

# Analiza testova zamornog loma detalja konstrukcije kroz poređenje sa računski određenim naponima

Nikola Brkljač, Branko Brkljač, Milan Zeljković  
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu,  
Novi Sad, Srbija  
[brkljac@uns.ac.rs](mailto:brkljac@uns.ac.rs), [brkljacb@uns.ac.rs](mailto:brkljacb@uns.ac.rs), [milanz@uns.ac.rs](mailto:milanz@uns.ac.rs)

Radoslav Simić  
NIS GazpromNeft  
Novi Sad, Srbija  
[radoslav.simic@nis.eu](mailto:radoslav.simic@nis.eu)

*Sadržaj*— U cilju ilustracije nastojanja da se numerički rešava problem procene veličine dejstva koncentracije napona pri ispitivanjima izdržljivosti konstrukcije sa gledišta otpornosti na zamor i provere te procene eksperimentom, u okviru rada je za konkretni primer konstruktivnih detalja izvršena računaska analiza naprezanja primenom Metoda konačnih elemenata (MKE). U tu svrhu korišćeni su validni rezultati eksperimentalnih ispitivanja posmatranih konstruktivnih detalja preuzeti iz citirane literature. Na osnovu izvedene računske analize naponsko-deformacijskog stanja posmatranih konstruktivnih detalja i poređenja sa rezultatima eksperimentalnih testova izdržljivosti prema zamaranju preuzetim iz citirane reference dat je slikovit grafički prikaz i izvedeni su zaključci koji opravdavaju nastojanja da se numerički rešava procena veličine dejstva koncentracije napona na zamornu čvrstoću.

*Ključne reči*- koncentracija napona, test izdržljivosti na zamor.

## I. UVOD

Postavljajući pitanje „šta je, ustvari, dobra mehanička konstrukcija?“, Matek (*Claus Mattheck*), [1], ističe da je sasvim izvesno da bi mašinske delove, koji na sebi imaju opasne zarez, bilo moguće učiniti potpuno sigurnim u odnosu na otkaz u eksploataciji na bazi jednostavne „predimenzionisanosti“ i primećuje da bi oni time dobili besmisleno veliku masu. Pri tome se primenjuje ideja, da se napon koji vlada daleko od zone zarez, na bazi dodatno ugrađenog materijala drži na tako niskoj vrednosti, da i maksimalni napon, koji nastaje usled dejstva zarez  $\sigma_{\max} = F \cdot \sigma_0$ , bude dovoljno nizak da se isključi opasnost od pojave pukotina. Matek naglašava, da se ovakav prilaz koristi zbog nedovoljnog razumevanja problema, a nažalost u praksi se i danas često primenjuje. Osvrćući se na principe stvaranja u prirodi on konstatuje da „u okviru borbe za opstanak, koja se u prirodi odvija svakodnevno sa zastrašujućom nemilosrdnošću, ovakav prilaz bi u velikom broju slučajeva bio plaćen životom.“, [1].

Iz ovih razmatranja Matek izvodi zaključak da navedeni stavovi jasno pokazuju da „može postojati samo jedna dobra mehanička konstrukcija, naime ona, kod koje se ne pojavljuju ni tempirana mesta loma (lokalno visoki naponi u zoni zarez), ni zone koje su nedovoljno opterećene (nekorisni balast!)“. Posledica ovoga zaključka je da „za određeno delujuće opterećenje dela, naponi moraju biti konstantni u svakoj tački tog dela, što znači da je opterećenje podesno raspodeljeno

(aksiom konstantnog napona!). Samo u tom slučaju će svaka zona dela biti potpuno iskorišćena.“, [1].

S obzirom na zahtev da se pri konstruisanju moraju izbeći lomovi usled zamora (pojava pukotine ili barem njeno dalje širenje) nezavisno od radnog veka, postavlja se pitanje u kom stepenu koncentracija napona oslabljuje konstrukcijski deo? Raspravljajući o ovom pitanju Timošenko (*Стенан Прокофьевич Тимошенко*), [2], konstatuje da odgovor zavisi od vrste materijala i od karaktera dejstvujućih sila. Tako on zaključuje, da ako je materijal kovan, kao konstrukcioni čelik, i dejstvo sila statičko, koncentracija napona se može zanemariti. Dakle, maksimalni napon može izazvati izvesno tečenje u metalu lokalnog karaktera. Kada maksimalni napon premaši granicu tečenja, deformacija u korenu zarez nastavlja da se povećava, ali se maksimalni napon povećava samo delimično, naponi se izravnavaju i ne predstavljaju nikakvu opasnost pri statičkom opterećenju.

