

Učinek uporabe procesnega računalnika v procesu legiranja jekla

UDK: 669.168.1.31,65.011.51
ASM/SLA: U4k, X14, D5, A5f, 1-54, 18-74

Jože Šegel

Neposredna uporaba procesnega računalnika in matematičnih metod optimiranja v procesu legiranja ima izreden ekonomski in kakovostni učinek. Kljub temu, da so razmere v jeklarni za uporabo računalnika vse prej kot idealne, lahko dosežemo znatne prihranke pri porabi ferolegur, izboljšamo lahko enakomernost končne kemijske sestave in znižamo odstotek kemijsko zgrešenih šarž.

Pričujoči članek spada v serijo člankov, ki so ali še bodo objavljeni v *Železarskem zborniku na temo »uporaba procesnega računalnika v elektro-jeklarni«* in opisuje izkušnje *Železarne Ravne na tem področju*.

MATEMATIČEN MODEL OPTIMIZACIJE IZRAČUNA DODATKA FEROLEGUR

Za celoten koncept uporabe procesnega računalnika v jeklarni je značilno, da se je treba posluževati različnih matematičnih metod optimiranja. Pri izračunu dodatka ferolegur še posebej izstopa kombinacija uporabe metod linearnega programiranja in statističnih regresijskih enačb.

Ciljna funkcija linearnega programa so minimalni stroški:

$$g = f(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n) \Rightarrow \min. \text{ ali} \quad (1)$$

$$g = \sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j \Rightarrow \min \quad (2)$$

pri čemer pomeni S_1, S_2, S_3, \dots strošek dodatka posamezne komponente legiranja

(C_j = cena, X_j = količina j -te komponente).

Omejitev linearnega modela je predpisana končna kemijska sestava jekla, ki ima za en kemijski element naslednjo obliko:

$$SM_{el} \leq VP + IZ_{el} \cdot \sum_{i=1}^n (d_i \cdot X_i) \leq ZM_{el} \quad (3)$$

SM_{el} = zahtevana spodnja meja za element (kg/t)

ZM_{el} = zahtevana zgornja meja za element (kg/t)

VP = vsebnost elementa v talini pred legiranjem (kg/t)

Jože Šegel, dipl. inž. met.: vodi službo za organizacijo in avtomatizacijo proizvodnih procesov v Železarni Ravne

IZ_{el} = izkoristek elementa pri legiranju
 d_i = delež elementa v i -t feroleguru (kg/t)
 X_i = količina i -t ferolegure (kg/t)

Pri obravnavanem modelu mora biti vsota vseh elementov v jeklu enaka 1 toni:

$$d_{lit} \cdot \sum_{j=1}^n IZ_{el-j} \cdot \sum_{i=1}^m (d_{i,j} \cdot X_{i,j}) \leq 1000 \quad (4)$$

d_{lit} = izplen litja

Dodatne omejitve linearnega modela optimiranja so razpoložljive količine posameznih surovin (enačba 5) in obvezno jemanje surovin zaradi tehnoloških razlogov (enačba 6):

$$X_{su,i} \leq Q_{su,i} \quad (5)$$

$$d_{su,i} \leq X_{su,i} \leq D_{su,i} \quad (6)$$

$d_{su,i}$ = minimalen dodatek i -t ferolegure (kg/t)

$D_{su,i}$ = maksimalen dodatek i -t ferolegure (kg/t)

$X_{su,i}$ = dodatek i -t surovine (kg/t)

$Q_{su,i}$ = razpoložljiva količina i -t ferolegure (kg/t)

Predpisana (zahtevana) kemijska sestava in tehnološko predpisani dodatki se med jekli razlikujejo. Zato je tudi dimenzija matrice, ki nastopa v linearnem programu, spremenljiva. Matrika je velika tudi do 30 vrstic \times 80 kolon in razvita iz zgoraj opisanih neenačb (1 do 6).

Osnovnemu linearnemu matematičnemu modelu je dodan statističen model v obliki večkomponentnih nelinearnih regresijskih enačb, ki pojasnjujejo zakonitosti v procesu izdelave jekla in povečujejo matematično determiniranost procesov in zanesljivost izračunov.

Regresijske enačbe (7) je mogoče poiskati s pomočjo obstoječih računalniških programov in podatkov iz proizvodnje. Za izračun dodatka ferolegur ima enačba izplena posameznega legiranega elementa naslednjo obliko:

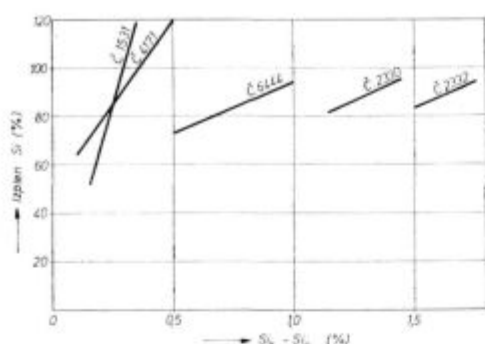
$$Izplen = A_0 + A_1 \cdot \% C_{pr} + A_2 \cdot \% ME_{pr} + A_3 \cdot (\% ME_{ko} - \% ME_{pr}) + A_4 (\% ME_{ko} - \% ME_{pr})^2 \quad (7)$$

kjer pomeni:

A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 = koeficient regresijske enačbe

$\% C_{pr}$ = vsebnost ogljika pred legiranjem (%)

$\% ME_{pr}$ = vsebnost metala v predpreizkušancu (%)



Slika 1
Izplen silicija pri različnih skupinah jekla
Fig. 1
Yield of silicon in various steel groups

$\% ME_{ko}$ = ciljana končna vsebnost metala v jeklu (%)

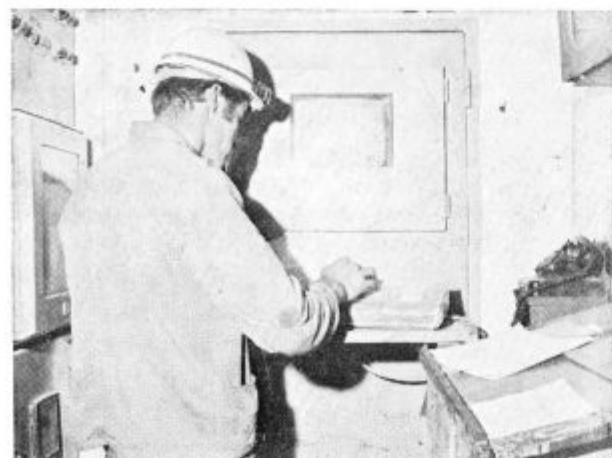
Slika 1 prikazuje odvisnost izplena silicija od porasta vsebnosti silicija med legiranjem. Za posamezne predstavnike skupin jekel so vrisane preme, ki ponazarjajo linearne regresijske enačbe:

$$Izplen_{Si} = A_0 + A_3 \cdot (\% Si_{ko} - \% Si_{pr}) \quad (8)$$

Iz splošnejše enačbe (7) smo dobili za izplen silicija razmeroma preprosto regresijsko enačbo. Za druge legirne elemente imajo regresijske enačbe drugačne oblike, vendar vse v okviru splošne enačbe (7).

Matematično statistični model regresijskih enačb, ki so mu dodane praktične izkušnje v obliki omejitev, je dinamičen, saj je koristno in potrebno občasno iskati nove regresijske enačbe, ki pojasnjujejo novosti v tehnološkem procesu. V Železarni Ravne je že izdelana II. in za nekatera jekla III. generacija regresijskih enačb izplenov.

V regresijsko enačbo so vključeni poleg izplena tudi drugi korekturni parametri, kot sistematične napake teže vložka, kemijska analiza in podobno. Zato izraz izplen ni povsem točen in pride do tega,



Slika 2
Talilec pri uporabi video terminala
Fig. 2
Smelter using video terminal

da dajo enačbe včasih tudi preko 100 % »izplen«. V takšnih primerih seveda ne gre za izplen, temveč le za korekcijski faktor.

