Proizvodnja debelostijenih odljevaka od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate

Severinski, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:062715

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF METALLURGY
SISAK

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Ante Severinski

ZAVRŠNI RAD

Sisak, srpanj 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Ante Severinski

PROIZVODNJA DEBELOSTIJENIH ODLJEVAKA OD FERITNOG NODULARNOG LIJEVA KVALITETE HRN-EN-GJS-400-18-LT ZA VJETROAGREGATE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: izv.prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović- predsjednik
izv.prof.dr.sc. Zoran Glavaš - član
izv.prof.dr.sc. Stjepan Kožuh - član
izv.prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac– zamjenski član

Sisak, srpanj 2016.

ZAHVALA

Veliku zahvalnost dugujem svom voditelju izv.prof.dr.sc. Zoranu Glavašu koji mi je omogućio svu potrebnu opremu i pomogao svojim savjetima pri izradi ovog završnog rada, i što je uvijek imao strpljenja i vremena za moje brojne upite.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima i prijateljicama, posebno Tomislavu, Juraju i Janu, koji su uvijek bili uz mene i bez kojih cijeli ovaj tijek mog studiranja ne bi prošao tako lako i zabavno.

Posebnu zahvalnost iskazujem cijeloj svojoj obitelji koja me je uvijek podržavala i upućivala na pravi put.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili tu, uz mene, bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

Veliko HVALA svima!

SAŽETAK

PROIZVODNJA DEBELOSTIJENIH ODLJEVAKA OD FERITNOG NODULARNOG LIJEVA KVALITETE HRN-EN-GJS-400-18-LT ZA VJETROAGREGATE

Proizvodnja debelostijenih odljevaka od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate je vrlo zahtjevan zadatak i izazov za ljevaonice. Zahtijevana mehanička svojstva i mikrostrukturne značajke moraju se postići u lijevanom stanju. Sporo hlađenje debelostijenih odljevaka u kombinaciji s neadekvatnim kemijskim sastavom i neodgovarajućim procesnim parametrima može rezultirati različitim greškama u mikrostrukturi koje negativno utječu na mehanička svojstva.

Ovaj rad pruža informacije o kemijskom sastavu i procesnim parametrima koji omogućuju da se zahtijevana mehanička svojstva i mikrostrukturne značajke debelostijenih odljevaka od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate postignu u lijevanom stanju. Detaljno je analiziran kemijski sastav i proces proizvodnje (uložni materijali, taljenje, obrada magnezijem, cijepljenje, izrada kalupa, lijevanje, istresanje odljevka iz kalupa).

Ključne riječi: nodularni lijev HRN-EN-GJS-400-18-LT, debelostijeni odljevci, vjetroagregat

ABSTRACT

PRODUCTION OF HEAVY SECTION HRN-EN-GJS-400-18-LT FERRITIC DUCTILE IRON WINDMILL CASTINGS

Production of heavy section HRN-EN-GJS-400-18-LT ferritic ductile iron windmill castings is a very demanding task and a challenge for the foundries. The required mechanical properties and microstructural features have to be achieved in the as-cast condition. Slow cooling of heavy section castings combined with inadequate chemical composition and inappropriate process parameters can result in different defects in the microstructure which adversely affect the mechanical properties.

This paper provides information on the chemical composition and process parameters that allow the achievement of the required mechanical properties and microstructural features of heavy section HRN-EN-GJS-400-18-LT ferritic ductile iron windmill castings in the as-cast condition. The chemical composition and production process (charge materials, melting, magnesium treatment, inoculation, molding, pouring temperature, shake-out) have been analyzed in detail.

Key words: ductile iron grade HRN-EN-GJS-400-18-LT, heavy section castings, windmill

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. DANAŠNJA SITUACIJA I BUDUĆI TRENDOVI U RAZVOJU VJETROAGREGATA 3

3. VRSTE I NAČIN RADA VJETROAGREGATA 6

4. ODLJEVCI OD NODULARNOG LIJEVA ZA VJETROAGREGATE 9

5. PROCES PROIZVODNJE ODLJEVAKA OD FERITNOG NODULARNOG LIJEVA KVALITETE HRN-EN-GJS-400-18-LT ZA VJETROAGREGATE 11

5.1 Mikrostrukturne značajke i svojstva 11

5.2 Kemijski sastav 12

5.3 Uložni materijali i izrada taline 18

5.4 Obrada magnezijem 19

5.5 Cijepljenje 20

5.6 Izrada kalupa 20

5.7 Temperatura lijevanja 21

5.8 Uklanjanje odljevka iz kalupa 21

6. ZAKLJUČAK 22

7. LITERATURA 23

ŽIVOTOPIS 27

1. UVOD

Nodularni lijev pripada skupini željeznih ljevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita [1, 2]. Grafitne čestice u nodularnom lijevu imaju oblik kuglica, odnosno nodula, što je rezultat dodataka sferoizidirajućih elemenata, prvenstveno magnezija. Zbog takvog oblika grafita nodularni lijev ima višu čvrstoću, granicu razvlačenja i žilavost od ostalih željeznih ljevova, tj. sivog i vermikularnog lijeva te bijelih željeznih ljevova [1 - 3]. Posebno se ističe njegova žilavost koja je zadovoljavajuća za mnoge primjene i nije svojstvena ostalim navedenim željeznim ljevovima. Danas nodularni lijev zbog takvih povoljnih svojstava u mnogim aplikacijama zamjenjuje čelični lijev.

Svjetska proizvodnja nodularnog lijeva u 2014. godini iznosila je 25,03 mil. t. [4]. To predstavlja 24,15 % ukupne svjetske proizvodnje odljevaka, odnosno 29,64 % svjetske proizvodnje odljevaka od ljevova čija je osnova željezo.

Tijekom 2014. godine u svijetu je proizvedeno 22433 TWh električne energije [5]. Od toga, 66 % je proizvedeno iz fosilnih goriva, 11 % odnosi se na nuklearnu energiju, a 23 % električne energije je dobiveno iz obnovljivih izvora, od čega 17 % iz hidroelektrana [5, 6]. Očito je da još uvijek dominira proizvodnja iz fosilnih goriva. Međutim, zbog niza problema koji se javljaju kod proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva ili u nuklearnim elektranama, kao što su velika potrošnja prirodnih resursa, velika emisija CO_2, problemi zbrinjavanja radioaktivnog otpada itd., sve veća pažnja posvećuje se primjeni obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije, kao što su hidroenergija, energija vjetra, sunčeva energija, geotermalna energija, energija biomase, energija plime i oseke te energija valova [7].

Energija vjetra pokazala se kao vrlo pogodna za proizvodnju električne energije. Trenutno je najčišća i najbolja opcija za smanjenje emisije CO_2. Primjenom jednog vjetroagregata snage 3 MW tijekom jedne godine izbjegava se emisija više od 5000 t CO_2 u atmosferu [8]. Zbog toga broj instaliranih vjetroagregata u zadnjih 15 godina bilježi velik porast.

Od samih početaka čovječanstvo je istražilo veliki broj izvora energije da bi svakodnevni život i rad učinilo lakšim i produktivnijim. Jedan od prvih korištenih izvora bio je vjetar. Vjetrenjače u Kini građene su prije više od 4000 godina [9]! Međutim, upotreba, energije vjetra za proizvodnju električne energije datira iz 80-ih godina 19. stoljeća kada je danski fizičar Poul La Cour (1846. - 1908.) pretvorio klasičnu vjetrenjaču u agregat za proizvodnju istosmjerne struje. Tijekom 10-ih godina 20. stoljeća vjetroagregati za proizvodnju električne energije postali su dio danskih predjela s nekoliko stotina instaliranih jedinica pri čemu je svaka proizvodila od 5 do 25 kWh električne energije. S gradnjom vjetroagregata također se počelo u Njemačkoj i ostalim Europskim državama. Međutim, jeftiniji izvori energije za koje se pretpostavljalo da imaju gotovo neograničenu dostupnost značajno su usporili razvoj vjetroagregata. Danas, danska proizvodnja vjetroagregata čini 50 % ukupne svjetske proizvodnje [9].

Naftne krize 70-ih godina 20. stoljeća (1973. i 1978.), povećana zabrinutost javnosti oko kvalitete okoliša (globalno zatopljenje, kisele kiše…) i neriješeni rizici nuklearne energije prisilili su zapadnoeuropske vlade da počnu razmišljati o čistoj obnovljivoj energiji. Unatoč tome, tek 20 godina nakon prve naftne krize energija vjetra je jasno prepoznata kao alternativni izvor energije u odnosu na fosilna goriva i nuklearnu energiju. Tijekom 90-ih godina 20. stoljeća naglo se povećala izgradnja vjetroagregata. U periodu od 1997. do 2002. godine godišnji instalirani kapacitet povećavao se prosječno za 640 MW [9].

Veći broj faktora utjecao je na povećanje upotrebe energije vjetra u Europi. Ti faktori uključuju: smanjenje ovisnosti o proizvođačima nafte, potrebu za alternativnim izvorima električne energije radi zamjene ugljena, nafte ili plina, jer će u budućnosti imati ograničenu

dostupnost te će doći do značajnog povećanja cijene, eliminaciju rizičnih tehnologija kao što je nuklearna energija, primjenu slobodnog, dostupnog i obnovljivog goriva, eliminaciju utjecaja na okoliš te odsutnost otpada. Navedeni faktori, uz ostale faktore, stvorili su uvjete naročito pogodne za porast upotrebe energije vjetra u Europi.

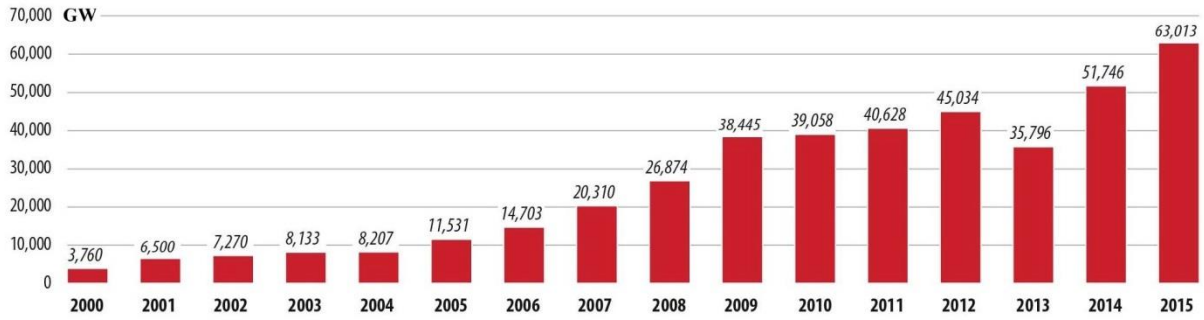
Nodularni lijev pokazao se kao pogodan materijal za gradnju mnogih komponenti vjetroagregata. U odnosu na čelični lijev, nodularni lijev ima bolju livljivost, manju gustoću (a time i masu odlivene komponente), bolju strojnu obradivost te veću fleksibilnost po pitanju konstrukcije, a ujedno ima i potrebna mehanička svojstva za komponente vjetroagregata [9 - 11].

Komponente vjetroagregata izrađene od nodularnog lijeva rade u oštrim uvjetima i izložene su velikim opterećenjima [12]. Greške u mikrostrukturi negativno utječu na mehanička svojstva, odnosno vlačnu i dinamičku čvrstoću, granicu razvlačenja, istezanje i žilavost tih komponenti. Zbog toga se velika pažnja mora posvetiti postupku proizvodnje da bi se dobila odgovarajuća mikrostruktura i mehanička svojstva u lijevanom stanju.

