

PRETHODNO SAOPŠTENJE

B. Sabo*

NAPONSKO-DEFORMACIONO STANJE I-NOSAČA KAO
POSLEDICA ZAVARIVANJA UGAONOG ŠAVA

Rezime

U radu je prikazano naponsko-deformaciono stanje I-nosača kao posledica zavarivanja ugaonog šava. Dat je raspored uzdužnih ostatnih ukupnih, plastičkih i elastičnih deformacija kao i raspored uzdužnog ostatnog napona. Deformacije su merene na deset mernih mesta mehaničkim deformometrom uz primenu metode izrezivanja mernih mesta.

SPANNUNG-DEFORMATION ZUSTAND VON I-TRÄGER IN
FOLGE EINE KEHLNAHTSCHWEISSUNG

Zusammenfassung

In Artikel ist der Spannung-Deformation Zustand von I-träger in folge eine Kehlnahtschweißung beschrieben. Anordnung von gesamten; plastischen, elastischen Langsschweissdeformationen und Längsschweißspannungen wird gegeben. Die Schweissdeformationen werden in zehn Meßpunkten mit Mechanischer Dehnungsmesser, mit verwendung von heraustrennen der Meßstrecken, gemessen.

1. UVOD

Pokretni izvor toplote dovodi kod zavarivanja do neravnog zagrevanja elemenata koji se zavaruju. Delovi elementa u neposrednoj blizini pokretnog izvora toplotē intenzivno se zagrevaju za razliku od udaljenih delova koji se zagrevaju u manjoj meri. Hladniji delovi elementa suprotstavljaju se toplotnim deformacijama što dovodi do stvaranja odredjenog napon-

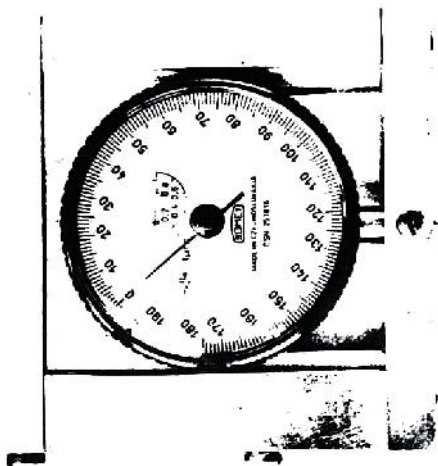
*) Sabo mr Bela, dipl. ing., asistent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V. Perića - Valtera 2.

ska-deformacionog stanja u zavarenom elementu. Deformacije i naponi koji ostaju u zavarenom elementu nakon hladjenja nazivaju se ostatnim (zaostalim). Ostatna ukupna deformacija u bilo kojoj tački elementa sastoji se iz zbira plastične i elastične ostatne deformacije. Napone koji deluju u pravcu šava nazivamo uzdužnim i njihova veličina je približno konstantna uzduž elementa za odredjenu tačku preseka [1].

Cilj rada sastoji se u nalaženju uzdužnog naponsko-deformacionog stanja I-nosača kao posledicu zavarivanja jednog ugaonog šava. U radu će biti prikazan raspored uzdužne ostatne ukupne deformacije (ϵ) kao i komponentalnih ostatnih deformacija: plastične (ϵ_p) i elastične (ϵ_e). Pomoću uzdužne ostatne elastične deformacije izračunaće se uzdužni ostatni napon (σ) na rebro zavarenog I-nosača. Uzdužno naponsko-deformaciono stanje odrediće se za vertikalnu ravan simetrije I-nosača gde su deformacije i naponi najveći [2].

Na rebro i pojasima I-nosača, na sredini nosača, biće utisnuto deset mernih mesta u kojima se mehaničkim deformometrom meri izduženje i skraćenje. Merna mesta imaće bazu od 50 mm. Rastojanje izmedju mernih mesta biće 15 mm. Sva potrebna merenja izvršiće se mehaničkim deformometrom sopstvene konstrukcije, koji je prikazan na slici 1. Tačnost komparatora ugradjenog u deformometar iznosi 0,001 mm [3]. Iz rezultata merenja i potrebnog izračunavanja dobiće se

veličina uzdužnih ostatnih deformacija i napona svakog mernog mesta (diskretna veličina) kao i raspored ostatnih deformacija i napona za vertikalnu ravan simetrije I-nosača.

