

## FIZIČKO I NUMERIČKO MODELIRANJE DEFLEKSIONIH POJAVA KOD TANKIH LIMOVA - YOSHIDA TEST

M. Stefanović<sup>1</sup>, V. Mandić<sup>2</sup>, M. Živković<sup>3</sup>, S. Aleksandrović<sup>4</sup>

**Rezime:** Rad obuhvata tematiku defleksionih pojava kod tankih limova i limova povećane čvrstoće. Sklonost limova ka defleksiji ispitivana je u laboratorijskim uslovima jednoosnim zatezanjem kvadratne epruvete, tzv. YOSHIDA tesomt. Paralelno sa fizičkim modeliranjem izvedena je i numerička simulacija testa, korišćenjem programskog paketa PAK, razvijenog na bazi metode konačnih elemenata. Pri fizičko-numeričkom modeliranju varirane su vrste materijala (Č0148 P5 i PHZ 260) i debljina lima (0.7 i 0.8mm), i praćene su izlazne informacije modeliranja, odnosno njihov uticaj na defleksione pojave kod limova.

**Ključne reči:** modeliranje defleksionih pojava, limovi povećane čvrstoće, FEM simulacija

## PHYSICAL AND NUMERICAL MODELING OF DEFLEXION APPEARANCES AT THIN SHEET METALS – YOSHIDA TEST

M. Stefanovic<sup>5</sup>, V. Mandic<sup>6</sup>, M. Zivkovic<sup>7</sup>, S. Aleksandrovic<sup>8</sup>

**Abstract:** The paper includes the topic of deflexion appearances at thin sheet metals and sheet metals of increased hardness. The tendency of sheet metals towards deflexion has been investigated in laboratory conditions by one-axis straining of square test-tube – so called YOSHIDA test. In parallel with physical modelling, the numerical simulation of the test was performed, by use of program package PAK, developed on the basis of finite elements method. At physical-numerical modelling, the material brands (C0148 P5 and PHZ 260) and sheet metal thickness (0.7 and 0.8mm) were varied, and the output modelling information, i.e. their influence onto the deflexion appearances at sheet metals, were followed.

**Key words:** modelling of deflexion appearances, sheet metals of increased hardness, FEM simulation

<sup>1</sup> Dr Milentije Stefanović, red.prof. Mašinskog fakult. u Kragujevcu, [stefan@knez.uis.kg.ac.yu](mailto:stefan@knez.uis.kg.ac.yu)

<sup>2</sup> Dr Vesna Mandić, docent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, [mandic@knez.uis.kg.ac.yu](mailto:mandic@knez.uis.kg.ac.yu)

<sup>3</sup> Dr Miroslav Živković, vanr.prof. Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, [zile@knez.uis.kg.ac.yu](mailto:zile@knez.uis.kg.ac.yu)

<sup>4</sup> Dr Srbslav Aleksandrović, docent Mašinskog fakult. u Kragujevcu, [srba@knez.uis.kg.ac.yu](mailto:srba@knez.uis.kg.ac.yu)

<sup>5</sup> Dr Milentije Stefanovic, full-time professor at the Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac,

<sup>6</sup> Dr Vesna Mandic, senior lecturer at the Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac,

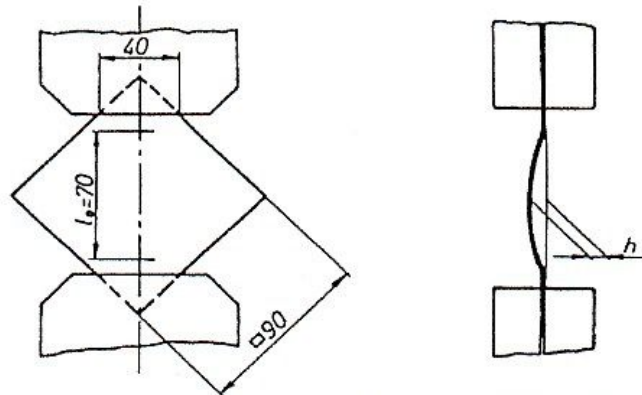
<sup>7</sup> Dr Miroslav Zivkovic, part-time professor at the Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac,

<sup>8</sup> Dr Srbslav Aleksandrovic, senior lecturer at the Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac,

