

<https://doi.org/10.24867/JPE-1994-11-117>

ORIGINALNI NAUČNI RAD

Novović, M., Šidanin, L.\*

## MIKROSTRUKTURA ALUMINIJUMSKOG BAINITNOG NODULARNOG LIVA

### MICROSTRUCTURE OF ALUMINIUM AUSTEMPERED DUCTILE IRON

#### *Summary:*

*The present work is concerned with the effect of heat treatment on the microstructure of an aluminum ductile iron.*

*Specimens were austenitized at 900 and 950°C for 1.5 hour, and then austempered in a salt bath at a temperature of either 300 or 400°C for intervals of time up to 4 hours.*

*Microstructures were examined using light, transmission and scanning electron microscope. To determine the volume fraction of retained austenite, a X-ray diffraction analysis was carried out with  $C_{\alpha}$ - $K_{\alpha}$  radiation. Integrated intensity under the Bragg peaks (111) and (002) for fcc austenite and (011) for bcc ferrite were used to produce diffraction pattern. Computer analysis of the data produced values of  $2\theta$ ,  $d$  and  $I$ , from which the volume fractions of retained austenite were calculated.*

*The results obtained indicate four main microstructure constituents: two types of bainitic ferrite, stable, highly enriched retained austenite and carbide precipitates. The morphology, volume, distribution and size of these microstructure constituents depend upon heat treatment variables.*

*The fracture behavior of samples austempered at both 300 and 400°C is influenced by carbide formation, which results in a mostly brittle cleavage mode of fracture.*

---

\*) Milorad Novović, dipl.ing., asistent-pripravnik, Dr Leposava Šidanin, dipl. ing., redovni profesor; Institut za proizvodno mašinstvo, FTN, Novi Sad, Vladimira Perića Valtera 2

**Rezime**

*Na uzorcima izotermno poboljšanog aluminijumskog nodularnog liva, primjenom različitih tehnika mikrostrukturnih ispitivanja, ispitivani su morfologija, zapremina, raspodjela i veličina bainitnog ferita, zadržanog austenita i karbida.*

*Ispitivanja svjetlosnim mikroskopom pokazuju da se mikrostruktura ADI materijala sastoji iz bainitnog ferita i zadržanog austenita, i da njihova morfologija zavisi od temperature izotermne transformacije. Međutim, ispitivanja transmisionim elektronskim mikroskopom pokazuju da morfologija mikrostrukture ne zavisi od temperature izotermne transformacije, jer su bainitni ferit i zadržani austenit uvek pločasti. Međutim, prisustvo i mjesto izlučivanja karbida zavise i od temperature i od vremena izotermne transformacije.*

*Dobijene mikrostrukture utiču na karakter površine preloma. ADI mikrostruktura bez, odnosno sa malom količinom karbida pokazuje duktilnu površinu preloma. Veća količina karbida izlučenih unutar bainitnog ferita prouzrokuje kvazi-krti lom, a karbidi izlučeni na graničnoj površini bainitni ferit/zadržani austenit izazivaju krti lom.*

**1. UVOD**

U posljednjih nekoliko godina u svijetu postoji veliko interesovanje za izučavanje bainitnog nodularnog liva (ADI materijala) u kome je silicijum zamijenjen aluminijumom. To je novi materijal koji mnogo obećava. Mehaničke osobine ADI materijala direktno zavise od mikrostrukture i promjenom parametara termičke obrade mogu se mijenjati u širokom opsegu, što omogućava dobijanje izvanredne kombinacije čvrstoće i duktilnosti. Parametri termičke obrade kontrolišu obrazovanje gornjeg, odnosno donjeg bainita, količinu zadržanog austenita i prisustvo karbida, a sve ove veličine utiču na mehaničke osobine liva.

Pregledom svjetske literature konstatovano je da radova vezanih za primjenu svjetlosne i transmisione elektronske mikroskopije u cilju karakterizacije ADI materijala ima veoma malo. Razlog tome je komplikovanost mikrostrukture, kao i komplikovana priprema uzoraka za transmisionu elektronsku mikroskopiju, zbog prisustva nodula grafita.

