

Utjecaj broja nodula na žilavost feritnog nodularnog lijeva

**Faruk UNKIĆ, Zoran GLAVAŠ i
Katarina TERZIĆ**

Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet
(University of Zagreb, Faculty of Metallurgy),
Aleja narodnih heroja 3,
HR - 44103 Sisak, **Republic of Croatia**

unkic@simet.hr; glavasz@simet.hr;
terzicka@simet.hr

Keywords

*Ductile iron
Microstructure properties
Toughness*

Ključne riječi

*Mikrostrukturna svojstva
Nodularni lijev
Žilavost*

Received (primljeno): 2007-11-16

Accepted (prihvaćeno): 2008-04-30

Izvornoznanstveni članak

U radu je istraživana utjecaj broja nodula/mm² i temperature ispitivanja na žilavost feritnog nodularnog lijeva u lijevanom stanju. Ispitivanje žilavosti provedeno je u uvjetima udarnog opterećenja pri sobnoj i sniženim temperaturama prema HRN EN 10045. Ustanovljeno je da pri temperaturama 20 °C i 0 °C žilavost feritnog nodularnog lijeva raste s porastom broja nodula/mm² do određenog maksimuma, nakon čega daljnji porast broja nodula/mm² utječe na pad žilavosti. Kod niskih temperatura (-20 °C i -40 °C) žilavost konstantno raste s porastom broja nodula/mm². Broj nodula/mm² važna je mikrostrukturna značajka nodularnog lijeva čiju je vrijednost potrebno prilagoditi specifičnim radnim uvjetima lijevanih komponenti.

Influence of Nodule Count on Toughness of Ferritic Ductile Iron

Original scientific paper

The influence of nodule count and test temperature on the as-cast ferritic ductile iron toughness was analyzed in this paper. The examination of toughness was performed in impact load conditions at room and lower temperatures according to HRN EN 10045. It has been found that ferritic ductile iron toughness at 20 °C and 0 °C increases with a rise of the nodule count to a certain maximum, afterwards a further increase of nodule count results in a decrease of toughness. At low temperatures (-20 °C and -40 °C), the ferritic ductile iron toughness constantly increases with a rise in the nodule count. Nodule count is an important ductile iron microstructure characteristic, whose value is necessarily adapted to specific working conditions of castings.

1. Uvod

Žilavost nodularnog lijeva usko je povezana s mikrostrukturom, tj. oblikom izlučenog grafita i strukturom metalne osnove [1–8]. Sadržani degenerirani oblici grafita ili eventualno vermikularni ili listićavi grafit negativno utječu na žilavost nodularnog lijeva. S porastom udjela ferita u metalnoj osnovi raste žilavost nodularnog lijeva.

Udio ferita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva ovisi o kemijskom sastavu, brzini hlađenja tijekom skrućivanja i naknadne pretvorbe u krutom stanju te volumnom udjelu i broju grafitnih nodula po jedinici površine [2, 3]. Povećanje broja nodula po jedinici volumena rezultira višim sadržajem ferita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva [9, 10]. Dodatkom Bi u vrlo malim koncentracijama (0,005 – 0,01 mas. %) može se značajno povisiti broj nodula/mm², jer Bi snažno promovira nukleaciju grafita [11, 12]. Prekomjerni dodatci Bi imaju negativan učinak na broj nodula/mm².

Pored kemijskog sastava i mikrostrukture, na žilavost nodularnog lijeva utječe i temperatura ispitivanja. Sa sniženjem temperature opada žilavost nodularnog lijeva. Pri tome je bitno da se prijelaz iz žilavog u krhki lom odvija pri što je moguće nižoj temperaturi [5, 8].

Cilj ovog rada je ustanoviti kako broj nodula/mm² utječe na žilavost feritnog nodularnog lijeva, ispitivane u lijevanom stanju, pri sobnoj (20 °C) i sniženim temperaturama (0 °C, -20 °C i -40 °C).

2. Metodologija ispitivanja

Primarna taljevina za proizvodnju feritnog nodularnog lijeva izrađena je u indukcijskoj peći kapaciteta 250,0 kg. Uložak se sastojao od vlastitog povrata (sivi lijev, nodularni lijev), čeličnog otpada i niskomanganskog sirovog željeza. Nakon taljenja i korekcije kemijskog sastava, provedena je predobrada taljevine u peći u cilju povećanja nukleacijskog potencijala. Kemijski sastav sredstva za predobradu prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav sredstva za predobradu, predlegura za obradu taljevine i cjepiva**Table 1.** Chemical composition of preconditioning alloy, treatment alloys and inoculants

