

# Tehničko rešenje

## Postupak proizvodnje nelegiranih ADI materijala sa poboljšanim otporom na kavitaciju

Autori: Dr Olivera Erić Cekić, viši naučni saradnik  
Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

Dr Sebastian Baloš, Mr Dragan Rajnović, Prof. Dr Leposava Šiđanin,  
Miroslav Dramićanin, Danka Labus  
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Dr Marina Dojčinović, docent  
Tehnološko metalurški fakultet, Beograd

Korisnik tehničkog rešenja:

Privredno društvo za proizvodnju i promet odlivaka „*Livnica Topola a.d.*“,  
*Topola (Varošica)*

Projekat: „**Projektovanje, razvoj i primena nove generacije ADI materijala**“  
TR34015

## Sadržaj

1. Oblast tehnike na koju se tehničko rešenje odnosi	3
2. Uvod	3
3. Tehnički problem	4
4. Stanje rešenosti tehničkog problema u svetu	4
5. Detaljan opis tehničkog rešenja	5
5.1 Materijali	5
5.2 Metode karakterizacije	6
5.3 Osobine materijala pre kavitacije	8
5.4 Površina uzoraka nakon kavitacije	9
5.5 Brzina kavitacije	12
6. Suština tehničkog rešenja	12
7. Način industrijske ili druge primene tehničkog rešenja	13
8. Verifikacija rezultata	13
9. Literatura (stanje rešenosti tehničkog problema u svetu)	15

## 1. OBLAST TEHNIKE NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Materijali, Inženjerski materijali, Livena gvožđa

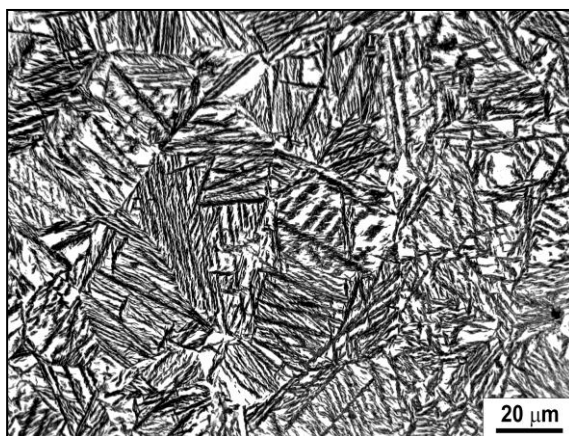
Tehničko rešenje klase M84 - Bitno poboljšan postojeći proizvod ili tehnologija (uz dokaz) novo rešenje problema u oblasti mikroekonomskog, socijalnog i problema održivog prostornog razvoja recenzovano i prihvaćeno na nacionalnom nivou (uz dokaz)

## 2. UVOD

Savremena inženjerska praksa iskazuje potrebu za materijalom koji će udovoljiti širokim zahtevima koje pred njega postavlja industrijska primena. Jedan od takvih materijala je i austemperovani nodularni liv, odnosno ADI materijal (engleska skraćenica od **Austempered Ductile Iron**) [1].

ADI materijali dobijaju se izotermalnom transformacijom nodularnog liva, pri čemu nastaje jedinstvena mikrostruktura koja se sastoji od grafitnih nodula smeštenih u osnovi, visokougljeničnog zadržanog austenita i igličastog ausferitnog ferita (slika 1). Vrlo povoljna kombinacija mehaničkih osobina i to: visoke čvrstoće, dobre duktilnosti i žilavosti, kao i dobre otpornosti na habanje i zamor, a sve uz nižu cenu i masu u odnosu na čelik sličnih karakteristika omogućava široku primenu ovih materijala kako u automobilskoj industriji i industriji šinskih vozila, tako i u industriji teških mašina i vojnoj industriji. Optimalni odnos mehaničkih osobina kod ovih materijala obično se postiže podešavanjem hemijskog sastava i odgovarajućom termičkom obradom – austemperovanjem, dok se temperatura i vreme termičke obrade određuju u zavisnosti od željene mikrostrukture i osobina [2].

S obzirom na to da ADI predstavlja grupu relativno novih materijala, postoji još uvek čitav niz nepoznanica koje još uvek privlače pažnju naučne i stručne javnosti. Na to ukazuje veliki broj objavljenih radova i prijavljenih patenata, kao i veliki broj međunarodnih naučnih i stručnih simpozijuma koji su tematski posvećeni ovim materijalima. Poslednjih godina velika ekspanzija proizvodnje i primene ovih materijala opravdava predviđanja naučnih krugova da se radi o materijalima koji će zameniti skupe specijalne vrste čelika u mnogim oblastima njihove primene [3, 4].



**Slika 1** Ausferitna mikrostruktura ADI materijala [4]

### 3. TEHNIČKI PROBLEM

Metalni materijali (čelici, livena gvožđa i legure obojenih metala) se najviše koriste za izradu elemenata hidrauličnih mašina. Izbor određenog metalnog materijala za primenu u uslovima kavitacione otpornosti zavisi od hemijskog sastava i mehaničkih osobina.

Kavitaciona erozija predstavlja problem koji je prisutan kod mašina čiji su elementi pri radu izloženi dejstvu brzog toka tečnosti, kao što su brodski propeleri i hidroprofili, na branskim ventilima, tunelima i drugim hidrauličnim strukturama, lopaticama vodenih turbina i pumpi.

Elementi turbina izloženi dejstvu kavitacije uglavnom se izrađuju od čeličnih materijala. Zbog specifičnih radnih uslova koriste se ugljenični, legirani, i mikrolegirani čelici i nerđajući čelici različitog hemijskog sastava [5].

Tradicionalni materijal koji se koristi za izradu delova koji su otporni na kavitaciju su čelici [6]. Međutim, na osnovu brojnih eksperimentalnih ispitivanja, može se takođe konstatovati da postoje interesantne alternative čelicima. Jedna od tih alternativa je i ADI materijal. Ranija istraživanja su pokazala da kavitaciona otpornost livenog gvožđa koji je polazni materijal za dobijanje ADI materijala, zavisi od veličine, oblika i raspodele grafita, kao i od čvrstoće metalne osnove. Kavitaciona otpornost nodularnog liva je za 2/3 odnosno 1/3 niža u poređenju sa ugljeničnim čelikom. Razlog za takvo kavitaciono ponašanje nodularnog liva može se pripisati uklanjanju grafitnih nodula iz metalne osnove na samom početku kavitacionog procesa [7, 8].

### 4. STANJE REŠENOSTI TEHNIČKOG PROBLEMA U SVETU

Austemperovani nodularni liv (ADI) pripada grupi novih materijala zahvaljujući svojoj odličnoj kombinaciji visoke čvrstoće i duktilnosti, odlične otpornosti na habanje, visoke performanse dinamičkog opterećenja [2, 9-15]

ADI materijali se dobijaju postupkom izotermnom transformacijom nodularnog liva, pri čemu se promenom parametara termičkog tretmana mogu dobiti različite kombinacije mehaničkih osobina [9-11]. Mehaničke osobine ADI materijala prvenstveno su određene mikrostrukturom osnove, kao i veličinom i rasporedom grafitnih nodula.

Nodularni liv je legura železa i ugljenika, pri čemu se jedan deo ugljenika izdvaja u obliku grafitnih nodula. Nodularni, odnosno sferni oblik grafita se ostvaruje dodavanjem tzv. nodulatora u obliku magnezijuma ili cerijuma u rastopljeni liv. Na mehaničke osobine nodularnog liva i ADI materijala, velik uticaj ima broj i veličina nodula, što se reguliše dodavanjem inokulanata pre procesa kristalizacije [12, 13].

Izotermna transformacija nodularnog liva, - austemperovanje, odvija u dve faze. Prva faza predstavlja austenitizaciju na temperaturama od 850 do 950°C, u trajanju od 120 min, radi maksimalnog zasićenja austenita ugljenikom. Druga faza sastoji se od brzog hlađenja do temperature izotermalne transformacije između 250 i 400°C i zadržavanja na toj temperaturi obično od 60 do 360 min, ali i duže. Tokom ove faze, zasićeni austenit transformiše se u ausferitni ferit i zadržani, ugljenikom obogaćeni, stabilni austenit. Dobijena mikrostruktura naziva se ausferit i predstavlja karakterističnu mikrostrukturu austemperovanog nodularnog liva. Zavisno od parametra procesa, međutim, u ausferitnom feritu mogu se istaložiti prelazni  $\eta$  i  $\epsilon$ -karbidi, dok se dužim zadržavanjem dolazi do transformacije ugljenikom obogaćenog austenita u termički stabilniji ferit i karbide što izaziva znatan pad mehaničkih osobina [3, 4, 12].

Prema tome, najuticajniji parametri za dobijanje ADI materijala sa povoljnom mikrostrukturom su temperatura i vreme izotermne transformacije. Primera radi, transformacijom na višim temperaturama (350÷400°C) ostvaruje se visoka duktilnost i žilavost, ali manja čvrstoća i tvrdoća,

dok se transformacijom na nižim temperaturama (250–350°C) ostvaruje visoka čvrstoća, tvrdoća i otpornost na habanje, ali manja žilavost, odnosno manja otpornost na udar [4, 10, 12].

