

UNIVERZITET "VELJKO VLAHOVIĆ" U TITOGRAU  
METALURŠKI FAKULTET

MR MITAR MIŠOVIĆ, DIPL.ING.

"ISTRAŽIVANJE KRITERIJUMA STABILNOG TEČENJA  
METALA U PROCESU HLADNOG IZVLAČENJA ČELIČNIH ŠIPKI"

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

TITOGRAU, 1987.

## Z a h v a l j u j e m

Prof.dr Svetozaru Blečiću, na podršci, vodjenju  
i ostvarivanju uslova za realizaciju ovog rada,

Prof.dr Milojici Jaćimoviću, na pomoći oko račun-  
ske obrade rezultata rada,

Dušku Cvijanoviću, na pomoći oko račun-  
ske obrade rezultata rada,

Dr Radomiru Vukčeviću, na korisnim sugestijama,

Kolegama iz Vučionice čelika - Željezare "Boris  
Kidrič" Nikšić - I.Samardžiću, M.Tomanoviću i  
D.Otaševiću, na pomoći oko realizacije eksperimen-  
talnog rada,

Draganu Vidakoviću, za pomoć na tehničkoj obradi.

## S A D R Ž A J

	Strana
1. UVOD I POSTAVKA ZADATKA .....	1
2. TEORIJA OSNO-SIMETRIČNIH PROCESA .....	2
2.1 METOD LINIJA KLIZANJA .....	4
2.2 METOD KONAČNIH ELEMENATA .....	4
2.3 METOD "GORNJE" i "DONJE" GRANICE .....	5
2.4 METOD VIZIOPLASTIČNOSTI .....	6
3. PRIMJENA METODE VIZIOPLASTIČNOSTI .....	7
3.1 FORMIRANJE STATIČKI ODREĐJENOG ZADATKA .....	7
3.2 ODREĐJIVANJE KOMPONENATA BRZINA .....	9
3.3 ENERGETSKI USLOVI DEFORMACIJE .....	12
4. E K S P E R I M E N T A L N I D I O .....	16
4.1 PRIPREMA EKSPERIMENTA I IZBOR USLOVA MJERENJA ...	16
4.2 PLAN EKSPERIMENTA .....	18
4.3 MJERNI PARAMETRI .....	20
4.4 POLAZNI REZULTATI ISPITIVANJA .....	21
4.5 ANALIZA POLAZNIH REZULTATA .....	23
4.5.1 Profili zone deformacije .....	23
4.5.2 Brzine deformacije .....	27
4.5.3 Sila izvlačenja .....	28
4.5.4 Otpor metala deformaciji .....	30
4.6 MATEMATIČKI MODEL TEČENJA METALA .....	36
4.6.1 Postavka modela .....	36
4.6.2 Provjera modela .....	38
4.6.3 Uopštavanje modela .....	39
4.7 ANALIZA PROFILA ZONE DEFORMACIJE .....	67
4.7.1 Uticaj stepena deformacije .....	67
4.7.2 Uticaj polaznog prečnika .....	68

	Strana
4.8. KINETIČKI PARAMETRI PROCESA .....	72
4.8.1. Brzine pomjeranja .....	72
4.8.2. Brzine deformacije .....	90
4.8.3. Intenziteti brzina deformacija i deformacija .....	109
4.9. NAPONSKE KARAKTERISTIKE PROCESA .....	114
4.9.1. Analiza uticaja stepena deformacije na napone .....	116
4.9.2. Uticaj brzine deformacije .....	132
4.9.3. Uticaj sredstva za podmazivanje na napone .....	132
4.9.4. Uticaj polaznog prečnika na napone .....	133
4.9.5. Promjena otpora metala deformaciji .....	133
4.10. ENERGETSKI USLOVI DEFORMACIJE .....	133
5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....	146
6. L I T E R A T U R A .....	152

## 1. UVOD I POSTAVKA ZADATKA

Poznavanje mehanike procesa deformacije ocjena konačnih mehaničkih osobina, ocjena vjerovatnoće pojave unutrašnjih i spoljašnjih pukotina, identifikacija zona visokih koncentracija napona i deformacija, pravilna konstrukcija alata i dr. su osnovni zahtjevi koji se postavljaju pri analizi procesa plastične prerade metala.

Premda teorija plastičnosti pruža dovoljan broj nezavisnih jednačina za rješavanje postavljenih zadataka, teško je dobiti zadovoljavajuća rješenja koja odgovaraju statičkim i kinematskim uslovima realnog procesa deformacije. Ograničenja povezana sa tačnošću definisanja ponašanja metala i uslovima trenja dovode do toga da se sva rješenja dobiju kao približno tačna.

Proces izvlačenja kroz koničnu matricu, bez obzira na jednostavnost, pripada grupi procesa za koje u literaturi ne postoje tačna rješenja kinetike tečenja [1]. Uvijek je neophodno uvesti znatne aproksimacije i uprošćenja koje zadatak i rješenja prevode u parcijalne slučajeve. Danas se, zahvaljujući mogućnostima izvodjenja proračuna, i sveobuhvatnom pristupu na osnovu energetske uslova deformacije sve više napreduje u ovoj oblasti, kako sa teorijskog tako i sa eksperimentalnog aspekta. Polazni korak u ovakvim ispitivanjima je dobijanje što potpunije informacije o deformacijama, a zatim koristeći neki od pristupa, formirati potpunu sliku o procesu sa svim navedenim veličinama. Na osnovu izloženog koncepta je proizašao i cilj ovog rada: detaljno opisivanje uslova i kinetike tečenja pri hladnom izvlačenju čeličnih šipki. Posebno posvećujući pažnju obradi eksperimentalnih rezultata i zakonitostima njihove promjene biće prikazan matematički model tečenja. Model omogućava definisanje kinetičkih parametara, napona i energetske uslova u zoni deformacije kao i analizu uticajnih parametara na navedene veličine.

## 2. TEORIJA OSNO-SIMETRIČNIH PROCESA

Osnovni polaz pri definisanju uslova deformacije je posmatranje metala kao kruto-plastičnog tijela koji ojačava u procesu deformacije. Izvođenje jednačina ravnoteže je, pored toga praćeno sljedećim postavkama:

- hidrostatički pritisak ne utiče na plastično stanje, kako je to i eksperimentalno potvrđeno [2,3];
- treći invarijant devijatora napona se može zanemariti kao beskonačno mala višeg reda pa se naponsko i deformaciono stanje može opisati jednačinama Levy-Misesa za kruto-plastično tijelo.

U uslovima osne simetrije napona, u cilindričnom sistemu koordinata sa z-osom simetrije, komponente napona su:

$\sigma_r$  - radijalni napon,  $\sigma_z$  - osni napon,  $\sigma_\phi$  - ugaoni napon i  $\tau_{zr}$  - tangencijalni napon.

Komponente brzine su  $V_r$  - normalna komponenta na osu simetrije i  $V_z$  - komponenta u pravcu ose simetrije. Sve komponente napona i brzina su funkcije koordinata  $r$ ,  $z$  i vremena.

Ako se, uz navedene postavke, zanemare inercione sile jednačine ravnoteže napona imaju oblik:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} = 0. \quad (2)$$

Kriterijum tečenja Misesa se može prikazati jednačinom

$$(\sigma_r - \sigma_r)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{zr}^2 = 2K_f. \quad (3)$$

Zavisnost napona i brzina deformacije označenih sa  $\dot{\epsilon}$  i indeksom kao kod napona, po jednačinama Levy-Misesa, se mogu prikazati kao:

$$\dot{\epsilon}_r = \dot{\lambda} (2\sigma_r - \sigma_\phi - \sigma_z), \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_z = \dot{\lambda} (2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\phi), \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_\phi = \dot{\lambda} (2\sigma_\phi - \sigma_r - \sigma_z), \quad (6)$$

$$\dot{\gamma}_{zr} = 3\dot{\lambda}\tau_{zr}. \quad (7)$$

Ako plastična oblast uključuje konačnu dužinu ose simetrije može se pri zanemarivanju beskonačno malih višeg reda, uzeti da je  $\sigma_r = \sigma_\phi = 0$  za  $r=0$ , odnosno osa simetrije predstavlja pravac glavnih napona.

Jednačine (1-7) sadrže sedam nepoznatih veličina i to: 4-komponente napona, 2-komponente brzina i modul  $\dot{\lambda}$ , pa se problem njihovog rešavanja može posmatrati kao statički odredjen. Medjutim, kako postoje samo tri jednačine za napone to se četvrta mora formirati iz jednačina (4-7) preko odgovarajućih parcijalnih izvoda, tako da je uopšteno problem statički neodredjen.

Osnosimetrična deformacija se često poistovjećuje sa ravnoosnom deformacijom na račun istog broja koordinata. Ova dva naponska stanja se mogu poistovjetiti samo u slučaju kada je koordinata  $r$  dovoljno velika da komponenta brzine  $\dot{\epsilon}_\phi$  postane zanemarljivo mala. Odredjivanje nepoznatih veličina u izvedenim jednačinama može se vršiti različitim metodama. Pregled metoda i njihova analiza sa stanovišta rezultata su dovoljno poznati pa će ovdje biti prikazani samo radovi koji se odnose na proces izvlačenja.

## 2.1. METOD LINIJA KLIZANJA

Izvlačenje u uslovima ravanske šeme napona je prikazano mrežom linija klizanja u radovima Hilla [4]. Ovakvo polje linija klizanja je razvijeno i korišćeno za konstrukciju matrice geometrijskim odredjivanjem trajektorije tečenja metala ka kontaktnoj površini sa matricom. Veliki broj radova iz ove oblasti je dat kao provjera bilo preko osobina metala bilo deformacijom modela [5-10].

