

A. Milovanović, A. Sedmak, A. Milosavljević, Z. Burzić, Ž. Sarkočević

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE PONAŠANJA ZAVARENIH POSUDA POD PRITISKOM SA PRSLINOM

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CRACKED WELDED PRESSURE VESSEL BEHAVIOUR

Stručni rad / Professional paper

UDK /UDC: 621.791.05:66-988

Rad primljen / Paper received: 10.01.2000.

Adresa autora / Author's address:

Mr Andrija Milovanović, GOŠA Institut, Smederevska Palanka
Prof. dr Aleksandar Sedmak, prof. dr Anđelka Milosavljević,
Mašinski fakultet, Beograd
Dr Zijah Burzić, Institut VJ, Žarkovo
Mr Živče Šarkočević, Fabrika šavnih cevi, Uroševac

Ključne reči:

- Zavarene posude pod pritiskom sa prslinom
- Šavne cevi
- Direktno merenje J integrala
- Integritet konstrukcije

Izvod

Direktno merenje J integrala je primenjeno na modelima posuda pod pritiskom, izrađenih od šavnih cevi od čelika X55. Ispitana su dva modela, jedan sa prslinom u metalu šava, drugi sa prslinom u ZUT. Poseban problem u eksperimentu je predstavljalo zaptivanje, koje je rešeno specijalnom gumenom zaptivkom. Rezultati ispitivanja su ukazali na veću otpornost na rast prslina u slučaju posude sa prslinom u ZUT. Za taj slučaj je razmatrana nesimetrija svojstava materijala, čemu je prilagođena i eksperimentalna procedura. Kod oba modela se pokazalo da su u ukupnom J integralu dominantni zatežno-savojni članovi.

Key words:

- Cracked welded pressure vessel
- Seam pipes
- Direct measurement of J integral
- Structural integrity

Abstract

Direct measurement of J integral has been applied to the pressure vessel models, made of seam pipes of steel X55. Two models have been tested, one with crack in weld metal, the other one with crack in HAZ. The main experimental problem was sealing, which was solved by applying a special rubber seal. Results of this testing have shown that the pressure vessel with crack in HAZ has better crack growth resistance. For this case the asymmetry of material properties has been analyzed, adopting the experimental procedure accordingly. For both models tension-bending terms turned out to be dominant in total J integral value.

UVOD

Posude pod pritiskom i cevovodi u energetici, petrohe-mijskoj, hemijskoj i procesnoj industriji obuhvataju su izloženi različitim mehaničkim i toplotnim naprezanjima, uticaju agresivnih medija i vibracijama, a u oceni njihove sigurnosti treba uzeti u obzir i različite tipove grešaka koje se sreću na ovoj opremi, čak i pri dobro razrađenim tehnološkim postupcima izrade, kao što su hladne i tople prslinae pri zavarivanju. Propisi uglavnom zahtevaju da nema grešaka tipa prslina pri ispitivanju bez razaranja (IBR).

Često se dešava da uočene greške pri raznim postupcima kontrole, ocenjene kao "prihvatljive" što se standarda tiče, mogu u procesu eksploatacije da se razvijaju do nivoa opasnog po konstrukciju. Mehanika loma ocenjuje uticaj prslina, uzimajući u obzir uslove opterećenja i geometrijske faktore (položaj i veličina prslinae). U tom cilju razvijeni su brojni standardi, koji definišu ispitivanje raznih tipova epruveta sa veštački urađenim prslinama oblika, koji se analizirani u linearno elastičnoj mehanici loma (LEML) /1/.

U novije vreme su razvijeni postupci koji su proširili LEML. Koristeći otvaranje vrha prslinae (crack tip opening displacement - CTOD) propisan je i publikovan u poznatom dokumentu PD6493 kombinovani postupak zasnovan na LEML. Takođe su razvijene dve alternativne metode za određivanje uticaja greške izvan važećih granica LEML, jedna zasnovana na CEGB R6 prilazu, a druga na J integralu.

Ispitivanje epruveta sa prslinama treba da pruži podatke za definisanje podobnosti za upotrebu i određivanje parametara mehanike loma. Međutim, potpun uvid u ponašanje konstrukcija, kao što su zavarene posude pod pritiskom, sa prslinom je moguć jedino ispitivanjem realnih modela hidro-testom, pri čemu se prate odgovarajući parametri mehanike loma (CTOD i J integral).

