

ANALIZA VPLIVA PROCESNIH PARAMETROV NA KONTINUIRANO ULIVANJE ZLITINE Al4.5CuPbBi

ANALYSIS OF THE PROCESS PARAMETERS INFLUENCE ON THE DC CASTING OF Al4.5CuPbBi ALLOY

Mojca Sabolič Mijovič, Božidar Šarler

Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

Prejem rokopisa – received: 1998-11-10; sprejem za objavo – accepted for publications: 1999-01-25

V livarni IMPOL Slov.Bistrica smo leta 1996 začeli na podlagi v celoti doma razvitega sistema⁹ spremljati in zapisovati parametre polkontinuiranega ulivanja Al-zlitin. V tem delu analiziramo spremembe procesnih parametrov med postopkom ulivanja in njihov vpliv na kvaliteto. Pri tem statistično obdelamo dejanske parametre ulivanja in njihov odmik od tehnoloških predpisov. Posebej analiziramo vpliv letnega časa na delovanje hladilnega sistema. Na podlagi arhiva podatkov vzpostavimo nabor značilnih prehodnih pojavov procesnih parametrov sistema. Vzporedno s sistemom za spremljanje procesnih parametrov smo razvili eksperimentalno verificiran simulator procesa⁸. Na podlagi simulatorja in značilnih prehodnih pojavov sistema izračunamo vpliv procesnih parametrov na temperaturno polje gredice zlitine Al4.5CuPbBi premera 0.285m. Variacije temperaturnega polja povežemo s kvaliteto ulitka in ocenimo dopustne meje odmika procesnih parametrov. Opisano delo je nadaljevanje razvoja sistema za spremljanje procesnih parametrov do popolne avtomatizacije.

Ključne besede: kontinuirano ulivanje, modeliranje procesa, avtomatizacija procesa

In 1996, IMPOL Slovenska Bistrica Casthouse started to be equipped with the inhouse developed system for data acquisition and monitoring of the DC casting process for aluminium alloys. In this work, an analysis of variation of the process parameters and their influence on the cast product quality is made. The statistics of actual process parameters and their deviation from the technological setpoints is performed. The influence of the winter - summer season on the cooling system is particularly covered in the analysis. The stored process parameters archive is used for establishing a database of the typical process parameters transients. In parallel to the system for data acquisition an experimentally verified simulator of the process has been developed. Based on the simulator and typical process parameters, an influence of the process parameters on the thermal field of the Al4.5CuPbBi, 0.285 m diameter billet is calculated. Variation of the temperature field is correlated with the cast quality for estimating the allowed process parameters deviations. The described work represents the continuation of the development of the system for data acquisition and monitoring towards the complete automatization of the DC casting process.

Key words: DC casting, modelling of the process, automatization of the process

1 UVOD

IMPOL, d.d., PE Livarna ima letno kapaciteto 45.000 ton polkontinuiranih ulitkov v obliki bram in gredic, namenjenih za nadaljnjo predelavo z iztiskanjem, valjanjem in izsekovanjem. Več kot tri četrtine tako dobljenih polizdelkov proda IMPOL na zahtevne trge. Zaostajanje obstoječe tehnologije v primerjavi s tujo konkurenco je bilo v začetku devetdesetih let posledica izključno izkustvenega načina pri nastavitvi procesnih parametrov, nezadostnega spremljanja procesnih parametrov in ročnega krmiljenja ulivanja. IMPOL se je v tem času zavedel izjemnega pomena posodobitve livarne. Pri tem se je strateško odločil investirati in opreti na domače znanje za bolj poglobljeno poznavanja procesa, avtomatskega vodenja le-tega in s tem povezane boljše organiziranosti dela. Slednje se je odrazilo v pridobitvi licence ISO 9000 leta 1992.

