomanjšavi njihove dimenzije ustrezajo širini tiskarskih stolpcev. Te širine so:
  - a) za en stolpec ..... 8 cm
  - b) za dva stolpca z vmesnim presledkom 16,5 cm.
 Višina risbe odnosno diagram je avtomatično določena s širino. Največ pa je lahko 23 cm, kolikor pač znaša višina tiskarskega stolpca.
10. Velikost fotografij (metalografskih in ostalih). V članku je treba po možnosti uporabljati en sam oziroma čim manj različnih formatov fotografij. Uporabljamo naslednji format fotografij: 57 × 81 mm (slikovno polje brez roba). Druge formate uporabljamo le izjemoma.
11. Velikost povečave.  
Če je le mogoče, povečujemo vse risbe s faktorjem 2, s tem, da upoštevamo velikost definitivnih risb (na klišejih). Širina enostolpčne risbe v tisku (8 cm) bo torej pri risanju 8 cm × 2 cm = 16 cm, kar pomeni, da bomo risali na A4 format. Opozarjamo na to, da s širino ne mislimo le širino okvirja diagrama, temveč celotno širino risbe skupno z napisom na ordinatni osi.
12. Oblika in velikost črk in številke za povečane risbe. Uporabljamo izključno posebne črke in številke, ki jih predpisuje JUS (črke in številke po JUS so iste kot po DIN). Na celi risbi uporabljamo v glavnem eno velikost črk. Le za indekse in za eventualne glavne naslove uporabljamo druge velikosti. Naslovi, oziroma opisi, se predvidijo po možnosti v tisku, pod sliko za njeno vrstno številko. V odvisnosti od povečave uporabljamo naslednje velikosti črk:

Povečava	Velikost črk (mm)		Indeksi (mm)		Event. naslovi (mm)	
	na risbi	v tisku	na risbi	v tisku	na risbi	v tisku
2 ×	4	(2)	3	(1,5)	7	(3,5)
2,5 ×	5	(2)	3,5	(1,4)	8	(3,2)
3,5 ×	7	(2)	5	(1,4)	12	(3,4)

Uporabljamo predvsem 2-kratno povečavo in pripadajoče velikosti črk.

### 13. Debelina črt:

V odvisnosti od povečave uporabljamo naslednje debeline črt:

Povečava	koordinatne osi ali okvirji diagramov	mreža diagramov	Debelina črt v mm za krivulje 1)	črt v mm za osnovne črte v risbah	prerezi (obrisi)	šrafure
2 ×	0,4	0,2	0,6	0,2	0,4	0,2
2,5 ×	0,5	0,3	0,8 (0,5)	0,3	0,5	0,3
3,5 ×	0,8	0,4	1,0 (0,8)	0,4	0,8	0,4

Vrednosti v oklepaju uporabljamo, kadar je v istem koordinatnem sistemu več krivulj, ki se morajo med seboj razlikovati.

Uporabljamo predvsem 2-kratno povečavo in pripadajoče debeline črt.