U ovom radu ispitivana je mikrostruktura izotermno poboljšanog aluminijumskog nodularnog liva korišćenjem svjetlosne (SM), transmisione (TEM) i skening elektronske mikroskopije (SEM).

**2. EKSPERIMENTALNI RAD**

Za ispitivanje je korišćen izotermno poboljšani aluminijumski nodularni liv sastava:

| element | C   | Al  | Si  | Ni   | S    | Sn   | Mg    |
|---------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
| %       | 3,3 | 2,2 | 0,3 | 0,65 | 0,01 | 0,15 | 0,045 |

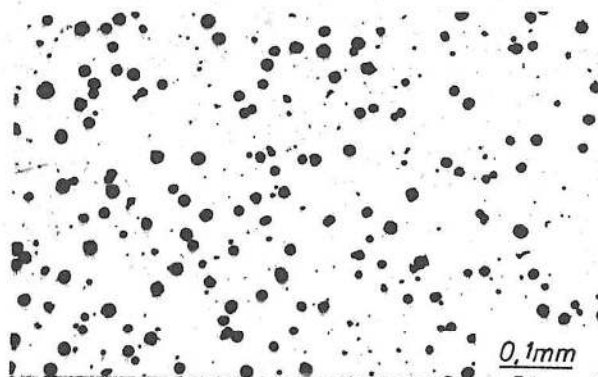
Termička obrada liva se sastojala iz:

- a) austenitizacije na 900 i 950°C u trajanju od 1,5 sata;
- b) izotermne transformacije na 300 i 400°C u trajanju od 0,5-4 sata.

Morfologija i karakter mikrostrukture ispitivani su na uzorcima dobijenim iz nedeformisanih dijelova epruveta za ispitivanje žilavosti, primjenom više metalografskih tehnika. Za svjetlosnu mikroskopiju korišćen je Leitz-ov mikroskop uz predhodnu konvencionalnu pripremu uzoraka. Identifikacija pojedinih mikrokonstituenata izvršena je metodom "tope oksidacije". Zapreminski udio zadržanog austenita određivan je rendgeno-strukturnom analizom, primjenom  $C_{\alpha}$ - $K_{\alpha}$  zračenja pri 40 kV i 30 mA. Transmisiona elektronska mikroskopija izvedena je na Jeol 4000 FX elektronskom mikroskopu. Priprema uzoraka za TEM je posebna, a sastoji se iz potpune mehaničke pripreme i jonskog stanjivanja u snopu jona argona, pri potencijalu od 5-6 kV. Površine preloma epruveta ispitivane su Jeol JSM 35 elektronskim mikroskopom.