Dobijanje uopštenog polja linija klizanja kroz matricu sa različitim profilom se pokazalo dosta složeno pošto treba zadovoljiti veliki broj graničnih uslova. Čisto grafička konstrukcija po metodi "proba-greška" ne omogućava zadovoljenje uslova profila matrice. Zbog toga se prešlo na matično rešavanje polja karakteristika [11-13]. Medjutim, ovakav način zahtijeva linearizaciju uslova koji prestaju da važe pri postojanju trenja na graničnim površinama.

Uvodjenjem dvo-centrirane mreže linija klizanja je nastavljeno ispitivanje pojedinih parametara procesa izvlačenje [14-19] u uslovima ograničenog stepena deformacije.

U svim slučajevima se razmatra ravansko naponsko stanje pa približna rešenja postaju grubo aproksimativna u uslovima velikih ugaonih deformacija.

## 2.2. METOD KONAČNIH ELEMENATA

Najveći broj radova kod kojih se primjenjuje metod konačnih elemenata za opisivanje plastične deformacije je skorijeg datuma. Odredjivanje polja brzina koje zadovoljavaju minimum ukupne energije pri kretanju elementa konačne dužine u plastičnoj oblasti je dato u radovima [20-23].

Pored navedenog minimuma kao uslova za dobijanje polja brzina metod podrazumijeva i dobijanje mogućeg polja napona koji odgovara maksimumu ukupne energije. Ovakvom postavkom metod konačnih elemenata se prevodi u metod "gornje" i "donje" granice.

Uočene teškoće povezane sa sabiranjem greške u izvornom modelu metoda konačnih elemenata su prevaziđene prelaskom sa diferencijalnih na konačne deformacije. Na taj način je razlika između navedenih metoda praktično prevaziđena [ 24 ] . Koristeći ovakav pristup vršena je uspješna analiza o čemu svjedoče i brojne publikacije primijenjene na osnosimetrične procese [ 24-34 ] .

Osnovna teškoća u definisanju polja napona je neophodnost uzimanja u obzir velikog broja ograničavajućih faktora, a u definisanju polja brzina, odnosno pomjeranja, veliki stepen slobode, što pruža mogućnost dobijanja različitih rezultata.

### 2.3. METOD "GORNJE" I "DONJE" GRANICE

Bez obzira na navedene teškoće u definisanju polja brzina kod određivanja minimuma energije ili polja napona koje obezbeđuje maksimum energije ovaj metod se široko koristi za izučavanje procesa osno-simetrične deformacije [ 35-38 ] . Budući da je polje napona ograničeno uslovima ravnoteže napona i uslovima plastičnosti to se definisanje polja brzina primjenjuje znatno više. Po mišljenju nekih autora ovaj metod je najperspektivnije za teorijsko izučavanje izvlačenja [ 1 ] . Osnovni razlozi za takav tretman je pristupačnost u pretpostavkama polja brzina i mogućnost korišćenja rezultata drugih metoda kao, na primjer, metode konačnih elemenata, metode konačnih razlika [ 5, 35 ] i metode vizioplastičnosti.

Medjutim, treba istaći da se pretpostavkama i uvodjenjem sve komplikovanih polja brzina zanemaruju fizički uslovi deformacije što pokazuju i eksperimentalne provjere veličina proračunatih na osnovu pretpostavljenog polja brzina. Pri jednostavnijim poljima brzina, greška u proračunu mjernih veličina je znatna.

#### 2.4. METOD VIZIOPLASTIČNOSTI

Na bazi postavki o meridijalnoj ravni u uslovima osne simetrije napona razvio se metod eksperimentalnog odredjivanja polja tečenja i brzina deformacije. Ovakva eksperimentalna metoda je istaknuta u radu [39], a zatim prihvaćena i korišćena od strane velikog broja istraživača [40, 41, 1,5]. Suština metode je da se nanošenjem mreže na meridijalnoj ravni i etapnom praćenju pomjeranja čvornih tačaka pri malim stepenima deformacije može formirati slika o tečenju metala i kinetici tečenja.

Nedostatak metoda je složenost eksperimenta i ograničena tačnost na račun očitavanja veoma malih vrijednosti pomjeranja.

I pored navedenog nedostatka opšte je prihvaćeno da predstavlja najbolji metod formiranja slike tečenja metala, u uslovima osne simetrije napona, a samim tim i odredjivanja ostalih parametara procesa. Zbog toga je u ovom radu usvojen kao optimalni za dobijanje podataka i analizu navedenog opsega istraživanja.

### 3. PRIMJENA METODE VIZIOPLASTIČNOSTI

U teoriji osno-simetričnih procesa je istaknuto da je zadatak proračuna potrebnih veličina statički određen ukoliko se komponente napona izraze preko parcijalnih izvoda odgovarajućih brzina. Na osnovu rada va Hilla može se zaključiti da je takvo rešavanje moguće budući da parcijalne jednačine nijesu hiperboličkog tipa [4].

Tačnost dobijenih rešenja se, na taj način, poistovjećuje sa tačnošću određivanja polja brzina. Pri korišćenju metode vizioplastičnosti tačnost je određena eksperimentalnim mogućnostima očitavanja položaja čvornih tačaka i može biti dovedena na zadovoljavajući nivo.

#### 3.1. FORMIRANJE STATIČKI ODREĐENOG ZADATKA

Poznavanjem pomjeranja čvornih tačaka duž zone deformacije može se formirati slika o tečenju metala, a zatim jednostavnim proračunima definisati kinetička tečenja, odnosno stvoriti osnova za opisivanje napona i energetskih uslova deformacije.

Formiranje zatvorenog sistema jednačina se vrši odgovarajućim transformacijama. Ako se hidrostatički pritisak označi sa  $\sigma_{sr}$ , onda se jednačine (4-7) mogu prevesti u oblik:

$$\sigma_r = \frac{2}{3} \frac{K_f}{\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}_r + \sigma_{sr} \quad (4a)$$

$$\sigma_z = \frac{2}{3} \frac{K_f}{\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}_z + \sigma_{sr} \quad (5a)$$

$$\sigma_\phi = \frac{2}{3} \frac{K_f}{\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}_\phi + \sigma_{sr} \quad (6a)$$

$$\tau_{zr} = \frac{1}{3} \frac{K_f}{\dot{\epsilon}} \dot{\gamma}_{zr} \quad (7a)$$

Provjera jednačine (4a-7a) se može vršiti preko zakona stalnosti zapremine. Modul plastičnosti  $\lambda$  je u jednačinama predstavljen odnosom intenziteta brzina deformacije  $\dot{\bar{\epsilon}}$  i intenziteta napona izraženog preko otpora metala deformaciji  $K_f$ .

Oduzimanjem odgovarajućih jednačine se formiraju razlike napona i eliminiše hidrostatički pritisak:

$$\sigma_z - \sigma_r = \frac{2}{3} \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r), \quad (8)$$

$$\sigma_r - \sigma_\phi = \frac{2}{3} \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} (\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\phi), \quad (9)$$

$$\sigma_\phi - \sigma_z = \frac{2}{3} \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} (\dot{\epsilon}_\phi - \dot{\epsilon}_z), \quad (10)$$

$$\tau_{zr} = \frac{1}{3} \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} \dot{\gamma}_{zr}. \quad (11)$$

Jednačine (8 - 11) moraju da zadovoljavaju intenzitet napona iz uslova identiteta. Odgovarajućim diferenciranjem po promenljivim  $r$  i  $z$  i zamjenom u jednačine (1) i (2) se dobijaju diferencijalne komponente napona:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = -\frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} \dot{\gamma}_{zr} \right) - \frac{1}{3} \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} \cdot \frac{\dot{\gamma}_{zr}}{r}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r) \right) + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \sigma_\phi}{\partial r} = -\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} (\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\phi) \right) + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -\frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} \dot{\gamma}_{zr} \right) - \frac{1}{3} \frac{K_f}{\dot{\bar{\epsilon}}} \cdot \frac{\dot{\gamma}_{zr}}{r}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial z} = -\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_f}{\bar{\epsilon}} (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r) \right) + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \sigma_\phi}{\partial z} = \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_f}{\bar{\epsilon}} (\dot{\epsilon}_\phi - \dot{\epsilon}_z) \right) + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} = \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{K_f}{\bar{\epsilon}} \dot{\gamma}_{zr} \right), \quad (18)$$

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} = \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_f}{\bar{\epsilon}} \dot{\gamma}_{zr} \right), \quad (19)$$

koji je potrebno riješiti na osnovu početnih i graničnih uslova da bi se dobile komponente napona.

### 3.2. ODREDJIVANJE KOMPONENATA BRZINA

Postupak eksperimentalnog odredjivanja polja brzina se sastoji u tome da se uzorak podijeli po osnovj ravni na dva jednaka dijela. Na pripremljenoj meridijalnoj ravni se nanosi koordinatna mreža a zatim polovine spajaju u kompaktan uzorak, slika 1. Uzorak se deformiše parcijalnim stepenima deformacije do konačnih dimenzija i poslije svakog stepena vrši fotografisanje mreže. Tako se formira polje čvorova od ulaza do izlaza iz zone deformacije. Upoređivanjem sa osnovnom mrežom se određuju veličine pomjeranja u pravcu koordinata  $r$  i  $z$  u odgovarajućem vremenskom intervalu. Na osnovu pomjeranja i vremena proračunavaju se brzine po relacijama:

$$v_r = \frac{\Delta r}{\Delta \tau}, \quad v_z = \frac{\Delta z}{\Delta \tau}, \quad (20)$$

i brzine deformacije

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad \dot{\epsilon}_\phi = -(\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_z), \quad \dot{\gamma}_{zr} = \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r}. \quad (21).$$

Tačnost odredjivanja polja brzina zavisi od koraka osnovne koordinatne mreže, tačnosti geometrijskog nanošenja čvorova, tačnosti očitavanja položaja čvorova, tačnosti formiranja slike ukupnog procesa na osnovu parcijalnih deformacija.

