

ORIGINALNI NAUČNI RAD

L. Šidjanin*, S. Miličev**, N. Matović**

ZAMORNI LOM KOLENASTIH VRATILA OD
NODULARNOG LIVA NL60

FATIGUE FRACTURE OF DUCTILE CAST
IRON CRANKSHAFT

Summary

Crankshaft is very important part in automotive industry and can be produced either as forged steel part or as casting from ductile iron. If it is done as a casting part from ductile iron the standard properties are very specific and strongly limited. Many tests of material control are included.

In this paper detailed investigation of pilot series of crankshafts produced from pearlite nodular iron grade NL60, were performed. In addition to standard mechanical properties and microstructure of pearlite ductile iron, fatigue life and fatigue limit were determined. The fatigue tests were carried out on crankshaft segments named series I and II with axial bend loading. For crankshaft series II the bending moment data to estimate fatigue life and fatigue limit, were obtained. However, fatigue life and fatigue limit for crankshaft of series I were not determined. All specimens were failed below 2×10^6 cycles. The cause of failure is microporosity under the surface of as-cast crankshafts. After machining the microporosity developed into the planar defect and reduced drastically fatigue fracture process.

*Dr Leosava Šidjanin, vanr. profesor Fakulteta tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V. Perića Valtera 2.

**Dipl.ing. Slavica Miličev, Dipl.ing. Nada Matović, DP "LIVNICA KIKINDA" 23000 Kikinda, Beogradski put bb.

Rezime

Na probnim uzorcima kolenastih vratila od perlitnog nodularnog liva kvaliteta NL60 ispitivana je vremenska i trajna dinamička čvrstoća. Ispitivanje je vršeno na segmentima kolenastih vratila sa naizmjeničnim opterećenjem na savijanje pod uslovima koji su slični eksploatacijskim. Za kolenasta vratila iz serije II određeni su momenti savijanja koji služe kao parametri za određivanje i vremenske i trajne dinamičke čvrstoće. Za uzorke kolenastih vratila iz serije I nije određena ni vremenska ni trajna dinamička čvrstoća pošto su se svi uzorci lomili kod broja ciklusa nižim od 2×10^5 . Razlog tome je podpovršinska mikroporoznost, koja nakon mašinske obrade rezanjem postaje planarna površinska greška i direktno utiče na proces zamornog loma.

1. UVOD

Kolenasto vratilo je veoma odgovoran mašinski deo automobilske industrije, a izrađuje se bilo kao čelični otkovak, bilo kao odlivak od nodularnog liva /1/.

Kada se proizvodi kao odlivak tehničko tehnološki zahtevi su specifični i veoma su strogi, a obuhvataju nekoliko vrsta ispitivanja /2/.

Jedno od složenijih i dugotrajnijih ispitivanja je određivanje dinamičke čvrstoće, gde se ispitivanje obavlja na pojedinim isečenim segmentima kolenastog vratila pod uslovima koji su slični eksploatacijskim /3/.

Primenom metode statističke obrade rezultata, dobijaju se vrednosti koje služe kao baza za vrednovanje prihvatljivosti cele serije odlivaka.

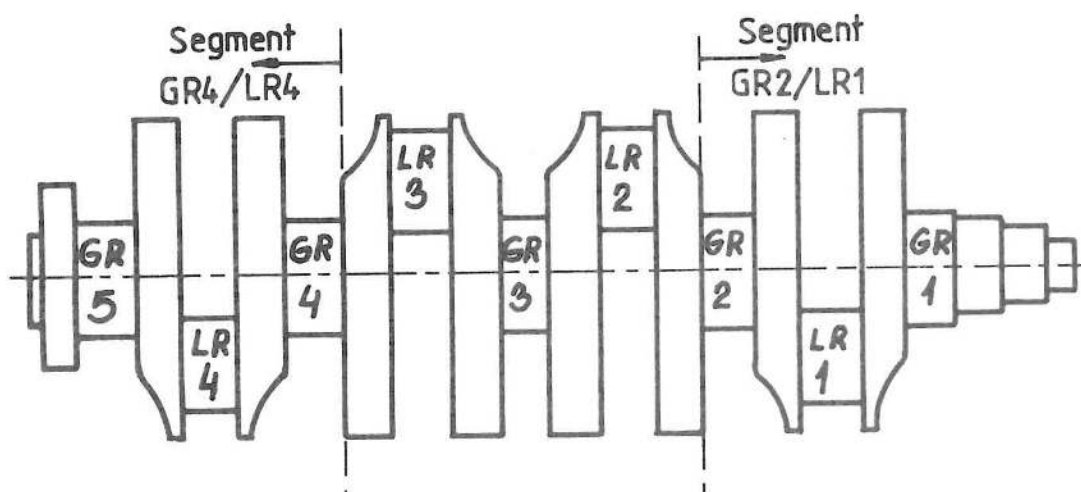
U ovom radu vršena su detaljna ispitivanja kolenastih vratila od nodularnog liva NL60.

