

Optimizacija procesnih parametrov pri kontinuiranem ulivanju jekla v železarni ACRONI Jesenice

Optimization of Process Parameters in Continuous Casting of Steel at the Steelwork ACRONI Jesenice

B. Filipič¹, IJS Ljubljana in Fakulteta za strojništvo Ljubljana
B. Šarler, Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

Opis postopka za ugotovitev optimalnih vrednosti procesnih parametrov livne naprave s pomočjo evolucijskega računanja. Opisano je fizikalno ozadje šestih empiričnih metalurških meril ohlajanja pri kontinuiranem ulivanju jekla. Problem optimalne nastavitve procesnih parametrov je formuliran kot minimizacijski problem, ki temelji na analitičnem zapisu meril ohlajanja in izračunanem temperaturnem polju slaba. Za reševanje tega problema je uporabljen genetski algoritem. Ta preiskuje nabore vrednosti procesnih parametrov s heuristiko, ki se zgladuje po načelih evolucije v bioloških sistemih, vrednotenje naborov pa poteka z numerično simulacijo ulivanja. Optimizacijski postopek in dobljeni rezultati so prikazani pri ulivanju nerjavnega jekla AISI 304 z dimenzijami slaba 1,06 m x 0,2 m.

Ključne besede: kontinuirano ulivanje, metalurška merila ohlajanja, numerična optimizacija, genetski algoritem

An evolutionary computation approach to process parameter optimization in continuous casting of steel is presented. Physical background of six empirical metallurgical criteria of slab cooling is introduced. The problem of finding optimal parameter values is stated as a minimization problem based on the analytical form of the cooling criteria and on computed temperature field of the slab. To solve the optimization problem, a genetic algorithm is employed. The algorithm explores process parameter settings heuristically by applying the principles of biological evolution. Parameter settings are evaluated through numerical simulation of the casting process. The optimization procedure is shown along with the results obtained for continuous casting of stainless steel AISI 304 with slab dimensions 1,06 m x 0,2 m.

Key words: continuous casting, metallurgical cooling criteria, numerical optimization, genetic algorithm

1 Uvod

Kontinuirano ulivanje jekla je uveljavljen metalurški postopek, ki se uporablja v proizvodnji različnih jeklenih polizdelkov. Na njihovo kvaliteto vpliva veliko dejavnikov, med njimi zlasti sestava in čistost taline, intenzivnost izceja, notranja in zunanja razpokanost, poroznost ter pravilne dimenzije. Kvaliteto kontinuirano ulitih proizvodov zato zagotavljamo in izboljšujemo na osnovi podrobnega razumevanja procesa, s spremljanjem in regulacijo procesnih parametrov ter z ustrežno organizacijo dela¹.

Nastavitev procesnih parametrov v sodobnih livnih napravah temelji na empiričnem znanju in modeliranju. Na podlagi izkušenj pri kontinuiranem ulivanju jekla so se izoblikovala empirična metalurška merila ohlajanja², ki omejujejo variacije temperaturnega polja slaba glede na želeno kvaliteto proizvoda. Iz izračuna temperaturnega polja slaba ter metalurških meril ohlajanja pa lahko sklepamo na dobro ali slabo nastavitve procesnih parametrov livne naprave.

Za livno napravo ACRONI Jesenice smo razvili programske sistem za ugotavljanje optimalnih vrednosti procesnih parametrov³. Sistem sestavljata numerični simulator livne naprave in optimizacijski postopek. Simulator livne naprave omogoča analizo sedanjega načina

ohlajanja slaba, študije alternativnih nastavitve procesnih parametrov in njihovo optimiranje. Kot optimizacijski postopek je uporabljen genetski algoritem. Ta heuristično preiskuje prostor parametrov in aktivira simulator, ki nastavitve parametrov vrednoti. Na ta način sistem postopno izboljšuje nastavitve procesnih parametrov glede na empirična metalurška merila. Podoben, a manj splošen sistem je znan iz literature⁴. Omogoča le optimiranje nastavitve ohlajanja s prhami in za razliko od našega sistema temelji na gradientni optimizacijski metodi.