Kavitacija je pojava pri kojoj u struji tečnosti učestano nastaju i implodiraju kavitacioni mehuri. Kada u toku strujanja tečnosti u hidrauličnim sistemima, usled lokalnog pada pritiska ispod kritične vrednosti pritiska, tečnost na datoj temperaturi više ne može opstati u tom agregatnom stanju, ona isparava i stvaraju se kavitacioni mehuri, koji daljim strujanjem dolaze u zonu normalizacije pritiska i tu se kondenzuju-implodiraju [16-19]. Udarni talasi i mikromlazovi koji se stvaraju implozijom kavitacionih mehura, na površinskim slojevima elemenata hidrauličnih mašina prouzrokuju zamor materijala i njegovo razaranje u lokalnim mikrozapreminama, a posledica toga je gubitak mase.

U ranijim istraživanjima pokazano je da na otpornost prema eroziji obojenih metala utiču sledeći faktori kao što su veličina zrna, granica elastičnosti, tvrdoća, zamor, duktilnost i fazne transformacije [20-24]. Ranija istraživanja pokazala su da kavitaciona otpornost livenog gvožđa zavisi od veličine oblika i rasporeda grafita, kao i od čvrstoće metalne osnove [25-29]. Nodularni liv koji je polazni materijal za ADI ima bolju otpornost prema kavitacionoj eroziji u poređenju sa sivim livom [30].

Mehanizam razaranja nodularnog liva pod dejstvom kavitacije je složen jer obuhvata odvajanje nodula od metalne osnove, pri čemu nastala oštećenja predstavljaju pogodno mesto za dalje napredovanje kavitacije. Pored toga, dolazi i do oštećenja međunodularnog prostora metalne osnove putem stvaranja jamica. Mikrojamice nastaju na mestima gde su prisutni defekti, kao što su uključci i mikropore, putem implozije kavitacionih mehura koji prouzrokuju plastičnu deformaciju osnove nodularnog liva. Povećanje vremena izlaganja dejstvu kavitacije uslovljava povećan stepen oštećenja metalne osnove sa većim brojem jamica i većim stepenom deformacije površine. Brzina kavitacije feritnog nodularnog liva u odnosu na ugljenični čelik odgovarajuće tvrdoće je i do 1.85 puta veća. [6, 30]

ADI materijal može se uspešno koristiti i za tela pumpi (različitih dimenzija), kao zamena za nisko legirane manganske čelične livove, zbog svoje visoke čvrstoće, duktilnosti i otpornosti na habanje. Međutim, poznato je da se kod pumpi javljaju kavitaciona oštećenja radnih površina što predstavlja ograničavajući faktor kod izbora materijala. Oštećenja nastala kavitacijom mogu se dodatno povećati ako se superponiraju sa pojavom krtosti usled tečnosti, i kao takva da predstavljaju poseban inženjerski problem. Pojava kavitacije kod ADI materijala nije dovoljno istražena, a obzirom na njegove izuzetne osobine, potrebno je preduzeti ispitivanja, kako bi se omogućila primena ADI materijala i u ovim oblastima inženjerske prakse.

## **5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA**

### **5.1 Materijali**

Eksperimentalni deo koji predstavlja osnovu verifikacije rezultata ovog tehničkog rešenja zasnovan je na kavitacionom ispitivanju nelegiranog ADI materijala. Hemijski sastav polaznog materijala, nodularnog liva DI-F prikazan je u tabeli 1. Željeni hemijski sastav postignut je odgovarajućim sastavom šarže koja se sastojala od sivog sirovog gvožđa, odabranog čeličnog otpada. Proces desumporizacije tečnog metala odvijao se na temperaturi od 1470°C u trajanju od 3 min u indukcionoj peći dodavanjem 2,5 % kalcijum karbida. Nakon procesa desumporizacije izvršeno je odstranjivanje šljake i uzimanje stepenaste probe u cilju ispitivanja efekata ove tehnološke faze. Noduliranje tečnog metala obavljeno je u zatvorenom sifonskom loncu tzv.

„sendvič“ postupkom. Prethodno je u pregradi lonca kroz otvor na poklopcu dozirana količina od 1,8 % nodulatora (FeSiMg<sub>5</sub>) i 0,3 % (FeSi). Modifikator je proizvod „Elektro-Bosne“ trgovačke oznake „CAMOD C“, granulacije od 0,2 do 0,7 mm koji sadrži 75 % Si.

ADI materijali bili su termički obrađeni postupkom austemperovanja koji je obuhvatio sledeće tri faze:

1. austenitizaciju na 900°C u trajanju od 2h
2. izotermalnu transformaciju na temperaturama 300°C i 400°C u trajanju od 1h.
3. hlađenje na vazduhu do sobne temperature.

Postupak austenitizacije izvršen je u komornoj peći sa argonom kao zaštitnom atmosferom, a za izotermalnu transformaciju korišćena je specijalno konstruisana peć šaržirana sa "Cassel TS 220" (50%-50% NaNO<sub>2</sub> - KNO<sub>3</sub>) soli za kaljenje. Da bi se odstranili masnoća i ostaci soli iz sonog kupatila posle izotermalne transformacije obavljeno je pranje uzoraka u benzinu, destilovanoj vodi i etil alkoholu. Na taj način su dobijene dve vrste ADI materijala, koji su označeni kao ADI300 i ADI400.

**Tabela 1** Hemijski sastav nodularnog liva u mas. %

Materijal	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mg	P	S	Fe
DI-F	3.53	2.53	0.347	0.045	0.055	0.031	0.018	0.015	Ostatak

## 5.2 Metode karakterizacije

Metalografska priprema izvršena je standardnom procedurom; nakon brušenja i poliranja, izvršeno je nagrizanje nitalom (3 %), dok je karakterizacija faza izvršena svetlosnim mikroskopom Leitz-Orthoplan. Klasifikacija grafita je izvršena u skladu sa standardom ISO 945-1:2008. Zapreminski udeo zadržanog austenita (V<sub>γ</sub>) je dobijen difrakcijom x-zraka, uređajem Phillips PW-1710, na površinama koje su prethodno izloženi dejstvu kavitacije. Sadržaj ugljenika u austenitu je određen prema sledećem izrazu [31]:

$$a_{\gamma} = 0.3548 + 0.0044C_{\gamma} \quad (1)$$

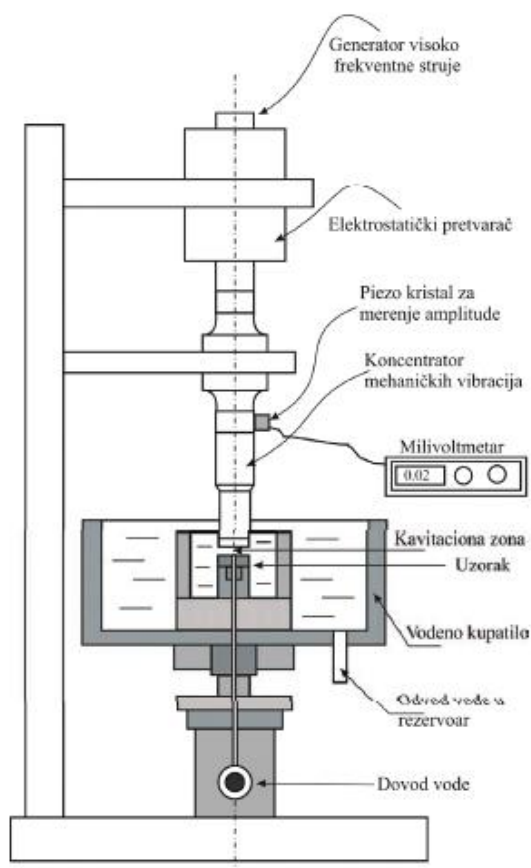
gde je  $a_{\gamma}$  parameter rešetke austenita [nm], a  $C_{\gamma}$  sadržaj ugljenika u austenitu [mas.%].

Za određivanje parametara rešetke, korišćene su ravni {111} i {200}. Za ispitivanje su korišćena tri uzorka, na osnovu kojih je dobijena srednja vrednost merenja.

Mehaničke osobine: zatezna čvrstoća, napon tečenja i izduženje, ispitane su na kidalici VEB ZDM 5/91, u skladu sa standardom ISO 6892-1:2009. Ispitivanje je izvršeno na tri uzorka prečnika 6 mm i početnom mernom dužinom 30 mm. Tvrdoća po Vickersu je ispitana u skladu sa standardom ISO 6507-1:2005, na uređaju VEB HPO-250, sa opterećenjem 10 kg. u vremenom zadržavanja 15 s. Vrednosti tvrdoće su dobijene kao srednja vrednost pet utiskivanja. Energija udara je merena na uzorcima bez zareza, dimenzija 10×10×55 mm, na uređaju Schenck-Treble RPSW/A. Ispitivanje je izvršeno u skladu sa standardom ISO 148-1:2009, na tri uzorka od svake grupe.

