

## OSIGURANJE NAJBOLJEG KVALITETA ODLJEVAKA IZ NODULARNOG LJEVA

### ASSURANCE OF CASTINGS QUALITY FROM DUCTILE IRON

mr Derviš Mujagić, dipl. inž.,  
Metalurški institut „Kemal Kapetanović“  
Univerzitet u Zenici

Mr. Derviš Pihura, dipl. inž.  
„Ljevani BiH“ Zenica

#### REZIME

*Budućnost savremenih vjetaroelektrana zavisi od kvaliteta ugrađenih odljevaka iz nodularnog ljeva (NL). Kvalitetne karakteristike odljevaka iz NL moraju zadovoljiti ne samo zahtjeve standarda, nego i one postavljene od strane naručilaca. Zato je potrebna iznimno oštra kontrola kvaliteta od izbora sirovina u pogledu čistoće, sadržaja elemenata i kvaliteta, te putem procedure izrade i obrade taline i njenih karakteristika, izrade formi za odlijevanje komada, uslova lijevanja i hlađenja, do konačne kontrole kvaliteta gotovog odljevka. Važno je zadovoljavanje uslova prijema u pogledu mehaničkih osobina, kemijskog sastava, te čistoće u pogledu nemetalnih uključaka i karakteristika grafita.*

**Ključne riječi:** energetska postrojenja, nodularni ljev, kvalitet, kontrola, proizvodnja

#### SUMMARY

*Future of modern wind turbines depends on quality of installed castings from ductile cast iron (DI). Quality characteristics of DI castings have to satisfy not only proscribed by norms, but also customer requests. Therefore it is important quality control of charging materials and additions from the point of cleanness, elements content, as well as by sever control quality and production procedures of melt, sand mixture and form making and also pouring operations. Casting condition are important as well as final quality control of finished castings. It is important satisfying of acceptance results of mechanical properties, content of elements, cleanness and graphite characteristics.*

**Keywords:** energy machines, ductile cast iron, quality, control, production

#### 1. OPĆI PREGLED

Planiranje i kontrola kvalitetnih karakteristika odljevaka od nodularnog ljeva visokih kvalitetnih karakteristika, za postrojenja vjetaroelektrana i slične namjene, se zasniva na procjeni raspoloživih tehničko-tehnoloških podataka i parametara upravljanja procesom, statističko-matematičkoj obradi rezultata, klasifikaciji i procjeni rezultata ispitivanja, te intervencijama u proizvodnji. Određene empirijske jednadžbe, uz rezultate ispitivanja daju odgovarajuće pravce u poboljšanju izrade odljevaka i pored mogućnosti utjecaja oligo i rezidualnih elemenata na fazne i strukturne komponente, na pojavu neodgovarajućeg oblika grafita, te kvalitetne karakteristike nodularnog ljeva. Izračun stepena teškoća, procentualnog

udjela strukturnih komponenti, indeksa nečistoća, a posebno vrijednosti mehaničkih osobina i uporedba izračunatih vrijednosti i dobijenih rezultata, su pokazatelji izabranih metalurških i tehničko-tehnoloških karakteristika izrade nodularnog ljeva. Posebnu pažnju treba obratiti na uplivne faktore u kolikoj mjeri otežavaju proces noduliranja ljeva i postizanje očekivanih osobina ili procesa grafitizacije, a koji može teći i u neželjenom smjeru, pod utjecajem nasljednih osobina metalnog uloška ili fizikalno-kemijskih karakteristika prisutnih primjesa.