	Kemijski sastav / Chemical composition, mas. %							
	Si	Ca	Zr	Ce	Al	Mg	La	RZ*
Sredstvo za predobradu / Preconditioning alloy								
Sredstvo za predobradu / Preconditioning alloy	62,0 – 69,0	0,6 - 1,9	3,0 – 5,0	-	3,0 – 5,0	-	-	10,0 - 38,0
Predlegura za obradu / Treatment alloy								
Predlegura 1 / Treatment alloy 1	44,0 -48,0	0,4 – 0,6	-	-	0,8 – 1,2	5,0 – 6,0	0,25 -0,40	-
Predlegura 2 / Treatment alloy 2	44,0 -48,0	0,8 - 1,20	-	-	maks. 1,5	4,75 -5,25		1,05 -1,35
Cjepivo / Inoculant								
Cjepivo 1 / Inoculant 1	70,0 -76,0	maks. 0,1	-	1,5 – 2,0	0,75 -1,25	-	-	-
Cjepivo 2 / Inoculant 2	70,0 -75,0	0,5 – 1,5	-	-	3,5 – 4,5	-	-	-
Cjepivo 3 / Inoculant 3	70,0 -76,0	0,75-1,25	-	-	0,75-1,25	-	-	-
Cjepivo 4 / Inoculant 4	73,0 -78,0	2,0 – 2,5	1,3 – 1,8	-	1,0 – 1,5	-	-	-

* Rijetke zemlje

Obrada primarne taljevine provedena je “sandwich” postupkom i to tako da je taljevina sukcesivno izljevana iz indukcijske peći u lonac za obradu kapaciteta 30,0 kg. Na taj način je dobiveno približno 6 jednakih dijelova taljevine pri čemu je svaki dio, odnosno lonac, obrađivan posebno, tj. primjenjivane su različite kombinacije vrste i količine predlegure i cjepiva (tablica 2).

stanju strojno su izrađene iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka (Y-proba). Oblik i dimenzije epruveta sukladne su HRN EN 10045-1. Za svaku od prethodno navedenih kombinacija obrade i cijepjenja (tablica 2) određena je udarna radnja loma pri temperaturama 20 °C, 0 °C, -20 °C i -40 °C na Charpyjevom klatnu s maksimalnom udarnom radnjom loma od 50 J. Za svaku temperaturu ispitivanja korištene su tri epruvete.

Tablica 2. Kombinacije i količine predlegura i cjepiva**Table 2.** Combination and amount of treatment alloys and inoculants

Broj serije / Series No.	Dodatak predlegure / Addition of treatment alloy, mas. %	Cjepivo / Inoculant, mas. %				
		u lonac / in ladle		u mlaz / in stream		
1	Predleg / Treatment alloy 1	1,7	Cjepivo / Inoculant 1	0,3	Cjepivo / Inoculant 1	0,2
2	Predleg / Treatment alloy 1	1,7	Cjepivo / Inoculant 3	0,3	Cjepivo / Inoculant 3	0,2
3	Predleg / Treatment alloy 1*	1,7	Cjepivo / Inoculant 3	0,3	Cjepivo / Inoculant 3	0,2
4	Predleg / Treatment alloy 2	1,7	Cjepivo / Inoculant 1	0,3	Cjepivo / Inoculant 1	0,2
5	Predleg / Treatment alloy 2	1,7	Cjepivo / Inoculant 4	0,3	Cjepivo / Inoculant 4	0,2
6	Predleg / Treatment alloy 2	1,7	Cjepivo / Inoculant 2	0,3	Cjepivo / Inoculant 2	0,2

* Uz predleguru u lonac dodano 0,007 mas. % Bi

Različitim vrstama i dodacima predlegura i cjepiva nastojao se dobiti različit broj nodula u feritnoj metalnoj osnovi. Kemijski sastavi primjenjivanih predlegura i cjepiva dani su u tablici 1. Cijepjenje taljevine provedeno je u loncu i u mlaz taljevine pri lijevanju u kalupe.

Iz obrađenih taljevina lijevane su tzv. Y-probe (lijevani ispitni uzorci). Od svake kombinacije (tablica 2) lijevane su dvije Y-probe u kalupe istih dimenzija i pod istim uvjetima da bi se eliminirao utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu. Mješavina za izradu jednokratnih kalupa sastojala se od suhog kvarcnog pijeska, vezivnog sredstva (alkalna fenol-formaldehidna smola) i učvršćivača (lako isparljivi ester (metilformiat)). Oblik i dimenzije lijevanih ispitnih uzoraka sukladni su HRN EN 1563. Odlivene Y-probe ohlađene su na zraku do sobne temperature.

Standardizirane epruvete s V-zarezom za određivanje udarne radnje loma nodularnog lijeva u lijevanom

Uzorci za metalografsku analizu uzeti su iz epruveta nakon ispitivanja udarne radnje loma. Metalografska ispitivanja provedena su pomoću svjetlosnog metalografskog mikroskopa s digitalnom kamerom i sustava za automatsku obradu slike pri povećanju 100x. Metalografska analiza obuhvatila je određivanje stupnja nodularnosti grafita, udjela ferita i perlita u metalnoj osnovi, broja nodula/mm² i raspodjele veličina nodula. Kod određivanja broja nodula/mm² postavljen je kriterij prema kojem sustav uzima u obzir samo one grafitne čestice čija je površina veća od 100 μm². Raspodjela veličina nodula određena je prema HRN EN ISO 945.

