



Society of Production
Engineering

SPMS 2018

37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

ICPE-S 2018

37th International Conference on Production
Engineering of Serbia



Faculty of Engineering
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

PRIMENA NUMERIČKE SIMULACIJE U UNEPREĐENJU PROCESA LIVENJA FLOTACIJSKIH KUGLI KOJE SE KORISTE U RUDARSKOJ INDUSTRIJI

Aleksandar JOVIČIĆ^{1*}, Radomir SLAVKOVIĆ², Nedeljko DUČIĆ², Radomir RADIŠA³, Srećko
MANASIJEVIĆ³

¹Visoka broderska škola akademskih studija, Beograd, Srbija, aleksandar.jovicic@vbs.edu.rs

²Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Srbija, radomir.slavkovic@ftn.kg.ac.rs

³Istraživačko-razvojni institut Lola, Beograd, Srbija, radomir.radisa@li.rs; srecko.manasijevic@li.rs

*Kontakt adresa autora: aleksandar.jovicic@vbs.edu.rs

Rezime: U radu je prikazano unapredjenje procesa livenja flotacijskih kugli bazirano na primeni numeričke simulacije - savremenih softverskih sistema za optimizaciju i upravljanje parametrima procesa livenja. Koncept obuhvata virtuelnu proizvodnju, praktičnu realizaciju tehnološkog procesa korišćenjem unapredjene verzije alata za livenje i konačnu proveru kvaliteta odlivaka - flotacijskih kugli. Primenom metodologije prikazane u radu skraćuje se vreme razvoja novog proizvoda i njegove proizvodnje u odnosu na tradicionalne metode testiranja putem pokušaja i pogreški.

Ključne reči: flotacijske kugle, livenje, numeričke simulacije, tvrdoća.

1. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE I PRIMENA FLOTACIJSKIH KUGLI

1.1 Pregled primene numeričke simulacije u procesu livenja

Proces livenja je veoma stara proizvodna tehnologija koja je evoluirala tokom vremena u veliki broj raznovrsnih postupaka livenja. Razvoj oblasti livarstva zasnovan je na naučnim rezultatima od kojih su mnogi proizvod upotrebe specijalizovanih savremenih softverskih sistema. Pomenuti softverski sistemi omogućuju virtuelnu proizvodnju zasnovanu na numeričkoj simulaciji, s ciljem da se optimizuju procesni parametri, poboljša kvalitet odlivka i smanji trošak proizvodnje.

Nimbulkar i Dalu (2016) predstavljaju primenu softvera *Auto-CAST X1 za simulaciju*

procesa livenja. Naime, autori ističu značaj dizajna ulivnog sistema i sistema hranjenja za ispravnost odlivka kroz brojne simulacije u pomenutom softveru [1]. Jie i njegovi koautori (2014) koriste softverski paket *Pro Cast u unapredjenju livenja legure aluminijuma* i donose zaključak da povećanjem temperature liva i brzine livenja rešavaju problem poroznosti [2]. Dabade sa svojim saradnicima (2013) koristi softver za simulaciju procesa livenja *MAGMASoft*, za analizu različitih nedostataka u procesu livenja, detektujući njihov uzrok kroz simulacije dimenziono i poziciono različitih varijanti sistema livenja i hranjenja [3]. Dučić i drugi (2017) prezentuju metodologiju optimizacije ulivnog sistema za livenje u pesku upotrebom genetskog algoritma. Predmet optimizacije je geometrija ulivnog sistema, konkretno, poprecni presek

ulivnika i visina livenja. Cilj optimizacije je minimizacija vremena livenja. Numericka simulacija je korisna kao verifikacija valjanosti optimizovane geometrije ulivnog sistema [4].