## 1. UVOD

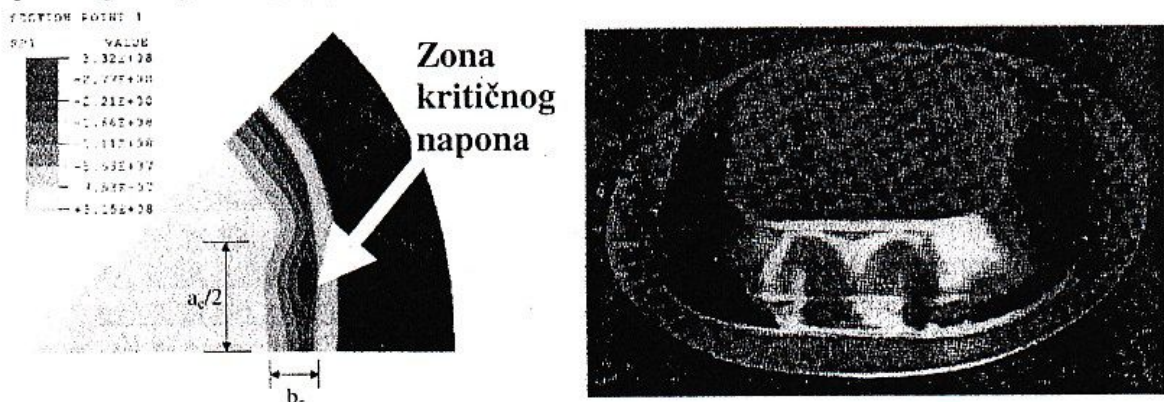
Limovi od čelika povećane čvrstoće (High Strength Steels) imaju izuzetnu primenu u mašingradnji, posebno u automobilske industriji za izradu lakih karoserija- U odnosu na niskougljenične limove za duboko izvlačenje, ovi limovi imaju nepovoljnije karakteristike obradivosti [1]. Zbog povećane čvrstoće, posebno je pri obradi izražena sklonost ka pojavi defleksije (povišinki geometrijski defekti na izvučenim delovima u vidu ulegnuća, ispupčenja, blagih talasa i sl.).

Sklonost limova ka defleksiji se u laboratorijskim uslovima ispituje modeliranjem, čime se simuliraju naponski odnosi pri stvarnoj obradi. Osnovno ispitivanje ove vrste je tzv. YOSHIDA-test jednosnosnog zatezanja kvadratne epruvete (v.sl.1), čime se ostvaruje nehomogeno naponsko-deformaciono polje u limu, što ima za posledicu formiranje nabora po glavnoj dijagonali epruvete. Merna karakteristika je visina nabora i ona je značajni pokazatelj sklonosti materijala ka defleksiji.



Slika 1 - Šema ispitivanja defleksije (YOSHIDA- test)

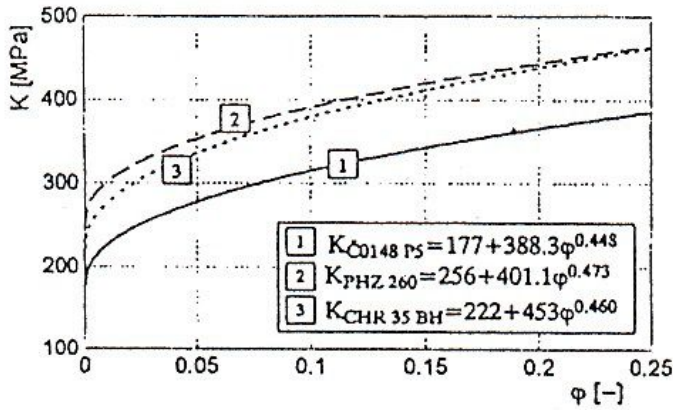
Predviđanje i prevencija pojave nabora je posebno važna pri projektovanju alata i definisanju parametara procesa obrade lima. Najefikasnija metoda predviđanja pojave nabora u limu, a koja se u poslednje vreme sve šire primenjuje u svetu, je svakako fizičko-numeričko modeliranje, koje podrazumeva primenu nekih od gore navedenih laboratorijskih testova, i numeričku simulaciju procesa korišćenjem programa na bazi metode konačnih elemenata. Pored toga, razvijene su i teorijsko-analičke metode za procenu pojave nabora. Npr. u radu [2] se proračunava kritični napon za pojavu nabora u funkciji osobina materijala, geometrijskih parametara i graničnih uslova. Pri FEM simulaciji procesa, ovakav analitički metod se može implementirati, i tako predviđati pojava nabora na obratku od lima u bilo kojem 3D procesu. Predloženi energetski metod obezbeđuje realnu i efikasnu procenu pojave nabora u procesima obrade lima, što potvrđuju rezultati fizičko-numeričkog modeliranja Yoshida testa i dubokog izvlačenja kutijastog dela [2] (v.sl.2).



