



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndeans@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАЏМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: 01.сл

Ваш број:

Датум: 2019-01-31

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 11. редовној седници одржаној дана 30.01.2019. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

ТАЧКА 12.2. Верификација нових техничких решења и именовање рецензената

Тачка 12.2.1.: На основу позитивног извештаја рецензената верификује се техничко решење (М85) под називом:

Назив техничког решења:

“ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ ЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ВИСОКОМ ОТПОРНОШЋУ НА КАВИТАЦИЈУ”

Аутори техничког решења: Оливера Ерић Цекић, Себастиан Балаш, Драган Рајновић, Лепосава Шиђанин, Петар Јањатовић, Мирослав Драмићанин, Марина Дојчиновић.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник

Декан

Проф. др Раде Дорословачки

Tehničko rešenje

Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju

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

Dr Sebastian Baloš, vanredni profesor;
Dr Dragan Rajnović, docent;
Dr Leposava Šidānin, profesor emeritus;
Mast. inž. Petar Janjatović, asistent;
Mast. inž. Miroslav Dramićanin asistent;
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Dr Marina Dojčinović, vanredni profesor;
Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

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

2018. god.

Sadržaj

1. Oblast tehnike na koju se tehničko rešenje odnosi	3
2. Uvod	3
3. Tehnički problem	3
4. Stanje rešenosti tehničkog problema u svetu	3
4.1 Cilj tehničkog rešenja	4
5. Detaljan opis tehničkog rešenja	4
5.1 Polazni materijal – nodularni liv	4
5.3 Karakterizacija ADI materijala	6
5.4 Kavitaciono ispitivanje	8
5.5 Površina uzorka nakon kavitacionog ispitivanja	9
5.6 Gubitak mase tokom kavitacionog ispitivanja	10
5.7 Mikrostruktura ADI materijala nakon kavitacionog ispitivanja	11
6. Suština tehničkog rešenja	12
7. Način industrijske ili druge primene tehničkog rešenja	13
8. Verifikacija rezultata	14
9. Literatura	14

1. OBLAST TEHNIKE NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Materijali, Inženjerski materijali, Livena gvožđa

Tehničko rešenje klase M85 – Novo tehničko rešenje (nije komercijalizovano)

2. UVOD

Produženje radnog veka komponenti je jedan od važnih elemenata za doprinos smanjenju troškova radnog ciklusa industrijske opreme. Cilj je smanjiti troškove održavanja, povećati pouzdanost i produktivnost. Jedan od glavnih uzroka vremenskog zastoja i novčanih gubitaka u industriji jeste reparacija ili zamena opreme. Savremena inženjerska praksa se bazira na pronalasku materijala čije će vreme eksploatacije biti duže i samim tim potreba za reparacijom manja. Poznato je da se elementi i uređaji sistema za transport fluida izrađuju od čelika, ali i od livenog gvožđa što predstavlja mogućnost korišćenja ADI materijala. ADI materijal (engleska skraćenica od Austempered Ductile Iron) se dobija izotermnom transformacijom - austemperovanjem nodularnog liva (NL), čija se mikrostruktura sastoji od grafitnih nodula smeštenih u ausferitnoj osnovi – jedinstvenoj mikrostrukturi koja se sastoji iz visokougleničnog zadržanog austenita i pločastog ili igličastog ausferitnog ferita. Poseduju visoku čvrstoću, duktilnost, žilavost loma, otpornost na zamor i habanje, kao i dobru obradivost rezanjem. Optimalni odnos mehaničkih osobina ADI materijala se postiže variranjem parametara termičkog tretmana. Ima gustinu za oko 12 % manju u odnosu na čelik kao i niže troškove proizvodnje (do 50 %). Sve navedeno omogućava sve veću primenu ADI materijala za delove koji su se do sada izrađivali od kovanog ili livenog čelika [1].

3. TEHNIČKI PROBLEM

Za izradu elemenata hidrauličnih mašina najviše se koriste metalni materijali kao što su čelici i livena gvožđa. Radni vek elemenata zavisi od otpora površine koja je izložena dejstvu kavitacije. Pod kavitacijom, podrazumeva se stvaranje parnih mehurova u tečnosti koja struji. Kavitacija je neželjena pojava u hidrosistemima jer je praćena: šumom, vibracijama, erozijom materijala, povećanim gubitkom energije, itd. Kavitacija nastaje kada pritisak tečnosti ima kritičnu vrednost, tj. kada dostigne vrednost pritiska isparavanja tečnosti na temperaturi tečnosti. Kavitacija je prisutna kod elemenata kao što su brodski propeleri i hidroprofili, na branskim ventilima, tunelima i drugim hidrauličnim strukturama, lopaticama vodenih turbina i pumpi [2].

4. STANJE REŠENOSTI TEHNIČKOG PROBLEMA U SVETU

Dosadašnja istraživanja su pokazala da na otpornost materijala prema eroziji utiče veličina zrna, tvrdoća, duktilnost, zamor i fazne transformacije. Otpornost takođe zavisi i od veličine, oblika i rasporeda mikrokonstituenata (npr. grafit kod livenog gvožđa). Nodularni liv zahvaljujući svom obliku i rasporedu grafita ima bolju otpornost prema kavitacionoj eroziji u poređenju sa sivim livom [3,4]. Međutim, kavitaciono razaranje nodularnog liva je složen proces. Najmanju otpornost ka kavitacionoj eroziji imaju grafitne nodule na čijim mestima se formiraju jamice koje omogućavaju dalje napredovanje kavitacije.

Termičkim tretmanom se od nodularnog liva dobija ADI materijal pri čemu se promenom parametara termičkog tretmana mogu dobiti različite kombinacije mehaničkih osobina. Mehaničke osobine ADI materijala prvenstveno su određene mikrostrukturom osnove, kao i veličinom i

rasporedom grafitnih nodula [5,6]. Termički tretman nodularnog liva odnosno austemperovanje se sastoji iz austenitizacije i izotermne transformacije.

Tokom austenitizacije teži se ka maksimalnom zasićenju austenita ugljenikom iz grafitnih nodula. Na maksimalnu rastvorljivost ugljenika kao i brzinu difuzije utiče temperatura [7]. Temperatura austenitizacije zavisi od legirajućih elemenata. Ukoliko je nodularni liv legiran sa silicijumom i niklom austenitizacija se vrši na višoj temperaturi za razliku od nodularnog liva legiranog sa manganom i molibdenom [8]. Austenitizacija se vrši u temperaturnom intervalu od 850 do 950°C, obično u trajanju od 120 min.

Nakon austenitizacije vrši se brzo hlađenje do temperature izotermne transformacije. Tokom izotermne transformacije dobija se jedinstvena ausferitna mikrostruktura koja se sastoji iz ausferitnog ferita i ugljenikom obogaćenog stabilnog austenita. Izotermna transformacija se vrši u temperaturnom intervalu 250÷400°C u trajanju od nekoliko minuta do 360 minuta. Morfologija nastalog ausferitnog ferita zavisi od temperature izotermne transformacije. U donjem području, u temperaturnom intervalu 250÷330°C nastaje acikularna (igličasta) morfologija ausferita sa finijim i izduženim snopovima ausferitnog ferita i ugljenikom obogaćenog austenita. ADI materijal sa takvom morfologijom karakteriše visoka čvrstoća i tvrdoća, ali manja žilavost [9, 10]. U gornjem području izotermne transformacije, u temperaturnom intervalu 330÷400°C nastaje pločasta morfologija ausferita sa širim i kraćim snopovima ausferitnog ferita. Mehaničke karakteristike tako dobijenog ADI materijala su visoka duktilnost, ali manja čvrstoća i tvrdoća.