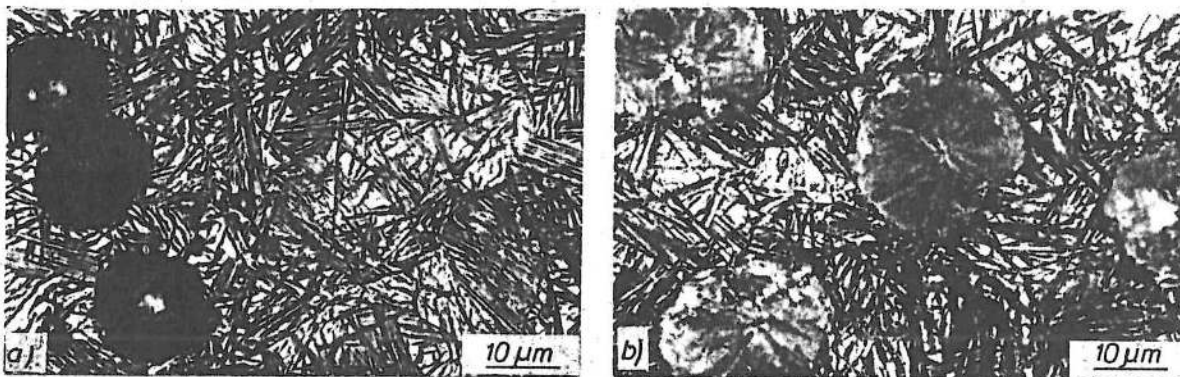
### 3. REZULTATI

U svim ispitivanim uzorcima, oblik, veličina i raspored grafitnih nodula su ujednačeni. Prosječna veličina nodula je  $20 \mu\text{m}$ , prosječna gustina  $300 \text{ mm}^{-2}$ , a stepen sferoidizacije nodula je veći od 90% (slika 1).



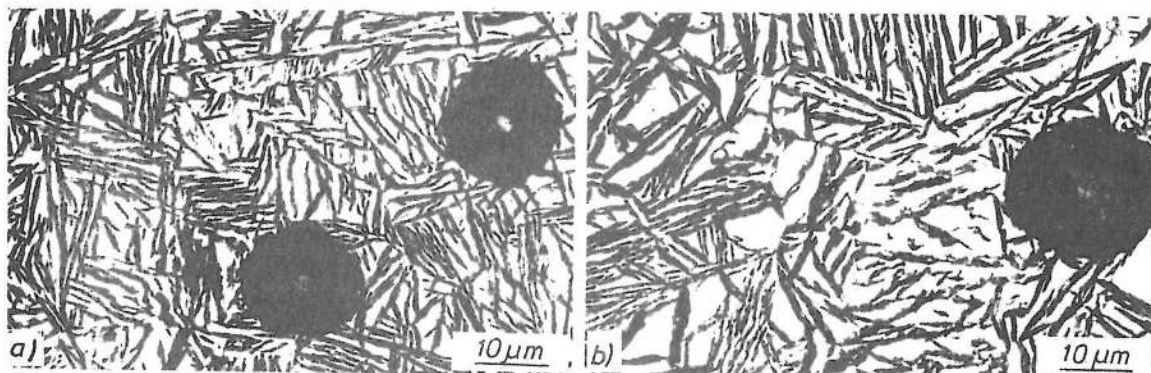
*Sl.1 Oblik, veličina i raspored grafitnih nodula (SM)*  
*Fig.1 The shape, size and distribution of graphite nodules (LM)*

Mikrostruktura uzoraka austenitiziranih na 900 i 950°C i izotermno transformisanih na 300°C sastoji se iz igličastog bainitnog ferita smještenog u osnovi stabilnog, ugljenikom obogaćenog, zadržanog austenita (slika 2a,b).



*Sl.2 Mikrostruktura uzorka izotermno transformisanog na 300°C/4h, predhodno austenitiziranog na: a) 900°C, b) 950°C (SM)*  
*Fig.2 Austempered matrix at 300°C and austenitized at: a) 900°C, b) 950°C (LM)*