Uzimajući da je greška u svakoj fazi aditivna veličine brzina se mogu dobiti bitno različite od stvarnih. Posebne teškoće u primjeni metode stvaraju mogućnosti smicanja po meridijalnoj ravni čime se gubi nanese-na rasterska mreža. Takođe, pojedine specifičnosti procesa izlučenja mogu izazvati teškoće u zadržavanju rasterske mreže.

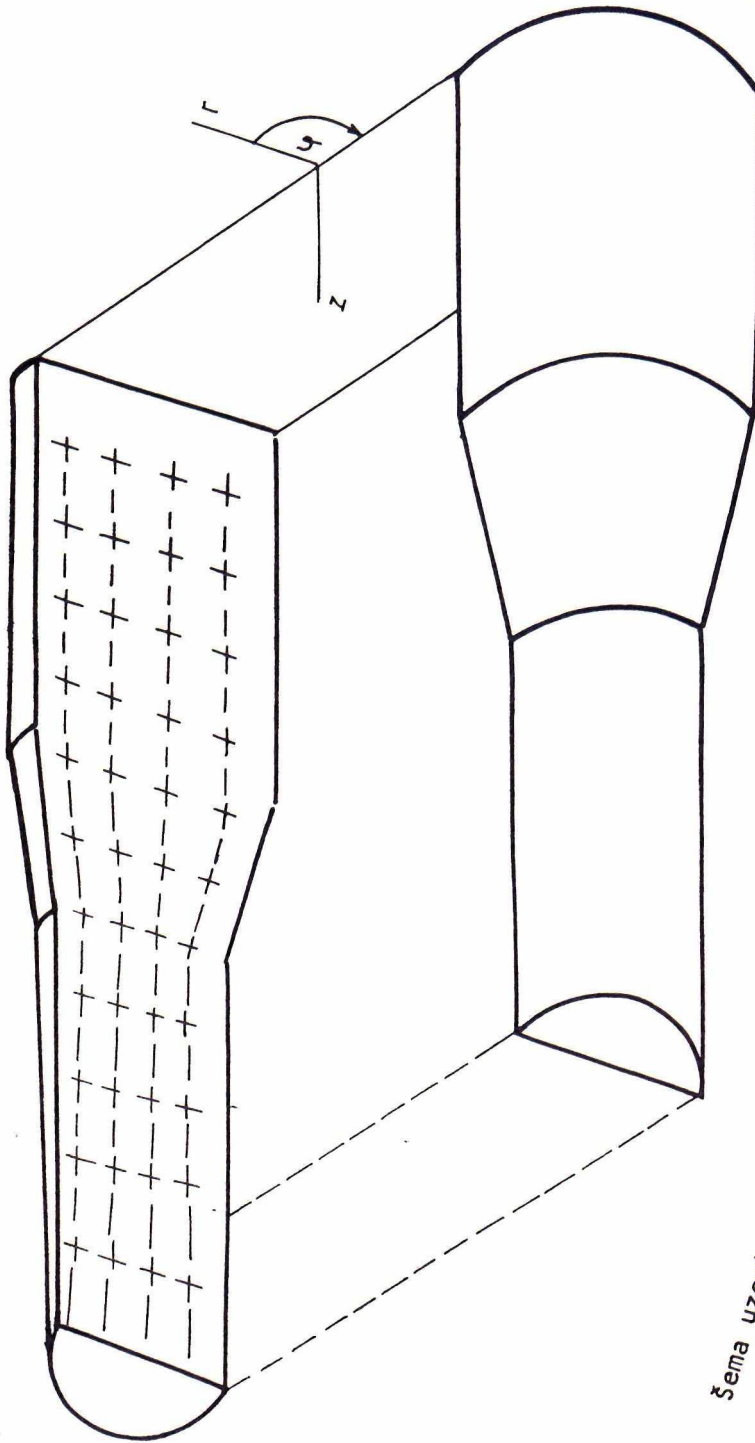
Komponente brzina mogu biti odredjene, pored navedenog i analitički iz uslova stalnosti zapremine, tj. rešavanjem diferencijalne jednačine:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0. \quad (22)$$

Ukoliko se zanemari uticaj trenja na kontaktnim površinama metala i alata dobija se geometrijski odnos između brzina odredjen kretanjem elementarne čestice duž neke od ravni konusa formiranog oblikom matrice, čiji se tjeme nalazi na konačnoj dužini osi simetrije. Dobijena rešenja za idealno plastičan materijal i idealnu geometriju alata i komada su tačna duž ose simetrije. Ovo je potvrđeno u radovima [42, 43, 44].

Pored analitički dobijenog polja brzina, za primjenu analiziranih metoda usvaja se sferično polje brzina sa dvije površine diskontinuiteta: ulaz i izlaz iz zone deformacije. Duž zone deformacije zadržava se kao i u prethodnom, geometrijska interpretacija kretanja čestice [1].

Od polaznog pristupa metoda vizioplastičnosti se nije mijenjala, međutim, vršeno je njeno usavršavanje i optimizacija. Usavršavanje se, uglavnom, odnosi na skraćivanje postupka od izrade uzorka do dobijanja konačnih



SI.1. Šema uzorka primijenjenog za metodu viziooplastičnosti.

podataka (npr. primjenom specijalnih alata, automatizacijom očitavanja položaja tačaka korišćenjem precizne mjerne tehnike itd.). Optimizacija metode je vršena po osnovu skraćenja eksperimentalnog dijela i korišćenja metode "fitovanja" za određivanje položaja čvorova na osnovu trajektorije koja se ocijeni kao najsloženija | 45 | .

### 3.3. ENERGETSKI USLOVI DEFORMACIJE

Bilans energije procesa izvlačenja predstavlja osnovu najvećeg dijela citiranih radova kod metode konačnih elemenata, konačnih razlika i granica. Kako je već navedeno, polje brzina treba da zadovolji energetske uslove deformacije. Jednačina koja ih povezuje ima oblik:

$$W_s = \int_V K_f \epsilon \, dv + \int_F (K_f / \sqrt{3}) \Delta V \, dF + \int_F (m K_f / \sqrt{3}) \Delta V^* \, ds, \quad (23)$$

gdje prvi član predstavlja čistu energiju deformacije, drugi član energiju utrošenu na smicanje po površini F na kojoj nastaje diskontinuitet u kretanju izražen razlikom brzine  $\Delta V$  i uslovima maksimalnog smičućeg napona  $K_f / \sqrt{3}$ , treći član predstavlja energiju utrošenu na savladjivanje sila trenja, pri brzini klizanja  $\Delta V^*$ , na kontaktnoj površini metal-alat.

Koristeći jednačinu (23) vršena je analiza različitih karakteristika procesa izvlačenja a u tom smislu i graničnih uslova deformacije. Eksperimentalna provjera npr. pojave unutrašnjih grešaka je pokazala da je neophodno uzeti u obzir deformaciono ojačavanje jer samo u tim uslovima se može proces detaljno istraživati, a naročito definisati granice | 40, 46, 47 |.

U ovom radu je, prema mogućnostima izabrane metode, izvršena analiza energetskih uslova na sljedeći način:

- Energija potrebna za deformaciju kruto-plastičnog metala koji ojačava po eksperimentalno utvrđenom zakonu se može proračunati iz relacije:

$$W_d = \iiint_V K_f \dot{\epsilon} dv; \quad (24)$$

- Energija potrebna za deformaciju smicanja, usljed promjene pravca vektora brzina, na ulazu i izlazu iz zone deformacije je određen iz uslova:

$$W_{su} = \iint_{Fu} \frac{K_{fu} \cdot V_{Ru}}{\sqrt{3}} dFu \quad (25)$$

na ulazu i

$$W_{si} = \iint_{Fi} \frac{K_{fi} \cdot V_{Ri}}{\sqrt{3}} dFi \quad (26)$$

na izlazu iz zone deformacije;

- Energija potrebna za savladjivanje sila trenja na kontaktnoj površini je određen iz uslova:

$$W_{tr} = \iint_{F_k} \frac{mK_f}{\sqrt{3}} V_{uz} dF_k. \quad (27)$$

Proračun energija smicanja zahtijeva tačno poznavanje oblika ulazne i izlazne površine. Kako je u ovom eksperimentu bilo nemoguće tačno odrediti položaj ulazne i izlazne površine na kojima počinje i završava se plastična deformacija to je usvojeno da one odgovaraju geometrijskim površinama ulaza i izlaza iz zone deformacije. Na taj način je olakšano definisanje graničnih uslova pri rešavanju diferencijalnih jednačina napona bez unošenja velike greške u proračunu energije deformacije.

Energija potrebna za određivanje sila trenja je formirana na bazi uslova trenja klizanja po kontaktnoj površini i zahtijeva poznavanje koeficijenta  $m$ , koji sadrži koeficijent trenja i udio tangencijalnog napona trenja i intenziteta napona, izraženim otporom metala deformaciji. Ako se usvoji konstantna vrijednost koeficijenta  $m$  onda se on može odrediti iz ostalih

mjernih parametara procesa. Mogućnosti metodologija određivanja trenja metodom konačnih elemenata za uslove presovanja po programu FEDA je data u radovima [ 48 i 49 ].