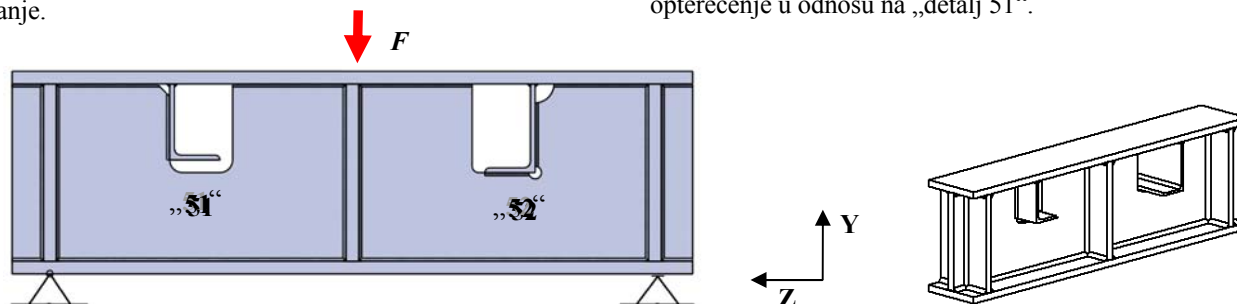
Bitno drugačija situacija nastaje kada je mehanički deo podvrgnut dejstvu ciklično promenljivih sila. Tada se zamorna prslina može pojaviti pri naponima daleko nižim od granice tečenja materijala i može se očekivati jak uticaj maksimalnog napona. Timošenko, [2], navodi da su prvi eksperimenti ispitivanja izdržljivosti prema zamaranju, sa koncentracijom napona, izvedeni na uzorcima relativno malih dimenzija i da su rezultati tih ispitivanja pokazali da je uticaj maksimalnih napona na smanjenje granice izdržljivosti mnogo manji nego što se moglo očekivati na osnovu veličine koeficijenta koncentracije napona. Međutim, kada su izvedena ispitivanja sa većim uzorcima dobijeni su potpuno drugi rezultati, [2]. Konstatacija da je u nekim slučajevima izdržljivost prema zamaranju vrlo bliska teorijskoj vrednosti napona na mestu koncentracije, naglašava Timošenko, je od velike praktične vrednosti, jer izgleda da postoji opšte ubeđenje, zasnovano na nekim ranijim eksperimentima, da je izdržljivost u slučaju koncentracije napona uvek znatno veća od teorijske vrednosti, tj. na strani sigurnosti pri dimenzionisanju, [3].

U cilju procene veličine dejstva koncentracije napona na zamornu čvrstoću, u okviru ovog rada je za konkretni primer konstruktivnih detalja, kroz poređenje sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja izdržljivosti dejstvom cikličkog opterećenja, izvršena analiza numerički određenih napona na mestima pojave lomova tokom eksperimenata. Primer se navodi kao ilustracija nastojanja da se numerički rešava problem procene veličine dejstva koncentracije napona pri

ispitivanjima izdržljivosti konstrukcije sa gledišta otpornosti na zamor i provere te procene eksperimentom, koji pokazuje u kojoj meri je potrebno učinjene hipoteze proveriti kroz ponašanje same konstrukcije. U tu svrhu ovde su korišćeni rezultati eksperimentalnih ispitivanja izdržljivosti na zamor konstruktivnih detalja prikazanih u referenci [4] i rezultati računске analize naprezanja posmatranih konstruktivnih detalja, izvedene u okviru reference [5].

## II. PRIKAZ PRIMERA ZAMORNOG LOMA DETALJA KONSTRUKCIJE

Skica konstruktivnih detalja ispitivanih uzoraka je prikazana na Sl. 1. Ispitivani uzorci su izrađeni od mekog čelika granice tečenja 240 do 270 MPa. Zavarivanje je izvedeno elektrolučno, a veličina zvara je izabrana na osnovu konstruktivnih pravila saglasno debljini limova. Prolazi zvara u regionima gde se očekivalo pucanje usled zamora su izvedeni bez prekida. Ispitivanja su izvedena hidrauličnim mašinama za ispitivanje.



Slika 1. Prikaz načina opterećivanja konstrukcijskih „detalja 51 i 52“, prema opisu iz [4].

TABELA I. REZULTATI ISPITIVANJA IZDRŽLJIVOSTI PRI ZAMARANJU „DETALJA 51 I 52“, PREUZETO IZ [4].

Test br.	Opterećenje [kN]	Broj ciklusa N	Lokacija pukotine	Mesto loma <sup>3</sup>	Dužina pukotine [mm]	Skica konstrukcijskog detalja sa numeracijom i naznakom pravca prostiranja pukotina
51-1	Statičko - 647	--	v. Sl. F.14 u [4]	--	--	<p>„Detalj 51“</p>
51-2	22.5 do <b>337.5</b>	<b>202 350</b>	1, <b>3</b> , 7	<b>3</b>	91.28	
51-3	22.5 do <b>225</b>	<b>1 007 100</b>	1, <b>16</b>	<b>16</b>	79.37	
51-4	22.5 do <b>337.5</b>	<b>203 110</b>	1, <b>3</b>	<b>3</b>	107.95	
51-5	22.5 do <b>225</b>	<b>910 510</b>	1, <b>16</b>	<b>16</b>	97.63	
51-6	22.5 do <b>337.5</b>	<b>241 800</b>	1, <b>3</b> , 7	<b>3</b>	222.25	
52-1	Statičko - 647	--	v. Sl. F.14 u [4]	--	--	<p>„Detalj 52“</p>
52-2	22.5 do <b>337.5</b>	202 350 <sup>4</sup>	2, 4, 6, 12		14.29	
52-3	22.5 do <b>225</b>	<b>2 131 920</b>	9, 10, <b>11</b>	<b>11-(10)</b>	110.46	
52-4	22.5 do <b>337.5</b>	<b>500 750</b>	2, 4, 6, <b>14</b> , 15, 18	<b>14-(15)</b>	119.86	
52-5	22.5 do <b>225</b>	<b>2 323 100</b>	10, <b>11</b> , 18	<b>11-(10)</b>	93.66	
52-6	22.5 do <b>337.5</b>	<b>461 510</b>	2, 6, 10, <b>11</b> , 18	<b>11-(10)</b>	142.87	

<sup>3</sup> Tačke br. 10 i br. 11 predstavljaju krajnje tačke pukotine br. 11-10. Pukotina u tački br. 10 se pojavljuje sa donje a pukotina u tački br. 11 sa gornje strane ugaonika. Pukotine u tačkama br. 14 i br. 15 se pojavljuju na isti način.