Način uporabe računalnika

Z računalniškega vidika je uporabljen on-line open loop model (enolinijski model odprte zanke). To je model neposredne uporabe računalnika v toku proizvodnega procesa, pri katerem gredo informacije iz računalnika do človeka in ne direktno v proces.

Delovodja ali talilec pokliče računalniški program »LEGI« za izračun dodatka ferolegur preko video terminala (slika 2). Pokliče ga lahko kadarkoli. Običajno je to takrat, ko je pri ročnem izračunavanju pristopil k uporabi logaritmičnega računalja. Izračun lahko po potrebi večkrat ponovi.

```
----/LEGI
IZRAČUN DODATKA FEROLEGUR 24-SEP-78 12:05
SARŽA ? 22420
JEKLO ? ECM0100
```

CILJANA KEMIJSKA SESTAVA JEKLA: ECM0100

EL.	CILJ,%	ANAL.	PREDPIS	ENAC.
C	0.210	0.180	0.230	3.
S	0.035MAX	0.000	0.035	1.
SI	0.320	0.150	0.400	4.
CR	1.200	1.100	1.400	2.
CU	0.350MAX	0.000	0.350	1.
MN	1.040	0.900	1.200	4.
MO	0.235	0.200	0.300	2.
P	0.035MAX	0.000	0.035	1.
NI	0.300MAX	0.000	0.300	1.

PREDPISANA TEMPERATURA IZLIVA: ...1650.
IZPLEN VLOZKA(%): 90.00

PREDPISANI DODATEK KG/T:
MATERIAL V PEC V PON.
ALZV 1.35 0.40
CASI 0.00 1.50

ALI ZELIS POPRAVITI VREDNOSTI - D/N ? N

SKUPAJ SARŽIRANO /KG/ ? 47000

KEMIJSKA SESTAVA PREDPROBE:

- 1 C ? 0.12
- 2 S ? 0.025
- 3 SI ? 0.01
- 4 CR ? 0.42
- 5 CU ? 0.28
- 6 MN ? 0.40
- 7 MO ? 0.19
- 8 P ? 0.032
- 9 NI ? 0.08

Legenda:

— vtipka delovodja

ALI ZELIS POPRAVITI VREDNOSTI - D/N ? N

V NAPREJ DODANO PO PREDPROBI:

1 NAZIV ?

Slika 3
Dialog računalnik-talilec pri vnosu podatkov za izračun dodatka ferolegur

Fig. 3
Dialog between the computer and the smelter in data input for the calculation of ferroalloy additions

SARZA: 72420 JEKLO: ECM100 CAS: 12:07 DATUM: 24-SEP-78

MATERIAL	DODATI KG	ZE DODANO KG	STROSKI
ALZV	58.		1229.60
ALZV V PONOVCU	16.		339.20
CASI V PONOVCU	63.		2142.00
FENO	35.		7350.00
FECRA	31.		666.50
FECRC	431.		6120.20
SINH	477.		4626.90
SICR	97.		1503.50

SKUPAJ: 1208. 23977.90

TEZA VLOZKA 47000.
 TEZA SARZE V PONOVCU BO 43268.
 STROSKI LEGIRANJA (DIN/KG) 0.55
 PADEC TEMPERATURE PRI LEGIRANJU ... 55.

	DODANO KG	PREDPR.	IZRACZ	CILJ	ANAL.	PREDPIS	IZPLEN
C	37.59	0.120	0.210	0.210	0.180	0.230	106.671
S	0.02	0.025	0.024	-0.035	0.000	0.035	100.000
SI	160.10	0.010	0.320	0.320	0.150	0.400	83.840
CR	347.92	0.470	1.200	1.200	1.100	1.400	92.090
CU	0.03	0.280	0.274	-0.350	0.000	0.350	100.000
MN	316.63	0.400	1.040	1.040	0.900	1.200	88.678
MO	25.11	0.190	0.235	0.235	0.200	0.300	84.847
P	0.01	0.032	0.031	-0.035	0.000	0.035	100.000
NI	0.00	0.080	0.078	-0.300	0.000	0.300	100.000
FE			96.587	IZRAVNAVA			

ALI BOŠ IZRACUN UPORABIL PRI LEGIRANJU - D/N ? D

Slika 4
 Rezultat izračuna dodatka ferolegur
 Fig. 4
 Result of calculation of ferroalloy addition

To pride v poštev takrat, kadar želi zaradi priprave ferolegur dobiti orientacijski izračun. Klicanje programa »LEGI« pri predlegiranju je samostojno in se od končnega legiranja loči v toliko, da je pred nazivom jekla črka P (predlegiranje). Za to novo oznako jekla ima računalnik pripravljen povsem samostojen model izračuna dodatka ferolegur.

Delovodja vtipka v video terminal po načelu vprašanje — odgovor osnovne vhodne podatke:

- številko šarže,
- oznako jekla,
- težo vložka in
- kemijsko sestavo zadnjega predpreizkušanca.

Kot kaže slika 3, je mogoče v primernem trenutku začasno prilagoditi računalniški model izračuna posebnim zahtevam ali situacijam pri peči. Zniža ali poviša se ciljana kemijska sestava posameznega elementa, prepove ali vsili se dodatek

določene ferolegure itd. Takšne manipulacije pri legiranju nastopajo razmeroma redko. V Železarni Ravne je v teku projekt direktne povezave procesnih računalnikov v kemijskem laboratoriju z glavnim računalnikom jeklarne. Ta povezava bo omogočila neposreden prenos kemijske analize predpreizkušanca v program »LEGI« in se bo s tem ročno vtipkavanje podatkov skrajšalo.

Na sliki 4 je prikazan rezultat izračuna dodatka ferolegur. Razdelimo ga lahko v dva dela:

— V prvem delu so izpisani podatki, koliko posameznih ferolegur je potrebno vreči v peč ali ponovcu. Dopisani so tudi stroški legiranja.

— V drugem delu so podrobnejši podatki izračuna. Podatki povedo: koliko čistega legiranega elementa bo dodano (DODANO KG), kemijska analiza predpreizkušanca (PREDPR.), računski končni kemijski analiza (IZRAC %), ciljana kemijska analiza (CILJ), analizi predpis (ANAL. PREDPIS) in izračunan izplen elementa (IZPLEN).

Rezultat izračuna se shrani v eksterni računalniški spomin in ga je mogoče kasneje vrniti nazaj na video terminal. Poleg tega se rezultat izračuna zaradi dokumentacije in kasnejših analiz izpiše na papir glavnega terminala jeklarne. Vsi pomembnejši podatki iz računalnika se beležijo na ta terminal, ki predstavlja istočasno tudi rezervni terminal za primer izpada video terminala.

Uporaba računalniškega izračuna dodatka ferolegur je za delovodje ali talilce **neobvezno**. Delovodja se sam odloči, ali bo izračun uporabil v celoti ali samo delno, kajti samo on ve, ali je šarža normalno vodena, on je vtikal v računalnik ključne podatke za izračun in je še vedno odgovoren za končno kemijsko analizo jekla.

