

На основу Правилника о верификацији и валидацији техничко-технолошких решења и процедуре ИП 19 Израда и поступак верификације и валидације техничко-технолошких решења, Научно веће Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина, на седници одржаној 24.12.2012. год., донело је

## ОДЛУКУ

Да се резултат истраживачког рада „Технолошки поступак ливења алуминијумске легуре 7075 у електромагнетном пољу“, који је проистекао као резултат рада на Пројекту МПНТР

ТР34002

Назив пројекта:

**РАЗВОЈ ТЕХНОЛОШКИХ ПОСТУПАКА ЛИВЕЊА ПОД УТИЦАЈЕМ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГ ПОЉА И ТЕХНОЛОГИЈА ПЛАСТИЧНЕ ПРАДЕ У ТОПЛОМ СТАЊУ ЧЕТВОРОКОМПОНЕНТНИХ ЛЕГУРА Al Zn ЗА СПЕЦИЈАЛНЕ НАМЕНЕ**

аутора:

1. проф. др Звонка Гулишије, научног саветника, ИТНМС, Београд,
2. мр Александре Патарић, истраживача сарадника, ИТНМС, Београд,
3. мр Марије Михаиловић, истраживача сарадника, ИТНМС, Београд,
4. др Зорана Јањушевића, вишег научног сарадника, ИТНМС, Београд,
5. проф. др Милентија Стефановића, редовног професора, Фак.инж.наука Крагујевац,
6. проф. др Србислава Александровића, редов. професора, Фак.инж.наука Крагујевац,
7. др Весне Мандић, ванредног професора, Факултет инжењерских наука Крагујевац,

верификује као техничко решење према индикаторима научне компетентности (М 81) – нова технологија на међународном нивоу (уз доказ), у складу са Правилником о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача (Сл. гласник РС бр. 38/2008), а након усвајања рецензија рецензената проф. др Милана Шљивића, Машински факултет Бања Лука, Република Српска, и др Ане Костов, Институт за рударство и металургију, Бор.

Коначну одлуку о верификацији доноси надлежни Матични научни одбор МПН Р Србије.

### Доставити:

- руководиоцу Пројекта,
- ауторима,
- архиви НВ.



**ПРЕДСЕДНИК НАУЧНОГ ВЕЋА**

др Мирослав Сокић, научни сарадник

ИНСТИТУТ ЗА ТЕХНОЛОГИЈУ НУКЛЕАРНИХ  
И ДРУГИХ МИНЕРАЛНИХ СИРОВИНА са п.о.  
Број 13/9-10  
21.09. 2012 год.  
Београд  
Улица П'Етерс-а 88, пошт. факс 390

На основу члана 40 Статута Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Научно веће Института је, на седници одржаној 20.09.2012. год. донело

## О Д Л У К У

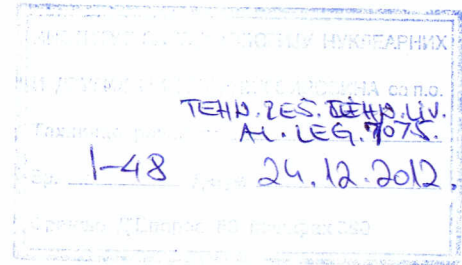
Покреће се поступак за валидацију и верификацију техничког решења под називом:

**"Технолошки поступак ливења алуминијумске легуре 7075 у електромагнетном пољу"** аутора проф. др Звонка Гулишије, научног саветника, мр Александре Патарић, истраживача сарадника, мр Марије Михаиловић, истраживача сарадника, др Зорана Јањушевића, вишег научног сарадника, проф. др Милентија Стефановића, редовног професора, проф. др Србислава Александровића, редовног професора, др Весне Мандић, ванредног професора и бирају рецензенти проф. др Милан Шљивић, редовни професор, Машински факултет Бања Лука и др Ана Костов, ИРМ Бор.



ПРЕДСЕДНИК НАУЧНОГ ВЕЋА

*Dr. Miroslav Sokić*  
Др Мирослав Сокић  
научни сарадник



## I z j a v a

Ovom izjavom potvrđujem da je tehničko rešenje kategorije M 81 – *Nova tehnologija uvedena u proizvodnju na međunarodnom nivou (uz dokaz)*, pod nazivom: „TEHNOLOŠKI POSTUPAK LIVENJA ALUMINIJUMSKE LEGURE 7075 U ELEKTROMAGNETNOM POLJU“, čiji su autori:

- prof.dr Zvonko Gulišija, naučni savetnik, ITNMS, Beograd,
- mr Aleksandra Patarić, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- mr Marija Mihailović, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- dr Zoran Janjušević, viši naučni saradnik, ITNMS, Beograd,
- prof.dr Milentije Stefanović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac,
- prof.dr Srbislav Aleksandrović, red. profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac i
- dr Vesna Mandić, vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

proisteklo kao rezultat istraživanja u okviru Projekta TR 34002 „Razvoj tehnoloških postupaka livenja pod uticajem elektromagnetnog polja i tehnologija plastične prerade u toplom stanju četvorokomponentnih legura Al-Zn za specijalne namene“, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Osvojena nova tehnološka znanja i dobijeni rezultati istraživanja tokom rada na svim planiranim aktivnostima u toku prve dve godine realizacije Projekta TR 34002, poslužila su kao tehnološka osnova za definisanje ovog tehnološkog rešenja iz kategorije M-81.

U Beogradu

20.12. 2012. godine



Rukovodilac Projekta 34002

prof.dr Zvonko Gulišija, naučni savetnik

**TEHNIČKO RAZVOJNO REŠENJE****TEHNOLOŠKI POSTUPAK LIVENJA ALUMINIJUMSKE LEGURE 7075 U  
ELEKTROMAGNETNOM POLJU****M 81 –NOVA TEHNOLOGIJA****Autori:**

- prof.dr Zvonko Gulišija, naučni savetnik, ITNMS, Beograd,
- mr Aleksandra Patarić, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- mr Marija Mihailović, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- dr Zoran Janjušević, viši naučni saradnik, ITNMS, Beograd,
- prof.dr Milentije Stefanović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac,
- prof.dr Srbislav Aleksandrović, red. profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac,
- dr Vesna Mandić, vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac.

**Beograd, 2012.**

## **SADRŽAJ**

- 1. PREDMET**
- 2. FUNDAMENTALNE OSNOVE TEHNOLOŠKOG REŠENJA**
- 3. POLU-KONTINUALNI ELEKTROMAGNETNI POSTUPAK LIVENJA**
- 4. EKSPERIMENTALNI DEO**
  - 4.1 MIKROSTRUKTURNA ANALIZA**
  - 4.2 KVANTITATIVNA ANALIZA**
  - 4.3 MEHANIČKA KARAKTERIZACIJA**
    - 4.3.1 ISPITIVANJE ZATEZANJEM**
    - 4.3.2 ISPITIVANJE TVRDOĆE**
- 5. ZAKLJUČAK**

## **1. PREDMET**

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina (ITNMS), Beograd je kao rezultat istraživanja grupe istraživača u okviru projekata br. 34002, čiju realizaciju finansira Ministarstvo za prosvetu i nauku Republike Srbije, razvio novu tehnologiju livenja do koncepcije tehničko- tehnološkog rešenja :

„Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju“

Osnov za izradu ovog Tehničkog rešenja je Pravilnik o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača i Procedura IP19 – Izrada i postupak verifikacije i validacije tehničkih rešenja u Institutu za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina koja nastaju kao rezultat realizacije projekata finansiranih od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

## **2. FUNDAMENTALNE OSNOVE TEHNOLOŠKOG REŠENJA**

Sve viši zahtevi koje industrija i druge grane tehnike postavljaju pred materijale (pa prema tome i proizvode metalurške industrije) rešavaju se uglavnom na dva načina. Prvi od njih su istraživanja u cilju pronalaženja novih materijala (na primer kompozita), a drugi je vezan za poboljšanje strukture i osobina već poznatih materijala. Budući da se sastav, građa i osobine materijala mogu menjati u određenim granicama pod dejstvom termičkih, hemijskih, mehaničkih i elektromagnetnih uticaja, jasno je da karakter delovanja temperature, hemijskih i termohemijskih načina obrade materijala, delovanja pritiska i elektromagnetnog polja uživa posebnu pažnju istraživača. U ovom tehničkom rešenju pažnja je posvećena primeni elektromagnetnog polja koje daje pozitivan uticaj na odvijanje metalurških procesa. Može se reći da je primena elektromagnetnog polja u metalurškim procesima kao prvi problem istakla energetska efikasnost, a da rešenje ovog problema uglavnom vodi do poboljšanja postojećih ili novih tehnoloških postupaka. Poznata su svetska iskustva primene elektromagnetnog polja u proizvodnji čelika, dok za aluminijum postoji malo podataka o tome.

U okviru višegodišnjih zajedničkih istraživanja saradnika ITNMS-a iz Beograda i Fakulteta inženjerskih nauka iz Kragujevca proistekao je nov tehnološki postupak proizvodnje aluminijumske legure EN AW 7075 koji je primenjen u industrijskim uslovima. Cilj je bio da se u ranoj fazi proizvodnje ove legure, dobiju odlivci što boljeg kvaliteta kako bi se skratila ili eliminisala sledeća faza (homogenizaciono zarenje) proizvodnog procesa.

Eksperimentalna istraživanja koja su dovela do ovog tehničkog rešenja podeljena su na dve faze: polu-kontinualni elektromagnetni postupak livenja i mikrostrukturna i mehanička karakterizacija uzoraka.

### 3. POLU-KONTINUALNI ELEKTROMAGNETNI POSTUPAK LIVENJA

Proizvodnja i prerada legure EN AW 7075 je dugotrajna i skupa, jer se sastoji od niza tehnoloških operacija. U te operacije spadaju modifikacija, polu-konti ili konti livenje, homogenizacija, presovanje, plastična prerada i termička obrada. Najčešće korišćeni modifikatori za usitnjavanje zrna kod aluminijumskih legura su: natrijum, fosfor, titan i bor. Poznato je da i male količine modifikatora (npr 0,05%Ti) dovode do formiranja sitnozrne mikrostrukture.