Za ispitivanje kavitacione otpornosti ADI materijala korišćena je ultrazvučna vibraciona metoda (sa stacionarnim uzorkom) prikazana na slici 2 [7]. Uređaj za ispitivanje ultrazvučnom vibracionom metodom (Branson Ultrasonics JP40022A) sastoji se iz generatora visokofrekventne struje, električnog pretvarača, koncentratora mehaničkih vibracija i vodenog kupatila sa držačem ispitnog uzorka. Kod ove metode uzorak materijala koji se ispituje ima otvor prečnika 2 mm kroz

koji struji tečnost a uzorak je postavljen ispod čeone površine koncentratora vibracija sa zazorom. Ispod čeone površine koncentratora i stacionarnog probnog uzorka, obrazuje se jaka kavitaciona zona. Voda se dovodi pumpom kroz otvor na uzorku u vodeno kupatilo i na taj način hladi uzorak i održava njegovu temperaturu konstantnom. Takođe, voda zahvaljujući svojim stalnim protokom stvara polje pritiska koje podstiče imploziju kavitacionih mehura na površini ispitivanog uzorka. Ispitni uzorak nije izložen mehaničkim nprezanjima u toku ispitivanja. Za ultrazvučno kavitaciono ispitivanje ADI materijala primenjuje se standardna procedura ispitivanja sa preporučenim standardnim vrednostima parametara [25]: frekvencija mehaničkih vibracija  $20 \pm 0,5$  kHz; amplituda mehaničkih vibracija na vrhu koncentratora  $50 \mu\text{m}$ ; zazor između probnog uzorka i koncentratora  $0,5$  mm; protok vode  $5-10$  ml/s.



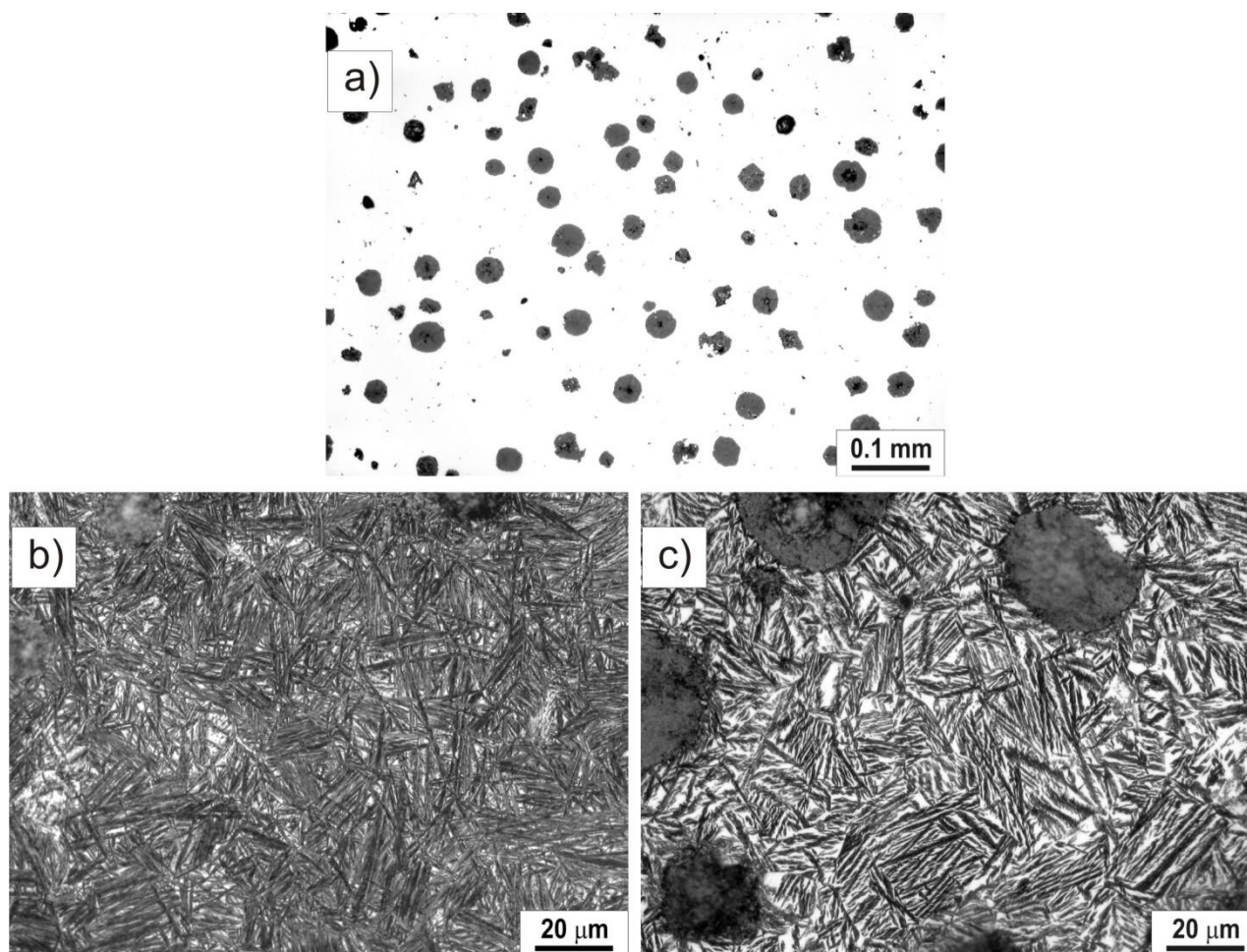
**Slika 2** Šema uređaja za ispitivanje kavitacione otpornosti ultrazvučnom vibracionom metodom [7]

Brzina kavitacione erozije materijala predstavlja gubitak mase ili zapremine materijala u jedinici vremena. Za laboratorijsko ispitivanje ADI materijala na kavitaciju primenjena je modifikovana ultrazvučna metoda. Autori su tretirali ADI materijal, dobijen austemperovanjem nelegiranog nodularnog liva na  $300\text{C}/1\text{h}$  i  $400\text{C}/1\text{h}$ . Vreme izlaganja dejstvu kavitacije ADI materijala bilo je 30, 60, 120 i 240 min. Nakon izlaganja ADI materijala dejstvu kavitacije praćen je gubitak mase na analitičkoj vagi tačnosti  $0.1\text{mg}$ .

### 5.3 Osobine materijala pre kavitacije

Mikrostrukture materijala pre dejstva kavitacije u poliranom i nagriženom stanju prikazana je na slici 3. Kod svih uzoraka je stepen sferoidizacije preko 90 %, veličina nodula je između 25 i 30  $\mu\text{m}$ , broj nodula 150 - 200  $\text{mm}^{-2}$ , a zapreminski udeo nodula 10,9 %, slika 3a.

ADI mikrostruktura, ausferit, sastoji se od ausferitnog ferita i zadržanog, izotermno transformisanog, ugljenikom visoko-obogaćenog (1.8÷2.2 %C) stabilnog austenita, sa morfologijom koja zavisi od temperature austemperovanja (slika 3b,c). Karakteristična ausferitna mikrostruktura koja se odnosi na ADI austemperovan na 300°C za 1h, sastoji se iz igličastog ausferitnog ferita i zadržanog, izotermno transformisanog, ugljenikom visoko-obogaćenog (1.8÷2.2 %C) stabilnog austenita prikazana je na slici 3b. Najverovatnije objašnjenje za pojavu ovakve mikrostrukture treba tražiti u relativno niskoj temperaturi izotermalne transformacije koja doprinosi većem podhlađenju austenita i sporijoj difuziji ugljenika. U tom slučaju nukleacija ferita više je favorizovana u odnosu na brzinu rasta feritnih pločica.



**Slika 3** Mikrostruktura ADI materijala: a) oblik, veličina i raspored grafitnih nodula, b) austemperovano na 300°C/1h; c) austemperovano na 400°C/1h



Porastom temperature izotermalne transformacije od 300 na 400°C, zapaža se da ausferitni ferit prelazi iz igličastog oblika u oblik u vidu snopova pločica, s tim da se broj feritnih pločica smanjuje, dok se pospešuje njihov rast. (Slika 3c). Zapreminski udeo zadržanog austenita se povećava sa porastom temperature izotermalne transformacije, dok se sadržaj ugljenika u austenitu smanjuje, tabela 2

**Tabela 2** Zapreminski udeo zadržanog austenita, saržaj ugljenika u zadržanom austenitu i ukupni sadržaj ugljenika u austenitu pre i posle kavitacije

Temperatura austemperovanja	Zapreminski udeo zadržanog austenita $X_{\gamma}$	Sadržaj ugljenika u zadržanom austenitu $C_{\gamma}$	Ukupni sadržaj ugljenika u austenitu $X_{\gamma}C_{\gamma}$
Pre kavitacije			
300°C	16.0	2.17	0.35
400°C	31.4	1.98	0.62
Posle kavitacije			
300°C	5.5	2.15	0.12
400°C	24.7	1.87	0.46

Mehaničke osobine ispitanih materijala date su u tabeli 3. Feritni nodularni liv ima najnižu vrednost zatezne čvrstoće, napona tečenja, ali najveću duktilnost. Pored toga, uzorci DI-F imaju i najmanju tvrdoću, te je očekivano da im je i otpornost na kavitaciju najmanja [27]. ADI materijali imaju povećane mehaničke osobine u odnosu na feritni nodularni liv.