<sup>4</sup> „Detalj 51-2“ nije ojačavan. Na „detalju 52-2“ je postojala samo kratka pukotina kada je test prekinut.

Lomovi na „detalju 51“ dešavali su u tačkama 3 i 16 u pravcu normale na konturnu liniju, a kod „detalja 52“ lomovi su se dešavali od tačke 11 prema 10 i tačke 14 prema 15. Koristeći rezultate izvršenih testova Mans i dr. (*H. W. Munse i dr.*), [4], su konstruisali S-N krive za „detalje 51 i 52“, kao opterećenje naspram broja ciklusa do loma (dato na Sl. 15 u [4]). Na istim dijagramima takođe su prikazane i krive odgovarajućeg srednjeg smičućeg napona na neto površini rebra. Na osnovu ovih grafičkih prikaza Mans i dr. zaključuju da je „sa ovih slika očigledno da 'detalj 52' ima veću otpornost na zamorno opterećenje u odnosu na 'detalj 51', međutim prosečni kapaciteti tangencijalnih napona se ne razlikuju značajno.“, [4].

U okviru ovog rada, za prikazani primer konstruktivnih detalja izvršena je računaska analiza stanja napona primenom MKE<sup>1</sup>, sa ciljem da se kroz poređenje sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja iz [4], izvedenih na konkretnom primeru, istraži povezanost koncentracije napona, proistekle iz geometrijske konfiguracije detalja, sa mestima pojave pukotina i lomova.

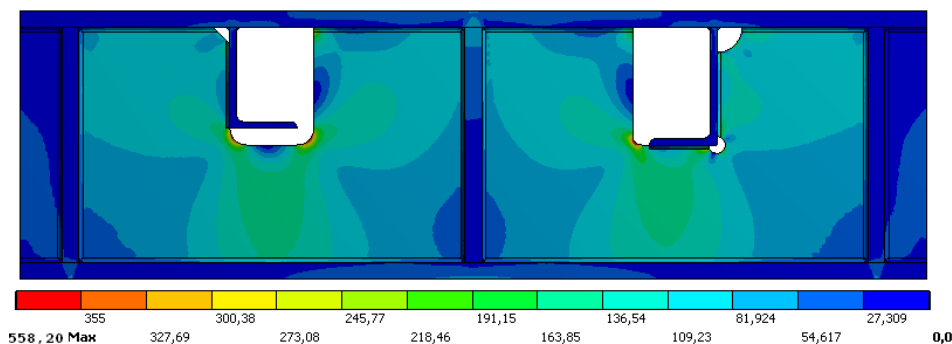
Slikovit grafički prikaz raspodele uporednih napona razmatranih konstruktivnih detalja,<sup>2</sup> određen primenom MKE za slučaj opterećenja silom  $F=337.5$  kN, dat je na Sl. 2. Na prikazanoj slici zone sa najvećim vrednostima napona, oblasti

sa izraženom koncentracijom napona, označene su crvenom bojom. Jednostavnim posmatranjem ove slike lako je uočiti da se naznačene lokacije zona sa izraženom koncentracijom napona upravo poklapaju sa mestima pojave pukotina pri testovima eksperimentalnih ispitivanja datim u Tabeli I.

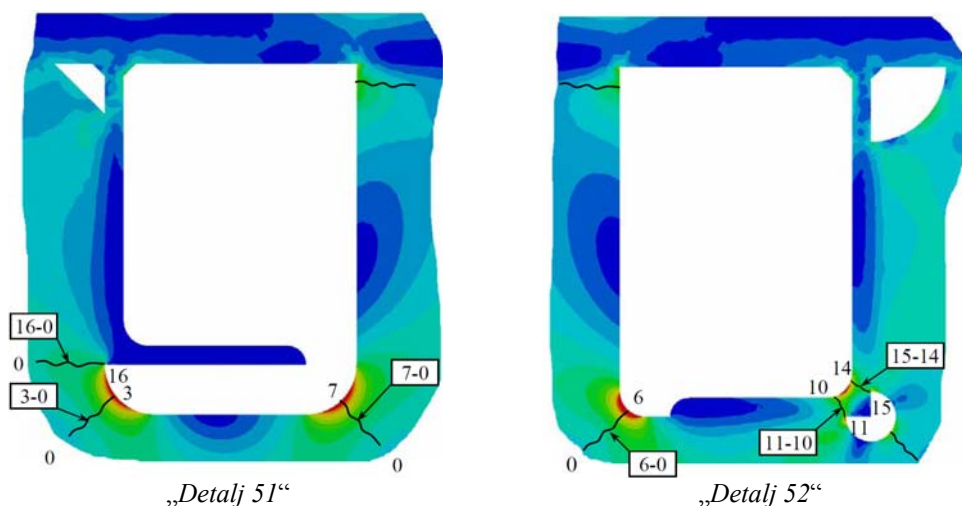
U cilju procene veličine dejstva koncentracije napona na zamornu čvrstoću, kroz poređenje sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja izdržljivosti dejstvom cikličkog opterećenja, izvedena je analiza numerički određenih napona na mestima pojave lomova (mesta lomova –tačke numerisane brojevima: 3; 6; 7; 10; 11; 14; 15 i 16).