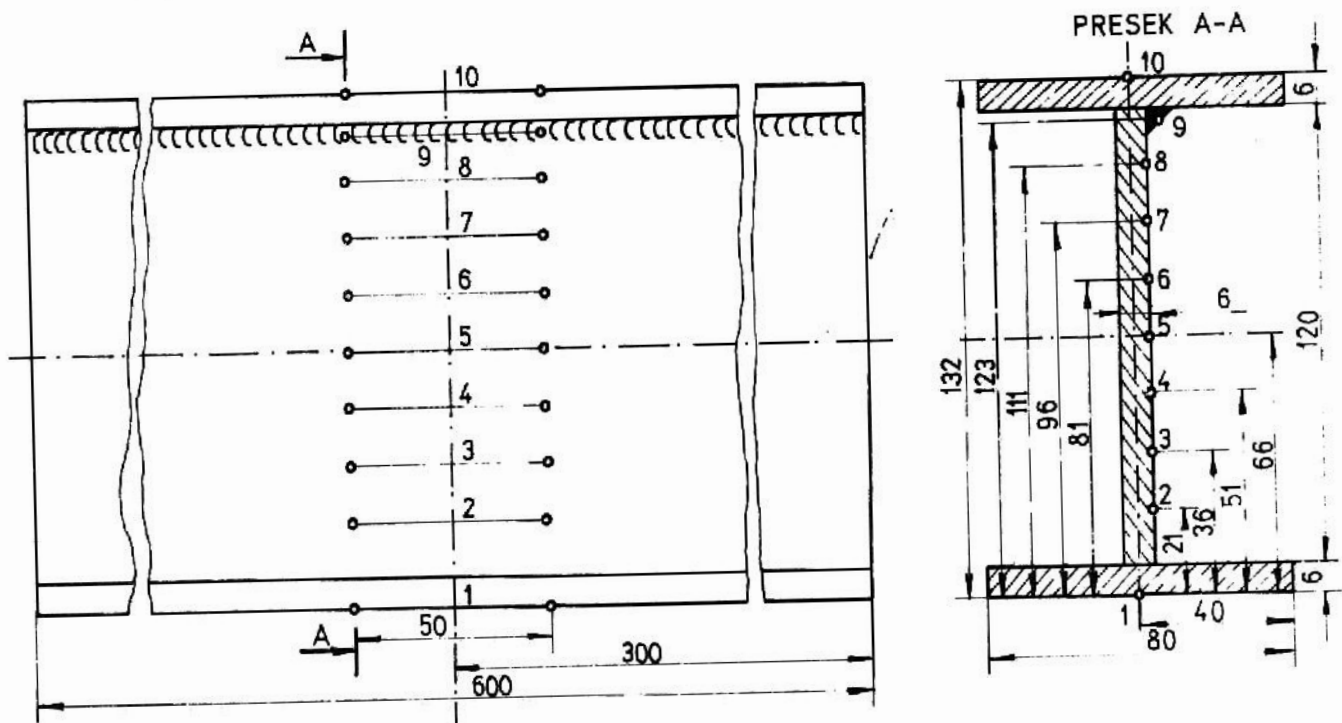


Slika 1. Mehanički deformometar

2. IZVODJENJE EKSPERIMENTA

Eksperimentalna istraživanja radjena su na realnim modelima. Formirani su I-nosači dužine 600 mm sa visinom rebra 120 mm, širinom pojasa 80 mm i debljinom rebra i pojasa 6 mm. Nosači su montirani zavarivanjem kratkih ugaonih šavova, REL postupkom, ravnomerno rasporedjenim uzduž rebra nosača. Ostatni naponi stvoreni ovim šavovima uklonjeni su termičkom obradom. Na ovaj način nosači su spremni za utiskivanje mernih baza.

Merne baze svih deset mernih mesta utisnute su alatom sa dva tačkasta obeleživača. Vrhovi obeleživača brušeni su u konus ugla 60° , razmak izmedju vrhova obeleživača je 50 mm. Dubina utiskivanja iznosila je oko 1 mm. Raspored svih mernih mesta sa utisnutim mernim bazama prikazan je na slici 2. Položaj svakog mernog mesta (h) dat je od mernog mesta 1.