POSTOPEK UVAJANJA UPORABE PROCESNEGA RAČUNALNIKA

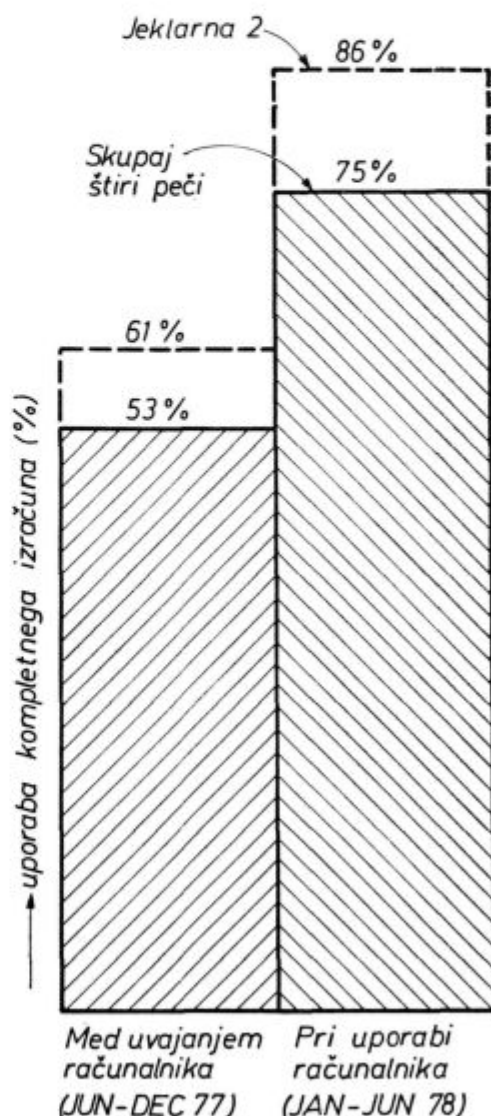
Za uvajanje izračuna dodatka ferolegur s pomočjo matematičnega modela in procesnega računalnika so značilne izredno zahtevne in obširne priprave. Priprava in umeritev matematičnih modelov izračuna dodatka ferolegur je povezana z obširnimi večkomponentnimi nelinearnimi analizami regresije. Takšna analiza je za podatke iz preko 3000 šaržnih kartonov izvedljiva praktično le s pomočjo večjega računalnika. Dela bi bilo še več, če v železarni ne bi izkoristili banke podatkov TKR na IBM računalniku, v kateri so shranjeni podatki o kemijski sestavi, mehanskih, metalografskih in drugih lastnostih izdelkov Železarne Ravne za obdobje več kot štirih let. V železarni se že več kot šest let pogosto uporablja računalnik pri matematično statističnih analizah, zato to delo ni bilo novo, vsekakor pa je bil nenavaden obseg analiz. Za preko 150 najbolj pogosto delanih jekel smo morali izdelati model izračuna dodatka ferolegur, pri čemer je potrebno usmeriti izračun vsakega legiranega elementa posebej. Med temi jekli je dobra tretjina takšnih, pri katerih nastopa dvakraten izračun dodatka ferolegur: predlegiranje in legiranje. Predlegiranje, ki zahteva posebne enačbe izplenov legirnih elementov in modelov izračuna dodatka ferolegur je sicer manj obsežno, vendar nič manj pomembno.

Skupaj s predlegiranjem je bilo potrebno pripraviti, umeriti in skrbno kontrolirati preko 800 modelov izračunov dodatka ferolegur. Pri tem predstavlja en model izračun dodatka več različnih ferolegur, za en legirni element in pri eni vrsti jekla. Tudi vseh 130 regresijskih enačb izplenov je bilo potrebno preveriti s testiranjem »za mizo«. Nekatere enačbe so se pokazale kot neuporabne in iskati je bilo potrebno nove. Še posebej intenzivna je bila kontrola modelov izračuna takoj po inštalaciji računalnika na Ravnah. V tem času je bil za vse delovodje in talilce organiziran tečaj uporabe računalnika pri legiranju. Da bi v modele izračunov dodatka ferolegur vgradili najboljši način le-

giranja, so bili v pripravljajna dela intenzivno vključeni izkušeni jeklarji.

Samo šest tednov po inštalaciji računalnika na Ravnah, to je 12. junija 1977, se je pričela na vseh štirih elektroobločnih pečeh neprekinjena uporaba računalnika pri legiranju in teče še danes, kar pomeni preko 13000 ur obratovanja računalnika. Računalnik dela 24 ur na dan in je delno izklopljen samo pri preventivnem vzdrževanju. Delovodja in talilci se poslužujejo računalnika neposredno sami, brez posredovanja računalniškega operaterja, ki dela tako samo na eno izmeno.

Naslednje tri mesece ni bila uvedena nobena druga aplikacija uporabe računalnika v jeklarni, kajti vsa pozornost je veljala neprekinjeni kontroli uporabe računalnika pri legiranju. Tudi javljanje rezultatov analiz preizkušancev iz kemijskega laboratorija se je na računalnik uvedlo kasneje.



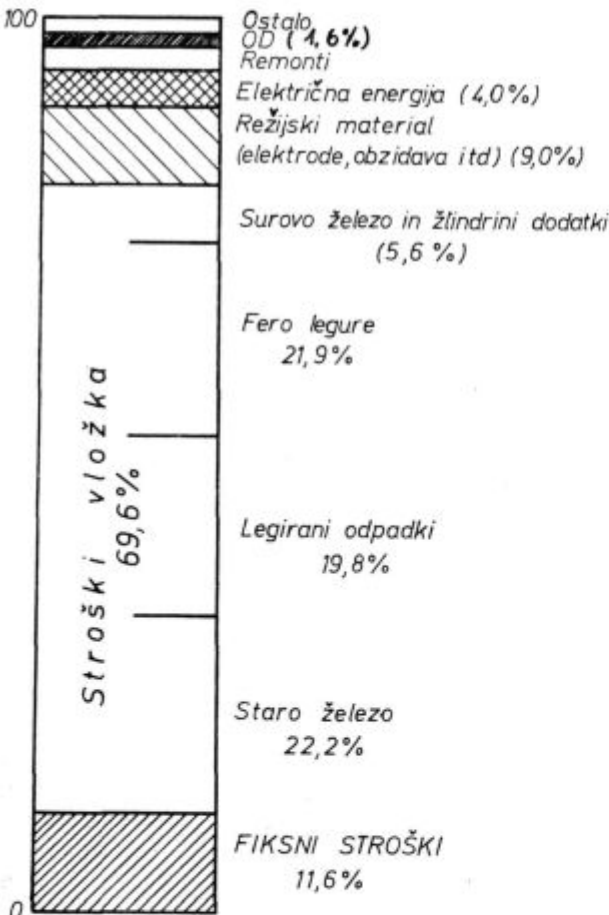
Slika 5
Pogostost uporabe kompletnega računalniškega izračuna
Fig. 5
Frequency of application of the complete computer system

To je takrat, ko je bila uporaba računalnika za legiranje osvojena in je postala sestavni del procesa izdelave jekla.

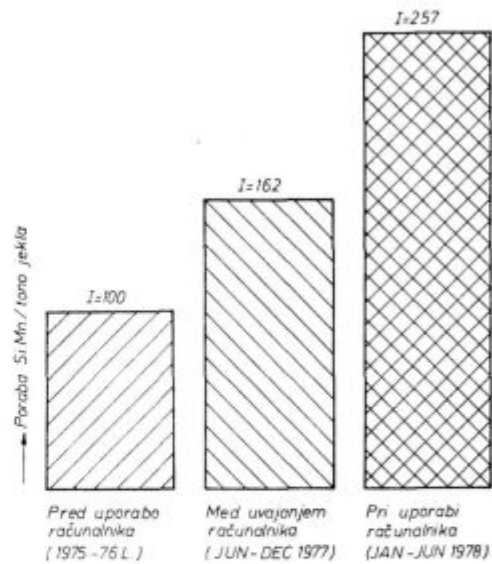
Eno od možnih meril uspešnosti uporabe računalnika pri legiranju je pogostost uporabe kompletnega računalniškega izračuna za dodatek ferolegur. V nekaterih ameriških jeklnah² se pogostost uporabe kompletnega izračuna giblje pri ogljikovih in nizko legiranih jeklih med 60 in 70 odstotkov. V Železarni Ravne (slika 5) je povprečna uporaba kolpletnega izračuna za vse vrste jekla in štiri peči enaka 75 %, samo za ogljikova in nizko legirana jekla pa je 86 %. Na sliki 5 je prikazan tudi povprečen odstotek uporabe kompletnega izračuna med uvajanjem uporabe procesnega računalnika.