4.1 Cilj tehničkog rešenja

Ciljevi tehničkog rešenja su sledeći:

- a) Definirati postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju.
- b) Mogućnosti primene i zamene dosadašnjih materijala za izradu vodenih pumpi, brodskih propelera, lopatica vodenih turbina i hidroprofila na branskim ventilima i tunelima uz duži radni vek elemenata i manje troškove proizvodnje.

5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

5.1 Polazni materijal – nodularni liv

Polazni materijali za izradu uzoraka ADI materijala su dve klase nodularnog liva. Proizvodnja liva, odnosno noduliranje tečnog metala obavljeno je u zatvorenom sifonskom loncu tzv. „sendvič“ postupkom. Odlivene su Y probe debljine 25 mm u peščanom kalupu.

5.1.1 Hemijski sastav nodularnog liva

Projektovanje hemijskog sastava je izvršeno sa ciljem dobijanja poboljšanih mehaničkih karakteristika i povećane prokaljivosti materijala uz postizanje uravnotežene segregacije legirajućih elemenata po preseku uzorka. Kao legirajući elementi su odabrani bakar i nikl. Hemijski sastav odlivenih Y proba dat je u tabeli 1. Ispitivanjem proizvedenih legiranih nodularnih livova (označenih kao: NL Cu i NL Cu+Ni) potvrđeno je da hemijski sastavi odgovaraju projektovanim. Hemijski sastav je utvrđen optičkim emisionim spektrometrom ARL-3460 i infra-crvenim spektrometrom LECO CS-244 IR.

Tabela 1 Hemijski sastavi legiranih nodularnih livova u mas. %

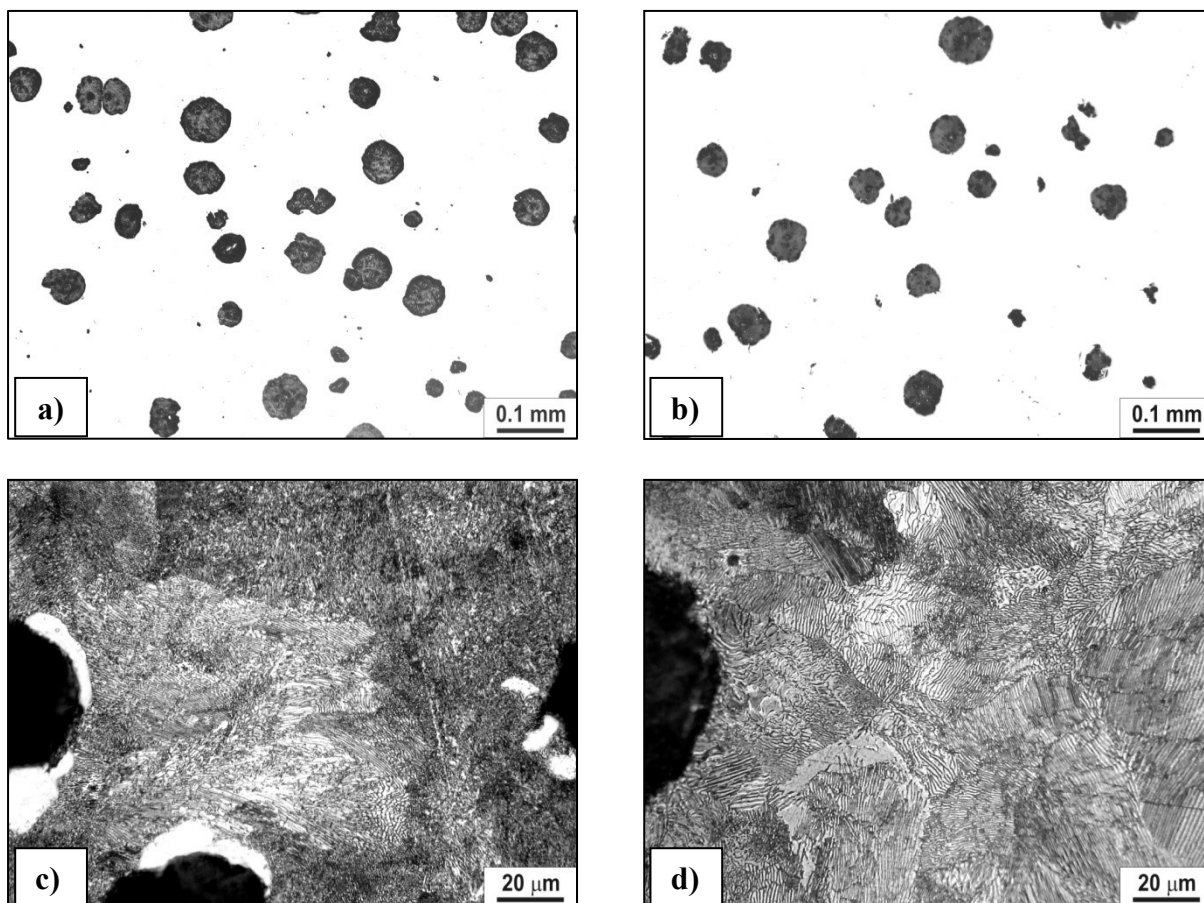
	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	%Mg	%Fe
NL Cu	3,64	2,49	0,30	0,014	0,014	0,46	-	0,042	ostatak
NL Cu+Ni	3,47	2,15	0,26	0,020	0,012	1,6	1,5	0,040	ostatak

5.1.2 Mikrostruktura nodularnog liva

Mikrostruktura legiranih nodularnih livova u poliranom stanju čiji su hemijski sastavi dati u tabeli 1, prikazana je na slici 1. Veličina grafitnih nodula je $48 \pm 4 \mu\text{m}$, dok je gustina 60 ± 5 nodula po mm^2 za ADI Cu (slika 1a) i 58 ± 6 nodula po mm^2 za ADI Cu+Ni (slika 1b). Step en sferoidizacije je preko 90 % kod obe legure.

Mikrostruktura metalne osnove NL Cu je pretežno perlitna sa udelom ferita manjim od 10 % (slika 1c), dok je mikrostruktura NL Cu+Ni potpuno perlitna (slika 1d).

Mikrostruktura uzoraka nodularnog liva je ispitana svetlosnim mikroskopom Leitz-Orthoplan.



Slika 1 Mikrostruktura nodularnog liva u poliranom stanju: a) NL Cu, b) NL Cu+Ni, i u nagriženom stanju: c) NL Cu, d) NL Cu+Ni

5.1.3 Mehaničke osobine nodularnog liva

Srednje vrednosti rezultata mehaničkih ispitivanja su date u tabeli 2. Nodularni liv legiran sa bakrom i niklom poseduje veći napon tečenja, zateznu čvrstoću i tvrdoću, a manje izduženje i energiju udara u odnosu na nodularni liv legiran samo sa bakrom.

Proizvedeni nodularni liv legiran sa bakrom odgovara standardnom nodularnom livu EN-GJS-700-2, dok nodularni liv legiran sa bakrom i niklom odgovara livu EN-GJS-800-2. Ispitivanje zatezanjem je izvršeno na kidalici VEB ZDM 5/91 u skladu sa standardom ISO 6892-1:2017.

Tabela 2 Rezultati ispitivanja mehaničkih osobina

Materijal	Rp _{0,2%} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	K ₀ [J]	HV 10
NL Cu	514	770	4,9	21,4	270
NL Cu+Ni	677	880	3,2	20,5	296

5.2 Termički tretman

Termički tretman - austemperovanje se sastoji iz austenitizacije i izotermne transformacije. Parametri austenitizacije su za obe legure ADI materijala isti. Austenitizacija je izvršena u komornoj peći u zaštitnoj atmosferi argona na temperaturi od 900°C u trajanju od 2 sata. Parametri izotermne transformacije su različiti za svaku leguru. Izotermna transformacija je izvršena u sonom kupatilu, a kao sredstvo je korišten rastop soli 50% NaNO₂ i 50% KNO₃. Temperatura izotermne transformacije je 350°C u trajanju od 2 sata za leguru NL Cu i 3 sata za leguru NL Cu+Ni.