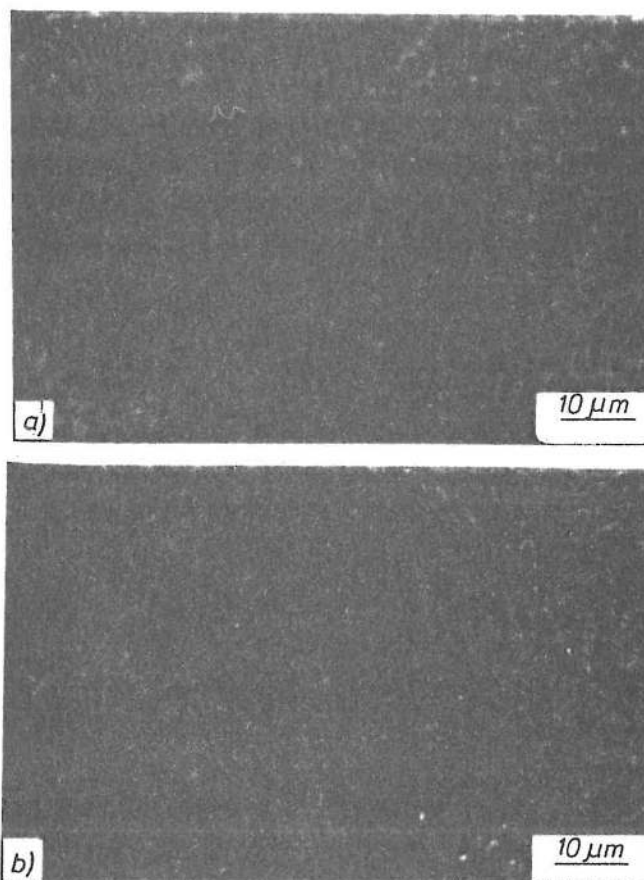
Sa povećanjem temperature izotermne transformacije, tj. u uzorcima transformisanim na  $400^{\circ}\text{C}$ , dobijen je pločasti bainitni ferit, takođe smješten u osnovi zadržanog austenita (slika 3a,b).



Sl.3 Mikrostruktura uzorka izotermno transformisanog na  $400^{\circ}\text{C}/4\text{h}$ , predhodno austenitiziranog na: a)  $900^{\circ}\text{C}$ , b)  $950^{\circ}\text{C}$  (SM)

Fig.3 Austempered matrix at  $400^{\circ}\text{C}$  and austenitized at: a)  $900^{\circ}\text{C}$ , b)  $950^{\circ}\text{C}$  (LM)

Prisustvo i stabilnost ugljenikom obogaćenog, zadržanog austenita potvrđeni su metodom "tope oksidacije" (slika 4a,b). Obogaćeni i stabilni austenit je purpurno crven, nestabilni austenit je svijetloplav, a bainitni ferit ima bež boju.

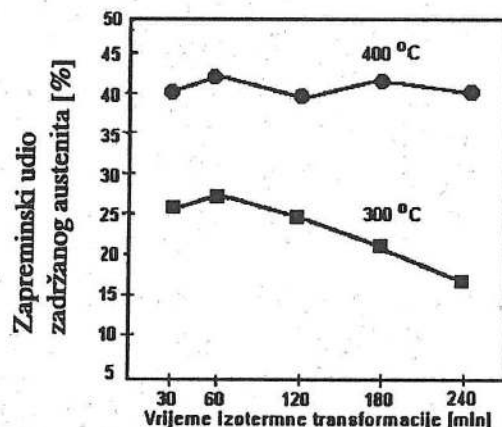


Sl.4 Topla oksidacija aluminijumskog nodularnog liva austenitiziranog na  $950^{\circ}\text{C}$  i izotermno transformisanog na: a)  $300^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ , b)  $400^{\circ}\text{C}/1\text{h}$  (SM)

Fig.4 Aluminium ductile iron austenitized at  $950^{\circ}\text{C}$  and austempered at: a)  $300^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ , b)  $400^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ ; Heat tinted (LM)



Uticaj temperature i vremena izotermne transformacije na zapreminski udio zadržanog austenita u uzorcima austenitiziranim na 950°C prikazan je na slici 5.



*Sl.5 Uticaj temperature i vremena izotermne transformacije na zapreminski udio zadržanog austenita*