U ovom radu je eksperimentalno određivanje J integrala primenjeno na realne cevi pod pritiskom, kod kojih je u jednom slučaju prslina postavljena u metal šava, a u drugom slučaju u zonu uticaja toplote (ZUT), sa ciljem da se utvrdi uticaj heterogenosti zavarenog spoja.

UTICAJ HETEROGENOSTI ZAVARENOG SPOJA

Uticao heterogenosti zavarenog spoja na njegovu čvrstoću je veoma bitan, pa ga je neophodno uzeti u obzir pri istraživanju otpornosti na rast prslina posuda pod pritiskom.

Osnovni princip projektovanja zavarenih spojeva je da metal šava (MŠ) ima veću čvrstoću od osnovnog metala (OM) (tzv. overmečing). To znači da će do tečenja prvo doći u OM, dok će MŠ početi da teče posle deformacijskog ojačavanja osnovnog metala. Ovakav spoj treba da se lomi posle plastične deformacije OM. Nasuprot ovome, kod čelika visoke čvrstoće teži se da MŠ ima manji napon tečenja (tzv. undermečing) zbog opasnosti od pojave prslina pri zavarivanju. U oba slučaja treba imati u vidu da prsline u OM ili MŠ menjaju raspored deformacija.

Ponašanje prslina u OM, MŠ i ZUT može da se ispita na epruvetama, bilo da je u pitanju zatezanje ploča ili savijanje u tri tačke, ili na modelima realnih konstrukcija, što je u ovom radu primenjeno na posude pod pritiskom.

EKSPERIMENT

Eksperiment je sproveden na posudama pod pritiskom, napravljenim od cevi sa aksijalnim prslinama u metalu šava i zoni uticaja toplote, direktnim merenjem J integrala.

Model posude realnih dimenzija (prečnik $\phi 219$ mm i debljina zida 5,5 mm), sl. 1, izrađen je od čelika za cevi X55, proizvodnje Železare SARTID - Smederevo. Dimenzije prsline su bile: dužina $2a=150$ mm, dubina $c=3,6$ mm. Cev je termički obrađena posle zavarivanja radi otpuštanja zaostalih napona. Zaptivanje je izvedeno gumenom zaptivkom, koja je postavljena ispod poklopaca, sl. 1. i 2.

Na model posude ne deluje aksijalni napon jer taj napon prenose vijci, koji se nalaze duž komore sa spoljne strane (sl. 2). Time je obezbeđeno jednoosno naponsko stanje u posudi, odnosno dejstvo obimskog napona na aksijalnu prslinu.

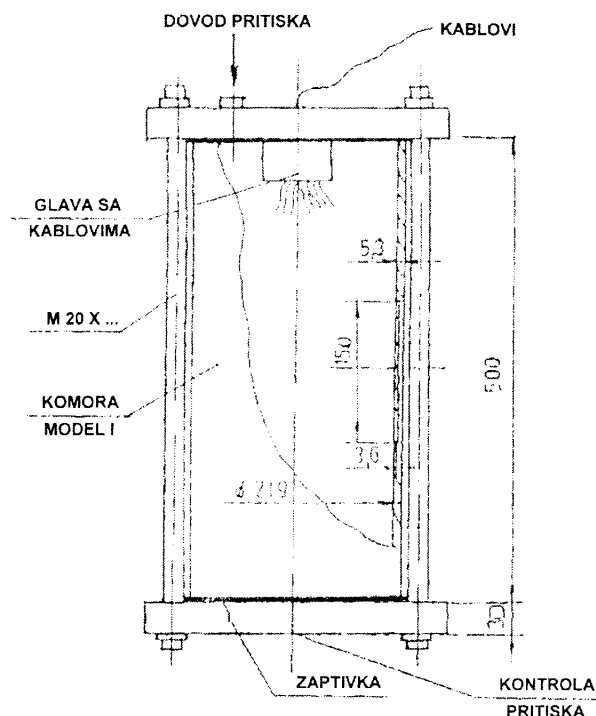
Direktno merenja J integrala na cevi pod pritiskom

