

# Primena reverznog inženjeringa pri projektovanju radnog kola Peltonove turbine

## Using of Reverse Engineering for Design of Pelton Turbine Runner

Radimir Radiša<sup>1</sup>, Aleksandar Stepanović<sup>1</sup>, Srećko Manasijević<sup>1</sup>, Vesna Mandić<sup>2</sup>, Ljubomir Nešovanović<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lola Institut, Kneza Višeslava 70a, 11 000 Beograd, Srbija

<sup>2</sup> Fakultet Inženjerskih Nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Sestre Janić 6, 34 000 Kragujevac, Srbija

**Rezime** - Rad opisuje inovativno rešenje pri revitalizaciji hidrauličnih turbina upotrebom tehnika reverznog inženjeringa i virtuelne proizvodnje. Upotreba modernih digitalnih alata pri razvoju, projektovanju i proizvodnji pokazala je značajne prednosti kod unapređenja postojećih hidrauličnih turbina. Modelska ispitivanja hidrauličnih turbina nisu neophodna, jer se kao polazna osnova koristi postojeća geometrija lopatica turbinskog kola. Digitalni alati omogućuju da se na lak način osvoji geometrija, unaprede hidraulične osobine turbine i ostvari bolji stepen korisnosti, uz minimalne troškove. Cilj je da se prikaže optimizovani oblik i unapređenje radnih karakteristika Peltonove turbine.

**Ključne reči** - Peltonova turbina, Reverzni inženjering, Konceptualno modeliranje, Metodologije, Digitalni alati

**Abstract** - The paper describes the innovative solution for revitalization of hydro turbines by using the techniques of reverse engineering and virtual production. The application of modern digital tools in developing, designing and producing shows substantial benefits in improving the existing hydro turbine. Model testing in these cases is not necessary to implement because as the basis is used the known geometry of existing hydro turbine runners and buckets. Digital tools allow a relatively easy way to develop new geometry, improve hydraulic performances of turbines and reach a greater level of usefulness with minimal costs. This paper aims to show optimized geometry and improvement of the Pelton turbine performance using the presented approach.

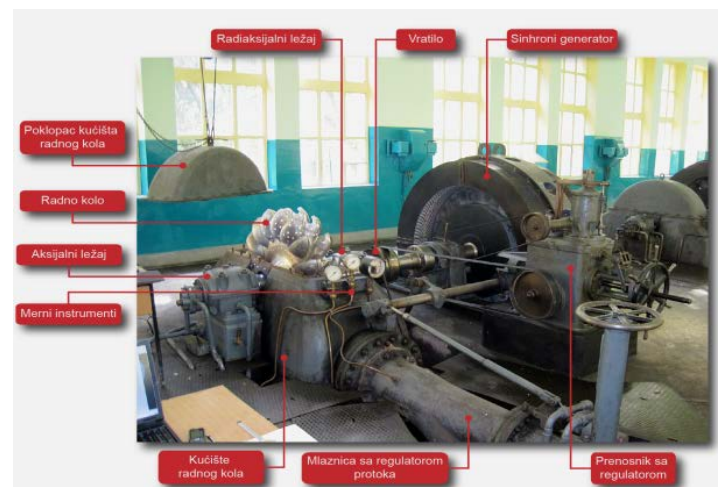
**Index Terms** - Pelton turbine, Reverse engineering, Conceptual modeling, Methodologies, Digital tools

### I U V O D

U radu je data implementacija inovativnih rešenja prilikom revitalizacije postojećih hidroturbina sa primenom na Peltonovoj turbini korišćenjem tehnika reverznog inženjeringa. Cilj je optimizacija oblika radnog kola i povećanje energetske efikasnosti hidroturbina [1]. Ovaj rad daje prikaz tehnika i tehnologija pri revitalizaciji radnog kola Peltonove turbine za mini hidroelektranu „Seljašnica“.