Osnovna znanja smo si nabrali v okviru predkonkurenčnih projektov Prenos toplote in snovi pri kontinuiranem ulivanju (01.01.1991-31.12.1993), Modeliranje kontinuiranega ulivanja (01.01.1994-31.12.1996), Optimizacija polkontinuiranega ulivanja aluminijevih

zlitin (01.01.1997-31.12.1999) in mednarodnih projektov COST-512 : Modelling in Materials Science and Processing (1994-1997), COST-P3: Simulation of Physical Phenomena in Technological Applications (1998-2002). Omenjene projekte je delno podprlo MZT, delno IMPOL Slovenska Bistrica in delno Evropska skupnost. Tako akumulirano znanje je omogočilo, da je bila ena od livnih naprav v letih 1996-1998 dopolnjena z računalniškim sistemom za načrtovanje ulivanja, spremljanje in zapisovanje procesnih parametrov ter z računalnikom za analizo procesnih parametrov ter simulacijo transportnih pojavov v kontinuirano ulitih ingotih. Opisani sistem, ki je v celoti plod interdisciplinarnega povezovanja znanja (LFDT, FS-UL procesno strojništvo - večfazni sistemi, ATES-elektronika in avtomatika, IMPOL Sektor razvoj-metalurgija), je bil v letu 1997 v fazi poskusnega obratovanja in dopolnitev. Zrelost je dosegel v letu 1998, tako da se je PE Livarna odločila, da z njim opremi vse tri livne naprave, skupaj z investicijo v dve novi talilni peči, eno odstajno peč, preureditvi starih talilnih peči s sistema zrak-zemeljski plin na sistem kisik-zemeljski plin. S tem se je v letu 1998 kapaciteta livarne povečala s 35000 na 45000 ton.

2 SISTEM ZA SPREMLJANJE IN NADZOR PROCESNIH PARAMETROV KONTINUIRANEGA ULIVANJA

Sistem za zajemanje, spremljanje, nadzor, analizo in arhiviranje parametrov polkontinuiranega procesa ulivanja sestavljajo trije procesni računalniki za zajemanje, spremljanje in nadzor parametrov ter računalnik za analizo procesa ulivanja. Procesni računalniki so po vmesnih enotah povezani s podrejenimi merilnimi sistemi, ki so instalirani na livnih napravah. Mrežna povezava računalnikov omogoča prenos podatkov med procesnimi postajami ter računalnikom za analizo procesa. Sistem je povezan tudi s poslovno-informacijskim sistemom vodenja livarne.

Na procesnih računalnikih se izvajajo programi za zajemanje in nadzor procesnih parametrov. Vhodni podatki so navodila za posamezna ulivanja ter kemijske analize zlitine pred začetkom le-tega. To so časovno neodvisni parametri procesa ulivanja, ki se po akciji operaterja prenesejo iz poslovno-informacijskega sistema v sistem za spremljanje in nadzor. Na procesnih računalnikih se v realnem času dinamično prikazujejo vrednosti procesnih parametrov v obliki bar grafov in alfanumerično. Dinamična je tudi slika livne naprave in hladilnih sistemov. Odmiki procesnih vrednosti parametrov od mejnih se alarmirajo slišno in vizualno. Vrednosti parametrov se v določenem časovnem intervalu shranjujejo v arhivu. Alarmiranje in vizualizacija procesa omogoča operaterju nadzor nad parametri ulivanja.

Program za zajemanje in nadzor procesnih parametrov kliče podprogram, Livni program. Namenjen je izračunavanje odmika trenutnih vrednosti procesnih parametrov od predvidenih, optimalnih. Optimalni parametri se določijo na podlagi specifikacij livarne in se kasneje izboljšajo s programom za optimalno nastavitvev procesnih parametrov. Vhodni in izhodni podatki livnega programa so podani v obliki polja spremenljivk, ki se med izvajanjem procedure nastavljajo na optimalno vrednost.

Vhodni podatki za livni program so:

- dimenzija kokile S_0 ;
- temperatura hladila T_{cool} ;
- temperatura ulivanja T_{cast} , T_{cast00} ;
- hitrost ulivanja V_{cast00} ;
- pretok hladila Q_{cool00} ;
- časovni intervali t_0 , t_{start} , t .
- Izhodna podatka iz livnega programa sta:
 - hitrost ulivanja V_{cast} ;
 - pretok hladila Q_{cool} .

Referenčni vrednosti izhodnih parametrov livnega programa se v realnem času dinamično izpisujeta na zaslon, shranjujeta pa se tudi v arhivu za analizo procesa.