Ovdje je usvojena takva metodologija s tim što je koeficijent trenja posmatran kao konstantan.

Naime, koeficijent  $m$  je određen iz uslova (23) prevedenog na jednakost. Vrijednost ukupno dovedene energije  $W_s$  je određena na osnovu stacionarne brzine izlaska metala iz zone deformacije i izmjerene vrijednosti sile izvlačenja po izrazu

$$W_s = F \cdot V_{zISR'} \quad (28)$$

gdje je:

$V_{zISR}$  - srednja osna brzina izlaznog poprečnog presjeka;

$F$  - sila izvlačenja.

Na taj način bilans energije, prema navedenom, može da se prikaže jednačinom:

$$F \cdot V_{zISR} = \iiint_V K_f(r, z) \dot{\epsilon}(r, z) dv + \iint_{Fu} \frac{K_f(r) \cdot V_{ru}(r)}{\sqrt{3}} dFu + \iint_{Fi} \frac{K_f(r) V_{Ri}(r)}{\sqrt{3}} dFi + m \iint_{Sk} \frac{K_f(r=R_o, z) \cdot V_{uz}(r=R_o, z)}{\sqrt{3}} dSk \quad (29)$$

Budući da proračun omogućava dobijanje svake stavke u jednačini (29) moguće je odrediti vrijednost koeficijenta  $m$  kao:

$$m = \frac{F \cdot V_{zISR} - \left( \iiint_V K_f \dot{\epsilon} dv + \iint_{Fu} \frac{K_f \cdot V_{Ru}}{\sqrt{3}} dFu + \iint_{Fi} \frac{K_f \cdot V_{Ri}}{\sqrt{3}} dFi \right)}{\iint_{Sk} \frac{K_f V_{uz}}{\sqrt{3}} dSk}, \quad (30)$$

i koeficijenta trenja iz koeficijenta  $m$ :

$$f = \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \quad (31)$$

Uzimajući kao gubitak pri deformaciji kruto-plastičnog tijela energiju utrošenu na savladjivanje sila trenja može se odrediti efikasnost procesa izvlačenja izražena koeficijentom iskorišćenja energije.

$$\eta = \frac{\iiint V K_f \cdot \dot{\epsilon} \, dv + \iint_{Fu} \frac{K_f \cdot V_{ru}}{\sqrt{3}} \, dFu + \iint_{Fi} \frac{K_f \cdot V_{Ri}}{\sqrt{3}} \, dFi}{F \cdot V_{uzsr}} \quad (32)$$

Osnovna teškoća u potpunom opisu procesa izvlačenja, koja je izložena, je definisanje otpora metala deformaciji. U radu je njegova vrijednost određena preko jednostavnih pokazatelja dobijenih u procesu zatezanja pritiskivanja i tvrdoće.

## 4. E K S P E R I M E N T A L N I D I O

### 4.1. PRIPREMA EKSPERIMENTA I IZBOR USLOVA MJERENJA

Za predvidjena istraživanja su uzeti uzorci mjerne dužine 600 mm, koji su glodanjem skinuti na polovinu poprečnog presjeka sa maksimalnom tačnošću. Meridijalne ravni dobijenih uzoraka su fino brušene i polirane, a zatim na njih nanešena koordinatna mreža. Pri izboru mreže pošlo se od rastera nanešenog na fotoemuliziju sa gustinom od 60 linija po kvadratnom santimetru. Međutim, zbog navedenog smicanja po meridijalnoj ravni kao i uočenog formiranja oblika čaše koja se manifestuje u centralnom dijelu uzorka i na znatnom odstojanju od ose, raster nije bio stabilan već se gubio čak i pri malim stepenima deformacije. Zbog toga se odustalo od nanošenja emulzije i primijenjena je stabilna elektrohemijski nanešena mreža, sa korakom od 1 mm u cik-cak rasporedu. Ovako nanešena mreža je ostala stabilna pri svim uslovima deformacije.

Primjena metode vizioplastičnosti podrazumijeva etapnu deformaciju i fotografisanje mreže poslije svake etape. Izvršena serija mjerenja na industrijskoj mašini za izvlačenje sa malim stepenima deformacija do konačnih dimenzija je pokazala znatno odstupanje profila koordinatne mreže od profila dobijenog u jednom izvlačenju do konačnih dimenzija. Pored toga, krivljenje usljed zaostalih napona je onemogućavalo nastavak, zbog nemogućnosti ponovnog sastavljanja formiranih polovina u kompaktni uzorak. Ova dva nedostatka, od kojih je prvi suštinski, su dovela do toga da se odustane od parcijalne deformacije.

Znači, eksperiment je morao biti organizovan tako da se formiraju uslovi za prekidanje procesa na određenoj dužini, kako bi se zadržao pro-

fil zone deformacije u obliku kakav egzistira u stacionarnom stadijumu izvlačenja. Dopunski faktori za ovakav način ispitivanja su izbjegavanje inercionog kretanja poslije zaustavljanja, koje bi formiralo pogrešnu sliku o položaju čvorova, i neophodna visoka snaga uredjaja, da bi se obezbijedilo izvlačenje dimenzija većeg poprečnog presjeka.

Zbog toga se pristupilo konstrukciji sopstvene aparature za izvodjenje eksperimenta. Aparatura je prilagodjena montaži na presi za duboko izvlačenje limova koja ima potrebnu snagu i preciznu regulaciju kretanja i zaustavljanja, čime su zadovoljeni navedeni faktori, kao i pouzdan sistem mjerenja sile, i time je izbjegnuta konstrukcija posebne aparature za mjerenje sile. Pošto su korišćeni uzorci predhodno toplo-valjani, aparatura je snabdjevena djelovima za djelimično sprečavanje krivljenja, zbog ograničene dimenzione tačnosti toplo-valjanih šipki i njihovog uticaja na tačnost izvlačenja. Ujedno je obezbijedjena mogućnost skidanja matrice sa uzorka u povratnom hodu pokretnog dijela aparature, tako da se profil zone u potpunosti zadržavao.

Ograničenje koje je stvoreno pri radu sa ovakvom aparaturom je mjerna dužina izvlačenja koja je maksimalno iznosila 100 mm. Uporedjivanjem konačno formiranih položaja tačaka i vrijednosti izmjerene sile sa rezultatima dobijenim na industrijskoj mašini je potvrđeno da navedena mjerna dužina nije ograničavajući faktor dobijanju tačnih rezultata. S druge strane, korišćenje malih dužina je povoljno zbog krivljenja usljed zaostalih napona koje je, u ovom eksperimentu, bilo ograničeno najvećim dijelom na zašiljeni nedeformisani dio uzorka gdje se trajno formira petlja, i to u toku samog procesa izvlačenja. Krivljenje na izlazu iz zone deformacije je neznatno dok profil zone ostaje u potpunosti očuvan.

Šema aparature je prikazana na slici 2.

Svi eksperimenti su vršeni sa matricama kakve se koriste u proizvodnji. Očitavanje položaja tačaka sa formiranog profila zone deformacije je neophodno bilo urediti uslove za postizanje zadovoljavajuće tačnosti. Ovdje



je, takodje, izvršena serija eksperimenata sa izborom načina očitavanja i potrebnog uvećanja. Usvojeno je da se profil zone deformacije prenese na mikrofilm, a zatim sa mikrofilma izvrši očitavanje pri uvećanju 20 i 30 x. Manja uvećanja nijesu pružala dovoljnu tačnost očitavanja minimalnog pomjeranja dok se kod većih stvarala teškoća tačnog očitavanja centra čvora. Pri tačnosti očitavanja 0,5 mm, koji je moguće bilo postići, minimalna vrijednost pomjeranja koja se može identifikovati iznosi 0.025 mm, što u odnosu na korak mreže iznosi 2,5%.

#### 4.2. PLAN EKSPERIMENTA

Za ispitivanje su uzeta tri čelika čiji su: hemijski sastav, prethodni tretman i dimenziona struktura prikazani u tabeli 1.

Odredjivanje profila zone deformacije, veličina pomjeranja i kinetičkih veličina je vršeno prema planu prikazanom u tabeli 2.

U tabeli 2 brojne oznake za uticajne parametre predstavljaju:

##### SREDSTVO ZA PODMAZIVANJE

- 1 - obično mašinsko ulje,
- 2 - sintetički vosak,
- 3 - sintetički parafin,
- 4 - kreč + ulje.

##### BRZINA IZVLAČENJA (KAO ULAZNA BRZINA U ZONU DEFORMACIJE)

- 1 - 0.3333
- 2 - 0.666.

##### USLOVI DEFORMACIJE IZRAŽENI REDUKCIJOM POPREČNOG PRESJEKA I PREDHODNOM REDUKCIJOM:

- 1 - redukcija nominalnog prečnika za 1 mm,
- 2 - redukcija dobijenog uzorka iz uslova 1 za 1 mm,
- 3 - redukcija dobijenog uzorka iz uslova 2 za 1 mm,
- 4 - redukcija nominalnog prečnika za 3 mm,
- 5 - redukcija nominalnog prečnika za 2 mm,
- 6 - redukcija dobijenog uzorka iz uslova 5 za 1 mm,
- 7 - redukcija nominalnog prečnika za 0,5 mm.