Parametri austemperovanja su izabrani u cilju postizanja što veće duktilnosti ADI materijala.

Nakon izotermne transformacije uzorci su hlađeni do sobne temperature na mirnom vazduhu.

Ostaci soli i masnoće sa uzoraka uklonjeni su sukcesivnim pranjem u benzinu, destilovanoj vodi i etil alkoholu.

5.3 Karakterizacija ADI materijala

Priprema uzoraka za metalografsko ispitivanje se sastojala iz brušenja, poliranja i nagrivanja. Brušenje je vršeno brusnim papirima, P150, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 2400, a poliranje dijamantskom suspenzijom 6, 3, 1 i 1/4 µm. Uzorci su nagriveni nitalom, odnosno 3 % azotnom kiselinom. Pored razvijanja mikrostrukture samo nagrivanjem nitalom, izvršeno je i termičko bojenje mikrostrukture u oksidacionoj atmosferi peći na 260°C u trajanju od 6 h.

Mikrostruktura uzoraka ADI materijala je ispitana svetlosnim mikroskopom Leitz-Orthoplan.

Ispitivanje zatezanjem je izvršeno na kidalici VEB ZDM 5/91 u skladu sa standardom ISO 6892-1:2017. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 3. Za ispitivanja su korišćene po tri epruvete za svaku leguru ADI materijala prečnika 6 mm, početne merne dužine 30 mm i paralelne dužine 36 mm sa navojem na krajevima epruveta.

Tvrdoća je ispitana po Vickersu u skladu sa standardom ISO 6507-1:2005, na uređaju VEB HPO-250, sa opterećenjem 10 kg i zadržavanjem 15 s. Izvršeno je po pet utiskivanja.

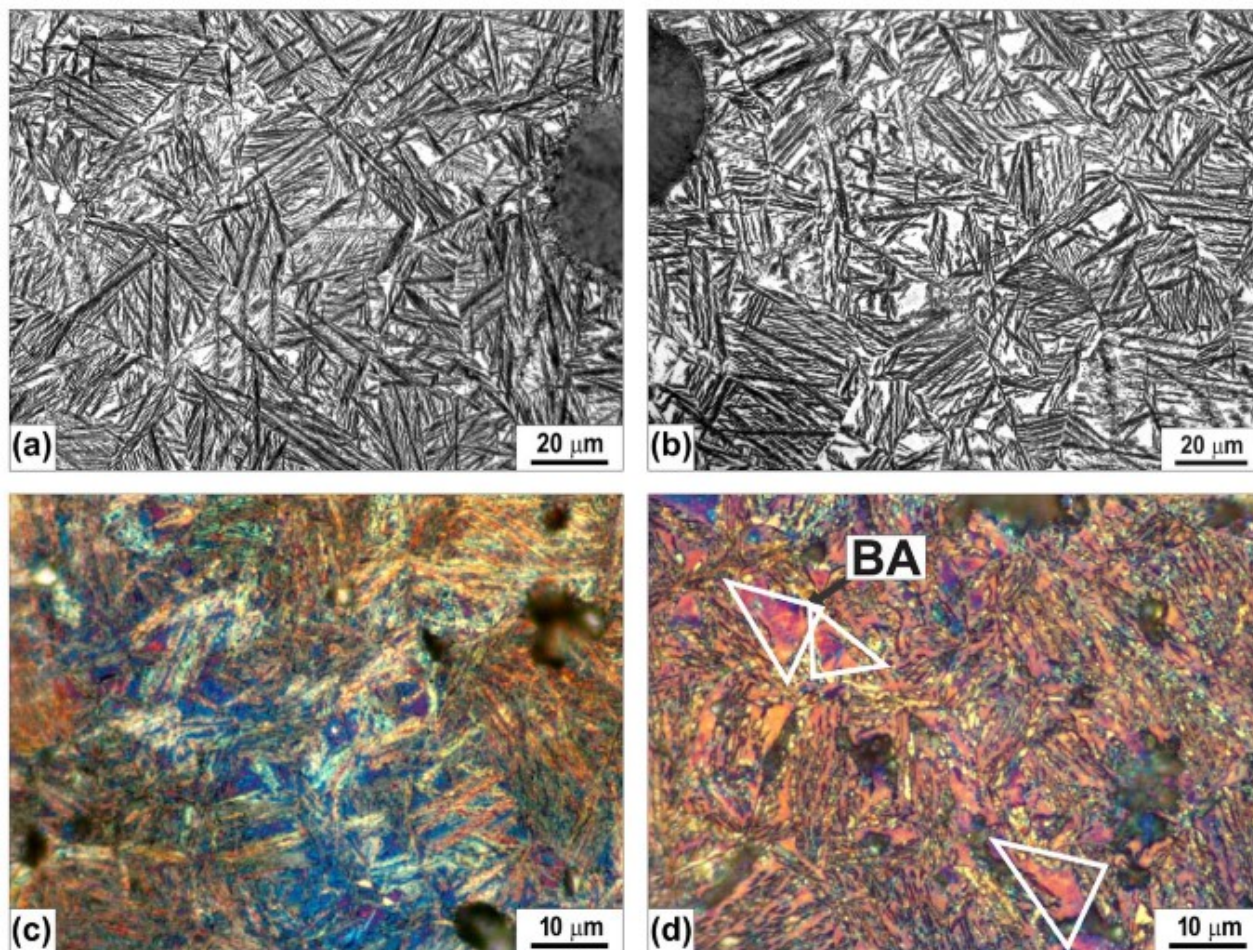
Ispitivanje energije udara je izvršeno na Šarpijevom klatnu VEB PSW-30 po standardu SRPS EN ISO 148-1:2012. Pri ispitivanju je korišćeno po tri epruvete bez zareza, dimenzija 10x10x55 mm.

5.3.1 Mikrostruktura ADI materijala

Mikrostruktura ADI Cu materijala je potpuno ausferitna i sastoji se iz igličastog ausferitnog ferita i ugljenikom obogaćenog zadržanog austenita, slika 2a.

Mikrostruktura ADI Cu+Ni je takođe u potpunosti ausferitna, ali je morfologija ausferita različita. ADI Cu+Ni poseduje šire ausferitno feritne pločice koje više liče na pločastu morfologiju.

Svetla poligonalna područja koja su više prisutna kod materijala ADI Cu+Ni (slika 2b) predstavljaju izdvojeni grubi "blocky" zadržani austenit. Slike 2b i 2d pokazuju da je zapreminski udeo ostrvaca zadržanog ausferita (BA blocky austenite) za uzorke ADI Cu+Ni veći nego za leguru ADI Cu. Međutim, mikrostruktura razvijena termičkim bojenjem pokazuje da ostrvca grubog zadržanog austenita (BA) su u stvari niskouglenični nestabilni austenit (slika 2c i 2d).



Slika 2 Mikrostruktura ADI materijala: nagriženog sa 3 % nitala a) ADI Cu, b) ADI Cu+Ni i naknadnim termičkim bojenjem: c) ADI Cu, d) ADI Cu+Ni

5.3.2 Mehaničke osobine ADI materijala

Srednje vrednosti rezultata ispitivanja mehaničkih osobina ADI Cu i ADI Cu+Ni ($R_{p0.2}$ -konvencionalni napon tečenja, R_m -zatezna čvrstoća, A_5 -izduženje, K_0 -energija udara određena na epruvetama bez zareza i HV tvrdoća po Vickersu) dati su u tabeli 3.