2.1 Analiza procesa

Program za analizo procesnih parametrov je instaliran na procesnem računalniku za analizo procesa. Namenjen je tehnologom. Vhodni podatki so vrednosti procesnih parametrov, ki so shranjene v arhivu (baza vrednosti procesnih parametrov). Omogoča pregledovanje podatkov po posameznih ulivanjih, izriše parametre v časovno odvisnih grafih (slika 1 in 2), oblikuje in izpiše poročilo po končanem procesu, izpiše in izriše parametre livnega programa ter statistične vrednosti. Glede na predhodno definiran livni program se izračunavata in nastavljata vrednosti dveh parametrov:

- hitrost ulivanja in
- pretok hladila.

V odvisnosti od drugih parametrov se vrednosti časovno spreminjata. Program za oba parametra izpiše najmanjšo in največjo dopustno mejo ter izmerjeno vrednost parametra. Na ta način lahko tehnolog preveri, ali je bil merjeni parameter v zelenih - dopustnih mejah. Izračunajo in izpišejo se tudi statistične vrednosti merjenih parametrov: vzorčno povprečje, vzorčna disperzija ter največji pozitivni in negativni odmik od povprečne vrednosti.

S simulatorjem se analizira vpliv odmika procesnih spremenljivk na temperaturno polje ulivanja in toplotne tokove v njem. Na podlagi analize tehnolog sklepa na povezavo med odmiki procesnih spremenljivk od livnega programa in napakami ulivanja.

Na podlagi izračunov in izkušenj načrtujemo optimalno krmiljenje procesnih parametrov.

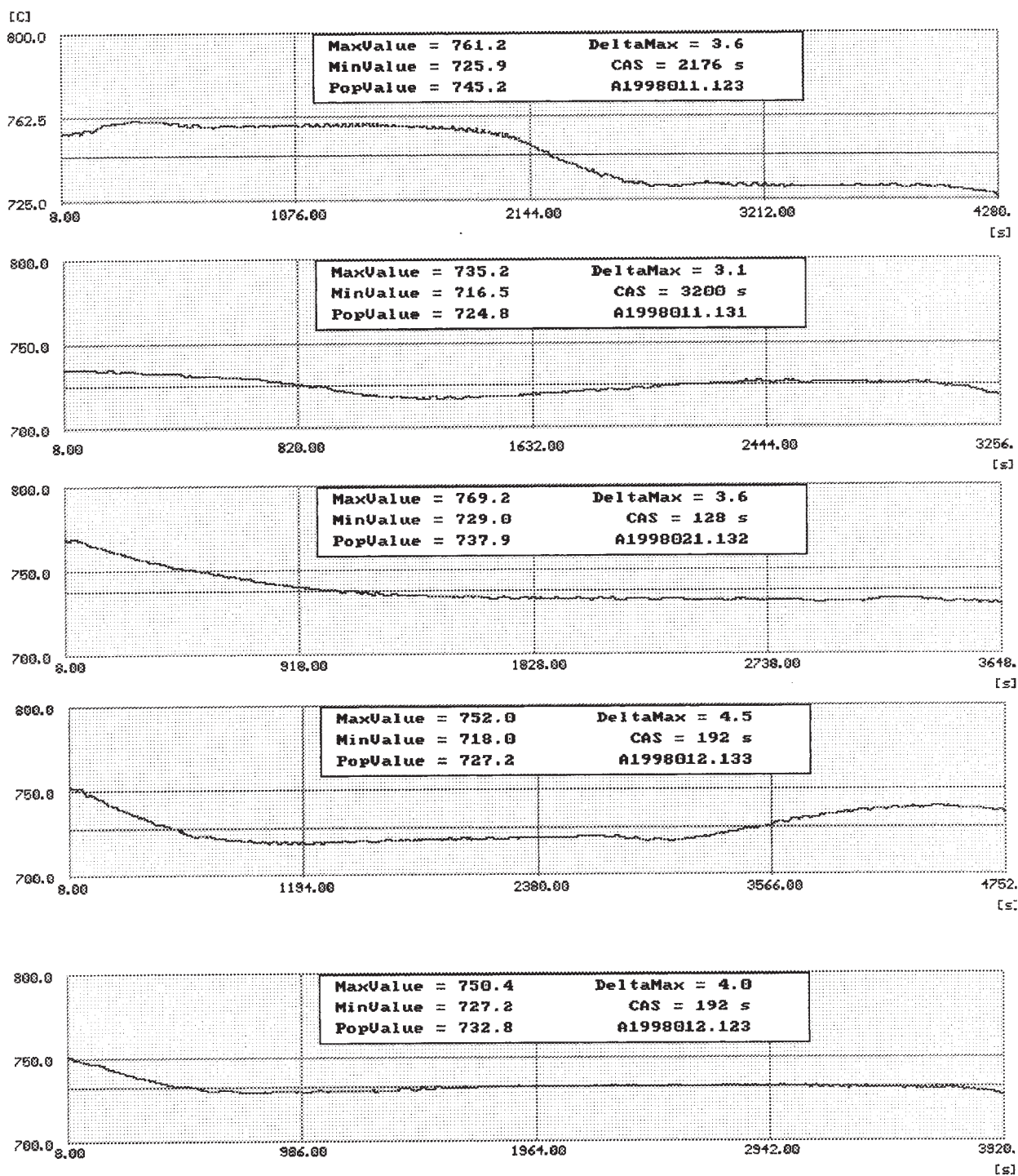
3 SISTEM ZA SIMULACIJO TEMPERATURNEGA POLJA V ODVISNOSTI OD PROCESNIH PARAMETROV