Konvencionalnim postupcima livenja u kokile, usled neravnotežnih uslova očvršćavanja, dolazi do izdvajanja segregacija po granicama zrna. Proizvodnju ove legure prate još i nedostaci tipa poroznosti, toplih pukotina i neujednačenosti u veličini zrna. Ove metalurške greške utiču na pogoršanje mehaničkih svojstava, pre svega čvrstoće i žilavosti. U cilju rešavanja ovog problema u svetu su primenjivane razne metode: metalurgija praha, ultrazvuk i mehaničke vibracije tokom očvršćavanja. Na žalost postupci su dosta komplikovani skupi ili nedovoljno efektni. Iskustva ovog istraživačkog tima su pokazala da je mnogo jednostavniji i efikasniji postupak kontinualnog livenja pod dejstvom elektromagnetnog polja. U svetu je ova ideja prisutna već neko vreme ali nije ozbiljnije razmatrana i u potpunosti primenjena.

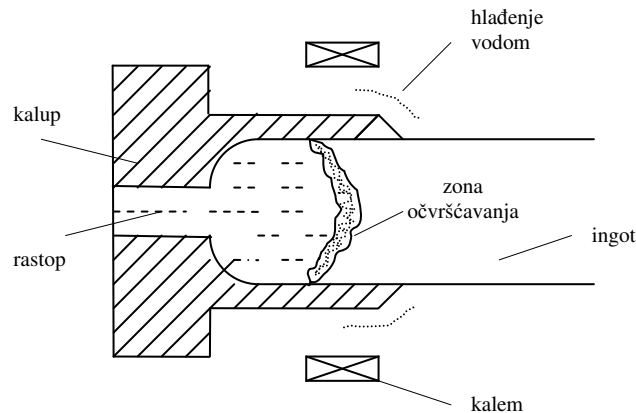
Homogenizacija nalazi široku primenu u termičkoj obradi tehničkih legura aluminijuma za deformaciju. Ingoti sa nehomogenom termodinamički nestabilnom strukturom izlažu se difuzionom žarenju (470-480°C, od 12-16<sup>h</sup>) u cilju postizanja homogenije strukture i dobijanja boljih mehaničkih svojstava.

Presovanje (ekstruzija) je nezaobilazna operacija u tehnološkom postupku prerade 7075 Al legure jer industrijski dobijeni ingoti imaju u prečniku i do 200mm, što nije ulazna veličina za naredni proces plastične prerade, već prečnik treba redukovati 3-4 puta.

Vrlo često se dešava da ingoti odliveni klasičnim polu-konti livenjem nemaju zadovoljavajući kvalitet površine pa se mora primeniti i dodatna mehanička obrada.

Zbog dugotrajnog i ni malo jednostavnog tehnološkog postupka proizvodnje i prerade legure EN AW 7075, javila se potreba za usavršavanjem postojećeg ili osvajanjem novog postupka kontinualnog livenja kako bi se metalurške greške u ingotima još u livenom stanju svele na minimum.

Klasičan polu-konti postupak livenja zasniva se na principu ulivanja istopljenog metala u kristalizator, a očvršli odlivak se izvlači iz kristalizatora konstantnom brzinom. Odliveni komad se posle izlaska iz kristalizatora odseca na potrebnu dužinu. Ovim postupkom livenjem dobijaju se odlivci usled postepene kristalizacije ulivenog materijala u kristalizator, a zatim naglog povećanja brzine hlađenja što predstavlja osnovni faktor za poboljšanje svojstva odlivaka. Po analognom principu je zasnovan elektromagnetni polu-konti postupak livenja kod koga se dodatno oko kristalizatora postavlja elektromagnetno polje. Ovaj postupak je pogodan za livenje aluminijuma i bakra kao i njihovih legura. Primena elektromagnetnog mešanja pri očvršćavanju metalnog rastopa je racionalna pre svega pri polu-konti livenju zbog tehničko-tehnoloških prednosti ovog postupka (mogućnost produženog delovanja elektromagnetnog polja u odnosu na očvršćavanje u kokili). Šematski izgled elektromagnetnog polu-konti postupka livenja dat je na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz elektromagnetnog polu-konti postupka livenja

#### 4. EKSPERIMENTALNI DEO

Za eksperiment je korišćena indukciona peć IP 100, kapaciteta do 100 kg. Na dnu peći nalazi se ispušnik sa grafitnim kristalizatorom koji se intenzivno hladi vodom protoka od 3.6 m<sup>3</sup>/h. Temperatura livenja je 710-720°C, a oko samog kristalizatora je postavljeno nisko frekventno elektromagnetno polje. Izvlačenje trupaca vrši se impulsivno sa prosečnom brzinom livenja od oko 1,5 mm/s. Uzorci su kružnog poprečnog preseka Ø90mm. Radni parametri pod kojima su uzorci odliveni su strogo kontrolisani i definisani su različitim vrednostima jačine struje (A), frekvencije (Hz), i jačine elektromagnetnog polja izraženu kroz veličinu amper navojaka (At-amper turns). Ovi parametri su u međusobnoj zavisnosti koja je data sledećom relacijom:

$$T = N \cdot I \quad (1)$$

Gde je:

I-jačina struje (A)

N-broj namotaja u kalem

T-jačina elektromagnetnog polja izražena u amper navojcima (At).

Prilikom livenja u prisustvu elektromagnetnog polja naizmenična struja generiše vremenski promenljivo magnetno polje u istopljenoj masi što opet povećava indukovanu struju u istopljenoj masi i ingotu. Stoga je istopljena masa podvrgnuta elektromagnetnim silama koje su prouzrokovane interakcijom indukovane struje i magnetnog polja. Gustina Lorencove sile pritisutne u sistemu, sastoji se iz dva dela izražena na sledeći način:

$$F = J \times B = -\nabla\left(\frac{1}{2}\mu B^2\right) + \frac{1}{\mu}(B \cdot \nabla)B \quad (2)$$



Gde je:

$B$ -intezitet magnetne indukcije

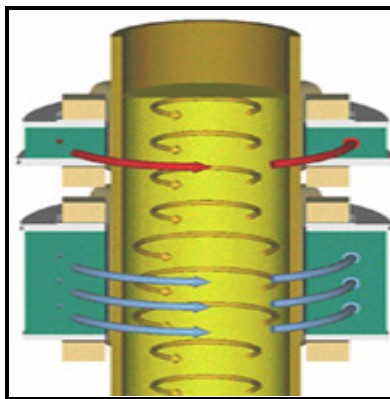
$J$ -gustina struje generisana u istopljenoj masi

$\mu$ -permeabilnost istopljene mase

$\nabla$ -nabla ili Hamiltonov operator

Prvi član desne strane jednačine (2) je obrnuta komponenta što ima za rezultat prinudnu konvekciju i protok u istopljenoj masi. Drugi član su potencijalne sile uravnotežene sa statičkim pritiskom istopljene mase što ima za rezultat formiranje konveksne površine i smanjenje kontaktnog pritiska između kalupa i metala te izostaju periferna zona metala nehomogene strukture kao i defekti na površini ingota.

Na slici 2 dat je poprečni presek elektromagnetnog mešača i metalnog rastopa u kome je izazvano mešanje. Efikasno mešanje rastopa aluminijuma jedan je od odlučujućih faktora za ubrzanje kinetike reakcija, kao i za poboljšanje prenosa toplote i mase, koji su suštinski parametri za povećanje produktivnosti, sa istim ili čak poboljšanim kvalitetom.



Slika 2. Elektromagnetno mešanje rastopa

Generalno govoreći najvažnija karakteristika indukcionog mešanja je da može da se izvede u celoj zapremini metalnog kupatila, pri čemu se zadržava kompaktnost sloja troske koji štiti rastop od delovanja atmosfere. Elektromagnetno polje od mešača prodire kroz plašt lonca i vatrostalni ozid, bez nepotrebne intrerferencije sa ozidom. Može da se koristi od prve šarže i jednostavno je za upravljanje.

Legura EN AW 7075 je jedna od najpoznatijih legura namenjena kovanju i ima veoma raznovrsnu i široku primenu u skoro svim granama industrije. Ima veliku primenu u avio i vojnoj industriji. Odlikuje se izuzetnim mehaničkim osobinama uz malu specifičnu masu i spada u grupu termički obradivih legura. Međutim, za nju su karakteristični brojni nedostaci koji nastaju u toku procesa očvršćavanja: poroznost, tople pukotine, neujednačena veličina zrna i kristalna segregacija. U cilju eliminacije metalurških grešaka u odlivcima u livenom stanju, kao preduslova za dobijanje finalnih proizvoda visokog kvaliteta i racionalizacije potrošnje energije, postoji potreba za usavršavanjem kontinualnog postupka livenja ove legure, što je u ovom tehničkom rešenju postignuto primenom elektromagnetnog polja tokom očvršćavanja.

Hemijski sastav legure EN AW 7075 dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav legure EN AW 7075

Element	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe
Sadržaj %	5.51	2.29	1.45	0.13	0.19	0.14

#### 4.1 MIKROSTRUKTURNA KARAKTEIZACIJA

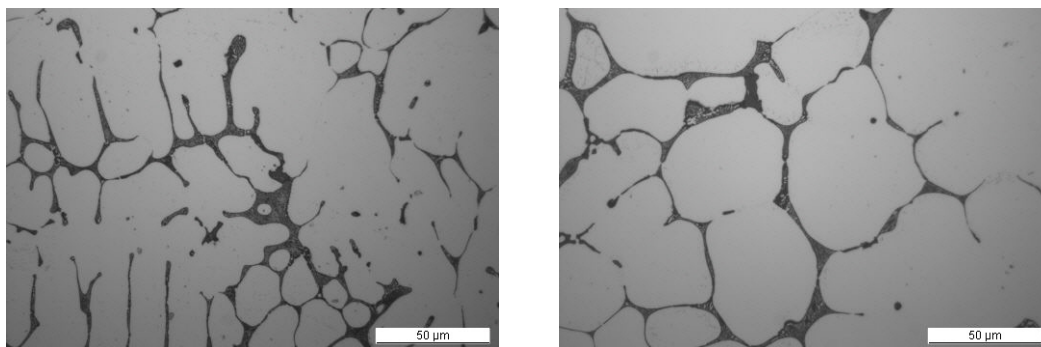
Uzorci na kojima su vršena ispitivanja dobijeni su klasičnim polu-konti livenjem bez elektromagnetnog polja (uzorak 1) i livenjem uzorka u prisustvu elektromagnetnog polja sa frekvencom od 30 Hz i jačinom polja od 200A (uzorak 2). Naša predhodna istraživanja pokazala su da je frekvencija od 30 Hz optimalna prilikom livenja ove legure. Uzorak 1 služio je kao etalon da bi mogao da se prati uticaj elektromagnetnog polja.