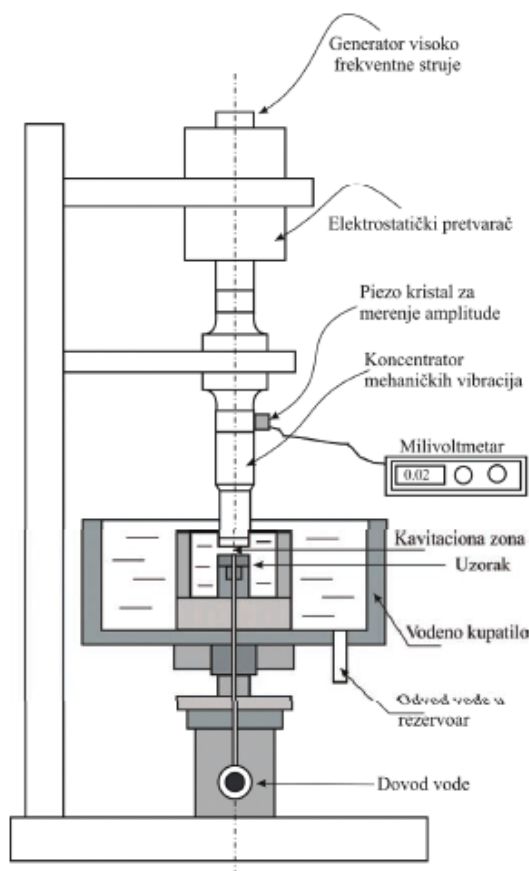
ADI materijal legiran sa bakrom ima veći napon tečenja, zateznu čvrstoću, i tvrdoću u odnosu na ADI legiran sa bakrom i niklom, ali i manju duktilnost i energiju udara.

Tabela 3 Mehaničke karakteristike ADI materijala

Materijal	$R_{p0,2\%}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	K_0 [J]	HV 10
ADI Cu	$995 \pm 17,7$	$1110 \pm 25,7$	$7,9 \pm 1,3$	$106,1 \pm 5,5$	$373 \pm 6,2$
ADI Cu+Ni	$901 \pm 4,5$	$1073 \pm 32,4$	$11,1 \pm 0,7$	$122 \pm 7,8$	$308 \pm 6,1$

5.4 Kavitaciono ispitivanje

Za ispitivanje kavitacione otpornosti ADI materijala korišćen je uređaj Branson Ultrasonics JP40022A. Uređaj je prikazan na slici 3 i radi na principu ultrazvučnih vibracija pri čemu je uzorak stacionaran (fiksiran).



Slika 3 Šema uređaja za ispitivanje kavitacione otpornosti ultrazvučnom vibracionom metodom [7]

Uređaj se sastoji 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 čelone površine koncentratora vibracija sa zazorom. Jaka kavitaciona zona se obrazuje ispod čelone površine koncentratora i stacionarnog probnog uzorka. Voda se kroz otvor na uzorku u vodenog kupatilo dovodi pumpom. Voda hladi i održava temperaturu uzorka konstantnom $25 \pm 0,5$ °C. Stalnim protokom vode na površini ispitivanog uzorka stvara se polje pritiska koje podstiče imploziju kavitacionih mehura. Ispitni uzorak nije izložen mehaničkim naprezanjima u toku ispitivanja.

Za ultrazvučno kavitaciono ispitivanje ADI materijala primenjena je standardna procedura ispitivanja sa preporučenim standardnim vrednostima parametara [11]: 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 $5\text{--}10$ ml/s.

Brzina kavitacione erozije materijala predstavlja gubitak mase ili zapremine materijala u jedinici vremena.

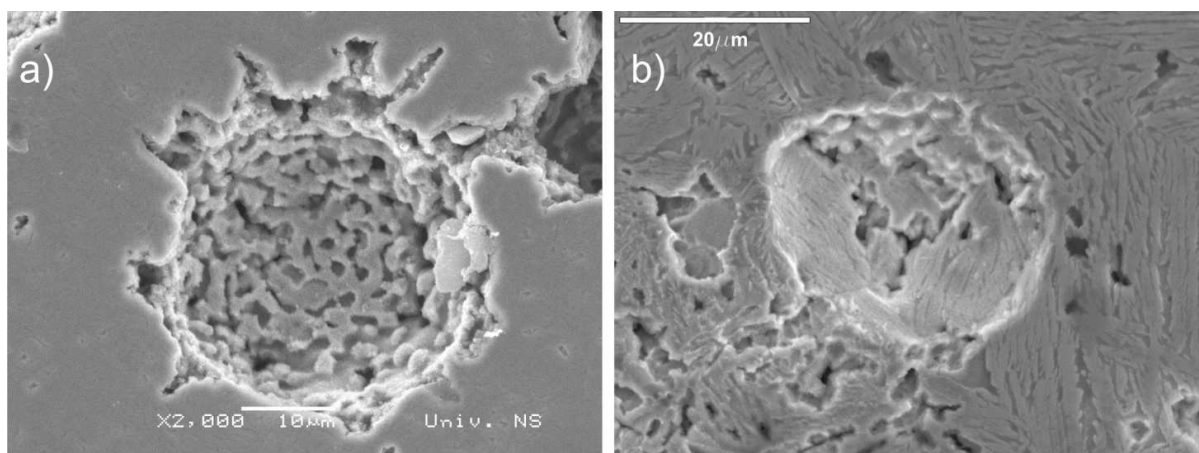
Vreme izlaganja dejstvu kavitacije ADI materijala bilo je 30, 60, 120, 180 i 240 min.

Gubitak mase uzoraka nakon dejstva kavitacije meren je na analitičkoj vagi tačnosti $\pm 0,1$ mg.

5.5 Površina uzorka nakon kavitacionog ispitivanja

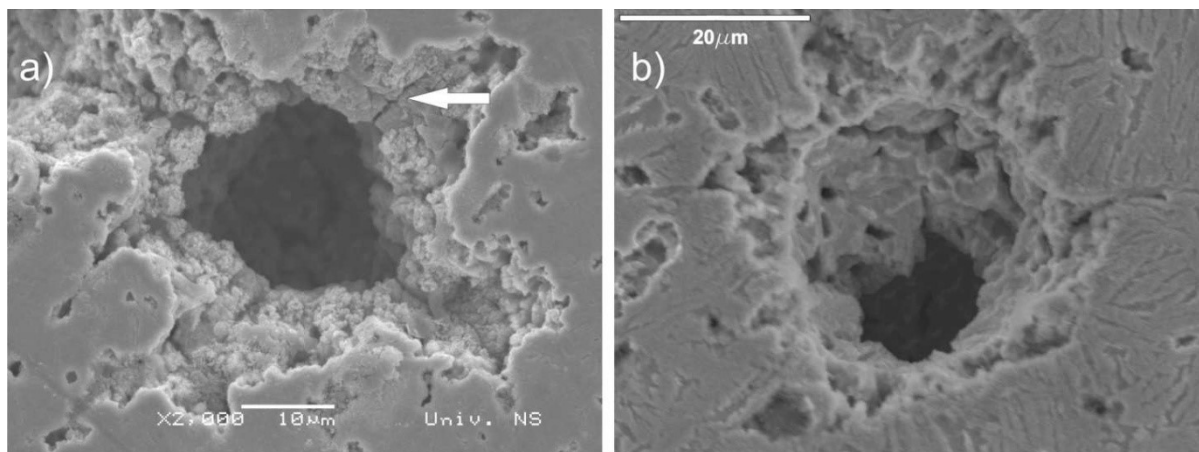
Površine uzoraka ADI materijala (ADI Cu i ADI Cu+Ni) nakon kavitacionog dejstva su ispitivane skeniranjem elektronskim mikroskopom (SEM). Rezultati ispitivanja uzoraka nakon 30 min, 60 min i 240 min kavitacionog dejstva su prikazani na slikama 4 - 6.