Model temperaturnega polja ingota temelji na modelu kontinuumske mešanice trdne in kapljevinske faze¹. Posebej sta izdelana modela procesa za brame in gredice.

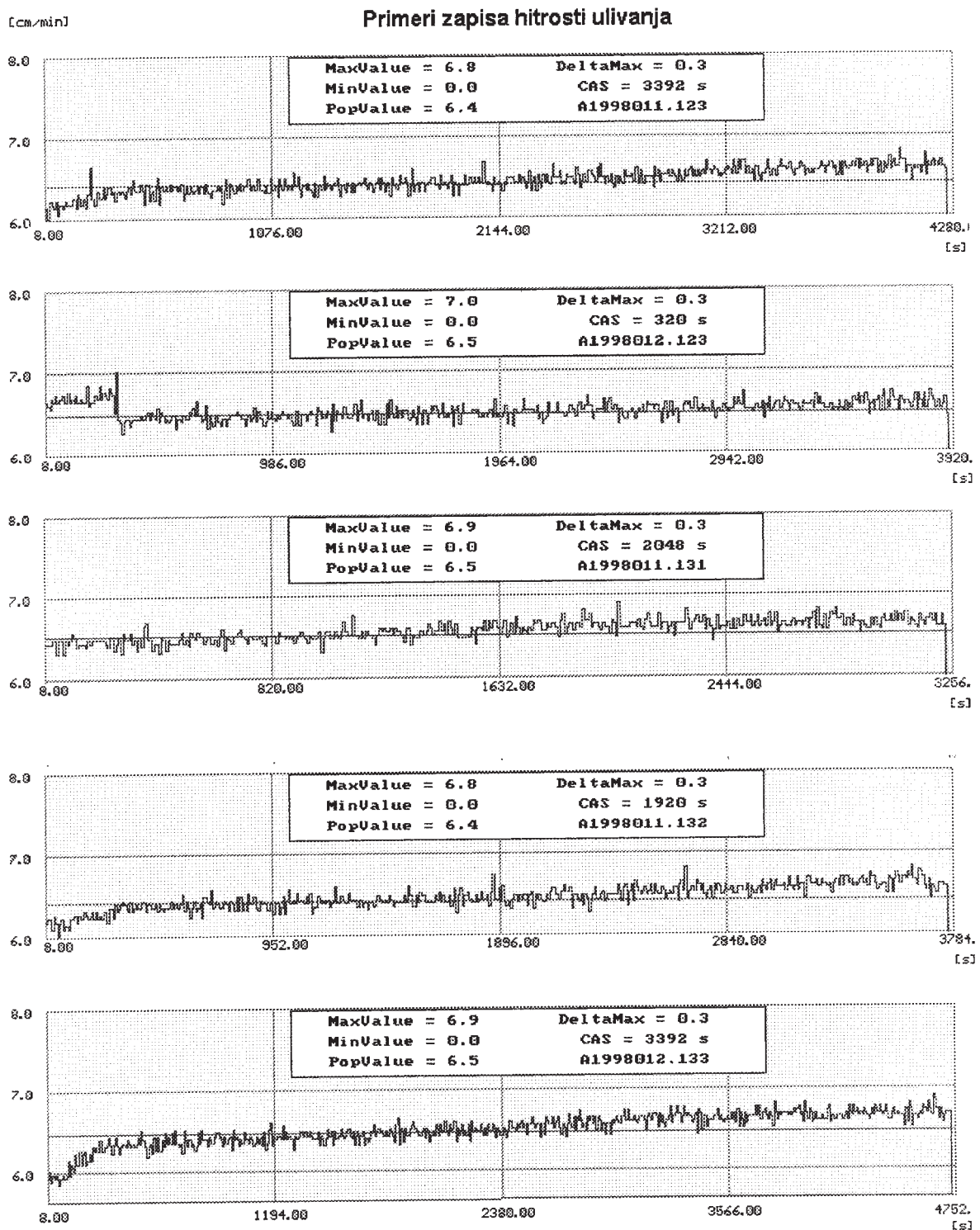
Robni pogoji procesa so razdeljeni na spodnjo in zgornjo ploskev ter na ploskev, ki jo obteka voda. Temperatura zgornje ploskve je na temperaturi ulivanja, spodnja pa je izolirana. Stranski robovi ingota so podvrženi robnim pogojem Robinovega tipa, ki vključujejo stik taline s kokilo, termično krčenje v kokili, špranjo med spodnjim robom kokile in točke, v katerih voda doseže površino ingota, ter robne pogoje zaradi odtekanja hladilne vode s površine ingota in zastoje vode v livnem kanalu.