Cilj ovog rada je prikazati dosadašnje spoznaje na polju proizvodnje debelostijenih odljevaka od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate.

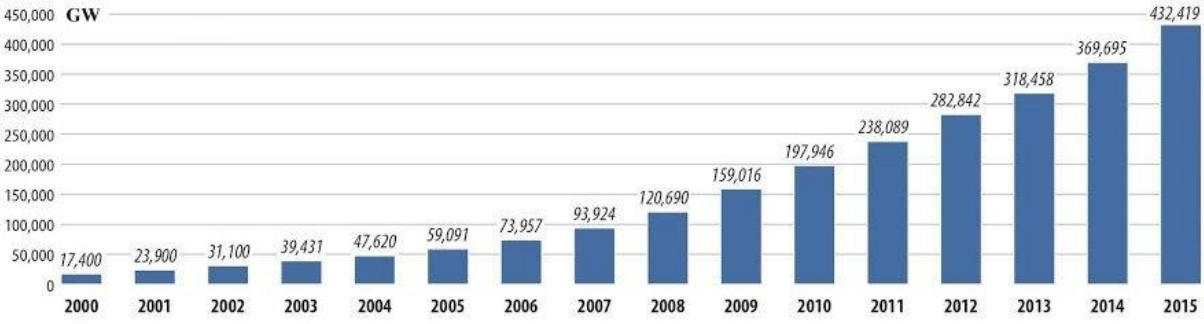
2. DANAŠNJA SITUACIJA I BUDUĆI TRENDOVI U RAZVOJU VJETROAGREGATA

Tijekom 2015. godine u svijetu su instalirana nova 63,013 GW snage iz vjetroagregata, što je porast u odnosu na 2014. godinu kada je instalirano 51,746 GW [13]. Dijagram na slici 1 pokazuje da se godišnji kapacitet novoinstaliranih vjetroagregata u svijetu gotovo konstantno povećava od 2000. do 2015. godine.



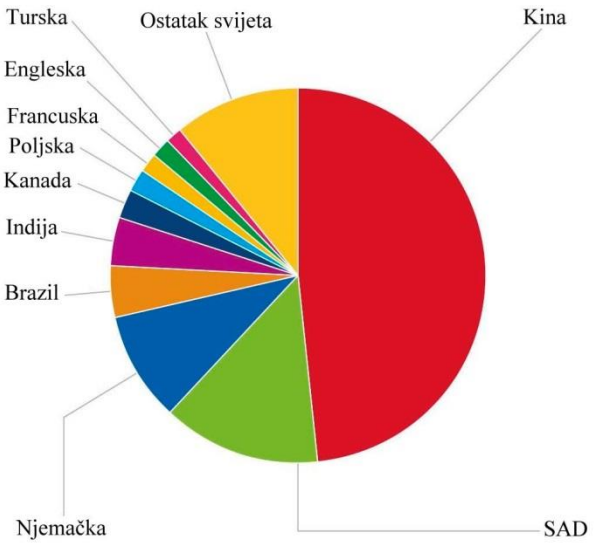
Slika 1. Godišnji kapacitet novoinstaliranih vjetroagregata u svijetu od 2000. do 2015. godine [13]

Ukupan kapacitet vjetroagregata u svijetu na kraju 2015. godine iznosio je 432,419 GW, što je za 17,04 % više nego u 2014. godini [13]. Dijagram na slici 2 pokazuje da se ukupni kapacitet vjetroagregata u svijetu konstantno povećava od 2000. do 2015. godine. Do kraja 2014. godine u svijetu je ukupno instalirano 268000 vjetroagregata [14].



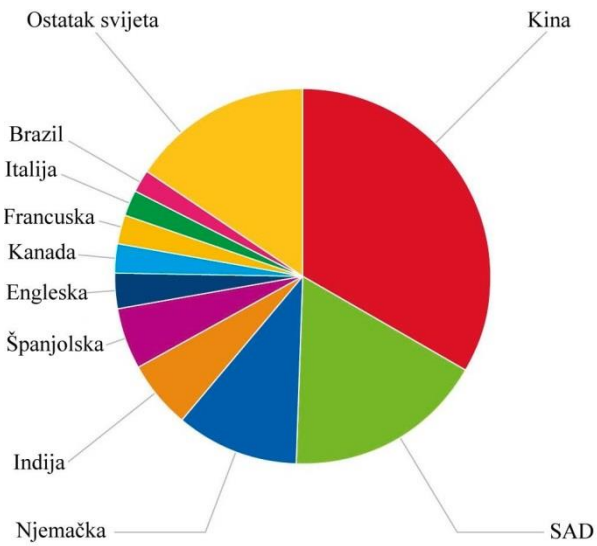
Slika 2. Ukupni kapacitet vjetroagregata u svijetu od 2000. do 2015. godine [13]

Kina je vodeća po kapacitetu novoinstaliranih vjetroagregata u 2015. godini sa 30,5 GW, a slijede ju SAD sa 8,598 GW i Njemačka sa 6,013 GW (slika 3a). Na kraju 2015. godine, najveći udio u ukupnom kapacitetu vjetroagregata u svijetu imala je Kina (33,6 %), nakon čega slijedi SAD (17,2 %) i Njemačka (10,4 %) (slika 3b).



Država	GW	Udio, %
Kina	30,500	48.4
SAD	8,598	13.6
Njemačka	6,013	9.5
Brazil	2,754	4.4
Indija	2,623	4.2
Kanada	1,506	2.4
Poljska	1,266	2.0
Francuska	1,073	1.7
Engleska	975	1.5
Turska	956	1.5
Ostatak svijeta	6,749	10.7
Prvih 10 ukupno	**56,264**	**89**
Svijet ukupno	**63,013**	**100**

a)



Država	GW	Udio, %
Kina	145,104	33.6
SAD	74,471	17.2
Njemačka	44,947	10.4
Indija	25,088	5.8
Španjolska	23,025	5.3
Engleska	13,603	3.1
Kanada	11,200	2.6
Francuska	10,358	2.4
Italija	8,958	2.1
Brazil	8,715	2.0
Ostatak svijeta	66,951	15.5
Prvih 10 ukupno	**365,468**	**84.5**
Svijet ukupno	**432,419**	**100**

b)

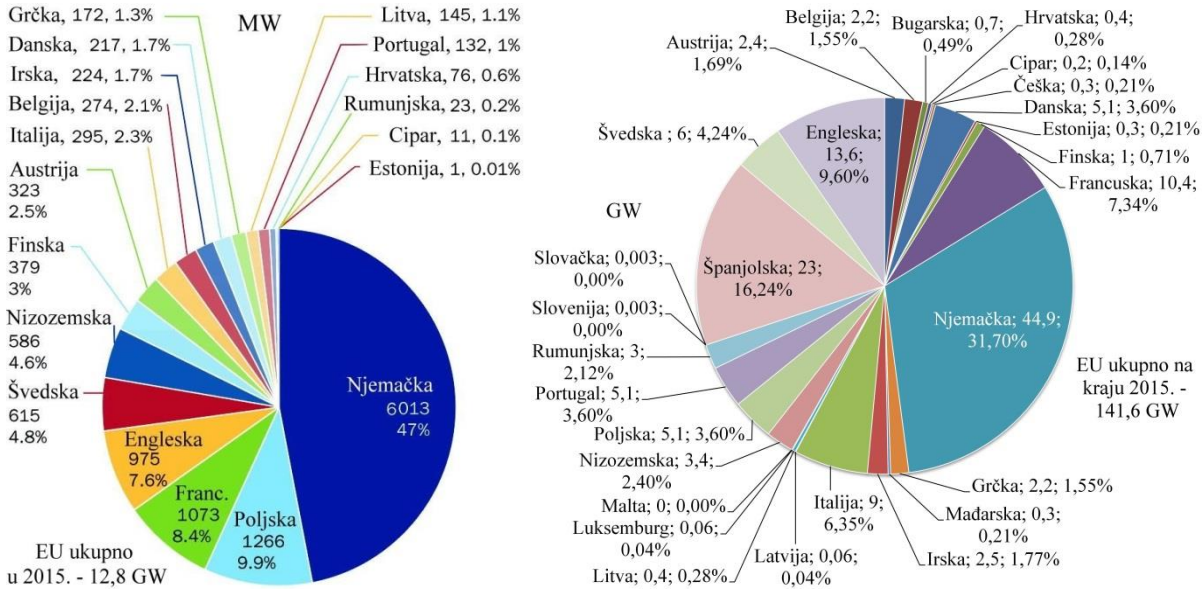
Slika 3. a) deset zemalja s najvećim kapacitetom novoinstaliranih vjetroagregata u 2015. godini, b) deset zemalja s najvećim ukupnim kapacitetom vjetroagregata na kraju 2015. godine [13]

Upotreba energije vjetra u proizvodnji električne energije trenutno je najčišća i najbolja opcija za smanjenje emisije CO_2. Tijekom 2014. godine u svijetu je upotrebom energije vjetra za proizvodnju električne energije izbjegnuta emisija od 608 milijuna tona CO_2 [14]. Osim toga, primjenom energije vjetra može se uštedjeti 2000 litara vode/MWh proizvedene električne energije [14].

Trenutno se u svijetu putem vjetroagregata dobiva 3 % od ukupne količine proizvedene električne energije [14]. Cilj je da se taj udio do 2030. godine poveća na 17 do 19 % [14]. Time bi se broj zaposlenih u sektoru vjetroagregata povećao sa 601500, koliko je bilo zaposleno 2013. godine, na 2171804 zaposlena u 2030. godini [14].

Tijekom 2015. godine u Europi je instalirano novih 13,805 GW snage iz vjetroagregata [15]. Od toga 12,8 GW instalirano je u zemljama Europske unije, što je povećanje za 6,3 % u odnosu na 2014. godinu [15]. Na kopnu je instalirano 9,766 GW snage iz vjetroagregata, a 3,034 GW na moru. Od svih instaliranih novih kapaciteta za proizvodnju električne energije u Europskoj uniji u 2015. godini, 44,2 % odnosi se na vjetroagregate.

Njemačka zauzima prvo mjesto u Europskoj uniji po kapacitetu novoinstaliranih vjetroagregata u 2015. godini sa 6,013 GW (slika 4a). Drugo mjesto zauzima Poljska sa 1,266 GW, a na trećem mjestu nalazi se Francuska sa 1,073 GW. U Hrvatskoj je tijekom 2015. godine instalirano novih 76,2 MW snage iz vjetroagregata [15].



a) b)

Slika 4. a) kapacitet novoinstaliranih vjetroagregata u 2015. godini u zemljama Europske unije, b) ukupni kapacitet vjetroagregata u zemljama Europske unije na kraju 2015. godine [15]

Danska se ističe jer 39,1 % svojih potreba za električnom energijom pokriva putem vjetroagregata [14]. Cilj je da taj udio podignu na 50 % do 2020. godine te da do 2050. godine svu potrebnu električnu energiju dobiju iz obnovljivih izvora [14].

Na kraju 2015. godine ukupan kapacitet vjetroagregata u Europskoj uniji iznosio je 141,578 GW, što je za 9,9 % više nego u prethodnoj godini [15]. Taj kapacitet omogućuje proizvodnju 315 TWh električne energije, što pokriva 11,4 % potreba Europske unije za eklektičnom energijom [15]. Ukupan kapacitet vjetroagregata u Europi na kraju 2015. godine iznosio je 147,772 GW. Na kraju 2015. godine najveći udio u ukupnom kapacitetu vjetroagregata u Europskoj uniji imala je Njemačka sa 31,7 %, nakon čega slijedi Španjolska sa 16,2 % i Engleska sa 9,6 % (slika 4b). Ukupan kapacitet vjetroagregata u Hrvatskoj na kraju 2015. godine iznosio je 422,7 MW [15].