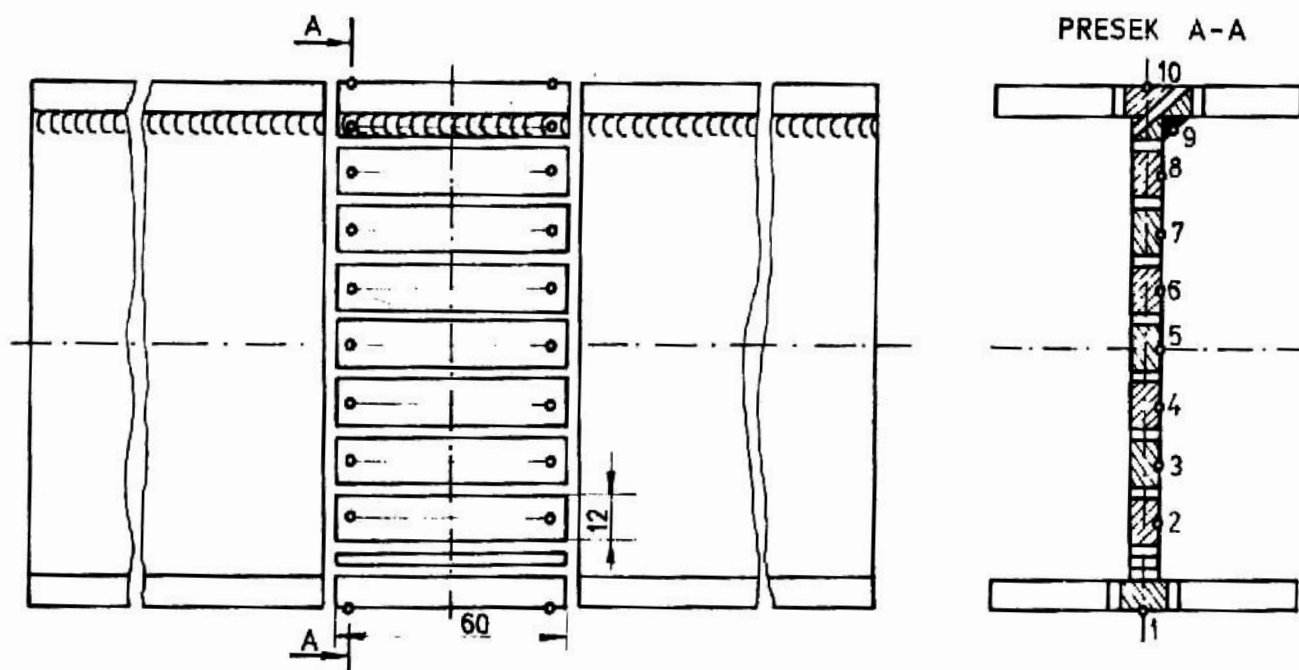
Slika 2. Raspored mernih mesta na I-nosaču

Za istraživanje uzeta su tri I-nosača. Postavljanjem šiljaka deformometra u utisnute merne baze, očitano je pokazivanje komparatora pre zavarivanja. Pokazivanje komparatora obeleženo je sa l_0 . Zavarivanje jednog ugaonog šava izvršeno je automatskim EPP postupkom sa sledećim parametrima zavarivanja:

$$I_z = 400 \text{ A} \quad U_1 = 30 \text{ V} \quad v_z = 50 \text{ cm/min}$$

Sa ovim parametrima zavarivanja dobijena je prosečna vrednost katete ugaonog šava od 6 mm. Materijal nosača, brodski lim. Zavarivanje je izvršeno elektrodnom žicom EPP 2, ϕ 3 mm i praškom EP 20 na automatu ISKRA E11. Posle izvršenog zavarivanja na potpuno ohladjenim I-nosačima utisnuta je merna baza na lice ugaonog šava (merno mesto 9) i izvršeno merenje mernih baza u svih deset mernih mesta. Pokazivanje komparatora obeleženo je sa z_1 . Nakon toga pristupilo se izrezivanju mernih mesta u cilju oslobadjanja elastične deformacije, odnosno napona. Izrezivanje mernih mesta je radjeno na hladno, mehaničkom i ručnom testerom. Izrezivanjem su dobijene pločice dimenzije oko 60 x 12 x 6 mm. Način izrezivanja mernih mesta prikazan je na slici 3. Šrafirano su prikazane dobijene pločice u kojima je naponsko stanje nula.