Model je ovrednoten na podlagi dvojne recipročne metode robnih elementov^{2,3}. Podrobnosti so razvidne v⁴. Dvojna recipročna transformacija temelji na dodanih umerjenih zlepkih tankih plošč v treh dimenzijah in v osni simetriji⁵. Veliki, polni, nesimetrični sistemi algebrskih enačb, ki pri tem nastanejo, so rešeni na iterativni način⁶. Računalniški model ingota smo verificirali na podlagi eksperimentalnih podatkov, ki

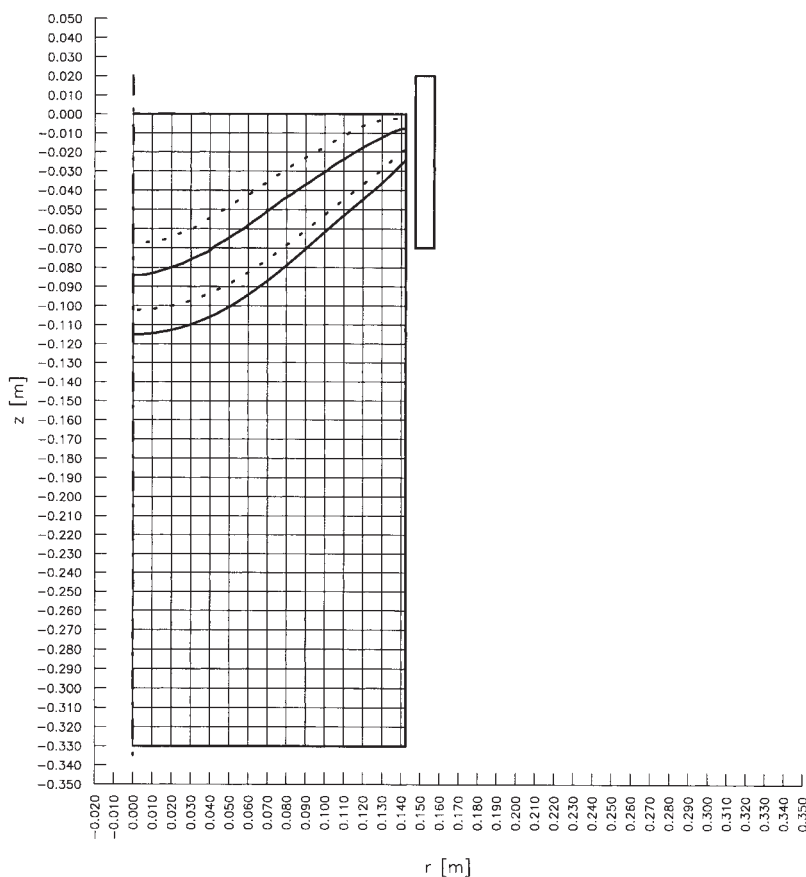
Primeri zapisa temperature ulivanja



Slika 1: Primer zapisa temperature ulivanja