Prema središnjem scenariju, Europska unija do 2020. godine planira povećati ukupan kapacitet vjetroagregata na 192 GW, a do 2030. godine planira se povećanje na 320 GW, od čega 254 GW na kopnu i 66 GW na moru [16]. Tako velik kapacitet omogućio bi proizvodnju 778 TWh električne energije, što bi pokrilo 24,4 % potreba Europske unije za električnom energijom. Broj zaposlenih u sektoru vjetroagregata povećao bi se na 334000. Ukupno bi bilo instalirano 96000 vjetroagregata čime bi se izbjegla emisija od 436 milijuna tona CO_2.

3. VRSTE I NAČIN RADA VJETROAGREGATA

Vjetroagregat najprije pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku, koju nakon toga pretvara u električnu energiju pomoću električnih generatora [17]. Prema osi vrtnje dijele se na vjetroagregate s horizontalnom osi vrtnje (slika 5a) i vjetroagregate s vertikalnom osi vrtnje (slika 5b).



a) b)

Slika 5. Vjetroagregati: a) s horizontalnom osi vrtnje [18], b) s vertikalnom osi vrtnje [19]

Kod vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje os vrtnje rotora tj. vjetroturbine je paralelna sa smjerom vjetra i tlom. Najčešće imaju 3 lopatice i moraju biti usmjereni direktno prema vjetru. Za proizvodnju električne energije uglavnom se koristi taj tip vjetroagregata. Glavne prednosti vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje su [17]: veća učinkovitost u proizvodnji električne energije, veće brzine vjetra jer su postavljeni na visoke stupove (tornjeve), poboljšana stabilnost jer se lopatice nalaze sa strane vjetroagregata, mogućnost zakretanja lopatica tako da se energija vjetra može maksimalno iskoristiti te mogućnost fiksiranja lopatica tijekom nevremena (oluje) čime se smanjuje mogućnost oštećenja. Postoje i neki nedostatci vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje [17]: potreban je sustav za zakretanje vjetroturbine što povećava cijenu, vjetrovi na maloj nadmorskoj visini često su turbulentni zbog čega je otežan rad u takvim uvjetima, otežan prijevoz tornjeva i lopatica zbog velikih dimenzija, otežano postavljanje vjetroagregata zbog velike visine tornjeva i velike mase pojedinih komponenti.

Kod vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje os vrtnje rotora je okomita na smjer vjetra i tlo. Da bi bili učinkoviti, ne moraju biti usmjereni direktno prema vjetru, što je značajna prednost. Prema tome, mogu iskoristiti energiju iz različitih smjerova vjetra [17]. Ostale prednosti vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje [17]: ne moraju se postavljati na velike tornjeve čime se olakšava održavanje, nije potreban mehanizam za zakretanje zbog čega su jeftiniji te dobri rezultati u područjima gdje je velika brzina vjetra blizu tla. Najznačajniji nedostatci vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje su [17]: iskoristivost je ~ 50 % manja nego kod vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje, moraju se postaviti na prilično ravno tlo te se moraju pokrenuti pomoću vanjskog izvora energije da bi započeli okretanje.

Prema veličini, odnosno snazi, vjetroagregati se dijele na male (snaga od 1 do 100 kW), srednje (snaga od 100 kW do 1,5 MW) i velike (snaga > 1,5 MW) [17]. Mogu se postaviti na kopnu, u priobalnom području ili na moru zbog većih brzina vjetra.

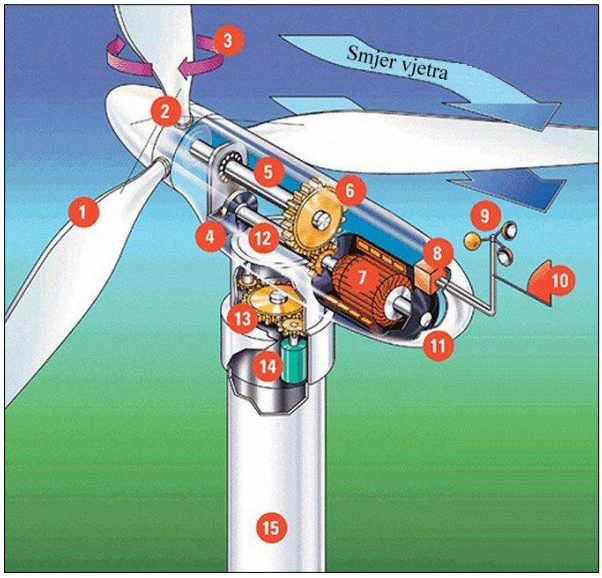
Trenutno najveći vjetroagregat na svijetu ima snagu 8 MW (slika 6) [14, 20, 21]. Visina do osi rotora iznosi 140 m, a promjer rotora je 164 m. U jednoj godini može osigurati dovoljno električne energije za 7500 kućanstava. Proizvođač je danska tvrtka Vestas.



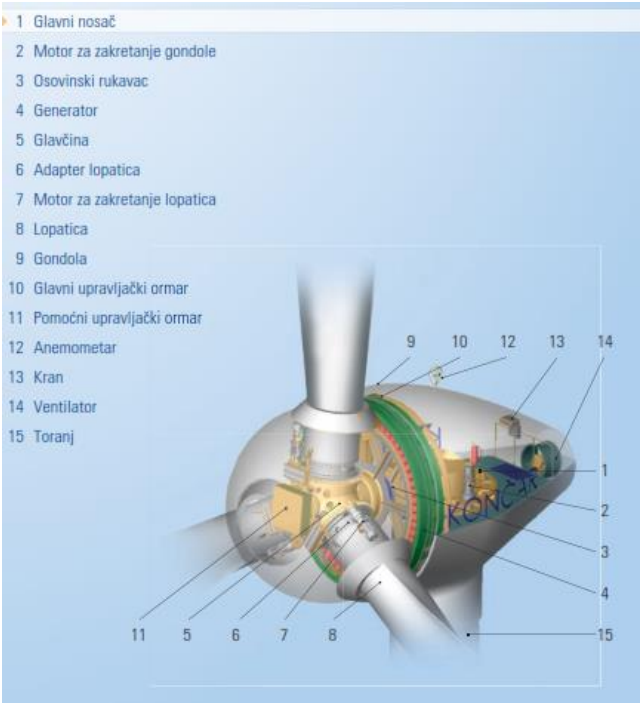
Slika 6. Najveći vjetroagregat na svijetu - Vestas V164 snage 8 MW [22]

Na slici 7 prikazani su glavni dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje. Energija vjetra pretvara se u mehaničku energiju pomoću rotora tj. vjetroturbine [24]. Vjetroturbina sastoji se od glavčine, osovine i 3 lopatice. Vjetar pokreće lopatice koje rotiraju, što rezultira okretanjem vjetroturbine oko horizontalne osi. Mehanička spojka povezuje vjetroturbinu s generatorom. Ona obično sadrži mjenjačku kutiju s prijenosnikom koji povezuje sporohodnu osovinu vjetroturbine s brzohodnom osovinom koja pokreće rotor električnog generatora i pri tome povećava brzinu rotacije sa 30 do 60 o/min na 1000 do 1800 o/min, koliko većina generatora zahtijeva za proizvodnju električne energije [25]. Noviji vjetroagregati imaju višepolne generatore s direktnim pogonom koji su većinom sinkroni i rade na nižim brzinama vrtnje zbog čega ne trebaju mjenjačku kutiju (slika 8).

Generator pretvara mehaničku energiju u električnu. Može biti sinkroni i asinkroni. Anemometar mjeri brzinu vjetra, a podatci se prosljeđuju upravljačkoj jedinici koja pušta u rad vjetroturbinu kod određene brzine vjetra te ju zaustavlja kada je brzina vjetra prevelika da ne dođe do oštećenja [25].



Slika 7. Glavni dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje: 1- lopatice, 2 – rotor (vjetroturbina), 3 – sustav za zakretanje lopatica, 4 – kočioni sustav, 5 – sporohodna osovina, 6 – mjenjačka kutija s prijenosnikom, 7 – električni generator, 8 – upravljačka jedinica, 9 – anemometar, 10 – uređaj za određivanje smjera vjetra, 11 – gondola (kućište stroja), 12 – brzohodna osovina, 13 – sustav za zakretanje gondole, 14 – motor za zakretanje gondole, 15 – toranj (stup) [23]



Slika 8. Glavne komponente vjetroagregata KONČAR KO-VA 57/1 snage 1 MW koji koristi sinkroni višepolni generator s direktnim pogonom i promjenjivom brzinom [26]

Podatci dobiveni uređajem za mjerenje smjera vjetra koristi sustav za zakretanje gondole da bi vjetroturbinu okrenuo pravilno obzirom na smjer vjetra. Kočioni sustav zaustavlja rotor kada je prevelika brzina vjetra ili u slučaju kada električni generator ispadne iz mreže. Osim toga, taj sustav održava definiranu brzinu vrtnje konstantnom [27].

4. ODLJEVCI OD NODULARNOG LIJEVA ZA VJETROAGREGATE

Postoje vjetroagregati različitih veličina i konfiguracija, a sastoje se od ~ 8000 dijelova [14]. Za njihovu izradu upotrebljavaju se različiti materijali. Metalne komponente čine gotovo 90 % mase i iznose više od 1/3 novčane vrijednosti suvremenog vjetroagregata [10]. Te komponente su odljevci, otkivci ili razni proizvodi koji prolaze višestruku strojnu obradu, zatim po potrebi toplinsku obradu i uklanjanje naprezanja te se na kraju nanosi zaštita od korozije.

Konstantan porast snage i veličine vjetroagregata zahtijevao je optimizaciju konstrukcijskih materijala koji se koriste za njihovu gradnju. Ubrzo je jasno postalo da su potrebni lakši materijali koji imaju zahtijevana mehanička svojstva. Zbog toga su konstruktori počeli razmatrati nodularni lijev kao materijal za gradnju mnogih komponenti vjetroagregata jer ima 10 % manju masu od čelika i potrebna mehanička svojstva [9]. Uobičajeni vjetroagregati obično sadrže 10 do 19 t odljevaka od nodularnog lijeva/MW [9, 28], dok je kod velikih vjetroagregata ta količina znatno veća. Najčešće korištena kvaliteta nodularnog lijeva je HRN-EN-GJS-400-18-LT. Tipične komponente vjetroagregata izrađene od nodularnog lijeva su: glavčina rotora ili vjetroturbine (slika 9a), adapter lopatica rotora (slika 9b), gondola (kućište stroja), razne osovine (slika 10), razna kućišta (ležajeva glavne (sporohodne) osovine (slika 11a), zupčanog prijenosnog mehanizma (slika 11b)) itd. Uglavnom se radi o debelostijenim odljevcima.



a)



b)

Slika 9. Odljevci od nodularnog lijeva za vjetroagregate: a) glavčina rotora ili vjetroturbine [29], b) adapter lopatica rotora [10]



Slika 10. Osovina od nodularnog lijeva za vjetroagregat [30]



a) b)

Slika 11. Odljevci od nodularnog lijeva za vjetroagregate: a) kućište ležajeva glavne (sporohodne) osovine (desni dio slike) [31], b) kućište zupčanog prijenosnog mehanizma [31]

5. PROCES PROIZVODNJE ODLJEVAKA OD FERITNOG NODULARNOG LIJEVA KVALITETE HRN-EN-GJS-400-18-LT ZA VJETROAGREGATE

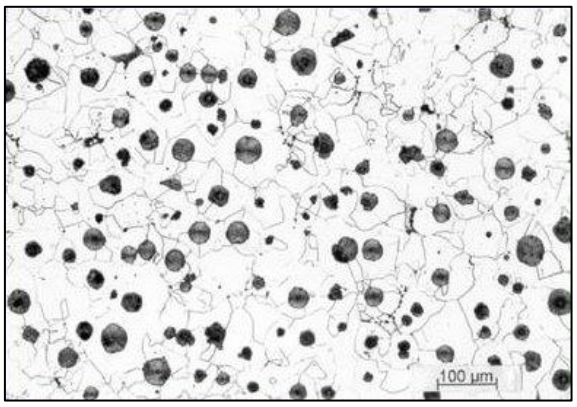
Proces proizvodnje odljevaka za vjetroagregate ne razlikuje se značajno od procesa proizvodnje visokokvalitetnih odljevaka od feritnog nodularnog lijeva. Međutim, pojedini parametri zahtijevaju posebnu pažnju kako bi se uvijek postigla visoka kvaliteta odljevaka.