Nakon izrezivanja izvršeno je merenje mernih baza na svih deset pločica. Pokazivanje komparatora obeleženo je sa z_2 . Ista procedura ponovljena je na sva tri zavarena I-nosača.



Slika 3. Način izrezivanja mernih mesta I-nosača

3. OBRADA REZULTATA

U tablici 1. prikazano je pokazivanje komparatora, z_0 pri merenju mernih baza pre zavarivanja I-nosača. U istoj tablici date su i srednje vrednosti za tri nosača. Nosači su obeleženi brojevima 1, 2 i 3, a merna mesta brojeva od 1 do 10. Merno mesto 9 u trenutku ovog merenja još ne postoji jer se ta merna baza utiskuje u šav.

U tablici 2. prikazano je pokazivanje komparatora, z_1 pri merenju mernih baza posle zavarivanja I-nosača.

Tablica 1.

z_0, mm		NOSAČ			\bar{z}_0, mm
		1	2	3	
MERNO MESTO	1	0,610	0,605	0,616	0,6103
	2	0,615	0,628	0,632	0,6250
	3	0,611	0,622	0,618	0,6170
	4	0,623	0,625	0,619	0,6223
	5	0,609	0,629	0,613	0,6170
	6	0,614	0,619	0,625	0,6193
	7	0,607	0,622	0,617	0,6153
	8	0,600	0,612	0,607	0,6063
	9	-	-	-	-
	10	0,602	0,608	0,604	0,6047

Tablica 2.

z_1, mm		NOSAČ			\bar{z}_1, mm
		1	2	3	
MERNO MESTO	1	0,634	0,628	0,639	0,6337
	2	0,630	0,641	0,645	0,6387
	3	0,615	0,627	0,622	0,6213
	4	0,614	0,617	0,613	0,6147
	5	0,587	0,608	0,594	0,5963
	6	0,582	0,587	0,593	0,5873
	7	0,566	0,580	0,576	0,5740
	8	0,552	0,563	0,559	0,5580
	9	0,585	0,590	0,593	0,5897
	10	0,547	0,553	0,550	0,5500

Uzdužna ostatna ukupna deformacija mernih mesta može se izračunati iz jednačine:

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{50} 100 = 2(l_1 - l_0), \% \quad (1)$$

U tablici 3. prikazane su izračunate vrednosti uzdužne ostatne ukupne deformacije prema jednačini (1). U istoj tablici date su i srednje vrednosti za tri nosača.

Tablica 3.

$\epsilon, \%$		NOSAČ			$\bar{\epsilon}, \%$
		1	2	3	
MERNO MESTO	1	+0,048	+0,046	+0,046	+0,0467
	2	+0,030	+0,026	+0,026	+0,0273
	3	+0,008	+0,010	+0,008	+0,0087
	4	-0,018	-0,016	-0,012	-0,0153
	5	-0,044	-0,042	-0,038	-0,0413
	6	-0,064	-0,064	-0,064	-0,0640
	7	-0,082	-0,084	-0,082	-0,0827
	8	-0,096	-0,098	-0,096	-0,0967
	9	-0,104	-0,105	-0,103	-0,1040
	10	-0,110	-0,110	-0,108	-0,1093

Vrednosti za merno mesto 9 dobijene su linearnom interpolacijom izmedju vrednosti mernih mesta 8 i 10. Sa predznakom "+" označeno je izduženje a sa predznakom "-" skraćenje merne baze.

U tablici 4. prikazano je pokazivanje komparatora, l_2 pri merenju mernih baza posle izrezivanja mernih mesta.

Uzdužna ostatna plastična deformacija mernih mesta može se izračunati iz jednačine:

$$\epsilon_p = \frac{l_2 - l_0}{50} 100 = 2(l_2 - l_0), \% \quad (2)$$

U tablici 5. prikazane su izračunate vrednosti uzdužne ostatne plastične deformacije prema jednačini (2). U istoj tablici date su i srednje vrednosti za tri nosača.