 Figure 1: Example of registered casting temperature

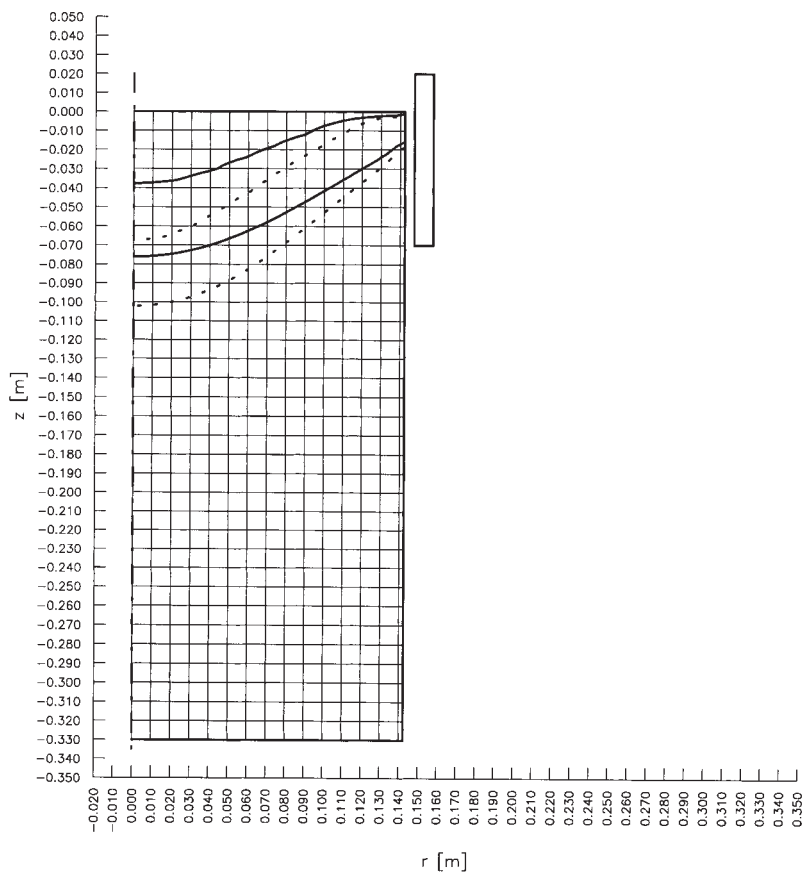


Slika 2: Primer zapisa hitrosti ulivanja
 Figure 2: Example of registered casting speed



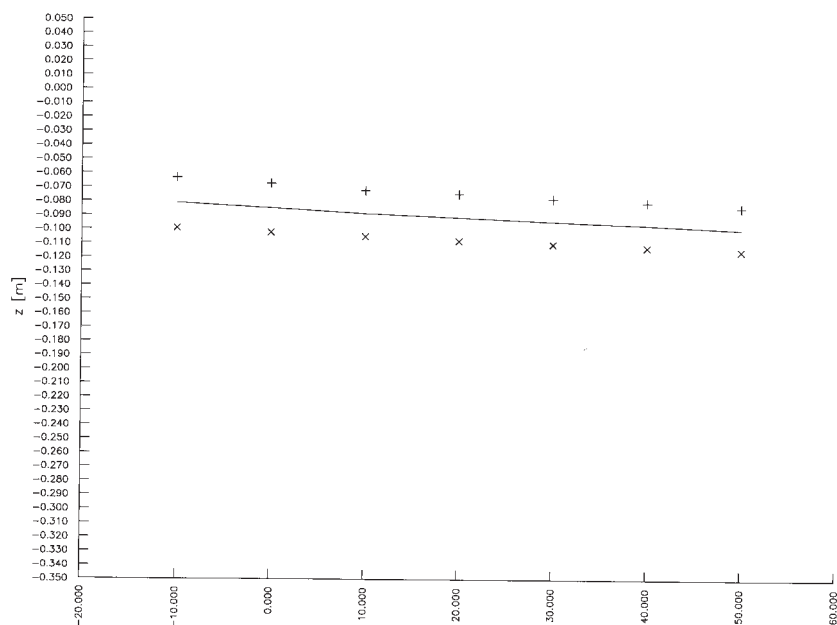
Slika 3: Izračun vpliva spremembe temperature ulivanja na položaj trdno-kapljevinskega stika. Temperatura je povečana za 40 K. Zgornja izoterma pomeni temperaturo likvidusa, spodnja pa solidusa. S pikami sta označeni referenčni vrednosti pri pogojih ulivanja, kot so predpisani z livnim programom