Da bi se dobio potpuniji uvid u utjecaj mikrostrukture na žilavost nodularnog lijeva, nakon određivanja udarne radnje loma provedena je analiza površina prijeloma pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa (SEM).

3. Rezultati i diskusija

U tablici 3 prikazan je kemijski sastav ispitivanih taljevina nodularnog lijeva.

Može se vidjeti da su sve taljevine gotovo eutektičkog sastava i da između pojedinih taljevina ne postoje značajnije razlike u sadržaju C i Si. Kod svih taljevina snižen je sadržaj silicija (2,01 – 2,13 mas. %) jer silicij očvršćuje ferit i smanjuje njegovu plastičnost. Nizak sadržaj elemenata koji pospješuju stvaranje perlita (Mn, Cu, Sn) omogućio je dobivanje visokih udjela ferita u

primarnoj metalnoj osnovi. Stvaranje karbida izbjegnuto je niskim sadržajem elemenata koji pospješuju njihovo stvaranje (Cr, Mn, Mo). Sadržaj fosfora također je nizak (od 0,025 – 0,030 %), čime je izbjegnuto stvaranje tvrdog i krhkog fosfidnog eutektika.

Rezultati ispitivanja udarne radnje loma i metalografske analize prikazani su u tablicama 4 - 7. Vrijednosti udjela ferita i perlita, broja nodula/mm² i nodularnosti grafitu prikazane u navedenim tablicama predstavljaju srednje vrijednosti 5 mjerenja.

Tablica 3. Kemijski sastav ispitivanih taljevina feritnog nodularnog lijeva

Table 3. Chemical composition of tested melts of ferritic ductile iron

Element	Kemijski sastav / Chemical composition, mas. %					
	Seriya / Series 1	Seriya / Series 2	Seriya / Series 3	Seriya / Series 4	Seriya / Series 5	Seriya / Series 6
C	3,60	3,60	3,59	3,59	3,58	3,58
Si	2,04	2,02	2,04	2,13	2,11	2,01
Mn	0,18	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17
P	0,030	0,029	0,025	0,030	0,027	0,027
S	0,020	0,020	0,025	0,025	0,020	0,020
Mg	0,062	0,059	0,067	0,067	0,061	0,054
Cr	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07
Ni	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Mo	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Cu	0,031	0,035	0,032	0,036	0,034	0,032
Sn	0,008	0,012	0,008	0,007	0,011	0,008
Al	0,012	0,015	0,013	0,010	0,011	0,015

Tablica 4. Mikrostrukturne značajke i vrijednosti udarne radnje loma (udarna radnja loma određena pri temperaturi 20 °C)

Table 4. Microstructural features and values of impact energy (impact energy is determined at a temperature of 20 °C)

Broj epruvete / No. of test sample	Nodularnost grafitu / Nodularity of graphite	Broj nodula / Nodule count / mm ²	Udio ferita / Percentage of ferrite, %	Udio perlita / Percentage of perlite, %	Udarna radnja loma / Impact energy, J
1	0,71	221	83,48	16,52	11,2
5	0,71	204	86,96	13,04	11,6
9	0,72	205	92,06	7,94	12,5
13	0,67	251	90,07	9,93	11,0
17	0,67	239	86,88	13,12	9,5
21	0,66	231	84,10	15,90	10,4
25	0,69	284	84,19	15,81	9,2
29	0,68	307	91,31	8,69	9,5
33	0,71	412	92,17	7,29	9,8
37	0,63	98	81,60	18,40	10,0
41	0,64	71	78,21	21,79	8,8
45	0,66	91	84,41	15,59	12,0
49	0,60	129	86,52	13,48	11,8
53	0,55	160	85,58	14,42	9,5
57	0,65	188	85,89	14,11	10,7
61	0,66	256	91,62	8,38	12,0
65	0,62	182	85,52	14,08	9,5
69	0,68	223	92,61	7,39	12,0

Tablica 5. Mikrostrukturne značajke i vrijednosti udarne radnje loma (udarna radnja loma određena pri temperaturi 0 °C)**Table 5.** Microstructural features and values of impact energy (impact energy is determined at a temperature of 0 °C)