Sprememba strukture porabe ferolegur

V jeklarni so stroški ferolegur v primerjavi z ostalimi stroški izredno visoki. Zato imajo spremembe strukture v porabi ferolegur močan vpliv na skupne stroške izdelave jekla. Na sliki 6 vidimo, da predstavljajo v železarni Ravne stroški ferolegur povprečno kar 22 % vseh stroškov surovega jekla. Zato ima znižanje porabe in spremem-



Slika 6
Struktura stroškov izdelave surovega jekla
Fig. 6
Cost structure in manufacturing raw steel



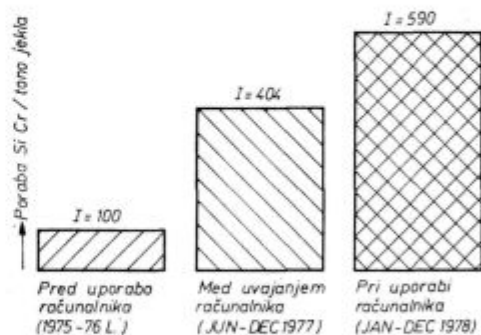
Slika 7
Povečanje porabe SiMn/tono jekla
Fig. 7
Increased consumption of SiMn per ton steel

ba struktur porabe ferolegur izredno močan ekonomski učinek. Razmeroma drag krom v FeCr suraffinē in mangan v FeMn suraffinē želimo, kolikor je le mogoče, zamenjati z večjo porabo cenejšega kroma v FeCr carburē in SiCr ter mangana v SiMn in FeMn carburē.

Neposreden učinek uporabe linearnega programiranja in procesnega računalnika na spremembo strukture porabe dragih in cenenih ferolegur nam kažejo slike od 7 do 12.

Na sliki 7 vidimo povečanje povprečne porabe SiMn/tono jekla. Indeks (I) porabe te ferolegure je narastel iz 100 pred uporabo računalnika na 257. To pomeni, da se je povprečna poraba te ferolegure povečala za 2,6 krat.

SiCr se je pred uvedbo računalnika uporabljal zelo redko in v glavnem le takrat, kadar je bil predpisan s tehnološkim procesom. Slika 8 kaže skoraj 6 kraten porast povprečne porabe SiCr/tono jekla. Že med uvajanjem se je poraba dvignila 4 krat. Tako močna sprememba porabe SiCr je za

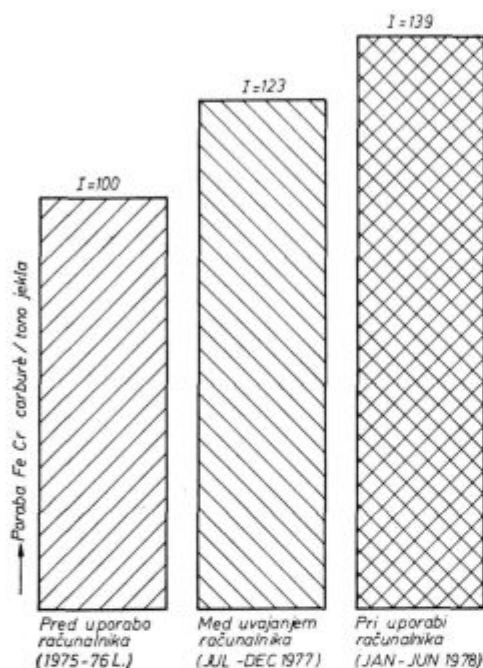


Slika 8
Povečanje porabe SiCr/tono jekla
Fig. 8
Increased consumption of SiCr per ton steel

vsakdanjo prakso zelo nenavadna in povezana z zaskrbljenostjo, ali bo res vse v redu. Pokazalo se je, da je bila zaskrbljenost odveč.

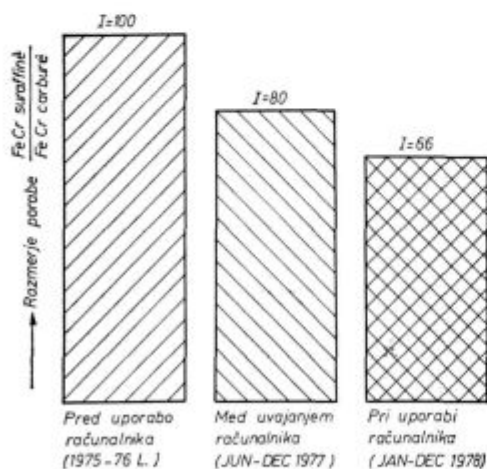
Tudi poraba FeCr carburè se je povečala, vendar le za 40 %. Onstotek sicer ni tako velik, vendar je to razumljivo, saj je bila poraba FeCr carburè pred uvedbo računalnika neprimerno večja kot poraba SiMn in SiCr (slika 9).

Na porabo ferolegur vpliva proizvodni program, zato je za objektivnejšo sliko primerno vzeti daljše obdobje in analizirati, kakšna je sprememba porabe drage ferolegure v primerjavi s porabo



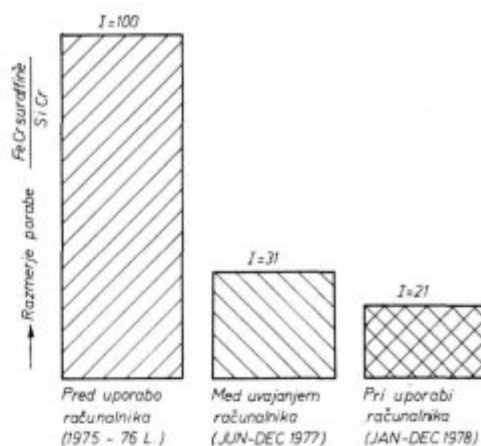
Slika 9
Povečanje porabe FeCr carburè/tono jekla

Increased consumption of FeCr carburè per ton steel

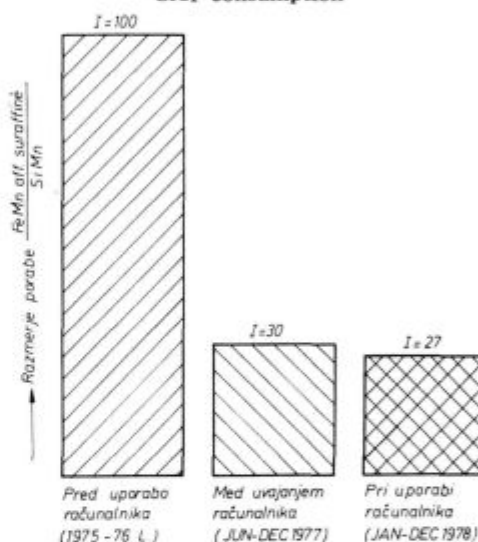


Slika 10
Znižanje porabe FeCr surrafinè v primerjavi s porabo FeCr carburè

Reduced consumption of FeCr surrafinè compared to FeCr carburè consumption



Slika 11
Znižanje porabe FeCr surrafinè v primerjavi s porabo SiCr
Fig. 11
Reduced consumption of FeCr surrafinè compared with SiCr consumption



Slika 12
Znižanje porabe FeMn aff + surrafinè v primerjavi s porabo SiMn
Fig. 12
Reduced consumption of FeMn aff + surrafinè compared with SiMn consumption

cene ferolegure. Na to razmerje imajo spremembe proizvodnega programa manjši vpliv.

Razmerje porabe FeCr surrafinè/FeCr carburè je prikazano na sliki 10. Že med uvajanjem je bilo prvič porabljen na mesec več FeCr carburè kot FeCr surrafinè. Razmerje se je v korist znižanja porabe drage ferolegure in povečanja porabe cene ferolegure znižalo za 34 %.

Kot kaže slika 11, se je razmerje porabe FeCr surrafinè/SiCr znižalo kar za 5 krat! To lahko pripišemo predvsem izrednemu povečanju porabe SiCr. Podoben učinek vidimo na sliki 12 pri spremembi razmerja FeMn aff + surrafinè/SiMn. Že med uvajanjem je opazen takojšen učinek uporabe računalnika in linearnega programiranja, saj se je razmerje med omenjenima ferolegurama spremenilo za 2/3 v korist znižanja porabe drage ferolegure v primerjavi s porabo cenejšega SiMn.