Razviti numerični postopek za izračun temperaturnega polja slaba je bil podrobno opisan v predhodni objavi⁵, v tem prispevku pa opisujemo empirična metalurška merila ohlajanja slaba in njihovo fizikalno ozadje, optimizacijski problem, prostor iskanja optimalne nastavitve procesnih parametrov, uporabljeni genetski algoritem in dosedanje rezultate optimiranja.

2 Metalurška merila ohlajanja slaba

Empirična metalurška merila ohlajanja slaba pri kontinuiranem ulivanju jekla se uveljavljajo v praksi kot merila za obvladovanje procesa ulivanja in zagotavljanje kvalitete ulitih izdelkov. Podajamo fizikalno ozadje meril in njihovo matematično obliko, razvito posebej za livno napravo ACRONI Jesenice⁶:

- Največja dovoljena dolžina kapljevinskega korena
- Največja dovoljena dolžina kapljevinskega korena (ali metalurška dolžina) je merilo, ki vpliva na notranjo

¹ Dr. Bogdan FILIPIČ
Inštitut Jožef Stefan, Odsek za inteligentne sisteme
Jamova 39, 1000 Ljubljana

razpokanost proizvoda in varnost procesa. Nekatere vrste jekel (navadno visoko legirane) je potrebno ravnati v popolnoma strjeni obliki, tako da je največja dolžina kapljevinskega korena omejena s točko ravnanja livne naprave. Druge vrste jekel (navadno nizko legirane) se lahko ravnajo tudi v ne povsem strjeni obliki. Pri teh določa največjo dolžino kapljevinskega korena lega rezalne naprave oziroma največji ferostatični tlak, ki ga je sposoben zdržati strjeni del slaba ob podpori valjčnic. Matematično ima merilo obliko:

$$c_1 = \int_{\Omega(z_{POOL}, z_{CUT})} [C^+(\frac{T-T_S}{T_S})]^2 d\Omega \quad (1)$$

Z z_{POOL} je označena največja dovoljena dolžina kapljevinskega korena, z_{CUT} dolžina, pri kateri režemo slab, $\Omega(z_{POOL}, z_{CUT})$ pa področje slaba, omejeno z definiranimi dolžinama. T je temperatura slaba, T_S solidus temperatura jekla, funkcija C^+ pa ima obliko:

$$C^+(x) = \begin{cases} x; & x \geq 0 \\ 0; & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Red velikosti največje dolžine kapljevinskega korena je pri kontinuiranem ulivanju jekla 10 m.

- Največje dovoljeno ohlajanje površine slaba na enoto časa med ohlajanjem s prhami

Ohlajanje površine slaba povzroča natezne napetosti na njegovi površini, ki lahko tvorijo nove ali povečajo stare površinske razpoke. Matematično ima merilo obliko:

$$c_2 = \int_{\Gamma(z_{SPRAY}, z_{CUT})} [C^+(\frac{\partial T}{\partial t}_{min} - \frac{\partial T}{\partial t})]^2 d\Gamma \quad (3)$$

Z z_{SPRAY} je označena dolžina, na kateri se začne ohlajanje slaba s prhami, $\Gamma(z_{SPRAY}, z_{CUT})$ pa površina slaba, omejena z definiranimi dolžinama. Pri tem ima količina $\partial T/\partial t_{min}$ značilno vrednost -1 K/s.

- Največje dovoljeno ponovno segrevanje površine slaba na enoto časa med ohlajanjem s prhami

Ponovno segrevanje površine slaba povzroča natezne napetosti na medfaznem robu, ki lahko tvorijo nove ali povečajo njegove stare notranje razpoke. Matematično ima merilo obliko:

$$c_3 = \int_{\Gamma(z_{SPRAY}, z_{CUT})} [C^+(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial T}{\partial t}_{max})]^2 d\Gamma \quad (4)$$

Pri tem ima količina $\partial T/\partial t_{max}$ značilno vrednost $+1$ K/s.