Tabelarni prikaz veličina komponentalnih napona u naznačenim tačkama (pri opterećenju silom od 337.5 kN, Sl. 1), dat je u Tabeli II. Posmatranjem računskih vrednosti napona prikazanih u ovoj tabeli zapaža se da maksimalne veličine napona u posmatranim tačkama prevazilaze napon granice tečenja, koja iznosi 240 do 270 MPa.

Na Sl. 3 šematski su prikazani pravci duž kojih su sačinjeni dijagrami raspodele napona. Naznačene duži polaze iz posmatranih tačaka sa najvećim vrednostima napona na konturnoj površini (tačke br.: 3, 7, 16, i 6) u pravcima normala na liniju konture, a pravci 10-11 i 15-14 su duži koje povezuju *prelazne* tačke na konturnim linijama.



Slika 2. Slika naponskog stanja – prikaz uporednih napona fon Mizesa, konstruktivnih „detalja 51 i 52“, pod dejstvom opterećenja  $F=337.5$  kN.



Slika 3. Šematski prikaz pravaca duž kojih su sačinjeni dijagrami raspodele napona.

<sup>1</sup> Podrobniji prikaz izvršene analize je dat u referenci [5].

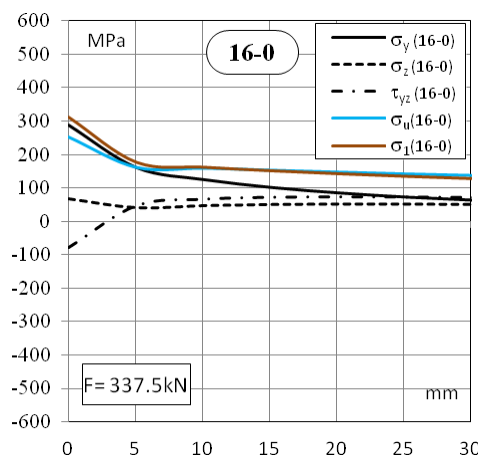
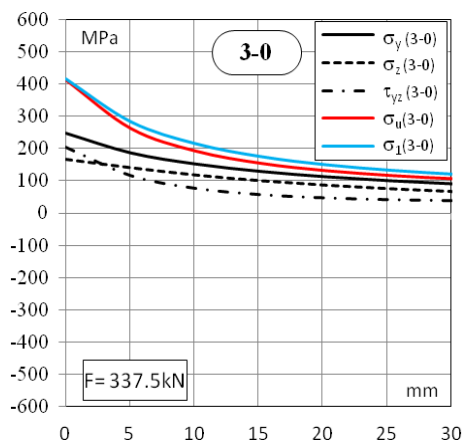
<sup>2</sup> Detaljniji prikaz je dat u referenci [5], u prilogu:4.2/I.

TABELA II. RAČUNSKE VREDNOSTI NAPONA KONSTRUKTIVNIH „DETALJA 51 I 52“ NA MESTIMA LOMOVA.

Komponenta napona		Vrednosti napona izračunate primenom MKE, u [MPa], pri opterećenju $F_y = -337.5$ [kN]							
		Lokacije očitavanja – „detalj 51“			Lokacije očitavanja – „detalj 52“				
		3	7	16	6	10	11	14	15
Normalni u pravcu osa: x, y, z	$\sigma_x$	2.24	-2.44	82.94	-10.40	96.38	-73.97	-26.09	52.32
	$\sigma_y$	248.14	-218.03	289.07	-286.06	336.55	6.70	265.59	90.03
	$\sigma_z$	167.02	-217.39	68.20	-279.46	166.80	167.70	50.53	276.77
Tange - nejalni	$\tau_{xy}$	-0.07	-0.04	-1.22	-0.34	1.35	-0.47	-0.19	0.25
	$\tau_{xz}$	0.08	0.14	-0.09	-0.57	-1.39	-0.28	-0.53	-0.11
	$\tau_{yz}$	203.34	217.20	-76.96	-281.28	-129.83	-34.41	-112.83	-82.23
Normalni u pravcima glavnih osa	$\sigma_1$	414.93	-0.50	313.24	-1.45	406.80	174.75	313.92	307.82
	$\sigma_2$	2.24	-2.45	82.94	-10.41	97.05	-0.34	2.21	58.99
	$\sigma_3$	0.23	-434.91	44.02	-564.06	95.88	-73.98	-26.11	52.32
Uporedni, fon Mizes	$\sigma_u$	413.70	433.44	252.03	558.19	310.33	221.30	326.79	252.23