Figure 3: Calculation of influence of casting temperature on solid-liquid interphase position. Temperature is enhanced for 40 K. The upper isotherm represents liquidus temperature and the lower isotherm the solidus temperature. Isotherms at the reference conditions, described by the casting programme, are denoted with dots



Slika 4: Primer izračuna vpliva spremembe hitrosti ulivanja na položaj trdno-kapljevinskega stika. Hitrost je povečana za 0,5 cm/min. Zgornja izoterma pomeni temperaturo likvidusa, spodnja pa solidusa. S pikami sta označeni referenčni vrednosti pri pogojih ulivanja, kot so predpisani z livnim programom

Figure 4: Calculation of influence of casting speed on solid-liquid interphase position. Casting speed is lowered for 40 K. The upper isotherm represents liquidus temperature and the lower isotherm the solidus temperature. Isotherms at the reference conditions, described by the casting programme, are denoted with dots



Slika 5: Vpliv temperature ulivanja na povprečno globino medfaznega roba za ingote premera (a) 0,225 m in (b) 0,285m

Figure 5: Influence of the casting temperature in mean solid-liquid interphase position for billets of (a) 0,225m and (b) 0,285m

smo jih dobili iz meritev s potopitvijo termočlenov v ingot med ulivanjem. Model je bil verificiran tako za čisti aluminij⁷, kot za aluminijeve zlitine⁸. Primeri uporabe modela so razvidni s slik 3 in 4.

4 AVTOMATSKO VODENJE PROCESNIH PARAMETROV NA PODLAGI SIMULATORJA

Sistem za zajemanje, spremljanje in nadzor procesnih parametrov zapisuje 12 časovno odvisnih procesnih parametrov:

- temperaturo ulivanja
- temperaturo hladila
- hitrost ulivanja
- pretok hladila
- višino livne mize
- višino hladilne vode
- dodano maso AlTiB-ofinjevala
- stanja črpalk hladilnega sistema (4 črpalke)
- stanje ventila taline.

Neposredno lahko vplivamo (reguliramo) na naslednje procesne parametre:

- hitrost ulivanja
- stanja črpalk hladilnega sistema
- dodajanje AlTiB-ofinjevala.

Na temperaturo ulivanja (temperatura taline v livnem žlebu) bi neposredno lahko vplivali le z regulacijo temperature v talilni peči, kar nam obstoječa oprema ne omogoča.

Na temperaturo, pretok in višino hladila lahko posredno vplivamo z regulacijo črpalk hladilnega sistema. Neposredno lahko vplivamo na hitrost ulivanja z regulacijo pomika livne mize.

5 SKLEP

S programom za analizo procesa na podlagi obstoječega arhiva procesnih parametrov smo analizirali:

Vpliv letnega časa na delovanje hladilnega sistema. Primerjali smo povprečne temperature hladilne vode za posamezna ulivanja od 1.1.1998 do 1.9.1998. Vrednosti so okoli 20,5°C, ne glede na zunanjo temperaturo. Največji odmiki od referenčne vrednosti za posamezno ulivanje so med 0,3 in 1,8°C. Sklepamo, da letni čas bistveno ne vpliva na temperaturo hladilne vode.