ADI-300, sa igličastom mikrostrukturuom i najmanjom količinom zadržanog austenita ima veću zateznu čvrstoću, napon tečenja i tvrdoću, ali manje izduženje i duktilnost u odnosu na materijal ADI-400.

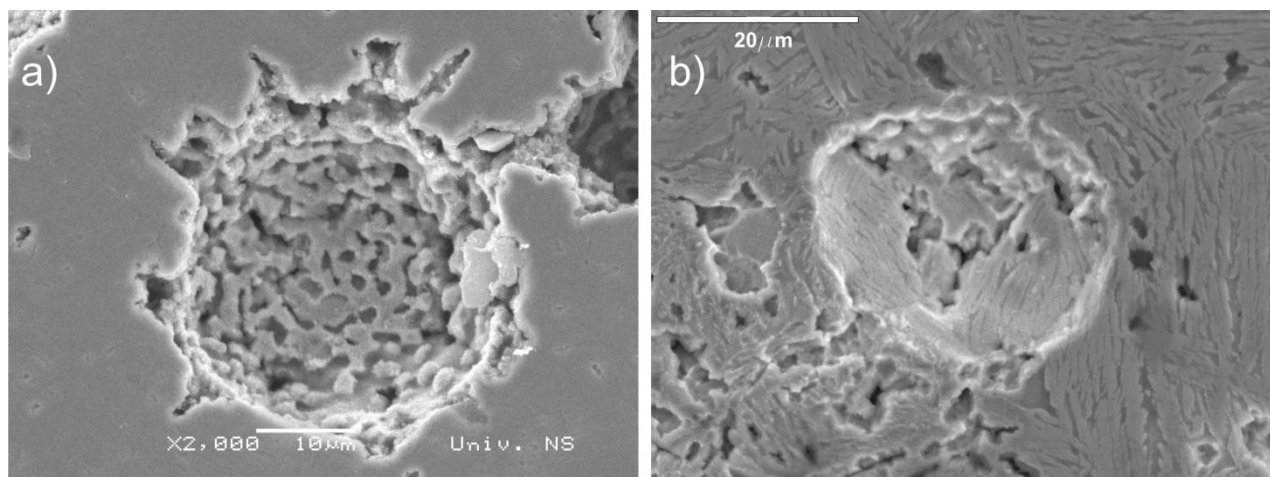
**Tabela 3** Mehaničke osobine ispitivanog ADI materijala

Materijal	Temperatura austemperovanja	Zatezna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Napon tečenja $R_{p0.2\%}$ [MPa]	Izduženje $A_{5.65}$ [%]	Energija udara $K_0$ [J]	Tvrdoća HV10
<b>DI-F</b>	-	433	314	27.8	144	161
<b>ADI-300</b>	300°C	1395	1513	3.8	65	460
<b>ADI-400</b>	400°C	759	1032	13.1	140	296

#### 5.4 Površina uzoraka nakon kavitacije

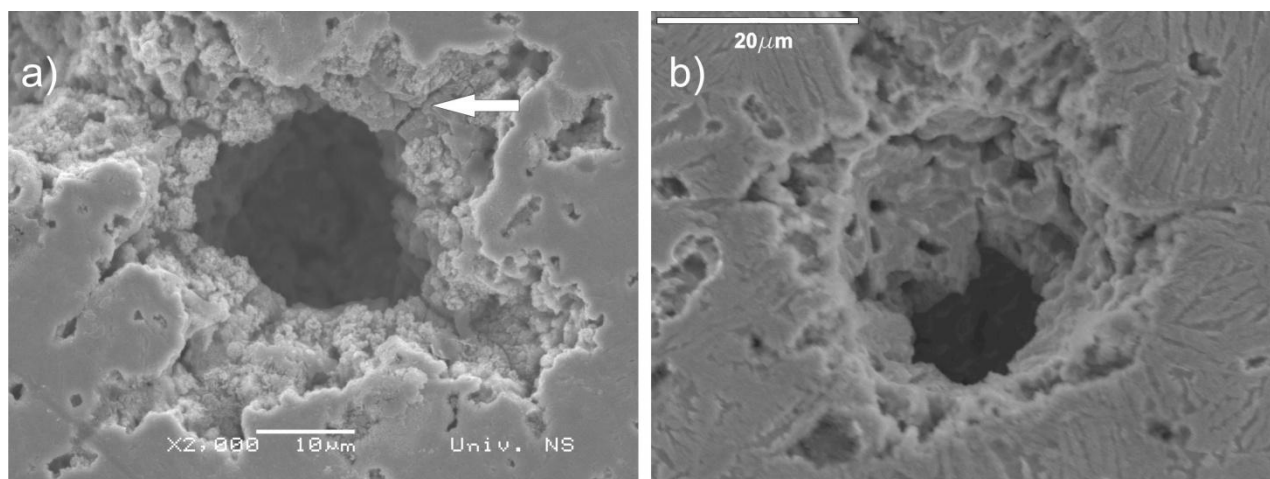
Rezultati ispitivanja površine uzoraka ADI materijala nakon kavitacije 0,5 h, 1 h i 4 h su prikazani na slikama 4 - 6.

Rezultati analize morfologije površine ADI materijala (slike 4a i 4b) pokazale su da nakon 0,5h kavitacionog dejstva, deformišu se površinski slojevi materijala (ADI-300 i ADI-400). U ovoj fazi kavitacionog dejstva dolazi do odvajanja nodula grafita iz metalne osnove i stvaranja jamica. Ove jamice pri izotermalnoj transformaciji na 400°C/1h se postepeno spajaju i obrazuju prsline.



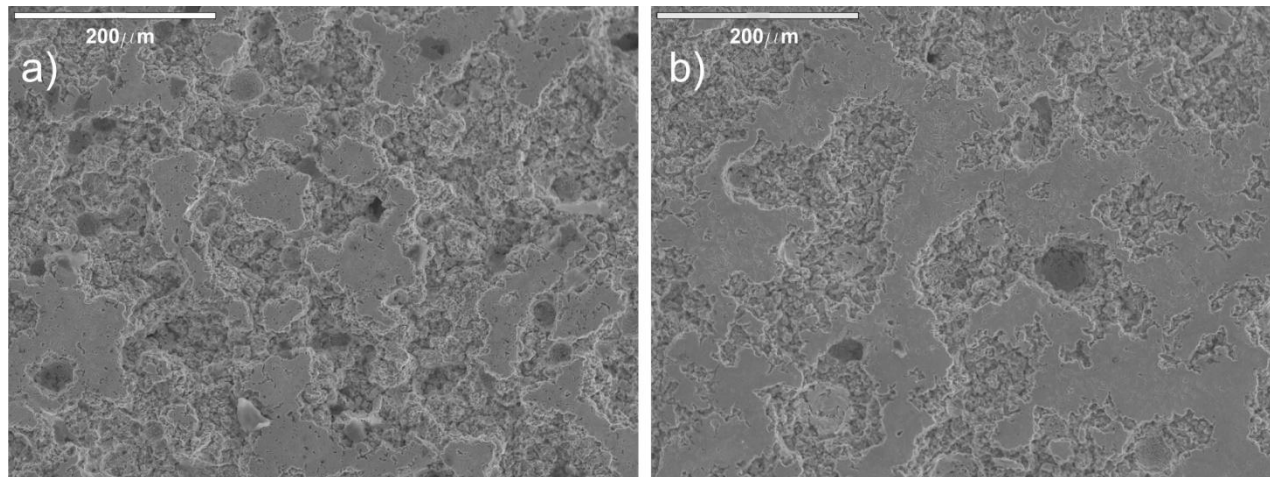
**Slika 4** Mikrostrukture ADI materijala, nakon 0,5h kavitacionog ispitivanja: a) 300°C b) 400°C

Posle 1 h dejstva kavitacije zapaža se znatno veće oštećenje kod oba ADI materijala. (Slika 5) Sa mikrostruktura na slici 5 vidi se izraženije ljuštenje osnove u zoni pored oboda jamica nastalih odvajanjem nodula grafita (Slika 5a) materijala ADI-300, u odnosu na ADI-400 (Slika 5b). Ovakvo ponašanje je u vezi sa pojavom mikroprslina uočenih na slici 5a), koje propagiraju uzdužno i poprečno, kao i razvoj novih mikroprslina ispod površinskog sloja, slika 5a (bela strelica). Kod oba ADI materijala, u osnovi se uočavaju mikrotuneli koji se razvijaju unutar jamica nastalih odvajanjem nodula grafita, koji su posledica udara mikromlaza nastalih implozijom kavitacionih mehura, što je u skladu sa literaturnim podacima [26-29].