- Najnižja dovoljena temperatura površine slaba v točki ravnanja

Ravnanje slaba inducira tlačne napetosti v delu slaba, ki je bližji notranjemu loku livne naprave, in natezne napetosti v delu slaba bližje zunanjemu loku. Prečne razpoke površine slaba zaradi ravnanja preprečimo tako, da naravnamo temperaturo njegove površine v točki ravnanja nad spodnjo mejo duktilnosti materiala. Takšna temperatura prav tako ugodno vpliva na trajnost ravnal-

nih valjčnic. To lahko zapišemo v matematični obliki takole:

$$c_4 = \int_{\Gamma(z_{UNB}^-, z_{UNB}^+)} [C^+(\frac{T_{duc}-T}{T_{duc}})]^2 d\Gamma \quad (5)$$

Z z_{UNB}^- in z_{UNB}^+ sta označeni dolžini, med katerima se slab ravna iz ukrivljene v ravno obliko. Količina T_{duc} ima značilno vrednost 1300 K.

- Največje negativno odstopanje temperature površine slaba pri dani osni legi med ohlajanjem s prhami

Vogali slaba zahtevajo manj hlajenja kot sredine stranic. Prevelike variacije temperature vzdolž stranice slaba povzročajo vzdolžne površinske razpoke. V matematični obliki je merilo:

$$c_5 = \int_{\Gamma(z_{SPRAY}^-, z_{SPRAY}^+)} [C^+(\frac{T_{min}(z)-T}{T_{avg}})]^2 d\Gamma \quad (6)$$

Z z_{SPRAY}^- je označena dolžina, pri kateri se konča ohlajanje slaba s prhami. Funkcija $T_{min}(z)$ je definirana kot:

$$T_{min}(z) = T_{avg}(z) - \Delta T_{min} \quad (7)$$

kjer je $T_{avg}(z)$ povprečna temperatura površine slaba pri dani dolžini. Značilna vrednost za $\Delta T_{min} = 100$ K.

- Največje pozitivno odstopanje temperature površine slaba pri dani osni legi med ohlajanjem s prhami

Fizikalno ozadje merila je enako kot prej. V matematični obliki ga lahko zapišemo:

$$c_6 = \int_{\Gamma(z_{SPRAY}^-, z_{SPRAY}^+)} [C^+(\frac{T-T_{max}(z)}{T_{avg}})]^2 d\Gamma \quad (8)$$

Funkcija $T_{max}(z)$ je definirana kot:

$$T_{max}(z) = T_{avg}(z) + \Delta T_{max} \quad (9)$$

Značilna vrednost za $\Delta T_{max} = 100$ K.

Metalurška merila so bila razvita na podlagi izkušenj, podatkov iz dostopne literature², analize konstrukcijskih značilnosti livne naprave ACRONI Jesenice in inženirskih ocen. Parametre, ki nastopajo v metalurških merilih ohlajanja slaba, skupaj z njihovimi vrednostmi povzema **tabela 1**.

Z opisanimi metalurškimi merili ohlajanja je nadgrajen simulator livne naprave. Ta izračuna za podane parametre kontinuiranega ulivanja temperaturno polje slaba⁵, nato pa ugotovi izpolnjenost metalurških meril. Pričakujemo, da bo uporaba simulatorja livne naprave v povezavi s sistemom zapisovanja in zajemanja podatkov definirana merila še dopolnila.

3 Optimizacijski problem

Pravilno nastavitve procesnih parametrov formuliramo kot optimizacijski problem:

$$f = \sum_{j=1}^6 K_j \bar{c}_j \rightarrow 0, \quad (10)$$

Tabela 1: Značilne vrednosti parametrov, ki nastopajo v metalurških merilih ohlajanja slaba za livno napravo ACRONI Jesenice**Table 1:** Typical values of parameters appearing in metallurgical cooling criteria for the ACRONI Jesenice continuous caster

parameter	vrednost
Z_{CUT}	21,493 m
Z_{POOL}	15,634 m
Z_{SPRAY}^-	0,352 m
Z_{SPRAY}^+	15,634 m
Z_{UNB}^-	15,634 m
Z_{UNB}^+	17,354 m
$\frac{\partial T}{\partial t}^-_{min}$	-1 K/s
$\frac{\partial T}{\partial t}^-_{max}$	1 K/s
ΔT_{min}	100 K
ΔT_{max}	100 K
T_{duc}	odvisno od vrste jekla (1300 K za AISI-304)
T_S	odvisno od vrste jekla (1672 K za AISI-304)

kjer so \bar{c}_j , $j=1 \dots 6$, normalizirane vrednosti metalurških meril, izračunane z izrazom:

$$\bar{c}_j = \frac{c_j - c_j^{min}}{c_j^{max} - c_j^{min}} \quad (11)$$

Pri tem c_j^{min} in c_j^{max} pomenita spodnjo in zgornjo mejo vrednosti metalurškega merila c_j . Ocenimo ju empirično z ovrednotenjem ustreznega števila nastavitvev procesnih parametrov.