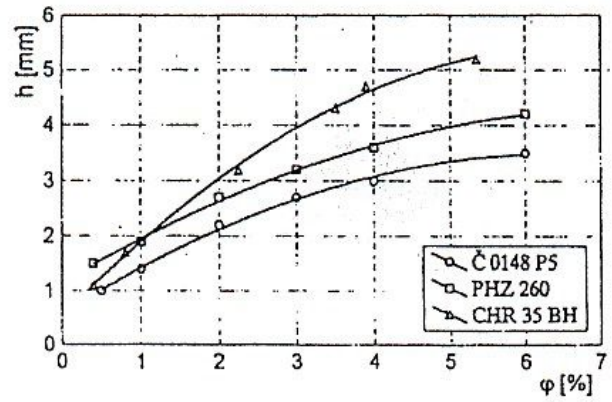
Slika 2 - Predviđanje pojave nabora kod dubokog izvlačenja kutijastog dela [3]

## 2. FIZIČKO-NUMERIČKO MODELIRANJE DEFLEKSIJE - YOSHIDA TEST

Eksperimentalna istraživanja obuhvataju klasičan Yoshida-test sa kvadratnim epruvetama (v.sl.1), pripremljenih od sledećih limova: Č0148 P5 (standardni niskouglenični čelični lim), PHZ 260 i CHR 35 BH (limovi iz kategorija HSS). Krive tečenja ovih materijala i njihove analitičke aproksimacije prikazane su na slici 3, a rezultati Yoshida testa na slici 4.



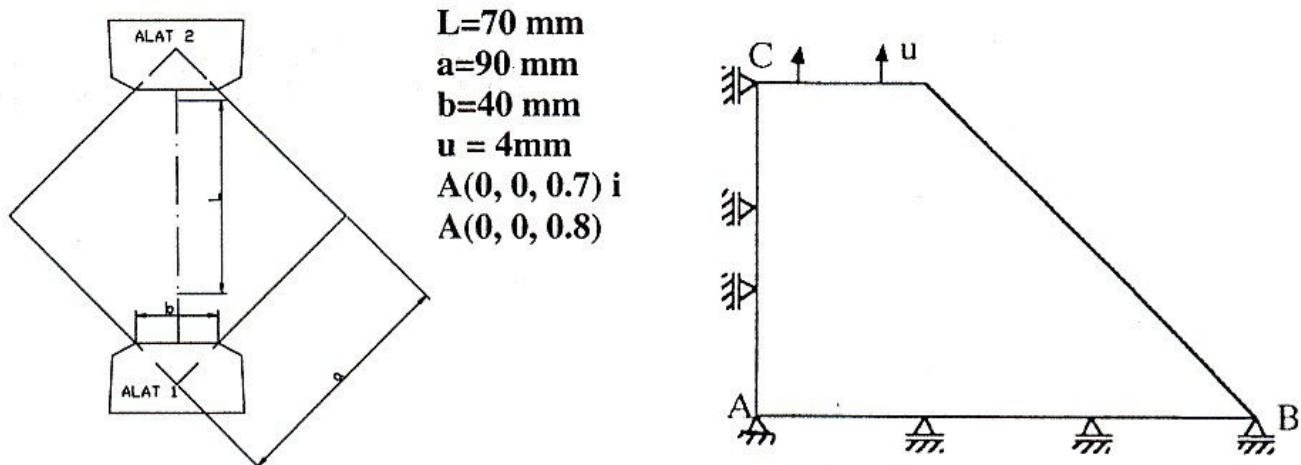
Slika 3 - Krive tečenja za ispitivane materijale



