

V. Vujović*

NAPONSKO-DEFORMACIONE KARAKTERISTIKE OBRADNOG SISTEMA I MOGUĆNOSTI ISPOLJAVANJA POTENCIJALA DEFORMABILNOSTI MATERIJALA

Rezime

U radu se polazi od činjenice da metalni materijali raspolažu veoma velikim potencijalom deformabilnosti i da je osnovni problem iskorišćenja tih potencijala, formulisanje odgovarajućeg obradnog sistema, koji će putem uslova obrade omogućiti ispoljavanje potrebne deformabilnosti. Ukazuje se na veoma široke mogućnosti u raznovrsnosti oblikovanja obradnog sistema. Ukupni tenzor napona se raščlanjava na devijatorski deo i na sverni deo, pri čemu se geometrijski interpretiraju različite mogućnosti nastajanja plastičnog tečenja putem devijatorskog dela, a zatim se analizira uticaj dodavanja svernog tenzora različitih veličina. Sverni tenzor i deformacione komponente imaju odlučujuću ulogu u nastajanju i razvoju pukotina u materijalu pa su oni merodavni za limit deformabilnosti. U radu se pretežno analizira uticaj naponskih komponentata na ispoljavanje deformabilnosti, međjutim, trebalo bi posebno analizirati uticaj deformacionih komponentata i njihov odnos prema naponskim, što bi značajno prevazišlo mogući obim ovoga rada.

SPANNUNG-DEFORMATIONSSCHARAKTERISTIK DES BEARBEITUNGSSYSTEMS UND MÖGLICHKEITEN VON AUSDRÜCKEN DES UMFORMBARKEITSPOTENTIAL EINES WERKSTOFFES

Zusammenfassung

In der Arbeit wird davon ausgegangen daß Metallwerkstoffe ein sehr großes Umformbarkeitspotential besitzen. Hauptproblem ist die Ausnutzung dieses Potentials. Formulierung entsprechendes Bearbeitungssystems das, mit Hilfe der Umformbedingungen, ermöglicht das Ausdrücken von notwendiger Umformbarkeit. Es wird auf die breite Möglichkeiten von Gestaltung des Bearbeitungssystems hingewiesen. Des Spannungstensor wird in Deviator und Kugeltensor geteilt. Dabei werden verchiedene geometrische Möglichkeiten von Fließbeginn, verursacht durch Spannungsdeviator gezeigt. Gleichzeitig wird analysiert was für ein Einfluß die Addition von Kugeltensor ausübt. Kugeltensor und Deformationskomponenten haben denentscheidenden Einfluß auf das Entstehen und das Ausbreiten von Rissen in Material und damit sind sie für die Grenzumformbarkeit zuständig. In der Arbeit wird hauptsächlich der Einfluß von Spannungs-komponenten auf die Umformbarkeit analysiert. Getrennt sollte der Einfluß von Deformationskomponenten wie auch ihr Verhältniß zu Spannungs-komponenten analysiert werden, was aber die Grenzen dieser Arbeit überschreitet.

*) Vujović dr Vlado, dipl.ing., redovni prof., Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V.Perića-Valtera 2.

1. UVOD

Brojna istraživanja u bližoj prošlosti u okviru naučnih disciplina kao što su matematička teorija plastičnosti, primenjena teorija plastičnosti, odnosno, teorija obrade deformisanjem, fizika i mehanika metalnih materijala, teorija elastičnosti, nauka o metalima, metalurgija i druge, dovela su do dubljih saznanja o mogućim uticajima na metalne materijale u odnosu na trajne promene oblika plastičnim deformisanjem.

Cilj obrade deformisanjem sastojao bi se u ostvarenju zahteva da se po želji menja oblik polaznom materijalu udovoljavajući zahteve geometrijske tačnosti i kvaliteta obradjenih površina i to na bilo kom metalnom materijalu.

Mogućnost promene oblika plastičnim deformisanjem iskazuje se deformabilnošću materijala. Maksimalna mogućnost promene oblika predstavlja najveću deformaciju pre nastajanja prvih pukotina u materijalu. Pojava prvih pukotina označava granicu deformabilnosti određenog materijala u određenim uslovima obrade. Prema tome deformabilnost materijala predstavlja najveću efektivnu deformaciju (ϕ_e) bez nastajanja pukotina.

Funkcija deformabilnosti zavisi od niza činilaca, koji su u krajnjoj liniji činiooci obradnog sistema. Ne ulazeći u ovom radu u razmatranje ostalih činilaca funkcije deformabilnosti, ipak se ukazuje da su suptilna istraživanja na ovom području dovela do neslućenih saznanja o mogućnostima razvoja primene obrade deformisanjem, posebno putem razvoja konstrukcije obradnog sistema u cilju stvaranja naponskog stanja koje omogućava materijalu ispoljavanje većih potencijalnih mogućnosti deformabilnosti.

U ovom radu se daje deo razmatranja uticaja obradnog sistema preko formiranja naponskog stanja u zoni deformisanja na deformabilnost.

2. NAPONSKO STANJE I POČETAK PLASTIČNOG TEČENJA

Značajan doprinos ubrzanom razvoju primene metoda obrade deformisanjem predstavljaju saznanja o odnosu napona i ponašanja materijala u obradnom sistemu. Ova saznanja su otvorila sasvim nove pravce istraživanja u oblasti konstrukcije obradnih sistema s obzirom na poželjno ponašanje materijala. U ovoj oblasti postoje teško sagledive široke mogućnosti daljeg razvoja primene obrade deformisanjem i istovremeno široko područje za opsežna dalja istraživanja. Obzirom da se ukupni tenzor napona

$$T_{\sigma} = D_{\sigma} + \sigma_{sr} \cdot T_1 \quad (1.1)$$

sastoji se iz devijatorskog dela D_{σ} i srednjeg hidrostatičkog pritiska $\sigma_{sr} \cdot T_1$ to se i istraživanja odnosa obradivosti materijala i obradnog sistema kreću u opštem slučaju u dva pravca:

- uticaj devijatora napona na ponašanje materijala
- uticaj srednjeg hidrostatičkog pritiska na ponašanje materijala u procesima obrade deformisanjem.

Proučavanja u ove dve oblasti dovela su do fundamentalno važnih saznanja:

- o uslovima početka plastičnog tečenja i
- o granici obradivosti deformisanjem.