Princip metode sastoji se u određivanju J integrala sračunavanjem podintegralnih članova, koji slede direktno iz definicije

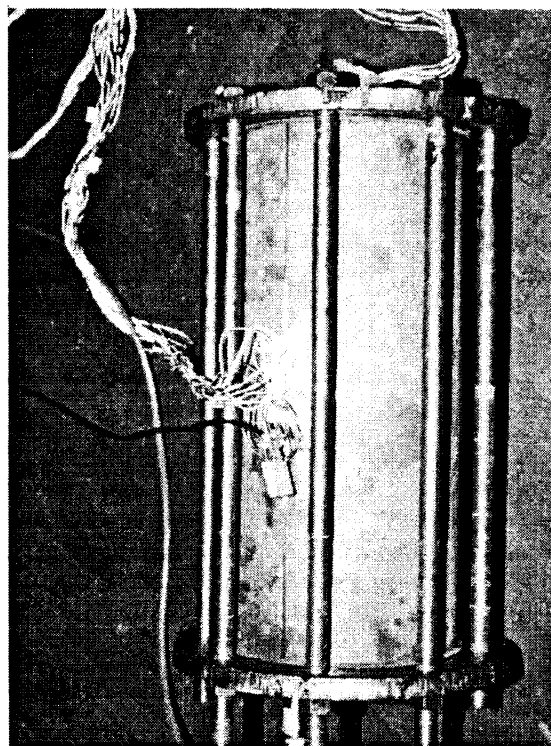
$$J = \int_G W dy - \vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds \quad (1)$$

gde su x i y su Dekartove koordinate sa koordinantnim početkom u vrhu prsline, osa x je u pravcu prsline. Veličina W predstavlja gustinu deformacijskog rada, \vec{T} je vektor zatezanja na konturi integracije G , u je vektor pomeranja na posmatranom elementu konture G , a ds je krivolinijski element date konture G .

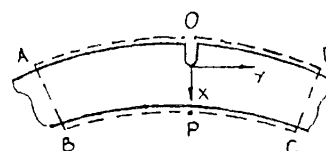
Dva podintegralna izraza u jed. (1), tj. deformacijski član $W dy$ i zatezno-savojni član $\vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x}$ se računaju posebno za segmente konture OA, AB, BP, PC, CD i DO, sl. 3, kao što je objašnjeno u radu /2/.



Slika 1. Model posude pod pritiskom



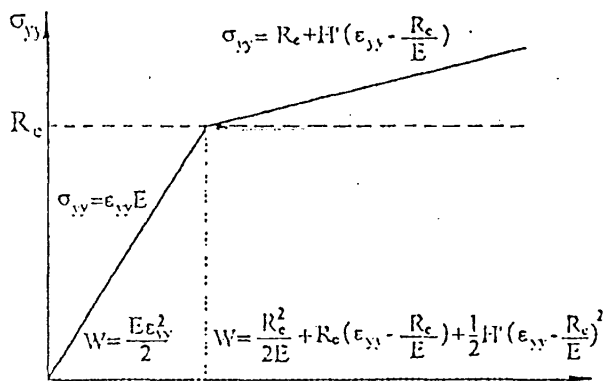
Slika 2. Eksperimentalna 'postavka'



Slika 3. Kontura G u preseku cevi sa površinskom prslinom

Segment konture integracije koji preseca materijal treba da je dovoljno udaljen od ravni prsline da bi se izvećao uticaj vrha prsline na polja raspodele napona i deformacija.

Gustina deformacijske energije je za slučaj linearno ojačavajućeg materijala data na sl. 4, zajedno sa odgovarajućim izrazima za napon σ_{yy} .