Tablica 4.

l_2, mm	NOSAČ			\bar{l}_2, mm	
	1	2	3		
Merno mesto	1	0,609	0,605	0,615	0,6097
	2	0,617	0,630	0,635	0,6273
	3	0,615	0,625	0,620	0,6200
	4	0,625	0,627	0,620	0,6240
	5	0,611	0,630	0,614	0,6183
	6	0,615	0,620	0,625	0,6200
	7	0,595	0,610	0,606	0,6037
	8	0,519	0,530	0,525	0,5247
	9	0,525	0,530	0,533	0,5293
	10	0,500	0,505	0,503	0,5027

Tablica 5.

$\epsilon_p, \%$	NOSAČ			$\bar{\epsilon}_p, \%$	
	1	2	3		
Merno mesto	1	-0,002	0,000	-0,002	-0,0013
	2	+0,004	+0,004	+0,006	+0,0047
	3	+0,008	+0,006	+0,004	+0,0060
	4	+0,004	+0,004	+0,002	+0,0033
	5	+0,004	+0,002	+0,002	+0,0027
	6	+0,002	+0,002	0,000	+0,0013
	7	-0,024	-0,024	-0,022	-0,0233
	8	-0,162	-0,164	-0,164	-0,1633
	9	-0,224	-0,226	-0,224	-0,2247
	10	-0,204	-0,206	-0,202	-0,2040

Vrednosti za merno mesto 9 dobijene su na taj način da je prvo izračunata vrednost uzdužne ostatne elastične deformacije iz jednačine:

$$\epsilon_e = \frac{l_1 - l_2}{50} 100 = 2(l_1 - l_2), \% \quad (3)$$

Uzdužna ostatna plastična deformacija za merno mesto 9 izračunata je iz jednačine:

$$\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_e, \% \quad (4)$$

Uzdužna ostatna elastična deformacija mernih mesta može se izračunati iz jednačine:

$$\epsilon_e = \epsilon - \epsilon_p, \quad (5)$$

U tablici 6. prikazane su izračunate vrednosti uzdužne ostatne elastične deformacije prema jednačini (5).

Tablica 6.

$\epsilon_e, \%$		NOSAČ			$\bar{\epsilon}_e, \%$
		1	2	3	
MERO MESTO	1	+0,050	+0,046	+0,048	+0,0480
	2	+0,026	+0,022	+0,020	+0,0227
	3	0,000	+0,004	+0,004	+0,0027
	4	-0,022	-0,020	-0,014	-0,0187
	5	-0,048	-0,044	-0,040	-0,0440
	6	-0,066	-0,066	-0,064	-0,0653
	7	-0,058	-0,060	-0,060	-0,0593
	8	+0,066	+0,066	+0,068	+0,0667
	9	+0,120	+0,121	+0,121	+0,1207
	10	+0,094	+0,096	+0,094	+0,0947

Veličina uzdužnog ostatnog napona mernih mesta izračunava se iz jednačine:

$$\sigma = \frac{E \cdot \epsilon_e}{100}, \text{ MPa} \quad (6)$$

Modul elastičnosti za niskougljenični čelik $E=2 \cdot 10^5$, MPa.

U tablici 7. prikazane su izračunate vrednosti uzdužnog ostatnog napona prema jednačini (6).