Bez obzira koliko dio čistog metalnog uloška se uzima za izradu taline nodularnog ljeva, ipak jedan dio mora se uzeti kao staro željezo. Kako je u posljednjih nekoliko decenija porastao udio oligo i rezidualnih elemenata u starom željezu [1,2,3], to otežava postizanje kvalitetnih karakteristika nodularnog ljeva, te se pojavila potreba za planiranjem kvalitetnih karakteristika oštrijom kontrolom i dizajniranjem. Planiranje i dizajniranje kvaliteta odljevaka od nodularnog ljeva, zahtijeva detaljno upoznavanje sa fizikalno-kemijskim utjecajima komponenti metalnog uloška i dodataka, kako u pogledu porijekla i sastava tako i u pogledu utjecaja pojedinih primjesa kao i nemetalnih dodataka [1,3]. Tek na osnovu poznavanja tih činjenica i poznavanja utjecaja pojedinih primjesa na nodularni ljev, te na osnovu ukupnih ispitivanja od kemijske analize do metalografskih ispitivanja, moguće je planirati i dizajnirati kvalitet ljeva koji se očekuje. Jasno je da očekivane osobine nodularnog ljeva, zavise i od tehnoloških i metalurških karakteristika samog procesa izrade talina i lijevanja, čije je parametre nužno kvantificirati i održavati u određenim granicama zadatih parametara. Odstupanja, kao i razlike u vođenju istog procesa dovode do značajnih razlika u kvalitetu.

## 2. PLANIRANJE I DIZAJNIRANJE

Planiranje i dizajniranje kvalitetnih karakteristika nodularnog ljeva, zahtijeva i poznavanje mogućnosti pripreme uslova izrade metala i ostalih pomoćnih operacija, ne samo empirijskim putem i izradom u industrijskom obimu nego i dobijanja pravih i kvalitetnih informacija na bazi drugih «pomoćnih alata», kako se vidi iz tabele 1. Uočava se da je moguće najveći obim istraživanja i ispitivanja, obaviti na „pilot“ postrojenjima osim optimizacije procesa što je preporučljivo vršiti u industrijskom obimu (tabela 1.).

Tabela 1. Pregled mogućnosti studiranja fenomena\*

Studirani fenomen	Laboratorijski obim	Fizikalni model	Pilot postrojenje	Pogonski obim
Ravnoteža	++	-	±	-
Brzina	(+)	(+)	++	+
Tehnika	-	( )	++	♀
Optimizacija	-	+	±	++
Znanost	++	(++)	+(+)	♀
Cijena (KM)	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$

\* Primjena skale: (++) vrlo prihvatljivo, (+) prihvatljivo, ± promjenljivo, ♀ teško, - ne preporučeno, ( ) zavisno od okolnosti

Značajan broj radova [3] na području interventnih, aplikativnih, razvojnih i fundamentalnih istraživanja za potrebe ljevarske industrije samo je potvrdio i verificovao izrečene navode, i omogućio postizanje odgovarajućih rezultata i brz i optimalan transfer rezultata.

Kao što se danas za poboljšanje osobina odljevaka koristi HIP postupak, moguće je koristiti djelovanje vakuumske obrade ljeva za odstranjivanje štetnih primjesa, što omogućava smanjenje sadržaja antimona do 80 %, a bakra i cinka oko 60 % [3].

Preoblikovanje grafitnih uključaka u pogledu oblika, rasporeda, tipa i veličine do nodula zahtijeva i prilagođavanje uslova ispitivanja mehaničkih osobina. Drugačiji oblik grafitnih uključaka uslovio je i utjecaj djelovanja sila kroz matricu ljevova. Upoređivanje dobijenih vrijednosti aplikativnih metoda ispitivanja i razmatranih teoretskih vrijednosti, ukazuje na potrebu uzimanja u obzir i drugih kvalitetnih karakteristika ljeva.

### 3. ISPITIVANJA

Uzorkovanje talina vrši se iz peći i kazana prije i poslije lijevanja. Kemijska analiza vrši se za osnovne elemente i za oko dvadeset ostalih elemenata iz uzetih uzoraka, te iz odljevka. Određivanje mehaničkih osobina vrši se na uzorcima izrađenim iz Y, U, te prilivenih proba, kao i iz odljevaka. Mehaničke osobine se određuju u odljevenom i termički obrađenom stanju. Metalografska ispitivanja strukturnih faza i komponenti i karakteristika grafitnih uključaka iz U, Y i prilivenih proba te stepenaste probe, kao i iz odljevka vrše se po standardima EN DIN 1563-1997, GOST 7293-85, ISO 1083/JS/500-10, SS 140725, itd. i treba da na osnovu rezultata daju osnove za utvrđivanje mogućnosti proizvodnje odljevaka iz nodularnog ljeva sa perlitnom ili feritnom ljevanom strukturom [3,4]. Određivanje tipa, veličine, oblika i rasporeda grafitnih uključaka u nodularnom ljevu, vrši se na nenagriženim uzorcima optičkim mikroskopom, dok se određivanje mikrostrukturnih faznih komponenti, kao što su feritna i perlitna, te cementitna, vrši na nagriženim uzorcima sa 1 – 4 % rastvorom nitala, također na optičkom mikroskopu.