Koeficienti K_j , $j = 1 \dots 6$, v enačbi (10) označujejo relativno pomembnost posameznega merila v primerjavi z drugimi. Njihove vrednosti so določene izkustveno. Navadno uporabljamo vrednosti koeficientov $K_1 = 10$ in $K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = 1$.

4 Prostor iskanja optimalne nastavitve procesnih parametrov

V livni napravi ACRONI Jesenice so procesni parametri: sestava taline, format slaba, temperatura ulivanja, hitrost ulivanja, nivo taline v kokili, frekvenca nihanja kokile, livni prašek, pretoki vsake izmed štirih stranic kokile, vstopna temperatura hladila primarnega ohlajevalnega sistema, pretoki prh dvanajstih sekundarnih ohlajevalnih sistemov in vstopna temperatura hladila sekundarnega ohlajevalnega sistema.

V sedanji izvedbi optimizacijskega postopka⁷ upoštevamo 14 procesnih parametrov (tabela 2). Njihove optimalne vrednosti iščemo v prostoru, določenem na podlagi inženirskih ocen in konstrukcijskih značilnosti livne naprave. Za vsak procesni parameter sta bili določeni spodnja in zgornja meja, tako dobljeni intervali dopustnih vrednosti pa so bili nato enakomerno razdeljeni v korake. Kot izhodišče za določitev intervalov dopustnih vrednosti je bila uporabljena sedanja

empirična nastavitvev procesnih parametrov. Spodnje in zgornje meje vrednosti parametrov so bile dobljene z ustreznim zmanjšanjem oz. povečanjem sedanjih vrednosti. Delitev vrednosti parametrov na korake je bila izvedena tako, da izbrani koraki pomenijo fizikalno smiselne spremembe vrednosti parametrov, ki jih je še mogoče zaznati s procesnimi instrumenti na livni napravi. Prostor iskanja optimalnih vrednosti obravnavanih procesnih parametrov povzema tabela 2.

Tabela 2: Značilen prostor iskanja optimalnih vrednosti procesnih parametrov za livno napravo ACRONI Jesenice**Table 2:** Typical search space explored in optimizing proces parameters of the ACRONI Jesenice continuous caster

procesni parameter	merska enota	spodnja meja	zgornja meja	delitveni korak
temperatura ulivanja	K	1752	1762	2,5
hitrost ulivanja	m/min	0,9	1,1	0,05
pretok prh sistema 01	l/min	110	150	10
pretok prh sistema 02	l/min	70	110	10
pretok prh sistema 03	l/min	190	270	10
pretok prh sistema 04	l/min	150	210	10
pretok prh sistema 05	l/min	95	135	10
pretok prh sistema 06	l/min	110	150	10
pretok prh sistema 07	l/min	65	85	10
pretok prh sistema 08	l/min	70	110	10
pretok prh sistema 09	l/min	55	75	10
pretok prh sistema 10	l/min	60	100	10
pretok prh sistema 11	l/min	50	70	10
pretok prh sistema 12	l/min	50	70	10

S širino intervala in delitvenim korakom je za vsak parameter določeno število vrednosti, ki jih lahko zavzame v optimizacijskem postopku. Parametre obravnavamo kot medsebojno neodvisne. Skupno število možnih nastavitvev parametrov je zato enako produktu števil možnih vrednosti pri vseh parametrih.

5 Genetski algoritem za optimiranje procesnih parametrov

Genetski algoritem^{8,9} je stohastična preiskovalna in optimizacijska metoda. Pri iskanju rešitev uporablja hevrstiko, ki posnema načela biološke evolucije. Z genetskim algoritmom rešujemo problem tako, da simuliramo evolucijo rešitev. Začetno množico (populacijo) rešitev ponavadi generiramo naključno. Njene člane ovrednotimo, t.j. ugotovimo, kako dobro rešujejo dani problem. Sledi simulirana evolucija, ki poteka v iterativnih korakih, imenovanih generacije. V vsaki generaciji učinkujeta na populacijo selekcija in variacija. Prva zagotavlja multipliciranje uspešnejših članov populacije, ki pomenijo boljše rešitve, v fazi variacije pa delujejo na populacijo operatorji, ki iz posameznih rešitev ali njihovih parov tvorijo naslednike. Te ovrednotimo, nato izvedemo novo iteracijo.