Rezultati analize morfologije površine obe legure ADI materijala nakon 30 min kavitacionog dejstva prikazane su na slikama 4a i 4b. Jasno su vidljive deformacije površinskih slojeva materijala. Usled kavitacionog dejstva odvajaju se grafitne nodule iz metalne osnove. Na mestima nodula se formiraju jamice, a na obodima jamica dalje nastaju mikroprrsline.



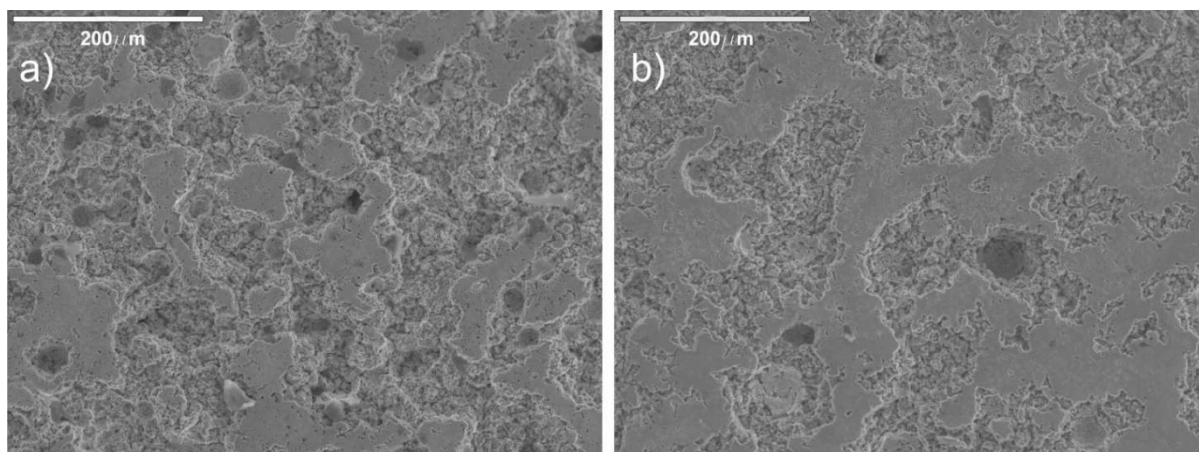
Slika 4 SEM mikrofotografije nakon 30 min kavitacionog ispitivanja: a) ADI Cu i b) ADI Cu+Ni

Nakon 60 min kavitacionog dejstva oštećenja su još veća. Izraženije je ljuštenje osnove u delu oboda jamice. Na slici 5a su prikazane mikroprrsline nastale međusobnim spajanjem. Površina metalne osnove između mikroprrsline će tokom dužeg vremena kavitacije zaustaviti njihov dalji rast. Obrazovanje mikroprrsline međusobnim spajanjem nije identifikovano kod ADI Cu+Ni materijala.



Slika 5 SEM mikrofotografije nakon 60 min kavitacionog ispitivanja a) ADI Cu i b) ADI Cu+Ni

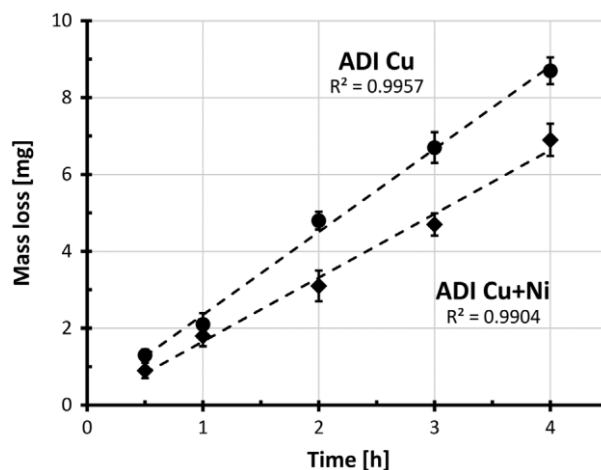
Posle 240 min kavitacionog dejstva uočena je velika površina oštećenja u oba ADI materijala (slika 6). Kod ADI Cu+Ni materijala se i dalje mogu videti jamice na mestima grafitnih nodula. Iz navedenog se može pretpostaviti da je debljina uklonjenog površinskog sloja tokom ispitivanja ADI Cu+Ni manja u poređenju sa ADI Cu, što ukazuje na veću kavitacionu otpornost ADI materijala legiranog sa bakrom i niklom.



Slika 6 SEM mikrofotografije nakon 240 min kavitacionog ispitivanja:
a) ADI Cu, i b) ADI Cu+Ni

5.6 Gubitak mase tokom kavitacionog ispitivanja

Kavitaciona otpornost materijala se ogleda kroz gubitak mase ispitivanog uzorka. Na slici 7 prikazan je dijagram poređenja gubitka mase u zavisnosti od vremena kavitacionog ispitivanja za materijale ADI Cu i ADI Cu+Ni. Proračunati gubitak mase za ADI Cu je $0,03625 \text{ mgmin}^{-1}$, a za ADI Cu+Ni $0,02875 \text{ mgmin}^{-1}$. Sa dijagrama se vidi da je nakon svakog kavitacionog testiranja gubitak mase sve veći za materijal ADI Cu, odnosno materijal ADI Cu+Ni je otporniji na kavitaciono oštećenje.

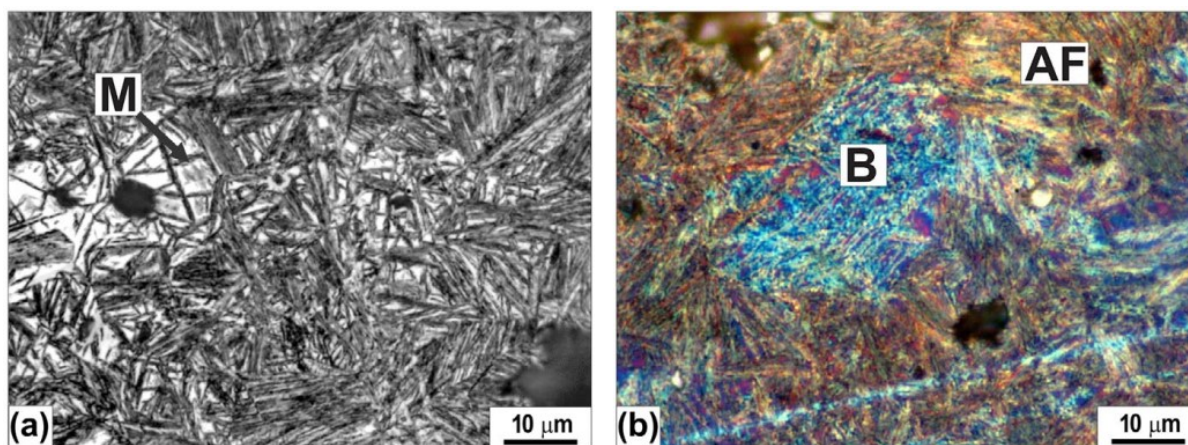


Slika 7 Gubitak mase u toku kavitacionog ispitivanja za materijale: a) ADI Cu i b) ADI Cu+Ni

5.7 Mikrostruktura ADI materijala nakon kavitacionog ispitivanja

Mikrostrukture ADI Cu i ADI Cu+Ni dobijene svetlosnim mikroskopom nakon 4 h kavitacije su prikazane na slikama 8 i 9.