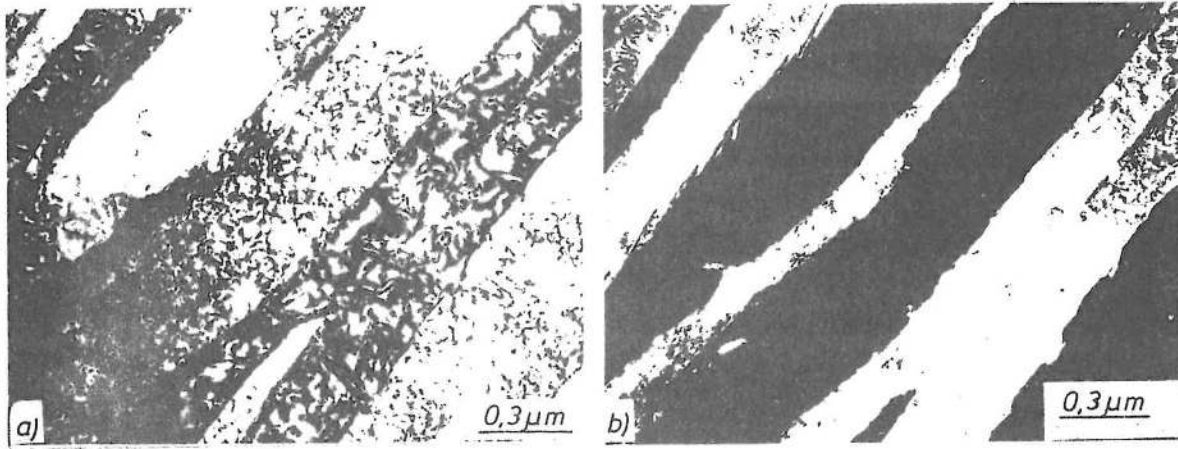
*Fig.5 Effect of austempering time on volume fraction of retained austenite at different temperatures*

Povećanje temperature izotermne transformacije izaziva značajno povećanje zapreminskog udjela zadržanog austenita. Uticaj vremena izotermne transformacije izražen je samo pri transformaciji na 300°C, gdje povećanje vremena transformacije prouzrokuje smanjenje zapreminskog udjela zadržanog austenita. Maksimalna vrijednost od 42% dobijena je u uzorcima transformisanim na 400°C u trajanju od 1 sat, i ostaje približno konstantna sa produženjem vremena transformacije do 4 sata. Pri smanjenju temperature austenitizacije uočeno je malo smanjenje zapreminskog udjela zadržanog austenita.

Ispitivanja svjetlosnim mikroskopom pokazuju da je uticaj vremena izotermne transformacije na morfologiju mikrostrukture neznan.

Rezultati ispitivanja transmisionim elektronskim mikroskopom pokazuju da morfologija bainitnog ferita i zadržanog austenita ne zavisi od temperature izotermne transformacije. Bainitni ferit i zadržani austenit u uzorcima transformisanim na 300 i 400°C imaju istu morfologiju- pločasti su.

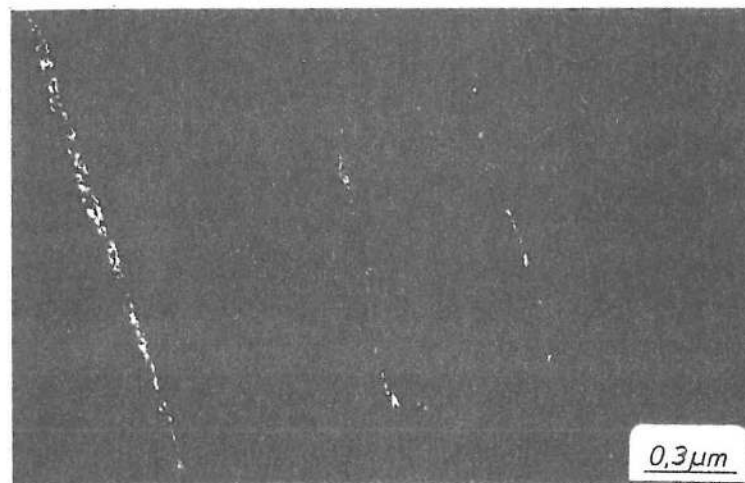
Tipična ADI mikrostruktura se sastoji iz bainitnog ferita bez karbida i stabilnog, zadržanog austenita (slika 6a,b). Takva mikrostruktura dobijena je u uzorcima transformisanim na 400°C u trajanju od 1-3 sata. Kod ostalih termičkih tretmana, identifikovani su karbidi, prisutni u bainitnom feritu (slika 7), i na graničnoj površini bainitni ferit/austenit (slika 8). Karbidi unutar bainitnog ferita identifikovani su kod uzoraka transformisanih na 300°C u trajanju od 1-4 sata, kao i kod uzoraka transformisanih na 400°C u trajanju od 4 sata. Karbidi na graničnoj površini ferit/austenit identifikovani su pri transformaciji i na 300 i na 400°C pri vremenu transformacije od 4 sata.