Termička obrada odljevaka, prilivenih proba, Y i U proba vrši se prema odgovarajućem dijagramu za osiguravanje feritne i standardima propisane strukture.

Pored ispitivanja mehaničkih osobina nodularnog ljeva, potrebno je vršiti tekuću procjenu na osnovu rezultata prethodnih mjerenja i istraživanja. Ocjena očekivane vrijednosti kvalitetnih karakteristika, npr. zatezne čvrstoće vrši se odgovarajućom jednadžbom ili permanentnim analitičkim praćenjem. Tada se upoređuju utjecaji faze noduliranja na promjenu i poboljšanje, npr. zatezne čvrstoće. U cilju postizanja uvida u spomenute karakteristike moguće je koristiti odgovarajuću jednadžbu. Za odljevke iz nodularnog ljeva koristi se jednadžba [1,3]:

$$R_m = (1/\alpha) (1 - e^{-(\alpha \cdot E \cdot \epsilon)}) \quad \dots(1)$$

Zbog dejstva kuglica grafita, zatezna čvrstoća nodularnog ljeva se mora računati po jednadžbi (1), gdje su  $\alpha$  – koeficijent istežanja, E - modul elastičnosti i  $\epsilon$  - jedinično istežanje.

### 4. DIZAJNIRANJE OPTIMALNIH ODLJEVAKA

Kod planiranja i dizajniranja karakteristika nodularnog ljeva teži se što efikasnijoj upotrebi sljedljivosti i korištenju mjerljivih parametara i konverzija pojedinih određenih fizikalnih veličina u prikladnije podatke, dostupne komercijalnim mjernim instrumentima kao kemijska analiza ili temperatura. Zato je potrebno poznavanje svih ulaznih parametara procesa izrade odljevaka od sirovina do uslova lijevanja i hlađenja.

Izbor sirovina pokazuje da se mora voditi računa o utjecaju i odnosu oligo i rezidualnih elemenata, kao i o odnosu osnovnih, te legirajućih elemenata da se postigne optimalni stepen zasićenja ( $S_c$ ) i vrijednosti ugljikovoga ekvivalenta (CE) [2,3].

Planiranje sadržaja elemenata u smislu održavanja u dozvoljenim granicama, ide u pravcu postizanja visoke vrijednosti CE da se smanji naklonjenost podhlađenju i skupljanju, što vodi stvaranju griješaka lijevanja [3] i skraćanju vremena potrebnog za austenitizaciju.

Da bi se stekla predstava o djelovanju pojedinih oligo ili rezidualnih elemenata potrebno je steći uvid u položaj oligoelemenata u periodnom sistemu (tabela 2.) ili u osnovne podatke, što daje mogućnost klasifikacije mogućih utjecaja pojedinih elemenata na povećanje područja pojedinih strukturnih faza, a time i na mogućnost pomjeranja tačaka zasićenja sa ugljikom.

*Tabela 2. Fizikalno-kemijske i imetalurške karakteristike nekih oligo i rezidualnih elemenata*

Karakteristika	Elementi						
	Fe	Cu	Pb	As	Bi	Sb	Sn
Promjer atoma, $\mu\text{m}$	25,4	25,5	-	29,8	-	32,9	31,6
Odstupanja od promjera Fe, %	0,00	0,39	-	17,30	-	27,10	24,21
Valentna grupa	0b	1b	Vb	1b	Vb	Vb	IVb
Elektronegativnost	2,0	1,9	-	2,0	-	1,9	1,8
Sadržaj $\gamma_{\text{Fe}}$ (max. mas.%)	-	8,0	-	4,0	-	4,0	2,0
Sadržaj $\alpha_{\text{Fe}}$ (max. mas.%)	-	1,4	-	7,0	-	8,0	2,0
Intermedijalna faza s min. sadržajem oligoelementa, %	-	-	-	FeAs 40,20	-	Fe <sub>2</sub> Sb 53,00	Fe <sub>3</sub> Sn 41,47

Prisustvo oligo i rezidualnih elementa smanjuje difuzijsku sposobnost u strukturnoj rešetki i usporava homogenizaciju taline. Ustanovljeno je i prisustvo posebnih faza drugih elemenata, odnosno interaktivno dještvo više elemenata koji tvore intermedijalne spojeve ili faze.