Z grafi smo analizirali časovni potek parametrov za posamezna ulivanja. S statističnimi izračuni smo izračunali minimalne, maksimalne, povprečne vrednosti parametrov ter odmike od referenčnih vrednosti:

Temperatura taline. Povprečne vrednosti temperatur so med 715 - 750°C. Največji odmiki od referenčnih vrednosti so od 2 - 5°C. S časovno odvisnih grafov je razvidno, da je temperatura taline največkrat zunaj referenčnega pasu na začetku ulivanja.

Pretok hladilne vode. Povprečne vrednosti pretokov so med 110 - 140 l/s. Največji odmiki od referenčnih vrednosti so do 7 l/s. S časovno odvisnih grafov je razvidno, da se pretoki hladilne vode dobro ujemajo z referenčnim pasom.

Hitrost ulivanja. Povprečne vrednosti hitrosti ulivanja so od 4,8 do 6,7 cm/min. Največji odmiki od referenčnih vrednosti so do 1,6 cm/min. S časovno odvisnih grafov je razvidno, da hitrost ulivanja na začetku procesa ni v referenčnem območju. Velikokrat je zunaj referenčnega območja ves čas med procesom ulivanja. Na spremembo hitrosti ulivanja vpliva operater s pritiskom na gumb na komandnem pultu. Z avtomatskim vodenjem - regulacijo bomo bistveno boljše vplivali na časovni potek parametra hitrost ulivanja.

S simulatorjem procesa lahko izračunamo vpliv procesnih parametrov na temperaturno polje gredice zlitine Al4.5CuPbBi kateregakoli premera. Iz rezultatov je razvidno, da ima parameter žitrost ulivanja največji vpliv na temperaturno polje gredice. Druge procesne spremenljivke, ki bi jih lahko krmilili, bistveno manj vplivajo na temperaturno polje gredice. Zato bomo izvedli regulacijo hitrosti pomika livne mize. V obstoječi sistem bomo vgradili krmilni sistem, ki bo po komunikacijskem vodu povezan s procesnim računalnikom. Na podlagi že izračunanih temperaturnih polj za posamezne vrednosti parametra *hitrost ulivanja* bo program v realnem času nastavljal želene vrednosti regulatorja hitrosti pomika.

6 LITERATURA

- ¹ W. D. Bennon, F. P. Incropera, A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems - i. Model Formulation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30 (1987) 2161-2170
- ² B. Šarler, G. Kuhn, Dual reciprocity boundary element method for convective diffusive solid-liquid phase change problems, Part I : Formulation, *Int. J. Eng. Anal.*, 21 (1998) 53-63
- ³ B. Šarler, G. Kuhn, Dual reciprocity boundary element method for convective diffusive solid-liquid phase change problems, Part II: Numerical Examples, *Int. J. Eng. Anal.*, 21 (1998) 55-79
- ⁴ B. Šarler, J. Mencinger, Solution of temperature field in D.C. casted aluminium alloy billet by dual reciprocity boundary element method, *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, (v tisku)
- ⁵ B. Šarler, Axisymmetric augmented thin plate splines, *Int. J. Eng. Anal.*, 21 (1998) 81-85
- ⁶ V. Bulgakov, B. Šarler, G. Khun, Iterative solution of systems of equations in the dual reciprocity boundary element method for the diffusion equation, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 43 (1998) 713-732
- ⁷ B. Šarler, M. Jelen, R. Šafhalter, F. Tomazini, D. Panzalović, Computational Methods and Experimental Measurements VII, P. Anagnostopoulos, G. M. Carlomango, C. A. Brebbia, (Eds.), CMP Southampton and Boston, 1997, 596-609
- ⁸ B. Šarler, M. Jelen, R. Šafhalter, F. Tomazini, Comparison of measured and calculated temperature field in aluminium-copper alloy D.C. casting, *Advanced Computational Methods in Heat Transfer V*, A. J. Nowak, C. A. Berbbia, R. Bialecky, M. Zerroukat, (Eds.), CMP Southampton and Boston, 1998, 253-266
- ⁹ M. Sabolič, B. Šarler, Sistem for Data Acquiring, Monitoring, Archiving Data and Casting Analysis, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 31 (1997) 3-4, 225-259