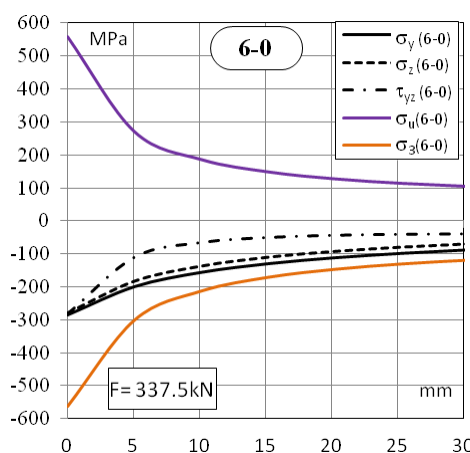
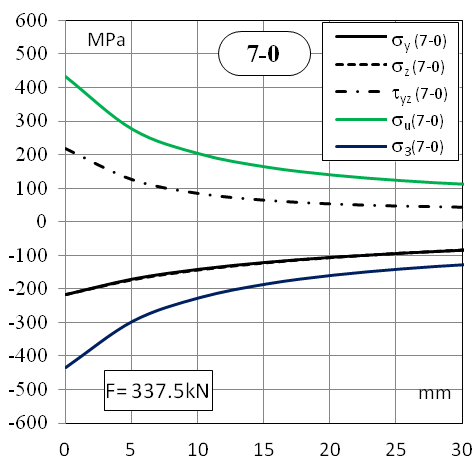
Na Sl. 4.a do 4.h i 5.a do 5.b, za posmatrana mesta lomova, grafički u vidu dijagrama je predstavljena raspodela komponentalnih i uporednih (fon Mizesovih) napona u pravcu

očekivanog rasprostiranja pukotina izazvanih cikličkim dejstvom opterećenja.



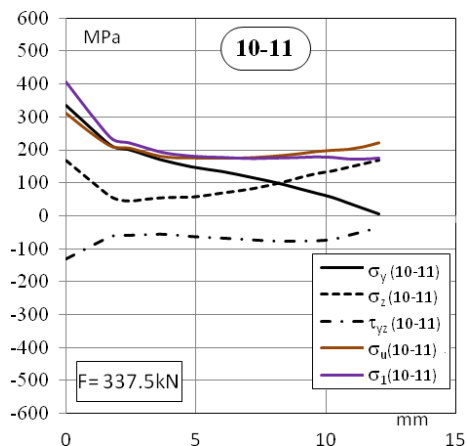
Slika 4. a.: Raspodela napona u okolini pukotine br. 3 u pravcu 3-0, pri opterećenju od 337.5 kN.

Slika 4. b.: Raspodela napona u okolini pukotine br. 16 u pravcu 16-0, pri opterećenju od 337.5 kN.

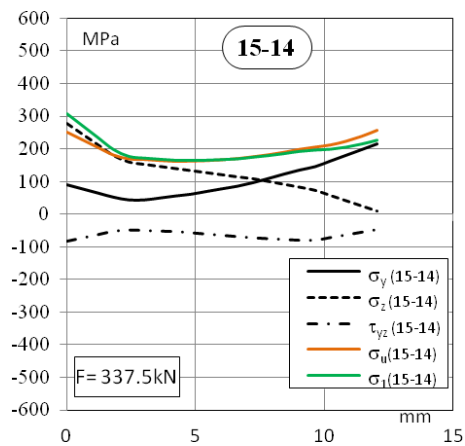


Slika 4. c.: Raspodela napona u okolini pukotine br. 7 u pravcu 7-0, pri opterećenju od 337.5 kN.

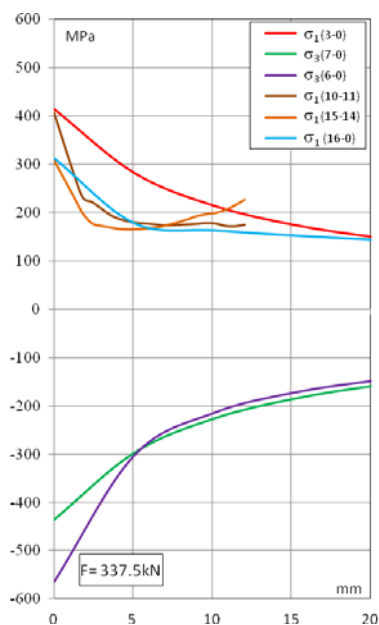
Slika 4. d.: Raspodela napona u okolini pukotine br. 6 u pravcu 6-0, pri opterećenju od 337.5 kN.



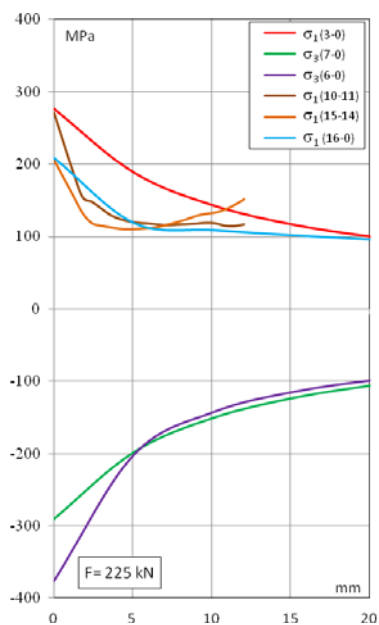
Slika 4. e.: Raspodela napona u okolini pukotine br. 11 u pravcu 10-11, pri opterećenju od 337.5 kN.