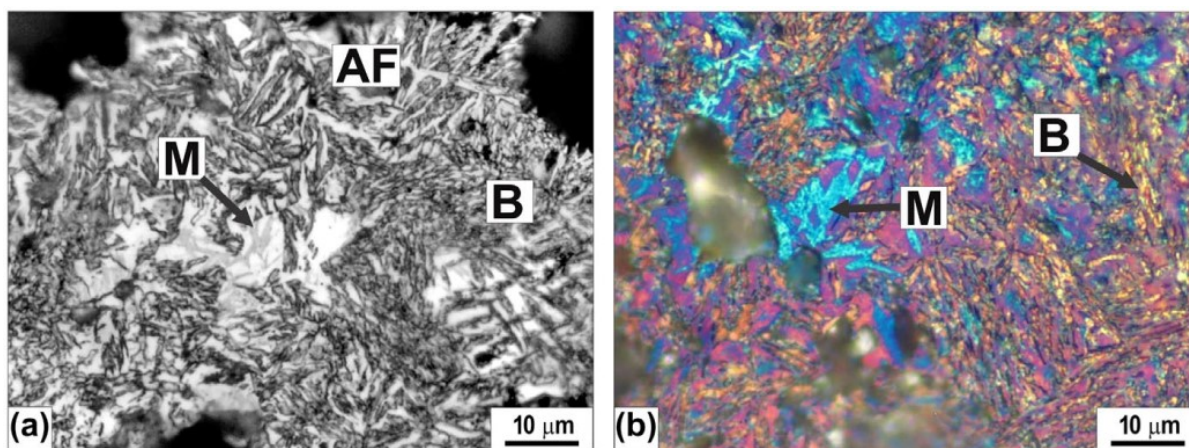
Morfološka promena ausferita (slika 8) u odnosu na kavitaciono ne tretiran ADI Cu uzorak (slika 2a i 2c) je značajna. Granična površina između igličastog (acikularnog) ferita i austenita je neuočljiva (difuzna, slika 8a). Naime nakon termičkog bojenja mikrostrukture uočeno je da se austenit sa visoko obogaćenim sadržajem ugljenika do parcijalno transformiše u termički stabilniji bainit (II stadijum transformacije), slika 8b (svetlo plava obojena površina sa sitnim belim česticama). Štaviše mala količina martenzita (slika 8a) je takođe uočljiva u ostrvcima austenita [12].



Slika 8 Mikrostruktura ADI Cu materijala nakon 4 h kavitacionog dejstva: a) nagrižena sa 3 % nitrala, b) sa naknadnim termičkim bojenjem (AF - ausferit, M - martenzit, B - bainit)

U mikrostrukтури legure ADI Cu+Ni prisutna je veća količina lećastog visokougleničnog martenzita nego u leguri ADI Cu nastaloj nakon 4 sata kavitacije (slika 9). Takođe je u leguri ADI Cu+Ni uočljiva posledica razlaganja austenita u termomehanički stabilniji bainit (II stadijum transformacije). Međutim količina transformisanog austenita kao posledica kavitacije je manja ako se uporedi sa transformacijom austenita u martenzit [12].

Tvrdoća merena na površini uzoraka koje su bile izložene kavitacionom dejstvu pokazuju povećanje tvrdoće do 480 HV10 u slučaju ADI Cu, i do 402 HV10 za ADI Cu+Ni materijal. Ovo povećanje tvrdoće objašnjava se pomenutom transformacijom mikrokonstituenata tokom kavitacije. Na taj način prikazani rezultati ukazuju na afinitet mikrokonstituenata da se transformišu u martenzit ili u bainit.



Slika 9 Mikrostruktura ADI Cu+Ni materijala nakon 4 h kavitacionog dejstva: a) nagrižena sa 3 % nitala, b) sa naknadnim termičkim bojenjem (AF - ausferit, M - martenzit, B - bainit)

6. SUŠTINA TEHNIČKOG REŠENJA

Suština ovog tehničkog rešenja je definisanje tehnoloških parametara procesa proizvodnje legiranih ADI materijala u cilju postizanja visoke otpornosti na kavitaciju.

Tehničko rešenje „*Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju*“ predstavlja poboljšanje u tehnologiji proizvodnje i primene ADI materijala. Zahvaljujući tehničkom rešenju dobija se ADI materijal koji ispunjava zahteve materijala za povišenom otpornošću na kavitaciju. Zamenom dosadašnjih materijala od kojih su se izrađivali elementi izloženi kavitacionom dejstvu postiže se duži radni vek komponenti, smanjenje troškova održavanja, povećanje pouzdanosti u radu proizvodnje i veća produktivnost.

Postupak proizvodnje legiranog ADI Cu+Ni materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju

Polazni materijal: EN-GJS-800-2

Hemijski sastav:

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%	Ni%	Mg%	Fe%
NL Cu+Ni	3,47	2,15	0,26	0,020	0,012	1,6	1,5	0,040	ostatak

Mikrostruktura NL: Potpuno perlitna.

Morfologija grafita: Step en sferoidizacije nodula preko 90 %, gustina nodula je $55 \div 65$ nodula /mm², veličina, prečnik nodula $44 \div 52$ µm.

Mehaničke osobine NL:

Materijal	R _{p0,2%} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	K ₀ [J]	HV 10
NL Cu+Ni	677	880	3,2	20,5	296

Termička obrada: Austenitizacija na 900°C u trajanju od 2 h.
Izotermna transformacija na 350 °C u trajanju 3 h.

Mikrostruktura ADI: Ausferitna

Mehaničke osobine ADI materijala:

Materijal	R _{p0,2%} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	K ₀ [J]	HV 10
ADI Cu+Ni	901 ± 4,5	1073 ± 32,4	11,1 ± 0,7	122 ± 7,8	308 ± 6,1

Otpornost na kavitaciju (gubitak mase): 0,02875 mgmin⁻¹

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 objavljivanjem radova u međunarodnim i domaćim časopisima, kao i izlaganjem na međunarodnim i domaćim konferencijama.

1. O. Eric Cekic, M. Dojcinovic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: Microstructure and cavitation behaviour of alloyed austempered ductile irons, International Journal of Cast Metals Research, (2018), pp. 1-9, DOI: 10.1080/13640461.2018.1446385

Ovo tehničko rešenje je klasifikovano kao M85 – Novo tehničko rešenje koje nije komercijalizovano. O eventualnoj komercijalizaciji će se odlučiti naknadno.