Tabela 1. Hemijski sastav, prehodni tretman i dimenziona struktura ispitivanih čelika

Oznaka	H e m i j s k i s a s t a v						Prehodni tretman	Oblik i dimenzije		
	C	Si	Mn	PiS	Cr	Mo				
Č.1220	0.12/0.18	0.15/0.30	0.25/0.5	0.045	-	-	Toplo valjanje	16,	32,	42
Č.4120	0.12/0.18	0.15/0.30	0.4/0.6	0.035	0.5/0.8		-luženje	16,	32,	42
Č.4721	0.18/0.23	0.15/0.35	0.9/1.2	0.035	0.9/1.4	0.2/0.3	"	16,	32,	42

Tabela 2. Plan ispitivanja uzoraka

Nominalni prečnik mm	Sredstvo za podmazivanje				Brzina, m/s		Uslovi deformacije izraženi redukcijom popreč.presj.						
	1	2	3	4	1	2	1	2	3	4	5	6	7
16	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
32	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
42	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

U svim slučajevima ugao matrice je bio konstantan i iznosio je  $\alpha/2=0.157$  rad.

Otpor metala deformaciji je određen na osnovu laboratorijskih ispitivanja metodom zatezanja, pritiskivanja i mjerenja tvrdoće. Krive tečenja pri zatezanju i pritiskivanju su formirane na osnovu tačaka početka plastičnog tečenja uzoraka predhodno deformisanih izvlačenjem sa odgovarajućim stepenom deformacije. Polazna vrijednost otpora je određena na uzorcima polaznog materijala. Provjera uslova ojačavanja duž zone deformacije je vršena na osnovu analogije dijagrama tvrdoće HRB u deformisanim uzorcima i tvrdoće duž zone deformacije.

#### 4.3. MJERNI PARAMETRI

Već je istaknuta metodologija određivanja profila zone deformacije na osnovu položaja čvornih tačaka i  $r$ - $z$ -koordinatnom sistemu.

Položaj tačaka, odnosno koordinate tačaka, su očitavane od presjeka  $(0, r)$  na kojem, sa navedenom tačnošću, nije uočeno pomjeranje do izlaznog dijela zone deformacije, tj. presjeka  $(z, r)$  na kojem je formirana konačna slika profila mreže. Parovi koordinata  $(r, z)$  su na osnovu uvećanja i polaznog rastojanja između čvorova preračunati na odgovarajuće vrijednosti priraštaja  $r(r, z)$  i  $z(r, z)$ . Na osnovu mjerenja vremena prelaska konstantnog rastojanja, označenog repnim tačkama na uzorku i aparaturi, prije ulaska u zonu deformacije je formirana vremenska osa u saglasnosti sa korakom polazne mreže duž ose simetrije. Tako su dobijeni eksperimentalni podaci za proračun brzina datih jednačinom (20). U procesu izvlačenja je mjerena sila izvlačenja, očitavanjem sa odgovarajućeg manometra i snimanjem signala sile na pisaču.

Pri skidanju matrice sa uzorka mjerena je vrijednost potrebne sile koja je takodje snimana na pisaču.

Pokušalo se mjeriti temperatura metala prije ulaza i na izlazu iz zone deformacije, međutim, pošto nije bilo moguće njeno kontinuirano praćenje odustalo se od daljeg mjerenja. Mada je mjerenje vršeno termoparom sa digitalnim očitavanjem, pokazalo se da je vrijeme od zaustavljanja procesa do mjerenja dugo za zadovoljavajuću tačnost.

#### 4.4. POLAZNI REZULTATI ISPITIVANJA

Opis procesa izvlačenja je analogan za sve ispitivane uzorke, zbog toga će rezultati biti detaljno prikazani na pojedinačnim uzorcima, dok će se u poglavlju analize uticajnih parametara prikazati uočene specifičnosti za sve ispitivane uzorke.

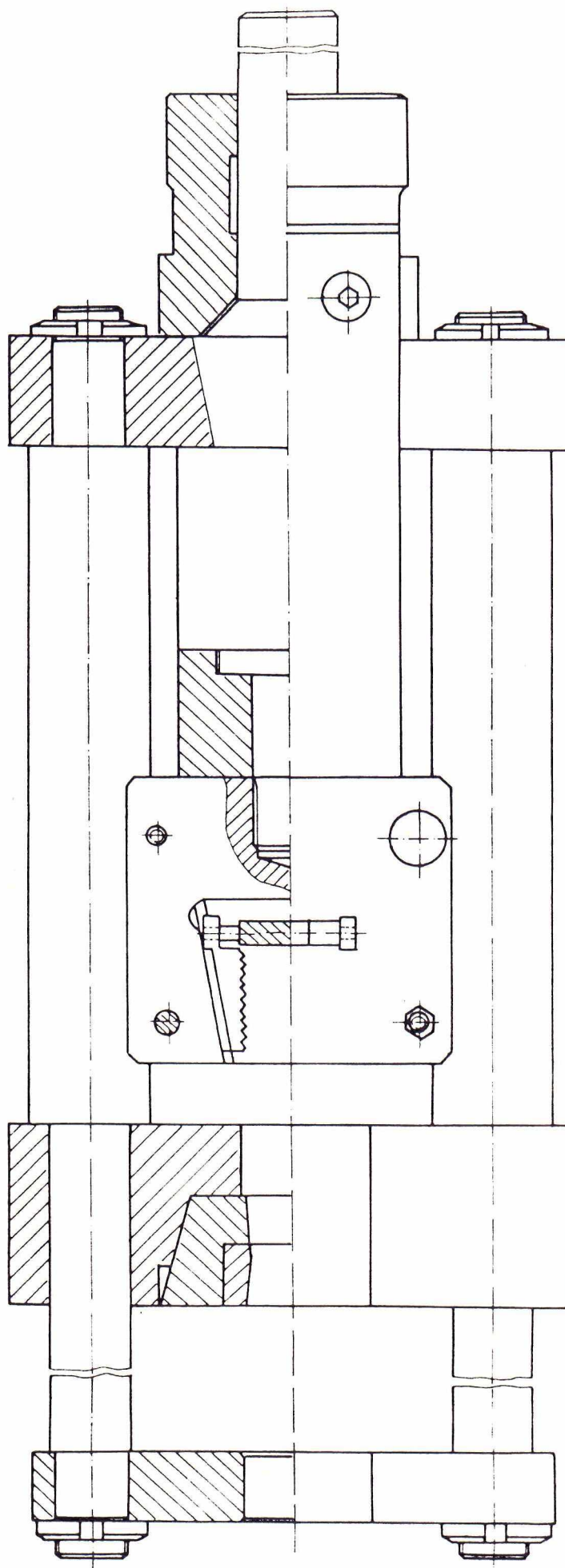
Pošto je u svim slučajevima koordinatna mreža nanešena na obje meridijalne ravni, detaljnija ispitivanja su pokazala da se zadovoljavajući opis može postići posmatranjem jednog dijela od ose do površine meridijalne zone (mreža je bila unakrsno identična što je omogućilo uporedjenje suprotnih krajeva polovina uzorka). S druge strane, izvjesne specifičnosti koje će kasnije biti analizirane, zanemarili bi se uopštavanjem cijele meridijalne ravni.

Profil zone deformacije pri izvlačenju šipki od čelika Č.1220 od nominalnog prečnika 16 mm na prečnik 13 mm je prikazan na slici 3a.

Brzine deformacija u radijalnom i osnom pravcu za isti profil zone deformacije su prikazane na slici 3b i 3c.

Sila izvlačenja za tri karakteristična slučaja izvlačenja čelika Č.4120 je prikazana dijagramom na slici 4.

Otpor metala deformaciji za ispitivane čelike je prikazan u tabeli 3, i na dijagramima 6, 7,8.



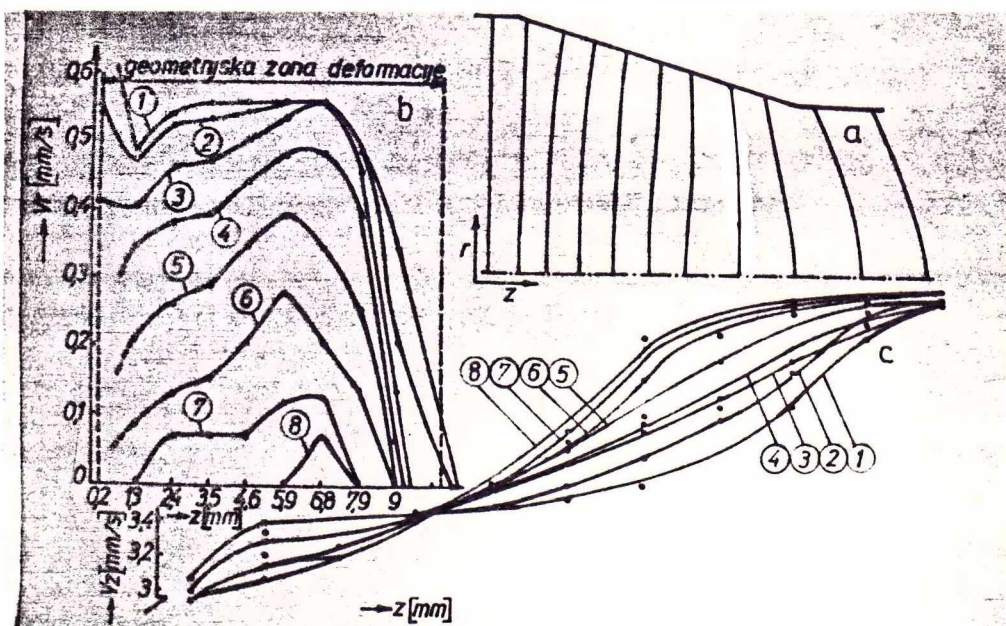
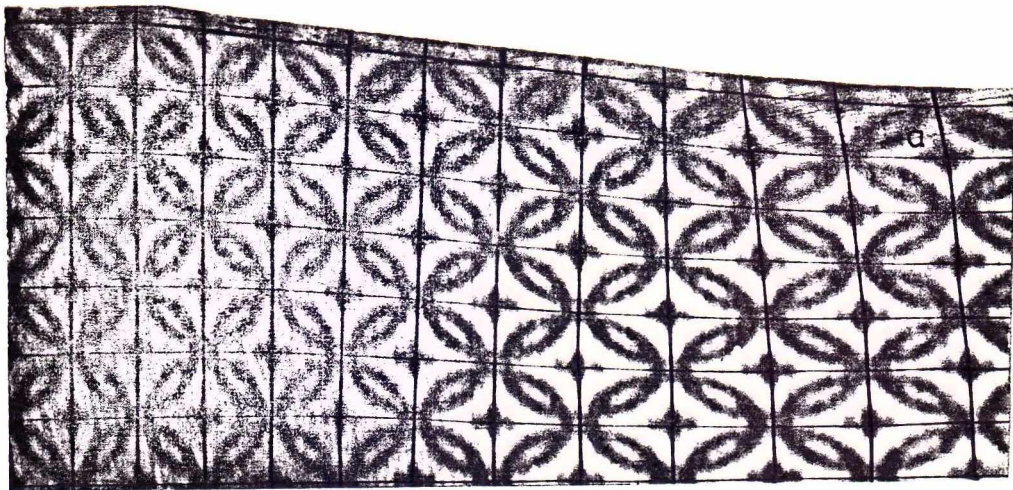
SI.2. Šema aparature.