2. EKSPERIMENTALNI RAD

2.1. Dinamička čvrstoća

Za ispitivanje su korišćeni probni odlivci kolenastih vratila od perlitnog nodularnog liva kvalitete NL60, koji su nakon mašinske obrade rezanjem površinski kaljeni na dubinu 1-3 mm i tvrdoćom min. 50 HRC /4/.

Na određeni broj slučajno odabrenih kolenastih vratila primenjen je jednostepeni i višestepeni postupak ispitivanja sa naizmjeničnim simetričnim opterećenjem na savijanje. Za ispitivanje su korišćeni segmenti glavnog i letećeg rukavca - slika 1, uz upotrebu specijalnog pribora za prihvatanje /5/.



Sl.1. Šema kolenastog vratila sa segmentima za ispitivanje

Fig.1. Crankshaff scheme with investigation segments

Pri ispitivanju korišćen je visokofrekventni pulzator od 200 KN tipa PVT 0056 "Carl-Schenck"

Uslovi jednostepenog i višestepenog ispitivanja su prikazani u tabeli 1 i 2.

Tabela 1 - Jednostepeno ispitivanje

Table 1 - One step experiment

Moment savijanja \pm Mb/Nm/	Frekvencija f/Hz/	Potreban broj ciklusa N90%	Rasipanje rezultata N90%/N10%
1425	40 ± 2	$> 2 \times 10^5$	$< 1:4$

Višestepeno ispitivanje je radjeno sa četiri nivoa momenta savijanja, a primenjeno je samo na seriju uzoraka kolenastih vratila koji su prethodno zadovoljili kod jednostepenog ispitivanja. Treba napomenuti da početni moment savijanja kod višestepenog ispitivanja zavisi od rezultata jednostepenog ispitivanja, s tim da se sledeći nivoi menjaju za veličinu ± 100 Nm na više ili na niže što zavisi od toga dali se uzorak pri ispitivanju slomio ili ne.

Tabela 2 - Višestepeno ispitivanje

Table 2 - Multistep experiment

Granični broj ciklusa višestepenog ispitivanja	Veličina promene momenta savijanja	Odnos momenata	Frekvencija	Zahtevani minimalni moment savijanja	Rasipanje rezultata
Nlim	$\pm D$ /Nm/	$R = \frac{Mbd}{Mbg}$	f /Hz/	$\pm Mb$ 90% /Nm/	$\frac{Mb}{Mb}$ 90% 10%
2×10^6	100	-1	40^{\pm}	>1000	<1:1,2

Matematički model korišćen za obradu rezultata kod jednostepenog ispitivanja gde je ispitivanje vršeno do loma, a broj ciklusa je ispod $2 \cdot 10^6$ glasi /6/:

$$\log \bar{x} = \frac{1}{n} \sum \log X_i$$

gde je: \bar{x} - srednja vrednost broja ciklusa, n - broj ispitanih uzoraka, X_i - pojedinačna vrednost broja ciklusa.

Matematički model korišćen za obradu rezultata kod višestepenog ispitivanja, gde je bitan broj slomljenih i neslomljenih uzoraka glasi /6/:

$$\bar{x} = x_0 + D \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right)$$

gde je: \bar{x} - srednja vrednost opterećenja, x_0 - početno opterećenje, D - veličina promena momenta opterećenja; $A=i \cdot Fi$ i $B=i^2 \cdot Fi$ gde je i - broj nivoa opterećenja, a Fi - broj slomljenih uzoraka na određenom nivou opterećenja.

2.2. Mehaničke karakteristike

Granica tečenja $R_{p0,2}$; zatezna čvrstoća R_m , izduženje A, kao i tvrdoća HB je ispitivana na epruvetama isečenim iz sirovih odlivaka kolenastih vratila i na epruvetama isečenim iz kolenastih vratila čiji su segmenti dinamički ispitivani /4/. Ispitivanje je vršeno na elektronskoj kidalci tipa Karl Frank GMBM i aparatu za merenje tvrdoće "Biviskop" - Georg Reicherter.

2.3. Mikrostruktura i morfologija loma

Na svim epruvetama isečenim iz kolenastih vratila, kao i na poprečnom preseku prelomljenih površina u zoni iniciranja zamornog loma, analizirana je mikrostruktura svetlosnim mikroskopom tipa Olympus, sa konvencionalnom metalografskom pripremom uzoraka.