1.2 Kokilno livenje flotacijskih kugli

Kokilno livenje je jedan od postupaka izrade flotacijskih kugli od niskohromnog belog livenog gvožđa. Proizvedene flotacijske kugle se koriste za mlevenje rude bakra (kugla sa 2,5%Cr). Livene flotacijske kugle pored mlevenja rude svoju primenu nalaze u cementarama, rafinerijama, elektranama i kvarcnim postrojenjima. Flotacijske kugle koje se koriste u tehnologiji pripreme rude bakra su obično sledećeg hemijskog sastava [C=(3.2-3.8)%, Si=(0.4-0.8)%, Cr=(2.2-2.8)%, Mn=(0.4-0.8)%, Pmax=0.1%, Smax=0,1%]. Površina livene flotacijske kugle za mlevenje ne sme imati defekte od livenja kao što su: pukotine i očigledna poroznost, šupljine, hladne varove, loše spojeve, hrapavu površinu itd. Najčešće greške su da kugla nije pravilnog sferičnog oblika, prečnici variraju $\pm 2\text{mm}$, a u zoni ostatka ulivnog kanala uočava se breg visine 2-4mm. Jasno je izražen prečnik u zoni spoja kalupa. Događa se da površina kugle bude izrazito hrapava. U pogledu unutrašnjeg kvaliteta na isečku kugle nije dozvoljena poroznost, gasoviti mehuri, nehomogenost materijala kugle, rupe (šupljine) u odlivku koje pobuđuju koncentraciju napona što dramatično skraćuje vek trajanja kugle, kao i drugi unutrašnji defekti.

1.3 Određivanje površinske i zapreminske tvrdoće flotacijske kugle

Zapreminska tvrdoća se izračunava prema formuli A.V.H. (Average Volumetric Hardness)[5]:

$$A.V.H. = 0.289A + 0.437B + 0.203C + 0.063D + 0.008E \quad (1)$$

gde je:

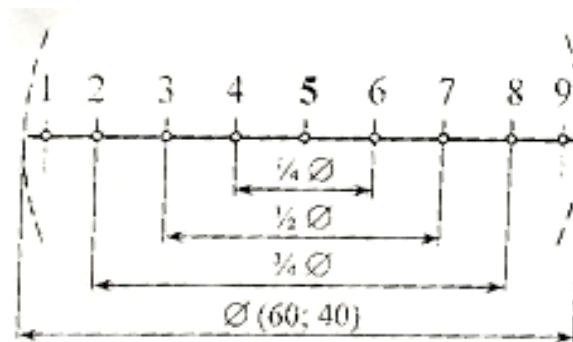
A - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 1 i 9 (Sl. 1),

B - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 2 i 8 (Sl. 1),

C - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 3 i 7 (Sl. 1),

D - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 4 i 6 (Sl. 1), i

E - vrednost izmerene površinske tvrdoće u tački 5 (Sl. 1).



Slika 1. Raspored mernih mesta

Za ispitivanja površinske tvrdoće, na osnovu definisanih ravni, izrađen je isečak po prečniku kugle u ravni spoja kalupa. Tom prilikom je uočena rupa (supljina) nepravilnog oblika 13x8(mm) i dubine 4-6(mm). Rupa je posledica stvaranja gasovitog mehura unutar kugle, nastalog usled nehomogenog liva i nepravilne brzine hladjenja.

Tabela 1. Prikaz rezultata površinske i zapreminske tvrdoće kugli livenih prethodnom verzijom alata

Merno mesto								
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
56	54	55	54	<20	54	56	56	57
Zapreminska tvrdoća: A.V.H.=55,19HRc								
Površinska tvrdoća: 56,5 HRc								

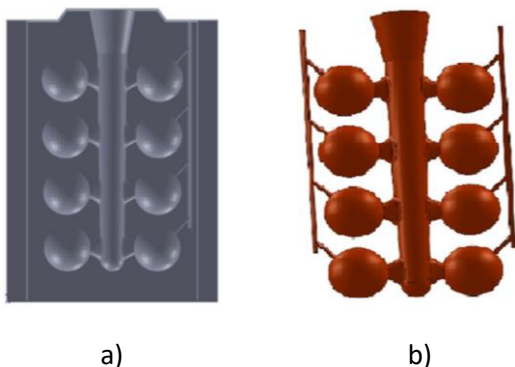
Na osnovu uvida u podatke koje po pitanju površinske i zapreminske tvrdoće ističu najveći svetski proizvođači flotacijskih kugli za mlinove (SAD, Kanada, Kina...), granične vrednosti tvrdoće za kugle, prečnika od 25 do 150mm, su od 58 - 65HRc za površinsku tvrdoću i 56 - 64HRc za zapreminsku tvrdoću. Analizirajući rezultate srednje vrednosti površinske tvrdoće kugle livene kokilnim livenjem, korišćenjem alata na slici 2, ostvarena vrednost je 56.5HRc, što je manje od minimalne preporučene vrednosti od 58 HRc. Vrednost zapreminske tvrdoće (A.V.H.) je 55.19HRc, što je takođe manje od minimalne preporučene vrednosti