Hidroenergetski potencijal vodotokova vekovima predstavlja značajan izvor energije, tragovi korišćenja energije vode mogu se

prati još od drevnih civilizacija Egipta, Mesopotamije, Kine, itd, gde je korišćena za pokretanje prvih mašina. Sa pronalaskom i početkom intenzivnog korišćenja električne energije tokom devetnaestog i početkom dvadesetog veka počinje i nagli razvoj hidrauličnih mašina za njenu proizvodnju. U ranoj fazi eksploatacije hidroenergetskih potencijala proizvedena električna energija retko je prelazila nekoliko stotina kilovata. Danas, primenom savremenih tehnologija i znanja o projektovanju, materijalima i proizvodnji učinjen je veliki napredak u razvoju i poboljšanju hidro-opreme, u cilju zadovoljavanja sve kompleksnijih zahteva. Povećanje cene nafte usled iscrpljivanja postojećih resursa, povećane zabrinutosti o negativnim uticajima sagorevanja uglja – efekat staklene bašte, korišćenje nuklearne energije, pa i uticaj velikih hidroelektrana na prirodnu okolinu, povećali su zanimanje za korišćenje hidroenergetskih potencijala malih vodotokova u svim delovima sveta. To je uslovalo razvoj modernih hidroturbina, koje mogu da rade u uslovima malih protoka i padova vodene mase.

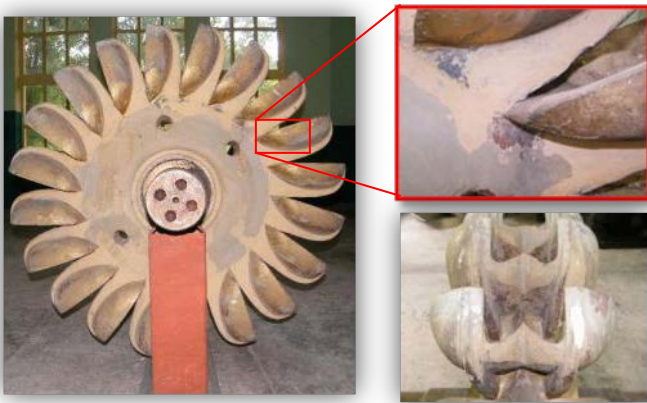


Slika 1. Prvi agregat - Peltonova turbina MHE „Seljašnica“

U prvoj fazi potencijalna energija vodene mase pokreće hidrauličnu turbinu i pretvara se u mehaničku energiju, a u drugoj fazi ova mehanička energija pokreće generator koji je pretvara u električnu energiju. Snaga proizvedene električne energije zavisi od protoka vode i razlike u nivou između nivoa gornje i donje vode.

## II OPIS MHE "SELJAŠNICA"

MHE 'Seljašnica' kod Prijepolja je jedna od 31 koja je u pogonu, ali radi sa smanjenim kapacitetom usled oštećenja radnog kola jednog agregata. Izgrađena je i puštena u rad 1952. godine sa instalisanom snagom od 1.260 kVA, projektovanom maksimalnom snagom koju predaje elektromreži od 800 kW i sa padom od 160 m. Posедуje dva sinhrona generatora snage 2x630 kVA. Napon priključenja na mrežu je 10 kV. Godišnja proizvodnja električne energije iznosi oko 3 GWh, slika 1.



**Slika 2.** Radno kolo iz 1952. godine sa karakterističnim oštećenjima u korenu lopatice, na sečici i na košu

Prvobitna radna kola Peltonove turbine u MHE 'Seljašnica' su bila izrađena od bronzе, slika 2. Usled eksploatacije, dinamičkih opterećenja, erozije, kavitacije i raznih nečistoća iz vode došlo je do njihovog znatnog oštećenja što je uslovlilo gubitke u snazi > 60 %. Merenjеm proizvedene količine električne energije, investitor je utvrdio da je proizvedena količina energije na godišnjem nivou, znatno umanjena u odnosu na nominalne vrednosti. Na osnovu toga je zahtevao revitalizaciju radnog kola turbine.