## 4.5. ANALIZA POLAZNIH REZULTATA

### 4.5.1 Profil zone deformacije

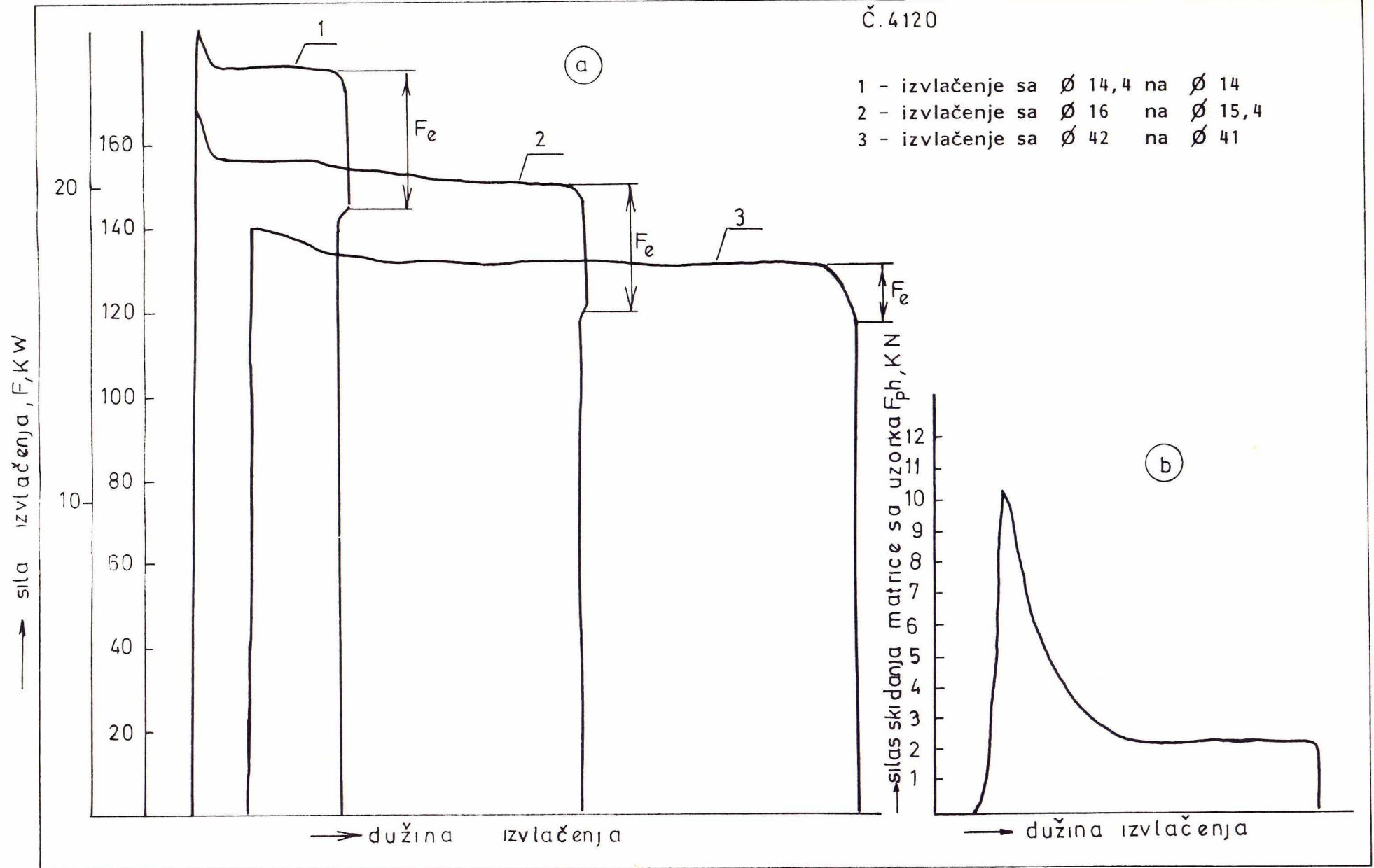
Analiza profila zone deformacije za uslove date na slici 3a je djelimično vršena u radu [50]. Očigledno je da pomjeranje tačaka duž zone deformacije ima složeni oblik koji zavisi od koordinata položaja, odnosno vremena. Izražene specifičnosti se odnose na najveći dio zone deformacije, dok je izlazni profil mreže dovoljno poznat i u literaturi analiziran. Posebno je karakteristično na ulazu u zonu deformacije veće z-pomjeranje na površini nego na osi. U nastavku, pomjeranje se postepeno intenzivira u potpovršinskim slojevima i kreće se prema osi formirajući složeni oblik vertikalnih linija mreže. Na određenoj dužini zone uspostavlja se stanje blisko homogenoj deformaciji o čemu govori normalni položaj vertikalne linije koordinatne mreže na osu simetrije. Do izlaska iz zone deformacije intenzitet z-pomjeranja se smanjuje na površini, a povećava na osi tako da linije dobijaju konveksan oblik u odnosu na smjer izvlačenja. Ukoliko se prati rastojanje između linija (odnosno čvorova) onda se uočava da je na ulazu u zonu, i pored navedenih razlika, neznatno povećanje rastojanja do identifikovanog "homogenog" položaja. U nastavku do izlaska iz zone rastojanje na osi brzo dostiže konačnu vrijednost, čak i prije presjeka koji označava geometrijski izlaz. Prirast rastojanja je znatno manji na površini i postiže konačnu vrijednost tek nakon izlaska iz zone deformacije.

Praktično, zona deformacije prikazana profilom tečenja, može da se podijeli na dva dijela u kojima je deformacija nehomogena. Pri tome je nehomogenost prvog ulaznog dijela znatno manja i povoljnija od nehomogenosti drugog - izlaznog dijela. Ponašanje ulaznog dijela govori o nehomogenosti z-pomjeranja i pri izuzetno malim stepenima deformacije. Kako se konačna vrijednost z-pomjeranja na površini postiže tek na izlasku iz zone deformacije, postoji jasna uloga kalibrujućeg pojasa matrice u tačnosti konačnih dimenzija proizvoda. Pomjeranje u radijalnom pravcu je takodje