Postopek se izvaja, dokler ni izpolnjen ustavitveni pogoj. Ta je lahko definiran na različne načine. Postopek ustavimo bodisi po vnaprej predpisanem številu iteracij

ali potem, ko kvaliteta rešitev doseže zeleno vrednost (algoritem konvergira), ali pa potem, ko se kvaliteta rešitev po določenem številu iteracij več ne izboljša. Za končno rešitev privzamemo najboljšo rešitev, ki jo je algoritem med izvajanjem odkril. Ta ne pripada nujno končni populaciji.

Genetski algoritmi so primerni za implementacijo na vzporednih računalnikih, za njihovo uporabo pa je posebej ugodno, da ne zahtevajo posebnih lastnosti problemskega prostora, kot sta zveznost ali odvedljivost, in dodatnih informacij o rešitvah, kot so vrednosti odvodov ipd. Zato so zlasti primerni za reševanje nalog, pri katerih zaradi nelinearnosti, nezveznosti, multimodalnosti in drugih neugodnih lastnosti tradicionalne optimizacijske metode odpovedo. Genetski algoritmi so bili že uspešno uporabljeni pri reševanju različnih realnih optimizacijskih nalog¹⁰.

Osnovni genetski algoritem za numerično optimizacijo je bil za potrebe optimiranja procesnih parametrov livne naprave ACRONI dopolnjen z naslednjimi elementi:

- Generiranje začetnih rešitev in njihovo variiranje sta bila prirejena tako, da zagotavljata preiskovanje vrednosti parametrov znotraj predpisanega prostora, t.j. upoštevata intervale dopustnih vrednosti in delitvene korake.
- Genetski algoritem je bil integriran s simulatorjem livne naprave in v integriranem sistemu nastopa kot nadzorni program, ki pripravi ustrezno vhodno datoteko za simulacijo, aktivira simulator in po izvedeni simulaciji iz izhodne datoteke prebere vrednosti metalurških meril.
- Med optimizacijskim postopkom gradi algoritem bazo podatkov o že opravljenih simulacijah kontinuiranega ulivanja. V njej so shranjene vrednosti procesnih parametrov in zanje izračunane vrednosti metalurških meril. Namen shranjevanja teh podatkov je izogniti se ponavljanju simulacijskih izračunov za enake nastavitve parametrov, do katerih bi sicer prihajalo med optimizacijskim postopkom, še posebej v fazi konvergiranih rešitev. Uvedba baze podatkov in z njo povezani prihranki računskega časa so smiselni zaradi velike časovne zahtevnosti simulacije. Zbrani podatki omogočajo tudi naknadne analize izračunov in preverjanje nastavitve parametrov.

Iskanje optimalne nastavitve procesnih parametrov s tako dopolnjenim algoritmom poteka na naslednji način:

1. Generiramo začetno množico nastavitve procesnih parametrov.
2. Ovrednotimo nastavitve z numerično simulacijo postopka ulivanja.
3. Kot rezultat shranimo nastavitve parametrov z najnižjo vrednostjo f .
4. Verjetnostno izberemo podmnožico nastavitve z nizko vrednostjo f .
5. Tvorimo nove nastavitve s kombiniranjem parov obstoječih nastavitve (križanje).

6. Nastavitve modificiramo z naključnimi spremembami (mutacija).
7. Ovrednotimo dobljene nastavitve z numerično simulacijo postopka ulivanja.
8. Če se je vrednost f znižala, kot rezultat shranimo novo nastavitve parametrov z najnižjo vrednostjo f .
9. Če je število iteracij manjše od predpisanega, se vrnemo na korak 4.

Pri tem je f stroškovna funkcija za vrednotenje nastavitve procesnih parametrov, definirana z izrazoma (10) in (11). Nastavitve procesnih parametrov so v algoritmu predstavljene kot realni vektorji, za njihovo variiranje pa uporabljamo operatorje križanja in mutacije, prilagojene za genetske algoritme z realnim kodiranjem rešitev¹¹.