**POVEČANJE ENAKOMERNOSTI
KEMIJSKE SESTAVE IN ZNIŽANJE
ODSTOTKA KEMIJSKO ZGREŠENIH ŠARŽ**

Uporaba računalnika pri legiranju učinkuje na porazdelitve vsebnosti posameznih kemijskih elementov na več načinov:

a) S spremembo lege porazdelitve v ugodnejše področje:

- se zniža odstotek kemijsko zgrešenih šarž,
- zniža se povprečna vsebnost elementa in
- regulirajo se lahko nekatere lastnosti jekla.

b) S samo zožitvijo porazdelitve se zniža odstotek kemijsko zgrešenih šarž. Kakovost jekla je enakomernejša.

c) Zožitev in premaknitev porazdelitve v ugodnejše področje je najučinkovitejše, vendar ne vselej izvedljivo.

Zožitev porazdelitve se mora najprej zanesljivo dokazati in če je dovolj velika, sledi sprememba lege porazdelitve. Kadar širina porazdelitve ne dovoljuje spreminjati lego porazdelitve znotraj predpisane kemijske sestave, se zadovoljimo s tem, da ciljamo pri izračunu dodatka ferolegura v sredino

analiziranega predpisa in tako znižamo odstotek zgrešenih šarž na stvarni minimum.

Ugotavljanje dejanske porazdelitve posameznega elementa za vsako vrsto jekla posebej je povezano z obdelavo velikega števila podatkov. Obdelava podatkov mora biti dinamična. Ko je na razpolago dovolj podatkov, sledi analiza porazdelitve in analiza možnosti premaknitve porazdelitve v ugodnejše področje. V Železarni Ravne opravlja večino tega dela IBM 370 računalnik. S pomočjo posebnega programa obdelava vse končne kemijske analize in izpiše predloge za spremembo ciljane kemijske sestave. Primer takšnega izpisa kaže slika 13. Računalnik išče možnost spremembe ciljane kemijske sestave bližje spodnji predpisani meji, kar pa kljub predlogu ni vedno izvedljivo, saj lahko pri nekaterih jeklih s pretiranim nižanjem vsebnosti vseh legirnih elementov ogrozimo druge lastnosti jekla.

V nadaljevanju bo opisan za vse pomembnejše legirne elemente, skupine jekel in tehnologije izdelave, učinek uporabe računalnika. Za primerjavo sta vzeti dve obdobji:

— obdobje pred uporabo računalnika (leto 1975 in 1976) in

ŽELEZARNA RAVNE

KEM110A

DATUM: 01.08.78

PREDLOG SPREMEMBE CILJANE KEMIJSKE SESTAVE

JEKLO : Čo 4172 PROKRo 3

KODA - 8005

1o ANALIZNI PREDPIS: 12,000 - 14,000 %CR

2o STATISTIČNI PODATKI:

ŠTEVILO ŠARŽ	N=	30	
SREDNJA VREDNOST	X=	13,0265	
STANDARDNA DEVIACIJA	S=	0,2455	
SPODNJA MEJA (X-1,96*S)	=	12,5453	(X-3*S)= 12,2900
ZGORNJA MEJA (X+1,96*S)	=	13,5076	(X+3*S)= 13,7630

3o NA OSNOVI STAT. ANALIZE PREDLAGAMO SPREMEMBO CILJANE VREDNOSTI:

CILJANO VREDNOST ZMANJŠATI PRI 95% SIGURNOSTI ZA: 0,545

PRI 99,9% SIGURN. ZA: 0,290

Slika 13
Predlog spremembe ciljane kemijske sestave
Fig. 13
Proposal for changed aimed chemical composition

— pri 6-mesečni uporabi računalnika (od jan. do jun. 1978).

Za nekatere elemente in jekla je bilo premalo časa in izdelanih premalo šarž, da bi lahko bila pri zoženih porazdelitvah tudi že izvršena premaknitev porazdelitve v ugodnejše področje. Na slikah 1 do 19 je s puščico označeno, da je bil dobljen predlog spremembe ciljane kemijske sestave.

Ogljik

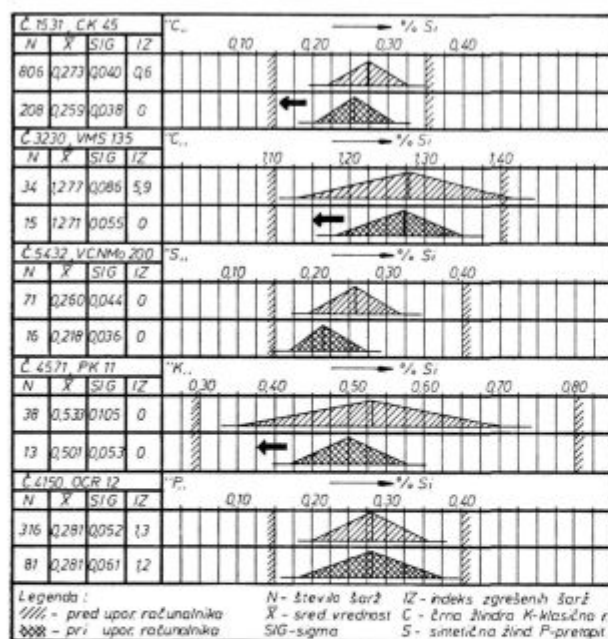
Spremembe porazdelitve vsebnosti ogljika pri uvedbi računalnika so vidne predvsem v ugodni spremembi lege porazdelitve. Pri nekaterih jeklih je ta sprememba lege porazdelitve vzrok občutnemu znižanju odstotka zgrešenih šarž.

Pri ogljiku ni dosežena, ne glede na vrsto tehnologije ali skupine jekla, pomembna zožitev porazdelitve.

Računalnik lahko uporabljamo le za spremembo lege porazdelitve, ki pa daje glede na velikost standardne deviacije razmeroma majhen manevrski prostor, uporabljen predvsem za zmanjšanje odstotka zgrešenih šarž in manj za izboljšanje mehanskih in drugih lastnosti jekla.

Silicij

Za silicij so dobljeni različni učinki uporabe računalnika, odvisno od povprečne vsebnosti elementa in tehnologije izdelave jekla (slika 14). Porazdelitev se je zožila pri vseh predstavnikih, razen pri jeklu Č 4150, ki se dela po pretalivnem postopku. Posebej ugodno izstopa jeklo Č 3230 in Č 4571. Prvo jeklo se dela na »črno žilindro« in ima



Slika 14

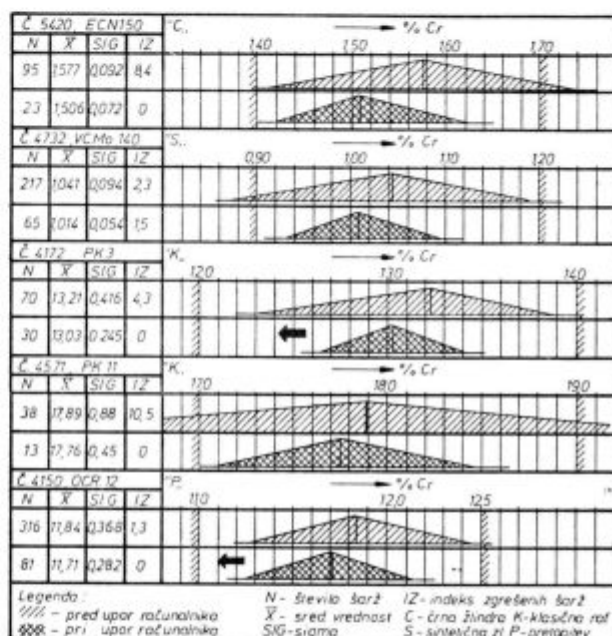
Sprememba porazdelitve vsebnosti silicija učinka uporabe procesnega računalnika.