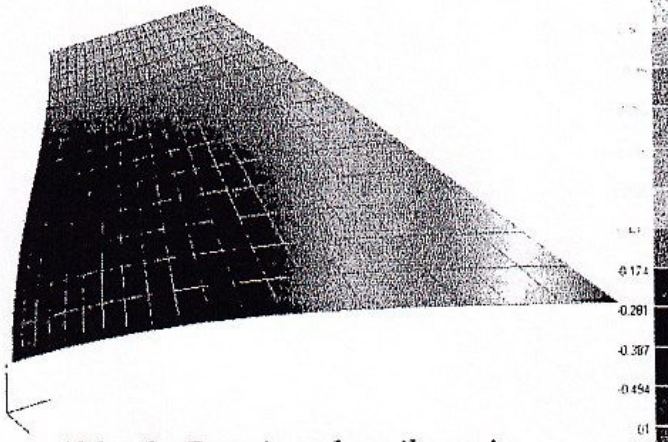
Slika 4 - Rezultati Yoshida-testa

Numerička simulacija jednoosnog dijagonalnog zatezanja kvadratne epruvete (Yoshida test) izvedena je korišćenjem programskog paketa **PAK**, razvijenog na bazi metode konačnih elemenata za linearnu i nelinearnu strukturnu i toplotnu analizu [3]. Program je razvijen na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, pri Centru za naučna istraživanja Srpske akademije nauka i umetnosti. U rešavanju je primenjena procedura za elasto-plastičnu analizu velikih deformacija ljuski [4].

Kvadratna epruveta od lima, stranice 90mm, modelirana je kao ljuske debljine 0.8 i 0.7mm, koje odgovaraju ispitivanim debljinama limova. Model epruvete i granični uslovi prikazani su na slici 5. Zbog simetrije modelirana je četvrtina epruvete. Epruveta je podeljena na četvorougaoone konačne elemente ljuske, sa osam spoljašnjih čvorova. Mreža nije uniforma po celoj površi. Da bi se pri zatezanju epruvete pojavila defleksija zadata je inicijalna imperfekcija geometrije u pravcu debljine lima. Modalnom analizom dobijeni su sopstveni oblici oscilovanja 1. i 2. moda koji odgovaraju datim kružnim frekvencijama. Kao inicijalna imperfekcija zadat je skalirani drugi mod (v.sl.6). U modalnoj analizi zadaju se samo elastične karakteristike (modul elastičnosti  $E=210000$  MPa, *Poisson*-ov odnos  $\nu=0.3$  i gustina materijala  $7.8 \times 10^{-9}$  kg/mm<sup>3</sup>).



Slika 5 - Model epruvete (geometrija i granični uslovi)



Slika 6 - Drugi mod oscilovanja

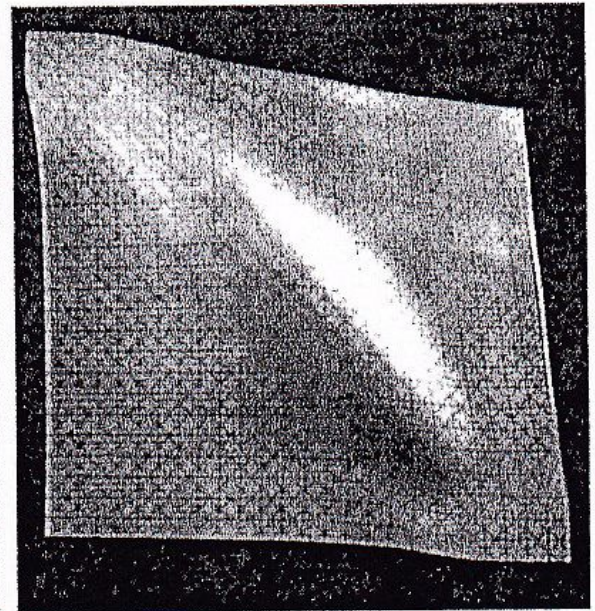
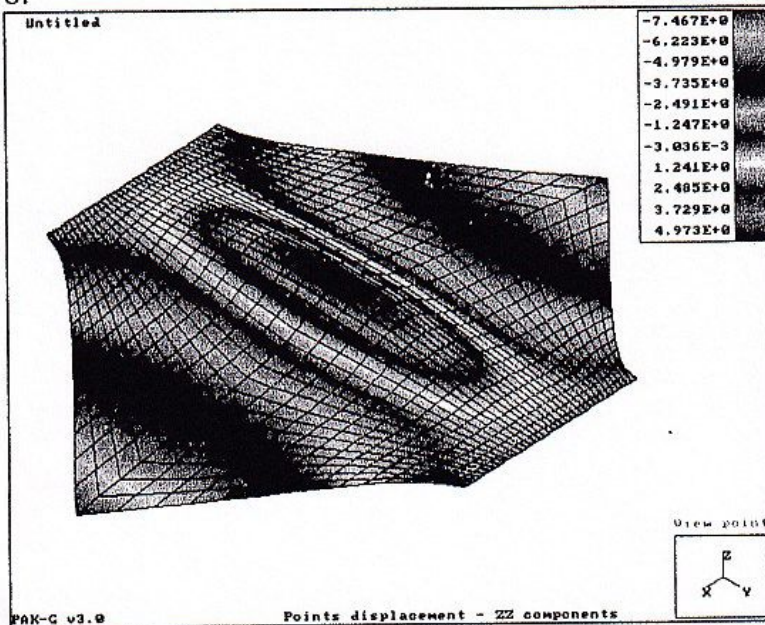