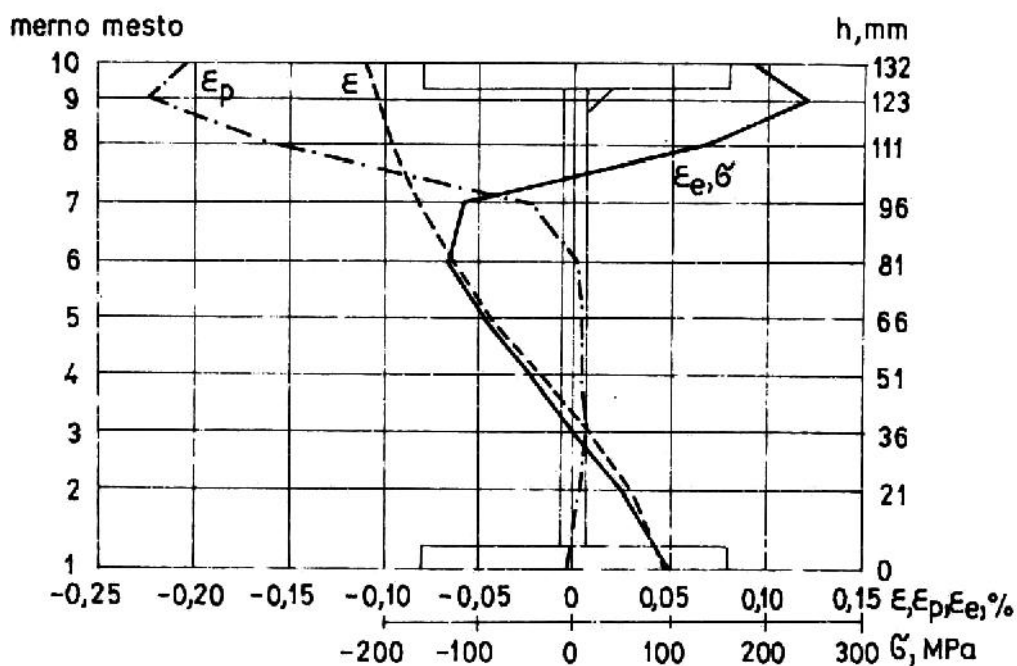
Sa predznakom "+" označen je zatezni, a sa predznakom "-" pritisni uzdužni ostatni napon.

Tabela 7.

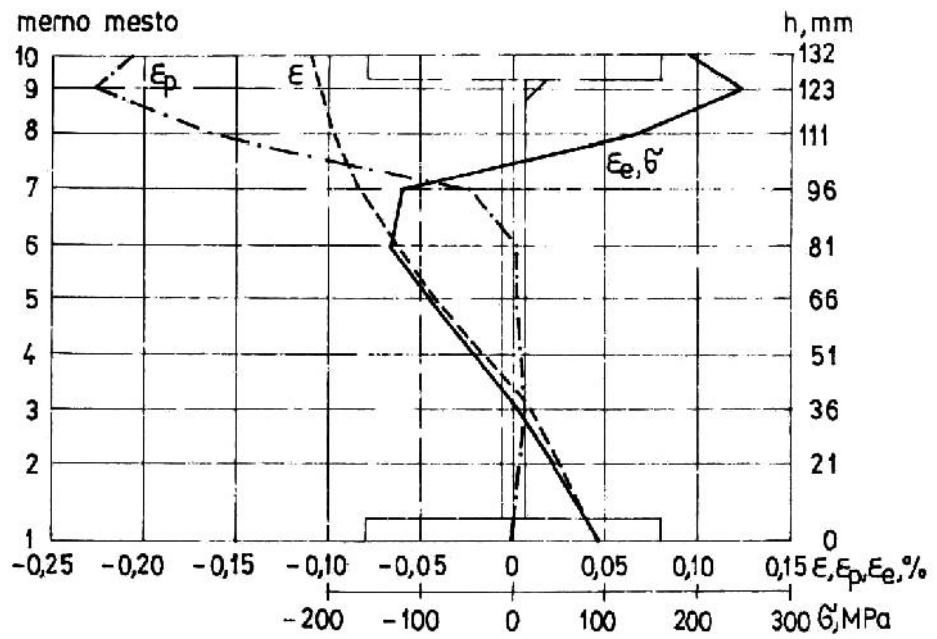
σ , MPa	NOSAČ			$\bar{\sigma}$, MPa
	1	2	3	
MERNO MESTO 1	+100	+92	+96	+96,0
2	+52	+44	+40	+45,3
3	0	+8	+8	+5,3
4	-44	-40	-28	-37,3
5	-96	-88	-80	-88,0
6	-132	-132	-128	-130,7
7	-116	-120	-120	-118,7
8	+132	+132	+136	+133,3
9	+240	+242	+242	+241,3
10	+188	+192	+188	+189,3