9. LITERATURA

- [1] Rajnović, D.: Karakterizacija, osobine i prelazna temperatura legiranih ADI materijala-magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, (2009)
- [2] Jovanovic, P. Cantrak, S. Radojevic, Z.: Kavitacija, Beograd (1985)
- [3] Dojcinovic M. Đorđević V.: Laboratory investigation of cavitation resistance of materialsmodified ultrasonically induced, cavitation method, MJoM Metalurgija -Journal of Metallurgy, 14, (3) (2008), pp. 217
- [4] 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, 269, (5-6), (2010), pp. 443-448
- [5] Harding, R.A. The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron, Kovove Mater., 45, (2007), pp.1-16
- [6] Rajnović D., Stojaković D., Sidjanin L., Postupak karakterizacije mikrostrukture ADI materijala, Časopis Tehnika-Novi materijali, 12/1, (2003), pp. 9-16
- [7] Rundman, K.B., Klung, R.C.: An x-ray and metallographic study of an austempered ductile cast iron, Transactions of the American Foundrymen's Society, 90, (1982), pp. 499-508
- [8] Yazdani, S., Elliott, R.: Influence of molybdenum on austempering behaviour of ductile iron. Part 2 -Influence of austenitising temperature on austempering kinetics, mechanical properties, and hardenability of ductile iron containing 0.13%Mo, Materials Science and Technology, 15, (1999), pp. 541-546
- [9] Shih, T.S., Chang, C.H., Hwang, L.Z., Loper, C.R.: Mechanical Properties and Microstructures of Austempered Alloyed Ductile Irons, AFS Transactions, 107, (1991), pp. 793-808
- [10] Harding, R.A.: The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron, Kovove Mater., 45, (2007), pp. 1-16
- [11] Modified ASTM G 32 Ultrasonically Induced Cavitation Test Method, ASTM G 32-92 (1992)
- [12] Eric Cekic O., Dojcinovic M., Rajnovic D., Sidjanin L., Balos S.: Microstructure and cavitation behaviour of alloyed austempered ductile irons, International Journal of Cast Metals Research, (2018), pp. 1-9, DOI: 10.1080/13640461.2018.1446385



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАНИ ОД:



Ваш број:

Датум: 2018-07-19

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Новом Саду, на 59. редовној седници одржаној дана 27.06.2018. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

Тачка 13.1. Верификација нових техничких решења и именовање рецензента

Тачка 13.1.1: У циљу верификације новог техничког решења усвајају се рецензенти:

1. др Бранка Пилић, редовни професор, Технолошки факултет, Универзитет у Новом Саду
2. др Бранко Шкорић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду

Назив техничког решења:

“ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ ЛЕГИРАНИХ АДИ МАТЕРИЈАЛА СА ВИСОКОМ ОТПОРНОШЋУ НА КАВИТАЦИЈУ”

Аутори техничког решења: Оливера Ерић-Цекић, Себастиан Балаш, Драган Рајновић, Лепосава Шиђанин, Петар Јањатовић, Мирослав Драмићанин, Марина Дојчиновић.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
39 Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник



Проф. др Рале Дорословачки

Наш број:

Nastavno naučnom veću Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu i Departmanu za proizvodno mašinstvo

Predmet: Recenzija tehničkog rešenja kategorije M85 (Novo tehničko rešenje koje nije komercijalizovano)

Naziv: Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju

Projekat iz koga proizilazi tehničko rešenje: "Projektovanje, razvoj i primena nove generacije ADI materijala TR34015"

Nosilac realizacije projekta: Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

Rukovodilac projekta: Dr Olivera Erić Cekić

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

Dr Sebastian Baloš, vanredni profesor;
Dr Dragan Rajnović, docent;
Dr Leposava Šidānin, profesor emeritus;
Mast. inž. Petar Janjatović, asistent;
Mast. inž. Miroslav Dramićanin asistent;
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Dr Marina Dojčinović, vanredni profesor;
Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

Mišljenje recenzenta

Tehničko rešenje: Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju

Odlukom od 27.06.2018. godine Nastavno- naučnog veća Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, donetoj na 59. Redovnoj sednici održanoj 27. 06. 2018.godine, pod tačkom 13.1 (Verifikacija novih tehničkih rešenja i imenovanje recenzenata), određena sam za recenzenta pomenutog tehničkog rešenja, pa u skladu s tim, dajem svoje mišljenje, na osnovu dostavljene dokumentacije.

Tehničko rešenje pod nazivom: **Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju**, autora: Olivera Erić Cekić, Sebastiana Baloša, Dragana Rajnovića, Leposave Šidānin, Petra Janjatovića, Miroslava Dramićanina i Marine Dojčinović urađeno je u skladu sa zahtevima koji su definisani u Pravilniku o postupku, načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača- "Službeni Glasnik RS", br. 24/2016, 21/2017 i 38/2017.

Tehničko rešenje je prikazano na 14 strana A4 formata, sadrži 9 slika, 6 tabela i 12 literaturnih referenci. Sadržaj tehničkog rešenja prikazan je kroz sledeće celine:

1. Oblast tehnike na koju se tehničko rešenje odnosi
2. Uvod
3. Tehnički problem
4. Stanje rešenosti tehničkog problema u svetu
 - 4.1 Cilj tehničkog rešenja
5. Detaljan opis tehničkog rešenja
 - 5.1 Polazni materijal – nodularni liv
 - 5.1.1 Hemijski sastav nodularnog liva
 - 5.1.2 Mikrostruktura nodularnog liva
 - 5.1.3 Mehaničke osobine nodularnog liva
 - 5.2 Termički tretman
 - 5.3 Karakterizacija ADI materijala
 - 5.3.1 Mikrostruktura ADI materijala
 - 5.3.2 Mehaničke osobine ADI materijala
 - 5.4 Kavitaciono ispitivanje
 - 5.5 Površina uzorka nakon kavitacionog ispitivanja
 - 5.6 Gubitak mase tokom kavitacionog ispitivanja
 - 5.7 Mikrostruktura ADI materijala nakon kavitacionog ispitivanja
6. Suština tehničkog rešenja
7. Način industrijske ili druge primene tehničkog rešenja
8. Verifikacija rezultata
9. Literatura

Tehničko rešenje pripada oblasti materijali, inženjerski materijali i livena gvožđa i direktno se odnosi na jedan od domena istraživanja u okviru projekta tehnološkog razvoja pod nazivom „*Projektovanje, razvoj i primena nove generacije ADI materijala*“ (evidencioni broj TR-34015) - domen predlog implementacije novih ADI materijala u industrijskim uslovima.

Osnovni cilj tehničkog rešenja je definisanje tehnoloških parametara procesa proizvodnje legiranih ADI materijala u cilju postizanja visoke otpornosti na kavitaciju.

U **Uvodu** su date fundamentalne podloge istraživanja, počev od značaja održavanja uređaja i sistema, preko vremena eksploatacije, sve do osnova vezanih za ADI materijale. Dat je način dobijanja ADI materijala, kao i njegove prednosti u odnosu na kovane i livene čelike.

U trećem poglavlju (**Tehnički problem**) su navedeni problemi sa kojima se susreću inženjeri pri projektovanju hidrauličnih uređaja. Poseban osvrt je dat na problem kavitacije kao jedan od ključnih u hidraulici.

Poglavlje **Stanje rešenosti tehničkog problema u svetu** razmatra otpornost materijala na eroziju materijala usled dejstva kavitacije, odnosno, uticaj kavitacije na livena gvožđa, posebno na nodularni liv. Predstavljen je termički tretman u cilju transformacije nodularnog liva u ADI materijal, vrlo pogodan način za poboljšanje mehaničkih osobina, a ujedno i za povećanje otpornosti na kavitaciju. U ovom poglavlju je dat i cilj tehničkog rešenja kao osnovu za dalji rad.

Detaljan opis tehničkog rešenja detaljno opisuje tehnološki postupak izrade ADI materijala, počev od polaznog materijala, preko postupka termičkog tretmana, sve do rezultujućih mehaničkih i metalografskih svojstava analiziranih ADI materijala, legiranih sa Cu i Cu i Ni. Prikazan je postupak kavitacionog ispitivanja sa svim neophodnim parametrima ispitivanja. Prikazan je tok kavitacionog

ispitivanja, praćenog sa mikrofotografijama površine uzorka i merenjem gubitka mase. Takođe, izvršena su metalografska ispitivanja nakon kraja kavitacionog ispitivanja i identifikovane su promene mikrostrukture kao rezultat kavitacije.