Broj epruvete / No. of test sample	Nodularnost grafita / Nodularity of Graphite	Broj nodula / Nodule count, mm ²	Udio ferita / Percentage of ferrite, %	Udio perlita / Percentage of perlite, %	Udarna radnja loma / Impact energy, J
2	0,71	220	90,15	9,85	9,8
6	0,68	189	92,56	7,44	9,5
10	0,71	180	85,96	14,04	7,8
14	0,72	263	92,20	7,80	9,0
18	0,69	253	90,57	9,43	8,9
22	0,68	235	91,13	8,87	8,8
26	0,69	332	88,57	11,43	7,3
30	0,68	233	85,62	14,38	7,7
34	0,69	288	86,92	13,08	8,5
38	0,65	126	85,04	14,96	9,0
42	0,62	72	78,48	21,52	6,8
46	0,65	106	83,05	16,95	10,0
50	0,52	102	79,60	20,40	7,7
54	0,54	137	82,28	17,72	7,0
58	0,59	170	87,76	12,24	11,4
62	0,56	207	83,58	16,42	7,4
66	0,63	264	90,70	9,30	9,5
70	0,67	288	91,95	8,05	9,4

Tablica 6. Mikrostrukturne značajke i vrijednosti udarne radnje loma (udarna radnja loma određena pri temperaturi -20 °C)**Table 6.** Microstructural features and values of impact energy (impact energy is determined at a temperature of -20 °C)

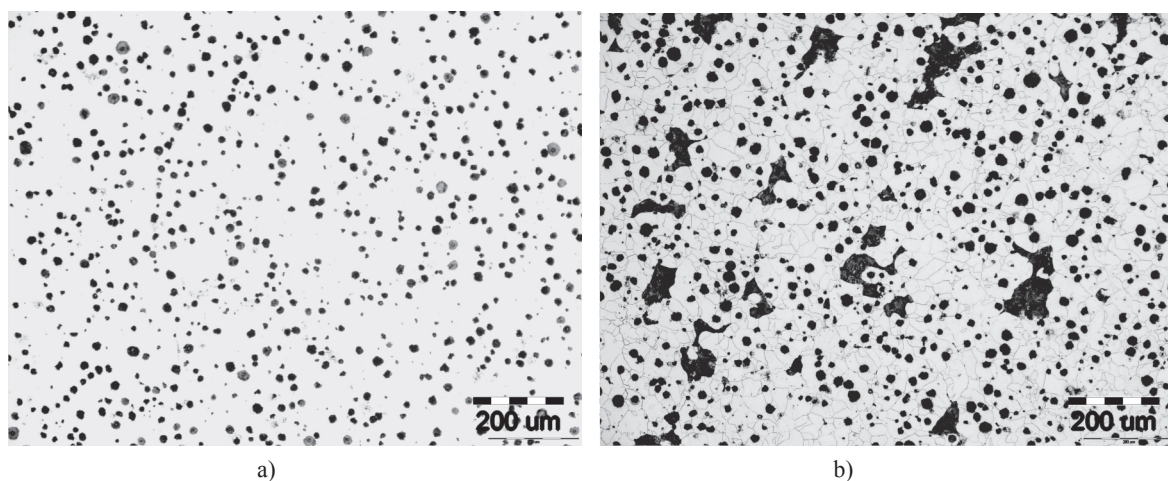
Broj epruvete / No. of test sample	Nodularnost grafita / Nodularity of Graphite	Broj nodula / Nodule count / mm ²	Udio ferita / Percentage of ferrite, %	Udio perlita / Percentage of perlite, %	Udarna radnja loma / Impact energy, J
3	0,71	236	89,61	10,39	8,5
7	0,70	190	87,12	12,88	7,5
11	0,72	209	86,40	13,60	5,3
15	0,66	246	87,99	12,01	6,0
19	0,65	254	91,72	8,28	8,2
23	0,69	236	90,66	9,34	6,4
27	0,68	297	90,67	9,33	6,5
31	0,64	257	87,24	12,76	5,5
35	0,72	362	86,24	13,76	7,9
39	0,67	129	84,97	15,03	6,9
43	0,56	100	80,38	19,62	5,0
47	0,65	110	79,78	20,22	8,0
51	0,60	124	87,68	12,32	7,2
55	0,63	268	89,65	10,35	7,8
59	0,53	158	84,41	15,59	5,3
63	0,67	307	91,71	8,29	9,3
67	0,62	192	87,88	12,12	5,7
71	0,61	218	86,57	13,43	5,7

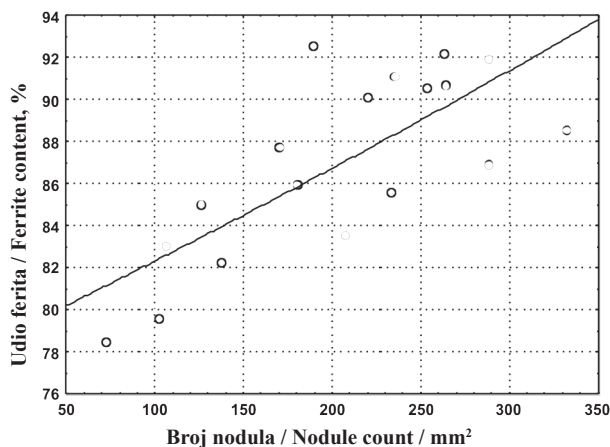
Tablica 7. Mikrostrukturne značajke i vrijednosti udarne radnje loma (udarna radnja loma određena pri temperaturi -40 °C)**Table 7.** Microstructural features and values of impact energy (impact energy is determined at a temperature of -40 °C)