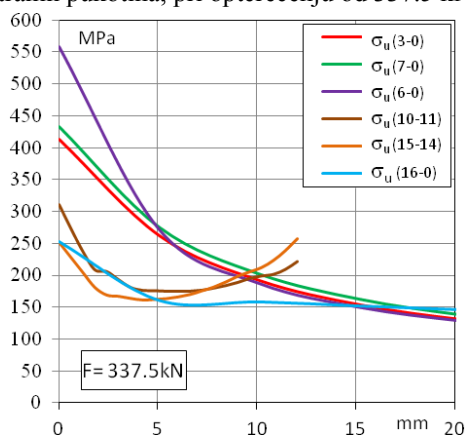
Slika 4. f.: Raspodela napona u okolini pukotine br. 14 u pravcu 15-14, pri opterećenju od 337.5 kN.



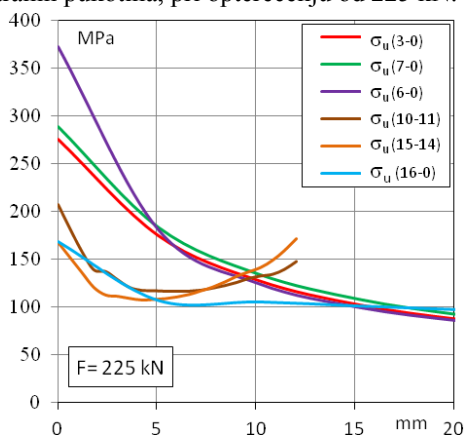
Slika 4. g.: Raspodela glavnih napona za „detalj 51“ i „detalj 52“ u naznačenim pravcima prostiranja posmatranih pukotina, pri opterećenju od 337.5 kN.



Slika 5. a.: Raspodela glavnih napona za „detalj 51“ i „detalj 52“ u naznačenim pravcima prostiranja posmatranih pukotina, pri opterećenju od 225 kN.



Slika 4. h.: Raspodela uporednih napona za „detalj 51“ i „detalj 52“ u naznačenim pravcima prostiranja posmatranih pukotina, pri opterećenju od 337.5 kN.



Slika 5. b.: Raspodela uporednih napona za „detalj 51“ i „detalj 52“ u naznačenim pravcima prostiranja posmatranih pukotina, pri opterećenju od 225 kN.

### III. UPOREDNA ANALIZA REZULTATA TESTOVA IZDRŽLJIVOSTI I RAČUNSKI ODREĐENIH NAPONA

Na osnovu izvedene računске analize naponsko-deformacijskog stanja posmatranih konstruktivnih „detalja 51 i 52“ i poređenja sa rezultatima eksperimentalnih testova izdržljivosti prema zamaranju datim u referenci [4] navodi se sledeće:

- Slika napona određenih računskim putem, primenom MKE, pokazuje da se lokacije pukotina i mesta lomova poklapaju sa oblastima konstrukcije u kojima su računskim putem određene najveće vrednosti napona. Ove lokacije su upravo mesta sa izraženom koncentracijom napona što potvrđuje teorijske stavove da se zamorne pukotine javljaju u zonama u kojima su prisutni koncentratori napona, odnosno da postoji pozitivna korelacija između koncentracije napona i pojave zamornih pukotina i lomova.
- Generalno gledano svi grafici, kojima je opisana napred navedena raspodela napona, karakterišu se dosta strmim gradijentom napona ispod površine materijala u odnosu na polaznu tačku. Već na rastojanju od oko 5 mm, ispod površine, relevantni naponi opadnu približno za 50% u odnosu na maksimalnu vrednost napon u posmatranoj tački.
- U poređnom analizom dijagrama raspodele napona (Sl. 4.g i 5.a, odnosno 4.h i 5.b) na pravcima lomova za „detalj 51“ (npr. pravci br.: 3-0; i 16-0) i „detalj 52“ (npr. pravci br.: 10-11 i 15-14) može se zaključiti da su vršni naponi isti za tačke 3 i 10, isto tako i za tačke 16 i 15 iz čega bi se moglo očekivati da postoji istovetan uticaj na zamornu čvrstoću u tačkama sa istim nivoom napona. Međutim sa istih dijagrama se može uočiti da je gradijent napona za pravce 10-11 i 15-14 (lokacije koje se odnose na „detalj 52“) *strmiji* u odnosu na korespondentni gradijent napona za pravce 3-0 i 16-0 (lokacije koje se odnose na „detalj 51“). Na osnovu važeće teorije ova činjenica ukazuje da bi „detalj 52“ trebalo da poseduje veću otpornost na zamor u odnosu na „detalj 51“, što je i potvrđeno rezultatima izvedenih eksperimentalnih testova, [4], datim u Tabeli I.
- Kada se uporedo posmatraju dijagrami raspodele napona za pravce: 7-0 („detalj 51“) i 6-0 („detalj 52“) vidi se da pravac 6-0 ima strmiji gradijent napona od pravca 7-0. Ovo je saglasno i sa teorijom *da kada radijus opada gradijent napona postaje strmiji*, jer je radijus zaobljenja na mestu 6 duplo manji od radijusa zaobljenja na mestu br. 7. Isto tako posmatranjem dijagrama raspodele komponentalnih napona u navedenim tačkama vidi se da se ove tačke nalaze u zoni pritiskih napona i iz tog razloga su manje osetljive na zamor u odnosu na zatezne napone. Uzimajući u obzir napred kazano i posmatrajući uporedo navedene dijagrame može se konstatovati da je otpornost na zamaranje u okolini ovih tačaka podjednaka, iako je napon u tački br. 6 veći u odnosu na napon u tački br. 7 što implicira manju otpornost na zamor u tački br. 6, a sa druge strane s obzirom na različite gradijente napona otpornost na zamor u tački 6 bi trebalo da je veća u odnosu na tačku br. 7. Uvidom u Tabelu I, u kojoj su dati rezultati eksperimentalno izvedenih testova na posmatranim detaljima, vidi se da se pukotine javljaju sa podjednakom učestanošću i kod tačke br. 6 i tačke br. 7 i to