Sl.6 Mikrostruktura metalne osnove austenitizirane na 950°C i izotermno transformisane na 400°C/1h: a) svijetlo polje, b) tamno polje; (TEM)  
Fig.6 Austempered matrix at 400°C/1 h: a) bright field image, b) dark field image; (TEM)

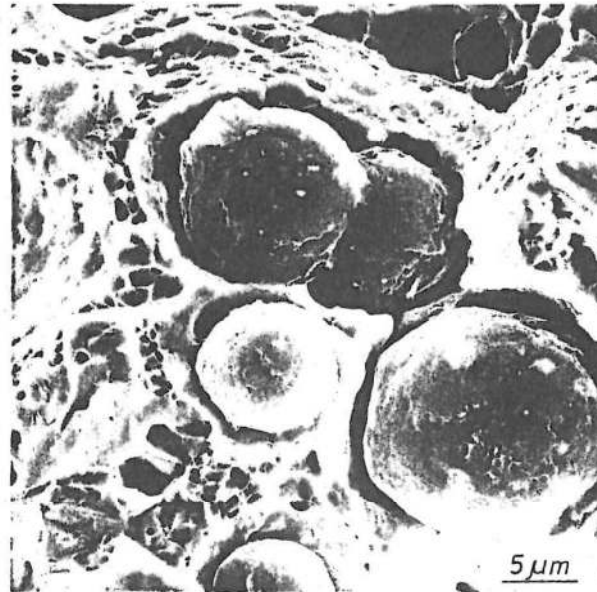


Sl.7 Mikrostruktura metalne osnove austenitizirane na 950°C i izotermno transformisane na 300°C/1h (TEM)  
Fig.7 Austempered matrix at 300°C/1h (TEM)



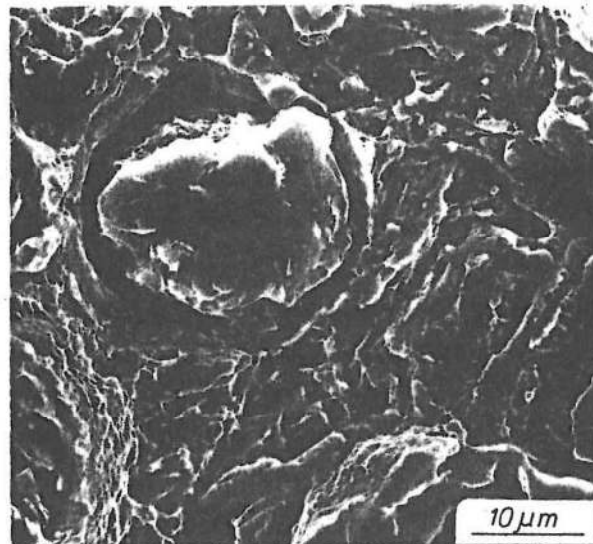
Sl.8 Mikrostruktura metalne osnove austenitizirane na 950°C i izotermno transformisane na 400°C/4h (TEM)  
Fig.8 Austempered matrix at 400°C/4h (TEM)

Površine preloma epruveta za ispitivanje žilavosti iz kojih su dobijeni uzorci za ispitivanje svjetlosnim i transmisionim elektronskim mikroskopom, analizirane su skening elektronskim mikroskopom. Rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 9-11. Površina preloma uzoraka sa tipičnom ADI mikrostrukturom je potpuno duktilna (slika 9). Izlučivanje karbida unutar bainitnog ferita prouzrokuje mješoviti duktilno-krti lom (slika 10), a izlučivanje karbida na na graničnoj površini ferit/zadržani austenit izaziva pretežno krti lom (slika 11).