**Slika 3.** Radno kolo iz 1978. godine tip Pelton P1 0.9/120, Litostroj

Radno kolo na agregatu br.1 je zamenjeno 1978. godine, slika 3. Tip turbine: Pelton P1 0,9/120, Litostroj. Ovo radno kolo je izrađeno kao monolitni odlivak od nerđajućeg čelika, ručno obrađeno i projektovano je sa sledećim parametrima:

- nominalni broj obrtaja: od 500 o/min,
- maksimalni broj obrtaja: 900 o/min,
- prečnik vratila: 150 mm,
- prečnik glavčine turbinskog kola 220 mm,
- prečnik turbinskog kola u podnožju lopatica 700 mm,
- spoljni (najveći) prečnik turbinskog kola oko 1180 mm,
- širina glavčine turbinskog kola: 300 mm,
- širina lopatica: 320 mm,
- dužina lopatica: oko 280 mm.

Upravo ovo radno kolo je poslužilo kao polazni model za razvoj i projektovanje novog koje treba da zameni postojeće radno kolo iz 1952. godine, primenom tehnika reverznog inženjerstva gde se na osnovu postojećeg objekta mogu pronaći njegove konstruktivne karakteristike. Na ovaj način izbegnuto je skupo i dugotrajno modelsko ispitivanje radnih kola u cilju postizanja zahtevanih projektinih parametara [2].

## II DIGITALIZACIJA RADNOG KOLA PELTONOVE TURBINE

Reverzni inženjering u modernom smislu podrazumeva korišćenje specijalne opreme (hardver i softver) za dobijanje geometrijskih podataka koji se koriste za stvaranje virtuelnog trodimenzionalnog modela koji odgovara originalu. Grubo, moguće je na tri načina dobiti potrebne podatke: kontaktno, beskontaktno i destruktivno. Dobijeni podaci su najčešće u obliku dvodimenzionalnih slika poprečnih preseka ili oblaka tačaka, definišu geometriju modela i pomoću posebnih softverskih paketa pretvaraju se u trodimenzione geometrijske modele [3].



**Slika 4.** Laserski skener

Kontaktne metode (mehaničke ruke, CNC koordinatne merne mašine) imaju veliku tačnost. Beskontaktnе metode rade na



principu projektovanja energetskih izvora (svetlosti, zvuka, magnetnih polja,...) na objekte, a potom se merenjem sprovedene ili reflektovane energije dobijaju dvodimenzionalne slike preseka ili oblaci tačaka koji predstavljaju geometriju objekta. Prednosti beskontaktnih metoda su odsustvo fizičkog kontakta između objekta i mernog aparata, dobra tačnost i brzina kao i mogućnost skeniranja objekata velikih gabarita. Destruktivne metode za akviziciju podataka koriste se za merenje malih i kompleksnih objekata. Destruktivne metode omogućavaju snimanje unutrašnjih delova strukture koji su skriveni unutar konture, ali se pri skeniranju objekat uništava [4].

Za digitalizaciju radnog kola Peltonove turbine primenjen je beskontaktni metod digitalizacije, pri tom je korišćen laserski skener ZScanner 700 proizvođača Z Corporation i softverski paket Geomagic Studio 12, slika 4. Ovako ukomponovan sistem odlikuje velika brzina skeniranja (akvizicije) do 18.000 tačaka u sekundi, dobra tačnost do 50  $\mu\text{m}$  (XY) i rezolucija od 0,1 mm po Z-osi.

Sam proces digitalizacije se sastoji iz nekoliko koraka: 1. čišćenje objekta koji se skenira, 2. matiranje sjanih površina, 3. postavljanje markera na skenirani objekat, 4. kalibracija sistema za skeniranje, 5. akvizicija – formiranje poligona, odnosno oblaka tačaka, slika 5.