od 56HRC [6]. Sagledavajući strukturu rezultata uzorka uočava se da je na mernom mestu broj 5 vrednost izmerene tvrdoće <20HRC što je posledica mikro šupljine u odlivku (Sl. 6). Treba napomenuti da se šupljine javljaju na pojedinim odlivcima. Ukoliko se eliminišu šupljine u odlivku doći će do povećanja površinske i zapreminske tvrdoće a pretpostavka je da bi tada tvrdoća flotacijskih kugli bila u propisanim granicama, koje zahtevaju svetski proizvođači kugli za mlevenje rude.

2. GREŠKE U PROCESU LIVENJA FLOTACIJSKIH KUGLI

Pravilno i potpuno popunjavanje kalupa predstavlja važan zadatak kod procesa livenja, kojim se postiže visok kvalitet odlivka. Uloga dizajna ulivnog sistema i dizajna hranitelja u ostvarenju ovog cilja veoma je značajna. Nepravilan dizajn ulivnog sistema dovodi do brojnih nedostataka u procesu livenja, što za posledicu ima nizak kvalitet odlivka. Dakle, zadatak ulivnog sistema je da obezbedi glatko, ujednačeno i potpuno punjenje kalupa čistim, istopljenim metalom [7].

Za odvodjenje gasova iz odlivka, u postojećoj verziji alata, korišćeni su odvodnici gasova. Alat je izradjen na CNC glodalici.



Slika 2. a) Izgled polovine alata - 3D model i b) izgled odlivka sa ulivnim sistemom i odvodnikom

Generisanje G - koda izvedeno je softverskim paketom Solid CAM. Dimenzionisanje ulivnog sistema izvršeno je prema livačkim standardima.

Glatko punjenje kalupa eliminiše turbulencije, ujednačeno punjenje obezbeđuje kontinuirano punjenje u toku vremena, a

potpuno punjenje podrazumeva vođenje istopljenog metala do tankih i krajnjih delova kalupa. Tokom hladjenja odlivka dolazi do zapreminskog skupljanja metala, tj. smanjenja zapremine odlivka. Značaj hranitelja ogleda se u njihovoj funkciji da nadoknadjuju odlivku manjak tečnog metala usled zapreminskog skupljanja.

U uslovima eksploatacije flotacijskih kugli moraju biti eliminisane mogućnosti pojave unutrašnjih šupljina (lunkera) i mikro poroznosti koje su veoma osetljive na koncentraciju napona i često su uzročnik loma odnosno pucanja flotacijskih kugli. Pojava ovih grešaka posledica je neadekvatnog rešenja ulivnog sistema.

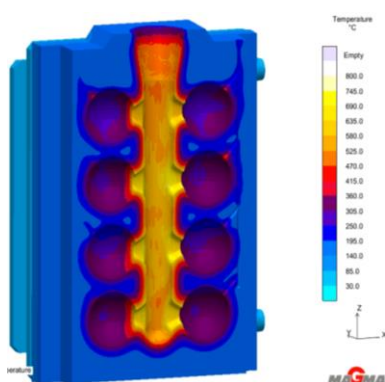
U ovakvim slučajevima veoma je značajno pre izrade alata, potrebnih za oblikovanje kalupa, izvršiti simulaciju procesa livenja odnosno izvršiti virtuelni proces livenja na osnovu kojeg se može proveriti širok spektar tehničko-tehnoloških karakteristika odlivka. U nizu mogućih kriterijuma za ocenu kvaliteta odlivka, u ovom slučaju dati su rezultati simulacije po kriterijumima „Solidification“, „Fstime“, „Hotspot“ i „Porosity“ na osnovu kojih se doneti zaključci o unutrašnjim greškama u odlivku.