Fig. 14

Changed distribution of silicon content

razmeroma visok predpisan odstotek silicija. Drugo jeklo se dela po klasični rafinaciji. Za obe vrsti jekla je značilen visok koeficient determinacije in kvalitetne regresijske enačbe izplena. Zato je izračun dodatka silicijevih ferolegur natančnejši in zanesljivejši. Lego porazdelitve lahko premaknemo bližje spodnji meji s spremembo ciljane kemijske sestave v modelu izračuna dodatka silicija. Kako je razmeroma ozka porazdelitev vsebnosti silicija pomaknjena bližje spodnji meji, vidimo na sliki 14 za jeklo Č 5432. Pri tem jeklu lahko smatramo, da je dobil model izračuna dodatka silicija »končno« obliko, ki se lahko spremeni le, če se bistveno spremeni standardna deviacija.

Občutno se je znižal odstotek zgrešenih šarž pri jeklu Č 3230.



Slika 15

Sprememba porazdelitve vsebnosti kroma

Fig. 15

Changed distribution of chromium content

Krom

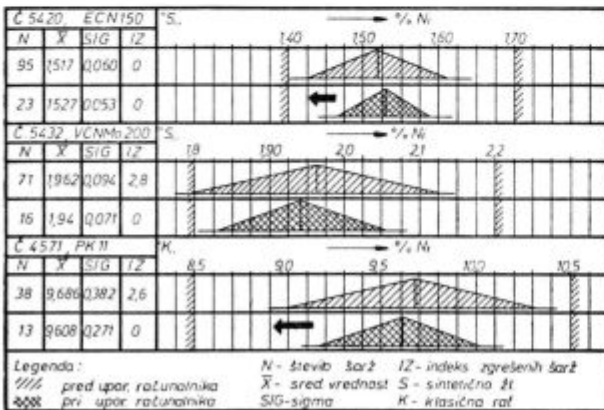
Za 20 do 50 % zoženje porazdelitve vsebnosti kroma kaže na izredno pozitiven učinek računalnika (slika 15). Očitno je močno znižanje odstotka kemijsko zgrešenih šarž in premaknitev ali možnost premaknitve lege porazdelitve bližje spodnji predpisani meji. Kar pri štirih od petih obravnavanih jekel je padel odstotek zgrešenih šarž na nič. To je še posebej pozitivno pri jeklih, ki so imela pred uporabo računalnika zelo visok indeks (IZ) zgrešenih šarž. Pri vseh obravnavanih jeklih je bila že dosežena delna premaknitev srednje vrednosti k nižjim vsebnostim elementa, vendar še niso izkoriščene vse možnosti, saj lahko npr. pri Č 4172 in Č 4150 še znatno znižamo povprečno koncentracijo kroma. Krom je tipičen primer možnosti, ki jih daje uporaba procesnega računalnika.

Dosežena je:

- sprememba lege porazdelitve,
- zožitev porazdelitve in
- kombinacija zožitev in spremembe lege porazdelitve (Č 4571).

Nikelj

V vseh primerih je dosežena pomembna zožitev porazdelitve in znižanje odstotka kemijsko zgrešenih šarž. Znižanje povprečne vsebnosti je doseženo pri jeklu Č 5420 in Č 4571. Dodatno je mogoče znižati vsebnosti razmeroma dragega niklja pri jeklih Č 4571 in Č 5420 (slika 16).



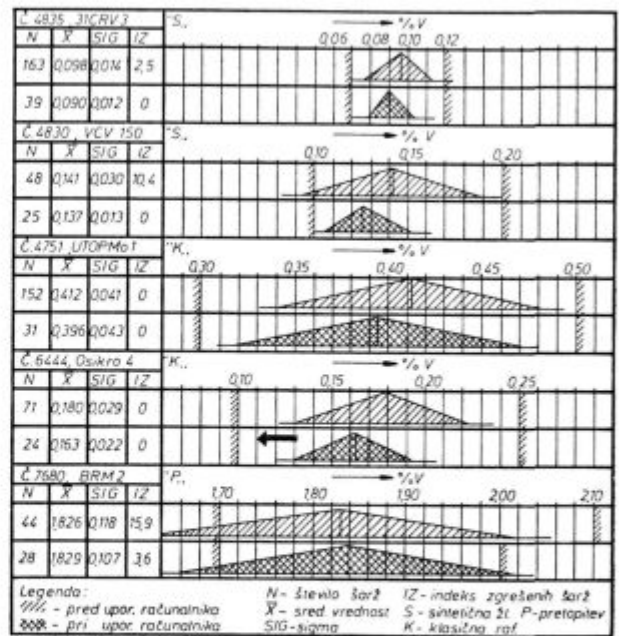
Slika 16
Sprememba porazdelitve vsebnosti niklja
Fig. 16
Changed distribution of nickel content

Vanadij

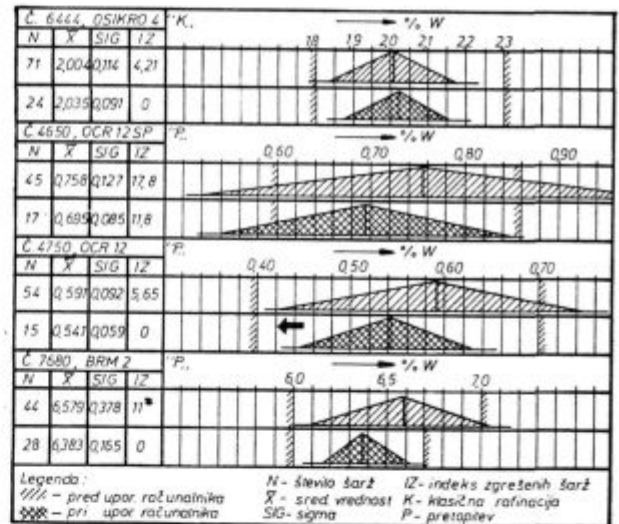
Podobno kot pri ostalih elementih lahko na sliki 17 vidimo izredno učinkovito zoženje porazdelitve, znižanje odstotka zgrešenih šarž in znižanje povprečne vsebnosti vanadija. Povprečna vsebnost vanadija se ni znižala pri Č 7680, kajti pri tem jeklu, kakor tudi pri Č 4830 je bilo treba najprej doseči znižanje odstotka zgrešenih šarž. To je bilo doseženo v obeh primerih. Lege porazdelitve pri jeklu Č 7680 ne smemo spreminjati, kajti premaknitev srednje vsebnosti iz sredine analiziranega predpisa bi povzročila nepotrebno povečanje odstotka zgrešenih šarž.

Volfram

Pri vseh obravnavanih jeklih (na sliki 18) je bilo treba najprej doseči znižanje odstotka zgrešenih šarž in šele v drugi fazi po možnosti znižati vsebnost dragega volframa. Znižanje zgrešenih šarž je doseženo pri vseh jeklih. Edino jeklo, pri katerem odstotek ni padel na nič, je Č 4650, vendar s premaknitvijo ciljne vrednosti v modelu izračuna dodatka volframa v sredino analiznega predpisa, lahko pričakujemo še dodatno znižanje odstotka kemijsko zgrešenih šarž. Tik pred uvedbo računalnika je prišlo pri jeklu Č 7680 do stro-



Slika 17
Sprememba porazdelitve vsebnosti vanadija
Fig. 17
Changed distribution of vanadium content

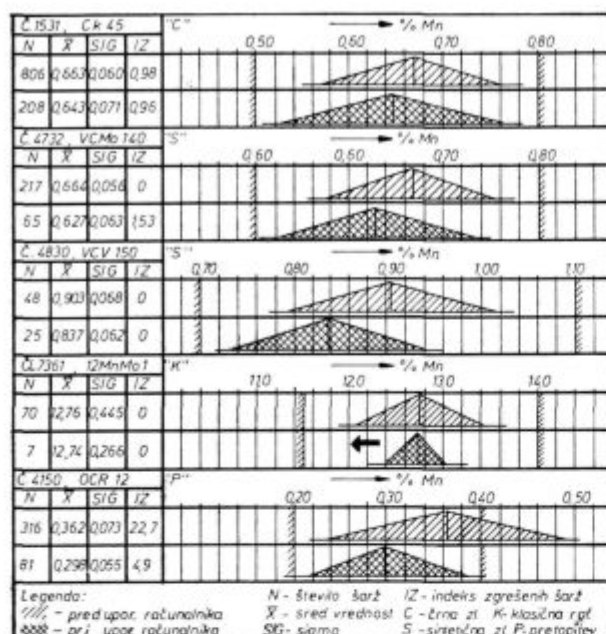


Slika 18
Sprememba porazdelitve vsebnosti volframa
Fig. 18
Changed distribution of tungsten content

žjega analiznega predpisa, ki bi pri obstoječi porazdelitvi imel katastrofalne posledice. Pričakovali bi lahko okoli 1/3 zgrešenih šarž. Zaradi uporabe računalnika pa je padel odstotek na nič; Očiten prihranek, ki ga je mogoče še povečati, je dosežen pri jeklu Č 4750.