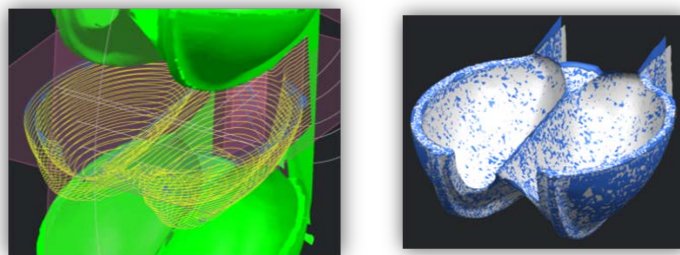


**Slika 5.** Proces digitalizacije radnog kola Peltonove turbine

#### IV FORMIRANJE CAD MODELA

Na osnovu dobijenog oblaka tačaka pristupa se formiranju 3D CAD modela. U ovom slučaju to je urađeno u okruženju Siemens/UGS NX. Proces se, ukratko, sastoji u sledećem: prvo se pronalaze osnovni geometrijski elementi kao što su ose i ravni simetrije nekom od metoda numeričke matematike, na osnovu

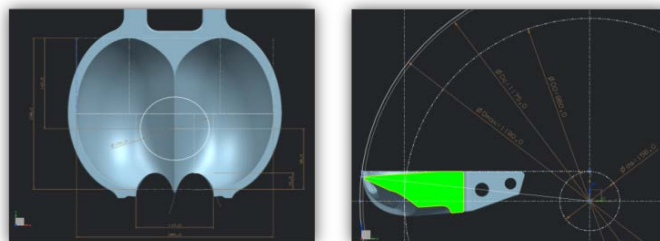
njih se vrši filtriranje i redukovanje (smanjivanje) dobijenog oblaka tačaka čime se znatno olakšava rad i rasterećuju računarski resursi, zatim se formiraju analitičke krive i površine čime se model zatvara u zapreminski, solid model, slika 6 [5].



**Slika 6.** Formiranje analitičkih krivih i analitičkih površina

Kako objekat koji se digitalizuje sadrži neka odstupanja od projektovanih parametara koja su posledica grešaka izrade i/ili montaže, tako i sam sistem za digitalizaciju radi sa određenom tačnošću. Konačan, digitalizovani, model će sadržati greške i digitalizovanog objekta i sistema za digitalizaciju. Da bi se te greške eliminisale pristupa se parametarskom CAD modeliranju na osnovu dobijenog oblaka tačaka, njihove vrednosti se procenjuju i računski se proveravaju. Tada digitalizovani objekat ne predstavlja ništa drugo do trodimenzionalnu skicu. Izbor o ulasku u proizvodnju sa digitalizovanim modelom ili parametarskim zavisi od složenosti, funkcionalnosti i nameni digitalizovanog objekta kao i rokova izrade.

U ovom slučaju izvršena je parametrizacija digitalizovanog modela, a sa tim je i dobijen sasvim nov oblik lopatice Peltonove turbine, slika 7.



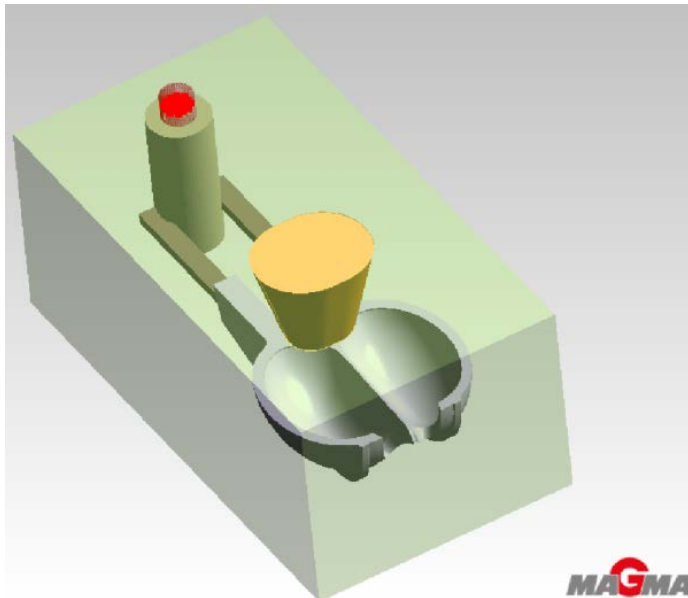
**Slika 7.** Parametri lopatice Peltonove turbine