Reč je o naponskim uslovima koji se ostvaruju konstrukcijom obradnog sistema. Analiza uslova plastičnog tečenja u naponskom prostoru omogućava bolje sagledavanje značaja istraživanja u dve navedene oblasti.

Misses, kriterijum plastičnog tečenja, izražava pomoću druge invarijante devijatora napona i neke konstante napona.

Devijator napona se može pisati u obliku:

$$D_{\sigma} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

pri čemu su vrednosti S_{ij} komponente devijatora napona za koje nije teško dokazati da važi uslov

$$\sum_{i=1}^3 S_{ii} = 0 \quad (1.3)$$

Druga invarijanta devijatora napona predstavlja zbir minora razvijenih po glavnoj dijagonali

$$J_{D2} = \Sigma M_{gd} = S_{22}S_{33} - S_{23}^2 + S_{11}S_{33} - S_{13}^2 + S_{11}S_{22} - S_{12}^2$$

odnosno u sredjenom obliku:

$$J_{D2} = S_{11}S_{22} + S_{22}S_{33} + S_{33}S_{11} - (S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) \quad (1.4)$$

Pogodnom transformacijom relacije (1.4) dobija se

$$J_{D2} = -\frac{1}{2} (S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2) - (S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) \quad (1.5)$$

Prvi deo izraza (1.5) predstavlja komponente normalnih napona pošto je u tom delu izraza

$$i = j,$$

a drugi deo izraza predstavlja komponente smičućih napona, pošto je ovde

$$i \neq j$$

Za glavne pravce drugi deo izraza (1.5) ne postoji, pošto u tim pravcima nema tangencijalnih napona.

Prema Misses-u drugu invarijantu devijatora napona treba smatrati kriterijumom plastičnog tečenja materijala. Sve dok je J_{D2} manja od neke karakteristične vrednosti materijala K^2 materijal je u elastičnom stanju. Kada J_{D2} dostigne vrednost K^2 materijal je u stanju tečenja. Ako nema pojave deformacionog ojačavanja, kombinacija devijatorskih komponenta J_{D2} neće nikad preći početnu vrednost K^2 . Ova tvrdnja se može izraziti preko

$$J_{D2} \ll K^2 \quad \text{u području elastičnosti} \quad (1.6)$$

$$J_{D2} = K^2 \quad \text{u području tečenja} \quad (1.7)$$

Opšti uslov plastičnog tečenja (1.7) može se preko naponskih komponenta izraziti u obliku:

$$\frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 = K^2$$

Aksijalno naponsko stanje se karakteriše

$$\sigma_{11} \neq 0 \quad \text{i sve ostale komponente}$$

$$\sigma_{ij} = 0$$

Ako se istezanje pri kome nastaje tečenje pri probi na kidanje označi sa $\sigma_{11} = \sigma_e = \sigma_T$, onda se lako pokazuje da je za ovaj slučaj naponskog stanja

$$J_{D2} = K^2 = \frac{\sigma_e^2}{3} = \frac{\sigma_T^2}{3}, \text{ odakle je}$$

$$K = \pm \frac{\sigma_e}{3} \quad (1.8)$$

Na osnovu ovoga Misses-ov kriterijum plastičnog tečenja se može napisati u obliku:

$$\frac{1}{2} (S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2) + S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2 = K^2 = \frac{\sigma_e^2}{3} = \frac{\sigma_T^2}{3} \quad (1.9)$$

odnosno preko naponskih komponenta

$$\frac{1}{6} |(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2| + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 = K^2 = \frac{\sigma_e^2}{3} = \frac{\sigma_T^2}{3} \quad (1.10)$$

Iz izraza (1.10) se može zaključiti da postoji veoma veliki broj različitih naponskih stanja koja osiguravaju početak plastičnog tečenja. Analiza tih mogućnosti kao i sagledavanje uloga devijatora napona i svernog tenzora (hidrostatičkog pritiska) se može izvršiti u tz. naponskom prostoru u kome su tri glavna napona - tri kordinate trodimenzionalnog naponskog prostora. Pojednostavljeni oblik relacije (1.10) bez smičućih napona ($\sigma_{ij} = 0$) predstavlja u opštem slučaju približni - aproksimativni uslov plastičnog rečenja, pri čemu na glavnim pravcima daje tačne vrednosti. Imajući to u vidu dobija se

$$(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 = 2 \sigma_e^2 = 2 \sigma_T^2 \quad (1.11)$$

Jednačina (1.11) u naponskom prostoru predstavlja cilindričnu površinu neograničene dužine, čija je osa jednako nagnuta u odnosu na sve tri koordinatne ose. To znači da osa cilindra (cilindrične površine) ima iste kosinuse pravca, koji iznose:

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} ; a_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} ; a_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (1.12)$$