Morfologija loma prelomljenih površina pri jednostepenom i višestepenom ispitivanju kao i prelomljenih površina zateznih epruveta je analizirana skening elektronskim mikroskopom (SEM) tipa JSM 35 i radnim naponom 25 KV.

3. REZULTATI

3.1. Dinamička čvrstoća

Jednostepeno ispitivanje je primenjeno na dve serije od po 7 kolenastih vratila, s tim da su kod svakog kolenastog vratila ispitivana po dva segmenta (ukupno 28 uzoraka). Rezultati ispitivanja nakon statističke obrade rezultata su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3 - Jednostepeno ispitivanje

Table 3 - Onestep experiment

Oznaka	Mesto ispitivanja		Rezultati ispitivanja	
	GR4/LR4	GR2/LR1	N90%	N90%/N10%
Serija I Kolenasta vratila 1 do 7	X		$6,18 \cdot 10^4$	1:1,68
		X	$1,13 \cdot 10^5$	1:1,56
Serija II kolenasta vratila 1a do 7a	X		$>2 \cdot 10^6$	
		X	$>2 \cdot 10^6$	

Prema uslovima ispitivanja prikazanim u tabeli 1, rezultati u tabeli 3 pokazuju da serija I sa kolenastim vratilima 1 do 7 ne zadovoljava ni na jednom segmentu, dok je serija II sa kolenastim vratilima 1a do 7a potpuno zadovoljila. Zbog toga na seriji II na još 24 kolenastih vratila, je primenjeno i višestepeno ispitivanje. Ispitivanje je vršeno samo na RL4/LR4 segmentu, pošto je to segment u odnosu na GR2/LR1 konstruktivno oslabljen prisustvom otvora za podmazivanje. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 4.

Tabela 4 - Višestepeno ispitivanje

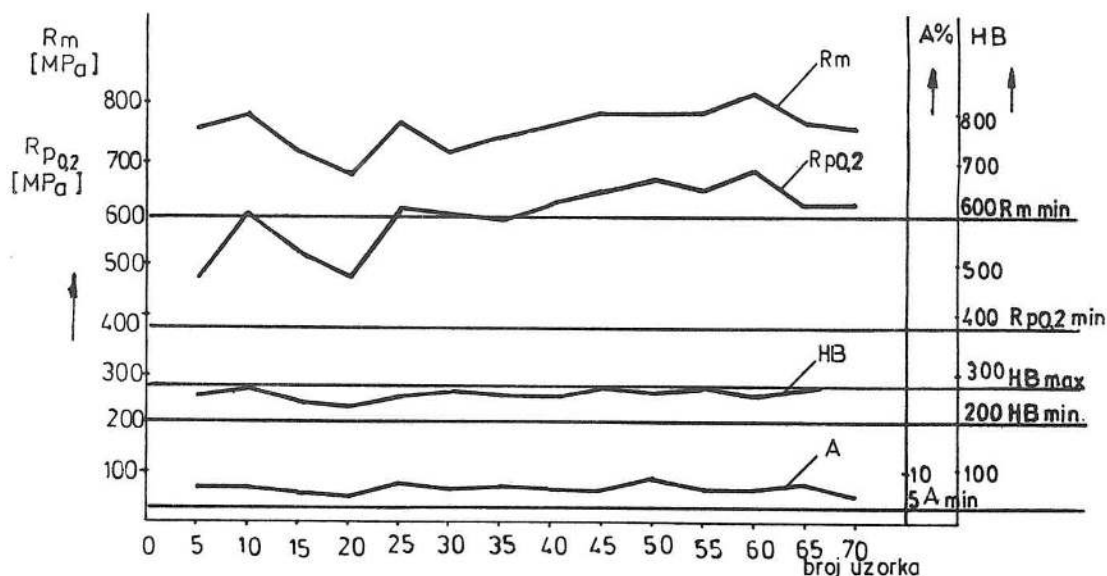
Table 4 - Multistep experiment

Oznaka	Mesto ispitivanja		Rezultati ispitivanja	
	GR4/LR4	GR2/LR1	Moment ispitivanja $\pm Mb90\%$ /Nm/	Rasipanje rezultata Mb90%/Mb10%
Seriya II Kolenasta vratila 8a-31a	X		1352	1:1,1

Početni moment ispitivanja je bio 1300 Nm dok moment ispitivanja kod četvrtog nivoa ispitivanja je bio 1600 Nm. Nakon svih nivoa ispitivanja, bilo je 12 segmenata slomljeno i 12 neslomljeno. Rezultati u tabeli 4. pokazuju da i višestepno ispitivanja kod serije II u potpunosti zadovoljava.