Slijedi da štetni utjecaj oligo i rezidualnih elemenata na proces nodulacije ne treba gledati izolovano, nego u interakciji sa ostalim fizičko-kemijskim i metalurškim reakcijama u odljevku iz nodularnog ljeva. Dještvo prisutnih rezidualnih i oligoelemenata ogleda se kroz utjecaj u različitim fazama procesa izrade taline i lijevanja odljevaka, tako da se određeni proces izrade ne mora podudarati kao i kod drugih, posebno kada se želi ispitati utjecaj nekih promjena u nodularnom ljevu, jer je proces veoma složen. Otuda se pojavljuju različiti literaturni podaci o stvarnom štetnom dještvo pojedinih oligo ili rezidualnih elemenata.

## 5. KVANTIFIKACIJA UTJECAJA

Planiranje kvalitetnih karakteristika odljevaka od nodularnog ljeva dovodi do smanjenja broja utjecajnih faktora ili uzroka subjektivnih ili objektivnih faktora [2,3].

Primjena pogonskih i istraživačkih iskustava, te statističke analize, kao i drugih metoda, ukazala je na mogućnost poboljšanja planiranja i dizajniranja karakteristika nodularnog ljeva na osnovu podataka o tome kako se odražava utjecaj pojedinih praktičnih kontrolnih veličina kao što su perlitni broj ( $P_x$ ), strukturna faza ferit (F) ili perlit (P), indeks nečistoća ( $I_x$ ), udarni rad loma (KU), stepen teškoća ( $T_{st}$ ) na nodularni ljev. Korištenjem spomenutih jednadžbi kao što su  $P_x$ ,  $I$ ,  $F$ ,  $a_k$ , ili  $T_{st}$  vodi se računa o utjecaju izabranih tehničko - tehnoloških i metalurških karakteristika procesa i omogućava brzu i blagovremenu intervenciju.

Iz raspoloživih podataka se vidi u kojoj mjeri spomenute jednadžbe uzimaju u obzir dještvo rezidualnih i oligoelemenata, odnosno pojedine površinsko aktivne elemente kao što su S, P ili O, koji se spominju kao utjecajni faktori na kvalitetne karakteristike nodularnog ljeva. Suprotno navodima literature [3] o razarajućem dještvo elemenata kao što su S, O i P na strukturu i kvalitetne karakteristike nodularnog ljeva, ni u jednoj jednadžbi se ne uzima u obzir štetni utjecaj ni S ni O. Izmjerena vrijednost sadržaja slobodnog O je 3 ppm  $a_o = 3 \pm 1$  ppm (ili  $3 \cdot 10^{-6}$

<sup>4</sup> %) [3], uz mnogo veće nađene vrijednosti sadržaja ukupnog O u ljevu. Očevidno je veoma jako djelstvo Bi i Pb na osobine nodularnog ljeva, bez obzira na netopnost u Fe matrici, što dovode do stvaranja defekata u grafitnoj strukturi i do razbijanja kristalne mreže nodula.

Pored navedenih jednadžbi koristi se, također, jednadžba (1) za određivanje vrijednosti mehaničkih osobina nodularnog ljeva [1,3].

Pored korištenja navedenih jednadžbi ili nomograma za dizajniranje i planiranje optimalnog kvaliteta nodularnog ljeva, kao i pilot opreme, veoma je zahvalno i korištenje dizajnirane vlastite opreme za uslove lijevanja i hladnjenja odljevaka. Najbolji primjer za to je lijevanje visokolegiranih dvoslojnih valjaka velikih dimenzija [3]. Pokušaji lijevanja takvih valjaka u industrijskom obimu zahtijevali su izradu nekoliko talina po 10 t. Izradom proporcionalnih formi za valjke na pilot postrojenjima (probnih talina), dobijeni su mini valjci optimalnih karakteristika. Transferom optimalne tehnologije u industrijskom obimu omogućeno je postizanje proizvodnje spomenutih valjaka bez daljnjih troškova i ispitivanja. Isti je slučaj sa korištenjem pristroja za lijevanje nodularnog ljeva za lijevanje cijevi.