U materijalno-geometrijski nelinearnoj analizi definisane su, za dva analizirana lima (Č0148 P5 i PHZ 260), dve vrste elasto-plastičnog materijala, odnosno bi-lineranog. prema krivim tečenja i njihovim analitičkim aproksimacijama prikazanim na slici 3. Za materijal važi *Mises-ov* elasto-plastični model sa mešovitim ojačanjem-*Ramberg-Osgood-ov* model sa multi-lenarnom krivom tečenja .

Pri zadavanju opterećenja i pomeranja korišćena je jednačina povezanih pomeranja za karakteristične čvorove, čime su definisani ulazni podaci za granična opterećenja i pomeranja.

Pri rešavanju izabrano je 400 numeričkih koraka sa vremenskim priraštajem 0.1 i BFGS metod iteracije.

Numerička simulacija Yoshida testa je uspešno izvedena. Na slici 7 prikazani su rezultati simulacije, sa distribucijom pomeranja u pravcu z ose, odnosno visinom nabora kao pokazateljem defleksije. Epruveta od PHZ260 lima, nakon Yoshida testa, prikazana je na slici 8.



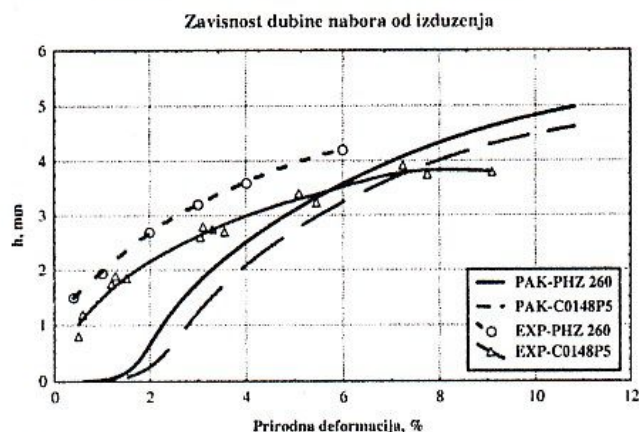
Slika 7 - Distribucija pomeranja u pravcu z, PHZ260

Slika 8 - Epruveta nakon testa, PHZ260

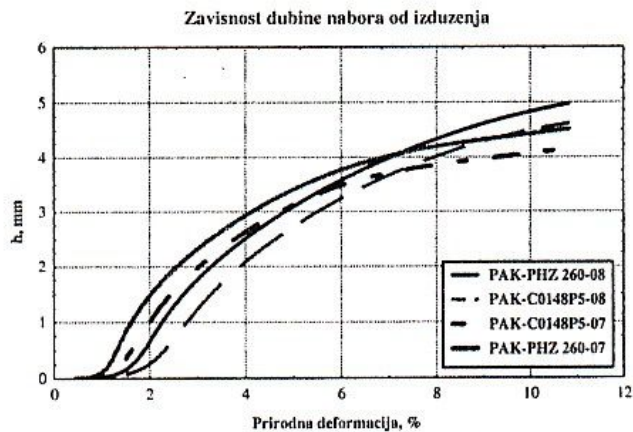
### 3. REZULTATI MODELIRANJA I DISKUSIJA

Uobičajeno je da se rezultati Yoshida testa prikazuju u obliku dijagrama zavisnosti visine nabora  $h$  od procentualnog izduženja, ili procentualne prirodne deformacije u pravcu dejstva sile. U daljem će biti prikazani uporedni dijagrami rezultata fizičko-numeričkog modeliranja defleksije preko Yoshida testa.