3.2. Mehaničke karakteristike

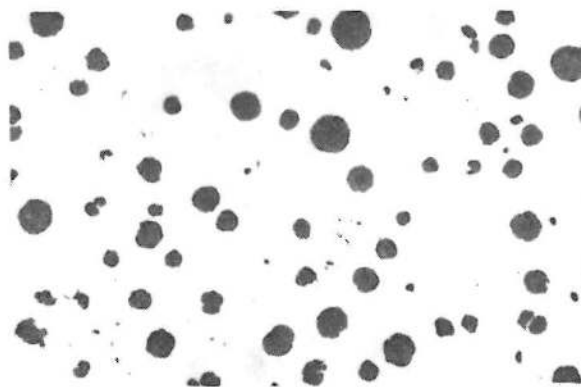
Rezultati mehaničkih ispitivanja svih ispitivanih epruveta isečenih iz sirovih i obradjenih kolenastih vratila (serija I i II) prikazani su na slici 2. Oni pokazuju da su svi rezultati viši od minimum propisanih.



Sl. 2. Mehaničke karakteristike
Fig. 2. Mechanical properties

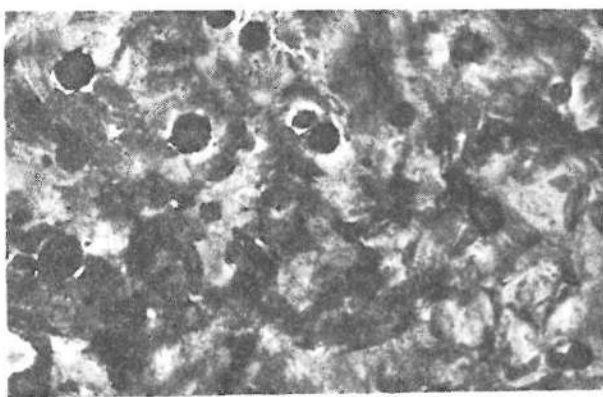
3.3. Mikrostruktura i morfologija loma

Na svim ispitivanim epruvetama analizirana je mikrostruktura. Mikrostruktura je ujednačena. Prisutan je nodularni grafit sa stepenom sferoidizacije od preko 90%. Prosečna veličina nodula je $35 \mu\text{m}$, a broj nodula po mm^2 je 120. Mikrostruktura metalne osnove je pretežno perlitna sa ostrvcima slobodnog ferita do 10%. Količina slobodnih karbida je ispod 1%. Ilustracija mikrostrukture je prikazana na slikama 3. do 5.



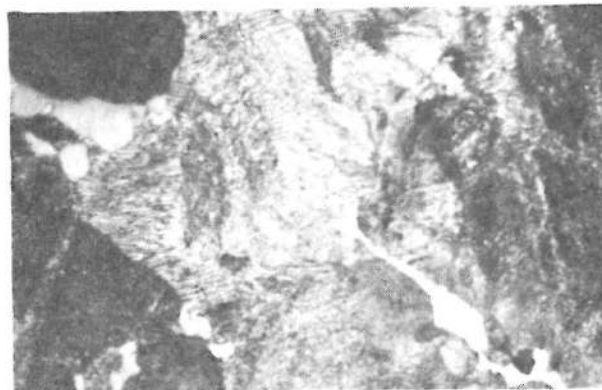
Sl. 3. 100x

Sl. 3. Oblik veličina i raspored modula grafita
Fig. 3. Shape, size and distribution of grafite



Sl. 4.