5.1 Mikrostrukturne značajke i svojstva

U tablici 1 prikazane su minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava odljevaka od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate, a na slici 12 prikazana je njegova mikrostruktura.

Tablica 1. Mehanička svojstva odljevaka od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate [8]

Uzorak	Debljina stijenke, mm	Vlačna čvrstoća R_m, N/mm^2, min.	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$, N/mm^2, min.	Istezanje A_5, %, min.	*KV* na – 20 °C, J	
					srednja vrijednost 3 mjerenja	pojedinačna vrijednost
Odvojeno lijevani uzorak (Y_{25} proba)	$t \leq 30$	400	240	18	12	9
Priliveni uzorak	$t \leq 30$	400	240	18	12	9
	$30 < t \leq 60$	380	230	15	12	9
	$60 < t \leq 200$	360	220	12	10	7



Slika 12. Metalografska snimka mikrostrukture feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT u nagrizenom stanju, nital [32]

Odljevci za vjetroagregate moraju imati visoku duktilnost i žilavost (mjerena metodom prema Charpy-u na uzorcima s V zarezom) zbog oštrih vremenskih uvjeta kojima mogu biti

izloženi u sjevernim zemljama ili na otvorenom moru. Pored toga, meka feritna metalna osnova u kombinaciji s efektom podmazivanja koji pružaju grafitne nodule olakšava strojnu obradu odljevaka.

Da bi se postigla zahtijevana mehanička svojstva odljevaka, potrebno je ostvariti sljedeće mikrostrukturne značajke [9, 12, 28]:

- Broj nodula: 100 – 200 nodula/mm^2. Prevelik broj nodula negativno utječe na vlačnu čvrstoću. Vrlo nizak broj nodula može rezultirati izlučivanjem krhkih faza po granicama zrna koje negativno utječu na čvrstoću i duktilnost,
- Nodularnost: minimalno 95 %. Nepravilno oblikovane nodule djeluju kao mjesta koncentracije naprezanja te kao inicijalna mjesta za stvaranje pukotine pod djelovanjem udarnog opterećenja,
- Metalna osnova: potpuno feritna, bez karbida po granicama zrna ili perlita zbog segregacije elemenata u tragovima, bez nemetalnih uključaka ili ostalih konstituenata,
- Ne smiju biti prisutne mikrousahline ili uključci troske.

Iskustva su pokazala da se takve mikrostrukturne značajke mogu postići u lijevanom stanju bez potrebe za skupom toplinskom obradom putem stroge kontrole kemijskog sastava odljevaka, pažljivog odabira uložnih materijala i optimizacije procesnih parametara.

5.2 Kemijski sastav

U tablici 2 prikazani su udjeli stalnih elemenata u odljevcima od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate.

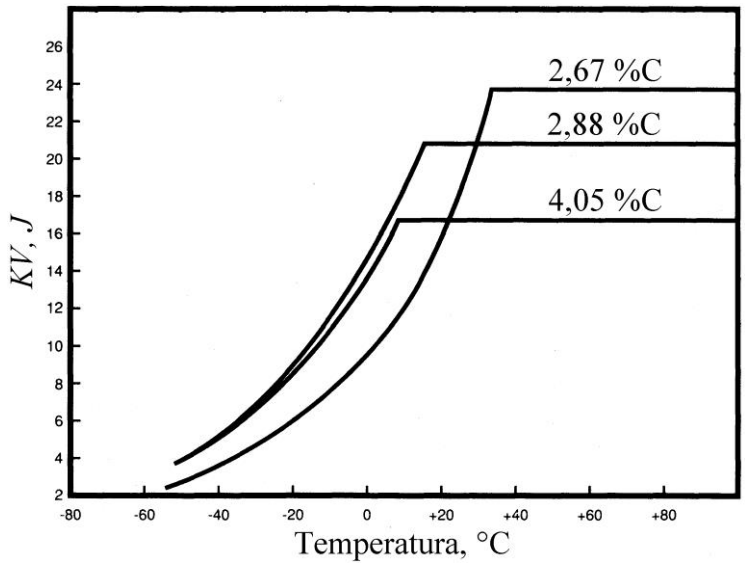
Tablica 2. Udjeli stalnih elemenata u odljevcima od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT za vjetroagregate [9, 28]

Element	mas. %
C	3,3 – 3,5
Si	1,9 – 2,2
S	0,008 – 0,012
P	< 0,03
Mn	< 0,15
Mg	0,04 – 0,045

Ugljik. S povećanjem udjela ugljika povećava se udio grafita u odljevku [9, 28, 33]. Na slici 13 može se vidjeti da se s porastom udjela ugljika u području žilavog loma, dakle pri višim temperaturama, smanjuje udarni rad loma, što je nepovoljno. Porast udjela ugljika može rezultirati povećanjem broja nodula/mm^2, a time se smanjuje prosječna udaljenost između njih [34]. Budući da grafitne nodule djeluju kao praznine, odnosno šupljine u metalnoj osnovi i da pukotina napreduje kroz metalnu osnovu nodularnog lijeva povezivanjem grafitnih nodula, očito je da prevelik broj nodula rezultira smanjenjem žilavosti u području žilavog loma, odnosno pri višim temperaturama [35].

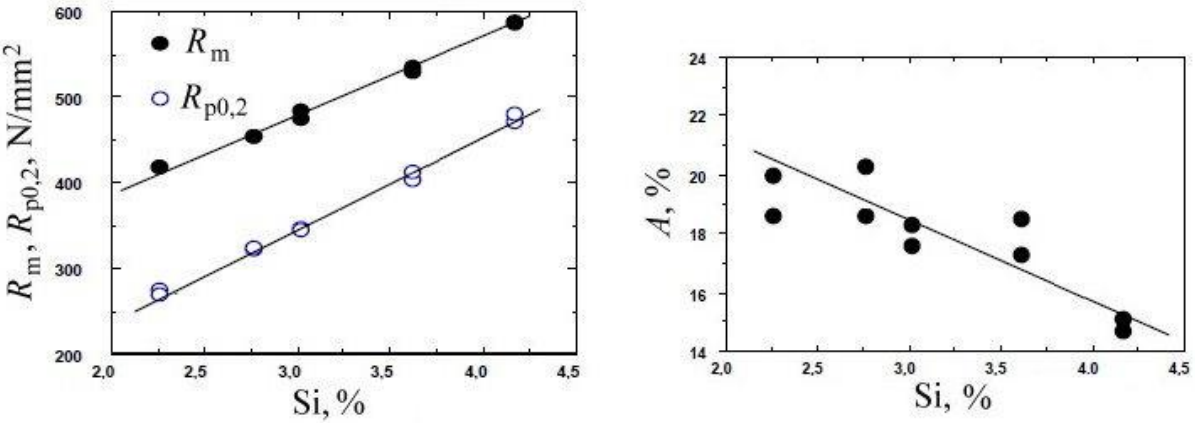
Međutim, postoji i pozitivan učinak povećanja udjela ugljika, a to je sniženje temperature prijelaza žilavog u krhki lom [9, 28]. Obzirom da je važno postići visoku žilavost, pogodniji je niži udio ugljika, premda se u tom slučaju povećava temperatura prijelaza žilavog

u krhki lom. Ustanovljeno je da udio ugljika u području od 3,3 do 3,5 % predstavlja najbolji kompromis [9, 28].



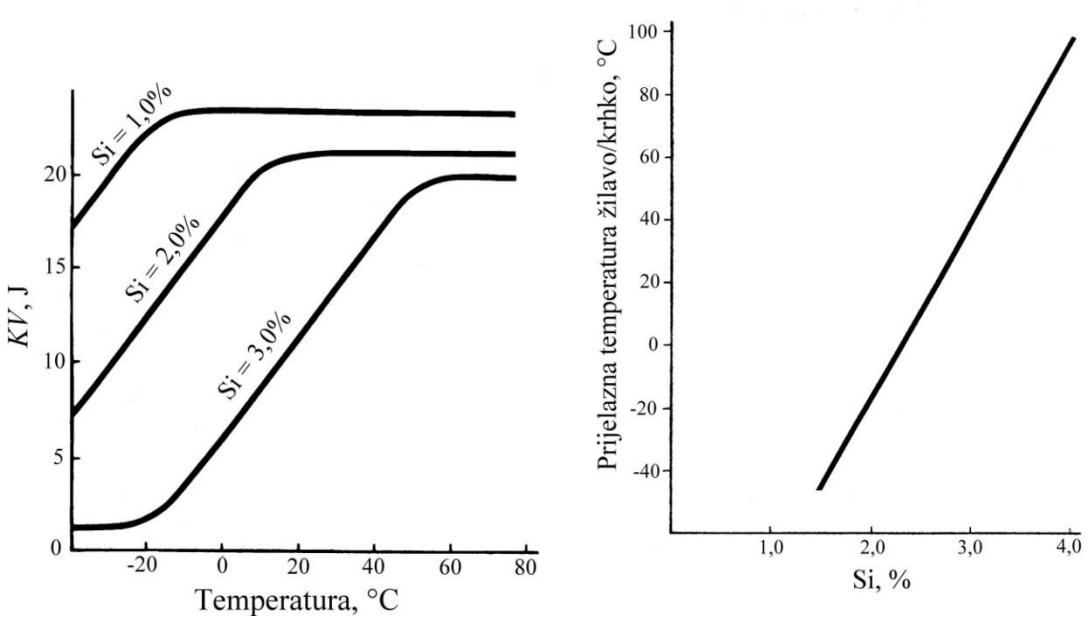
Slika 13. Utjecaj udjela ugljika na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [33]

Silicij. S porastom udjela silicija raste intenzitet očvršćivanja ferita, što dovodi do pada njegove plastičnosti [3, 28, 36 – 40]. Zbog toga s porastom udjela silicija raste vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i temperatura prijelaza žilavog u krhki lom, a opada istezanje i žilavost feritnog nodularnog lijeva (slike 14 i 15) [1, 9, 34, 41, 42]. Visok udio silicija može negativno utjecati na oblik grafita u debelostijenim odljevcima jer pospješuje stvaranje vrlo nepoželjnog *„chunky"* grafita koji značajno smanjuje istezanje i žilavost feritnog nodularnog lijeva [12, 43, 44]. Međutim, minimalni udio silicija u primarnoj talini je potreban radi zadržavanja njenog grafitizacijskog potencijala. Obzirom na sve navedene utjecaje, optimalni udio silicija u odljevcima od feritnog nodularnog lijeva za vjetroagregate kreće se od 1,9 do 2,2 % [9, 28, 45 - 47].