samo u slučajevima pri maksimalnom opterećenju od 337.5 kN, ali se ni u jednom slučaju ne javljaju kao referentna mesta lomova, iako su im glavni i uporedni naponi značajno veći u odnosu na granicu tečenja. Napred opisano može da posluži kao interesantan ilustrativni primer koji upućuje da je pri analizi napona kod dinamički opterećenih konstrukcija važno posmatrati i glavne napone da bi se tačnije procenjivala otpornost na zamor, s obzirom na veću osetljivost pri zamaranju zateznim u poređenju sa pritiskim naponima.

- Mesta pojavljivanja pukotina i lomovi (definisani referentnom dužinom pukotine) su se dešavali u tački br. 3 („detalj 51“) isključivo pri testovima sa višim nivoom opterećenja tj. pri opterećenju  $F = 337.5$  kN (pri tom opterećenju uporedni i glavni napon u posmatranoj tački značajno prevazilaze granicu tečenja tj.:  $\sigma_u = 413.70$  MPa i  $\sigma_1 = 414.93$  MPa), a u tački br.16 isključivo kod testova sa nižim nivoom opterećenja, tj.  $F = 225$  kN i naponima nižim od granice tečenja (videti podatke u Tabeli I i dijagrame na Sl. 5.a i 5.b). Iz ove činjenice se može zaključiti da širenje pukotina stoji u korelaciji sa veličinom napona, kao i uticajima unutrašnjih diskontinuiteta u materijalu (uticaj zavarivanja u okolini tačke br. 16, što je u skladu sa teorijom da unutrašnji diskontinuiteti imaju veći uticaj pri dugotrajnijem zamaranju nego pri kraćem). Očigledno, pri testovima sa višim nivoom naprezanja u okolini tačke br. 3, zbog napona koji u značajnoj meri prevazilaze granicu tečenja dolazi do lokalnih plastičnih deformacija i preraspodele polja napona, što inicira pojavu mikroprslina i vrlo brzu (mali broj ciklusa) pojavu tehničkih pukotina (pukotine reda veličine 0.5 do 1 mm) i njihov dalji rast. Ovo dovodi do nove preraspodele napona i promene pravca i brzine rasprostiranja začetih pukotina.
- Poređenjem vrednosti računskih napona za tačke br. 3 i br. 7 datih u Tabeli II i dijagramima na Sl. 4. g i 4.h, pri nivou opterećenja od 337.5 kN, vidi se da su apsolutne vrednosti napona u tački br. 7 veće u odnosu na tačku br. 3, tj.:  $\sigma_{u(7)} = 433.44 > \sigma_{u(3)} = 413.70$  i  $\sigma_{1(7)} = |-434.91| > \sigma_{1(3)} = |414.93|$  MPa. Isto tako, vidi se da su naponi u okolini tačke br. 7 pritiski, za razliku od napona u okolini tačke br. 3 koji su zatezni. Kako se iz Tabele I može uočiti pukotine su se javljale istovremeno u tačkama br. 3 i br. 7, ali su se referentni lomovi dešavali isključivo u tačkama br. 3 iako su kao što je napred pokazano vrednosti napona u tim tačkama manje od vrednosti napona u tačkama br. 7. Ovo potvrđuje teoriju da je osetljivost na zamor veća kod zateznih u odnosu na pritisne napone i da se prslina usled zamora, u opštem slučaju, obrazuju upravno na pravac najvećeg glavnog napona na zatezanje. To naročito važi za situaciju kada se glavni pravci napona samo malo menjaju pri različitim slučajevima opterećenja.
- Na osnovu izvršene računске analize napona, kojom je pokazano da u određenim tačkama sa izraženom koncentracijom napona postoje naponi koji značajno prevazilaze granicu tečenja i rezultata eksperimentalnih ispitivanja, iz koji se vidi da je do referentnih lomova pri ovako visokim naponima došlo na približno 200000 ciklusa,

potvrđuje se teorijski stav da ako je materijal kovan i dejstvo sila statičko uticaj koncentracije napona se može zanemariti.

Navedena zapažanja predstavljaju neke od zaključaka koji se mogu izvesti na osnovu raspoloživih podataka o izvršenim eksperimentalnim testovima. Svakako za potpuniju analizu bilo bi neophodno da se raspolaze zapisom o tačnoj lokaciji rasprostiranja pukotina i brzini širenja tokom ispitivanja, jer kao što je napred istaknuto pojava pukotine dovodi do preraspodele polja napona, lokalnih plastifikacija, kao i novih koncentracija napona izazvanih nastalim pukotinama.

Isto tako bilo bi od koristi da se na datom primeru ispita i kvantitativni uticaj osetljivosti na koncentraciju napona kroz ocenu realizacije teorijskog koeficijenta koncentracije napona, što ovde nije učinjeno. Svakako, za korektno izvođenje naznačene procene neophodno je posedovati potpune informacije o dinamičkoj čvrstoći materijala od koga su načinjeni ispitivani konstruktivni detalji kao i naučno utemeljene preporuke kako da se odredi nominalni napon u situaciji analize napona pri korišćenju MKE.