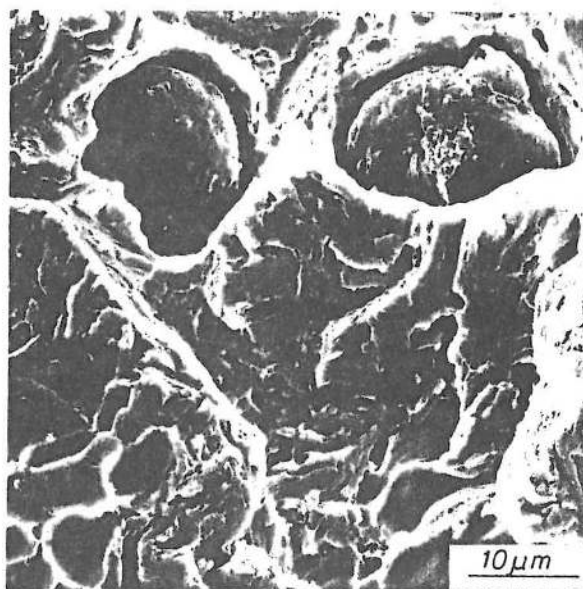
*Sl.9 Morfologija površine preloma uzorka austenitiziranog na 950°C i transformisanog na 400°C/1h; (SEM)*

*Fig.9 Fracture morphology of austempered aluminium ductile iron at 400°C/1h; (SEM)*



*Sl.10 Morfologija površine preloma uzorka austenitiziranog na 950°C i transformisanog na 400°C/4h; (SEM)*

*Fig.10 Fracture morphology of austempered aluminium ductile iron at 400°C/4h; (SEM)*



*Sl.11 Morfologija površine preloma uzorka austenitiziranog na 950°C i transformisanog na 300°C/4h; (SEM)*

*Fig.11 Fracture morphology of austempered aluminium ductile iron at 300°C/4h; (SEM)*

#### 4. DISKUSIJA

##### 4.1 Temperatura austenitizacije

Slike 2 i 3 pokazuju uticaj temperature austenitizacije na mikrostrukturu. Pločice bainitnog ferita dobijenog transformacijom na 400°C su finije pri austenitizaciji na 900°C (slika 3a,b). Slične efekte temperatura austenitizacije ima i na bainitni ferit dobijen transformacijom na 300°C (slika 2a,b). Povećanje temperature austenitizacije izaziva malo povećanje zapreminskog udjela zadržanog austenita (slike 2 i 3), što je posljedica povećanja rastvorljivosti ugljenika u primarnom austenitu. Takođe, povećanje temperature austenitizacije dovodi do ogrubljanja mikrostrukture, uslovljenog rastom austenitnog zrna.

##### 4.2 Temperatura i vrijeme izotermne transformacije

###### a) gornji bainit

Bainitna reakcija započinje nukleacijom pojedinačnih pločica bainitnog ferita na granicama zrna austenita i na graničnoj površini grafitnih nodula. Ugljenik iz ferita difundira u primarni austenit. Transformacija se dalje nastavlja kooperativnim rastom pločica bainitnog ferita, što rezultira nastajanjem snopova, odnosno paralelnih pločica bainitnog ferita (slika 3). Obogaćivanje austenita ugljenikom usporava rast bainitnog ferita i dovodi do prekida reakcije. Opisane pojave predstavljaju prvi stadijum bainitne transformacije. Mikrostruktura dobijena nakon prvog stadijuma reakcije je tipična ADI mikrostruktura, sastavljena od bainitnog ferita bez karbida i stabilnog, ugljenikom obogaćenog zadržanog austenita (slika 6a,b). Drugi stadijum bainitne reakcije počinje kada, uslijed dugog vremena transformacije, obogaćeni austenit izgubi svoju stabilnost, zbog čega nastaje njegova dekompozicija na ferit i karbide (slika 8). Istovremeno, karbidi se izlučuju i iz pločica bainitnog ferita koje u sebi sadrže izvesnu količinu rastvorenog ugljenika.