Slika 14. Utjecaj silicija na vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i istezanje feritnog nodularnog lijeva [38]

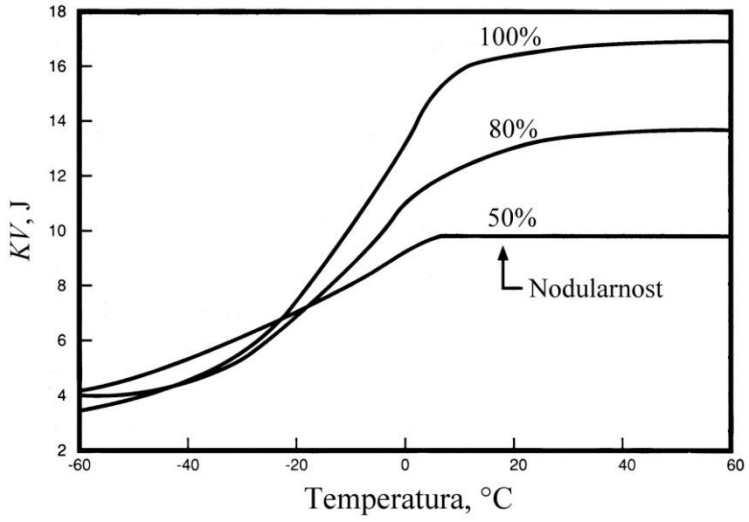
Ugljični ekvivalent (CE). Da bi se spriječila flotacija grafita i stvaranje vrlo nepoželjnog „*chunky*" grafita u toplinskom centru odljevka, ugljični ekvivalent trebao bi se nalaziti u granicama od 4,2 do 4,3 [8, 40].



a) b)

Slika 15. Feritni nodularni lijev: a) utjecaj udjela silicija na vrijednosti udarnog rada loma kod različitih temperaturama, b) utjecaj udjela silicija na temperaturu prijelaza žilavog u krhki lom [3]

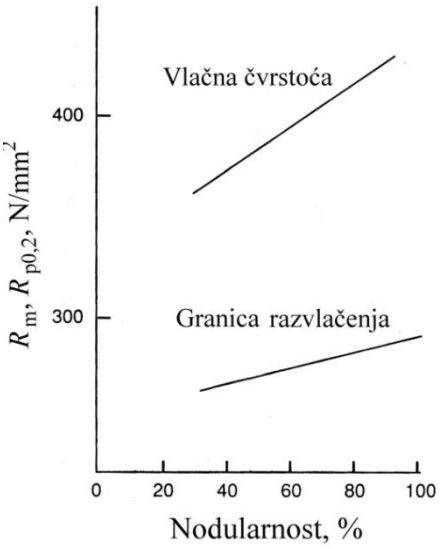
Sumpor. Udio sumpora treba biti nizak jer magnezij ima visok afinitet prema sumporu [1, 3]. Time se smanjuje raspoloživa količina magnezija za modifikaciju oblika grafita, što može rezultirati padom nodularnosti grafita. Za postizanje visoke žilavosti i visokog istezanja te propisane vlačne čvrstoće i granice razvlačenja potrebna je visoka nodularnost (slike 16 i 17) jer čestice grafita koje nisu sferične u većoj mjeri slabe metalnu osnovu od čestica sferičnog oblika.



Slika 16. Utjecaj nodularnosti grafita na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva [33]

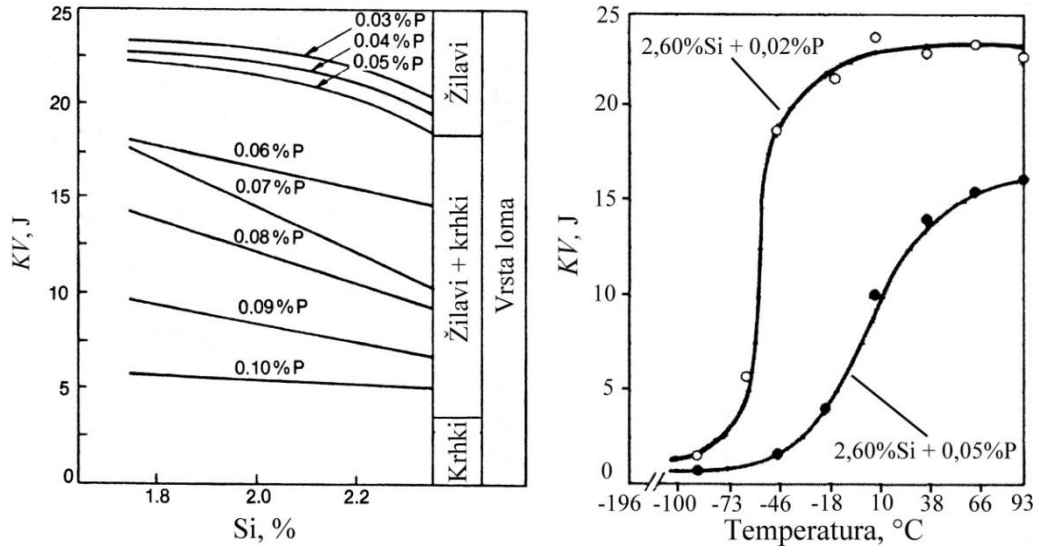
Reakcijama magnezija sa sumporom ujedno se povećava količina troske. To može rezultirati nemetalnim uključcima u odljevku. Međutim, prenizak udio sumpora nije povoljan jer čestice magnezijeva sulfida predstavljaju mjesta za nukleaciju grafita [1, 3]. Prema tome,

radi postizanja dobrog nukleacijskog potencijala i povećanja efikasnosti cijepljenja, minimalni udio sumpora treba iznositi 0,006 % [9, 28]. Udjeli sumpora > 0,012 % mogu negativno utjecati na nodularnost grafita [9, 28].



Slika 17. Utjecaj nodularnosti grafita na vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja feritnog nodularnog lijeva [33]

Fosfor. Na slici 18 može se vidjeti da fosfor povećava krhkost nodularnog lijeva, zbog čega se njegov udio mora održavati što nižim. Pad žilavosti i porast temperature prijelaza žilavog u krhki lom dodatno se povećavaju ako je uz povišen udio fosfora prisutan i povišen udio silicija (slika 18).

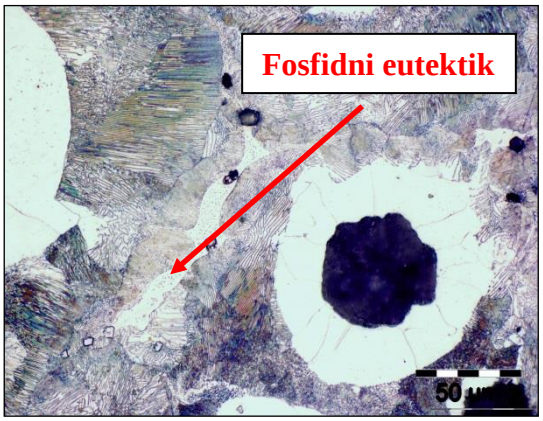


a) b)

Slika 18. Feritni nodularni lijev: a) utjecaj udjela fosfora i silicija na udarni rad loma, b) utjecaj udjela fosfora i silicija na temperaturu prijelaza žilavog u krhki lom [3]

Fosfor stvara steadit, odnosno eutektik koji ima nisku temperaturu taljenja i koji segregira po granicama zrna tijekom skrućivanja (slika 19) [1, 3, 33, 34, 41]. U debelostijenim

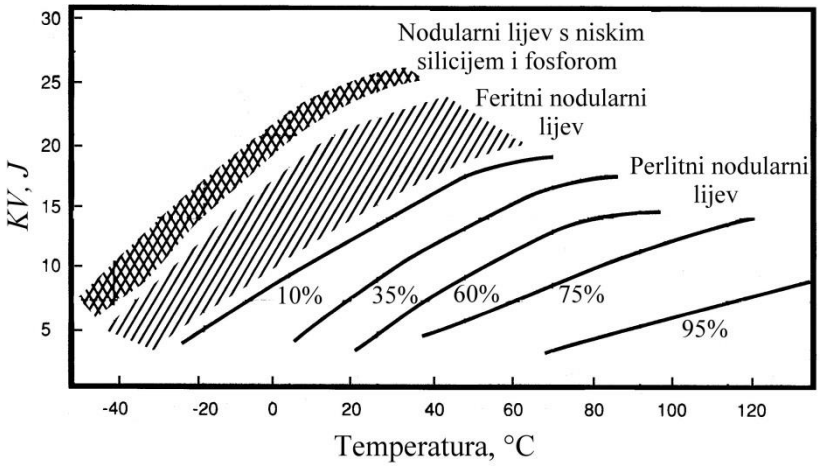
odljevcima, kao što su odljevci za vjetroagregate, granice zrna mogu sadržavati i 10 puta više fosfora od njegovog prosječnog udjela [9]. Zbog toga udio fosfora u odljevcima od feritnog nodularnog lijeva za vjetroagregate treba biti < 0,03 %, poželjno < 0,025 % [9].



Slika 19. Metalografska snimka mikrostrukture nodularnog lijeva u nagrizenom stanju koji sadrži 0,085 % P [1]

Ako u mikrostrukturi odljevka nema steadita, bez obzira na to atomi fosfora i dalje imaju negativan utjecaj na svojstva nodularnog lijeva jer su prisutni po granicama zrna i na taj način slabe njihovu povezanost.

Mangan. Mangan segregira po granicama zrna, posebno u debelostijenim odljevcima jer sporo skrućuju i promovira stvaranje perlita u tim područjima [3, 9, 48]. Na slici 20 može se vidjeti da perlit povećava krhkost nodularnog lijeva. Budući da stvara perlit, udio mangana u odljevcima od nodularnog lijeva za vjetroagregate treba biti < 0,15 % [9].



Slika 20. Utjecaj metalne osnove na udarni rad loma nodularnog lijeva [33]

Bakar, kositar, antimon, olovo, bizmut i arsen. Navedeni elementi promoviraju stvaranje perlita, zbog čega njihov udio treba biti što niži. Perlitni faktor (P_x) pruža informaciju o utjecaju kemijskog sastava na strukturu metalne osnove [8, 49, 50]:

$$P_x = 3{,}0\ (\%\ \mathrm{Mn}) - 2{,}65\ (\%\ \mathrm{Si} - 2{,}0) + 7{,}75\ (\%\ \mathrm{Cu}) + 90\ (\%\ \mathrm{Sn}) + 357\ (\%\ \mathrm{Pb}) + \\ + 333\ (\%\mathrm{Bi}) + 20{,}1\ (\%\mathrm{As}) + 9{,}60\ (\%\mathrm{Cr}) + 71{,}7\ (\%\mathrm{Sb}) \qquad (1)$$

Osim elemenata sadržanih u formuli za perlitni faktor, treba uzeti u obzir i utjecaj fosfora na metalnu osnovu jer ima ~ 10 puta jači učinak od mangana (tablica 3) [49, 50].

Tablica 3. Relativna efikasnost stvaranja perlita pojedinih elemenata [49]

Element	Efikasnost stvaranja perlita
Sn	39
Mo	7,9
P	5,6
Cu	4,9
Ti	4,4
Mn	0,44
Ni	0,37
Cr	0,37

Osnovni uvjeti za dobivanje feritne metalne osnove u lijevanom stanju su: P < 0,03 %, Mn < 0,15 %, P_x < 2 [8, 49].

Magnezij. Ciljani udio magnezija iznosi 0,04 % radi postizanja visoke nodularnosti [9]. Udjeli magnezija > 0,045 % nisu poželjni jer se povećava stvaranje troske, a time i opasnost od nemetalnih uključaka u odljevcima [9, 28].

Karbidotvorni elementi (krom, vanadij, molibden, bor, niobij, telur, volfram, titan, mangan). Budući da mikrostrukturi odljevaka od feritnog nodularnog lijeva nije dopuštena prisutnost karbida, udio karbidotvornih elemenata treba biti što niži [1, 3, 39, 51].