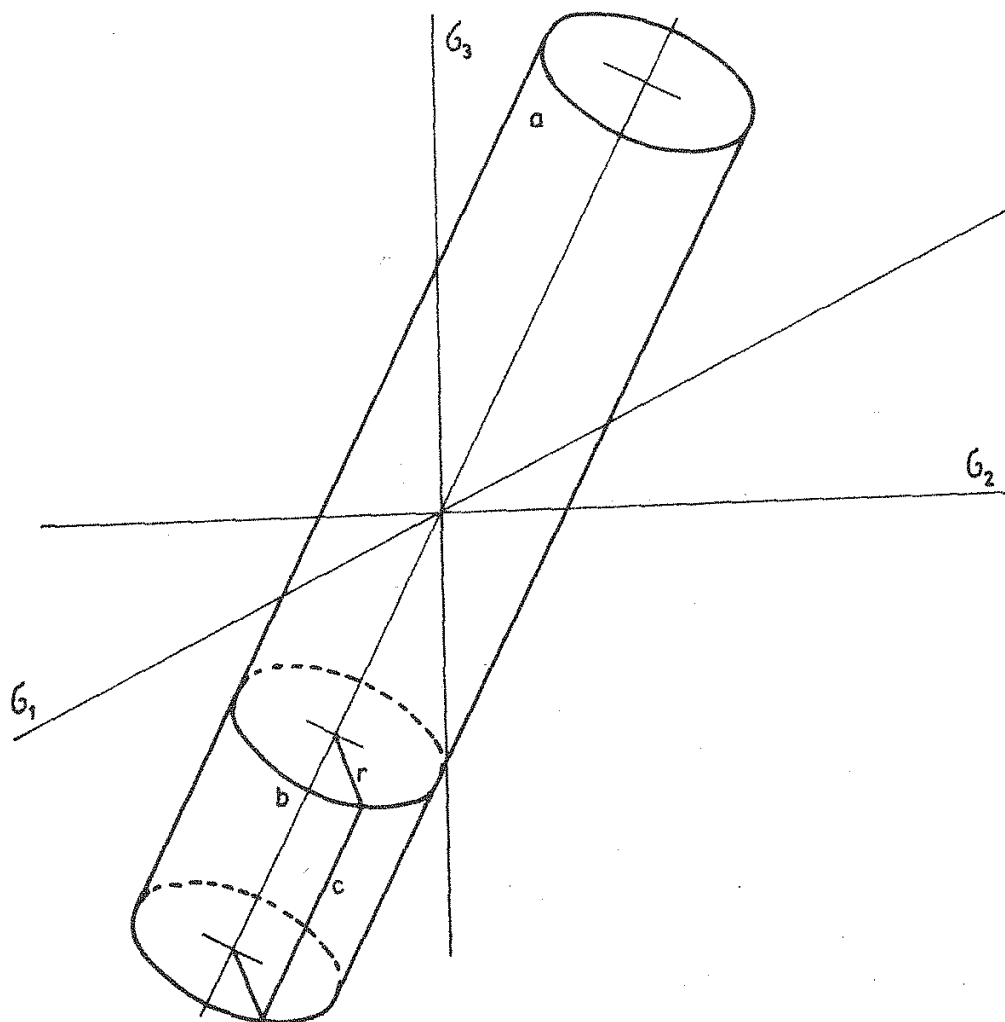
Poluprečnik cilindrične površine na osnovu jednačine (1.11) iznosi:

$$r = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_e \quad (1.13)$$

Grafički prikaz cilindrične površine (1.11) daje se na slici 1.1.

Ako su glavni normalni naponi u bilo kom elementu zone deformisanja takvi da određuju tačku koja leži na površini cilindra, onda će se taj element tela nalaziti u plastičnom stanju. Na taj način površina cilindra (1.11) je "granična površina plastične deformacije" prema Misses-ovom kriterijumu plastičnog tečenja.

Ako su glavni normalni naponi u elementu tela takvi da određuju tačku, koja leži unutar cilindrične površine, onda će se taj element nalaziti u elastičnom naponskom stanju. Kombinacija pak napona, koja određuje tačke izvan cilindrične površine nemaju fizičkog smisla. Razume se da postoji neograničen broj kombinacija veličina glavnih normalnih napona, koje zadovoljavaju jednačinu (1.11), jer je broj tačaka na cilindričnoj površini beskrajno velik. Teoretski ovo znači da postoji beskrajno mnogo mogućnosti za konstruisanje različitih obradnih sistema.



Slika 1.1. Geometrijska interpretacija uslova plastičnog tečenja.

Što je veće $\sigma_{e0} = \sigma_T$ utoliko je prema (1.13) veći i radijus cilindra r . Ako se deformisanje odvija uz pojavu deformacionog ojačavanja onda se σ_e povećava, pa se kao posledica toga granična površina plastične deformacije širi.

Krugovi na površini cilindra (na primer a i b , slika 1.1), dobijeni presekom sa ravni normalnom na osu cilindra, predstavljaju geometrijsko mesto tačaka, koje definišu granična naponska stanja kod kojih je zbir glavnih normalnih napona konstantan, tj. naponska stanja istog svernog tenzora, odnosno istog hidrostatičkog pritiska. Ovo proizilazi iz toga što jednačina ravni normalne na osu cilindra ima oblik:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = p \sqrt{3} \quad (1.14)$$

gde je p - dužina normale povučena iz koordinatnog početka do te ravni. Za slučaj $p = 0$, tj. za presek ravni normalne na osu cilindra, koja prolazi kroz

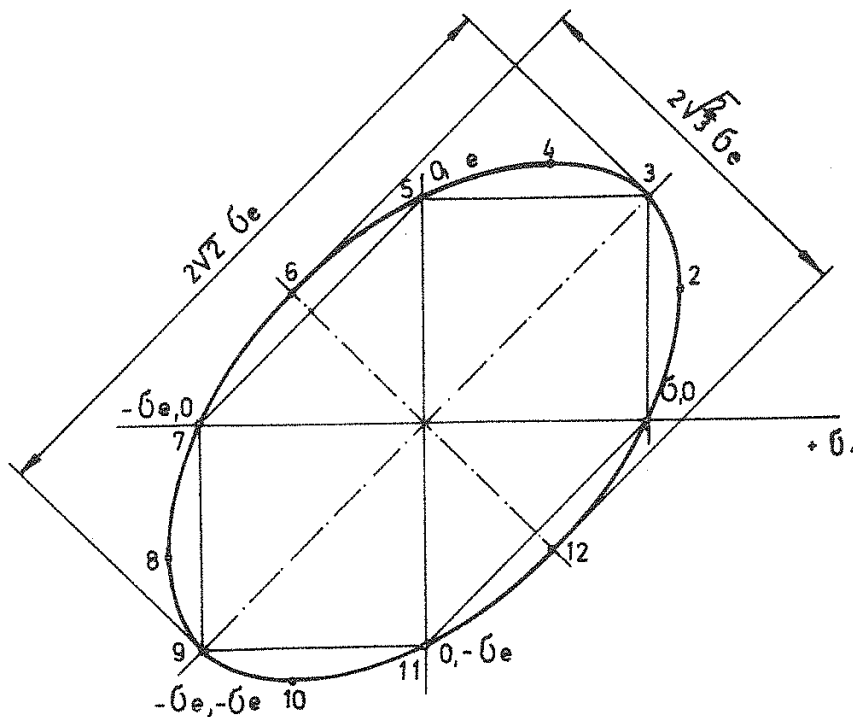
koordinatni početak dobija se čisto devijatorsko naponsko stanje jer je $\sigma_{sr}=0$.

Izvodnica cilindra (na primer c) čine geometrijsko mesto tačaka za koje je konstantna razlika tri glavna napona, tj. određuju naponska stanja sa konstantnim devijatorom napona.