Broj epruvete / No. of test sample	Nodularnost grafitu / Nodularity of Graphite	Broj nodula / Nodule count / mm ²	Udio ferita / Percentage of ferrite, %	Udio perlita / Percentage of perlite, %	Udarna radnja loma / Impact energy, J
4	0,72	209	82,96	17,04	3,9
8	0,72	178	90,84	9,16	5,8
12	0,72	171	78,39	21,61	3,8
16	0,67	221	83,57	16,43	3,6
20	0,70	260	86,55	13,45	3,6
24	0,72	283	88,84	11,16	5,2
28	0,69	291	92,72	7,28	5,3
32	0,68	332	92,58	7,42	5,4
36	0,70	298	86,44	13,56	4,4
40	0,66	80	87,74	12,26	5,1
44	0,65	93	80,75	19,25	3,6
48	0,66	99	80,21	19,74	3,2
52	0,61	243	90,12	9,88	6,1
56	0,63	221	85,27	14,73	3,3
60	0,62	200	91,65	8,35	5,7
64	0,55	189	86,15	13,85	4,8
68	0,62	216	88,17	11,83	3,3
72	0,63	219	90,15	9,85	6,5

Iz tablica 4 – 7 može se vidjeti da je kod svih taljevina ostvaren relativno visok udio ferita u metalnoj osnovi (78,21 – 92,72 %) i da vrijednosti udarne radnje loma općenito opadaju sa sniženjem temperature. Najviši broj nodula/mm² ostvaren je kod uzoraka iz serije 3 (uzorci broj 25 – 36), što se može povezati s dodatkom Bi (0,007 mas. %) (tablica 2, slika 1).

S porastom broja nodula/mm² raste udio ferita u metalnoj osnovi (slika 2). Povećanje udjela ferita u metalnoj osnovi s povećanjem broja nodula/mm² objašnjava se smanjenjem putova difuzije ugljika pri hlađenju nodularnog lijeva nakon skrućivanja. Što su kraći putovi difuzije, odnosno veći broj nodula, to će se austenit nastao tijekom eutektičke reakcije brže osiromašiti ugljikom, koji će difundirati na susjedne ili okružujuće nodule.

**Slika 1.** Metalografske snimke mikrostrukture uzorka br. 33: a) nenagrizeno stanje; b) nagrizeno stanje, nital**Figure 1.** Optical micrographs of microstructure of sample no. 33: a) no etched, b) etched, nital



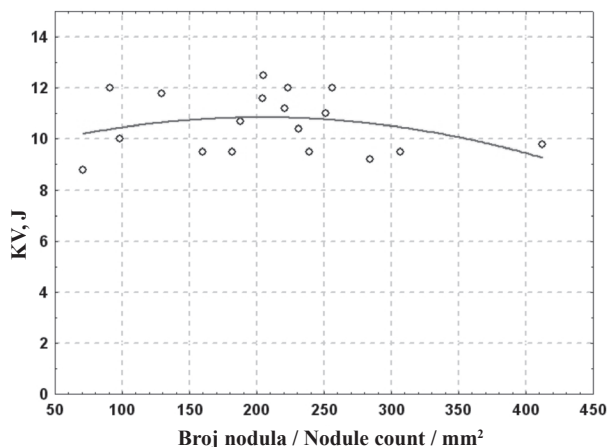
Slika 2. Ovisnost udjela ferita u metalnoj osnovi o broju nodula (uzorci čija je žilavost ispitana na temperaturi 0 °C)

Figure 2. Dependence of percentage of ferrite in a metal matrix on nodule count (samples whose toughness has been tested at a temperature of 0 °C)

Analize prijelomnih površina feritnog nodularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) pokazuju da prije loma uzorka dolazi do značajne plastične deformacije ferita u cilju razgradnje naprezanja (slika 3). Radi se o transkristalnom žilavom lomu kojeg karakterizira prisustvo udubina (jamica) na prijelomnoj površini nastalih plastičnom deformacijom ferita, što u konačnici rezultira povišenom udarnom žilavosti.