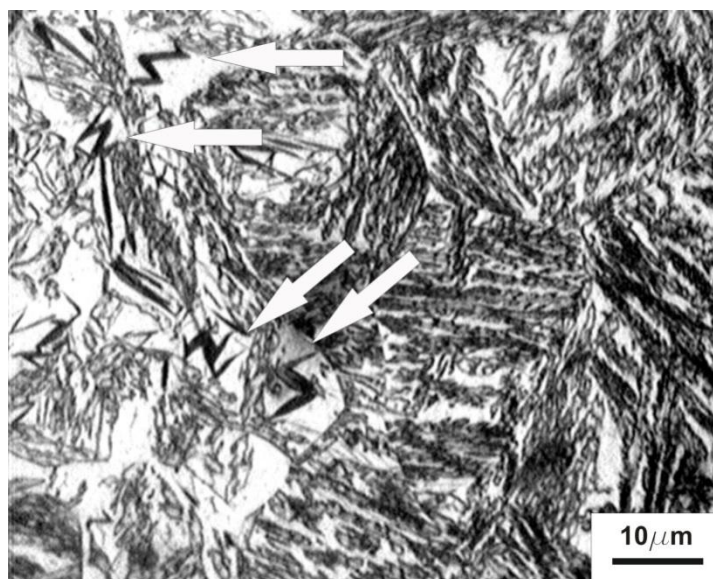
**Slika 5** SEM mikrofotografije ADI materijala nakon 1h kavitacionog ispitivanja: a) 300°C i b) 400°C

Nakon dejstva kavitacije u trajanju 4 h (slika 6) zapaža se veliki deo razorene površine kod oba ispitivana ADI materijala. Razorene površine predstavljaju skup dubokih kratera nastalih odvajanjem nodula grafita i prslina. Kod ADI-400 je karakteristično da su oštećena i neoštećena površina približno jednake, slika 6b.



**Slika 6** SEM mikrofotografije nakon 4 h kavitacionog ispitivanja: a) 300°C i b) 400°C

Prikazani rezultati ispitivanja ADI materijala ukazuju na to da ADI-400 ima veću otpornost na dejstvo kavitacije. Ovakvo ponašanje može se pripisati prisustvu niskougleničnog metastabilnog zadržanog austenita u mikrostrukturi ADI-400, koji se najverovatnije kavitacionim udarima transformisao u martenzit - SATRAM efekat (slika 7). SATRAM je engleska skraćenica za „Stress assisted phase transformations of austenite into martensite“, odnosno transformacija austenita u martenzit dejstvom napona. U slučaju ADI-400, napon je izazvan dejstvom kavitacije. Međutim, u slučaju ADI-300, posle dejstva kavitacije, stabilni austenit obogaćen ugljenikom (zadržani austenit) razlaže se na ferit i karbide, a rezultat je niža vrednost čvrstoće i duktilnosti.

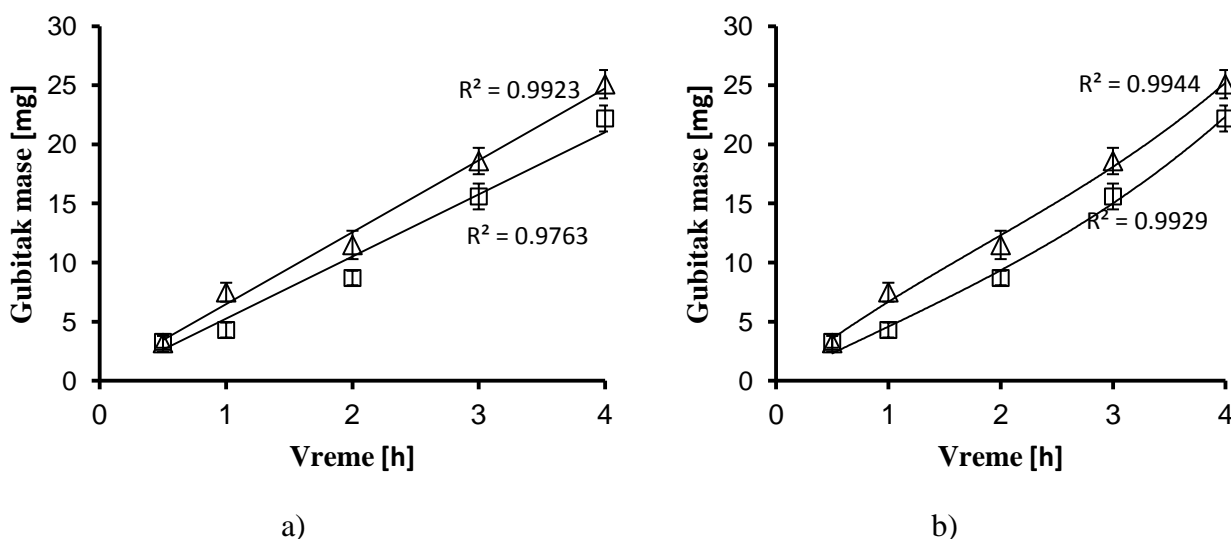


**Slika 7** Mikrostruktura ADI-400 posle 4 h kavitacionog ispitivanja

## 5.5 Brzina kavitacije

Za definisanje brzine kavitacione erozije ADI materijala korišćen je dijagram zavisnosti gubitka mase od vremena kavitacije. Gubitak mase nastale kavitacionim oštećenjem nanosi se na ordinatnu a vremenski intervali dati su na apscisi. Metodom najmanjih kvadrata tačke dijagrama aproksimirane su pravcem čiji tangens nagiba pokazuje gubitak mase materijala u periodu vremena delovanja kavitacije. Brzina kavitacije za ADI-300 je 0,1046 mg/min, dok za ADI-400 iznosi 0,0925 mg/min. Dobijene vrednosti brzine kavitacije su niže u odnosu na brzinu kod nodularnog liva sa 10% perlita, gde je brzina kavitacije 0,1179 mg/min [26].

Brzina kavitacije ispitivanih ADI materijala predstavlja gubitak mase u toku vremena u funkciji od vremena kavitacije i prikazana na slici 8. Na osnovu vrednosti kavitacione brzine i analize morfologije oštećenja površine uočava se da veću otpornost na dejstvo kavitacije ima ADI austemperovan na 400°C.



Slika 8 Gubitak mase u toku kavitacionog ispitivanja ADI materijala austemperovanog na 300°C i 400°C a) linearnom funkcijom b) polinomnom funkcijom trećeg stepena

## 6. SUŠTINA TEHNIČKOG REŠENJA

Tehničko rešenje „Postupak proizvodnje nelegiranih ADI materijala sa poboljšanim otporom na kavitaciju“ predstavlja poboljšanje u tehnologiji proizvodnje, odnosno proizvodnji ADI materijala. Zahvaljujući tehničkom rešenju dobija se nelegirani ADI materijal koji poseduje poboljšanu otpornost na kavitaciju u vodenoj sredini, uz povećanu duktilnost i otpornost na udarna opterećenja, u odnosu na standardne ADI materijale koji se široko koriste u industrijskoj praksi. Poboljšane karakteristike su postignute zahvaljujući prisustvu zadržanog austenita koji se mehanizmom SATRAM transformiše u martenzit na površini, čime se povećava otpornost na kavitaciju, dok u zapremini zadržani austenit (koji se ne transformiše) omogućava visoku duktilnost i otpornost na udare.

U nastavku je naveden postupak proizvodnje nelegiranog ADI materijala otpornog na kavitaciju visoke duktilnosti i otpornosti na udar.

**Polazni materijal:** EN-GJS-400-15

**Hemijski sastav:**

C%	Si%	Mn%	Mg%	P%	S%
3.60±0.20	2.50±0.20	0.30±0.10	0.030±0.010	<0.04	<0.02

**Mikrostruktura:** Ferit

**Morfologija grafita:** prosečni udeo grafita u zapremini od 10 do 12 %,  
stepen sferodizacije nodula preko 90 %,  
gustina nodula od 150 do 200 nodula/mm<sup>2</sup>  
veličina nodula od 25 do 30 µm.

**Termička obrada:** Austenitizacija na 900°C u trajanju od 2 h  
Izotermna transformacija 400°C u trajanju 1 h

**Mehaničke osobine:**

Materijal	Zatezna čvrstoća, R <sub>m</sub> [MPa]	Napon tečenja R <sub>p0.2%</sub> [MPa]	Izduženje A [%]	Energija udara, K0 [J]	Tvrdoća HV10
ADI-400	1042	757	14.2	140	306

## 7. NAČIN INDUSTRIJSKE ILI DRUGE PRIMENE TEHNIČKOG REŠENJA

Primena tehničkog rešenja je moguća u svakoj livnici ili metaloprerađivačkom pogonu koji imaju mogućnost da proizvedu (ili kupe) polazni materijal datih karakteristika i poseduju odgovarajuću opremu za termičku obradu.