4. ANALIZA REZULTATA

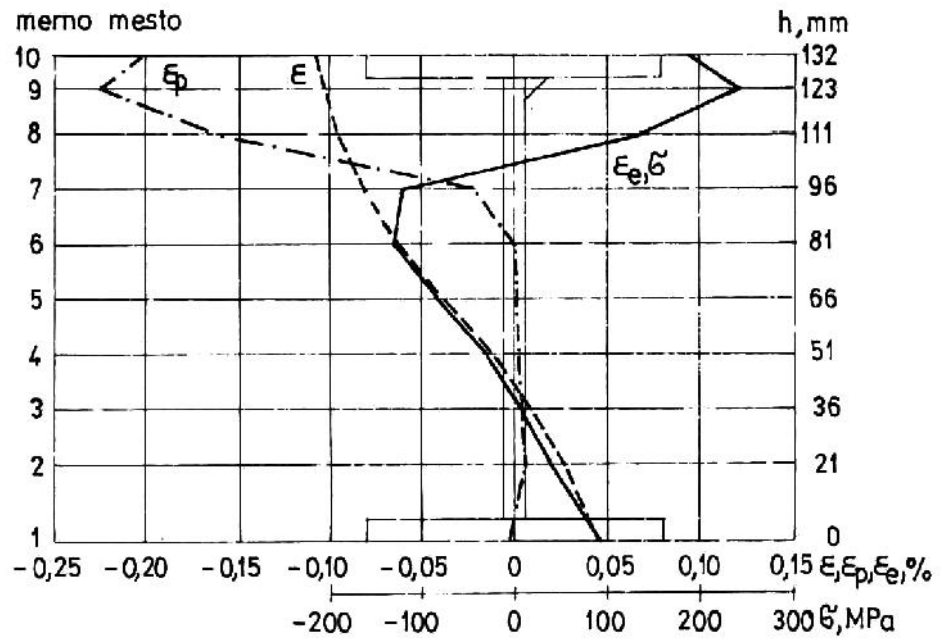
Raspored uzdužnih ostatnih deformacija (ϵ , ϵ_p , ϵ_e) i uzdužnog ostatnog napona (σ) prikazan je na slikama 4, 5, 6 i 7.



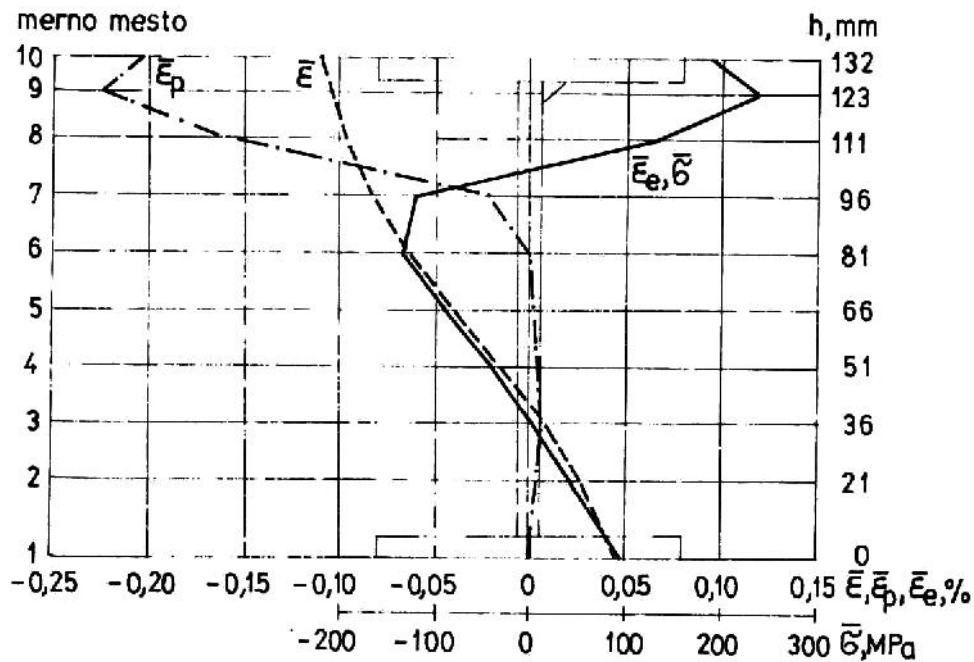
Slika 4. Raspored ϵ , ϵ_p , ϵ_e i σ za nosač 1