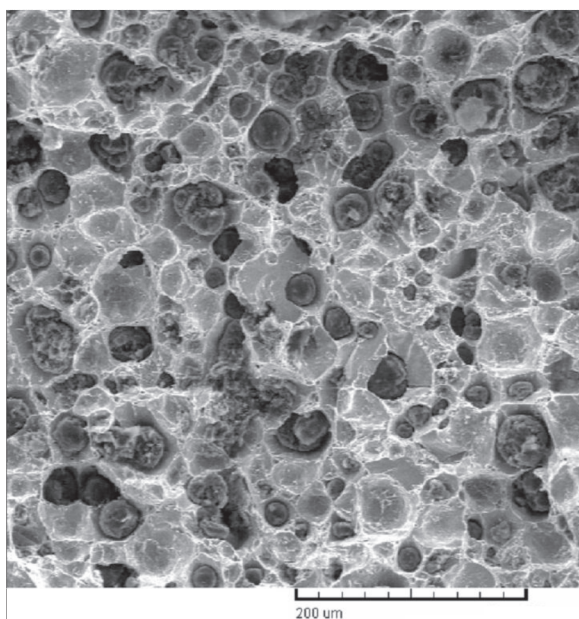
U svim ispitivanim uzorcima prevladavaju grafitne nodule veličine 6 – 8 (prema HRN EN ISO 945). S povećanjem broja nodula/mm² povećava se udio nodula veličine 7 i 8.

Na slikama 4 - 7 prikazan je utjecaj broja nodula/mm² na vrijednosti udarne radnje loma koje su određene pri različitim temperaturama.

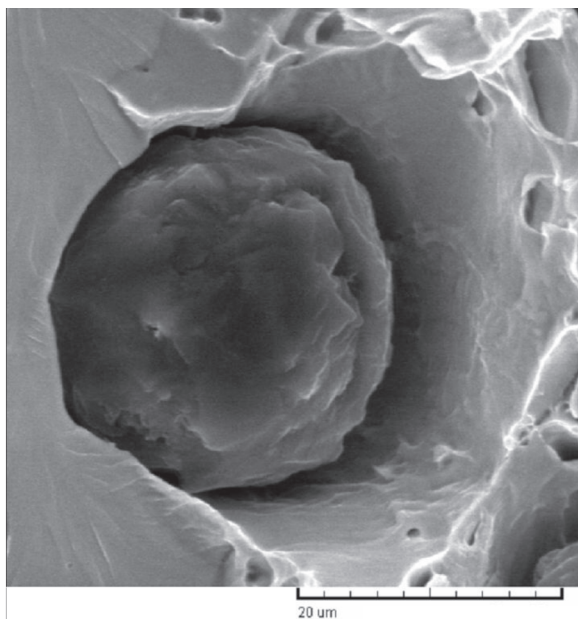


Slika 4. Ovisnost udarne radnje loma o broju nodula/mm² pri temperaturi 20 °C

Figure 4. Dependence of impact energy on nodule count at a temperature of 20°C



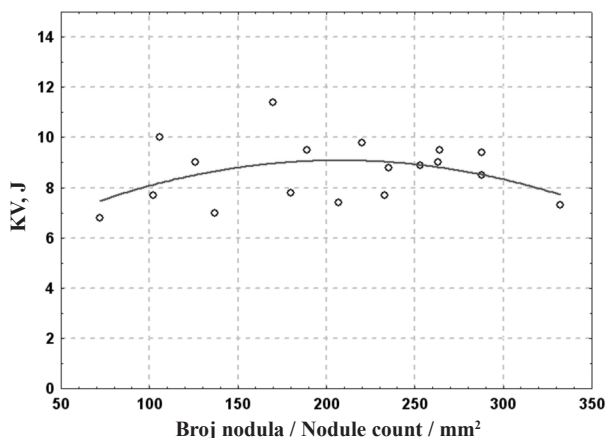
a)



b)

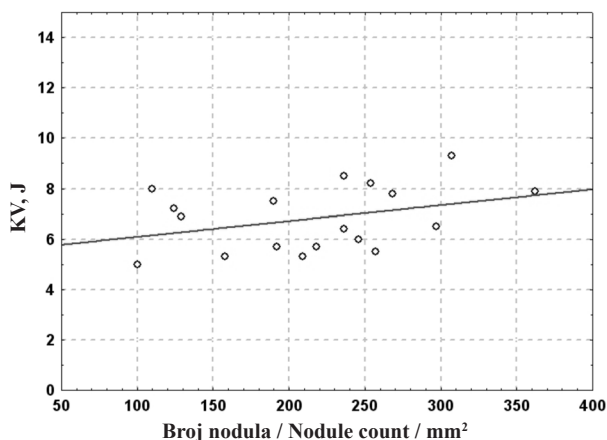
Slika 3. Snimka prijelomne površine uzorka br. 69 pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM): a) povećanje 300x; b) 3400x

Figure 3. SEM micrographs of breaking surface of sample no. 69: a) 300x, b) 3400x