## 8. VERIFIKACIJA REZULTATA

Naučna verifikacija rezultata ispitivanja je sprovedena putem objavljivanja radova u međunarodnim i domaćim časopisima, kao i putem izlaganja na međunarodnim i domaćim konferencijama.

1. Dojcinovic M., Erić O., Rajnović D., Sidjanin L., Baloš S., Effect of austempering temperature on cavitation behavior of unalloyed ADI material, Materials Characterization (2013) pp.66-72.
2. M. Dojcinovic, O. Eric, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: The morphology of ductile cast iron surface damaged by cavitation, Metallurgical and Materials Engineering (Metalurgija), 18/3, 2012, 165-176 (ISSN 2217-8961)

3. O. Eric Cekic, M. Dojcinovic, S. Balos, D. Rajnovic, L. Sidjanin: The SEM study of cavitation damage of as-cast ductile iron, Proceedings of Microscopy Conference - MC2013, Part 1, Regensburg, Germany, August 25 - 30, 2013, 666-667
4. O. Eric Cekic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: The morphology of austempered ductile iron surface damaged by cavitation, 45th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, 357-360 (ISBN 978-68-6305-012-9)
5. S. Balos, M. Dramicanin, M. Dojcinovic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, O. Eric Cekic, D. Labus: Cavitation of unalloyed ADI material in water, 45th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, 499-502 (ISBN 978-68-6305-012-9)

Na osnovu uspešne naučne i stručne verifikacije rezultata, tehničko rešenje je prihvaćeno za uvođenje u proizvodnju od strane korisnika tehničkog rešenja, Livnica Topola a.d. Topola, 2014. godine.

## 9. LITERATURA (stanje rešenosti tehničkog problema u svetu)

- [1] H.Morrogh, and W.J. Williams: “The production of nodular graphite structures in cast iron”, *J.Iron and Steel Inst.*, Vol.158, 1948, 306-322.
- [2] Harding, R.A. The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron, *Kovove Mater.*, 45, (2007), 1-16.
- [3] Eric O., Jovanovic M.T., Sidjanin L., Rajnovic D., Yec S., “The austempering study of alloyed ductile iron, *materials and Design*, 27 (2006), 617-622.
- [4] Eric O., “Određivanje opsega procesiranja legiranih ADI materijala“, Univerzitet u Novom Sadu, 2006.
- [5] S. Suslick, A. Crum, *Handbook of Acoustics*, Wiley, New York, 1994.
- [6] Dojčinović M., Erić O., Rajnović D., Sidjanin L., Baloš S., The morphology of ductile cast iron surface damage by cavitation, *Metall. Mater. Eng.* Vol 18 (3) 2012 p. 165- 176.
- [7] Dojcinovic M. Đorđević V.: Laboratory investigation of cavitation resistance of materials-modified ultrasonically induced, cavitation method, *MJoM Metalurgija -Journal of Metallurgy*, 14, (3) 2008, p. 217.
- [8] Hattori S., Kitagawa T.: Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data, *Wear*, Volume 269, Issues 5-6, 2010, pp. 443-448.
- [9] R.Harding: ”Standards and specifications for austempered ductile irons”, *BCIRA Research and Cast Metals Practica*, BCIRA report 1825, Vol.53, 1991, 336-347.
- [10] Rajnović D., Stojaković D., Sidjanin L., Postupak karakterizacije mikrostrukture ADI materijala, *Časopis Tehnika-Novi materijali*, 12/1, (2003), 9-16.
- [11] R.E. Smallman, I.R. Harris and M. A. Duggan: “Microstructure and Materials Processing”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.63, 1997, 18-29.
- [12] L.Sidjanin, R. E. Smallman and S.M. Boutorabi: “Microstructure and fracture of aluminium austempered ductile iron investigated using electron microscopy”, *Materials Science and Technology*, Vol.10, 1994, 711-720.
- [13] *Ductile Iron Data for Design Engineers*, Published by Rio Tinto Iron & Titanium, Inc., Montreal, Canada (1998)
- [14] Kovacs, B. V.: On the Terminology and Structure of ADI, *AFS Transactions*, 83, (1994), 417-420
- [15] Sidjanin, L., Smallman, R.E.: Metallography of bainitic transformation in austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 8, (1992), 1095-1103
- [16] Bayati, H., Elliott, R.: Role of austenite in promoting ductility in an austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 13/4, (1997), 319-326
- [17] M. Dojčinović, Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2013, ISBN: 978-86-7401-305-2, str.39.
- [18] Knapp RT, Daily JW, Hammit FG. *Cavitation*. New York: McGraw-Hill; 1970 .
- [19] Okada T, Iwai Y, Hattory S, Tanimura N. Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse. *Wear* 1995;184:231–9.
- [20] Shih TS, Chau SY, Chang CH. Optimization of austenitizing treatment of austempered ductile irons. *AFS Trans* 1988;96: 557–64.
- [21] Tanaka Y, Kage H. Development and application of austempered spheroidal graphite cast iron. *Mater Trans JIM* 1992;33:543–57.
- [22] Bayati, H., Elliott, R.: Role of austenite in promoting ductility in an austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 13/4, (1997), 319-326

- [23] M. Dojčinović, Razaranje materijala pod dejstvom kavitacije, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2013, ISBN: 978-86-7401-305-2, str.39.
- [24] O. Erić Cekić, M. Dojčinović, L. Šiđanin, S. Baloš, D. Rajnović: Kavitaciona otpornost ADI materijala, Zbornik radova XIX Konferencije o međulaboratorijskim ispitivanjima materijala, Komitet za međulaboratorijska ispitivanja materijala, Bela Zemlja, Užice, Srbija, 2-4.10.2013., 73-79 (ISBN 978-86-911831-5-8).
- [25] Modified ASTM G 32 Ultrasonically Induced Cavitation Test Method, ASTM G 32-92 (1992).
- [26] Dojcinovic M., Erić O., Rajnović D., Siđanin L., Baloš S., Effect of austempering temperature on cavitation behavior of unalloyed ADI material, Materials Characterization (2013) pp.66-72.
- [27] O. Eric Cekic, M. Dojcinovic, S. Balos, D. Rajnovic, L. Sidjanin: The SEM study of cavitation damage of as-cast ductile iron, Proceedings of Microscopy Conference - MC2013, Part 1, Regensburg, Germany, August 25 - 30, 2013, 666-667
- [28] O. Eric Cekic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: The morphology of austempered ductile iron surface damaged by cavitation, 45th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, 357-360 (ISBN 978-68-6305-012-9)
- [29] S. Balos, M. Dramicanin, M. Dojcinovic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, O. Eric Cekic, D. Labus: Cavitation of unalloyed ADI material in water, 45th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, 499-502 (ISBN 978-68-6305-012-9)
- [30] Wu CZ, Chen YJ, Shih TS. Phase transformation in austempered ductile iron by microjet impact, Materials Characterization (2002), 48, pp.43-54.
- [31] Yang HH, Putatunda SK. Influence of a novel two-step austempering process on the strain-hardening behaviour of austempered ductile iron (ADI). Mat.Sci.EngA-Struct 2004;382;265-79.



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 2277/2  
ДАТУМ: 26.12.2014.

На основу захтева др Оливере Ерић Цекић, вишег научног сарадника Иновационог центра Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 2277/1 од 20.11.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 25.12.2014. године, донело је следећу

### О Д Л У К У

Прихвата се Техничко решење под насловом: „**ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ НЕЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ПОБОЉШАНИМ ОТПОРОМ НА КАВИТАЦИЈУ**“, чији су аутори: др Оливера Ерић Цекић, виши научни сарадник, Иновациони центар Машинског факултета у Београду, др Себастијан Балаш, Факултет техничких наука, Нови Сад, мр Драган Рајновић, Факултет техничких наука, Нови Сад, проф. др Лепосава Шиђанин, Факултет техничких наука, Нови Сад, Мирослав Драмићанин, Факултет техничких наука, Нови Сад, Данка Лабус, Факултет техничких наука, Нови Сад, др Марина Дојчиновић, доцент, Технолошко металуршки факултет, Београд

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

2 Д Е К А Н  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић



T L O V P O C I A A D

Broj	Datum
916	31.10.2014.



LIVNICA TOPOLA A.D.