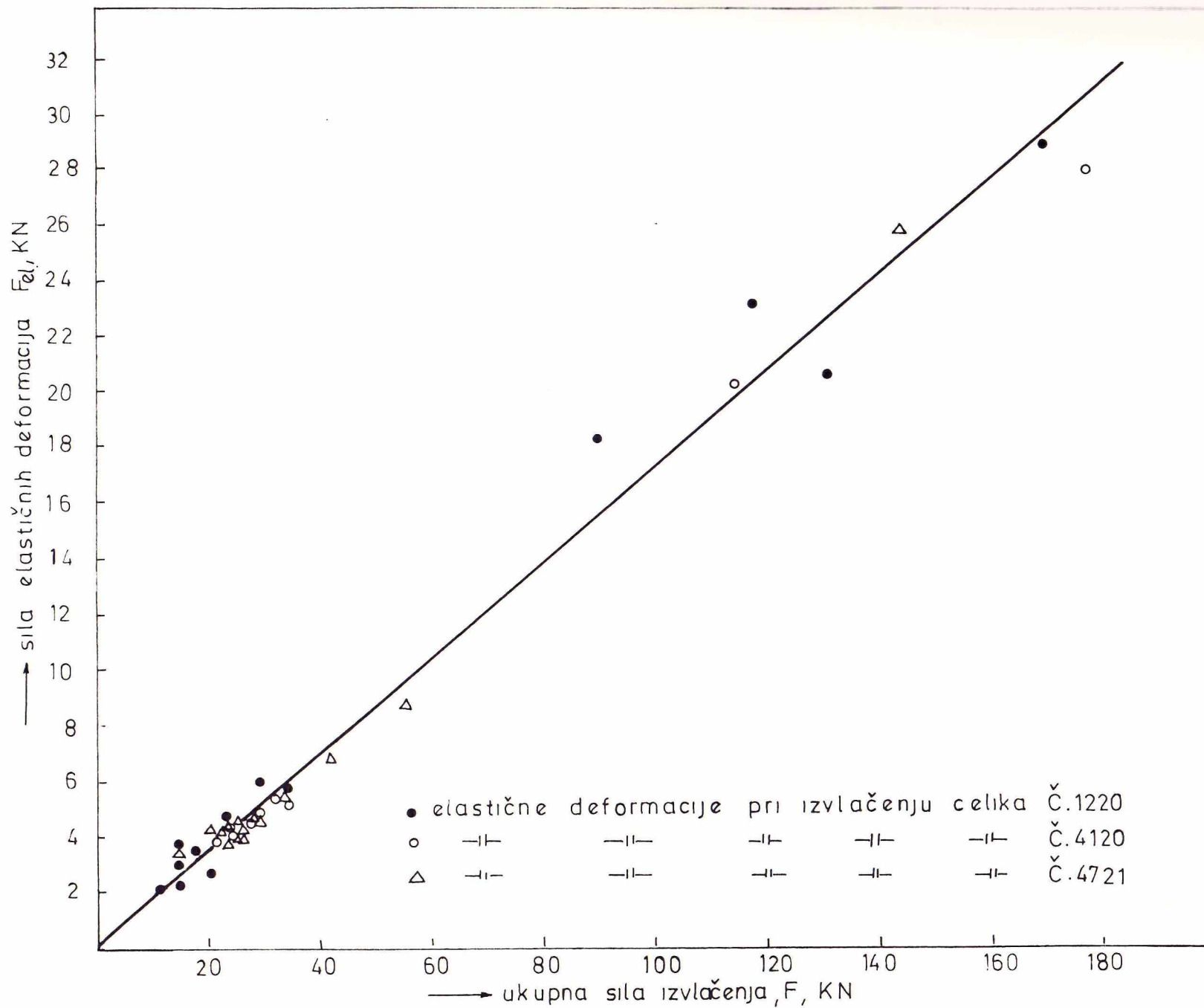
Sl.3. Profil zone deformacije pri izvlačenju čelika Č.1220 sa stepenom deformacije 0,1299 i podmazivanju parafinom (ugao matrice  $\alpha/2=0,147$  rad; brzina izvlačenja  $v=3,33$  mm/s) u obliku dobijenom fotografisanjem meridijalne ravni i šematski (a); radijalne brzine pomjeranja za dati profil zone (b); osne brzine pomjeranja za dati profil zone (c).

Č. 4120



Sl. 4. Dijagrami sile pri izvlačenju čelika Č. 4120 (a); i sile pri skidanju matrice sa uzorka (b):

- 1 - izvlačenje  $d_o = 16$  mm na  $d_1 = 14$  mm;
- 2 - izvlačenje  $d_o = 16$  mm na  $d_1 = 15$  mm;
- 3 - izvlačenje  $d_o = 32$  mm na  $d_1 = 30$  mm.



SI.5. Dijagram zavisnosti ukupne sile izvlačenja i sila elastičnih deformacija aparature.

složeno u odnosu na profil zone sa geometrijskim odnosom radijalnih i osnih pomjeranja. Trajektorija radijalnog pomjeranja čak ni na površini ne odgovara geometrijskoj interpretaciji o konstantnom priraštaju duž čitave zone. Međutim, može se uočiti da se trajektorija r-pomjeranja fenomenološki ponaša kao kriva sa dijelom laganog prirasta u početnom dijelu zone, zatim intenzivnog prirasta u najvećem dijelu zone, i ponovnog laganog prirasta do konačnih vrijednosti na izlazu iz zone deformacije. Konačno formirana r-rastojanja odgovaraju uslovima homogene deformacije, tj. polazno konstantno rastojanje između r-nivoa je konstantno i u determinisanom uzorku. Predstava ovakvog profila zone deformacije je data u radovima Avitzura i Shabaika, ali za znatno veće stepene deformacije u uglove matrice.

#### 4.5.2. Brzine deformisanja

Na osnovu očitanih vrijednosti pomjeranja preračunate su odgovarajuće brzine čiji dijagrami su prikazani na slici 3b i 3c.

Krive promjene su formirane tako da zadovolje najveći broj eksperimentalno odredjenih tačaka, i u potpunosti odgovaraju analiziranim vrijednostima promjene rastojanja između čvorova mreže. U tom smislu, osne brzine imaju međusobno blizak oblik dijagrama duž zone deformacije nezavisno od rastojanja između ose i površine. U početnom dijelu brzine rastu od ose prema površini, da bi se u presjeku homogene deformacije praktično izjednačile. U drugom dijelu, krive se ponovo razilaze s tim što se odnos površine i ose mijenja. Na izlazu iz zone deformacije vrijednosti brzine se približavaju, tako da u presjeku konačno formiranih dimenzija neznatno odstupaju sa promjenom r-koordinate.

Radijalne brzine za sve vrijednosti r-koordinate takodje imaju sličan dijagram predstavljen krivima sa maksimumom čija se veličina i položaj mijenja zavisno od položaja r.



Izložena razmatranja pokazuje da se brzine duž zone deformacije mogu fenomenološki opisati krivima koje imaju isti oblik, ali je za njihovu kvantifikaciju neophodno posmatrati svaku zasebno, budući da se karakteristične tačke međusobno razlikuju.

#### 4.5.3. Sila izvlačenja

Izvlačenje pripada grupi procesa sa najvećim dijelom deformacije u stacionarnim uslovima, što potvrđuje i dijagram prikazan na slici 4. Oblik dobijenog dijagrama je poznat i njegova analiza je data u radu [40]. Početni dio linearnog uspona koji odgovara deformaciji zašiljenog dijela na prikazanom dijagramu nedostaje iz razloga što mašina na kojoj je vršeno ispitivanje ne registruje silu na jednom dijelu puta pokretnog dijela alata, pa je taj dio vertikalni. Polazni vertikalni dio je doveo do jasno izraženog pika (u literaturi nazvan "lagani vrh") koji odgovara prolasku kroz matricu prelaznog presjeka između zašiljenog i ostalog dijela, kada uslovi podmazivanja još nisu stabilizovani. Ostali dio dijagrama predstavlja stacionarnu silu pri izvlačenju i kod pravilne geometrije on je konstantan. Pri izvlačenju toplo-valjanih šipki zbog razlika u profilu i dimenzijama mogu se javiti veće oscilacije u stacionarnom dijelu. Radi potvrde veze između razlika dimenzija i oscilacije sila pripremljen je uzorak na kome su minimalnim skidanjem površine napravljene stepenice. Skokovita promjena sile je potvrdila vezu oscilacija i razlika u dimenzijama.

Napon izvlačenja je proračunat iz odnosa sile izvlačenja i izlazne površine poprečnog presjeka.

Na desnom dijelu slike 4 je prikazan dijagram promjene sile pri skidanju matrice sa uzorka. Dijagram ima karakterističan oblik koji podsjeća na dijagram sile izvlačenja. Polazni pik je znatno izražen i predstavlja silu potrebnu za odvajanje matrice od zone deformacije. Njegova vrijednost dostiže do 10% ukupne sile izvlačenja, i može biti povezan najvećim dijelom sa elastičnim deformacijama metala i matrice i jednim dijelom

sa silama trenja pri elastičnom kontaktu. Detaljnija analiza bi, vjerovatno, omogućila razdvajanje ove dvije veličine i pomogla u eksperimentalnom mjerenju elastičnih deformacija. Međutim, ona nije vršena u ovom radu. Drugi dio dijagrama, predstavljen konstantnim dijelom je povezan, također, sa silom elastičnih deformacija metala, silom trenja pri elastičnom kontaktu kalibrujućeg pojasa matrice i metala i težinom pokretnih dijelova aparature. Njegova detaljnija analiza bi pružila korisne podatke o elastičnom povećanju poprečnog presjeka nazvanom "rast" metala, u procesu izvlačenja. Vrijednost sile u ovom dijelu je ispod 2% ukupne sile izvlačenja.

Upoređivanjem vrijednosti sile dobijene u ovom eksperimentu i sile dobijene mjerenjem na proizvodnoj mašini za izvlačenje sa mjernim priborom koji je opisan u radovima [51, 52, 53] se pokazalo da su dobijene vrijednosti sile veće od vrijednosti sila pri mjerenju na proizvodnoj mašini. S obzirom na značaj što tačnijeg poznavanja sile izvlačenja pristupilo se analizi uzroka odstupanja. Smatrajući da ono nije posljedica greške ili uticaja slučajnih faktora, kao pouzdan uzrok su ostale elastične deformacije metala, aparature i pokretnog alata mašine. Za njihovo određivanje je poslužio dijagram promjene sile izvlačenja odnosno njegova promjena na kraju stacionarnog dijela. Naime, završetak procesa izvlačenja je na dijagramu praćen sa dvije karakteristične pojave:

- skraćivanje puta sa smanjenjem sile za odgovarajuću vrijednost (kriva 1 i 2 dijagramima prikazanih na sl.4) pri trenutnom isključivanju procesa izvlačenja čime se istovremeno uključuje povratni hod (sistem je analogan prekidanju procesa pri izvlačenju po Eriksenovoj probi;
- povećanjem puta sa linearnim smanjenjem sile za odgovarajuću vrijednost pri zaustavljanju kretanja a zatim uključivanju povratnog hoda.