Slika 4. Kriva napon-deformacija za linearno ojačavajući materijal

Ostali potrebni izrazi za izračunavanje J integrala su dati u radu [2]. Ovde se samo naglašava da se u slučaju prsline u ZUT, tj. kada postoji nesimetrija deformacija u odnosu na ravan prsline, vrednosti pomeranja $u_y(B)$ i $u_y(C)$, odnosno $u_y(A)$ i $u_y(D)$, nisu iste, pa se za njihovo određivanje koriste sledeći izrazi:

$$u_y(A) = \int_0^A \epsilon_{yy} dy + \frac{CMOD}{2} \quad u_y(D) = \int_0^D \epsilon_{yy} dy + \frac{CMOD}{2} \quad (2)$$

$$u_y(B) = \int_P^B \epsilon_{yy} dy \quad u_y(D) = \int_P^D \epsilon_{yy} dy \quad (3)$$

gde je $CMOD$ (crack mouth opening displacement) otvaranje usana prsline mereno specijalnim COD meračem. Treba uočiti da je uzimanje polovine vrednosti $CMOD$ u jed. (2) proizvoljno izabrano, jer se u slučaju nesimetričnih deformacija stvarna "raspodela" $CMOD$ levo i desno od usana prsline ne zna. Ovom problemu treba posvetiti odgovarajuću pažnju u budućem radu, a jedna od mogućnosti je primena izraza koji uzimaju u obzir odnos napona tečenja metala šava i osnovnog metala [3, 4]:

$$CMOD^{OM} = CMOD \frac{1}{1+\alpha} \quad CMOD^{MS} = CMOD \frac{\alpha}{1+\alpha} \quad (4)$$

gde je $\alpha = 1,16(1 - S_r) + 1$, a S_r predstavlja količnik napona tečenja metala šava i osnovnog metala, $S_r = R_{ehMS}/R_{ehOM}$.

Opisana procesura se sa dovoljnom tačnošću primenjuje na realnu cev pod pritiskom, sl. 4, ako se pretpostavi da je kontura sa površinskom prslinom (sl. 3) po obliku takva da odgovara konturi epruvete za zatezanje sa ivičnom prslinom, to jest da važi $t \ll R$, gde je t debljina zida posude, a R srednji poluprečnik krivine posude.

Rezultati ispitivanja

Ispitivanjem zatezanjem dobijene su vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće. Za osnovni materijal su dobijene vrednosti $R_{eH} = 406$ MPa i $R_m = 464$ MPa, a za zavareni spoj (metal šava) $R_{eH} = 432$ MPa i $R_m = 502$ MPa. Na os-

novu ovih vrednosti i izmerenih tvrdoća [5], procenjene su odgovarajuće vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće u ZUT: $R_{eH} = 365$ MPa i $R_m = 418$ MPa. Primenom izraza (4) za $CMOD^{OM}$ i $CMOD^{MS}$ dobija se malo odstupanje od polazne pretpostavke o podeli $CMOD$ vrednosti na polovine, jer je za navedene vrednosti napona tečenja $CMOD^{ZUT} = 0,55CMOD$, a $CMOD^{MS} = 0,45CMOD$.

Direktno merenje J integrala na sprovedeno na modelima sa aksijalnom površinskom prslinom lociranom u metalu šavu u jednom slučaju i u ZUT u drugom slučaju. U toku ispitivanja pritisak je postepeno povećavan i očitane su izmerene vrednosti deformacije i $CMOD$. Deformacije su merene mernim trakama postavljenim prema rasporedu datom na sl. 5.

Kod modela sa prslinom u metalu šavu deformacije su merene do pritiska 154,2 bar, a rezultati su dati tab. 1. Rezultati merenja deformacija modela sa prslinom u ZUT do pritiska 182,2 bar dati su u tab. 2.

Dijagrami eksperimentalnih zavisnosti J integrala i udaljenog napona σ , tj. krive $J - \sigma$, date su na sl. 6. za oba modela.

Vrednosti J integrala za pojedine segmente konture dati su u tab. 3 za oba modela a izračunati su po komponentama JOA, JDO, JBC, JAB i JCD.

Tabela 1a. Rezultati merenja deformacija na uzorku sa prslinom u metalu šava - unutrašnje trake

Pritisak bar	CMOD mm	Merno mesto									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	2	9	3	7	-4	-5	-1	-5	-4	-3
31,2	104	148	158	217	296	768	140	237	101	172	155
48,2	190	202	211	352	441	1066	329	387	243	292	224
61,2	271	236	268	544	690	1297	561	563	488	412	303
72,2	355	305	345	721	832	1521	831	785	685	515	471
91	513	542	604	1058	1231	1988	1435	1241	980	718	662
108,8	621	873	955	1506	1726	2662	2235	1779	1349	1074	889
123,8	764	1231	1331	2016	2245	3526	3160	2415	1882	1788	1070
135,4	920	1509	1692	2534	2797	4454	4087	3246	2368	2220	1641
145	1052	1812	1993	2953	3350	5242	4838	3878	2699	2537	2141
154,2	1181	2022	2105	3270	3680	5746	5011	4365	2997	2889	2333