Предмет: Мишљење о прихваћеном техничко- развојном решењу под називом:

„Поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију“

У оквиру пројекта финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја, Републике Србије, бр. ТР34015, под називом „Пројектовање, развој и примена нове генерације АДИ материјала“, руководилац пројекта др Оливера Ерић Цекић, за период 2011-2015. г., током четврте године истраживања (у периоду од маја до децембра 2014.год.) развијена је битно побољшана технологија производње АДИ материјала до концепције техничког решења под називом:

„Поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију“

Аутора: Др Оливера Ерић Цекић, Иновациони центар Машинског факултета у Београду  
Др Себастиан Балаш, Факултет техничких наука, Нови Сад  
Мр Драган Рајновић, Факултет техничких наука, Нови Сад  
Проф Др Лепосава Шиђанин, Факултет техничких наука, Нови Сад  
Мирослав Драмићанин, Факултет техничких наука, Нови Сад  
Данка Лабус, Факултет техничких наука, Нови Сад  
Др Марина Дојчиновић, Технолошко металуршки факултет, Београд

У својству корисника резултата овог техничког решења, стручни тим „**ПРИВРЕДНО ДРУШТВО ЗА ПРОИЗВОДЊУ И ПРОМЕТ ОДЛИВАКА ЛИВНИЦА ТОПОЛА АД ТОПОЛА (ВАРОШИЦА)-У РЕСТРУКТУРИРАЊУ**“ је разматрао постигнуте резултате и у потпуности је сагласан са њима. У оквиру предметног техничког решења дат је поступак производње нелегираног АДИ материјала са битно побољшаном отпором на кавитацију, у воденој средини, уз повећану дуктилност и отпорност на ударна оптерећења, у односу на стандардне АДИ материјале који се широко користе у индустријској пракси.

Предметно техничко решење се прихвата за производњу, а реализоваће се у складу са нашом стратегијом пословања и развојним активностима.

Имајући у виду значај истраживања АДИ материјала, сматрамо да даља истраживања у овој области и на овом пројекту треба наставити.

Privredno društvo za proizvodnju i promet odlivaka Livnica Topola a. d.  
Ul. Pilota Zorana Tomića br.23, 34 310 Topola, Srbija  
Telefon / Fax +381 (0) 34 617 01 72  
e-mail: office@livnicatopola.rs  
Matični broj 07631618; Poreski broj 101225314



LIVNICA TOPOLA A.D.

Достављено:

Руководиоцу пројекта ТР34015 и  
Архиви ПРИВРЕДНО ДРУШТВО ЗА ПРОИЗВОДЊУ И ПРОМЕТ ОДЛИВАКА  
ЛИВНИЦА ТОПОЛА А.Д. ТОПОЛА (ВАРОШИЦА)

Корисник техничког решења:

**ПРИВРЕДНО ДРУШТВО ЗА ПРОИЗВОДЊУ И ПРОМЕТ  
ОДЛИВАКА ЛИВНИЦА ТОПОЛА АД ТОПОЛА  
(ВАРОШИЦА)**

LIVNICA PRIVREDNO DRUŠTVO ZA  
PROIZVODNJU I PROMET ODLIVAKA

Т о р о л а

LIVNICA TOPOLA  
TOPOLA (VAROŠICA)

Радован Илић, Генерални директор

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 2277/2  
ДАТУМ: 28.11.2014.

На основу захтева др Оливере Ерић Цекић, вишег научног сарадника Иновационог центра Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 2277/1 од 20.11.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 27.11.2014. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења под насловом: „**ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ НЕЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ПОБОЉШАНИМ ОТПОРОМ НА КАВИТАЦИЈУ**“, чији су аутори: др Оливера Ерић Цекић, виши научни сарадник, Иновациони центар Машинског факултета у Београду, др Себастијан Балаш, Факултет техничких наука, Нови Сад, мр Драган Рајновић, Факултет техничких наука, Нови Сад, проф. др Лепосава Шиђанин, Факултет техничких наука, Нови Сад, Мирослав Драмићанин, Факултет техничких наука, Нови Сад, Данка Лабус, Факултет техничких наука, Нови Сад, др Марина Дојчиновић, доцент, Технолошко металуршки факултет, Београд, именују:

- проф. др Татјана Волков Хусовић, Универзитет у Београду, Технолошко металуршки факултет,
- проф. др Александар Седмак, Универзитет у Београду, Машински факултет

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



2 Д Е К А Н  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА**

**БЕОГРАД**

**ПРЕДМЕТ: Рецензија техничког решења**

**Поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију**

Аутори:

Др Оливера Ерић Цекић, виши научни сарадник, Иновациони центар Машинског факултета у Београду,

Др Себастиан Балаш, Факултет Техничких наука, Нови Сад,

Мр Драган Рајновић, Факултет Техничких наука, Нови Сад,

Проф др Лепосава Шиђанин, Факултет Техничких наука, Нови Сад,

Мирослав Драмићанин, Факултет Техничких наука, Нови Сад,

Данка Лабус, Факултет Техничких наука, Нови Сад,

Др Марина Дојчиновић, доцент, Технолошко-Металуршки факултет у Београд

**Мишљење Рецензента**

На основу решења Универзитета у Београду, Машинског факултета, број 2277/2 од 28.11.2014. године именована сам за рецензента техничког решења под називом „ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ НЕЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ПОБОЉШАНИМ ОТПОРОМ НА КАВИТАЦИЈУ“.

У складу са наведеном Одлуком, износим мишљење на основу приложене документације.

Приказ техничког решења дат је сходно препорукама Министарства просвете и науке Републике Србије, које су дефинисане Правилником о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача (Сл. Гласник РС, бр. 38/2008), по аналогији са документацијом за пријаву патента.

Приложена документација садржи: област технике на коју се техничко решење односи, проблем којим се техничко решење решава, стање решености тог проблема код нас и у свету, суштину техничког решења, детаљан опис техничког решења са одговарајућим нацртом, начин индустријске и друге примене техничког решења.

Садржај техничког решења приказан је кроз следеће целине:

## **1. Област технике на коју се техничко решење односи**

У овом делу дефинисана је припадност и примена техничког решења, према којој техничко решење припада области материјала, инжењерских материјала, односно ливеног гвожђа, а нови технолошки поступак се односи на Поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију.

## **2. Технички проблем**

Технички проблем је јасно дефинисан и односи се на металне материјале који се највише користе за израду елемената хидрауличних машина, као што су челици, ливена гвожђа, као и легуре обојених метала. Избор материјала за примену у условима кавитационе отпорности зависи од хемијског састава као и термомеханичких особина.

Кавитациона ерозија представља проблем који је присутан код машина чији су елементи при раду изложени дејству брзог тока течности. Због тога се такви елементи израђују углавном од челичних материјала. Услед специфичних радних услова користе се угљенични, легирани и микролегирани челици, као и нерђајући челици различитог хемијског састава.

Поред традиционалних материјала који се користе за израду делова отпорних на дејство кавитације, у које пре свега спадају челици, може се констатовати да постоје веома интересантне алтернативе челицима. Једна од тих алтернатива су и АДИ материјали. Ранија истраживања су показала да кавитациона отпорност ливеног гвожђа, као полазног материјала за АДИ материјал зависи од величине, облика и расподеле графита, као и од чврстоће металне основе. Кавитациона отпорност нодуларног лива је за 2/3, односно 1/3

нижа у поређењу са угљеничним челиком. Објашњење је уклањање графитних нодула из металне основе на самом почетку кавитационог процеса.

### **3. Стање технике**

Аустемперовани нодуларни лив (АДИ) припада групи нових материјала. Карактеристична својства ове групе материјала су одлична комбинација високих вредности чврстоће и дуктилности, отпорности на хабање, као и динамичког оптерећења. Управо из тих разлога интересовање за ову групу материјала је постојало, што је изражено и делом литературних навода који су послужили за анализу стања проблематике у свету. У оквиру овог предлога техничког решења наведен је 31 литературни навод, од чега 13 литературних навода се односе на стање области код нас.

Разлика у односу на досадашња испитивања представља управо испитивања ове групе материјала на кавитациону ерозију. Због тога је поред прегледа групе радова који се односе на АДИ материјале дат и преглед стања у области испитивања материјала у циљу одређивања њихове кавитационе ерозије.

У ранијим истраживањима испитивана је кавитациона ерозија обојених метала. У оквиру тих истраживања испитиван је утицај следећих фактора: величина зрна, граница еластичности, тврдоћа, замор, дуктилност, као и фазне трансформације.

Испитивање понашања АДИ материјала у условима кавитационе ерозије није довољно истражена. С обзиром на добра својства АДИ материјала испитивања понашања и у овим условима би обезбедило проширивање области примене ове групе материјала.

### **4. Излагање суштине техничког решења**

Техничко решење „ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ НЕЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ПОБОЉШАНИМ ОТПОРОМ НА КАВИТАЦИЈУ“, представља побољшање у технологији производње, односно производње АДИ материјала. Захваљујући техничком решењу добија се нелегирани АДИ материјал који поседује побољшану отпорност на кавитациону ерозију. У поређењу са стандардним АДИ материјалима, ова група има поред побољшане отпорности на кавитациону ерозију и повећану дуктилност, као и отпорност на ударна оптерећења, у односу на стандардне АДИ материјале. Побољшане карактеристике су постигнуте захваљујући присуству задржаног аустенита, који се механизмом САТРАМ

трансформише у мартензит на површини, чиме се обезбеђује повећана отпорност на кавитацију. У запремини задржани аустенит омогућава високу дуктилност и отпорност на ударе.

## **5. Детаљан опис техничког решења**

У оквиру овог поглавља аутори су дали:

- Полазни материјал,
- дефинисали су хемијски састав, микроструктуру, као и морфологију графита,
- представљен је режим термичке обраде,
- дата су термомеханичка својства.