Metodom optičke mikroskopije urađena je mikrostrukturalna karakterizacija na uzorcima 1 i 2. Mikrostrukturalna je ispitivana na poprečnom preseku uzoraka nakon uobičajene metalografske pripreme:

- brušenja i poliranja (polirano stanje) radi određivanja poroznosti
- brušenja, poliranja i nagrizanja u Kelerovom reagensu radi određivanja morfologije izdvajanja Al- čvrstog rastvora i intermetalnih faza-IMF, i
- anodne oksidacije uzoraka sa Barkerovim reagensom sa ciljem da se odredi veličina i oblik zrna kao i prisustvo dendritne segregacije.

Za kvantitativnu mikrostrukturalnu analizu korišćen je uređaj za analizu slike Leica Q 500. Linijskom metodom merenja odsečaka koje prave testne linije sa granicama faza, izmerena je širina sekundarnih dendritnih grana (ćelija), DAS, i širina međudendritnog prostora,  $L_{IMF}$ , u kome su izlučene intermetalne faze i eutektikum, kao i njihov količinski udeo,  $V_{V IMF}$  za uzorak 1 u livenom stanju i uzorak 2 odliven pod dejstvom elektromagnetnog polja. Ovi parametri su mera disperznosti strukture i direktno utiču na mehaničke osobine legure, a posledica su uslova očvršćavanja.

Na slici 3 (a i b) prikazan je karakterističan izgled mikrostrukture po preseku uzoraka (1, 2) dobijenih pod različitim uslovima livenja.



(a) uzorak 1

(b) uzorak 2

Slika 3. Mikrostrukturalna analiza po preseku uzoraka, Kelerov reagens; 100x

Očigledno je da se radi o dendritno-ćelijskoj morfologiji izdvajanja Al čvrstog rastvora. Pri tome kod uzorka 1 koji je odliven bez prisustva elektromagnetnog polja

(slika 3, a) dominira dendritna struktura u odnosu na uzorak 2 (slika 3, b) kod koga su više izražene ćelije, a odliven je pod dejstvom elektromagnetnog polja. Struktura uzorka 2 je finija i ujednačenija u poređenju sa uzorkom 1. Sa slika se može videti da su izlučene intermetalne faze, IMF, u vidu eutektikuma ili pojedinačno po granicama dendritnih ćelija i zrna. Uvođenjem elektromagnetnog polja (uzorak 2) izlučene intermetalne faze postaju sve finije i raspoređuju se u sve užem međudendritnom prostoru.

#### 4.2 KVANTITATIVNA ANALIZA

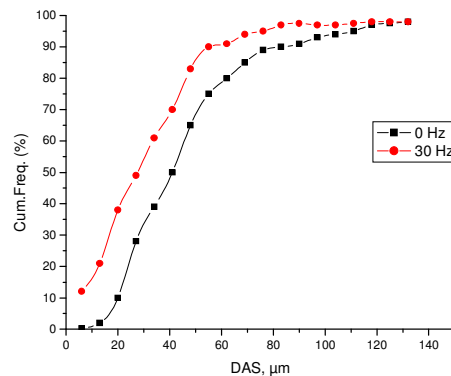
Rezultati merenja geometrijskih parametara mikrostrukture DAS,  $L_{IMF}$  i  $V_V$  dati su u tabeli 2.

Tabela 2. Izmerene vrednosti strukturnih parametara uzoraka u livenom stanju

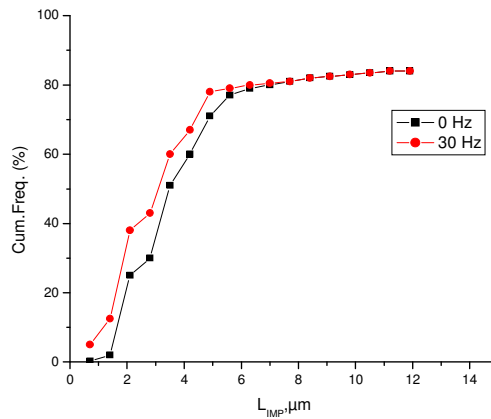
Parameter	DAS ( $\mu\text{m}$ )				$L_{IMF}$ ( $\mu\text{m}$ )				$V_{VIMP}$	
	min	max	av <sup>a</sup>	$\pm\sigma$ (%)	min	max	av <sup>a</sup>	$\pm\sigma$ (%)	$V_{VIMP}$ (%)	$\pm\sigma$ (%)
1	7.95	268.4	45.8	3,54	0.76	12.10	3.40	4,10	5.80	0,7
2	0.85	172.5	31.8	4,12	0.38	26.40	2.90	3,98	9.10	0,8

<sup>a</sup>av –srednja vrednost izračunata za ceo interval izmerenih vrednosti

Iz tabele 2 može se konstatovati da uzorak 1 koji je odliven bez dejstva elektromagnetnog polja ima najveće vrednosti parametra DAS i  $L_{IMF}$ . Primenom elektromagnetnog polja sa frekvencom od 30 Hz (uzorak 2) dolazi do pada vrednosti parametara DAS i  $L_{IMF}$ . Istovremeno sa padom vrednosti parametara DAS i  $L_{IMF}$  od uzorka 1 do uzorka 2, raste udeo intermetalne faze  $V_V$  IMF. Navedena promena vrednosti parametara DAS i  $L_{IMF}$  potvrđena je i analizom kumulativnih krivi (slika 4) čijom analizom se može zaključiti da je mnogo veći uticaj elektromagnetnog polja na DAS nego na  $L_{IMF}$ , odnosno brzina hlađenja utiče više na promenu vrednosti parametra DAS nego na promenu vrednosti parametra  $L_{IMF}$ .



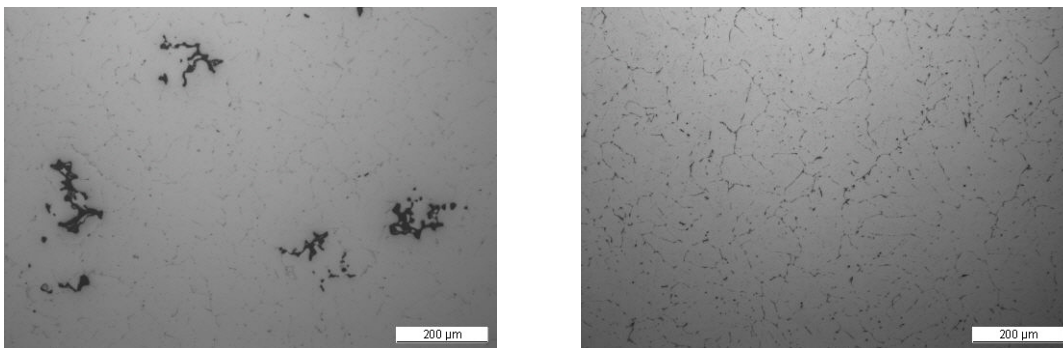
(a)



(b)

Slika 4. Kumulativne krive raspodele parametra DAS (a) i  $L_{IMF}$  (b) u funkciji radnih parametara elektromagnetnog polja

Na slici 5 prikazana je poroznost za uzorke 1 i 2



(a)

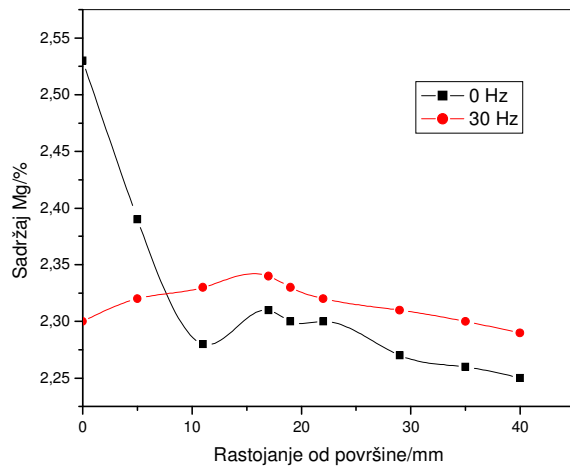
(b)

Slika 5. Poroznost uzoraka u livenom stanju (a-uz 1, b-uz 2)

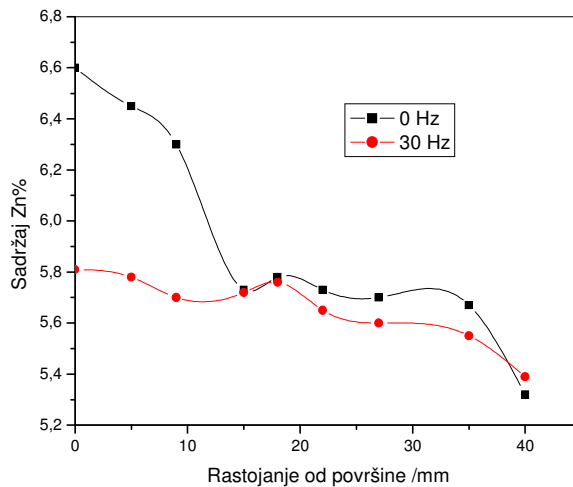
Mikrostrukturna analiza pokazala je da se u uzorku 1 koji je odliven na klasičan način bez elektromagnetnog polja javlja poroznost interdendritnog tipa. Uvođenjem elektromagnetnog polja čija frekvenca iznosi 30 Hz količinski udeo pora i veličina pora se smanjuju, uzorak 2.

Poznato je da se usled neravnotežnih uslova očvršćavanja, kod klasičnog polukontinuiranog livenja, javlja nehomogenost u pogledu sadržaja legirajućih elemenata po poprečnom preseku odlivka.

Promena sadržaja osnovnih legirajućih elemenata cinka i magnezijuma po poprečnom preseku praćena je hemijskom analizom, kod uzorka 1 koji je odliven bez polja i kod uzorka 2, koji je odliven sa elektromagnetnim poljem. Na slici 6 prikazana je raspodela legirajućih elemenata Zn i Mg po poprečnom preseku uzoraka.



(a)



(b)

Slika 6. Sadržaj legirajućih elemenata Mg (a) i Zn (b) po poprečnom preseku uzoraka odlivenih pod različitim uslovima

Sa slike 6 se vidi da kod odlivaka koji su odliveni klasičnim polu-konti livenjem postoji velika razlika u sadržaju legirajućih elemenata na površini i u centru uzoraka. Razlog za ovo su neravnotežni uslovi očvršćavanja i prisustvo kontakta između metala i kalupa. Sa druge strane uzorci koji su odliveni pod dejstvom elektromagnetnog polja imaju mnogo ujednačeniji sadržaj legirajućih elemenata duž poprečnog preseka uzoraka. Prilikom livenja u elektromagnetnom polju usled mešanja stvaraju se ravnomerniji uslovi očvršćavanja, pothlađenje je znatno manje jer je i sam kontak između kalupa i metala smanjen kao rezultat delovanja potencijalne sile (koja je horizontalna komponenta razložene Lorentzove sile). Na ovaj način se smanjuje nehomogenost legirajućih elemenata kod odlivaka.