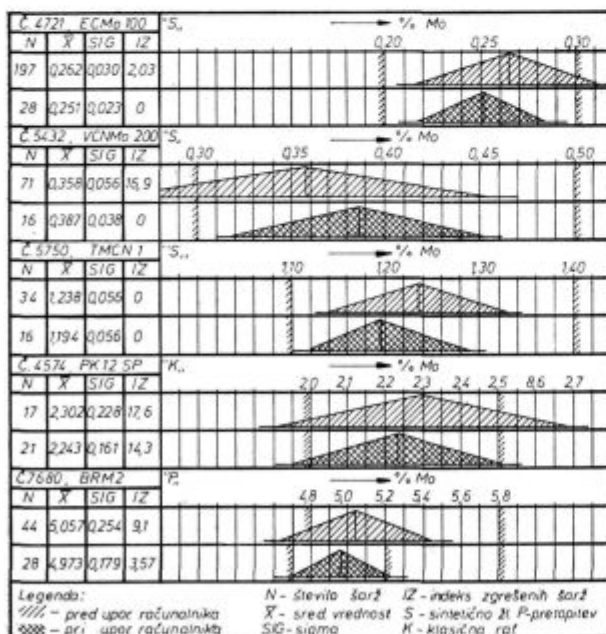
Mangan

Pri analizi regresije izplenov mangana se je pokazalo, da je to najbolj »problematičen« element. To je razlog, da kar pri treh jeklih na sli-



Slika 19
Sprememba porazdelitve vsebnosti mangana
Fig. 19
Changed distribution of manganese content

ki 19 ni prišlo do zoženja porazdelitve. Boljši rezultati so doseženi pri jeklih, ki se delajo s klasično rafinacijo ali po pretalitvenem postopku. Pri jekleni litini ČL 7361 je doseženo 40 % in pri jeklu Č 4150 25 % zoženje porazdelitve. Pomembna sprememba odstotka zgrešenih šarž je dosežena samo pri jeklu Č 4150, kjer je odstotek zgrešenih



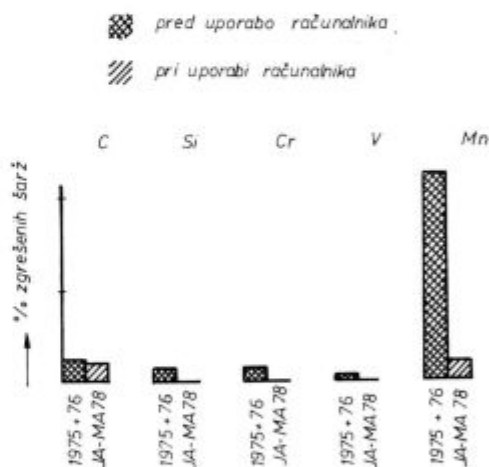
Slika 20
Sprememba porazdelitve vsebnosti molibdena
Fig. 20
Changed distribution of molybdenum content

šarž padel za 4,6 krat. Povprečna vsebnost mangana se je znižala zaradi ugodnejše lege porazdelitve. pri vseh obravnavanih jeklih, razen pri jekleni litini ČL 7361, kjer pa nam puščica nakazuje, da je mogoče znatno spremeniti ciljano kemijsko sestavo dodatka FeMn.

Molibden

Pri tem elementu je doseženo do 30 % zoženje porazdelitve in 20 do 100 % znižanje odstotka kemijsko zgrešenih šarž. Povprečna vsebnost molibdena je padla, kot nam kaže slika 20, pri vseh jeklih, razen pri jeklu Č 5432, kjer je bilo potrebno v prvi vrsti doseči znižanje odstotka zgrešenih šarž. Pri brzoreznem jeklu Č 7680 je tik pred pričetkom uvajanja procesnega računalnika prišlo do zožitve analiznega predpisa. Zato bi pri nespremenjeni širini porazdelitve lahko pričakovali dosti višji odstotek zgrešenih šarž. Zaradi uvedbe računalnika se to ni zgodilo.

Postopoma, v odvisnosti od števila izdelanih šarž, lahko za posamezno vrsto jekla dosežemo znižanje odstotka kemijsko zgrešenih šarž. Pri jeklih, ki se delajo pogosteje, je to doseženo običajno prej kot pri jeklih, ki se delajo občasno.



Slika 21
Znižanje odstotka zgrešenih šarž jekla Č.4150 pri uvedbi procesnega računalnika

Fig. 21
Reduced portion of wrongly composed melts of Č.4150 steel by introducing computer control

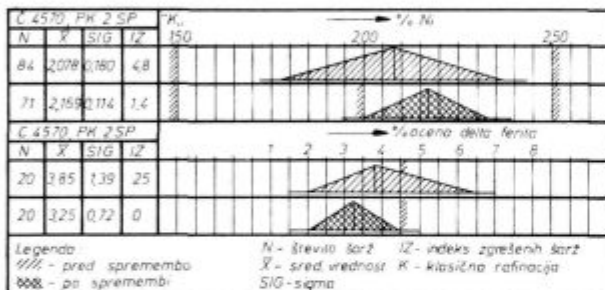
Poleg tega je uspeh odvisen od vrste tehnologije izdelave jekla in jakosti legiranja (povprečne vsebnosti legiranih elementov). Primer občutnega znižanja odstotka zgrešenih šarž nam kaže slika 21. Še posebej drastično je znižanje zgrešenih šarž pri manganu; pri siliciju, kromu in vanadiju pa je odstotek padel na nič.

Primerjalni podatki so vzeti za prvih pet mesecev 1978 in povprečje dveh let pred uporabo računalnika.

MOŽNOST REGULACIJE NEKATERIH LASTNOSTI JEKLA

Brez dvoma ima kemijska sestava jekla vpliv na mehanske, metalografske in druge lastnosti jekla, vendar nihanja kemijske sestave znotraj predpisanih mej nimajo na omenjene lastnosti vedno izrazitega vpliva. Močnejše vplive imajo drugi, predvsem tehnološki parametri. Pozornost na te vplive je zmanjšana tudi zato, ker imamo običajno opraviti s porazdelitvami kemijske sestave, ki pokrivajo celotno širino posameznega analiznega predpisa in je zato manevrski prostor za spreminjanje povprečne vrednosti zelo majhen.

Eden od pomembnih učinkov uporabe računalnika pri legiranju je zoženje porazdelitve končne kemijske sestave, ki znaša 50 % in več. To je novi moment pri možnostih reguliranja nekaterih lastnosti jekla, kajti glede na željene lastnosti nekaterih jekel lahko povprečje posameznega elementa premaknemo bližje zgornji ali spodnji predpisani meji, ne da bi ogrozili zadetje analize.