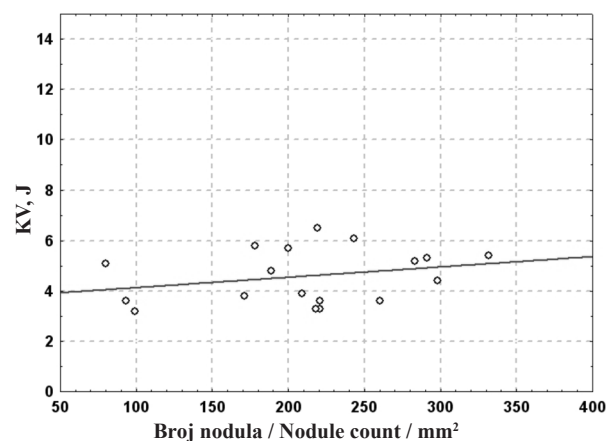
Slika 5. Ovisnost udarne radnje loma o broju nodula/mm² pri temperaturi 0 °C

Figure 5. Dependence of impact energy on nodule count at a temperature of 0 °C



Slika 6. Ovisnost udarne radnje loma o broju nodula/mm² pri temperaturi -20 °C

Figure 6. Dependence of impact energy on nodule count at a temperature of -20 °C



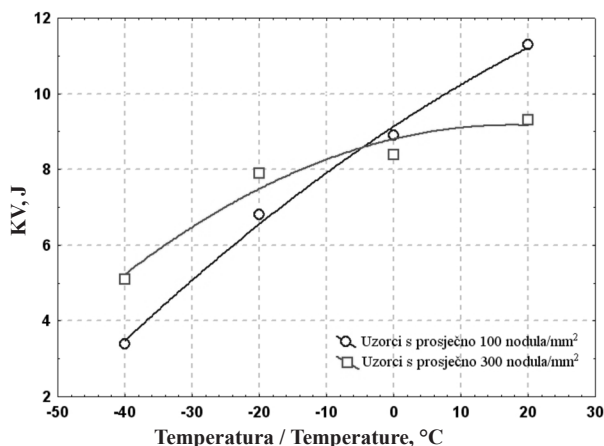
Slika 7. Ovisnost udarne radnje loma o broju nodula/mm² pri temperaturi -40 °C

Figure 7. Dependence of impact energy on nodule count at a temperature of -40 °C

Na slici 4 i 5 može se vidjeti da žilavost, odnosno udarna radnja loma feritnog nodularnog lijeva pri temperaturi 20 °C i 0 °C raste s porastom broja nodula po jedinici površine do granice od ~200 nodula/mm², a zatim ponovno opada. Ova povezanost udarne radnje loma nodularnog lijeva i broja nodula/mm² može se objasniti djelovanjem dvaju mehanizama. Do izvjesnog stupnja povećanje broja nodula rezultira povećanjem udjela ferita, odnosno smanjenjem udjela perlita u metalnoj osnovi, što ima za posljedicu povećanje žilavosti do odgovarajućeg maksimuma. Daljnje povećanje broja nodula utječe na značajno povećanje isprekidanosti metalne osnove, koja određuje mehanička svojstva nodularnog lijeva. Povećanjem broja nodula smanjuje se udaljenost između njih, što omogućuje lakše i brže širenje pukotine i pojavu transkristalnog krhkog loma.

Međutim, pri temperaturama -20 °C i -40 °C žilavost nodularnog lijeva raste konstantno s povećanjem broja nodula (slike 6 i 7), odnosno ne postoji maksimum nakon kojeg žilavost opada s porastom broja nodula, kao pri temperaturama 20 °C i 0 °C (slike 4 i 5).

Na slici 8 je prikazana ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod taljevina feritnog nodularnog lijeva s različitim brojem nodula/mm² (prosječno 100 nodula/mm², odnosno 300 nodula/mm²). Kod svake temperature ispitivanja izdvojeni su uzorci koji imaju ~100 nodula/mm², odnosno ~300 nodula/mm² i izračunate srednje vrijednosti udarne radnje loma.



Slika 8. Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi i broju nodula/mm² kod taljevina feritnog nodularnog lijeva

Figure 8. Dependence of impact energy on temperature and nodule count for ferritic ductile iron melts

Sa slike 8 može se vidjeti da se povećanjem broja nodula/mm² (u konkretnom slučaju sa 100 nodula/mm² na 300 nodula/mm²) snižava prijelazna temperatura žilavo/krhko, što je svakako pozitivan učinak. Međutim, vidljivo je da se s povećanjem broja nodula/mm² snižava i udarna radnja loma, odnosno žilavost pri sobnoj temperaturi, što predstavlja negativan učinak većeg broja

nodula. U uvjetima vlažnog opterećenja, nodule djeluju kao praznine (šupljine). U slučaju žilavog loma, koji se odvija povezivanjem susjednih praznina (grafitnih nodula), očito je da veći broj grafitnih nodula olakšava širenje pukotine, zbog smanjene udaljenosti između nodula. Za širenje pukotine u tom slučaju potrebna je manja energija. U uvjetima krhkog loma, tj. pri niskim temperaturama, situacija je obrnuta, odnosno poželjan je viši broj nodula/mm². Smanjenje udaljenosti između nodula (veći broj nodula) rezultira manjom mogućnošću nastanka uvjeta ravninskog naprezanja, što je glavni razlog porasta udarne radnje loma, odnosno žilavosti i pomicanja prijelazne temperature žilavo/krhko prema nižim vrijednostima s porastom broja nodula/mm². Očito je da postoji optimalno područje broja nodula u pogledu kompromisa između udarne radnje loma na sobnoj i na niskim temperaturama.