### 4.3 MEHANIČKA KARAKTERIZACIJA

Mehanička karakterizacija obuhvatila je određivanje osnovnih mehaničkih svojstava na uzorcima koji su dobijeni pod različitim uslovima livenja bez i sa elektromagnetnim poljem. U okviru ove analize korišćena je metoda određivanja tvrdoće (po Brinelu) i ispitivanje zatezanjem.

#### 4.3.1 Ispitivanje zatezanjem

Mehanička svojstva zatezna čvrstoća, tehnička granica tečenja, modul elastičnosti i izduženje pri razaranju su određena ispitivanjem zatezanjem. Ispitivanje je rađeno na mernom sistemu Zwick/Roell Z 100 koji je povezan sa računarom radi softverske obrade podataka (slika 7).



Slika 7. Kompjuterizovani merni sistem Zwick/Roell Z 100

Epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava izrađene su po standardu SRPS EN ISO 7500-1:2012

#### 4.3.2. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća ispitivanih uzoraka određena je Brinelovom metodom, korišćena je kuglica od čelika prečnika 5mm i sila utiskivanja 250 kp održana u toku 30 s, HB 5/250/30''.

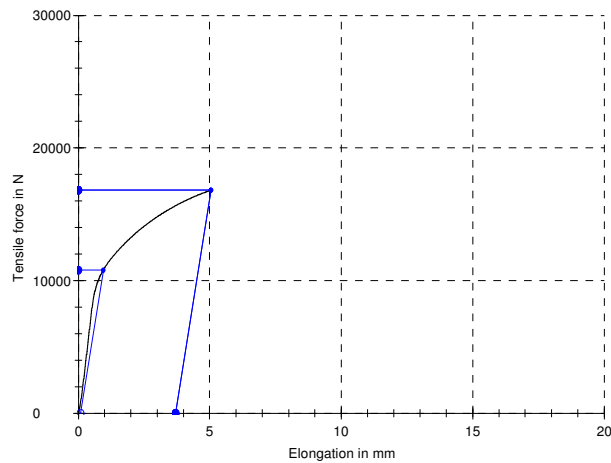
Vrednosti izmerenih tvrdoća su sledeće.

- |   |           |
|---|-----------|
| -Uzorak 1 koji je odliven klasičnim polu-konti livenjem       | 107,5 HB  |
| -Uzorak 2 koji je odliven pod dejstvom elektromagnetnog polja | 163,67 HB |

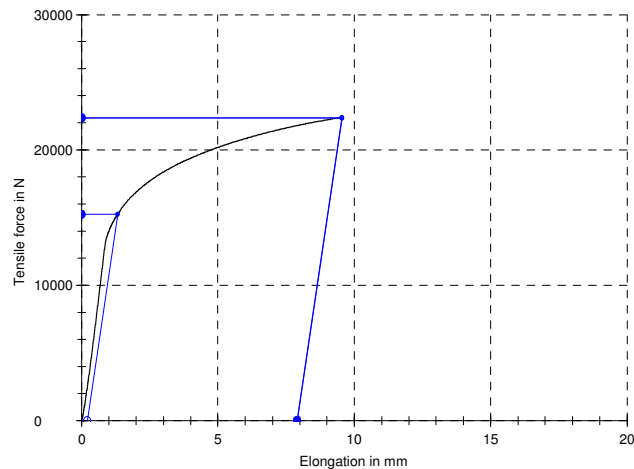
Rezultati mehaničkih ispitivanja (tvrdoća HB, zatezna čvrstoća Rm, tehnička granica tečenja  $R_{p0.2}$  i izduženje pri kidanju A) za uzorke 1 i 2 dati su u tabeli 3, a na slici 8 prikazane su odgovarajuće krive zatezanja.

Tabela 3. Mehanička svojstva uzoraka odlivenih pod različitim uslovima

Uzorak	HB (5/250/30")	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Rp 0.2 (N/mm <sup>2</sup> )	Ag %	A (%)
1	163,67	470,01	311,96	8,847	8,93
2	107,50	362,02	251,53	3,817	3,82



(a)



(b)

Slika 8. Krive zatezanja za uzorak 1 (a) i 2 (b)

Analiza dobijenih rezultata pokazuje da uzorak 2 koji je odliven elektromagnetnim polu-konti postupkom livenja ima veće vrednosti tvrdoće, kao i zatezne čvrstoće, granice tečenja i izduženja pri razaranju u odnosu na uzorak 1 koji je odliven klasičnim polu-konti postupkom livenja. Objašnjenje za ove rezultate treba tražiti u dobijenoj mikrostrukturi uzoraka. S obzirom da mikrostrukturni parametri direktno utiču na mehanička svojstva legure, sasvim je jasno zašto uzorak 2 ima bolja mehanička svojstva u odnosu na uzorak 1. Primenom elektromagnetnog polja odgovarajuće frekvence od 30 Hz dolazi do pada vrednosti mikrostrukturnih parametara  $DAS$  i  $L_{IMF}$ . Elektromagnetno polje niske frekvence (30Hz), je nedvosmisleno uticalo na dobijanje sitnije, uniformnije strukture sa redukovanom pojavom interdendritne poroznosti i dendritne segregacije. Uzorak 2 odlikuju se ovakvom mikrostrukturom pa samim tim i boljim mehaničkim svojstvima u odnosu na uzorak 1.

## 5. ZAKLJUČAK

Poboljšanje tehnološkog postupka proizvodnje aluminijumske legure EN AW 7075, sadrži sve elemente naprednih tehnologija što dovodi do podizanja kvaliteta ingota u ranoj fazi proizvodnog procesa i smanjenja troškova proizvodnje.

Realizacijom ovog tehničkog rešenja stvaraju se uslovi za skraćenje dugotrajnog procesa proizvodnje aluminijumske EN AW 7075 legure. Moguće je još u livenom stanju dobiti zadovoljavajuće mikrostrukturne parametre, a samim tim i mehanička svojstva. Kvalitet dobijene površine odlivka eliminiše potrebu za mašinskom obradom. Na taj način stvaraju se uslovi za skraćenje vremena homogenizacije, kao i za izostavljenje tehnološke faze predpresovanja, koja je neophodna u tehnološkom postupku prerade legura koje dalje preraduju postupkom kovanja.

Novim tehnološkim postupkom ostvaruju se značajni komercijalni efekti istovremenim postizanjem visokog kvaliteta.





**ITNMS**

*INSTITUTE FOR TECHNOLOGY OF NUCLEAR AND OTHER MINERAL RAW MATERIALS*

**DEVELOPED TECHNICAL SOLUTION**

**TECHNOLOGY FOR ALUMINIUM ALLOY 7075 CASTING IN THE  
ELECTROMAGNETIC FIELD**

**M 81 –NEW TECHNOLOGY**

**(IMPLEMENTED AT INTERNATIONAL LEVEL)**

**Authors:**

- Zvonko Gulišija, Ph.D., professor, ITNMS, Belgrade,
- Aleksandra Patarić, M.Sc., ITNMS, Belgrade,
- Marija Mihailović, M.Sc., ITNMS, Belgrade,
- Zoran Janjušević, Ph.D., ITNMS, Belgrade,
- Milentije Stefanović, Ph.D., professor, Faculty of Engineering University of Kragujevac,
- Srbislav Aleksandrović, Ph.D., prof., Faculty of Engineering University of Kragujevac,
- Vesna Mandić, Ph.D., Faculty of Engineering University of Kragujevac

**Belgrade, 2012.**



## **CONTENTS**

- 1. SUBJECT**
- 2. FUNDAMENTALS OF TECHNICAL SOLUTION**
- 3. SEMI-CUNTIINOUS CASTING IN ELECTRONAGNETIC FIELD**
- 4. EXPERIMENTAL**
  - 4.1 MICROSTRUCTURE ANALYSIS**
  - 4.2 QUANTITATIVE ANALYSIS**
  - 4.3 MECHANICAL CHARACTERIZATION**
    - 4.3.1 TENSILE TESTS**
    - 4.3.2 HARDNESS TESTS**
- 5. CONCLUSION**

## **1. SUBJECT**

Institute for technology of nuclear and other mineral raw materials (ITNMS), Belgrade, as a result of extensive research of above stated authors, through the project TR 34002, financed by the Ministry of Education, Science and New Technologies of the Republic of Serbia, has developed the New Technology, named:

“Technology for Aluminium Alloy 7075 Casting in the Electromagnetic Field“

This technical solution was done according to the Rules on methods and ways of validating and quantitative declaration of the results of scientific investigations and Procedures PI 19 – Developing and verification of technical solutions at the Institute for Technology of Nuclear and other Mineral Raw Materials in the projects financed by the Ministry of Education, Science and New Technologies of the Republic of Serbia.

## **2. FUNDAMENTALS OF TECHNICAL SOLUTION**

Increasingly high demands of industry and engineering towards the materials (as well as products of metallurgical industry) are being solved mainly in two ways. The first encompass studies in order to find new materials (such as composites), while the second is related to the improvement of the structure and properties of already known materials. Since the composition, structure and properties of materials can be changed to some extent under the influence of thermal, chemical, mechanical and electromagnetic interference, it is clear that the influence of temperature, chemical and thermochemical processing of materials, as well as of pressure and electromagnetic field enjoys special attention of researchers. In this technical solution attention is paid to the application of electromagnetic fields that have a positive impact on the progress of metallurgical processes. It can be said that the use of electromagnetic fields in metallurgical processes as first pointed out the problem of energy efficiency, and that the solution to this problem generally leads to an enhancement of existing or new technologies. The experiences of electromagnetic field application in the production of steel are known, but for aluminum casting in the presence of electromagnetic field, there is a very few information.

Within several years of joint research the researchers from ITNMS, Belgrade and Faculty of Engineering from Kragujevac, a new technological process of aluminum alloy EN AW 7075 production emerged, which has been applied in industrial facilities in abroad – Factory 11 Mart, Srebrenica, Bosnia and Herzegovina. The aim was to obtain in the early stage of production the best possible castings quality, in order to reduce or eliminate the next phase (homogenization annealing) manufacturing process.

Experimental investigation that led to the technical solution is divided into two phases: electromagnetic semi-continuous casting and microstructural and mechanical characterization of samples.