Nikal. Dodatkom nikla povećava se granica razvlačenja i vlačna čvrstoća feritnog nodularnog lijeva bez negativnog utjecaja na istezanje i žilavost [1, 3, 9, 49]. Zbog toga se često primjenjuje u feritnom nodularnom lijevu kada postizanje propisane vlačne čvrstoće i visokog istezanja predstavlja problem. Međutim, udjeli nikla ne smiju biti visoki jer promovira stvaranje perlita (tablica 2.5) te u kombinaciji s visokim ugljičnim ekvivalentom (CE) može dovesti do stvaranja vrlo nepoželjnog „*chunky*“ grafita [52]. Osim toga, dodatak od 1 % nikla povećat će temperaturu prijelaza žilavog u krhki lom za 10 °C [33].

Elementi rijetkih zemalja, kao što su **cerij, lantan, praseodimij i neodimij** djeluju kao nodulatori jer imaju visok afinitet prema kisiku i sumporu [3, 52]. Ako se dodaju u odgovarajućim količinama uz magnezij, dolazi do povećanja broja nodula [3]. Međutim, prekomjerni udjeli u debelostijenim odljevcima, zbog sporog skrućivanja i segregacije tih elemenata po granicama austenitnih zrna, mogu rezultirati degeneracijom grafita i stvaranjem vrlo nepoželjnog „*chunky*“ grafita [3, 52].

Negativan utjecaj elemenata rijetkih zemalja na oblik grafita u debelim stijenkama može neutralizirati dodavanjem vrlo male količine bizmuta (do ~ 0,003 %) ili antimona (do ~ 0,008 %) putem cjepiva [8, 39, 40, 43, 50, 53 – 62]. Kao rezultat reakcije bizmuta, odnosno antimona s elementima rijetkih zemalja nastaju intermetalni spojevi na kojima se može izlučiti grafit. Na taj način eliminira se negativan utjecaj elemenata rijetkih zemalja u debelim stijenkama te poboljšava nodularnost i povećava broj nodula. Međutim, treba imati na umu da količina dodanog bizmuta, odnosno antimona mora biti vrlo točno prilagođena udjelu elemenata rijetkih zemalja i debljini stijenke odljevka, što je vrlo zahtjevan zadatak. Prevelik udio bizmuta, odnosno antimona u odnosu na udio elemenata rijetkih zemalja može negativno

djelovati na oblik grafita. Pored toga, bizmut i antimon su jaki promotori perlita (jednadžba 1), zbog čega prevelik dodatak može rezultirati stvaranjem perlita u metalnoj osnovi.

Antinodularizatori (aluminij, arsen, kositar, titan, antimon, olovo, bizmut, kadmij). Navedeni elementi, čak u vrlo malim udjelima, negativno utječu na nodularnost grafita [1, 3, 39, 40, 50, 51]. Za vrijeme skrućivanja segregiraju po granicama zrna austenita, zbog čega dolazi do stvaranja uskih tekućih kanala preko kojih je grafitna nodula u kontaktu s ostatkom taline. Budući da grafitna nodula nije potpuno obavijena austenitnom ovojnicom, ugljik iz taline nejednoliko difundira ka grafitnoj noduli [43, 44]. To u konačnici rezultira degeneracijom nodula te padom mehaničkih svojstava feritnog nodularnog lijeva. Sumarni učinak antinodularizatora na nodularnost grafita može se izraziti pomoću faktora antinodularnosti (Thielmanova faktora) [8, 50, 63]:

$$K_1 = 4{,}4\ (\%\ \mathrm{Ti}) + 2{,}0\ (\%\ \mathrm{As}) + 2{,}4\ (\%\ \mathrm{Sn}) + 5{,}0\ (\%\ \mathrm{Sb}) + 290\ (\%\ \mathrm{Pb}) + 370\ (\%\ \mathrm{Bi}) + 1{,}6\ (\%\ \mathrm{Al}) \quad (2)$$

Vrijednost K_1 faktora treba biti < 1 radi postizanja visoke nodularnosti [8]. Negativan utjecaj antinodularizatora do K_1 = 2 može se neutralizirati pravilnim dodatkom elemenata rijetkih zemalja [8, 43, 50, 54]. U slučajevima kada je $K_1 < 1{,}2$ koristan je dodatak elemenata rijetkih zemalja, a ako je $K_1 > 1{,}2$ dodatak elemenata rijetkih zemalja je obavezan [8, 50]. Međutim, udio elemenata rijetkih zemalja mora biti točno podešen prema udjelu štetnih elementa. To je vrlo zahtjevan zadatak obzirom da se radi o vrlo malim udjelima, koje oprema za analizu kemijskog sastava u ljevaonicama često ne može detektirati ili nije u mogućnosti točno odrediti.

5.3 Uložni materijali i izrada taline

Štetni utjecaji segregacije elemenata koje se javljaju zbog sporog skrućivanja debelostijenih odljevaka mogu se smanjiti kontrolom čistoće, odnosno kemijskog sastava uložnih materijala i povećanjem broja grafitnih nodula, odnosno eutektičnih ćelija. Metalni uložak sastoji se od sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog nodularnog lijeva (tablica 4) [8, 9, 49, 51].

Tipični metalni uložak sadrži 40 % do 60 % specijalnog sirovog željeza koje sadrži nizak udio rezidualnih elemenata (fosfora, mangana, bakra, kroma itd.) i štetnih elemenata (olova, kositra, antimona, bizmuta, arsena itd.) [9, 51]. Prisutnost specijalnog sirovog željeza u metalnom ulošku je vrlo korisna, ne samo radi kontrole perlitnog faktora (P_x) i faktora antinodularnosti (K_1), već i radi poboljšanja metalurške kvalitete taline.

U čeličnom otpadu, koji je nužno dodati radi sniženja udjela ugljika u talini, udio fosfora, mangana te ostalih elemenata koji promoviraju stvaranje perlita i karbida, kao i elemenata koji otežavaju stvaranje nodularnog grafita treba biti što niži [8, 9, 49, 51]. Pored toga, na čeličnom otpadu ne smije biti zaštitnih prevlaka i boje. Udio kvalitetnog čeličnog otpada u metalnom ulošku obično se kreće do 20 % [51].

Povratni feritni nodularni lijev iz procesa proizvodnje odljevaka za vjetroagregate je visokokvalitetan materijal i može se koristiti kao komponenata metalnog uloška. Udio u metalnom ulošku obično se kreće od 30 do 60 % [8, 51].

Udio silicija u primarnoj talini obično je manji od 1 % [8]. Prilagođava se prema naknadnoj nodulaciji i cijepljenju jer tijekom tih faza povećava se udio silicija u nodularnom lijevu zbog doprinosa iz predlegure za obradu i cjepiva. Ako je udio silicija prenizak, može se povisiti dodatkom ljevaoničkog FeSi u peć koji sadrži nizak udio kalcija i aluminija. Nakon

dodatka FeSi korisno je talinu zagrijati na min. 1580 °C i zadržati na toj temperaturi 10 min. [8].

Tablica 4. Komponente metalnog uloška, njihove prednosti i nedostatci [8]

Materijal	Argumenti	Mogući problemi
Specijalno sivo sirovo željezo	- Najveći doprinos ugljika, - Najniži udio silicija, mangana, sumpora i štetnih elemenata, - Visoka metalurška kvaliteta taline i visok grafitizacijski potencijal, - Ekonomično taljenje, - Manje grešaka zbog volumnog stezanja, - Poboljšana svojstva nodularnog lijeva.	- Najviša cijena - Ograničena dostupnost
Čelični otpad	- Najniža cijena, - Dostupan materijal, - Niži doprinos silicija, - Moguć je nizak udio mangana, fosfora i sumpora, - Moguć je nizak udio štetnih elemenata.	- Uglavnom sadrži > 0,4 % mangana, - Sadrži krom, nikal, bakar, kositar, kadmij, olovo, antimon, - Prevlake (sadrže kositar, olovo), - Izvor oksida željeza i mangana, - Troškovi obrade.
Povratni nodularni lijev	- Dostupan materijal, - Posebna kvaliteta: kontrolirani udio mangana, fosfora i ugljika, nizak udio štetnih elemenata, nizak udio sumpora i kisika.	- Visok doprinos silicija, - Mješavina više kvaliteta.

Predobrada primarne taline sa SiC ili Al-Zr-Ca-FeSi sredstvom za predobradu također je preporučljiva radi poboljšanja nodularnosti i povećanja broja nodula [8, 9].

Indukcijska peć je vrlo pogodan agregat za proizvodnju feritnog nodularnog lijeva za vjetroagregate jer se lako i precizno može kontrolirati kemijski sastav. Da bi se zadržala potrebna visoka metalurška kvaliteta taline i visok nukleacijski potencijal, talina se ne smije dugo držati na temperaturama > 1500 °C [9].

5.4 Obrada magnezijem

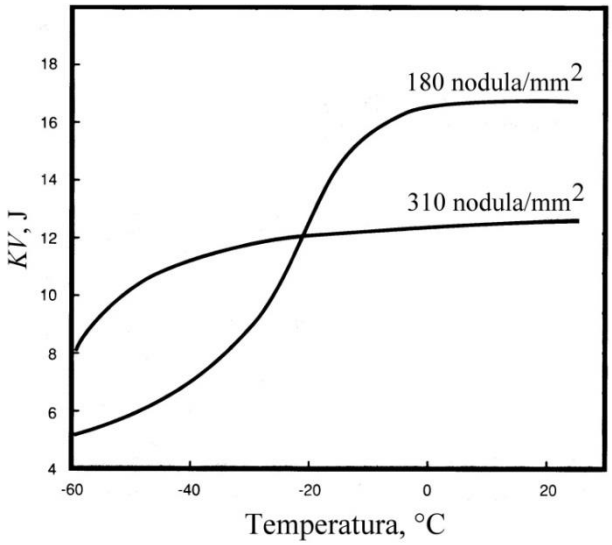
Za nodulaciju upotrebljavaju se predlegure koje sadrže do 7 % magnezija [8]. Metode obrade koje koriste čisti magnezij ili predlegure s visokim udjelom magnezija mogu rezultirati prekomjernom dezoksidacijom taline, što negativno utječe na njen nukleacijski potencijal i zbog toga nisu preporučljive. Budući da se talina proizvodi iz visokokvalitetnih uložnih materijala koji sadrže vrlo mali udio antinodularizatora, ukupan udio elemenata rijetkih zemalja u predleguri treba biti nizak (< 0,5 %) [8]. Previsok udio elemenata rijetkih zemalja može rezultirati stvaranjem eksplodiranog i „*chunky*“ grafita. Udio kalcija u predleguri također mora biti nizak jer promovira stvaranje „*chunky*“ grafita [8, 40]. Predlegure nikal-magnezij nude određene prednosti. Osim što se minimalizira unos silicija u talinu tijekom obrade, legiranje s niklom povoljno utječe na vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja bez negativnog utjecaja na žilavost. Obzirom da se radi o niskim udjelima nikla, ne dolazi do stvaranja perlita.

Postupak nodulacije u loncu s poklopcem posebno je pogodan za proizvodnju odljevaka od nodularnog lijeva za vjetroagregate jer omogućuje obradu velike količine taline u kontroliranim uvjetima [8, 9].