Описане су методе карактеризације које су коришћене у оквиру техничког решења. У оквиру овог дела посебно је објашњена ултразвучна вибрациона метода (са стационарним узорком) као и уређај који је коришћен за испитивање.

Посебан део се односи на карактеризацију површине узорка након испитивања кавитационе ерозије. Представљен је начин одређивања брзине кавитационе ерозије, као и добијени резултати.

## **6. Начин индустријске или друге примене техничког решења**

Примена техничког решења је могућа у свакој ливници или металопрерађивачком погону који имају могућност коришћења полазног материјала датих карактеристика, као и да поседују одговарајућу опрему за термичку обраду.

## **7. Апстракт**

Апстракт даје резиме суштине техничког решења, које је приказано у опису.



## Верификација добијених резултата

У оквиру овог техничког решења пуликовано је 5 радова, од којих је један у часопису са СЦИ листе, категорија М21/22, један у часопису националног значаја, док је 3 рада саопштено на међународним конференцијама.

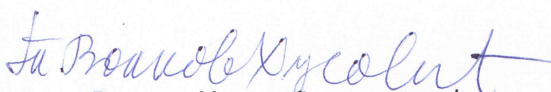
## Закључак

Документација за техничко решење „ ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ НЕЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ПОБОЉШАНИМ ОТПОРОМ НА КАВИТАЦИЈУ“ урађена је у складу са Првилником о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача (Сл. гласник РС, бр. 38/2008) и пружа све неопходне информације о области на коју се техничко решење односи, проблем који се њиме решава, стање решености тог проблема у свету, детаљан опис поступка добијања производа захтеваних својстава са препорукама о начину примене.

Нови технолошки поступак који дефинише поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију претставља оригинално и комерцијално решење. Његовом применом проширује се област примене нелегираних АДИ материјала.

На основу изложеног препоручујем да се техничко решење „ ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ НЕЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ПОБОЉШАНИМ ОТПОРОМ НА КАВИТАЦИЈУ“ прихвати и сврста, према Првилнику о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача (Сл. гласник бр. РС, 38/2008), у категорију **М 84**.

## РЕЦЕНЗЕНТ

  
др Татјана Волков-Хусовић, ред. проф.

Технолошко-металуршки факултет Београд

У Београду, 11.12.2012.

Универзитет у Београду  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У БЕОГРАДУ  
-Наставно научном већу-  
11000 Београд  
Улица Краљице Марије 16

**Предмет:**

Мишљење рецензента о техничком решењу под насловом

**ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ  
НЕЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ПОБОЉШАНИМ ОТПОРОМ НА  
КАВИТАЦИЈУ**

Чији су аутори:

Др Оливера Ерић-Цекић, виши научни сарадник, Иновациони центар Машинског факултета у Београду	
Др Себастиан Балаш,	Факултет техничких наука, Нови Сад
Мр Драган Рајновић,	Факултет техничких наука, Нови Сад
Проф. др Лепосава Шиђанин,	Факултет техничких наука, Нови Сад
Данка Лабус,	Факултет техничких наука, Нови Сад
Мирослав Драмићанин,	Факултет техничких наука, Нови Сад
Др Марина Дојчиновић, доцент,	Технолошко-металуршки факултет у Београду

Техничко решење је урађено у оквиру пројекта ТР 34015, по програму за технолошки развој, област Материјали и хемијске технологије, а под насловом:

„Пројектовање, развој и примена нове генерације АДИ материјала“,  
руководилац пројекта др Оливера Ерић Цекић, ев.број број 451-03-694/2014-14 -1 од 29. априла  
2014. Године Анекс III основног уговора о реализацији Пројекта ТРп у периоду мај -децембар  
2014.године као четврте године истраживања у циклусу 2011-2015. године.

**Образложење:**

Одлуком број 2277/2 од 28.11. 2014. године Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду, донетој на седници одржаној 27.11.2014.године, одређен сам за рецензента поменутог техничког решења, па у складу са тим, дајем своје мишљење, а на основу достављене документације.

Основни подаци о Техничком решењу:

-укупан број страница	16
-број скица	8
- урађено је у складу са	Правилником о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научно- истраживачких резултата (СГ РС број 38/2008)

Техничко решење под насловом: „ **Поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију**“ је обрађено кроз девет поглавља и то

1. Област технике на коју се техничко решење односи
2. Увод
3. Технички проблем
4. Стање решености техничког проблема у свету
5. Детаљан опис техничког решења
6. Суштина техничког решења
7. Начин индустријске или друге примене техничког решења
8. Верификација резултата
9. Литература (стање решености техничког проблема у свету)

У првом делу аутори дају фундаменталне подлоге истраживања и његово стање решености у свету, истичући да савремена инжењерска пракса исказује потребу за материјалом који ће удовољити широким захтевима које пред њега поставља индустријска примена. Један од таквих материјала је и аустемперовани нодуларни лив, односно АДИ материјал (Austempered Ductile Iron). Аустемперовани нодуларни лив представља групу нових металних материјала захваљујући својој одличној комбинацији високе чврстоће, дуктилности, одличне отпорности на хабање и високе перформансе динамичког оптерећења. Избор одређеног металног материјала за примену у условима кавитационе отпорности зависи од хемијског састава и механичких особина.

Ранија истраживања су показала да традиционални материјал који се користи за израду делова који су отпорни на кавитацију су челици. Међутим бројна истраживања су такође показала да постоје и материјали који су интересантна алтернатива челицима. АДИ материјали су једна од тих алтернатива.

Обзиром да кавитациона ерозија која је присутна код машина чији су елементи при раду изложени дејству брзог тока течности представља врло озбиљан проблем који може озбиљно да ограничи радни век компоненте, јавља се тенденција дефинисања поступка производње АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију високе дуктилности и отпорности на ударце.

АДИ материјали се добијају изотермалном трансформацијом нодуларног лива- процесом аустемперовања, при чему се варирањем параметара термичког третмана могу добити изванредне механичке особине у широком дијапазону. Резултат аустемперовања нодуларног лива, на основу којег се производи АДИ материјал, јесте аусферитна микроструктура. Технологија производње приказаног нелегираног АДИ материјала обухватила је следеће фазе: добијање полазног материјала нодуларног лива дефинисаног хемијског састава, производња и ливење нодуларног лива У проба, карактеризација полазног нодуларног лива, поступак термичког третмана-аустемперовање полазног нодуларног лива, карактеризација АДИ материјала (микроструктурна и механичка испитивања), испитивање понашања АДИ материјала у условима кавитационе ерозије. За испитивање кавитационе отпорности произведеног АДИ материјала коришћена је

ултразвучна вибрациона метода (са стационарним узорком). За ултразвучно кавитационо испитивање АДИ материјала примењена је стандардна процедура испитивања са препорученим стандардним вредностима параметара. Наведене су и детаљно описане примењене методе карактеризације полазног нодуларног лива, произведеног АДИ материјала, као и карактеризација морфологије површине АДИ материјала након дејства кавитације. Детаљно је описан поступак одређивања брзине кавитационе ерозије као добијени резултати.

Кроз поглавље **Суштина техничког решења** дат је поступак производње нелегираног АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију. Захваљујући техничком решењу добија се нелегирани АДИ материјал који поседује побољшану отпорност на кавитацију у воденој средини, уз повећану дуктилност и отпорност на ударна оптерећења, у односу на стандардне АДИ материјале који се широко користе у индустријској пракси. Побољшане карактеристике су постигнуте захваљујући присуству задржаног аустенита који се механизмом „SATRAM“ трансформише у матензит на површини, чиме се повећава отпорност на кавитацију, док у запремини задржани аустенит (који се не трансформише) омогућава високу дуктилност и отпорност на ударе.

Провера и верификација техничког решења спроведена је путем објављивања радова у међународним и домаћим часописима, као и путем излагања на међународним и домаћим конференцијама. У оквиру реализације пројекта TP34015 је спроведена експериментална истраживања. Потенцијални корисник „Привредно друштво за производњу и промет одливака ливница Топола а.д. Топола (Варошица)“ је имао континуирани увид у ток истраживања као и у постигнуте резултате. Корисник је остварио увид у техничку документацију предложеног техничког решења као и у мишљење рецензента о квалитету и значају постигнутог техничког решења. Мишљење корисника је састави део техничког решења и дато је у прилогу извештаја о реализацији пројекта TP34015. Аутори техничког решења под називом „**Поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију**“ су јасно приказали и обрадили комплетну структуру техничког решења.

На основу напред изложеног, са задовољством предлажем да Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду прихвати техничко решење под насловом „**Поступак производње нелегираних АДИ материјала са побољшаним отпором на кавитацију**“ и сврста га у категорију **М-84**, у складу са одредбама Правилника о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научно-истраживачких резултата (СГ РС број 38/2008).

У Београду, 19.12. 2014. године

Рецензент



---

Проф др Александар Седмак, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Машински факултет  
Уно: Технологија материјала и машински материјали