### 3. SEMI-CONTINUOUS CASTING IN ELECTROMAGNETIC FIELD

Production and processing of alloy EN AW 7075 is long-lasting and expensive, because it consists of a series of technological operations. These operations are modification, semi-continuous or continuous casting, homogenization, pre-pressing, plastic processing and heat treatment. The most commonly used modifiers for grain refinement of aluminum alloys are: sodium, phosphorus, titanium and boron. It is known that the small amounts of modifiers (eg, 0.05% Ti) leads to the formation of fine-grained microstructure.

During the conventional casting methods into molds, due to non-equilibrium solidification conditions, the segregation at grain boundaries occurs. Production of this alloy is accompanied by a number of defects that occur during the solidification process such as porosity, hot cracking and unevenness in grain size. These metallurgical defects affect the deterioration of mechanical properties, particularly strength and toughness. In order to solve this problem some different methods have been applied: powder metallurgy, mechanical vibration and ultrasound influence during solidification process. Unfortunately, these procedures are complicated and expensive, or insufficiently effective. This research group experiences have shown that the continuous casting process under the influence of electromagnetic field is much simpler and more efficient. This idea has been present in research worldwide for some time, but it had not been seriously considered and fully implemented.

Homogenization is widely used in the heat treatment of aluminum alloys for technical deformation. Ingots with inhomogeneities are thermodynamically unstable structures are subjected to diffusion annealing (470-480° C for 12-16h) in order to achieve more uniform structure and to obtain better mechanical properties.

Pressing (extrusion) is an inevitable operation in technological procedure of 7075 aluminum alloy ingots, because ingots obtained in industrial scale has diameter up to 200mm, which is not requested input to the next process of plastic forming. It has to be reduced 3-4 times in diameter before the forging phase.

It is almost usual that ingots casted by classic semi-continuous process do not have suitable surface quality and further mechanical processing must be applied.

Due to a long lasting and even complicated technological process of production and processing of alloy EN AW 7075, a need aroused for improvement of existing and development a new continuous casting process so as to metallurgical errors in ingots can be reduced to a minimum.

Classic semi-continuous casting process is based on the principle of pouring molten metal in the crystallizer; a hardened casting is pulled out of the mold at a constant speed. This procedure is obtained by casting castings due to the gradual crystallization of poured material in crystallizer, and then a sudden increase in cooling rate, which is the main factor for improving the properties of castings. The electromagnetic semi-continuous casting process is based on analogous principle, in which the mold is placed around an additional electromagnetic field. This procedure is suitable for casting aluminum and copper and its alloys. The application of electromagnetic interference during solidification of metal melt is rational primarily in semi-continuous casting because of the technological advantages of the process (the possibility of extended effects of

electromagnetic fields in relation to the cooling in the casting mould). Scheme of electromagnetic semi-continuous casting process is shown in Figure 1.

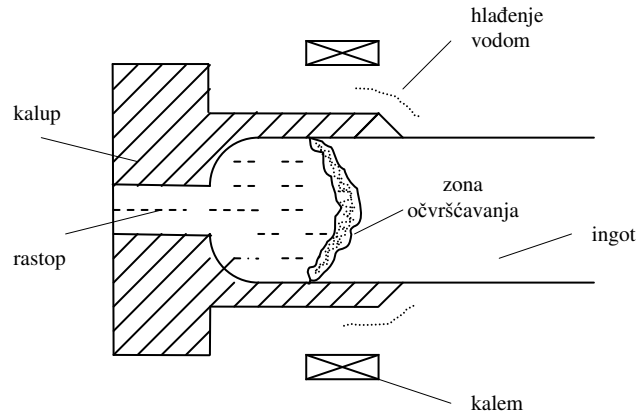


Figure 1 Scheme of electromagnetic semi-continuous casting process

#### 4. EXPERIMENTAL

The experimental equipment consists of medium frequency induction furnace IP-100 with 100 kg capacity. There is a drainpipe, at the bottom of the furnace, with graphite crystallizer that is intensively cooled with water, with the flow rate of 3.6 m<sup>3</sup>/h. The casting temperature was in the range of 710-720°C and it was controlled by a digital pyrometer. The average pulsed casting speed was 1,5 mm/s. The testing samples were taken out of ingots with a diameter of 90 mm, obtained by vertical continual casting.

Operating parameters are strictly controlled and they are defined by values of current intensity (A), frequency (Hz), and the strength of the electromagnetic field, expressed through the ampere-turns (At). These parameters are mutually depending, and their relation which is given to the following equation:

$$T = N \cdot I \quad (1)$$

Where:

I- amperage (A)

N- Number of turns in coil

T- Electromagnetic field strength, in ampere-turns (At).

During casting in the presence of electromagnetic field, the alternating current generate the time varying field in melted bulk, which in turn increases the electric current in melted bulk and ingot. Therefore, the molten mass subjected to electromagnetic forces

which are caused by the interaction of induced currents and magnetic fields. The density of the Lorentz force in the system consists of two parts expressed as follows:

$$F = J \times B = -\nabla\left(\frac{1}{2}\mu B^2\right) + \frac{1}{\mu}(B \cdot \nabla)B \quad (2)$$

Where:

B-intensity magnetic induction

J-current density generated in the molted bulk

$\mu$ -permeability molten mass

$\nabla$  -operator or Hamiltonian

The right side of equation (2) is the inverse component which results in forced convection flow and molted bulk. Another potential member of the force balanced with a static pressure of molten mass which results in the formation of a convex surface and reduces the contact pressure between the mold and the metal, and absent peripheral zone of inhomogeneous metal structures and defects on the surface of ingots.

Figure 2 presents a cross-section of the electromagnetic stirring of molten metal which is caused by interference. Efficient mixing of molten aluminum is one of the determining factors for the acceleration of reaction kinetics, as well as to improve the heat and mass transfer, the essential parameters for increased productivity, with the same or even improved quality.

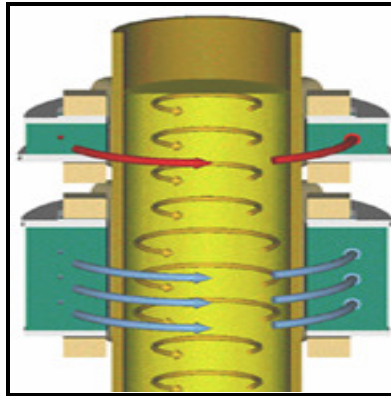


Figure 2. Electromagnetic mixing of molten metal

Generally speaking, the most important feature of induction mixing is that it can take place in the whole volume of the mtela bath, while maintaining the compact layer of molten slag that protects from the effects of the atmosphere. Electromagnetic field penetrates through the metal mantle and refractory masonry, without unnecessary intrerfering with refractories. It can be used from the first batch and is easy to manage.

The chosen alloy, EN AW 7075 is one of the most eminent forging Al alloys, heat treatable, widely used in all industries, specially in the aerospace and military industries. It is characterized by excellent mechanical properties with low specific weight It is characterized by a number of defects that occur during the solidification process: porosity, hot cracks, non-uniform grain size and crystal segregation. In order to eliminate metallurgical errors in the castings, as a prerequisite to obtain a high quality final product and to reduce energy consumption, there is a need for continuous improvement of the

casting process of this alloy, and in this technical solution it is achieved using electromagnetic field during solidification process.

The chemical composition of the alloy EN AW 7075 is given in Table 1

Tab. 1. Chemical composition of alloy EN AW 7075

Element	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe
Content %	5.51	2.29	1.45	0.13	0.19	0.14

#### 4.1 MICROSTRUCTURE ANALYSIS

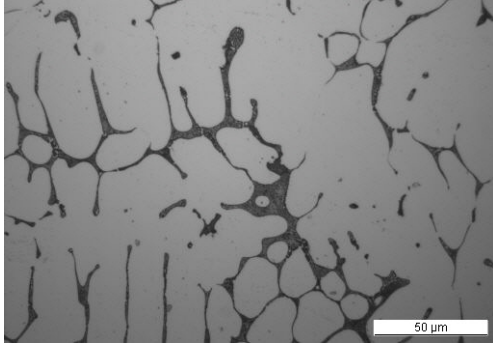
The examined samples were obtained by classic semi-continuous casting process, without the electromagnetic field effect (marked as sample 1) and of samples series 2 (marked as sample 2), obtained with the effect of electromagnetic field (EMF). The frequency of electromagnetic field was 30 Hz, because our previous experience indicated that this is the optimal frequency. The current intensity was 200 A. Sample 1 was used as a standard to be able to compare the influence of EMF.

The method of optical microscopy was used for microstructural characterization of samples 1 and 2. The microstructure was examined in a cross section of samples after standard metallographic preparation:

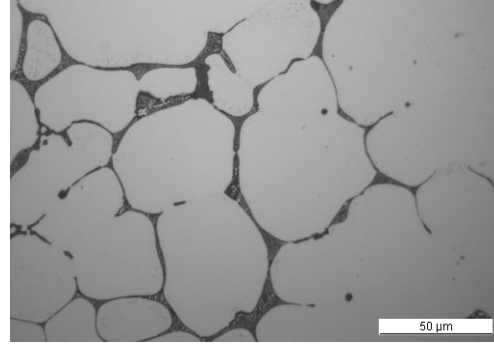
- grinding and polishing for porosity determination
- grinding, polishing and etching in Keller's reagent (revealing morphology of Al segregation-solid solution and inter-metallic phases)
- anodic oxidation of samples with Barker's reagent in order to determine the size and shape of the grains and the presence of dendritic segregation.

For the qualitative microstructure analysis, the image analysis device Leica Q500MC was used. Our studies have also included measurement of microstructural parameters: dendrite arm spacing (DAS), interdendritic space width ( $L_{IMP}$ ) where intermetallic phases and eutecticum were separated, as well as their volume fraction,  $V_{VIMP}$ . They were acquired using linear method, through the measuring of total length of the line segments belonging to each phase and calculating the amount of intersects with phase boundaries. These parameters describe the structure dispersity and they are the consequence of the solidification conditions.

Comparing the microstructure of samples series 1, obtained without the field effect (marked as sample 1) and of samples series 2 (marked as sample 2), obtained with the effect of electromagnetic field, it is obvious that the structure of sample 1 is more dendritic than the structure of sample 2, which is finer and with more emphasized cells. The characteristic microstructure appearance at the cross section of samples casted under different conditions is shown in Figure 3. As it can be seen, the cellular/dendritic morphology is the result of Al segregation from the solid solution during the solidification process. Nevertheless, the morphology of the samples casted without the electromagnetic field effect, Figure 1a, is more dendritic, in comparison with distinctive cells at Figure 1b, obtained with the electromagnetic field influence.