100x

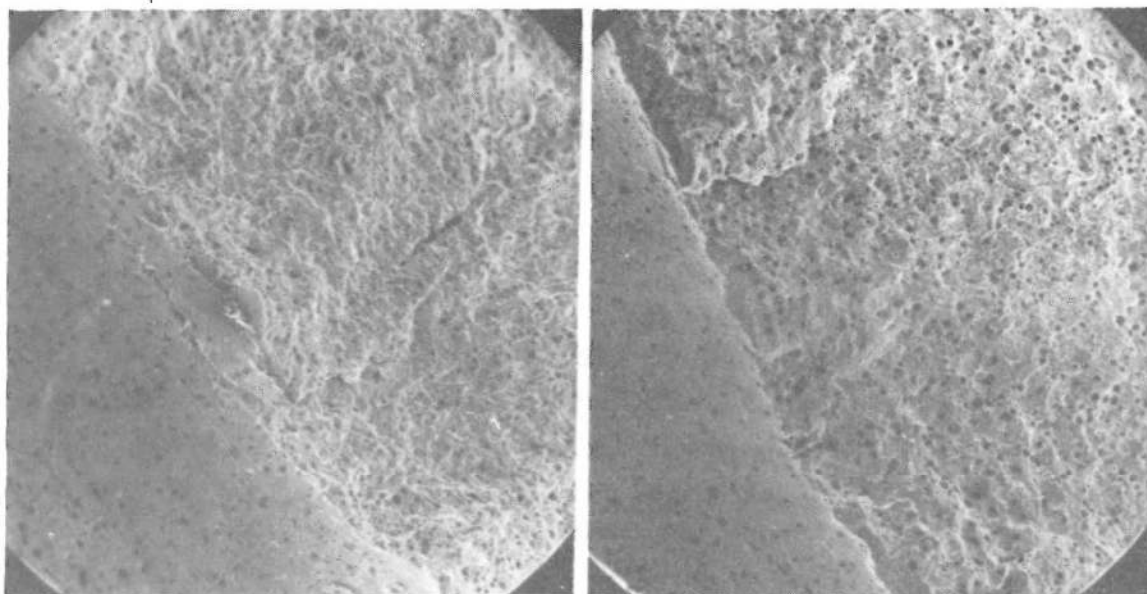


Sl. 5.

500x

Sl. 4,5 Mikrostruktura metalne osnove
Fig. 4,5 Microstructure of the matrix

Morfologija loma je ispitivana na prelomljenim segmentima kolenastih vratila serije I i II i na prelomljenim površinama zateznih epruveta. Kod svih uzoraka segmenata I i II serije zamorna prslina se stvara na površini u zoni žljeba - slike 6. i 7. Kod uzoraka segmenata serije I u samom žljebu postoje i sekundarne prsline, koje su počele da se šire sa istog mesta gde je i iniciranje primarne zamorne prsline - slika 6. Iniciranje zamorne prsline na mestu površinske mikroporoznosti i počeci širenja prsline i u zoni žljeba je prikazana na slikama 8. i 9.



Sl. 6.

20x

Sl. 7.

30x

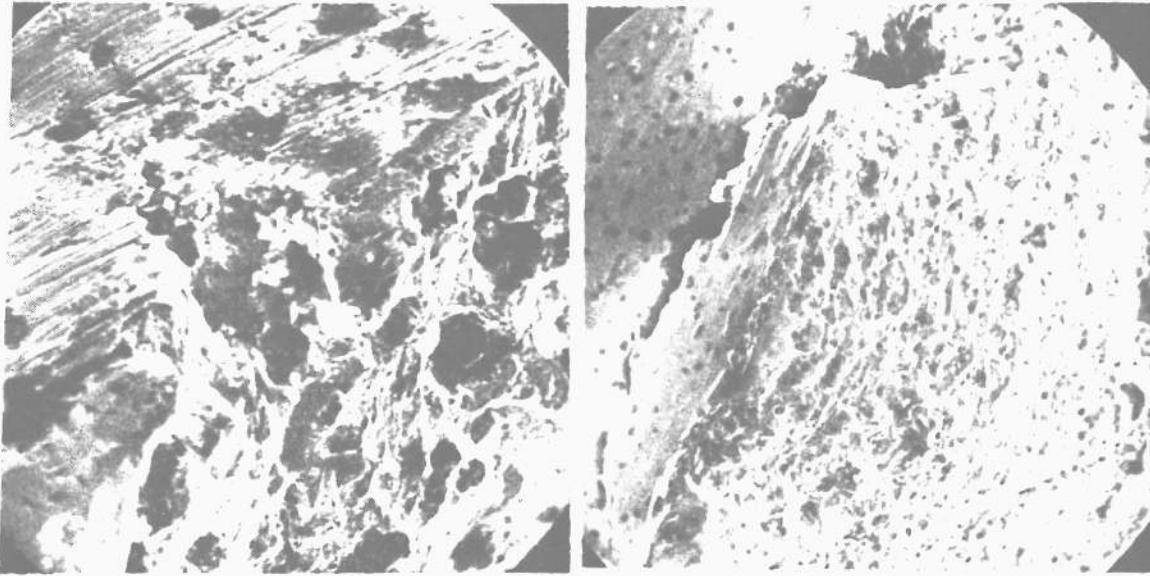
Sl. 6,7. Mesto iniciranja zamorne prsline - uzorak segmenta serije I i uzorka segmenta serije II

Fig.6,7. Initiation of fatigue fracture - segment from series I and segment from series II.

Sa površine, zamorna prslina se širi talasasto, cik-cak, stvarajući tzv. "brda i doline" sa smicajnim površinama loma - slika 10.

Prelazna zona zamor/nasilni lom nije oštra, nego između smicajnih površina, prisutne su prvo manje, a kasnije više, i površine krtoeg transkristalnog loma, na kojima su prisutne izrazite rečne šare - slika 11.

Morfologija završnog loma uzorka segmenta je identična sa morfologijom loma zatezne epruvete, tj. lom je mešovitog tipa, 10% duktilan sastavljen iz sitnih jamica i 90% krto, transkristalan, koji je nastao mehanizmom cepanja - slika 12.