U poglavlju **Suština tehničkog rešenja**, koncizno, taksativno je prikazan polazni materijal, njegov hemijski sastav, mikrostruktura, morfologija grafita, mehaničke osobine, parametri termičkog tretmana, mehaničke osobine dobijenog ADI materijala i otpornost na kavitaciju izražena kao gubitak mase. Ovo tehničko rešenje pokazuje da najveću otpornost na kavitaciju ima ADI materijal legiran sa Cu i Ni.

Način industrijske ili druge primene tehničkog rešenja objašnjava uslove koji se zahtevaju za uvođenje tehničkog rešenja u proizvodnju.

U poglavlju **Verifikacija rezultata**, data je naučna potvrda kroz objavljivanje naučnog rada u međunarodnom časopisu sa impakt faktorom kategorije M23.

Literatura obuhvata naučne radove i knjige koje su korišćene u teoretskom delu, za potvrdu polaznih pretpostavki u vezi opravdanosti tehničkog rešenja i osnovnih teoretskih podloga.

ZAKLJUČAK

Tehničko rešenje pod naslovom "Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju" omogućava značajno poboljšanje i unapređenje postupka izrade ADI materijala namenjenih za primenu u hidrauličnim uređajima, što predstavlja značajan udeo primene ovih materijala u praksi.

Na osnovu izloženog, sa zadovoljstvom predlažem da Nastavno-naučno veće Departmana za proizvodno mašinstvo i Nastavno naučnom veće Fakulteta Tehničkih nauka u Novom Sadu, ovo tehničko rešenje prihvati i svrsta ga u kategoriju M85 – Novo tehničko rešenje koje nije komercijalizovano.

U Novom Sadu, 23. 01. 2019.

Recenzent

Dr Branka Pilić, redovni profesor
Tehnološki fakultet, Novi Sad

Odlukom nastavno-naučnog veća Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, na 59. redovnoj sednici od 27.06.2018. godine, tačka 13.1 (Verifikacija novih tehničkih rešenja i imenovanje recenzenata) doneto je rešenje o imenovanju Dr Branke Pilić, redovni profesor, Tehnološki fakultet Novi Sad i Dr Branka Škorića, redovni profesor, FTN Novi Sad, za recenzente tehničkog rešenja: „**Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju**“ autora: **Olivera Erić Cekić, Sebastian Baloš, Dragan Rajnović, Leposava Šidanin, Petar Janjatović, Miroslav Dramićanin, Marina Dojčinović.**

Na osnovu odluke NNV Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu i uvida u predlog tehničkog rešenja podnosi se sledeća:

RECENZIJA

Tehničkog rešenja „**Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju**“ autora: **Olivera Erić Cekić, Sebastian Baloš, Dragan Rajnović, Leposava Šidanin, Petar Janjatović, Miroslav Dramićanin, Marina Dojčinović.**

Tehničko rešenje je izrađeno na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, 2018. godine, u sklopu projekta „Projektovanje, razvoj i primena nove generacije ADI materijala“ TR34015.

Tehničko rešenje je dato na 14 strana, ima 9 slika, 6 tabela, i 12 literaturnih podataka.

Opis tehničkog rešenja je dat kroz poglavlja: 1. Oblast tehnike na koju se tehničko rešenje odnosi; 2. Uvod; 3. Tehnički problem; 4. Stanje rešenosti tehničkog problema u svetu; 5. Detaljan opis tehničkog rešenja; 6. Suština tehničkog rešenja; 7. Način industrijske ili druge primene tehničkog rešenja; 8. Verifikacija rezultata; 9. Literatura.

Sadržaj tehničkog rešenja je prikazan u skladu sa preporukama datim u Pravilniku o postupku, načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača, broj: 24/2016, 21/2017 i 38/2017.

Autori tehničkog rešenja „Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju“ su u delu teoretskih osnova koji obuhvata sledeća poglavlja: **1. Oblast tehnike na koju se tehničko rešenje odnosi; 2. Uvod; 3. Tehnički problem; 4. Stanje rešenosti tehničkog problema u svetu;** jasno i pregledno sa teorijske i praktične strane prikazali problem na koji se odnosi dato tehničko rešenje. Problem se odnosi na zahteve savremene industrije za poboljšanje postojećih proizvoda u vidu livenih materijala, pre svega livenih gvožđa za proizvodnju kućišta rezervoara, reduktora, menjača i sl. Za takve proizvode, ključan je radni vek, koji je duži ukoliko je veća otpornost na kavitaciju. U cilju rešavanja zahteva industrije i uočenog problema, autori tehničkog rešenja su predložili primenu austemperovanog nodularnog liva (ADI – austempered ductile iron). Date su prednosti tog materijala u odnosu na nodularni liv, kovani čelik i čelični liv.

U poglavlju **5. Detaljan opis tehničkog rešenja**, na pregledan i jasan način predstavljena je procedura za izradu razmatranih tipova ADI materijala.

Prikazan je izbor odgovarajućeg hemijskog sastava polaznog materijala (nodularnog liva, legiranog sa Cu s jedne strane i Cu i Ni sa druge strane), kao i mikrostrukturne karakteristike (veličina i gustina nodula, stepen sferodizacije, zapreminski udeo grafita i udeo perlita i ferita). Pored toga, date su i mehaničke karakteristike polaznog materijala, u skladu sa standardom SRPS EN 1563.

Kako bi se utvrdila najpogodnija procedura austemperovanja, i pokazale razlike između mogućih klasa ADI materijala, autori su izabrali dva različita tretmana austemperovanja nodularnog liva, prilagođenih pojedinim tipovima nodularnog liva. Dok je temperatura austenitizacije bila ista, 900°C u trajanju od 2 sata, izotermna transformacija bila izvršena na temperaturi 350°C u trajanju od 2 sata za leguru NL Cu i 3 sata za leguru NL Cu+Ni.

U nastavku je dat postupak ispitivanja kavitacije, prikazan je uređaj sa parametrima i način kvantifikacije otpornosti na kavitaciju preko gubitka mase. Takođe, izvršena je analiza površina izloženih kavitaciji, kao i metalografska analiza, a izvršena je korelacija između dobijenih rezultata.

U poglavlju **6. Suština tehničkog rešenja**, koncizno i taksativno su dati svi neophodni podaci za dobijanje ADI materijala sa povećanom otpornšću na kavitaciju. Prikazan je hemijski sastav polaznog nodularnog liva, njegova mikrostruktura, morfologija grafita, mehaničke osobine, parametri termičkog tretmana, mehaničke osobine dobijenog ADI materijala i otpornost na kavitaciju izražena kao gubitak mase pod određenim parametrima uređaja za kavitaciju, sa istaknutom prednošću ADI materijala legiranog sa Cu i Ni.

Poglavlje **7. Verifikacija rezultata**, ponudila je naučnu potvrdu prikazanog tehničkog rešenja kroz objavljivanje naučnog rada u međunarodnom časopisu kategorije M23, koji je objavljen uz nezavisnu recenziju koju je obezbedio sam časopis.

Na osnovu svega iznetog daje se sledeće mišljenje:

MIŠLJENJE

Kavitacija predstavlja značajan problem u inženjerstvu, te je predloženo tehničko rešenje značajan korak u pogledu unapređenja izrade ADI materijala za hidraulične uređaje: rezervoare, kućišta reduktora i menjača.

Stoga, predlaže se da se tehničko rešenje pod naslovom "Postupak proizvodnje legiranih ADI materijala sa visokom otpornošću na kavitaciju" autora: Olivera Erić Cekić, Sebastian Baloš, Dragan Rajnović, Leposava Šidanin, Petar Janjatović, Miroslav Dramićanin, Marina Dojčinović., prihvati kao tehničko rešenje klase M85 - Novo tehničko rešenje koje nije komercijalizovano.

Novi Sad, 24.01.2019.



Dr Branko Škorić, redovni profesor
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad