

B. Devedžić, S. Aleksandrović\*

## UTICAJ NEMONOTONOSTI DVOFAZNIH PROCESA DEFORMISANJA NA GRANIČNU DEFORMABILNOST TANKIH LIMOVA

### REZIME

U radu se uporedo prikazuju krive granične deformabilnosti tankih limova dobijene pomoću dva teorijska pristupa i eksperimentalnim postupkom.

Na osnovu teorije dekohezije mikrostrukture i t.z.v. kombinovanog teorijskog modela formirani su računarski programi koji omogućuju relativno lako dobijanje graničnih krivih samo na osnovu par osnovnih karakteristika materijala i procesa deformisanja.

### 1. UVOD

Dijagrami granične deformabilnosti limova (Keeler- Goodwin-ovi dijagrami - DGD u daljem tekstu) najčešće se dobijaju jednim od više mogućih eksperimentalnih postupaka. Međutim, to može u nekim industrijskim i drugim sredinama predstavljati relativnu teškoću, s obzirom na potrebno vreme, opremu, obučene stručnjake i dr. Osim toga, u velikom broju slučajeva nema praktične potrebe da se njihovi oblici i položaji određuju sa izuzetno velikom tačnošću, što znači da bi se mogla prihvatiti i njihova teorijska aproksimacija - ukoliko to izrazito pojednostavljuje postupak dobijanja dijagrama.

Opšte je poznato da se osnovni dijagrami granične deformabilnosti odnose na jednofazno monotono deformisanje sa pravolinijskom putanjom deformisanja. Takođe je poznato da se pri višefaznim nemonotonim procesima graničana deformabilnost menja. To je, pored ostalog, posledica odgovarajućih dekohezionih

\* Dr Branislav Devedžić red.prof., Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6.  
Mr Srbislav Aleksandrović dipl. ing., asistent, Mašinski fakultet Kragujevac

promena u mikrostrukturi. Koristeći teoriju dekohezije /1,3,4/, kao i quasi-teorijski pristup /5/, dobijeni su DGD u daljem prikazani na način koji olakšava upoređenje sa eksperimentalnim rezultatima.

## 2. OSNOVNE RELACIJE TEORIJSKIH PRISTUPA

Za monotone procese deformisanja važi da će do razaranja materijala doći kada koeficijent iskorišćenja plastičnosti dostigne vrednost 1.

$$q = \int_0^{\varphi_e^*} \frac{d\varphi_e}{\varphi_{el}} = 1 \quad (1)$$

gde je  $\varphi_e$ -ekvivalentna lokalna deformacija na kritičnom mestu otpreska, a indeks L se odnosi na graničnu vrednost (limit).

U razmotrenom slučaju moguće je uspostaviti analognu vezu i za slučaj kada se umesto ekvivalentne deformacije  $\varphi_e$  koristi veća deformacija u ravni lima  $\varphi_1$ .

Kada je proces nemonoton može se uticaj nemonotonosti uzeti u obzir preko koeficijenta  $b < 1$ , pa će koeficijent iskorišćenja plastičnosti za i-tu fazu biti

$$q^{(i)} = b^{(i)} \frac{\Delta \varphi_1^{(i)}}{\varphi_{1L}^{(i)}} \quad (2)$$

Za dvofazni proces biće ukupna granična deformacija /4/:

$$\begin{aligned} \varphi_{1L(t)}^T &= \varphi_1^{(1)} + \Delta \varphi_{1(t)}^{(2)} = \frac{\varphi_{1L(t)}^{(2)}}{b^{(2)}} + q^{(1)} \left( \varphi_{1L}^{(1)} - \frac{\varphi_{1L(t)}^{(2)}}{b^{(2)}} \right) \\ \varphi_{2L(t)}^T &= t^{(1)} \varphi_1^{(1)} + t_{(j)}^{(2)} \left( \varphi_{1L(t)}^T - \varphi_1^{(1)} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

gde su granične deformacije za pojedine faze  $\varphi_{1L}^{(1)}$  i  $\varphi_{1L(t)}^{(2)}$ , dok su deformacioni odnosi  $t = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$  u njima  $t^{(1)}$  i  $t_{(j)}^{(2)}$ , a

$$q^{(1)} = b^{(1)} \frac{\Delta \varphi_1^{(1)}}{\varphi_{1L}^{(1)}} \quad (4)$$

Vrednosti  $\varphi_{1L}^{(i)}$  dobijaju se kao presek pravca putanje pojedine faze i osnovnog DGD (datog grafički ili analitički). Za drugu fazu  $t_{(j)}^{(2)}$  je nezavisno promenljiva (uzima vrednosti od približno -0,5 do 1).

U radu /4/ dat je predlog empirijskog izraza za faktor b:

$$b^{(i)} = 1 + a(m^{(i-1)} - m^{(i)})q^{(i-1)}(1 + m^{(i-1)}) \left| 1 + \gamma(m^{(i-1)})^k (q^{(i-1)})^l \right| \quad (5)$$

i predlog vrednosti konstantnih veličina a,  $\gamma$ , k, l:

$a \approx \frac{1}{3}$ ;  $\gamma \approx 20$ ;  $k \approx 3$ ;  $l \approx 1$  za niskouglenične čelične limove. Veličina  $m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$  je naponski koeficijent koji se za proporcionalno naprezanje lako dovodi u vezu sa deformacionim koeficijentom  $t$ . Prema prethodnom lako se dobija:

$$b^{(1)} = 1; q^{(1)} = \frac{\varphi_1^{(1)}}{\varphi_{1L}^{(1)}}; b^{(2)} = 1 + \frac{1}{3}(m^{(1)} - m^{(2)})q^{(1)}(1 + m^{(1)}) \left| 1 + 20(m^{(1)})^3 q^{(1)} \right|.$$

$\varphi_1^{(1)}$  je deformacija na kraju prve faze procesa.

Drugi teorijski pristup je kombinacija prethodno navedenog i t.z.v. quasi-teorijskog modela izloženog u /5/. Ovdje će biti dati samo konačni izrazi za granične deformacije. Za detalje treba videti /5/ i /6/.

$$\varphi_{1L(i)}^T = \varphi_1^{(1)} + \frac{1 - q_a^{(1)}}{1 + f(t^{(1)} - t_{(i)}^{(2)})q_a^{(1)}} \frac{(1 + 1,8s)n}{\frac{6A_{\varphi(i)}^{(2)}}{\sqrt{3}(t_{(i)}^{(2)} + 1)} - 2} \quad \text{za } t_{(i)}^{(2)} > 0 \quad (6)$$

$$\varphi_{1L(i)}^T = \varphi_1^{(1)} + \frac{1 - q_a^{(1)}}{1 + f(t^{(1)} - t_{(i)}^{(2)})q_a^{(1)}} \frac{(1 + 1,8s) \frac{2t_{(i)}^{(2)} + 3}{3(t_{(i)}^{(2)} + 1)} n}{\frac{6A_{\varphi(i)}^{(2)}}{\sqrt{3}} - 2} \quad \text{za } t_{(i)}^{(2)} < 0 \quad (7)$$

ovdje je  $s$  debljina lima,  $n$  eksponent deformacionog ojačavanja

$$A_{\varphi(i)}^{(2)} = \sqrt{1 + t_{(i)}^{(2)} + (t_{(i)}^{(2)})^2}; \quad q_a^{(1)} = \frac{\varphi_1^{(1)}}{\varphi_{1L}^{(1)}} \quad \text{a} \quad \varphi_{1L}^{(1)} = \frac{(1 + 1,8s)n}{\frac{6A_{\varphi}^{(1)}}{\sqrt{3}(t^{(1)} + 1)} - 2} \quad \text{za } t^{(1)} > 0 \text{ t.j.}$$

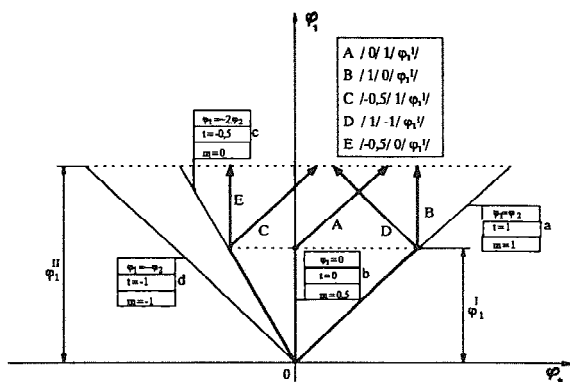
$$\varphi_{1L}^{(1)} = \frac{\frac{2t^{(1)} + 3}{3(t^{(1)} + 1)} (1 + 1,8n)}{\frac{6A_{\varphi}^{(1)}}{\sqrt{3}} - 2} \quad \text{za } t^{(1)} < 0. \quad \text{Za } t^{(1)} > t^{(2)} \quad f=3, \quad \text{a za } t^{(1)} < t^{(2)} \quad f=1/3.$$

$\varphi_{2L(i)}^T$  se dobija po jednačini (3b).

### 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I UPOREĐENJE SA TEORIJSKIM MODELIMA

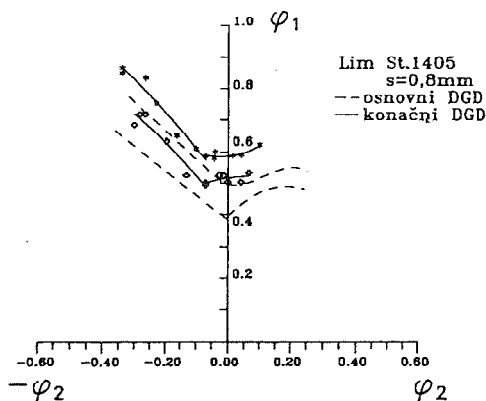
U nastavku su prikazani rezultati dva nemonotona postupka. Jedan u prvoj fazi ima putanju  $c$  (jednoosno zatezanje), a drugi putanju  $a$  (dvoosno razvlačenje) sa sl.1. Simbolički opis putanja na ovoj , i ostalim slikama, je prema /2/. Prvi podatak označava vrednost deformacionog odnosa  $t$  za putanju u prvoj fazi, drugi podatak je odnos  $t$  sa drugu fazu (promenljiv od -0,5 do 1) i treća vrednost je maksimalna deformacija  $\varphi_1$  na kraju prve faze.

Eksperimentalni postupak kojim su dobijene granične krive je razvlačenje traka različite širine (30-120x120 mm) izvlakačem prečnika 50 mm. Osnovne krive (dobijene pri jednofaznom monotonom deformisanju) naznačene su isprekidanim linijama. Materijal lima je St.1405 (po DIN-u) debljine 0,8 mm proizveden u železari Thyssen (Nemačka). Stanje kontaktnih površina je suvo, a brzina deformisanja 20 mm/min. Karakteristike materijala i ostali detalji mogu se naći u /6/.

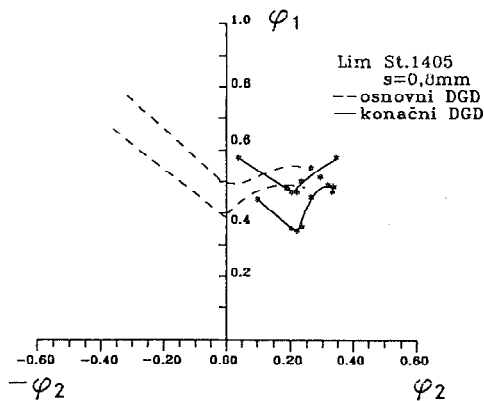


Sl.1 Shematski prikaz najčešće realizovanih putanja pri dvofaznom deformisanju /6/

Za dijagram na sl.2 u prvoj fazi je vršeno jednoosno zatezanje široke trake /6/ iz koje su, zatim, pripremane epruvete za DGD. Krive su date u parovima pri čemu donja odgovara lokalizaciji, a gornja razaranju.



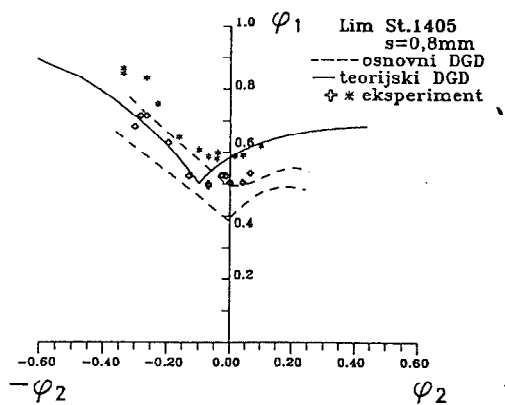
Sl. 2 Eksperimentalni DGD za nemonotoni postupak /-0,58/t<sup>(2)</sup>/0,17/



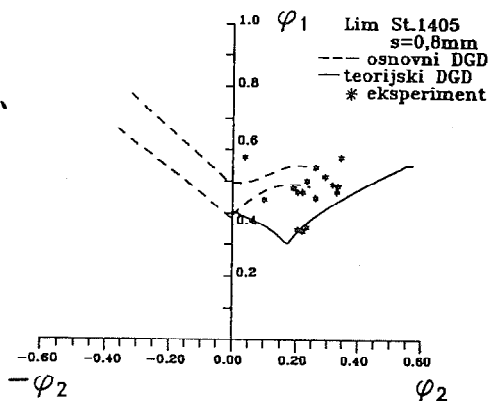
Sl. 3 Eksperimentalni DGD za nemonotoni postupak /1/t<sup>(2)</sup>/0,17/

DGD na sl.3 određen je za postupak koji u prvoj fazi ima razvlačenje /6/. Iz deformisanog komada sečene su epruvete za drugu fazu.

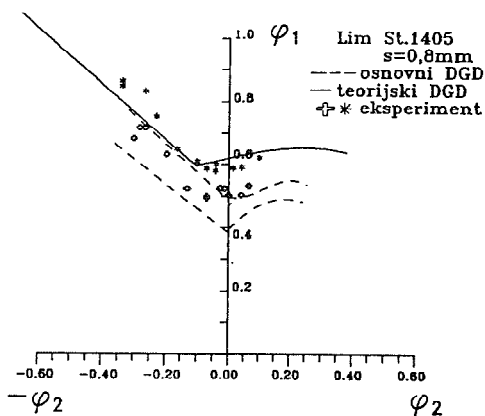
Sl. 4 daje uporedne rezultate eksperimenta i teorijskog "kombinovanog" modela. Dobija se samo jedna kriva čiji oblik i položaj dobro prate eksperimentalne tačke. Zbog ograničenog prostora nije moguće prikazati algoritam i detalje programa pa se čitalac upućuje na /6/.



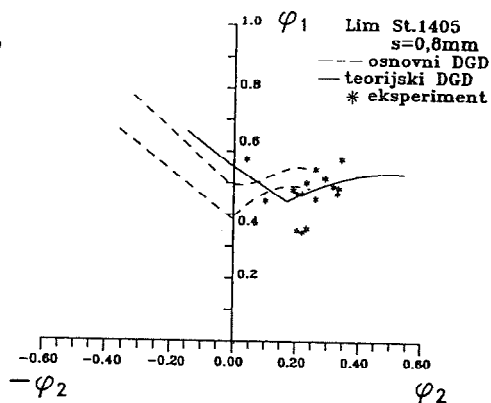
Sl. 4 DGD za uslove sa sl.2 po kombinovanom teorijskom modelu