#### V ANALIZA TEHNOLOGIJE LIVENJA LOPATICA PUTEV SOFTVERSKOG PAKETA MAGMASOFT<sup>5</sup>

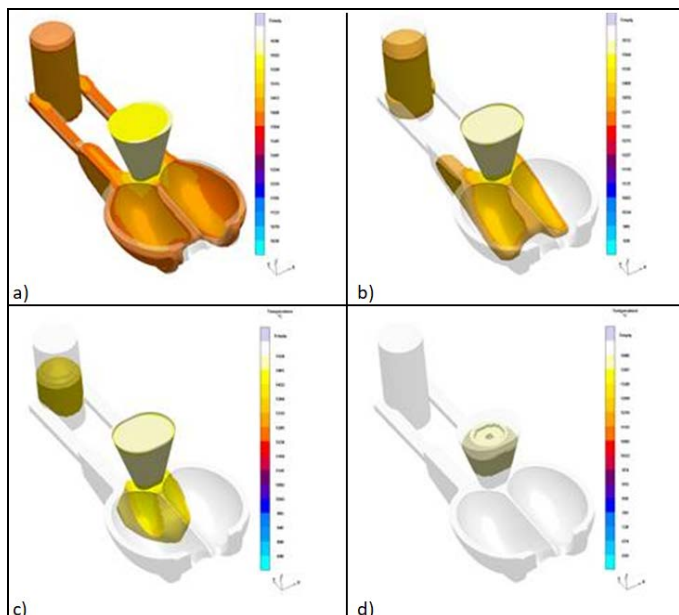
Izrada modela i kalupa za livenje lopatica i diska radnog kola Peltonove turbine je složen proces zbog izuzetno komplikovane geometrije. Pre nego što se pristupi izradi drvenog modela za izradu odlivaka lopatice i diska radnog kola, kompletan proces livenja je simuliran u okruženju MAGMASOFT<sup>5</sup>, što omogućuje optimizaciju svih relevantnih tehnoloških parametara livenja.

MAGMASOFT<sup>5</sup> je u mogućnosti da radi sa grafičkim formatima kao što su *.stl* i *.step* pa se geometrija lopatice i diska radnog kola, prethodno digitalizovana u okruženju Siemens/UGS NX, upotrebljava i za optimizaciju procesa livenja. Na slici 8. je prikazan 3D geometrijski model sistema livenja lopatice radnog kola Peltonove turbine.

Nakon što je simulacija procesa livenja završena, uz pomoć rezultata očvršćavanja, MAGMASOFT<sup>5</sup> automatski prikazuje rezultate po više kriterijuma koji se koriste za tumačenje kvaliteta odlivka. Prikazani rezultati pomažu pri razumevanju grešaka livenja. Vreme očvršćavanja je 50 minuta. U ovom radu, na slici 9, prikazan je kriterijum *Solid\_Temp*.