(a)



(b)

Fig. 3 Microstructure of sample cross section: sample 1 (a) and sample 2 (b), Keller's reagent, 500x

#### 4.2 QUANTITATIVE ANALYSIS

The results of microstructure geometrical parameters measurements, such as: DAS,  $L_{IMF}$  and  $V_V$  are given in Table 2.

Table 2 Statistical values of the measurement of structural parameters

Parameter	DAS ( $\mu\text{m}$ )				$L_{IMP}$ ( $\mu\text{m}$ )				$V_{VIMP}$	
	min	max	av <sup>a</sup>	$\pm\sigma$ (%)	min	max	av <sup>a</sup>	$\pm\sigma$ (%)	$V_{VIMP}$ (%)	$\pm\sigma$ (%)
1	7.95	268.4	45.8	3,54	0.76	12.10	3.40	4,10	5.80	0,7
2	0.85	172.5	31.8	4,12	0.38	26.40	2.90	3,98	9.10	0,8

<sup>a</sup>av – an average value calculated over the entire measurement range

From Table 2 it can be seen that both parameters, DAS and  $L_{IMP}$ , decrease from sample 1, obtained without the electromagnetic field effect, towards the sample 2, casted with the electromagnetic field of applied low frequency (30Hz), and that the decrease is a consequence of the electromagnetic field effect. There is a decrease in the values of the parameters DAS and  $L_{IMF}$  By using electromagnetic field with frequency of 30 Hz (sample 2). Simultaneously with the decline of the parameters of the DAS and  $L_{IMF}$ , from sample 1 to sample 2, the percentage of intermetallic phase  $V_{VIMF}$  grows. The above changes to the parameter values DAS and  $L_{IMF}$  was confirmed by the analysis of cumulative curve (Figure 4), analyzing which we can conclude that the much larger effect of electromagnetic field can be seen on the DAS than on the  $L_{IMF}$ , i.e. the cooling rate more influences the change of the parameter DAS than the change of the parameter  $L_{IMF}$ .



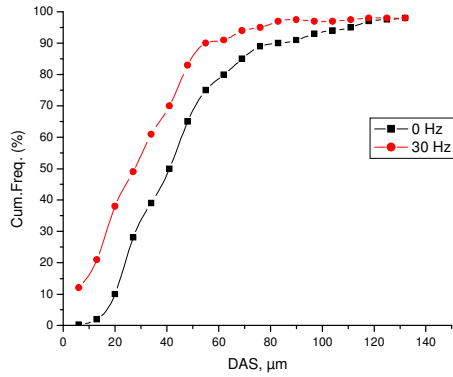


Fig. 4 (a) Cumulative distribution curve of parameter DAS depending on operating parameters of electromagnetic field

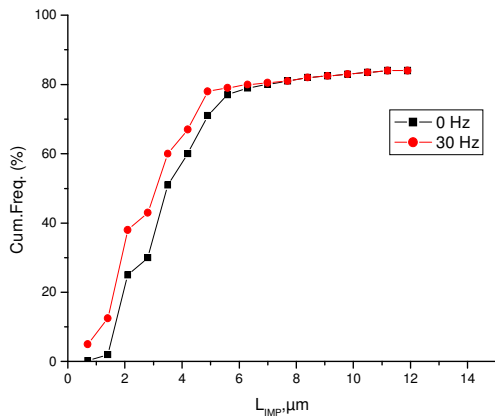


Fig. 4 (b) Cumulative distribution curve of parameter  $L_{IMP}$  depending on operating parameters of electromagnetic field

It is determined that the porosity of interdendritic type is reduced in sample 2.

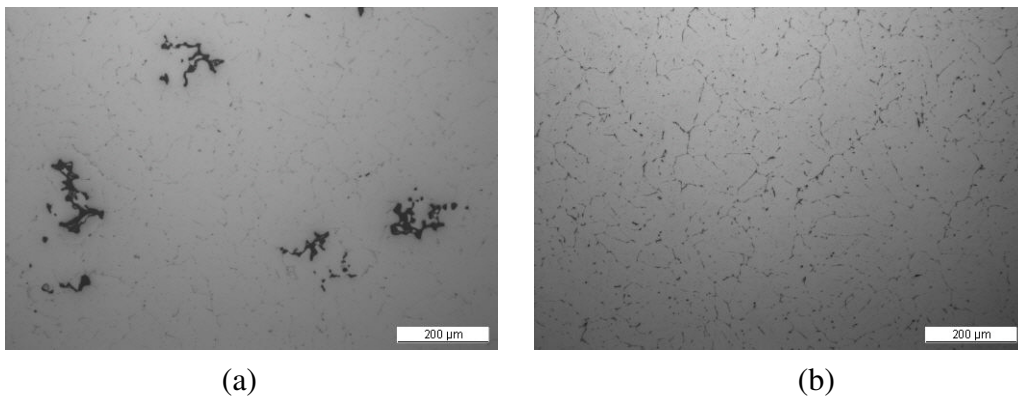
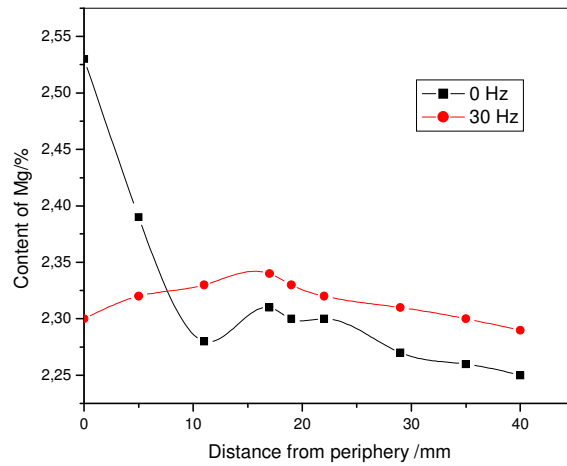


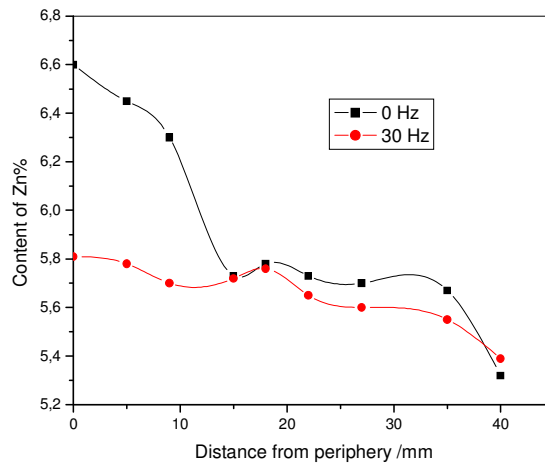
Fig 5 The porosity of interdendritic type: sample 1 (a)- without the electromagnetic field effect, and sample 2 (b)- with the electromagnetic field effect, Keller's reagent, 100x

The variation of elements content through the entire cross section was examined using chemical analysis. The Figure 6 shows the distribution of alloying elements Zn and

Mg along the radius of ingots. During the casting without electromagnetic field influence due to unequal conditions of solidification, the large inhomogeneity of alloying elements distribution can be seen.



(a)



(b)

Fig. 6 Content of Mg element (a) and content of Zn element (b) along radius of samples with different casting conditions

From the Figure 6, it can be seen that content of alloying elements is significantly higher on the surface of ingots than in the center. The reason for this is the nonequilibrium solidification conditions and the contact between the metal and the mold. On the other hand, samples which are casted under the influence of electromagnetic field have a much more balanced content of alloying elements along the cross-section of the samples. The application of the electromagnetic field reduces the undercooling because the contact line between mold and metal is smaller, as the result of potential force, a horizontal component of Lorentz force density acting. In this way the inhomogeneity of alloying elements distribution is reduced.

## 4.3 MECHANICAL CHARACTERIZATION

### 4.3.1 Tensile tests

The mechanical characteristics, such as elongation, reduction area, tensile strength, yield point as well as flow curves, were determined at room temperature using a computerized materials testing machine Zwick/Roel Z/100 (Fig. 7) .



Figure 7. Computerized materials testing machine Zwick/Roel Z/100 Z 100

Specimens for testing mechanical properties were made according to standard SRPS EN ISO 7500-1:2012

)

### 4.3.2. Hardness testing

The hardness was determined according to Brinell hardness test.

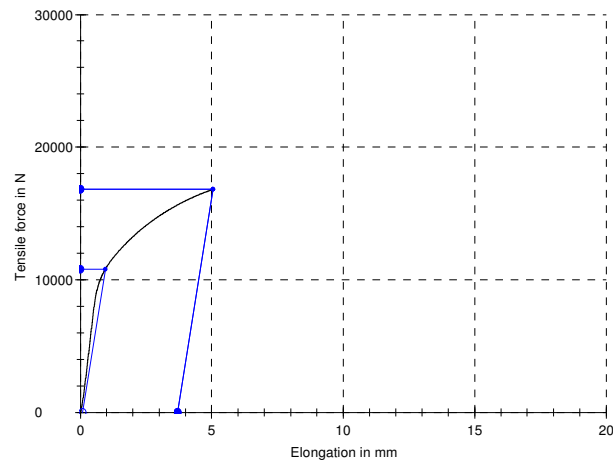
The mean value of hardness HB 5/250/30'' was as follows:

- for samples series 2, taken from ingot casted without EMF presence: 107.5 HB
- for samples series 2, taken from ingot casted with EMF presence: 163,67 HB

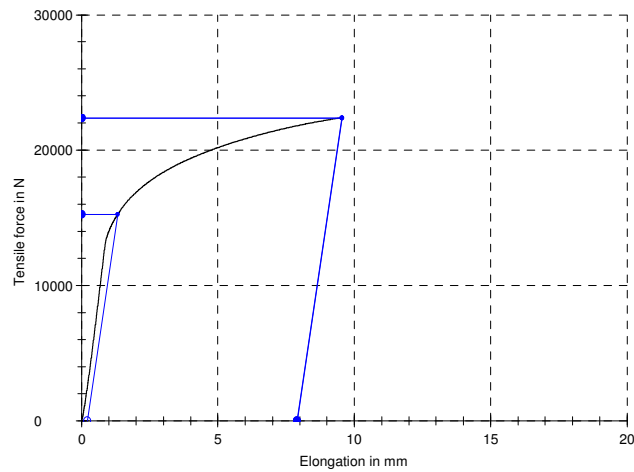
The results of mechanical tests (hardness, tensile strength, technical strength and elongation limits during destruction) for samples 1 and 2 are given in Table 3. Figure 8 shows the corresponding flow curves.