Sl. 8.

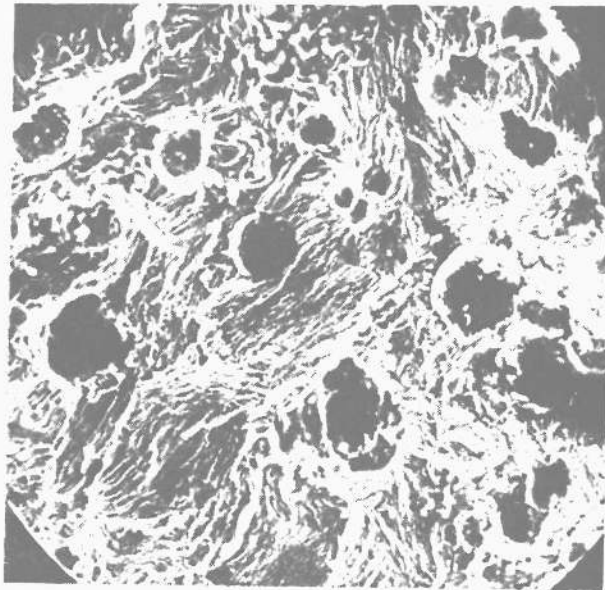
200x

Sl. 9.

30x

Sl. 8,9. Iniciranje zamorne prsline na mestu mikroporoznosti
(uzorci segmenta serije I)

Fig. 8,9. Initiation of fatigue crack on microporosile (segment
from series I.)

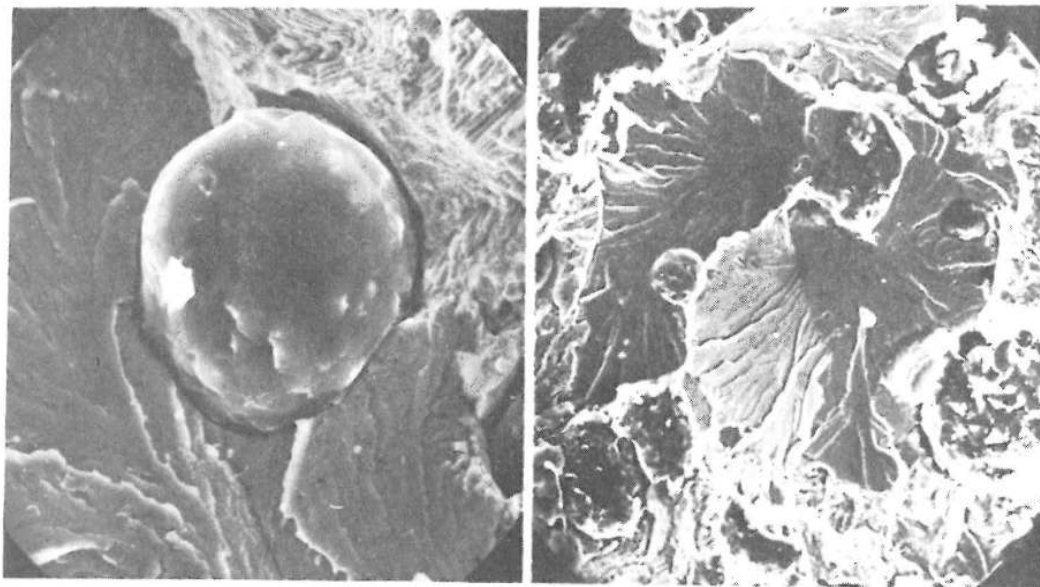


Sl. 10.

300x

Sl. 10. Zona zamornog loma

Fig. 10. Fatigue fracture area



Sl.11.

430x

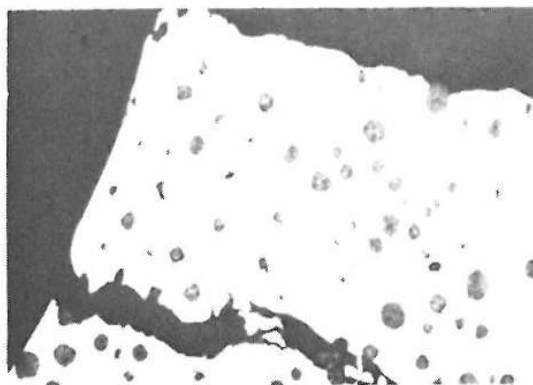
Sl.12.