**Slika 8.** 3D geometrijski model livenja lopatice radnog kola Peltonove turbine



**Slika 9.** Solid\_Temp – očvršćavanje, a) 25 %, b) 50 %, c) 75 % i d) 100 %

#### VI LIVENJE I OBRADA LOPATICA I DISKA RADNOG KOLA

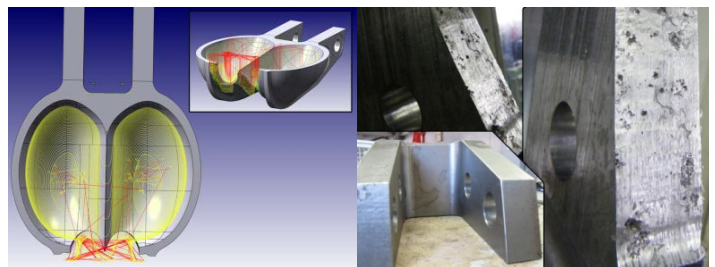
Novodobijeni 3D geometrijski oblik lopatice radnog kola je osnova za definisanje modela za livenje lopatice. Po definisanju mera radnog kola i crteža za izradu pozicija radnog kola izrađen

je drveni model diska i drveni model lopatica za izradu odlivka diska (1 kom) i izradu lopatica diska (18 kom). Materijal diska i lopatica radnog kola je Č.4580 stare oznake po JUS-u. Za taj materijal definisani su dodaci za mašinsku obradu u proseku 1.5 mm do 4 mm na gornjoj ravnoj površini lopatice, kao i procenat skupljanja materijala nakon livenja, koji za ovaj čelik iznosi 2 %. Na slici 10, prikazan je drveni model lopatice i odlivena lopatica, dobijena gravitacionim livenjem u pesku [6].



**Slika 10.** Drveni model i odlivena lopatica

Drveni model lopatice, sa dodacima za skupljanje materijala i dodacima za mašinsku obradu, izrađen je na CNC mašini. Taj drveni model korišćen je za izradu svih kalupa za livenje lopatica [7]. Mašinska obrada funkcionalnih površina lopatice izvedena je na trosnom obradnom centru HMC 500 uz primenu savremenih reznih alata, koji su omogućili obradu složenih površina lopatice. Karbidni uključci i ostaci peska dovodili su do znatno dužeg vremena obrade pojedinih lopatica u odnosu na lopatice koje nisu imale takve greške. Izgled karbidnih uključaka na ušicama lopatice prikazan je slikom 11. Na istoj slici se vidi obrađena ušica lopatice. S obzirom na tvrdoću lopatice na mestu ušica, a u cilju postizanja paralelnosti površina ušica vršeno je brušenje unutrašnjih površina ušica lopatice. Livenje lopatice izvedeno je u položaju lopatice prikazanom na desnoj strani slike 10 sa hranjenjem centralnog dela lopatica iza ušica [8].



**Slika 11.** Tehnologija obrade i kvalitet liva lopatice



**Slika 12.** 3D CAD model sklopa radnog kola i napravljeno radno kolo Peltonove turbine

## VII PROIZVEDENO RADNO KOLO TURBINE

Nakon livenja izvršena je mašinska obrada diska i lopatica i montaža istih na disk. Lopatice i disk montirane su na vratilo koje je prethodno obrađeno na mestu konusnog naleganja, tako da se ostvari čvrsto naleganje u konačnom aksijalnom položaju diska na vratilu. Montaža je izvršena zagrevanjem diska na 250 °C i pri toj temperaturi je vratilo postavljeno u konusni otvor diska.

Balansiranje radnog kola Peltonove turbine izvršeno je pri znatno većem broju obrtaja od radnog t.j. pri 1500 %/min. Primenom softvera za raspored lopatica na radnom kolu ostvaren je izuzetno mali debalans mase od 160 gr. Na slici 12 prikazan je CAD model radnog kola i proizvedeno radno kolo [9].