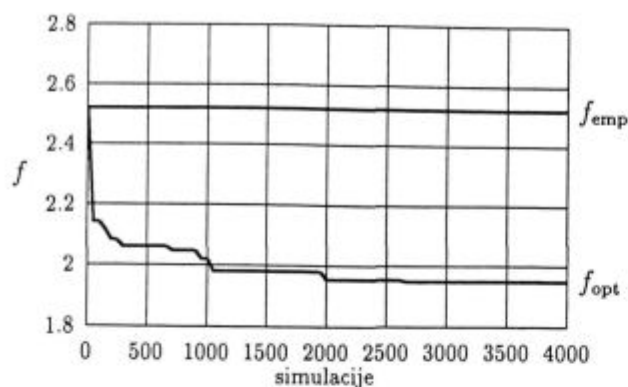
6 Optimiranje ulivanja jekla AISI-304 in rezultati

Z razvitim optimizacijskim sistemom smo izvedli poskusno optimiranje procesnih parametrov kontinuiranega ulivanja nerjavnega jekla AISI-304 z dimenzijami slaba 1,06 m x 0,20 m. Preizkus je obsegal tri faze:

- začetno naključno generiranje in vrednotenje nastavitve parametrov, katerega namen je bil preveriti pravilnost delovanja simulatorja,
- sistematično preiskovanje prostora parametrov, katerega namen je bil ugotoviti odvisnosti metalurških meril od posameznih procesnih parametrov,
- optimiranje procesnih parametrov z genetskim algoritmom, katerega namen je bil preveriti pravilnost delovanja optimizacijskega postopka in ugotoviti možnosti izboljšanja sedanje izkustvene nastavitve parametrov pri kontinuiranem ulivanju jekla AISI-304.

V fazi naključnega generiranja in vrednotenja nastavitve parametrov je bilo opravljenih preko 3000 simulacij procesa pri različnih nastavitvah parametrov. Pri tem niso bile ugotovljene nepravilnosti delovanja simulatorja, rezultati izračunov pa so bili fizikalno smiselni. Simulator je bil verificiran s primerjavo izračuna in meritev temperatur površine slaba pri izstopu iz vodne komore. Ujemanje izračunanih in izmerjenih temperatur je bilo ± 25 K, kar simulator uvršča ob bok podobnim¹². Nadaljnje meritve bodo omogočile primerjavo izračunanih in izmerjenih temperatur v več točkah vzdolž slaba.

Osnova sistematičnega preiskovanja prostora parametrov v drugi fazi je bila sedanja empirična nastavitve procesnih parametrov. Za vsak parameter smo opravili zaporedje enajstih izračunov, pri čemer smo njegovo vrednost enakomerno povečevali od predpisane spodnje do zgornje meje (glej **tabelo 2**), drugi parametri pa so imeli vrednost, ki se sedaj uporablja v praksi. Rezultati teh izračunov so pokazali odvisnosti (naraščanje, upadanje) vrednosti metalurških meril od posameznih parametrov in ponovno potrdili pravilnost odzivanja simulatorja na spreminjanje procesnih parametrov.



Slika 1: Optimirana nastavitve procesnih parametrov (f_{opt}) v primerjavi s sedanjo empirično nastavitvijo (f_{emp})

Figure 1: Optimized process parameter setting (f_{opt}) compared with current empirical setting (f_{emp})

V tretji fazi je bila izvedena poskusna optimizacija procesnih parametrov z genetskim algoritmom. Podmnožico petdesetih najboljših nastavitvev, dobljenih v predhodnih izračunih, smo uporabili za začetno populacijo in optimizacijski postopek izvajali 80 generacij. Slika 1 prikazuje postopno izboljševanje vrednosti stroškovne funkcije f med optimiranjem. Dobljena optimirana nastavitve procesnih parametrov ima vrednost stroškovne funkcije $f_{opt} = 1.94$, kar pomeni znatno izboljšanje dosežane empirične nastavitve ($f_{emp} = 2.52$).