5.5 Cijepljenje

Cijepljenje je ključna faza u procesu proizvodnje za postizanje visokog broja nodula. Visok broj nodula je nužan da bi se spriječile segregacije fosfora i elemenata koji promoviraju stvaranje perlita i karbida te da bi se izbjegla poroznost. Treba upotrijebiti snažna cjepiva s dobrom otpornosti na odgor, kao što su cjepiva koja sadrže barij [8, 9, 64]. Cijepljenje treba provesti u dva koraka. Tijekom ispusta taline iz peći u lonac u mlaz taline treba dodati 0,4 do 0,8 % cjepiva [9]. Kasno cijepljenje (u mlaz ili u kalupu) treba provesti dodatkom 0,1 do 0,2 % cjepiva [9]. Ako je otežano dodavanje cjepiva u mlaz taline prilikom lijevanja u kalup, cjepivo u obliku bloka određenog kemijskog sastava, veličine i mase smješta se u uljevnu čašu ili uljevni sustav u kalupu [64]. Stvaranje nepravilnih oblika grafita (posebno „*chunky*“ grafita) može se izbjeći i istovremeno ostvariti visok broj nodula i visoka nodularnost kontroliranim dodatkom cjepiva koje sadrži barij (FeSiBa) u kombinaciji sa specijalnim cjepivom koje sadrži bizmut i elemente rijetkih zemalja (FeSiBiRE) ili u kombinaciji sa specijalnim cjepivom koje sadrži antimon i elemente rijetkih zemalja (FeSiSbRE) [43, 65].

Dodatak cjepiva uvijek treba prilagoditi da se postigne optimalni broj nodula u debelostijenim odljevcima (100 – 200 nodula/mm^2) [9]. Prenizak broj nodula nije povoljan. Također ni prevelik broj nodula nije povoljan jer negativno utječe na vlačnu čvrstoću, ali i udarni rad loma u području žilavog loma, dakle pri višim temperaturama (slika 21). Međutim, na slici 21 mogu se vidjeti i pozitivne strane velikog broja nodula, a to je sniženje temperature prijelaza žilavog u krhki lom, te porast žilavosti na vrlo niskim temperaturama (< - 20 °C).



Slika 21. Utjecaj broja nodula u feritnom nodularnom lijevu na udarni rad loma [33]

5.6 Izrada kalupa

Kruti i kompaktni kalupi ključni su element za primjenu samonapajanja i proizvodnju debelostijenih odljevaka bez poroznosti i usahlina [8, 9, 51]. Zbog toga se uglavnom izrađuju od različitih kemijski vezanih mješavina, obično s furanskim ili fenolnim vezivom. Pri tome treba obratiti pažnju na sastav komponenti mješavine da bi se izbjegao visok udio sumpora u mješavini i s tim povezana degeneracija grafita u površinskom sloju odljevka [8, 28, 63, 66 – 70]. Toluen sulfonska kiselina koja se koristi za očvršćivanje fenolne smole ili furanskog veziva značajan je izvor sumpora. Zbog toga se njen udio mora što je moguće više smanjiti.

Kao alternativno sredstvo za očvršćivanje koristi se fosforna kiselina, koja se miješa s toluen sulfonskom kiselinom ili se koristi samostalno. Negativna strana tog pristupa je povećanje udjela fosfora u kalupnoj mješavini. Talina nodularnog lijeva može vezati fosfor iz kalupne mješavine, što je vrlo nepovoljno. Istraživanjima je ustanovljeno da se dobri rezultati postižu s trokomponentnim sredstvom za očvršćivanje koji sadrži jednake udjele toluen sulfonske, fosforne i mliječne kiseline uz smanjenje dodatka furanskog veziva s 1,2 na 0,9 % u odnosu na masu pijeska [63]. Budući da u regeneriranom pijesku postepeno raste udio sumpora i fosfora, kalupi se obično izrađuju od 60 % regeneriranog i 40 % novog pijeska [63].

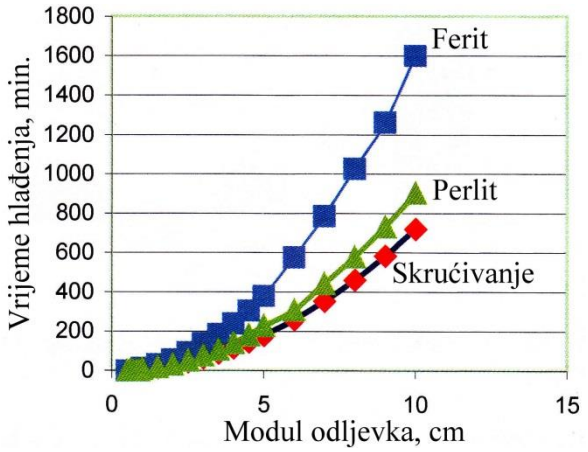
U kalupima za lijevanje debelostijenih odljevaka za vjetroagregate često se koriste filtri da bi se izbjegla prisutnost uključaka u odljevcima. Prakticira se i upotreba hladila u kritičnim područjima da bi se eliminirala potreba za pojilima [9, 51]. Kalupna šupljina obično se premazuje s dva premaza [8, 28, 63]. Premaz baziran na CaO ili MgO koristi se da bi se izbjeglo vezanje sumpora u talinu, a premaz na osnovi cirkonijevog oksida upotrebljava se radi povećanja vatrostalnosti. Ventilacijski otvori moraju biti dovoljno veliki da bi se omogućilo brzo punjenje kalupa.

5.7 Temperatura lijevanja

Temperatura lijevanja debelostijenih odljevaka od feritnog nodularnog lijeva obično je manja od 1350 °C [8]. Treba je pažljivo odrediti ovisno o debljini stijenke odljevka i korištenoj metodi napajanja. Poželjno je da se primjeni samonapajanje jer odljevci imaju debele stijenke, tj. visok modul i lijevaju se u krute kalupe, a talina ima visoku metaluršku kvalitetu. Da bi samonapajanje bilo učinkovito, pored navedenih uvjeta bitna je i niska temperatura lijevanja.

5.8 Uklanjanje odljevka iz kalupa

Vrijeme hlađenja odljevka u kalupu mora biti dovoljno dugo da se izbjegne/minimalizira stvaranje perlita [9]. Na slici 22 prikazano je preporučeno vrijeme hlađenja u kalupu ovisno o modulu odljevka da bi se dobila feritna metalna osnova. Radi usporedbe, prikazana su i vremena hlađenja u cilju postizanja perlitne metalne osnove.



Slika 22. Preporučena vremena hlađenja u kalupu ovisno o željenoj strukturi metalne osnove i modulu odljevka od nodularnog lijeva [9]

6. ZAKLJUČAK

Feritni nodularni lijev kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT pogodan je materijal za gradnju mnogih debelostijenih komponenti vjetroagregata. Budući da se u svijetu planira značajno povećanje broja instaliranih vjetroagregata u narednih 15 godina, očito je da će porasti i potražnja za odljevcima od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT.

Proizvodnja debelostijenih odljevaka od feritnog nodularnog lijeva kvalitete HRN-EN-GJS-400-18-LT je zahtjevan zadatak i izazov za ljevaonice, jer se mora ostvariti visoka nodularnost (> 95 %), relativno visok broj nodula (100 – 200 nodula/mm^2) i potpuno feritna metalna osnova u lijevanom stanju bez karbida i fosfidnog eutektika. Da bi se to postiglo potrebno je sljedeće:

- ostvariti propisani kemijski sastav: 3,3 do 3,5 %C, 1,9 do 2,2 %Si, 0,008 do 0,012 %S, < 0,03 %P, < 0,15 %Mn, 0,04 do 0,045 %Mg, uz što niži udio elemenata rijetkih zemalja (Ce, La, Pr, Nd itd.), što niži udio elemenata koji promoviraju stvaranje perlita (Cu, Sn. Sb, Pb, Bi, As) i karbida (Cr, V, Mo, B, Nb, Te, W, Ti, Mn) te što manji udio antinodularizatora (Al, As, Sn, Ti, Sb, Pb, Bi, Cd),
- neutralizirati eventualno prisutne elemente rijetkih zemalja dodatkom Bi (do ~ 0,003 %) ili Sb (do ~ 0,008 %). Dodatak Bi ili Sb mora se točno prilagoditi udjelu elemenata rijetkih zemalja i debljini stijenke odljevka,
- neutralizirati eventualno prisutne antinodularizatore dodatkom elemenata rijetkih zemalja koji mora biti točno prilagođen udjelu antinodularizatora i debljini stijenke odljevka,
- koristiti kvalitetan metalni uložak: 40 % do 60 % specijalnog sirovog željeza s niskim udjelom rezidualnih elemenata (P, Mn, Cu, Cr …) i štetnih elemenata (Pb, Sn, Sb, Bi, As …), do 20 % kvalitetnog čeličnog otpada sa što nižim udjelom P, Mn, antinodularizatora i elemenata koji promoviraju stvaranje perlita i karbida, te 30 do 60 % povratnog feritnog nodularnog lijeva,
- provesti predobradu primarne taline sa SiC ili Al-Zr-Ca-FeSi sredstvom za predobradu,
- primarnu talinu izraditi u indukcijskoj peći,
- izbjeći dugo zadržavanje primarne taline u peći i na temperaturama > 1500 °C,
- nodulaciju provesti u loncu s poklopcem uz primjenu predlegure FeSiMg koja sadrži do 7 %Mg, < 0,5 %RE i nizak udio Ca. Pogodne su i predlegure FeNiMg,
- cijepljenje provesti u dva koraka: 0,4 do 0,8 % cjepiva dodati u mlaz taline tijekom ispusta iz peći u lonac i potom 0,1 do 0,2 % cjepiva dodati u mlaz taline tijekom lijevanja u kalup ili ga dodati u kalup u obliku bloka. Pogodna su cjepiva koja sadrže barij (FeSiBa) u kombinaciji s cjepivom FeSiBiRE ili cjepivom FeSiSbRE,
- kalupe i jezgre izraditi od kemijski vezanih mješavina, s tim da se posebna pažnja obrati na sastav komponenti mješavine radi izbjegavanja visokog udjela sumpora u njoj,
- kalupnu šupljinu premazati premazom na osnovi CaO ili MgO te premazom na osnovi cirkonijevog oksida,
- postaviti filtre u kalup i po potrebi hladila u kritična područja,
- izraditi dovoljno velike ventilacijske otvore u kalupu,
- temperatura lijevanja treba biti < 1350 °C,
- odljevke dovoljno dugo zadržati u kalupu radi sporog hlađenja,
- pažljivo kontrolirati sve ulazne sirovine i sve procesne parametre,
- striktno se pridržavati propisane tehnologije i dokumentirati sve procesne parametre.

7. LITERATURA

[1] Z. Glavaš, F. Unkić, Lijevanje željeznih metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2009.

[2] Z. Glavaš, Osnove lijevanje metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2014.

[3] M. Gagné, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 2004.

[4] …, A Modern Casting Staff Report, 49th Census of World Casting Production, Modest Growth in Worldwide Casting Market, Modern Casting 105(2015) 12, 26 – 31.

[5] http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart

[6] https://yearbook.enerdata.net/world-electricity-production-map-graph-and-data.html

[7] https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljiva_energija

[8] I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, Performance of heavy ductile iron castings for windmills, China Foundry 7(2010) 2, 163 - 170.

[9] H. Roedter, M Gagné, Ductile Iron for Heavy Section Wind Mill Castings: A European Experience, The Ductile Iron Society's 2003 Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron, Cosponsored by AFS/Modern Casting, Crowne Plaza Resort, Hilton Head, South Carolina, October 20 - 23, 2003, 176 – 183.

[10] I. Dugić, Ductile Iron for the Wind Power Industry, Proceedings book of 13th International Foundrymen Conference, Innovative Foundry Processes and Materials, ed. F. Unkić, Opatija, Croatia, May, 16-17, 2013, 97 - 108.