Za slučaj dvodimenzionalnog naponskog stanja iz relacije (1.11) mogu se napisati tri jednačine

$$\begin{aligned}
 1) \quad \sigma_{33} = 0 &\rightarrow \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} = \sigma_e^2 \\
 2) \quad \sigma_{22} = 0 &\rightarrow \sigma_{11}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11}\sigma_{33} = \sigma_e^2 \\
 3) \quad \sigma_{11} = 0 &\rightarrow \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33} = \sigma_e^2
 \end{aligned}
 \tag{1.15}$$

Jednačine (1.15) određuju potpuno jednake elipse s centrom u koordinatnom početku i osama nagnutim pod uglom od 45° u odnosu na koordinatne ose. Elementarnom analizom analitičke geometrije mogu se odrediti koordinate svih karakterističnih tačaka elipse (1.15). Grafički prikaz ove elipse daje se na sl.1.2.



Slika 1.2. Elipsa plastičnosti

Na elipsi se uočava dvanaest karakterističnih tačaka, čije su koordinate prema sledećem:

- | | |
|--|--|
| 1. $\sigma_e = \sigma_T, 0$ | 7. $-\sigma_e, 0$ |
| 2. $\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e, \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e$ | 8. $-\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e, -\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e$ |
| 3. σ_e, σ_e | 9. $-\sigma_e, -\sigma_e$ |
| 4. $\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e, \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$ | 10. $-\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e, -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$ |
| 5. $0, \sigma_e$ | 11. $0, -\sigma_e$ |
| 6. $-\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e, \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e$ | 12. $\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e, -\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e$ |

Prema tome, jednačine (1.15) predstavljaju uslov plastičnosti za ravno naponsko stanje, a elipsa određena ovim jednačinama "graničnu konturu plastičnosti" za ravno naponsko stanje. Sa slike 1.2 proizilazi da ni jedan glavni napon ne može premašiti veličinu

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e = 1,155 \sigma$$

četiri tačke elipse 5 $(0, \sigma_e)$, 1 $(\sigma_e, 0)$, 11 $(0, -\sigma_e)$ i 7 $(-\sigma_e, 0)$ određuju osna naponska stanja (linearno rastezanje i linearni pritisak). Dalje četiri tačke 4 $(1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e, 2/\sqrt{3} \cdot \sigma_e)$, 2 $(2/\sqrt{3} \cdot \sigma_e, 1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e)$, 10 $(-1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e, -2/\sqrt{3} \cdot \sigma_e)$ i 8 $(-2/\sqrt{3} \cdot \sigma_e, -1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e)$ odgovaraju postojanju ne samo ravnog naponskog stanja, već i ravnog deformacionog stanja, pošto je jedan napon ravan polusumi drugih dva (pri ovome se uzima u obzir i napon jednak nuli):

$$\frac{0 + \sigma_1}{2} = \sigma_3 \quad \text{ili} \quad \frac{0 + \sigma_3}{2} = \sigma$$

Dve tačke 12 $(1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e, -1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e)$ i 6 $(-1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e, 1/\sqrt{3} \cdot \sigma_e)$ odgovaraju čistom smicanju, jer su pri jednom naponu ravnom nuli druga dva napona po apsolutnoj vrednosti medjusobno jednaka sa različitim predznacima.

Različite tačke elipse predstavljaju različita naponska stanja, međutim one istovremeno predstavljaju različite obradne sisteme, koji trebaju takva stanja da realizuju. Očito je da će obradivost materijala biti različita zavisno od toga u kojoj tački elipse, odnosno u kom obradnom sistemu će se realizovati proces deformisanja.

Prema izloženom različitim tačkama površine cilindra (1.11) i konture elipse (1.15) odgovaraju različita naponska stanja, koja se u pravilu realizuju različitim obradnim sistemima. Obzirom da devijatorski deo tenzora napona vrši promenu oblika, to detaljnije razmatranje njegovog uticaja ima poseban značaj, što se u nastavku ovog rada čini.

3. ANALIZA PROMENE DEVIJATORA NAPONA

Devijatorske komponente su prema relaciji (1.2) sledeće:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \sigma_{11} - \sigma_{sr} = \sigma_{xx} - \sigma_{sr} \\ S_{22} &= \sigma_{22} - \sigma_{sr} = \sigma_{yy} - \sigma_{sr} \\ S_{33} &= \sigma_{33} - \sigma_{sr} = \sigma_{zz} - \sigma_{sr} \\ S_{12} &= \sigma_{12} = \sigma_{xy} - \sigma_{xy} \\ S_{13} &= \sigma_{13} = \sigma_{xz} = \sigma_{xz} \\ S_{21} &= \sigma_{21} = \sigma_{yx} = \sigma_{yx} \\ S_{23} &= \sigma_{23} = \sigma_{yz} = \sigma_{yz} \\ S_{31} &= \sigma_{31} = \sigma_{zx} = \sigma_{zx} \\ S_{32} &= \sigma_{32} = \sigma_{zy} = \sigma_{zy} \end{aligned} \tag{1.16}$$

Analiza promene devijatora napona i njegovog uticaja na deformacije može se vršiti preko analize promene njegovih komponenata (1.16), a praćenje tih promena prema slikama 1.1 i 1.2.

Poseban interes predstavljaju čista devijatorska naponska stanja u kom slučaju je:

$$\sigma_{sr} = 0$$

Za trodimenzionalno naponsko stanje treba biti ispunjen uslov:

$$\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = 0$$

a za dvodimenzionalno

$$\sigma_{11} + \sigma_{22} = 0, \text{ odnosno } \sigma_{11} = -\sigma_{22}$$

da bi se ostvarilo čisto devijatorsko naponsko stanje.

Pošto se srednji hidrostatički pritisak, odnosno sverni tenzor, dodaje u pozitivnom ili negativnom smislu devijatoru napona, to je jasno da čisto devijatorsko naponsko stanje, omogućava deformaciju uz najmanja opterećenja obradnog sistema.

Na slici 1.1 čisto devijatorsko naponsko stanje označavaju tačke na cilindru plastičnosti koje daje presek površine ovog cilindra i ravni koja prolazi kroz koordinatni početak, a normalna je na osu cilindra. Na slici 1.2 tačke 6. i 12. predstavljaju čista devijatorska naponska stanja.

Uticaj naponskih stanja na veličinu deformacija se može sagledati grafičkim prikazom glavnih napona i glavnih deformacija. To je skup šema glavnih napona i glavnih deformacija.

Usled konstantnosti zapremine, po apsolutnoj vrednosti najveća deformacija je jednaka zbiru druge dve sa suprotnim znakom. Na taj način, jedna od deformacija, maksimalna po apsolutnoj veličini uvek ima suprotan znak od druge dve deformacije. Iz ovoga proizilazi da može biti samo tri oblika šeme glavnih deformacija:

1. Šema sa jednom deformacijom pozitivnom i druge dve negativne, tj. rastezanje
2. Šema sa jednom deformacijom negativnom i druge dve pozitivne, tj. sabijanje i konačno
3. Šema sa jednom deformacijom ravnom nuli i drugim dvema jednakim po apsolutnoj vrednosti i suprotnim znakovima - ravno deformaciono stanje - smicanje.

Šeme naponskih stanja mogu biti, polazeći od broja mogućih vektora:

1. linearno (jedan vektor)
2. ravno (dva vektora)
3. zapreminsko (tri vektora).

Uz ovo linearno naponsko stanje može biti sa pozitivnim (zatežućim) i sa negativnim (pritiskujućim) naponom. Ravna naponska stanja mogu biti istosmerna ili raznosmerna. Kod istosmernih šema svi naponi su istog znaka. Zbog toga se razlikuju dva slučaja ravnih istosmernih šema (dva pritiskujuća ili dva zatežuća napona) i dva slučaja zapreminskih istosmernih šema (tri zatežuća napona ili tri pritiskujuća napona). Kod plastičnog deformisanja ne može biti jednakosti između ova tri napona.

Raznosmerne šeme napona mogu biti i u ravni samo jedan oblik a zapreminska naponska stanja imaju dva oblika (sa dva pozitivna i jednim negativnim naponom ili obrnuto). Na taj način postoji svega devet oblika šema glavnih napon-

skih stanja: dva linearna, tri ravna i četiri zapreminska. Razume se da odnosi između napona kod ravnog i zapreminskog naponskog stanja mogu biti različiti.

Svaka od sedam oblika ravnih i zapreminskih šema glavnih napona može se kombinovati sa svakom od tri oblika šema glavnih deformacija. To daje 21 mehaničku šemu naponsko deformacionog stanja. Linearna šema sa jednim zatežućim glavnim naponom kombinuje se samo sa zapreminskom šemom glavnih deformacija, kod koje je jedna pozitivna deformacija i dve negativne, koje su međusobno jednake, a linearna šema s jednim pritiskujućim naponom kombinuje se sa šemom deformacije kod koje je jedna deformacija negativna a druge dve međusobno jednake i pozitivne. Na taj način ukupan broj oblika mehaničkih šema može biti 23.

Mehaničke šeme deformacija odražavaju šemu sila, koje dejstvuju i određuju karakter promene oblika. Proces deformacije su mehanički uporedivi (slični), ako imaju istu šemu koja pretežno postoji. Dakle, razne procese obrade deformisanjem je moguće klasifikovati prema njihovim mehaničkim šemama. Iz mehaničkih šema proizilaze karakteristike pojedinih tehnoloških metoda obrade deformisanjem.

Šema glavnih deformacija određuje karakter promene fizičko-mehaničkih osobina metala. Tako na primer dobijanje ravnomernog toka vlakana u materijalu najlakše je ostvariti sa šemom glavnih deformacija kod koje je jedna pozitivna i druge dve međusobno jednake i negativne. Pri takvoj šemi se stvaranje teksture deformacije vrši najbrže i najintenzivnije deformat. ojačavanje.

Medjutim, nije moguće prema šemama glavnih deformacija, bez šeme glavnih napona, ceniti o deformacionom otporu ni o deformabilnosti metala u procesima obrade. Deformabilnost i deformacioni otpor zavise od šeme glavnih napona.

Pri prelasku od ravnih raznosmernih preko linearnog rastezanja prema istosmernim šemama sa zatežućim naponima deformabilnost metala opada pri deformisanju i obrnuto, pri prelazu kroz linearno sabijanje prema istosmernim šemama sa pritiskujućim naponima deformabilnost raste. Na taj način je deformabilnost metala uvek veća pri deformisanju u uslovima, koji odgovaraju pritiskujućim šemama naponskih stanja nego pri istosmernim zatežućim šemama. Drugim rečima ako se čistom devijatorskom naponskom stanju dodaje pozitivni sferni tenzor, deformabilnost metala opada i to u toliko više ukoliko su veće komponente sfernog tenzora, a ako se dodaje negativni sverni tenzor, onda deformabilnost metala raste i to utoliko više ukoliko su veće komponente tog negativnog svernog tenzora,

Isto to može da se kaže i na sledeći način: što manju ulogu u šemi glavnih napona igraju zatežujući naponi i što veću ulogu igraju pritiskujući naponi utoliko će metal ispoljavati veću sposobnost za plastično deformisanje.

Dominantna šema glavnih napona kod raznih tehnoloških metoda obrade metala deformisanjem je različita, pa prema tome metal će ispoljavati i različitu deformabilnost u uslovima obrade. Tako na primer obradivost čelika pri hladnom istiskivanju je znatno veća nego pri vučenju. Iz ovoga sledi zaključak da je neophodno za teže obradive materijale, birati povoljnije uslove u odnosu na ispoljavanje deformabilnosti.

Najveći deformacioni otpor stvara metal u uslovima deformisanja sa istosmernim šemama naponskog stanja. Pri deformisanju u uslovima raznosmernih šema glavnih napona, kao i kod linearnih, deformacioni otpor se smanjuje.

Pošto svaku od sedam oblika ravnih i zapreminskih šema glavnih napona je moguće kombinovati sa svakom od tri šeme glavnih deformacija, to bez dodatnih podataka nije moguće rešiti koju deformaciju - rastezanje, sabijanje ili smicanje će izazvati neko naponsko stanje, koje odgovara odredjenoj šemi glavnih napona. Za odgovor na ovo pitanje mora se koristiti devijator napona, koji, kako je već rečeno uslovljava promenu oblika elementa tela.

Komponente devijatora napona sa glavne dijagonale poseduju isto svojstvo kao i komponente plastičnih deformacija - njihov zbir je jednak nuli, pa zbog toga je i maksimalni normalni napon po apsolutnoj vrednosti jednak zbiru drugih dva uzetih sa obrnutim znakom.