4. Zaključak

Žilavost nodularnog lijeva usko je povezana s mikrostrukturom, odnosno oblikom, raspodjelom i veličinom izlučenog grafita te strukturom metalne osnove (udio ferita, odnosno perlita). Povećanjem broja nodula/mm² povećava se udio ferita u metalnoj osnovi, što pozitivno utječe na porast žilavosti nodularnog lijeva.

Žilavost feritnog nodularnog lijeva općenito opada sa sniženjem temperature ispitivanja (slika 8). Prijelazna temperatura žilavo/krhko snižava se s povećanjem broja nodula/mm².

Pri temperaturama 20 °C i 0 °C, žilavost feritnog nodularnog lijeva raste s porastom broja nodula/mm² do određenog maksimuma, nakon čega daljnji porast broja nodula/mm² utječe na pad žilavosti. Kod uzoraka feritnog nodularnog lijeva koji sadrže ~ 200 nodula/mm² ostvarene su najviše vrijednosti žilavosti. U tim slučajevima prisutan je karakteristični jamičasti duktilni prijelom.

Kod niskih temperatura (-20 °C i -40 °C) žilavost konstantno raste s porastom broja nodula/mm².

Broj nodula/mm² je važna mikrostrukturna značajka čije je vrijednosti potrebno prilagoditi uvjetima primjene odljevaka, što zahtijeva striktnu kontrolu nukleacijskog potencijala taljevine putem predobrade i cijepjenja.

LITERATURA

- [1] VENUGOPALAN, D.; ALAGARSAMY, A.: *Effects of Alloy Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of Commercial Ductile Iron*, AFS Transactions 98(1990), 395-400.
- [2] GUO, X.; STEFANESCU, D. M.: *Solid Phase Transformation in Ductile Iron – A Benchmark for Computational Simulation of Microstructure*, AFS Transactions 105(1997), 533-543.
- [3] VENUGOPALAN, D.: *A Kinetic Model of the $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Gr}$ Eutectoid Transformation in Spheroidal Graphite Cast Irons*, Metallurgical Transactions 21A(1990)4, 913-918.
- [4] MRVAR, P.; TRBIŽAN, M.; MEDVED, J.: *Dilatation Analysis of the Eutectoid Transformation of the As-cast Spheroidal Graphite Cast iron*, Scandinavian Journal of Metallurgy 31(2002), 393-400.
- [5] KOMATSU, S.; SHIOTA, T.; NAKAMURA, K.: *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*, Tokyo, 1989, 313 - 320.
- [6] GLAVAŠ, Z.; LISJAK, D.; UNKIĆ, F.: *The Application of Artificial Neural Network in the Prediction of the As-cast Impact Toughness of Spheroidal Graphite Cast Iron*, Kovové Materiály 45(2007)1, 41-49.
- [7] UNKIĆ, F.; GAVRANOVIĆ, N.; VASILIC, M.; HREN, S.: *Influence of Silicon Content on the Mechanical Properties of As-cast and Heat Treated Samples of Nodular Cast Iron Grade EN-1563-GJS-400-18-LT*, Strojarstvo 47(2005)1-2, 33-38.
- [8] KOMATSU, S.; SHIOTA, T.; MATSUOKA, T.; NAKAMURA, K.: *Effects of Several Main Factors on Ductile-Brittle Transition Behaviors of Fracture Toughness in SG Cast Iron*, AFS Transactions 102(1994), 121-125.
- [9] GOODRICH, G. M.; JONES, D. P.: *Factors Affecting Ductile Iron Nodule Count: A Literature Review*, AFS Transactions 101(1993), 1031-1037.
- [10] HEINE, R. W.: *Nodule Count: The Benchmark of Ductile Iron Solidification*, AFS Transactions 101(1993), 879-884.
- [11] SHIHE, W.; GUOQING, X.; HANQIAO, D.; HANTONG, L.: *Metallurgical Behavior of the Bismuth in Molten Iron*, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron, *Physical Metallurgy of Cast Iron IV*, Tokyo, 1989, 119-124.
- [12] HORIE, H.; KOWATA, T.; CHIDA, A.: *Influence of Bismuth on Graphite Nodule Count in Thin-section Spheroidal-graphite Cast Iron*, Cast Metal 2(1990)4, 197-202.