Tabela 1b. Rezultati merenja deformacija na uzorku sa prslinom u metalu šava - spoljne trake

Pritisak bar	CMOD mm	Merno mesto					
		11	12	13	14	15	16
0	0	0	-1	0	0	-1	-1
31,2	104	78	57	28	23	59	42
48,2	190	137	128	56	50	124	118
61,2	271	205	188	99	87	208	193
72,2	355	319	242	157	144	274	304
91	513	425	328	226	313	337	416
108,8	621	539	465	311	297	453	526
123,8	764	689	635	408	394	628	639
135,4	920	861	842	521	507	818	827
145	1052	991	971	660	639	927	922
154,2	1181	1206	1080	805	778	1050	1146

Tabela 2a. Rezultati merenja deformacija ($\mu\text{m}/\text{m}$) na modelu sa prslinom u ZUT - unutrašnje trake

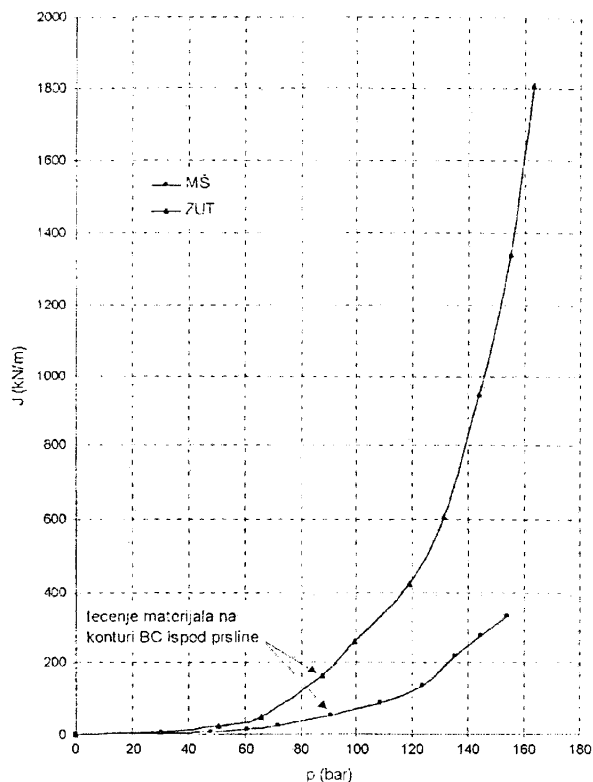
Pritisak bar	CMOD mm	Merno mesto								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,2	94	258	277	334	346	553	468	359	306	292
50,6	155	385	422	417	523	791	654	458	439	428
65,8	201	675	730	708	881	1325	1089	776	750	745
87,6	452	1135	1096	1232	1456	2180	1688	1309	1246	1124
99,4	542	1487	1411	1589	1832	3245	2321	1680	1623	1535
119	711	1998	2055	2150	2540	4887	3146	2345	2250	2168
131,6	894	2559	2642	2690	3109	6570	3956	2985	2731	2618
143,8	1233	3124	3255	3341	3890	8890	4993	3534	3391	3320
155,2	1559	4339	4481	4520	5129	-	6275	4739	4680	4570
163	1911	5128	5211	5390	6693	-	7790	6055	5563	5308
174,6	-	6215	6252	6387	8090	-	9031	7246	6720	6132
185,2	-	7411	7408	7691	-	-	-	8560	8205	7518