Slika 22

Povezava spremembe vsebnosti delta ferita ob spremembi vsebnosti niklja pri jeklu C.4570

Fig. 22

Relation between the changed content of delta ferrite and the changed nickel content in C.4570 steel

Na prekaljivost jekla ima kemijska sestava jekla znaten vpliv. Zato lahko pričakujemo pri pravilni uporabi procesnega računalnika manjše odstopanje od željene prekaljivosti in boljše prilagajanje predpisanim pasovom kaljivosti. Posebej pozorni moramo biti na Cr, Mn in C, kjer se gibljejo skupni koeficienti determinacije od 0,40 do 0,60, v odvisnosti od jekla in globine meritve trdote.⁴

Ugotovljen je tudi pomemben vpliv Si in C na žilavost in velikost avstenitnega zrna pri cementacijskih jeklih. Vpliv ni tako močan, kot ga kaže aluminij (ki z uporabo računalnika nima praktično nobene zveze), vendar je vreden pozornosti.³

Pri nerjavem jeklu C 4570 ima odstotek delta ferita pomemben vpliv na predelavnost jekla. Problematično je lahko valjanje na bloomingu. Zaželjen je nizek odstotek delta ferita, ki naj bo vsaj pod 10 % (ocene 5). Na odstotek delta ferita v jeklu ima močan vpliv vsebnost niklja in kro-

ma. Nižji odstotek delta ferita dobimo, če imamo nikelj blizu zgornje meje in krom blizu spodnje meje analiznega predpisa. Pred uporabo in v prvih tednih uporabe računalnika je bilo valjanje jekla C 4570 zelo kritično. Analize so pokazale, da imajo šarže razmeroma nizko vsebnost niklja in pogosto visok odstotek delta ferita.

Sprejet je bil nov ožji interni predpis vsebnosti niklja od 2,00 do 2,50 %. Temu predpisu se je prilagodila nova ciljana vsebnost niklja v modelu izračuna dodatka ferolegur na procesnem računalniku. Na sliki 22 je prikazana porazdelitev vsebnosti niklja in delta ferita pred spremembo predpisa za nikelj in po njej. Učinek spremembe predpisa in uporabe računalnika je dobro viden. Ožja porazdelitev in premaknitev porazdelitve v zgornjo polovico JUS analiznega predpisa za nikelj zelo ugodno vpliva na nižjo vsebnost delta ferita v jeklu. Od preiskovanih šarž imajo vse šarže oceno delta ferita pod 5. Tako so problemi pri valjanju ingotov praktično rešeni.

Nova širina porazdelitve niklja v jeklu C 4570 nam daje skoraj dvakrat večji manevrski prostor, poleg tega pa je očitno, da ni pri vsakem jeklu in elementu mogoče porazdelitve premakniti čim bližje spodnji predpisani meji, ampak je potrebno pri pripravi modela izračuna dodatka ferolegur upoštevati in izkoriščati še kvalitetne momente jekla.

Zaključek

V razmeroma kratkem času se je v jeklarni Železarne Ravne pokazala učinkovitost uporabe procesnega računalnika na področju legiranja. Že v prvih mesecih uporabe računalnika je doseženo znatno znižanje materialnih stroškov, povečana je enakomernost končne kemijske sestave in znižan je odstotek kemijsko zgrešenih šarž. Poraba dragih ferolegur kroma in mangana se je znižala v primerjavi s porabo cenениh ferolegur 1,5 do 6 krat!

Pri uporabi računalnika so porazdelitve končne kemijske sestave pogosto tudi za polovico ožje.

Učinek lahko pripišemo naslednjim funkcijam:

— računalnik je neposredno vključen v proces izdelave jekla (24 ur na dan),

— v vsakdanji in pogosti uporabi so matematične metode optimiranja (linearno programiranje),

— uporabljeni so matematični modeli izračuna izplena ferolegur in

— uporaba računalnika je poenotila postopek in ciljane vsebnosti legirnih elementov pri izračunu dodatka ferolegur.

Rezultati kažejo, da je investicija v procesni računalnik izredno ekonomična in dosega ali celo presega pričakovanja.

Literatura:

1. Segel J.: Approaches to Computer Control in Meltshop Steelmaking, 3rd International Iron and Steel Congress, 1978, Chicago
2. Shroeder D. L., Lendman T. T.: Materials Management in Electric Furnace Steelmaking, A. I. S. E. Steel Show, Cleveland, Ohio, sep. 1977
3. Segel J.: Analiza kakovostnega nivoja in vpliv kemijske sestave na ZF 6. Interna dokumentacija železarne Ravne, 1976
4. Segel J.: Kontrola pasov garantirane kaljivosti in analiza vpliva kemijske sestave na kaljivost, Zelezarski zbornik, (Jesenice), 9, 1975
5. Segel J.: Uporaba procesnega računalnika v elektrojeklarni, Zelezarski zbornik (Jesenice) 12 (1978) 2, str. 37-47

ZUSAMMENFASSUNG

In verhältnismässig kurzer Zeit hat sich im Stahlwerk des Hüttenwerkes Ravne der Nutzeffekt der Anwendung des Prozessrechners auf dem Gebiet des Legierungsverfahrens gezeigt. Schon in den ersten Monaten der Anwendung des Rechners ist eine beträchtliche Verminderung der materiellen Kosten erzielt worden, die Gleichmässigkeit der Stahlzusammensetzung in der Endanalyse hat sich vergrössert und der Prozentanteil der Fehlschargen vermindert.

Die Stahlerzeugungskosten sind stark von der Struktur der Einsatzstoffe und der Ferrolegierungen abhängig und gerade auf diesem Gebiet ist ein grosser Erfolg erzielt worden.

Der Verbrauch von teureren Ferrolegierungen wie Chrom und Mangan hat sich zu Gunsten der billigeren Ferrolegierungen um 1,5 bis 6 Mal vermindert.

Bei der Anwendung des Prozessrechners ist die Verteilung der chemischen Endzusammensetzung häufig um die Hälfte enger.

Dieses Ergebnis kann folgenden Tatsachen zugeschrieben werden:

— der Rechner ist unmittelbar und ununterbrochen in den Stahlerzeugungsprozess eingeschlossen (24 Stunden am Tag)

— die mathematischen Optimierungsmethoden (lineare Programmierung) werden täglich und häufig angewendet

— die mathematischen Modelle werden für die Ausrechnung der Ferrolegierungsausbeute angewendet und

— die Anwendung des Prozessrechners hat das Verfahren und die gezielten Gehalte der Legierungselemente bei der Ausrechnung der Ferrolegierungszugabe vereinfacht.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Investition in den Prozessrechner als sehr ökonomisch erwiesen hat und die Erwartungen erreicht, oder sogar übertroffen worden sind.

SUMMARY

In a relatively short time, the application of the process computer control in alloying processes showed results in the steel plant of Ravne Ironworks. Already the first months of computer control indicated substantial reduction of cost, increased uniformity of final chemical composition, and reduced portion of chemically wrongly composed melts.

Manufacturing costs of steel are highly influenced by the consumption structure of feed and ferroalloys. Here an extraordinary success was achieved:

Consumption of expensive chromium and manganese ferroalloys in comparison with cheaper ferroalloys was reduced for 1,5 to 6 times. Computer control reduced the

variation of final chemical composition to a half. The effect can be ascribed to:

— computer is directly and constantly controlling the manufacturing process of steel (24 hours per day),

— often mathematical methods of optimisation are applied (linear programming),

— mathematical models are applied in determining the yield of ferroalloys, and

— computer control unified the processes and the aimed values of alloying elements in calculation of the additions of ferroalloys. The results clearly show that investment into the process computer was very profitable and it even exceeds the expectations.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительно в коротком промежутку времени в сталеплавильном цехе металлургического завода Железарна Равне установлена эффективность применения вычислительной машины в области стали. Уже в первых месяцах употребления вычислительной машины замечено значительное снижение расходов на материал, увеличена равномерность химического состава и уменьшен процент неудачных плавов. Полученные в этой области значительные результаты показали, что в сравнении с дешевыми ферросплавами расход Ферросплавов хрома и марганца уменьшился в 1,5 до 6 раз. При применении счётной машины оказалось, что отклонения при конечном химическом составе на половину уже.

Эффект можно причислить следующим факторам:

— счётная машина непосредственно и непрерывно включена в процесс изготовления стали (24 ч в сутки),

— ежедневному и частому применению математического метода оптимизации (линейное программирование),

— применению математических моделей для вычисления выхода ферросплавов.

Применение счётной машины вызвало унификацию самого способа, и достижение целевых величин легированных элементов при вычислении добавки ферросплавов.

Результаты показали, что вложения в управляющую вычислительную машину, что касается экономии достигли и даже превзошли ожидания.