Glavni normalni naponi, koji su komponente devijatora napona u narednom se radi kratkoće nazivaju glavnim komponentama devijatora. Prema tome moguća su samo tri oblika šema glavnih komponentata devijatora i te šeme su identične sa šemama glavnih deformacija.

Karakterisanje ovih šema moguće je pre svega koeficijentom naponskog stanja:

$$v_{\sigma} = \frac{\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} = \frac{2 \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{ili} \quad (1.17)$$

$$v_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{sred}} - \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2}}{\frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{2}} = \frac{2 \sigma_{\text{sred}} - \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}} \quad (1.18)$$

Za šemu čistog smicanja $v_{\sigma} = 0$. Pri prelasku na šeme rastezanja v_{σ} se smanjuje, dostižući minimalnu vrednost $v_{\sigma} = -1$ za slučaj šeme 1 a sa slike 1.3, a pri prelasku na pritiskujuće šeme v_{σ} se povećava, dostižući maksimalnu veličinu $v_{\sigma} = 1$ na šemi 1.3a.

Druga glavna karakteristika šema glavnih komponenata devijatora može biti srednji glavni napon imajući u vidu da je

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_s > \sigma_3 \text{ iz (1.17) i (1.18)}$$

proizilazi

$$\sigma_s = v_{\sigma} \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} + \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.19)$$

Iz jednačine (1.19) proizilazi da je pri $v_{\sigma} = 0$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

pri $v_{\sigma} > 0$

$$\sigma_s > \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

a pri $v_{\sigma} < 0$

$$\sigma_s < \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Pri čistom smicanju je

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

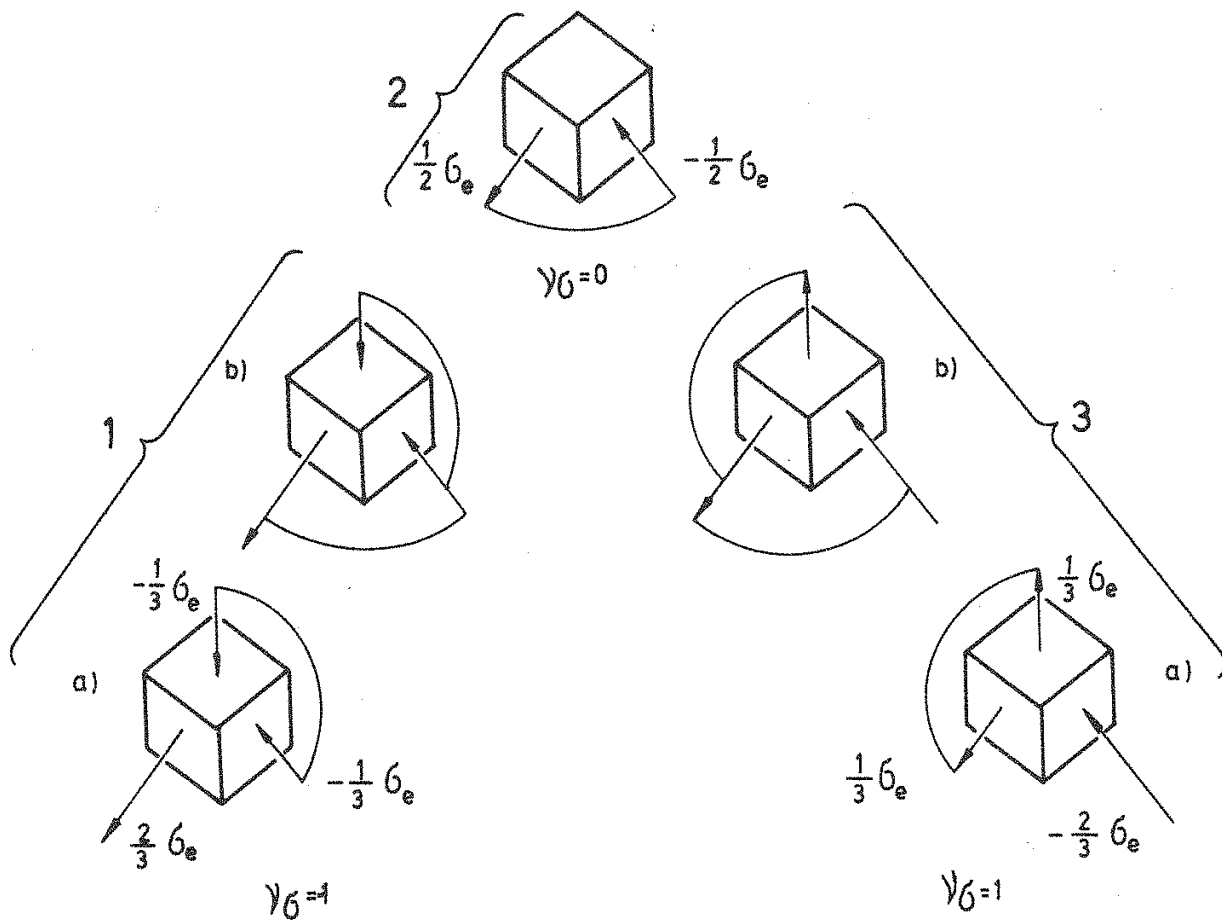
pri deformaciji rastezanja

$$\sigma_s > \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

i pri deformaciji sabijanja

$$\sigma_s < \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Veličina v_{σ} može ne samo okarakterisati šeme glavnih komponenata devijatora napona, već i izraziti preko nje sve moguće vrednosti glavnih napona pri plastičnoj deformaciji. Radi ovoga se rešava jednačina (1.19), zajedno sa jednačinom plastičnosti, kao rezultat čega se dobija:



- 1 - Deformacija rastezanja: $\sigma_s < 0,5 (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$
 2 - Smicanje - ravno deformaciono stanje: $\sigma_s = 0,5 (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$
 3 - Deformacija sabijanja: $\sigma_s > (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) 0,5$

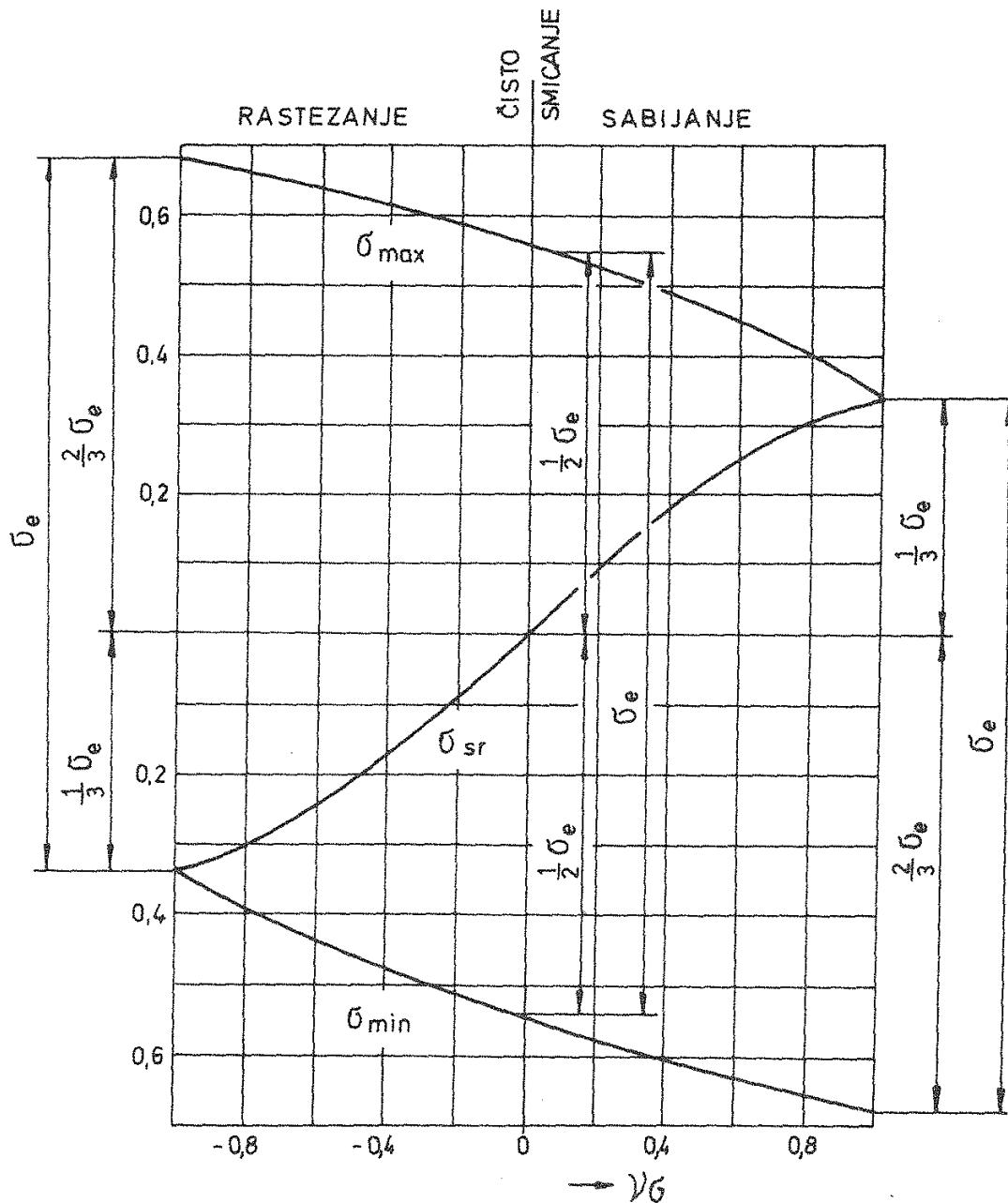
Slika 1.3. Šema devijatorskih komponenta

$$\sigma_{\max} = \sigma_e \frac{3 - \nu_{\sigma}}{3 + \nu_{\sigma}^2} + \sigma_{\text{sred}}$$

$$\sigma_{\min} = -\sigma_e \frac{3 + \nu_{\sigma}}{3 + \nu_{\sigma}^2} + \sigma_{\text{sred}} \quad (1.20)$$

$$\sigma_s = \sigma_e \frac{2 \nu_{\sigma}}{3 + \nu_{\sigma}^2} + \sigma_{\text{sred}}$$

Za devijatorsko naponsko stanje je $\sigma_{sred} = 0$ zbog čega svakoj vrednosti v_{σ} odgovara određena vrednost glavnih komponenta devijatora što je prikazano na tzv. "Z"-dijagramu na slici 1.4.



Slika 1.4. Prikaz devijatorskih komponenta u zavisnosti od koeficijenta v_{σ}

Kao što je već rečeno, šeme glavnih komponenta devijatora napona potpuno su identične sa šemama glavnih deformacija. Svaka šema komponenta de-

vijatora napona odgovara samo jednoj šemi deformacija. Ako je na primer u šemi glavnih komponenata jedan napon pozitivan a druga dva negativna onda je isto takva i šema deformacija. U pravcu pozitivne glavne komponente nastaju pozitivne deformacije; u pravcu maksimalne po apsolutnoj vrednosti negativne glavne komponente nastaje i maksimalna po apsolutnoj vrednosti negativna deformacija.

Pri dodavanju svernog tenzora (hidrostatički pritisak) na devijator, menja se šema glavnih napona, ali pokazatelj v_{σ} i karakterističan njegov odnos sa srednjim glavnim naponom i polusumama ekstremnih napona ne menja se. Ne menja se ni šema glavnih deformacija. Pokazatelji koji karakterišu deformabilnost i deformacioni otpor će se međjutim izmeniti.

Linearna šema rastezanja dobija se samo iz devijatora sa jednim zatežućim naponom i sa dva medjusobno jednaka pritiskujuća napona slika 1.3,1a. Ali se pomoću tog devijatora ne mogu dobiti zapreminske raznosmerne šeme sa dva zatežuća napona kao ni istosmerne šeme sa zatežućim naponima.

Linearna šema sabijanja dobija se samo iz devijatora sa jednim pritiskujućim i dva medjusobno jednaka zatežuća napona 3a (slika 1.3). Ali iz ovoga devijatora nije moguće dobiti zapreminske raznosmerne šeme sa dva pritiskujuća napona, niti ravne istosmerne šeme sa pritiskujućim naponima. Medjutim, ako bilo koje dve šeme glavnih napona formalno možemo smatrati istim, recimo svestrani neravnomerni pritisak, one po svojoj suštini u odnosu na izazvane deformacije u vezi sa odnosom veličina glavnih napona, ne mogu biti iste. Obrnuto, ako dve šeme glavnih napona imaju iste odnose napona, one ne mogu odgovarati različitim šemama glavnih deformacija. Tako na primer nije moguće ostvariti proces istiskivanja i zapreminskog sabijanja pri istom odnosu medju glavnim naponima.

U tabeli 1.1 data je razvijena šema glavnih napona i deformacija. Klasifikacija je sastavljena dodavanjem svernog tenzora na polazne šeme glavnih napona, koje su komponente devijatora. U ovoj tabeli date su veličine pokazatelja v_{σ} i naznačeni su znaci dodatnog svernog tenzora, date su šeme glavnih deformacija koje odgovaraju šemama glavnih napona. Pozitivni naponi i deformacije označeni su strelicama prema gore, negativni (sabijanje) strelicama na dole. Maksimalni glavni napon u šemama je postavljen na levoj strani, minimalni na desnoj i srednji napon σ_2 u sredini.

U svojstvu primera razmotri će se drugi vertikalni stupac (kolena). U njemu se nalaze naponske šeme od svestranog rastezanja do svestranog pritiska.

Tabela 1.1. - Razvijene šeme glavnih napona i glavnih deformacija

REDNI BROJ	NAZIV NAPONSKOG STANJA	RASTEZANJE OBIČNO	RASTEZANJE	SMICANJE	SABIJANJE	SABIJANJE OBIČNO
		$\nu\epsilon = -1$ $G_2 \leq \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$	$-1 < \nu\epsilon < 0$ $G_2 \leq \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$	$\nu\epsilon = 0$ $G_2 = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$	$0 < \nu\epsilon < 1$ $G_2 > \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$	$\nu\epsilon = 1$ $G_2 > \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$
1	ZAPREMINSKO ISTOSMERNO (SVESTRANO ZATEZANJE)					
2	RAVNO ISTOSMERNO (DVA ZATEŽUĆA)	NE POSTOJI		$G_e^* = \frac{2}{\sqrt{3}} G_e$ 		G_e
3	ZAPREMINSKO RAZNOSMERNO (DVA ZATEŽUĆA)	NE POSTOJI				$\frac{1}{3} G_e$ $-\frac{2}{3} G_e$
4	RAVNO RAZNOSMERNO I LINEARNO	G_e 		$\frac{1}{2} G_e$ $-\frac{1}{2} G_e$		 $-G_e$
5	ZAPREMINSKO RAZNOSMERNO (DVA PRITISKUJUĆA)	$\frac{2}{3} G_e$ $-\frac{1}{3} G_e$				NE POSTOJI
6	RAVNO ISTOSMERNO (DVA PRITISKUJUĆA)	 $-G_e$				NE POSTOJI
7	ZAPREMINSKO ISTOSMERNO (SVESTRANI PRITISAK)					

Medjutim, kod svih tih šema je jedan te isti devijator napona. Svim šemama napona te kolone odgovara samo jedna šema glavnih deformacija; za sve važi nejednakost

$$\sigma_2 < 0,5 (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \text{ i}$$

$$-1 < \nu_{\sigma} < 0.$$

Iz šema se lako može odrediti, koju veličinu svernog tenzora treba dodati da bi se prešlo od odgovarajućeg devijatora na posmatranu šemu. Na primer, da bi se od šeme čistog smicanja prešlo na zapreminsku šemu svestranog pritiska, potrebno je dodati negativni sverni tenzor veličine

$$|\sigma| > \frac{1}{2} \sigma_e^*.$$

Tabela 1.1. omogućava dobijanje odgovora na raznovrsna pitanja.

4. ZAKLJUČAK

Za prognozu ponašanja materijala u obradnom sistemu u smislu ispoljavanja potencijala deformabilnosti neophodno je putem konstrukcije obradnog sistema formirati takve naponske komponente i njihove odnose da omogućavaju najveće korišćenje potencijala deformabilnosti. Za svaki konkretan zahtev promene oblika postoji optimalno naponsko stanje koje omogućava materijalu ispoljavanje maksimalne deformabilnosti.

Veze naponskog i deformacionog stanja nisu jednoznačno određene, što značajno otežava optimalnu konstrukciju obradnog sistema.

Značajnu ulogu igra i nivo napona u kojima se vrši promena oblika, tj. kolika se vrednost svernog tenzora dodaje devijatorskom naponskom stanju.

Potrebno bi bilo posebno izučavanje uticaja svake naponske komponente u širokom dijapazonu mogućih vrednosti.

Odnosi naponskih komponentata i komponentata deformacija igraju posebno značajnu ulogu u ispoljavanju deformabilnosti materijala. To se pre svega odnosi na smerove i karaktere naponskih - odnosno, deformacionih komponentata. Od ovih činilaca veoma zavisi nastajanje i razvoj pukotina, pri čemu postoja- nje diskontinuiteta brzine tečenja metala, odnosno, raznosmerno tečenje, znatno ubrzavaju razvoj pukotine. Pukotine pre nastaju kod slobodnih nego kod prinudnih deformacija. Zbog svega ovoga za ocenu mogućnosti ispoljavanja deformabilnosti

u određenim uslovima potrebna je potpuna determinisanost ne samo naponskog već i deformacionog stanja. Svi ti elementi trebaju biti obuhvaćeni projektovanjem obradnog sistema, pri čemu se prognoza iskorišćenja potencijala deformabilnosti svodi na prognozu naponskih i deformacionih komponenata u tačkama zapremine zone deformisanja. U radu su razmatranja koncentrisana pre svega na uticaj naponskih komponenata, a komponente deformacija i posebno povezani uticaj naponskih i deformacionih komponenata na iskorišćenje deformabilnosti nije detaljnije razmatran.

LITERATURA

- [1] M.V.Storožev, E.A.Popov: Teorija obrabotki metalov davljenijem, Mašinstrojenje, Moskva, 1977.
- [2] Ohrimjenko M.JA. i dr.: Njeravnomjernost deformaciji pri kovke, Mašinstrojenje, Moskva, 1969.
- [3] V.Vujović: Istraživanje uticaja promene devijatorskog dela tenzora napona na obradivost materijala u procesima obrade deformisanjem. Tema u okviru projekta Teorijska i primenjena istraživanja tehnologije oblikovanja u industriji SAP Vojvodine, radjeno prema ugovoru broj 01-194/2 od 1980. godine za SIZ NVR.
- [4] V.Vujović: Stanje i perspektive razvoja obrade deformisanjem, Zbornik radova sa XIII savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, II knjiga, B.Luka, 1979.