[11] H. Roedter, "Powerful Ductile Iron Castings for Wind Energy Applications, Sorelmetal Suggestions for Ductile Iron Production, Data Sheet No. 110, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montreal, Canada, March 2006, http://www.sorelmetal.com/en/publi/PDF/110_EN.pdf

[12] M. Shirani, G. Härkegård, A review on fatigue design of heavy section EN-GJS-400-18-LT ductile iron wind turbine castings, Energy Equipment and Systems 2(2014), 5 – 24.

[13] …, Global Wind Statistics 2015, Global Wind Energy Council (GWEC), 10.02.2016, http://www.gwec.net/global-figures/graphs/

[14] http://www.gwec.net/global-figures/wind-in-numbers/

[15] …, Wind in Power, 2015 European Statistics, The European Wind Energy Association (EWEA), February 2016, http://www.ewea.org/statistics/european/

[16] …, Wind Energy Scenarios for 2030, The European Wind Energy Association (EWEA), August 2015, http://www.ewea.org/publications/reports/wind-energy-scenarios-for-2030/

[17] https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroagregat

[18] https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine#/media/File:Windmills_D1-D4_%28Thornton_Bank%29.jpg

[19] http://windgenerator-plans.blogspot.hr/2010/04/vertical-wind-turbines.html

[20] http://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/02/meet-the-new-worlds-biggest-wind-turbine.html

[21] http://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines

[22] http://www.powermag.com/generation-of-vestas-8-mw-offshore-wind-prototype-begins/

[23] http://www.wwindea.org/technology/ch01/imgs/1_2_img1.jpg

[24] N. Dizdarević, M. Majstorović, S. Žutobradić, Pogon vjetroelektrana, http://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&ved=0CFsQFjAMahUKEwjI54mZxLIAhVGCiwKHW2QBEk&url=http%3A%2F%2Fwww.eihp.hr%2F~ndizdar%2FENERGIJA03b.pdf&usg=AFQjCNFak-rejPyE6m8hAJFuTLzHsh4HA
[25] http://energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0
[26] http://www.koncar-ket.hr/podrucja_djelovanja/obnovljivi_izvori/vjetroagregati
[27] https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijelovi_vjetroagregata
[28] S. K. Sharma, Controlling in-situ Microstructure of S. G Iron Castings, Proceedings book of 71st World Foundry Congress, Advanced Sustainable Foundry, 19 – 21 May 2014, Palacio Euskalduna, Bilbao, Spain, 1 – 9.
[29] https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design#/media/File:Connecting_Hub_to_Turbine_Tower_No_11_-_geograph.org.uk_-_787410.jpg
[30] https://www.gmdu.netproduct-29538.html
[31] http://www.salvex.commediadocument1Wind%20turbine%20hub.pdf
[32] http://www.mezgergroup.com/unternehmen/gussatlas/sphaeroguss/metallographie-verwendungszweck/
[33] …, Ductile Iron Data for Design Engineers, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 1998.
[34] S. Komatsu, T. Shiota, K. Nakamura, Influences of Silicon, Phosphorus and Carbon Contents on Transition Behaviors of Fracture Toughness in Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron, Physical Metallurgy of Cast Iron IV, ur. G. Ohira, T. Kusakawa, E. Niyama, Materials Research Society, Tokyo, 4 - 6 September, 1989., 313 - 320.
[35] S. Komatsu, T. Shiota, T. Matsuoka, K. Nakamura, Effects of Several Main Factors on Ductile-Brittle Transition Behaviors of Fracture Toughness in SG Cast Iron, AFS Transactions 102(1994), 121 - 125.
[36] R. Larker, Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators, China Foundry 6(2009) 4, 343 – 351.
[37] L. E. Björkegren, K. Hamberg, Silicon Alloyed Ductile Iron with Excellent Ductility and Machinability, Proceedings of 2003 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, Crown Plaza Resort, Hilton Head, South Carolina, 20 - 23 October, 2003, 70 – 90.
[38] R. Larker, Solution Strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators, Proceedings of 2008 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, Las Vegas, Nevada, 20 – 22 October 2008, 169 – 177.
[39] A. Javaid, C. R. Loper, Jr., Production of Heavy-Section Ductile Cast Iron, AFS Transactions 103(1995), 135 – 150.
[40] H. W. Hoover, Jr., A Literature Survey on Degenerate Graphite in Heavy Section Ductile Iron, AFS Transaction 94(1986), 601 – 608.
[41] S. Komatsu, T. Shiota, Influences of Silicon and Phosphorus Contents and Cooling Rate on J_{IC} Fracture Toughness of Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron, Proceedings of the Third International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron, The Physical Metallurgy of Cast Iron, ur. H. Fredriksson, M. Hillert, Elsevier Science Publishing Company, Stockholm, Sweden, 29 - 31 August 1984., 517 - 526.
[42] D. Venugopalan, A. Alagarsamy, Effects of Alloy Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of Commercial Ductile Iron, AFS Transactions 98(1990), 395 - 400.

[43] P. Ferro, A. Fabrizi, R. Cervo, C. Carollo, Effect of Inoculants Containing Rare Earth Metals and Bismuth on Microstructure and Mechanical Properties of Heavy-Section Near-Eutectic Ductile Iron Castings, Journal of Materials Processing Technology 213(2013) 9, 1601 – 1608.
[44] J. Zhou, Spheroidal Graphite Cast Iron (II), China Foundry, 7(2010) 2, 183 – 198.
[45] F. Unkić, N. Gavranović, M. Vasilić, S. Hren, Effect of Silicon Content on Microstructures and Mechanical Properties of Spheroidal Graphite Cast Iron Grade EN-GJS-400-18-LT, Hommes & Fonderie N^{o} 356, Juin/Juillet 2005., 50 - 58.
[46] F. Unkić, N. Gavranović, M. Vasilić, Utjecaj Metalurških parametara na svojstva nodularnog lijeva kvalitete EN-1563-GJS-400-18-LT, Zbornik 3. međunarodnog savjetovanja ljevača, Suvremeni postupci proizvodnje odljevaka od željeznog lijeva, ur. F. Unkić, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 11.- 12. listopada 2000., 77 - 86.
[47] E. N. Pan, W. S. Hsu, C. R. Loper, Jr., Effects of Some Variables on the Matrix and Mechanical Properties of Ferritic Ductile Irons, AFS Transactions 96(1988), 645 - 660.
[48] L. Guerin, M. Gagné, Effect of Mn, Cu and Sn on the Microstructure and Properties of Ductile Iron Castings, The Foundryman 80(1987) 8/9, 336 - 344.
[49] I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, Influencing factors on as-cast and heat treated 400-18 ductile iron grade characteristics, China Foundry 4(2007) 4, 300 - 303.
[50] I. Riposan, M. Chisamera, V. Uta, S. Stan, The Importance of Rare Earth Contribution From Nodulizing Alloys and Their Subsequent Effect on the Inoculation of Ductile Iron, International Journal of Metalcasting 8(2014) 2, 65 – 80.
[51] G. Schlagl, The 8 Rules to Manufacture Ductile Iron with High Impact Strength at Low Temperatures (EN GJS-400.18 LT), Proceedings book of 13th International Foundrymen Conference, Innovative Foundry Processes and Materials, ed. F. Unkić, Opatija, Croatia, May, 16-17, 2013, 338 - 346.
[52] Elkem Foundry products, Overview of alloying elements and their effects in ductile iron, Technical information 12B, http://www.scribd.com/doc/74039009/Elkem-Alloying-Elements-and-Their-Effects#scribd
[53] J. Zhou, Spheroidal Graphite Cast Iron (III), China Foundry, 7(2010) 3, 292 – 307.
[54] E. N. Pan, C. Y. Chen, Effects of Bi and Sb on graphite structure of heavy-section ductile cast iron, ASF Transaction 104(1996), 845 – 858.
[55] L. Zhe, C. Weiping, D. Yu, Influence of cooling rate and antimony addition content on graphite morphology and mechanical properties of a ductile iron, China Foundry 9(2012) 2, 114 – 118.
[56] H. Nakae, M. Fukami, T. Kitazawa, Y. Zou, Influence of Si, Ce, Sb and Sn on chunky graphite formation, China Foundry 8(2011) 1, 96 – 100.
[57] B. C. Liu, T. X. Li, Z. J. Rue, X. Y. Yang, E. Q. Huo, C. R. Loper, Jr., The Role of Antimony in Heavy-Section Ductile Iron, AFS Transaction 98(1990), 753 – 757.
[58] P. Larrañaga, I. Asenjo, J. Sertucha, R, Suárez, I. Ferrer, J. Lacaze, Effect of Antimony and Cerium on the Formation of Chunky Graphite during Solidification of Heavy-Section castings of Near-Eutectic Spheroidal Graphite Irons, Metallurgical and Materials Transactions A 40A(2009) 3, 654 – 661.
[59] J. Lacaze, I. Asenjo, S. Méndez, J. Sertucha, P. Larrañaga, R, Suárez, Experimental Evidence for Metallurgical Modification Associated to Chunky Graphite in Heavy-Section Ductile Iron Castings, International Journal of Metalcasting 6(2012) 1, 35 – 42).
[60] J. Zhou, Solidification morphology of heavy section ductile iron castings, Foundry 45(1996) 1, 1 – 7.

[61] M. Gagné, C. Labrecque, Microstructural Defects in Heavy Section Ductile Iron Castings: Formation and Effect on Properties, AFS Transactions 117(2009), 561 – 570.
[62] C. Labrecque, P. M. Cabanne, Low Temperature Impact Strength of Heavy Section Ductile Iron Castings: Effect of Microstructure and Chemical Composition, China Foundry 8(2011) 1, 66 – 73.
[63] I. Riposan, M. Chisamera, A. Stan, Control of surface graphite degeneration in ductile iron for windmill applications, International Journal of Metalcasting, 7(2013) 1, 9 – 20.
[64] Elkem Foundry products, Inoculation of Heavy Section Castings, Technical information 36, http://wenku.baidu.com/view/4654b9ee81c758f5f61f6783.html
[65] A. Fay, M. Koch, K. Soulas, Development of a totally new inoculant for ductile iron castings, Proceedings book of 71st World Foundry Congress, Advanced Sustainable Foundry, 19 – 21 May 2014, Palacio Euskalduna, Bilbao, Spain, 1 – 8.
[66] …, Cast Irons, ed. J. R. Davis, ASM Specialty Handbook, ASM International, Materials Park, Ohio, 1996.
[67] Z. Glavaš, Analiza grešaka na odljevcima, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2010.
[68] Elkem Foundry Products, Poor Nodularity in Ductile Iron, Technical Information 25 http://www.scribd.com/doc/29137642/Poor-Nodularity-in-Ductile-Iron#scribd
[69] J. Jorstad, M. B. Krusiak, J. O. Serra, V. L. Fay, Aggregates and Binders for Expendable Molds, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 528 - 548.
[70] …, No-Bake Sand Molding, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 567 - 580.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODATCI:

Ime i prezime:	Ante Severinski
Datum i mjesto rođenja:	19. srpnja 1994.g., Sisak
Adresa:	Ivana Cankara 7, 44000 Sisak
Telefon:	044/547-905, 0917972202
E-mali:	ante.severinski@gmail.com

OBRAZOVANJE:

2001.g. - 2009.g. -	Osnovna škola: Ivana Kukuljevića, Sisak
2009.g. - 2013.g. -	Srednja škola: Zrakoplovna tehnička škola Rudolfa Perešina, Velika Gorica
2013.g. -	Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet

VJEŠTINE:

Rad na računalu
Strani jezik: Engleski, pasivno u govoru i pismu

NAGRADE I PRIZNANJA:

Uvjerenje o položenom ispitu za nogometnog suca, 2014.g.

AKTIVNOSTI:

Nogomet, trčanje