Slika 5. Raspored ϵ , ϵ_p , ϵ_e i σ za nosač 2



Slika 6. Raspored $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}_p$, $\bar{\epsilon}_e$ i σ za nosač 3



Slika 7. Raspored $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}_p$, $\bar{\epsilon}_e$ i $\bar{\sigma}$ (srednja vrednost za nosače 1, 2 i 3)

Analizom vrednosti iz tablica 3, 5, 6 i 7 kao i analizom slika 4, 5, 6 i 7 može se uočiti sledeće:

a) Uzdužna ostatna ukupna deformacija, ϵ

Na gornjem pojasu I-nosača (merno mesto 10) skraćenje je najveće i iznosi $\bar{\epsilon} = -0,1093 \%$. Na donjem pojasu (merno mesto 1) izduženje je najveće i iznosi $\bar{\epsilon} = +0,0467 \%$. Neposredno iznad mernog mesta 3 nalazi se neutralna linija gde je uzdužna ostatna ukupna deformacija ravna nuli. Opaža se monotonost krive po visini I-nosača.

b) Uzdužna ostatna plastična deformacija, ϵ_p

U zoni šava (merno mesto 9) može se uočiti najveće skraćenje koje iznosi $\bar{\epsilon}_p = -0,2247 \%$. Iz slika je vidljivo da su najveće plastične deformacije u zoni oko šava gde je osnovni materijal zagrejan iznad 600°C . Ova zona se prostire između mernih mesta 7 i 10. Uzdužna ostatna plastična deformacija mernih mesta 1, 2, 3, 4, 5 i 6 zanemarljiva je, što se dobro poklapa sa literaturnim podacima [2].

c) Uzdužna ostatna elastična deformacija, ϵ_e

U zoni šava (merno mesto 9) izduženje je najveće i iznosi $\bar{\epsilon}_e = +0,1207 \%$. Kod mernog mesta 6 skraćenje je najveće i iznosi $\bar{\epsilon}_e = -0,0653 \%$. U zoni neposredno iznad mernog mesta 3 i između mernih mesta 7 i 8 uzdužna ostatna elastična deformacija ravna je nuli.

d) Uzdužni ostatni napon, σ

Uzdužni ostatni napon proporcionalan je uzdužnoj ostatnoj elastičnoj deformaciji (jednačina (6)). Najveći zatezni uzdužni ostatni napon je u zoni šava (merno mesto 9) i iznosi $\bar{\sigma} = +241,3$ MPa. Najveći pritiski uzdužni ostatni napon je kod mernog mesta 6 i iznosi $\bar{\sigma} = -130,7$ MPa. U zoni neposredno iznad mernog mesta 3 i između mernih mesta 7 i 8 uzdužni ostatni napon ravan je nuli.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak određivanja uzdužnog naponsko-deformacionog stanja zavarenog I-nosača nastalog kao posledica zavarivanja jednog ugaonog šava. Analizom naponsko-deformacionog stanja utvrđeno je da se poklapa sa literaturnim podacima [4,5]. Kroz ovaj rad proveren je mehanički deformometar sopstvene konstrukcije. Primenom metode izrezivanja mernih baza i pored velikog broja mernih mesta može se lako naći raspored uzdužnih ostatnih deformacija i napona I-nosača. U daljem radu bilo bi neophodno istražiti raspored uzdužnih i poprečnih ostatnih deformacija i napona, u raznim presecima I-nosača, u cilju dobijanja prostornog naponsko-deformacionog stanja nosača.

LITERATURA

- [1] Palić V.: Zavarivanje, IV deo, skripta, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1982.
- [2] Malizius R.: Schrumpfung, Spanungen und Risse beim Schweißen, Düsseldorf, 1960.
- [3] Szabó B.: Raspored uzdužnih ostatnih deformacija i napona zavarenog I-nosača, "Zavarivanje", br.4, Zagreb, 1983.
- [4] Vinokurov V.A.: Svarka v mašinstroeni, tom 3, Moskva, 1979.
- [5] Okerblom N.O.: Schweißspanungen in Metallkonstruktionen, Halle, 1959.