#### IV. ZAKLJUČNI KOMENTARI

Napred izloženo pokazuje da je detaljno proučavanje naponsko deformacijskog stanja na mestu koncentracije, za karakteristična stanja materijala (*elastično - plastično*), obavezan deo opšteg numeričkog proračuna mehaničkih komponenata konstrukcija i bitna pretpostavka za stvaranje optimalnih, svrsishodnih, pouzdanih i trajnih konstrukcija.

Značajna osobina pojave koncentracije napona sastoji se u tome, što se istovremeno s naglim povećanjem napona u blizini koncentratora čak i pri jednostavnom jednoosnom naprezanju pojavljuje složeno (ravansko ili zapreminsko) raznorodno naponsko stanje, neposredno utičući na razvoj plastičnih deformacija ili naprslina. Tako se **moć nošenja** osnovnih elemenata mnogih konstrukcija obično potvrđuje naponskim stanjem i **uslovljena je čvrstoćom na mestu koncentracije**, jer, pre svega, baš **tamo nastaje granično stanje i lom**. Dakle, za procenu čvrstoće je važno što tačnije razjasniti sliku raspodele napona i deformacija u zoni koncentracije.

Iskustvo stečeno iz prakse i potvrđeno nizom eksperimentalnih ispitivanja, ukazuje da se u najvećem broju slučajeva u toku upotrebe konstrukcijskih delova pojavljuju **zločeste** i **zločudne** zamorne prsline, koje po pravilu kreću iz tačka sa izraženom koncentracijom napona, sa težnjom da izazovu lom dela pre isteka planiranog veka trajanja, sa nesagledivim posledicama. Zbog toga je zaključeno da zamorna čvrstoća konstrukcijskog dela značajno zavisi od **dejstva koncentratora napona** na njoj.

Dejstvo koncentracije napona izazvano promenljivom geometrijom dela je od odlučujućeg značaja za smanjenje trajne dinamičke čvrstoće, što posebno važi za slučajeve cikličkog naprezanja uz ne previše visok srednji napon. Stoga nas, uz čvrstoću materijala, posebno zanima i čvrstoća na bazi oblika dela.

Rasprostranjena predstava o tome da je za kovne materijale konstrukcija, uticaj koncentracije napona beznačajan, je opravdana samo za statičko (*jednokratno*) opterećenje, što

svakako nije slučaj kod mašinskih konstrukcija. Upravo u najvećem broju slučajeva, prsline usled zamora nastaje tamo gde se javlja lokalna koncentracija napona, a takvih mesta uvek ima kod mašinskih konstrukcija.

Nedovoljno stroga procena naponskog stanja i uslova čvrstoće u zoni koncentracija može biti uzrok loma visokonapregnutih elemenata nosećih konstrukcija, sa veoma teškim posledicama. Koncentracija napona je glavni faktor koji određuje čvrstoću i dugovečnost konstrukcija, a posebno je aktuelna za konstrukcije čiji mnogi elementi rade u uslovima visokih mehaničkih i termičkih opterećenja.

Snižavanje koncentracije napona, konstruktivnim i tehnološkim merama, omogućava stvaranje lakše i ekonomičnije konstrukcije, pri tome, pouzdane i prikladne za korišćenje.

#### ZAHVALNICA

Ovaj istraživački rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kroz istraživački projekat tehnološkog razvoja TR – 35036: Primena informacionih sistema u lukama Srbije – od monitoringa mašina do umreženog sistema sa EU okruženjem, rukovodilac projekta dr Milosav Georgijević, red. prof.

#### LITERATURA

- [1] C. Mattheck, Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister. Freiburg: Rombach Verlag, 4. Auflage, 2006.
- [2] S. Timoshenko, „Stress concentration and fatigue failures”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 157, vol. 28, str. 163–9 1947.
- [3] S. Timošenko, Otpornost materijala, drugi deo, viša teorija i primeri. Beograd: Građevinska knjiga, 1966.
- [4] W.H. Munse, W.T. Wilbur, L.M. Tellalian, K. Nicoll, K. Wilson, Fatigue characterization of fabricated ship details for design. Washington: Ship structure committee, Technical report SSC318, 1983.
- [5] N. Brkljač, Proračunski modeli nosećih konstrukcija sa primenom na rešenja železničkih vagona za prevoz tereta, disertacija. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2013.

#### ABSTRACT

In order to illustrate efforts towards the numerical solution of the problem of estimation of the effect of the stress concentration during the fatigue endurance tests of structures, from the viewpoint of resistance to fatigue and verification of the obtained estimate by experiment, this paper presents computational stress analysis of real construction details by application of FEM. For this purpose, results of valid, real experimental tests performed on the chosen structural details taken from the cited literature were used. Based on the performed computational analysis of stress-strain state of analyzed structures, and comparison with experimental tests of fatigue endurance, a vivid graphical illustration is given, and conclusions which justify efforts to numerically solve problem of estimation of magnitude of stress concentration effect on fatigue strength are presented.

#### ANALYSIS OF FATIGUE TESTS OF CONSTRUCTION DETAILS THROUGH COMPARISON WITH COMPUTATIONAL STRESSES

Nikola Brkljač, Radoslav Simić, Branko Brkljač, Milan Zeljković