1500x

Sl.11,12. Prelazna i završna zona loma

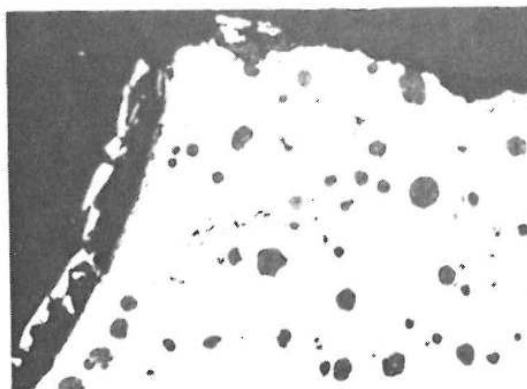
Fig.11,12. Transition and final fracture area

Rezultati mikrostrukturne analize površine poprečnog preseka loma u zoni iniciranja zamorne prsline su prikazani na slikama 13 do 16. Oni pokazuju da su u blizini prelomljene površine prisutne i sekundarne prsline i nakupnina mikropora. Pored toga, pokazuju da zamorni lom je nastao i širio se u zonama koje nisu površinski okaljane.



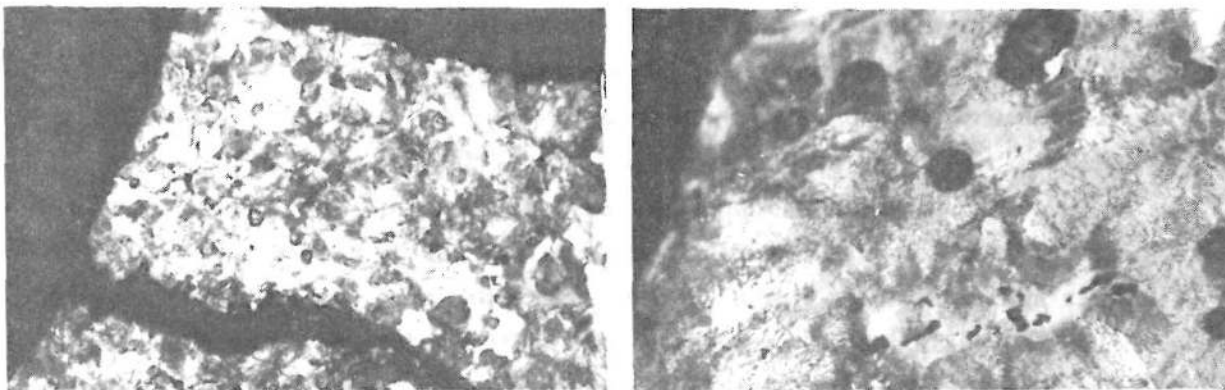
Sl.13.

100x



Sl.14.

100x



Sl. 15.

100x

Sl. 16.

500x

Sl. 13-16. Mikrostruktura u zoni iniciranja zamornog loma
 Fig. 13-16 Microstructure of fatigue initiation area

4. DISKUSIJA

Primenjeno jednostepeno i višestepeno ispitivanje sa naizmeničnim opterećenjem na savijanje je pokazalo da jedan deo ispitivanih uzoraka segmenata kolenastih vratila tj. uzorci segmenata glavnih i letećih rukavaca GR4/LR4 i GR2/LR1 iz serije I nisu zadovoljili već kod jednostepenog ispitivanja jer su se slomili pri broju ciklusa koji je bio niži od minimum propisanog 2×10^5 (tabela 1 i 3).

Za razliku od serije I uzorci istih segmenata serije II pri istim uslovima jednostepenog ispitivanja izdržale su 2×10^6 ciklusa i ostale su neslomljene. Dobijeni broj ciklusa od 2×10^6 sa momentom savijanja ± 1425 Nm predstavljaju parametri za određivanje vremenske dinamičke čvrstoće za seriju II kolenastih vratila od perlitnog nodularnog liva NL60, sa pouzdanosti rezultata od 90%.

Radi određivanja trajne dinamičke čvrstoće kolenastih vratila serije II primenjeno je i višestepeno ispitivanje sa četiri nivoa opterećenja, gde je početni moment savijanja bio ± 1300 Nm, a veličina promene momenta savijanja kod svakog nivoa je bila ± 100 Nm. Ispitivanje je vršeno samo na segmentima glavnog i letećeg rukavca GR4/LR4, pošto je kako je već rečeno to segment u odnosu na GR2/LR1 konstruktivno oslabljen prisustvom otvora za podmazivanje. Nakon ispitivanja, dobijen je moment savijanja ± 1352 Nm sa pouzdanošću od 90% koji predstavlja parametar za određivanje trajne dinamičke čvrstoće. Obzirom na podatke iz tabela 2 i 4 vidi se da je serija II kolenastih vratila potpuno zadovoljila.