Rezultati simulacije prikazni su u 3D grafičkom okruženju, gde se rendgenskim pogledom u kalup vidi tok punjenja kalupne šupljine, brzina punjenja kalupa kao i temperaturne oblasti. Presecima kroz odlivke dobijen je front očvršćavanja i moguća mesta poroznosti usled očvršćavanja metala. Za ulaz u simulaciju procesa livenja primenom MAGMASoft uradjen je 3D CAD model svih elemenata kalupne šupljine koju popunjava tečni metal, ulivni sistem, hranitelji i odvodnici gasova.

Pored prethodno navedenih 3D geometrijskih modela (STL standardnog grafičkog formata) za simulaciju potrebni su i parametri tehnologije livenja (temperatura livenja, materijal kalupa, vrsta premaza, materijal odlivka, vrsta livačkog lonca i sl.). Nakon procesiranja livenja date se preporuke i zaključci. Na osnovu njih, izvodjene su simulacije sa promenjenim parametrima dok

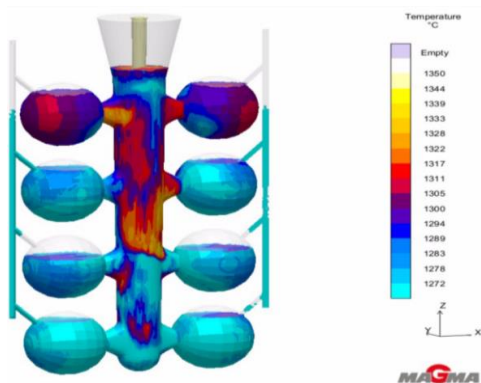
se nije došlo do konačnog rešenja. Takođe, pri pregledu rezultata simulacije u nastavku date su slike kritičnih i zanimljivih delova, potrebnih korisniku rezultata simulacije.

Alat za livenje flotacijske kugle (Sl. 3) pre ulivanja liva zagrejan je na temperaturu od minimum 120°C. Temperatura alata kreće se i do 700°C. Jasno se uočava (Sl. 3) da su najveće temperature alata na mestima gde se nalazi ulivni sistem pa iz tog razloga alat treba zaštititi termoizolacijskim premazima. Ukoliko se ne bi vršilo premazivanje došlo bi do značajnog oštećenja alata. Upotrebom termoizolacijskih premaza značajno se produžava vek alata.



Slika 3. Raspored temperatura u alatu nakon livenja

Kriterijum „Solidification“ daje mogućnost prikazivanja faza očvršćavanja sa izotermama temperaturnih polja očvršćavanja, temperaturnih gradijanata, tečnog testastog ili čvrstog stanja (Sl. 4) gde se vidi da odlivak očvršćava od tanjeg ka masivnije delu, dok ulivnik poslednji očvršćava čime je obezbeđeno potrebno hranjenje odlivka.

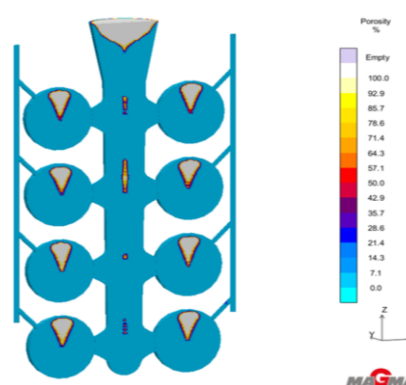


Slika 4. Izgled odlivka pri očvršćavanju

Prilikom hlađenja odlivka (Sl. 4) dolazi do zatvaranja kanala za odvođenje gasova čime oni gube svoju funkciju i gasovi ostaju

zarobljen u kalupu što za posledicu ima pojavu poroznosti u odlivku. Uzrok nastanka gasovitih mehurova treba tražiti u nedovoljnom prečniku odvodnika gasova kao i vrtložnom strujanju liva što je posledica neadekvatno rešenog ulivnog sistema.