Tabela 2b - spoljne trake

Pritisak bar	CMOD mm	Merno mesto							
		11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	-5	0	-1	0	0	-1	-1	0
30,2	94	172	148	99	88	73	92	131	157
50,6	155	267	256	178	156	136	167	235	257
65,8	201	395	369	305	225	205	285	328	380
87,6	452	545	528	441	267	244	409	469	536
99,4	542	770	725	580	334	308	551	689	718
119	711	1020	931	772	417	401	718	863	991
131,6	894	1280	1190	991	535	512	892	1061	1243
143,8	1233	1506	1389	1207	642	613	1151	1340	1448
155,2	1559	1808	1691	1448	775	7726	1348	1635	1792
163	1911	2250	2024	1805	901	885	1790	1892	2192
174,6	-	2894	2511	2211	1138	1101	2246	2357	2870
185,2	-	3311	3036	2615	1326	1289	2705	2916	3265

Tabela 3. Vrednosti J integrala (kN/m) na segmentima konture

	Pritisak bar	J integral					
		JOA	JDO	JBC	JAB	JCD	J
MŠ	0	0	0	0	0	0	0
	31,2	0	0	0,38	0,86	0,99	2,23
	48,2	-0,01	-0,01	0,81	3,35	3,17	6,31
	61,2	-0,03	-0,03	1,51	4,37	6,54	12,36
	72,2	-0,05	-0,05	2,42	7,93	13,36	23,61
	91	-0,09	-0,1	5,11	19	26,77	50,69
	108,8	-0,17	-0,16	9,96	34,97	41,89	86,49
	123,8	-0,3	-0,28	17,04	59,06	61,39	136,91
	135,4	-0,5	-0,47	24,71	87,73	105,91	217,38
	145	-0,68	-0,62	31,16	118,15	130,09	278,1
154,2	-0,92	-0,85	35,16	141,22	148,89	333,5	
ZUT	0	0	0	0	0	0	0
	30,2	-0,02	-0,02	0,47	5,06	2,87	8,36
	50,6	-0,06	-0,05	0,93	13,24	8,69	22,75
	65,8	-0,14	-0,12	2,66	29,63	16,03	48,06
	87,6	-0,27	-0,23	6,95	107,94	48,67	163,06
	99,4	-0,5	-0,45	11,97	169,36	81,31	261,69
	119	-0,86	-0,76	20,88	269,11	134,82	423,19
	131,6	-1,39	-1,17	29,25	367,72	210,88	605,29
	143,8	-1,96	-1,8	39,69	548,32	362,12	946,37
	155,2	-2,85	-2,63	40,6	752,35	555,51	1342,98
	163	-4,17	-3,91	51,6	1006,31	756,6	1806,43
	174,6	(-6,02)	(-5,82)	(63,09)	(2301,55)	(1876,51)	(4229,31)
185,2	(-7,75)	(-7,66)	(50,37)	(3933,52)	(3422,23)	(7390,71)	



Slika 5. Zavisnost J integrala od pritiska p

ZAKLJUČCI

Vrednosti J integrala, dobijene za modele posuda sa prslinom u metalu šava, odnosno u ZUT, ukazuju na veću otpornost na rast prsline u slučaju ZUT, što je pokazano većim pritiskom zabeleženim pri procurivanju posude sa prslinom u ZUT za prslinu približno iste veličine (185,2 prema 154,2 bara).

Vrednosti J integrala po segmentima ukazuju na zatezno-savojni član kao dominantan, odnosno na relativno mali doprinos članova koji potiču od deformacijske energije.

Primena izraza (4) za udele CMOD u metalu šava i osnovnom metalu nije bitnije promenila polaznu pretpostavku o podeli CMOD na polovinu vrednosti.

LITERATURA

1. S. Sedmak, A. Sedmak, Eksperimentalna analiza ponašanja prsline u zavarenim posudama pod pritiskom. Časopis "Zavarivanje i Za-va-re-ne konstrukcije", str. 1-12, br. 1-2, 1999.
2. M. Essamei, Z. Radaković, A. Sedmak, B. Petrovski i M. Zrilić, Direktno merenje J integrala kao ocena podobnosti za upotrebu, Časopis "Zavarivanje i Zavarene konstrukcije", br. 4, 1999, str. 137-141
3. K. Satoh, M. Toyoda, The Influence of Mechanical Heterogeneity on Fracture Toughness Evaluation of Welds, IIW Doc. X-1031-83
4. Ž. Šarkočević, Analiza uticaja grešaka zavarenim spojevima na ponašanje šavnih cevi od čelika povišene čvrstoće, magistarska teza, Mašinski fakultet, Beograd, 1999