Table 3. Mechanical characteristics

Sample	HB (5/250/30")	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	Rp 0.2 (N/mm <sup>2</sup> )	Ag (%)	A (%)
1	153,67	470,01	311,96	8,847	8,93
2	107,50	362,02	251,53	3,817	3,82



(a)



(b)

Fig.8a Flow curves for the sample 1(a) and 2(b)

Analysis of the results shows that sample 2, which was semi-continuous casted with the presence of EMF, has higher hardness and tensile strength, yield strength and elongation in comparison to sample 1, which was obtained by classic semi-continuous casting process. The explanation for these results should be found in the microstructure of the samples obtained. Since microstructural parameters directly affect the mechanical properties of the alloy, it is quite clear why sample 2 have better mechanical properties compared to sample 1. During casting under the influence of EMF with frequencies of 30 Hz, there is a decrease in the values of microstructural parameters DAS and  $L_{IMF}$ . Electromagnetic field of a low frequency (30Hz), is clearly influenced getting finer, more uniform structure with a reduced appearance of interdendritic porosity and dendritic segregation. Sample 2 is characterized by such microstructure and hence better mechanical properties compared to the sample 1.

## **5. CONCLUSIONS**

Technology improvement of production of aluminum alloy EN AW 7075, contains all the elements of advanced technology resulting in improving the quality of ingots in an early stage of the manufacturing process and reduce production costs.

The realization of this technical solution creates conditions for shortening the process of manufacturing aluminum alloy EN AW 7075. It is possible to obtain the requested microstructural parameters, and thus the mechanical properties just after the casting process. The obtained casting surface quality eliminates the need for machining. In this way, the conditions for shortening the time of homogenization, as well as technological stages of pre-pressing have been achieved. These operating stages were inevitable in former technological processing of these alloys aimed for forging, in classic technological process.

The better castings quality, accompanied with significant commercial effects was achieved in the new technological process.



**11. MART**  
**SREBRENICA**

Kompanija za proizvodnju, preradu i promet  
obojenih, rijetkih i plemenitih metala  
"11. MART" A.D. Srebrenica

Telefoni: ++ 387 56 440 861; 440 895; 440 894; 440 200; email: [mart@rstel.net](mailto:mart@rstel.net); [www.11-mart.com](http://www.11-mart.com)  
Srebrenica, Potočari bb, Bosnia and Herzegovina

Srebrenica, 12.12.2012.

INSTITUT ZA TEHNOLOGIJU NUKLEARNIH  
I DRUGIH MINERALNIH SIROVINA  
Franše d Eperea 86  
11 Beograd  
SRBIJA

Int.br. 215/12

Ovim potvrđujemo

Verifikaciju tehničko-tehnološkog rešenja:

**TEHNOLOŠKI POSTUPAK LIVENJA ALUMINIJUMSKE LEGURE EN AW 7075 U  
ELEKTROMAGNETNOM POLJU**

U okviru višegodišnjih zajedničkih istraživanja saradnika Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, ITNMS iz Beograda, Mašinskog fakulteta iz Kragujevca i preduzeća ELING iz Loznice, kao zainteresovanog korisnika, proistekao je tehnološki postupak livenja aluminijumske legure EN AW 7075 u elektromagnetnom polju.

Verifikacija tehnološkog postupka livenja najpre je urađena u pogonu ELING-a, topljenjem liva u srednjefrekventnoj indukcionoj peći, pa livenjem u prisustvu elektromagnetnog polja, koje je postavljeno oko kristalizatora.

Na osnovu dobijenih parametara, ovaj tehnološki postupak livenja je našao komercijalnu primenu u našoj Kompaniji 11-mart iz Srebrenice, i to vertikalnim polukonitnim livenjem legure EN AW 7075 u elektromagnetnom polju. Primena elektromagnetnog polja u tehnologiji livenja ove aluminijumske legure znatno je doprinela konkurentnosti naših proizvoda zbog poboljšanja kvaliteta i uštede energije.

**Zbog postignutih rezultata u industrijskoj proizvodnji, ovim verifikujemo tehnološki postupak livenja aluminijumske legure EN AW 7075 u elektromagnetnom polju.**

Direktor,  
Milan Arsenović, dipl.ing.

Naučnom veću

Instituta za tehnologiju nuklearnih  
i drugih mineralnih sirovina,  
Franše d Eperea 86

Beograd

PREDMET:

Recenzija Tehničkog rešenja, kategorije **M 81**  
(nova tehnologija uvedeni u proizvodnju)

Naziv predloženog tehničkog rešenja:

**TEHNOLOŠKI POSTUPAK LIVENJA ALUMINIJUMSKE LEGURE 7075 U  
ELEKTROMAGNETNOM POLJU**

Odlukom Naučnog veća Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, broj 13/9-10, od 21.09.2012. god., određena sam za recenzenta tehničkog rešenja pod nazivom: „*Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju*“, koje je rezultat rada u okviru projekta TR 34002, čiju realizaciju finansira Ministarstvo za prosvetu i nauku Republike Srbije. Autori su iz Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina u Beogradu i Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu u.

Autori tehničkog rešenja su:

- prof.dr Zvonko Gulišija, naučni savetnik, ITNMS, Beograd,
- mr Aleksandra Patarić, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- mr Marija Mihailović, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- dr Zoran Janjušević, viši naučni saradnik, ITNMS, Beograd,
- dr Milentije Stefanović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac,
- dr Srbislav Aleksandrović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac,
- dr Vesna Mandić, vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac.

Na osnovu priloženog tehničkog rešenja gore navedenih autora, Naučnom veću Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina dajem sledeće:

## MISLJENJE:

Tehničko rešenje „*Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju*“ urađeno je na 13 strana sa 8 slika i 3 tabele i u skladu je sa propozicijama definisanim u Pravilniku o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata, Službeni Glasnik, Republike Srbije 38/2008.

Uvodna poglavlja „*Predmet*“ i „*Fundamentalne osnove tehnološkog rešenja*“ govore o osnovama za primenu elektromagnetnog polja u toku polu-kontinuiranog livenja aluminijumskih legura. Navedeno je stanje u svetu na polju tehnologija koje se tiču teme ovog tehničkog rešenja.

Poglavlje „*Polu-kontinualni elektromagnetni postupak livenja*“, ovog tehničkog rešenja bavi se tehnološkim specifičnima proizvodnje aluminijumske legure 7075, namenjene za kovanje. Analiza tehnoloških faza govori i o konvencionalnoj šemi proizvodnje i prerade ove legure. Novim tehnološkim postupkom, usled delovanja elektromagnetnog polja, dolazi do elektromagnetnog mešanja za vreme očvršćavanja metalnog rastopa pri polu-kontinualnom livenju, pa je očvršćavanje znatno drugačije u odnosu livenje na bez dejstva elektromagnetnog polja. Prikazani su uslovi eksperimentalnih ispitivanja i radni parametri pod kojima su uzorci odliveni.

U poglavlju „*Mikrostrukturalna analiza*“ prikazani su rezultati mikrostrukturne karakterizacije, korišćenjem metoda optičke mikroskopije. Na osnovu rezultata iz navedenih poglavlja, sumiranih u tabelama 2. i 3, kao i analize mikrostrukture prikazanih na slikama 3 i 5, zaključeno je da je primenjeno elektromagnetno polje, pogotovo polje niže frekvencije (30Hz), nedvosmisleno uticalo na poboljšanje mikrostrukture, pa samim tim i poboljšanje mehaničkih svojstava.

U delu „*Kvantitativna analiza*“ poređeni su rezultati merenja geometrijskih parametara mikrostrukture,  $DAS$ ,  $L_{IMF}$  i  $V_V$  dobijeni na uzorcima u livenom stanju, odlivenih bez dejstva i pod dejstvom elektromagnetnog polja različite frekvencije. Na slici 6 prikazana je raspodela glavnih legirajućih elemenata Zn i Mg po poprečnom preseku uzoraka, što govori o homogenosti uzorka po poprečnom preseku, dobijenog novom tehnologijom. Ovo ukazuje da je moguća ideja o skraćenju homogenizacionog žarenja, procesa koji dugo traje i troši dosta energije u staroj, konvencionalnoj tehnologiji.

Potom je data i *Analiza mehaničkih svojstava* ispitivanih uzoraka. Rezultati mehaničkih ispitivanja (tvrdoća, zatezna čvrstoća, tehnička granica tečenja i izduženja pri razaranju) za uzorke 1 i 2 dati su u tabeli 3, a na slici 8 prikazane su odgovarajuće krive zatezanja.

U *Zaključku* je sumiran kratak opis nove tehnologije proizvodnje aluminijumske legure 7075.



Na osnovu analize priloženog tehničkog rešenja donosim sledeći

## Z A K L J U Č A K

Predloženo tehničko rešenje „*Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju*“, koje daje opis nove tehnologije uvedene u proizvodnju, pripremljeno je u skladu sa Pravilnikom o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača, Službeni Glasnik, Republike Srbije 38/2008. Autori imaju objavljen rad u vrhunskom međunarodnom časopisu, koji se jednim delom oslanja na predloženo tehničko rešenje. Tehničko rešenje pruža neophodne informacije o oblasti na koju se odnosi kao i mogućnostima njegove dalje primene.

Dokumentacija tehničkog rešenja jasno opisuje novu tehnologiju i dobijanje novog kvaliteta odlivaka, uz postizanje bolje energetske efikasnosti

Na osnovu prikazanih rezultatima, predlažem Naučnom veću Instituta tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina iz Beograda, da tehničko rešenje prihvati i svrsta u kategoriju **M 81 (nova tehnologija uvedena u proizvodnju)**, prema pomenutom pravilniku.

17.12.2012.

RECENZENT

*Ana Kostov*

dr Ana Kostov, naučni savetnik  
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

## NAUČNOM VEĆU

*Instituta za tehnologiju nuklearnih  
i drugih mineralnih sirovina,*

*Beograd*

**PREDMET:** Recenzija Tehničkog rešenja, kategorije **M 81**  
(novi proizvod ili tehnologija uvedeni u proizvodnju na međunarodnom nivou)

**NAZIV:** **TEHNOLOŠKI POSTUPAK LIVENJA ALUMINIJUMSKE  
LEGURE 7075 U ELEKTROMAGNETNOM POLJU**

### **Autori:**

- prof.dr Zvonko Gulišija, naučni savetnik, ITNMS, Beograd,
- mr Aleksandra Patarić, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- mr Marija Mihailović, istraživač saradnik, ITNMS, Beograd,
- dr Zoran Janjušević, viši naučni saradnik, ITNMS, Beograd,
- prof.dr Milentije Stefanović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac,
- prof.dr Srbislav Aleksandrović, red. profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac,
- dr Vesna Mandić, vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac.