Pojava poroznosti na odlivcima (Sl. 5) direktno utiče na smanjenje tvrdoće odlivaka, samim tim i smanjenu otpornost na habanje što direktno utiče na povećanu potrošnju odlivaka tokom eksploatacije. Kriterijum „Porosity“ omogućava analizu poroznosti i šupljina u odlivku. Rezultati dobijeni primenom softverskog paketa MAGMAsoft potvrđeni su u praksi (Sl. 6). U poprečnom preseku kugle (Sl. 6), livene u alatu prema prethodnoj verziji, jasno se uočavaju gasoviti uključci koji se javljaju u obliku zarobljenog gasa kao “naduvani” otvori sto za posledicu ima poroznost.



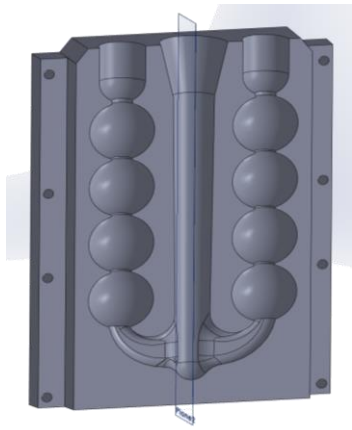
Slika 5. Kriterijum “Porosity”



Slika 6. Izgled odlivka - flotacione kugle nakon ispitivanja na udar

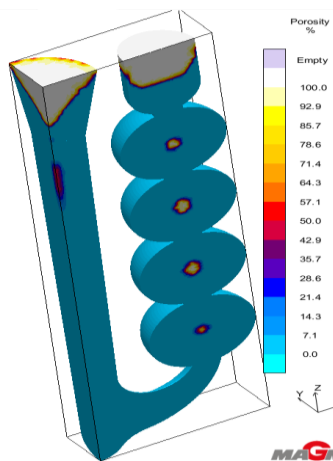
3. UNAPREĐENJE PROCESA LIVENJA FLOTACIJSKIH KUGLI

Novim rešenjem alata za livenje “odozdo” (Sl. 7) izbegava se vrtložno strujanje liva.



Slika 7. Izgled alata za livenje flotacionih kugli sa načinom livenja “odozdo”

Punjenje alata vršeno je livenjem kugle kroz kuglu. Numeričkom simulacijom je potvrđeno da ne dolazi do stvaranja vazdušnih mehura, odnosno, ne dolazi do pojave poroznosti u gornjim zonama odlivka kao što je bio slučaj sa prethodnim verzijama alata.



Slika 8. Poroznost pri 100% očvrslag metala

Nakon sprovedene simulacije procesa livenja u softverskog paketu MAGMASoft, prema kriterijumu “Porosity “ (Sl. 8) uočava se poroznost u centru kugle. Poroznost u centru kugle nema značajnijeg uticaja na habanje jer se kugla nikada ne pohaba do kraja (Sl. 9) a ista nije uočena pri livenju (Sl. 10) jer se očigledno radi o mikro poroznosti koju softver detektuje.



Slika 9. Nivo habanja flotacijske kugle

Radi potvrde sprovedenih istraživanja, u realnim uslovima, uz strogu kontrolu parametara tehnologije livenja (temperatura livenja, materijal kalupa, vrsta premaza, materijal odlivka, vrsta livačkog lonca...) korišćenih u simulaciji sprovedeno je livenje flotacijskih kugli prema novoj verziji alata.



Slika 10. Polovina kugle - livena prema novoj verziji alata

U poprečnom preseku flotacijske kugle, livene sa novom verzijom alata, nije uočena poroznost (Sl. 10).

Tabela 2. Prikaz rezultata površinske i zapreminske tvrdoće kugli livenih prema novoj verziji alata

Merno mesto								
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
58	54	55	54	52	54	56	56	58
Zapreminska tvrdoća: A.V.H.=56,4HRc								
Površinska tvrdoća: 58 HRc								

Analizirajući rezultate, srednja vrednost površinske tvrdoće uzorka 2, kugli radjenih prema novoj verziji alata (merna mesta 1 i 9) 58HRc = 58HRc i vrednost zapreminske tvrdoće A.V.H. =56,4HRc>56HRc, zaključuje se da je tvrdoća ove kugle jednaka preporučenim vrednosti što je i bio cilj unapredjenja.