Sl. 5 DGD za uslove sa sl.3 po kombinovanom teorijskom modelu



Sl. 6 DGD sa uslove sa sl. 2 po teoriji dekohezije



Sl. 7 DGD za uslove sa sl.3 po teoriji dekohezije

Kriva sa sl. 5 je nešto ispod eksperimentalnih vrednosti, što ne mora da se shvati kao nedostatak, već kao postojanje rezerve. Sa tehnološkog aspekta bilo bi opasno neslaganje da teorijska kriva leži iznad eksperimentalnih vrednosti.

Sl.6 i sl.7 daju rezultate teorije dekohezije i očigledno je vrlo povoljno slaganje sa eksperimentom. Treba naglasiti da je opsežnim ispitivanjima /6/ utvrđeno da za ovu klasu limova u empirijskom faktoru  $b$  (5) više odgovaraju nove vrednosti konstanti  $a=1/5$  i  $\gamma=10$  što se vidi sa prethodnih dijagrama. Za pojedinosti o algoritmu i programu po ovom teorijskom modelu zainteresovani se upućuje na /6/.

## 4. ZAKLJUČAK

Ispitivanja, čiji su rezultati ovde delimično prezentirani, potvrđuju značajnu aplikativnu vrednost pomenutih teorijskih modela. Posebno je značajno istaći njihovu relativnu jednostavnost i primenljivost ne samo za dvofazne nego i za višefazne nemonotone postupke. Potrebno je da postupak unutar svake faze bude monoton i da pravci glavnih napona i deformacija ne pokazuju velike promene od faze do faze.

**Napomena:** Zbog ograničenog obima rada nisu mogle biti prikazane pojedinosti navedenih postupaka, pa se zainteresovani upućuju na naznačenu literaturu (osnovni cilj rada bio je da se uporedo prikažu granične krive dobijene različitim postupcima, a ne temeljito razmatranje tih postupaka).

## 5. LITERATURA

- /1/. V.L. Kolmogorov : Plastičnost i razrušenje, Metalurgia, Moskva, 1977.g.
- /2/. S.N. Rasmussen : Theoretical Prediction of Strainpath Dependence of Limit Strains in Sheet Materials, Annals of the CIRP, Vol.30/1/1981.g., s. 179-184.
- /3/. B. Devedžić : On the effects of strain path on the forming limit of sheet metal, 15<sup>th</sup> Biennial Congress IDDRG, Dearborn, USA, 1988.g.
- /4/. B. Devedžić : Jedan nov pristup određivanju deformabilnosti limova u uslovima složene istorije deformisanja, 22. Jugoslovensko savetovanje proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1989.g., Zbornik s. 27-35.
- /5/. B. Devedžić : Granična deformabilnost limova pri različitim istorijama deformisanja, 24. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Novi Sad, 1992.g., Zbornik s. 1-11 do 1-19.
- /6/. S. Aleksandrović : Granična deformabilnost tankih limova u uslovima nemonotonog procesa plastičnog deformisanja, mag. rad, Maš. fak. Kragujevac, 1993.

B. Devedzic, S. Aleksandrovic

### THE INFLUENCE OF NON MONOTONY OF TWO PHASE FORMING PROCESSES ON THIN SHEET METALS FORMING LIMIT

#### Summary

This paper compares thin sheet metals forming limit curves obtained by two theoretical methods with the results obtained experimentally.

On the basis of both micro structure decohesion theory and "combined quasi-theoretical" approach we created computer programs which enable a relatively simple generation of forming limit curves by using just a few basic characteristics of the material and the forming process. The experiment for obtaining the limit forming curves was set up in a similar way.

A comparative analysis of theoretical and experimental results is given in the paper.