## 6. KOMPARACIJA

Rezime o utjecaju oligo i drugih elemenata na kvalitet nodularnog ljeva iz domaćih sirovina i gvožđa za noduliranje dat je na osnovu literaturnih i vlastitih podataka.

U cilju dobijanja prirodnih uzoraka i uslova izrade nodularnog ljeva izrađeno je vlastito gvožđe za noduliranje iz uvoznih željeznih ruda različitog prijekla iz Indije, Mauritanije, Brazilije. Izrada gvožđa za noduliranje vršena je u pilot i industrijskom obimu. Od dobijenih gvožđa je proizveden nodularni ljev u pilot i industrijskom obimu. Noduliranje je vršeno sendvič postupkom sa predlegurom koja sadrži 5 % magnezija.

Metalografska ispitivanja prikazuju da je dizajniranje i planiranje proizvedenog nodularnog ljeva dalo dobre rezultate u pogledu stepena nodulacije i oblika nodula (slika 1.). Ispitivanja središta i površinskog sloja nodule su pokazala da su u nekim uzorcima u sredini uočene formacije uključaka tipa  $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ , dok su na površini nodula uočeni kompleksni uključci sastavljeni od komponenti  $\text{SiO}_2\text{-MgO-MgS-FeO}$  kao dijelovi ovojnice.



*Slika 1. Rezultati metalografskih ispitivanja oblika, tipa, rasporeda i veličine grafitnih uključaka u NL iz proizvedenih vrsta gvožđa (nenagriženo, povećanjem 500X)*

## 7. ZAKLJUČCI

1. Izbor sirovina pokazuje da se mora voditi računa o utjecaju i odnosu oligo, rezidualnih i osnovnih elemenata da bi se postigao optimalni stepen zasićenja i ugljikov ekvivalent.
2. S obzirom na osobine Bi i Pb, spojevi s niskim tačkama topljenja, djeluju na površinski napon u talini i dovode do stvaranja defekata u grafitnoj strukturi i do razbijanja kristalne mreže nodula.
3. Mehanizam utjecaja eligoelemenata otežava difuziju u kristalnoj rešeci i pospešuje štetne procese na granici zrna.
4. Planiranje i dizajnirane procesa i uslova izrade i lijevanja nodularnog ljeva dali su optimalne rezultate i omogućili uspješan transfer rezultata istraživanja i ispitivanja sa nivoa pilot obima na proizvodnju u industrijskim uslovima.
5. Provjera primjene aplikativnih jednadžbi o utjecaju sadržaja navedenih elemenata na kvalitetne osobine nodularnog ljeva, ukazala je na odgovarajuću mogućnost primjene navedenih jednadžbi za dizajniranje i planiranje kvalitetnog nodularnog ljeva iz optimalnih raspoloživih sirovina.

## 8. LITERATURA

- [1] Pihura D., Oruč M.: Application of spheroidal graphite cast iron in Bosnia and Herzegovina; Journal: Materials and technology, Ljubljana, Vol. 41 (2007) No. 4, pp 193/195.; Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Slovenia; Franc Vodopivec; ISSN 1580.2949;
- [2] Larker L.: Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotors, China Foundry, Vol. 6, No. 4, November 2009, 343 – 351; ISSN 1672-6421; CN 21-1498/TG; Foundry Journal Agency, P.R. China
- [3] Pihura D.: Estimation of importance of some influencing parameters in manufacturing ductile iron castings; International 48<sup>th</sup> Conference; Conference proceedings, pp: 63-64; Foundrymen Society; Debelak Martin; ISSN 1318-9123; Portorož, September 2008, File Currently on the CD
- [4] Europäischer Normung: DIN EN 1563-1997; Konstruieren und giessen; 22 (1997)3; pp 27-37