4. ZAKLJUČAK

Savremene livnice se ne mogu zamisliti bez primene numeričke simulacije u postupku razvoja proizvoda. U konkretnom slučaju, prilikom livenja flotacijskih kugli, tokom

eksploatacije uočene su šupljine u odlivcima koje su veoma osjetljive na koncentraciju napona i često su uzročnik loma odnosno pucanja flotacionijskih kugli. Primenom virtuelne proizvodnje, simulacijom procesa livenja, utvrđeno je da pojavu ovih grešaka prouzrokuje neadekvatno rešenje ulivnog sistema. Unapredjenje procesa livenja flotacijskih kugli sprovedeno je primenom softverskog paketa MAGMASoft, a na osnovu različitih kriterijuma (Porosity, Fstime, Hotspot, itd.) izveden je zaključak o poboljšanoj tehnologiji livenja flotacijskih kugli.

Konstrukcijom novog alata, livenje se vrši "odozdo". Alat je modifikovan tako da se eliminiše vrtložno strujanje liva [8]. Ulivanjem kugle kroz kuglu, simulacijom kao i livenjem u strogo kontrolisanim uslovima potvrđeno je da ne dolazi do stvaranja vazdušnih mehura u odlivku, samim tim i poroznosti u odlivku. Primenom numeričke simulacije unapredjen je proces livenja flotacijskih kugli i dostignute su potrebne preporučene vrednosti kako površinske tako i zapreminske tvrdoće.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju IKL Industrijski kombinat livnica d.o.o. Guča i Istraživačko-razvojnem institutu Lola Beograd na pomoći oko realizacije procesa livenja, eksperimentalnih merenja u radu kao i na korišćenju softverskog paketa MAGMASoft tokom procesa simulacije livenja.

LITERATURA

- [1] S.L. Nimbalkar, R.S. Dalu: Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate, Perspectives in Science, Vol. 8, pp. 39-42, 2016.
- [2] Z. Jie, Z. Dongqi, W. Pengwei, W. Gang, L. Feng, D. Penglong: Numerical simulation research of investment casting for TiB₂/A356 aluminum base composite, Rare Metal Materials and Engineering, Vol. 43, pp. 47-51, 2014.
- [3] U.A. Dabade, R.C. Bhedasgaonkar: Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique, Procedia CIRP, Vol. 7, pp. 616-621, 2013.
- [4] N. Dučić, Ž. Čojbašić, S. Manasijević, R. Radiša, R. Slavković, I. Milićević, Optimization of the gating system for sand casting using genetic algorithm, International Journal of Metalcasting, Vol. 11, pp. 255-265, 2017.
- [5] About Handnes, available at: www.zgffty.com/list-41-1.html, accessed: 17.07.2018.
- [6] High hardness, available at: <http://energosteel.com/en/productsspecificatio-pr-grinding-balls-5-grouphardness/>, accessed: 17.07.2018.
- [7] S. Manasijević, Z. Pavlović-Aćimović, R. Radisa: Optimizacija parametara livenja klipova koriscenjem softverskog paketa MAGMASoft, Metalurgija, Vol. 13, No 3, pp. 221-230, 2007.
- [8] I. Vasková, D. Fecko, L. Eperješi: Comparison of simulation programs MAGMASoft and NOVAFLOW & SOLID in terms of results accuracy, Archives of Foundry Engineering, Vol.11, pp. 51-54,2011.

THE APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION IN THE IMPROVEMENT OF THE FLOTATION BALLS CASTING PROCESS USED IN THE MINING INDUSTRY

Abstract: *The paper presents the improvement of the flotation balls casting process based on the application of numerical simulation - modern software systems for optimization and control of casting process parameters. The concept includes virtual production, practical realization of the technological process by using an advanced version of casting tools and final check of casting parts quality - flotation balls. By applying the presented production methodology, the time, necessary for the development of new product and its production, is reduced compared to traditional testing methods through attempts and errors.*

Keywords: *flotation balls, casting process, numerical simulations, hardness.*