Iz optimiranih vrednosti parametrov izhaja, da je za boljše izpolnjevanje metalurških meril ohlajanja slaba potrebno rahlo zmanjšati hitrost ulivanja in pretoke hladilnih prh v zaključnem delu sekundarnega sistema hlajenja. Ti rezultati so v jeklarni Bela v preverjanju z vidika učinkov na kvaliteto proizvoda in stroškov. Na osnovi ugotovitev uporabnikov nameravamo optimizacijski postopek in vgrajena metalurška merila po potrebi izpopolniti in uporabiti za optimiranje parametrov ulivanja drugih vrst jekel, ki jih proizvaja jeklarna.

7 Sklep

Razvit in računalniško izveden je sistem za optimiranje procesnih parametrov livne naprave ACRONI Jesenice. Ključna elementa sistema sta numerični simulator livne naprave in genetski algoritem kot optimizacijska metoda. Elementa sta integrirana v enovit programski sistem, v katerem genetski algoritem preiskuje prostor parametrov, za vrednotenje nastavitve parametrov pa aktivira simulator. To je tudi v mednarodnem merilu pionirsko delo v uporabi genetskih algoritmov pri optimiranju parametrov kontinuiranega ulivanja.

Sistem je bil preizkušen pri optimiranju procesnih parametrov ulivanja jekla AISI-304. Pri tem se je izka-

zalo, da je zaradi računske zahtevnosti simulacije kontinuiranega ulivanja računalniška optimizacija procesnih parametrov sicer časovno zahtevna, vendar možna in smiselna, saj je eksperimentiranje z nastavitvami v praksi povezano z neprimerno večjimi stroški. Dosedanji rezultati že nakazujejo možnost izboljšanja nastavitve procesnih parametrov.

Del sistema je prerasel laboratorijsko fazo razvoja in je bil maja 1997 predan tehnologom jeklarne Bela. Pričakujemo, da se bo z uporabo sistema v praksi potrdila njegova koristnost pri izboljševanju kvalitete ulitih izdelkov. Nadaljnje delo na tem področju pa bo izpopolnjevanje optimizacijskega postopka in njegova uporaba pri ulivanju različnih vrst jekel.

Zahvala

Avtorja se zahvaljujeta železarni ACRONI Jesenice za financiranje tega dela v okviru projekta *Modeliranje kontinuiranega ulivanja jekla* ter Ministrstvu za znanost in tehnologijo Republike Slovenije za financiranje projektov *Modeliranje kontinuiranega ulivanja in Evolucijsko računanje v optimizaciji in identifikaciji sistemov* ter sofinanciranje mednarodnega projekta COST-512: *Modelling in Materials Science and Processing*.

8 Literatura

- W. R. Irving, *Continuous Casting of Steel*, The University Press, Cambridge, 1993
- E. J. Laitinen, On the simulation and control of the continuous casting process, *Technical report 43*, Department of Mathematics, University of Jyväskylä, Finland, 1989
- B. Filipič, B. Šarler, E. Šubelj, Evolutionary optimization of continuous casting at the ACRONI (Slovenia) steelworks, *EvoNews*, December 1996, 2, 16-18
- P. Neittaanmäki, On the control of cooling during continuous casting, *Numerical Methods in Thermal Problems*, Vol. IV, R. W. Lewis, K. Morgan (ur.), Proceedings of the Fourth International Conference held in Swansea, U.K., 1985
- B. Šarler, Numerični postopek za izračun temperaturnega polja brame pri kontinuiranem ulivanju jekla, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 30, 1996, 217-223
- B. Šarler, B. Filipič, Simulator livne naprave ACRONI Jesenice: metalurška merila ohlajanja brame, *Delovno poročilo BS-BF/1996/01*, LFDT, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, avgust 1996
- B. Filipič, B. Šarler, Optimizacija procesnih parametrov livne naprave ACRONI Jesenice: optimizacijska metoda in začetni rezultati, *Delovno poročilo BS-BF/1996/01*, LFDT, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, september 1996
- D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989
- M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, Cambridge, MA, 1996
- L. Davis (ur.), *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- Z. Michalewicz, C. Z. Janikow, Genetic algorithms for numerical optimization, *Statistics and Computing*, 1, 1991, 75-91
- M. Rappaz, M. Kedro (ur.), *Modelling in Materials Science and Processing*, Proceedings of the General COST 512 Workshop, Davos, Switzerland, 1996