Vrednosti momenta savijanja koji određuju trajnu dinamičku čvrstoću kolenastih vratila serije II, istovremeno ne daju objašnjenje zašto uzorci kolenastih vratila serije I nisu zadovoljile minimalni broj ciklusa te su se lomile kod broja ciklusa nižim od 2×10^5 .

Analiza rezultata mehaničkih karakteristika na epruvetema isečenim kako iz sirovih kolenastih vratila, tako i iz kolenastih vratila serije I i II (sl.2. i analiza mikrostrukture (slike 3 do 5) pokazuju da se svi rezultati nalaze u okvirima tehničkih uslova propisanim za kvalitet nodularnog liva NL60 /2,4/.

Medjutim, analiza loma prelomljenih uzoraka segmenata serije I i II je pokazala određene razlike. Morfološki gledano sve prelomljene površine su sadržale tri zone loma: zonu zamora (slika 10), prelaznu zonu (slika 11) i zonu završnog loma (slika 12).

Zona zamora je nastala kao rezultat stvaranja inicijalne zamorne prsline i njenog širenja talasasto, cik-cak, stvarajući tzv. "brda i doline" sa smicajnim površinama loma.

Prelazna zona zamor/završni lom nije oštra. Između smicajnih površina na početku manje, a kasnije više, prisutne su površine krtoeg transkristalnog loma sa izrazitim rečnim šarama.

Završni lom je pretežno krt (90%), transkristalan, i nastao je mehanizmom cepanja. Mestimično (10%) prisutne su i sitne jamice karakteristične za duktilni lom.

Mesto iniciranja i stvaranja zamorne prsline je na prelazu žljeba glavnog rukavca i ramena kolena kolenastog vratila tj. na konstruktivnom mestu najveće koncentracije napona. Za razliku od uzoraka segmenata serije II, uzorci serije I u samom žljebu imaju i sekundarne prsline. One su počele da rastu sa mesta gde su nastale primarne zamorne prsline (slike 6 i 7), a primarna zamorna prsline se stvarala na mestu gde su prisutne mikro pore (slike 8 i 9). Postojanje mikro pora na površini ispitivanih segmenata je posledica prisutnosti podpovršinskih mikro pora u sirovim oblicima, koje se nakon mašinske obrade rezanjem pojavljuju na površini kao mikroplanarne greške. Rezultati mikrostrukturne analize površine poprečnog preseka loma u neposrednoj blizini iniciranja primarne zamorne prsline pokazuju da u području primarnih i sekundarnih prsline uz same prsline ili neposredno uz njih, prisutne su nakupine mikro pora (slike 13 do 16). Postojanje mikropora na mestima najveće koncentracije napona je dovelo do stvaranja inicijalne zamorne prsline pri nižem broju ciklusa a time se smanjio i broj ciklusa potreban kako za rast zamorne prsline, tako i za završni lom.

Napominje se da direktan uticaj površinske termičke obrade nije uočen, jer je nastajanje i rast primarne zamorne prsline u zonama koje nisu površinski kaljene. Pored toga merena je i hrapavost žljeba, a razlika u rezultatima hrapavosti uzorka serije I i II nije značajna.

5. ZAKLJUČAK

1. Za jedan broj probnih uzoraka kolenastih vratila od perlitnog nodularnog liva kvaliteta NL60 (serija II) određeni su momenti savijanja koji služe kao parametri za definisanje vremenske i trajne dinamičke čvrstoće.

Za propisane uslove ispitivanja, rezultat momenta savijanja koji određuje vremensku dinamičku čvrstoću iznosi ± 1425 Nm, a za trajnu dinamičku čvrstoću ± 1352 Nm.

2. Za probne uzorke kolenastih vratila iz serije I nije određena ni vremenska ni trajna dinamička čvrstoća pošto su se uzorci lomili pri broju ciklusa $6,18 \cdot 10^4$.

Razlog tome je prisustvo podpovršinske mikroporoznosti odlivaka, koje nakon mašinske obrade rezanjem postaju planarne površinske greške i direktno utiču na proces zamornog loma.

6. LITERATURA

- /1/ Gundlach R., Janovak J.: Proceeding of 2nd International Conference on Austempering Ductile Iron, Ann Arbor-Michigan (1986)
- /2/ Adam Opel - Techn. Lieferbedingungen für Werkstoffe QS 18M000 Grusseisen mit Kugelgraphit (1980)
- /3/ GME-Test procedure No L-GC-1 Deverschwing versuch mit Kurbelwellen und Kropfungen (1984)
- /4/ Techn. Zeichnung R90 156.373 (1985)
- /5/ Adam Opel - Prüfvorrichtung für Kurbelwelle R90 156373 Zeichnung Nr 284.02-03 (1981)
- /6/ Adam Opel - Auswertung von Versuchen und Messungen durch statistische Methoden (1972)