Na slici 9 prikazan je uporedni dijagram zavisnosti visine nabora od merodavne deformacije, na osnovu rezultata fizičko-numeričkog modeliranja Yoshida testa.



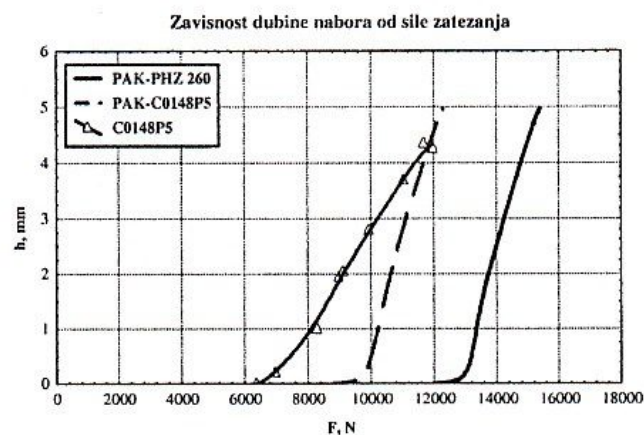
Slika 9- Rezultati fizičko-numeričkog modeliranja defleksije, limovi debljine 0.8mm



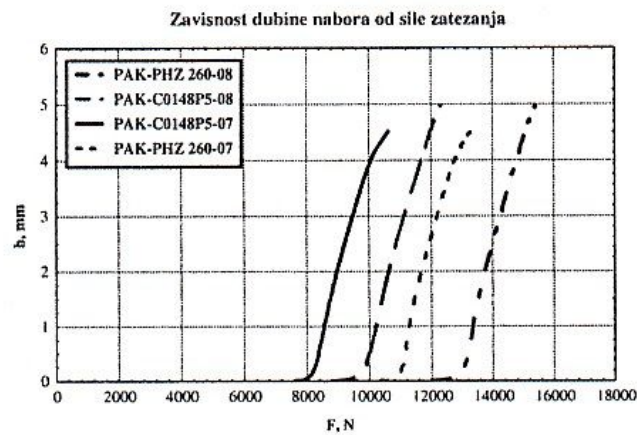
Slika 10 - Rezultati PAK numeričkog modeliranja, uticaj debljine lima

Uticaj debljine lima na veličinu defleksije, odnosno trenutak pojave nabora i njegovu visinu, koji ilustruje slika 10, analiziran je preko numeričke simulacije testa. Očigledno je da kod tanjih limova pre dolazi do pojave nabora, ali je njegova konačna visina manja, nego kod limova veće debljine.

Limovi od čelika povećane čvrstoće pokazuju izraženiju sklonost ka defleksiji, pri čemu njen porast prati rast granice tečenja. Kod ovakvih limova za nabor iste visine potrebno je utrošiti veću silu. Poslednju konstataciju ilustruje dijagram visine nabora od sile zatezanja, na slici 11.



Slika 11- Rezultati fizičko-numeričkog modeliranja defleksije, uticaj vrste materijala