Odlukom Naučnog veća Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, broj 13/9-10, od 21.09.2012. god., određen sam za recenzenta tehničkog rešenja pod nazivom: „*Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju*“, koje je rezultat rada autora iz Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina u Beogradu i Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu u okviru projekta TR 34002, čiju realizaciju finansira Ministarstvo za prosvetu i nauku Republike Srbije.

Na osnovu priloženog tehničkog rešenja gore navedenih autora, Naučnom veću Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina dajem sledeće:

### **MIŠLJENJE:**

Tehničko rešenje „*Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju*“ urađeno je na 13 strana sa 3 tabele, 8 slika i u skladu je sa zahtevima definisanim Pravilnikom o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata, Sl. Glasnik, RS 38/2008.

Tehničko rešenje sadrži sledeće celine:

- Predmet
- Fundamentalne osnove tehnološkog rešenja
- Polu-kontinualni elektromagnetni postupak livenja
- Eksperimentalni deo
- Mikrostrukturalna analiza
- Kvantitativna analiza
- Mehanička karakterizacija
- Zaključak

U delu *Predmet/ Fundamentalne osnove tehnološkog rešenja* autori daju osnove za primenu elektromagnetnog polja u toku kontinuiranog livenja aluminijumskih legura. Istaknuta je mogućnost dobijanja kvalitetnijih ingota u ranoj fazi proizvodnog procesa što vodi uštedi energije i vremena.

U 1 delu tehničkog rešenja, *Polu-kontinualni elektromagnetni postupak livenja*, date su tehnološke specifičnosti proizvodnje legure EN AW 7075, zatim je data analiza tehnoloških faza i prikazana je konvencionalna šema proizvodnje i prerade ove legure. Prikazan je novi tehnološki postupak primenom elektromagnetnog mešanja za vreme očvršćavanja metalnog rastopa pri polu-kontinualnom livenju, usled delovanja elektromagnetnog polja u odnosu na očvršćavanje bez dejstva elektromagnetnog polja. U okviru ovog dela opisane su teorijske osnove, dati su uslovi eksperimentalnih ispitivanja, dimezije uzoraka i prikazani su radni parametri pod kojima su uzorci odliveni.

U poglavlju *Mikrostrukturalna analiza* prikazani su rezultati mikrostrukturne karakterizacije, korišćenjem metoda optičke mikroskopije. Upoređeni su rezultati uzoraka u livenom stanju, odlivenih bez dejstva i pod dejstvom elektromagnetnog polja različite frekvencije. Rezultati merenja geometrijskih parametara mikrostrukture, DAS,  $L_{IMF}$  i  $V_V$  sumirani su u delu *Kvantitativna analiza*, a potom je data i *analiza mehaničkih svojstava* ispitivanih uzoraka.

Na osnovu rezultata iz navedenih poglavlja, sumiranih u tabelama 2. i 3., kao i analize mikrostrukture prikazanih na slikama 3 a i b, i 5 a i b, zaključeno je da je primenjeno elektromagnetno polje, pogotovo polje niže frekvencije (30Hz), nedvosmisleno uticalo na poboljšanje mikrostrukture, pa samim tim i poboljšanje mehaničkih svojstava. Na slici 6 prikazana je raspodela glavnih legirajućih elemenata Zn i Mg po poprečnom preseku uzoraka, što govori o homogenosti uzorka po poprečnom preseku, dobijenog novom tehnologijom. Ovo ukazuje da je moguća ideja o skraćenju homogenizacionog žarenja, procesa koji dugo traje i troši dosta energije u staroj, konvencionalnoj tehnologiji.

Rezultati mehaničkih ispitivanja (tvrdoća, zatezna čvrstoća, tehnička granica tečenja i izduženja pri razaranju) za uzorke 1 i 2 dati su u tabeli 3, a na slici 8 prikazane su odgovarajuće krive zatezanja.

Na samom kraju, u okviru dela *Zaključak* dat je kratak opis i prednosti nove tehnologije proizvodnje aluminijumske legure 7075.

Na osnovu analize priloženog tehničkog rešenja donosim sledeći

## Z A K L J U Č A K

Tehničko rešenje „*Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju*“ pripremljeno je u skladu sa Pravilnikom o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača, SI.GI.38/2008. Dokumentacija tehničkog rešenja jasno opisuje novu tehnologiju i poboljšanje kvaliteta odlivaka koji je postignut, uz poboljšanje energetske efikasnosti u preduzeću u kome je primenjena. Tehničko rešenje pruža sve neophodne informacije o oblasti na koju se odnosi kao i mogućnostima njegove dalje primene.

Prema prikazanim rezultatima i činjenicama predlažem Naučnom veću Instituta tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina iz Beograda, da tehničko rešenje prihvati i svrsta u kategoriju **M 81 -(nova tehnologija uvedena u proizvodnju)**, prema pomenutom pravilniku.

27.12.2012.

RECENZENT



---

dr Milan Šljivić

Na osnovu člana 25. tačka 2) i 3) Zakona o naučnoistraživačkoj delatnosti i Prilogu 2 Pravilnika o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača daje se

## **MIŠLJENJE o tehničkom rešenju**

**Naziv tehničkog rešenja** Tehnološki postupak livenja aluminijumske legure 7075 u elektromagnetnom polju

**Autori:** prof. dr Zvonko Gulišija, mr Aleksandra Patarić, mr Marija Mihailović, dr Zoran Janjušević, prof.dr Milentije Stefanović, prof.dr Srbislav Aleksandrović, dr Vesna Mandić

**Godina:** 2012.

**Prijavljena kategorija:** M81 Nova tehnologija

**Pregledom svih priloženih dokaza sam utvrdio da:**

<b>1. Rešenje poseduje stručnu komponentu celokupnog i samostalnog rezultata</b>	<b>Da</b>
<b>2. Rešenje ima originalni naučno-istraživački doprinos</b>	<b>Da</b>
<b>3. Rešenje poseduje uredan tehnički elaborat (naslovna strana sa osnovnim podacima, potom elaborat sa opisima, crtežima itd)</b>	<b>Da</b>
3.1. Naveden je korisnik rešenja (naručilac)	<b>Da</b>
3.2. Navedeno je ko je rešenje prihvatio, ko ga primenjuje	<b>Da</b>
3.3. Priložen je dokaz o komercijalizaciji rezultata (korišćenju)	<b>Da</b>
<b>4. Opisan je problem koji se rešava</b>	<b>Da</b>
4.1. Dato je stanje rešenosti tog problema u svetu	<b>Da</b>
4.2. Dato je stanje rešenosti tog problema kod nas	<b>Da</b>
<b>5. Opisane su tehničke karakteristike</b>	<b>Da</b>
<b>6. Za kritičke evaluacije podataka, baza podataka</b>	
6.1. Deo je međunarodnog projekta	<b>Ne</b>
6.2. Publikovana je kao internet publikacija ili objavljena na internetu	<b>Ne</b>
6.3. Publikovano u časopisu sa SCI liste	<b>Da</b>
6.3. Ostalo	<b>Ne</b>
<b>7. Rešenje je rađeno u okviru projekta Ministarstva nauke i dat je broj projekta ili broj ugovora sa privredom iz kog proizilazi</b>	<b>Da</b>

\* uneti da/ne u prazne kockice

Dato tehničko rešenje:

1. Ispunjava uslove za priznavanje prijavljene kategorije Da
2. Ispunjava uslove za priznavanje kategorije različite od prijavljene.
3. Ne ispunjava uslove za priznavanje tehničkih rešenja.

**ZAKLJUČAK I MIŠLJENJE RECENZENTA DATO U POSEBNOM DOKUMENTU**

Mesto i datum Bor, 17. 12. 2012.

**RECENZENT**

*Ana Kostov*

**dr Ana Kostov, naučni savetnik**  
(Ime i prezime, potpis)

Na osnovu člana 25. tačka 2) i 3) Zakona o naučnoistraživačkoj delatnosti i Prilogu 2 Pravilnika o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača daje se

## **MIŠLJENJE** **o tehničkom rešenju**

**Naziv tehničkog rešenja** Tehnološki postupak livenja aluminijske legure 7075 u elektromagnetnom polju

**Autori:** prof. dr Zvonko Gulišija, mr Aleksandra Patarić, mr Marija Mihailović, dr Zoran Janjušević, prof.dr Milentije Stefanović, prof.dr Srbislav Aleksandrović, dr Vesna Mandić

**Godina:** 2012.

**Prijavljena kategorija:** M81 Nova tehnologija

**Pregledom svih priloženih dokaza utvrdio sam da:**

1. Rešenje poseduje stručnu komponentu celokupnog i samostalnog rezultata	Da
2. Rešenje ima originalni naučno-istraživački doprinos	Da
3. Rešenje poseduje uredan tehnički elaborat (naslovna strana sa osnovnim podacima, potom elaborat sa opisima, crtežima itd)	Da
3.1. Naveden je korisnik rešenja (naručilac)	Da
3.2. Navedeno je ko je rešenje prihvatio, ko ga primenjuje	Da
3.3. Priložen je dokaz o komercijalizaciji rezultata (korišćenju)	Da
4. Opisan je problem koji se rešava	Da
4.1. Dato je stanje rešenosti tog problema u svetu	Da
4.2. Dato je stanje rešenosti tog problema kod nas	Da
5. Opisane su tehničke karakteristike	Da
6. Za kritičke evaluacije podataka, baza podataka	
6.1. Deo je međunarodnog projekta	Ne
6.2. Publikovana je kao internet publikacija ili objavljena na internetu	Ne
6.3. Publikovano u časopisu sa SCI liste	Da
6.3. Ostalo	Ne
7. Rešenje je rađeno u okviru projekta Ministarstva nauke i dat je broj projekta ili broj ugovora sa privredom iz kog proizilazi	Da

\* uneti da/ne u prazne kockice

Dato tehničko rešenje:

1. Ispunjava uslove za priznavanje prijavljene kategorije Da
2. Ispunjava uslove za priznavanje kategorije različite od prijavljene.
3. Ne ispunjava uslove za priznavanje tehničkih rešenja.

**ZAKLJUČAK I MIŠLJENJE RECENZENTA DATO U POSEBNOM DOKUMENTU**

Mesto i datum : Banja Luka, 18.12.2012

**RECENZENT**

dr Milan Šljivić, red.prof.  
(Ime i prezime, potpis)