*b) donji bainit*

Igličasta mikrostruktura nastala pri transformaciji na 300°C naziva se donji bainit (slika 2a,b). Uslijed male brzine difuzije ugljenika, nastaju tanke fine pločice bainitnog ferita relativno zasićene ugljenikom. Rast ovih pločica je moguć samo ako dođe do smanjenja zasićenosti. Zbog onemogućene difuzije ugljenika u okolni austenit, to se postiže izlučivanjem karbida unutar pločica bainitnog ferita (slika 7). Dakle prvi stadijum bainitne reakcije u donjem bainitnom području (300°C) karakteriše izlučivanje karbida unutar bainitnog ferita. Drugi stadijum reakcije je identičan drugom stadijumu reakcije u gornjem bainitu (400°C), jer i u ovom slučaju produženje vremena transformacije izaziva razlaganje obogaćenog austenita na ferit i karbide. Posljedica navedenih promjena je i manji zapreminski udio zadržanog austenita u donjem u odnosu na gornji bainit.

**5. ZAKLJUČAK**

Promjene u morfologiji, zapremini, raspodjeli i veličini bainitnog ferita, zadržanog austenita i karbida, izazvane promjenom parametara termičkog tretmana, praćene su primjenom različitih tehnika.

Ispitivanja svjetlosnim mikroskopom su pokazala da se mikrostruktura ADI materijala sastoji iz bainitnog ferita i zadržanog austenita. Ispitivanja transmisionim elektronskim mikroskopom pokazuju da su bainitni ferit i zadržani austenit nezavisno od temperature izotermne transformacije pločasti. Prisustvo i mjesto izlučivanja karbida zavise od temperature i vremena izotermne transformacije.

Dobijene mikrostrukture utiču na karakter površine preloma. ADI mikrostruktura bez, odnosno sa malom količinom karbida pokazuje plastičnu površinu preloma. Veća količina karbida izlučenih unutar bainitnog ferita prouzrokuje kvazi-krti lom, a karbidi izlučeni na graničnoj površini bainitni ferit/zadržani austenit izazivaju krti lom.

**LITERATURA**

- [1] ŠIDANIN, L., SMALLMAN, R. E.: *Metallography of Bainite Transformation in Austempered Ductile Iron*, *Materials Science and Technology*, 1992, p. 1095-1103.
- [2] ŠIDANIN, L., SMALLMAN, R. E., BOUTORABI, S. M.: *Bainitna transformacija nodularnog liva, Uvodno predavanje po pozivu štampano u celini u Zborniku radova Naučno-stručnog skupa: V jugoslovenskog simpozijuma o metalurgiji*, Beograd, 1992, p. 338-341.
- [3] ŠIDANIN, L., NOVOVIĆ, M.: *Mikrostruktura i osobine bainitnog nodularnog liva-ADI materijala, Zbornik radova, 24. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije*, N. Sad, p. 25-30.
- [4] ŠIDANIN, L., NOVOVIĆ, M.: *Uticaj prelaznih karbida na morfologiju loma ADI materijala, Treći simpozijum za elektronsku mikroskopiju Srbije, SEM'92, Niš, 1992, p. 64.*
- [5] ŠIDANIN, L., SMALLMAN, R. E., BOUTORABI, S. M.: *Electron Microstructure and Fracture of Aluminium Austempered Ductile Iron*, *Materials Science and Technology*, in press.
- [6] BOUTORABI, S. M., YOUNG, J. M., KONDIĆ, V.: *AFS., Inc., World Conference on ADI, Indian Lakes Resort, Bloomington, IL., 1991, 33.*