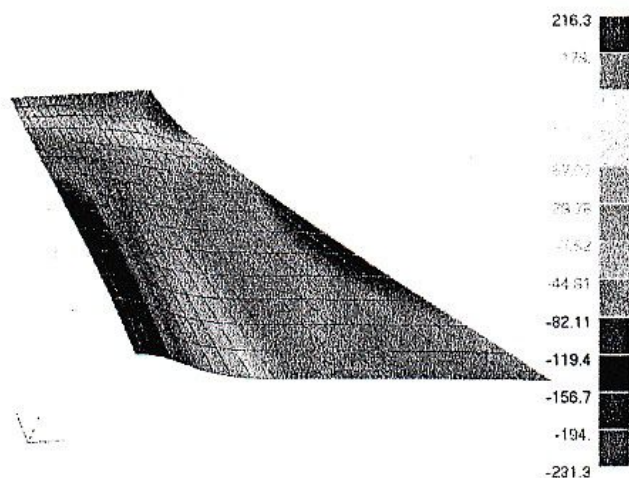


Slika 12- Rezultati PAK numeričkog modeliranja, uticaj debljine lima

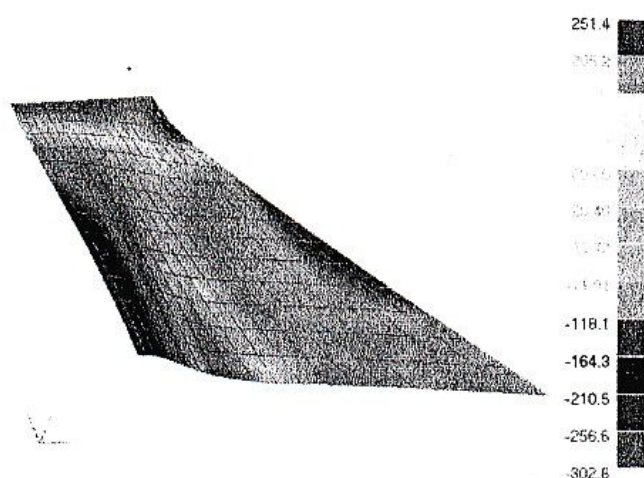
Pri promeni debljine lima, dijagram zavisnosti sile od visine nabora, dobijen numeričkom PAK simulacijom, izgleda kao na slici 12. Svakako da povećanje debljine lima dovodi do povećanja sile zatezanja, kao i konačne defleksije, odnosno visine nabora.

Upoređujući ekperimentalno dobijene i numerički procenjene rezultate modeliranja defleksije, posredstvom Yoshida testa (v.sl. 9), zapaža se odstupanje ekperimentalnih i numeričkih rezultata. To je posebno izraženo u oblasti malih deformacija (< 3%). Razlozi se mogu objasniti nepodudarnošću ekperimentalnog pristupa (opterećenje više epruveta do različitih stepena deformacije) i simulacije (kontinualno zatezanje). Takođe, moguć je uticaj stezanja (proklizavanje). Naredna ispitivanja, uz primenu kontinualnog sistema za akviziciju, obezbediće neophodnu sličnost u terorijsko-eksprientalnom pristupu.

Deformaciono-naponska PAK numerička analiza Yoshida testa, čiji se rezultati mogu prikazati u vidu distribucije deformacionih i naponskih polja, pokazuje da se upravo na mestu nabora pojavljuju maksimalni pritiskujućii naponi u pravcu x-ose (v.sl.13 i 14). Upravo se na taj način, pri simulaciji ostalih procesa obrade lima, može detektovati zona kritičnog napona kao mesto potencijalnog nabora.



Slika 13 - Distribucija napona  $\sigma_{xx}$ , Č0148P5



Slika 14 - Distribucija napona  $\sigma_{xx}$ , PHZ260

#### 4. ZAKLJUČAK

U više "numeričkih eksperimenata", variranjem vrednosti uticajnih parametara procesa, može se opisati pojava defleksije u modeliranim procesima, a dobijena iskustva preneti na realne procese u proizvodnim uslovima. Bolja podudarnost eksperimentalnih i numeričkih podataka, znači kvalitetnija numerička procena defleksionih pojava, ne samo u Yoshida testu, već i u procesima obrade lima u proizvodnim uslovima može se postići na sledeći način:

- obezbeđenju stroge sličnosti razmatranih procesa,
- sprečavanjem proklizavanja epruvete u čeljustima uređaja za ispitivanje,
- kvalitetnijim opisom početne inperfekcije u numeričkoj simulaciji,
- preciznijim zadavanjem graničnih uslova pri numeričkoj simulaciji, koji se odnose na eventualno proklizavanje epruvete itd.

Napomena: U radu su saopšteni neki rezultati projekta TR0025, koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnologije Republike Srbije.

#### LITERATURA

- [1] M.Stefanović, S.Aleksandrović, M.Milovanović, R.Jevtić, **High strength Steel for Automotive Panels and their Formability**, Metallurgia and New Materials Researc., Vol.VI, No4/1988., p.29-42.
- [2] Cao J., Wang X., **On the prediction of side-wall wrinkling in sheet metal forming processes**, International Journal of Mechanical Sciences 42 (2000), pp. 2369-2394.
- [3] Kojić M., Živković M., Slavković R., Grujović N., **PAK - Finite Element Program for Linear and Nonlinear Structural Analysis and Heat Transfer**, Faculty of Mechanical Engineering University of Kragujevac, Yugoslavia, 1996
- [4] Kojić M., Živković M., Slavković R., Grujović N., Vlastelica I., **A Procedure for Large strain Elastic-plastic Analysis of shells**, Computational Methods for Shell and Spatial Structures, IASS-IACM 2000, Athens, Greece 2000.