## VIII ZAKLJUČAK

U radu je pokazan jedan metod za projektovanje delova složene geometrije kakva je lopatica Peltonove turbine. Digitalizacija laserom se pokazala kao veoma efikasna metoda. Važno je napomenuti da je na ovaj način izbegnuto složeno modelsko ispitivanje koje je obavezno kod projektovanja turbina. Kao model je iskorišćeno postojeće radno kolo sa poznatim karakteristikama i na osnovu njega je konstruisano novo radno kolo sa većim stepenom korisnosti. U radu je stavljeno težište na problematiku formiranja CAD modela lopatice radnog kola i nije pokazan proračun koji je prilikom njegovog konstruisanja sproveden. Na osnovu dobijenog modela izvršeno je livenje a zatim obrada na CNC obradnom centru, a kasnije i montaža radnog kola i turbine.

## ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Finansiranje realizacije naučnoistraživačkog rada vrši MPNTR po Ugovoru Evid. Br. 451-03-68/2022-14/ 200066.

## LITERATURA/REFERENCES

[1] Raja, V., Fernandes, K., *Reverse Engineering – An Industrial Perspective*,

Springer-Verlag, London, 2008.

- [2] Vesely, J., Varner, M., *A Case Study of upgrading of 62.5MW Pelton Turbine*, CKD Blansko internal report. 2006.
- [3] Gao, J., Chen, X., ZHeng, D., Yilmaz, O., Gindi, N. Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application, *Advances in Engineering Software*, Vol. 37, No. 9, pp. 592-600, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.01.007>
- [4] Bagci, E. Reverse engineering application for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies, *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, No. 6, pp. 407-418, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.07.003>
- [5] Chen, L.C., Lin, G.C.I. Reverse engineering in the design of turbine blades – a case study in applying the MAMPD, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol.16, No. 2, pp. 161-167, 2000. [http://doi.org/10.1016/s0736-5845\(99\)00044-7](http://doi.org/10.1016/s0736-5845(99)00044-7)
- [6] Radiša, R., Gulišija, Z. Virtual manufacturing of casting using CAE techniques, metals and alloys casting simulation – savings in Serbian foundries and tool-rooms, in: Kuzmanovic, S., (Ed.), *Machine design-2009*, pp. 271-276, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, 2008.
- [7] Radiša, R., Marković, S., Pristavec, J., Kvrđić, V., Manasijević, S. Use of CAE techniques in virtual design of metalcasting technology-saving in Serbian foundries, in *Proc. 48<sup>th</sup> International Foundry Conference* Portorož, Slovenija, pp. 1-8, Septembar 2008.
- [8] Manasijević, S., Radiša, R., Marković, S., Raić, K., Aćimović-Pavlović, Z. Implementation of the infrared thermography for thermo-mechanical analysis of the AlSi cast piston, *Practical Metallography*, Vol. 46 No. 11, pp. 565-579, 2009. <https://doi.org/10.3139/147.110015>
- [9] Najdenov, I., Radiša, R., Raić, K. Microeconomics of the materials and energents consumption in a simulated copper casting process, *La Metalurgia Italiana*, Vol. 104, No. 5, pp. 51-56, 2012.

## AUTORI/AUTHORS

**Radimir Radiša, dipl. maš. inž.** Lola Institut, Radimir.Radisa@li.rs

**Aleksandar Stepanović, dipl. maš. inž.** Lola Institut, Aleksandar.Stepanovic@li.rs

**dr Srećko Manasijević, dipl. inž. met.** Lola Institut, Srecko.Manasijevic@li.rs, ORCID [0000-0002-4277-9783](https://orcid.org/0000-0002-4277-9783)

**dr Vesna Mandić, dipl. maš. inž.** Fakultet Inženjerskih Nauka, Univerzitet u Kragujevcu, mandic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-1624-3536](https://orcid.org/0000-0003-1624-3536)

**Ljubomir Nešovanović, dipl. maš. inž.** Lola Institut, Ljubomir.Nesovanovic@li.rs, ORCID [0000-0002-7265-1596](https://orcid.org/0000-0002-7265-1596)