Upoređivanjem ove dvije vrijednosti su dobijeni približno isti podaci za iste uslove deformacije. Ako se analizira sistem opterećenja dolazi se do zaključka da je u prvom slučaju skraćivanje puta posledica elastičnog ra-

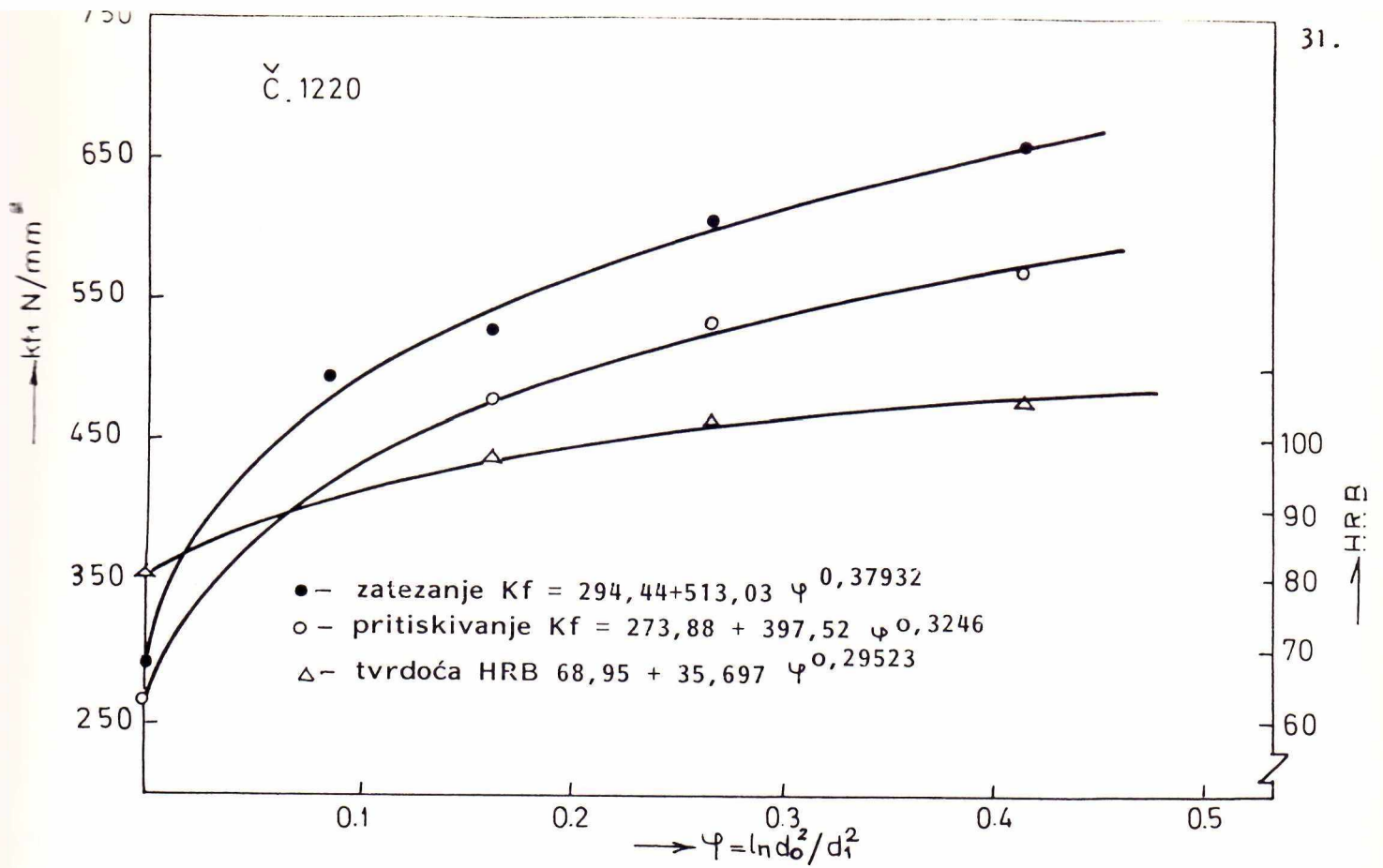
sterećenja aparature, čime se vraća pokretni dio alata mašine, pošto je rasterećen pritisak radnog hidrauličnog cilindra, što je registrovano na pisaču kao skraćenje puta. U drugom slučaju, pogonski dio mašine pri zaustavljanju izvlačenja nastavlja kretanje, pošto je još izložen pritisku hidrauličnog cilindra, za vrijednost elastičnog rasterećenja ukupnog sistema, a da pri tome sila opadne na vrijednost sile izvlačenja.

Koristeći proporcionalnost između ukupne sile i ovako određene sile konstruisan je dijagram prikazan na slici 5. Rasipanje rezultata može biti posledica različitih ostalih uslova izvlačenja kao i eventualnih grešaka povezanih sa inertnošću prisača. Budući da nanešene tačke na dijagramu ne omogućavaju razdvajanje po osnovu vrste čelika dijagram je prikazan kao zajednički za sve ispitivane čelike. Sa dijagrama se vidi da sila ovako određenih elastičnih deformacija iznosi  $\cong 17\%$  ukupne sile izvlačenja.

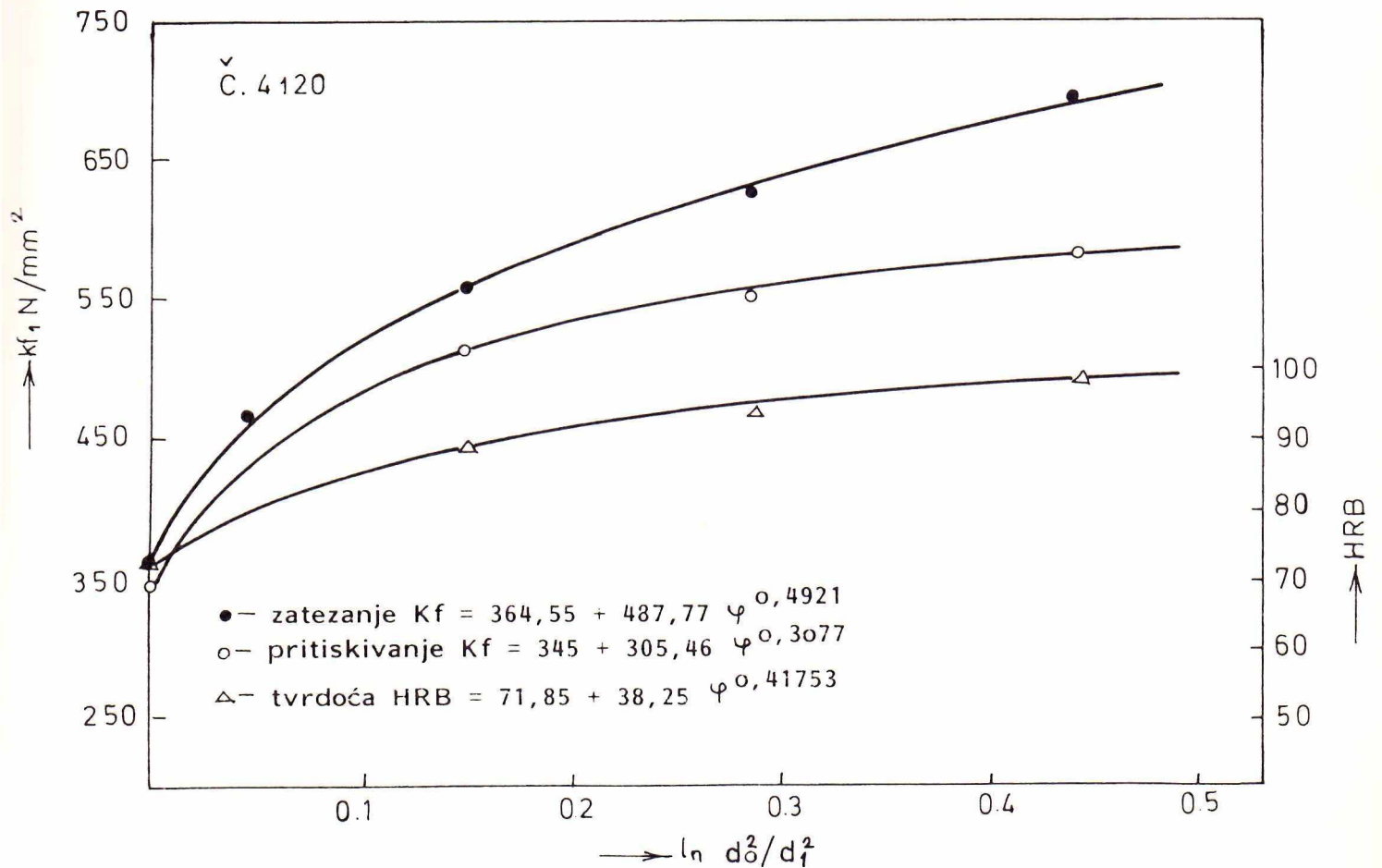
#### 4,5.4. Otpor metala deformaciji

Izučavanju promjene otpora metala deformaciji pri hladnom izvlačenju nije posvećeno dovoljno pažnje sa stanovišta njegove primjene za plasto-mehaničke proračune već se najčešće metal posmatra kao idealno plastičan, iako su u svim radovima pri uzimanju u obzir deformacionog ojačavanja dobijaju sasvim različiti rezultati kod određivanja značajnijih parametara procesa [40, 41, 47]. U radovima koji obraduju elementarnu teoriju izvlačenja otpor metala se poistovjećuje sa pokazateljima dobijenim u procesu zatezanja, kao srednja vrijednost na ulazu i izlazu iz zone deformacije. Pored ovakvog načina proračuna koriste se jednačine dobijene aproksimacijom krive tečenja linearnom, eksponencijalnom ili polinomskom zavisnošću [1, 40, 41, 54 - 57].

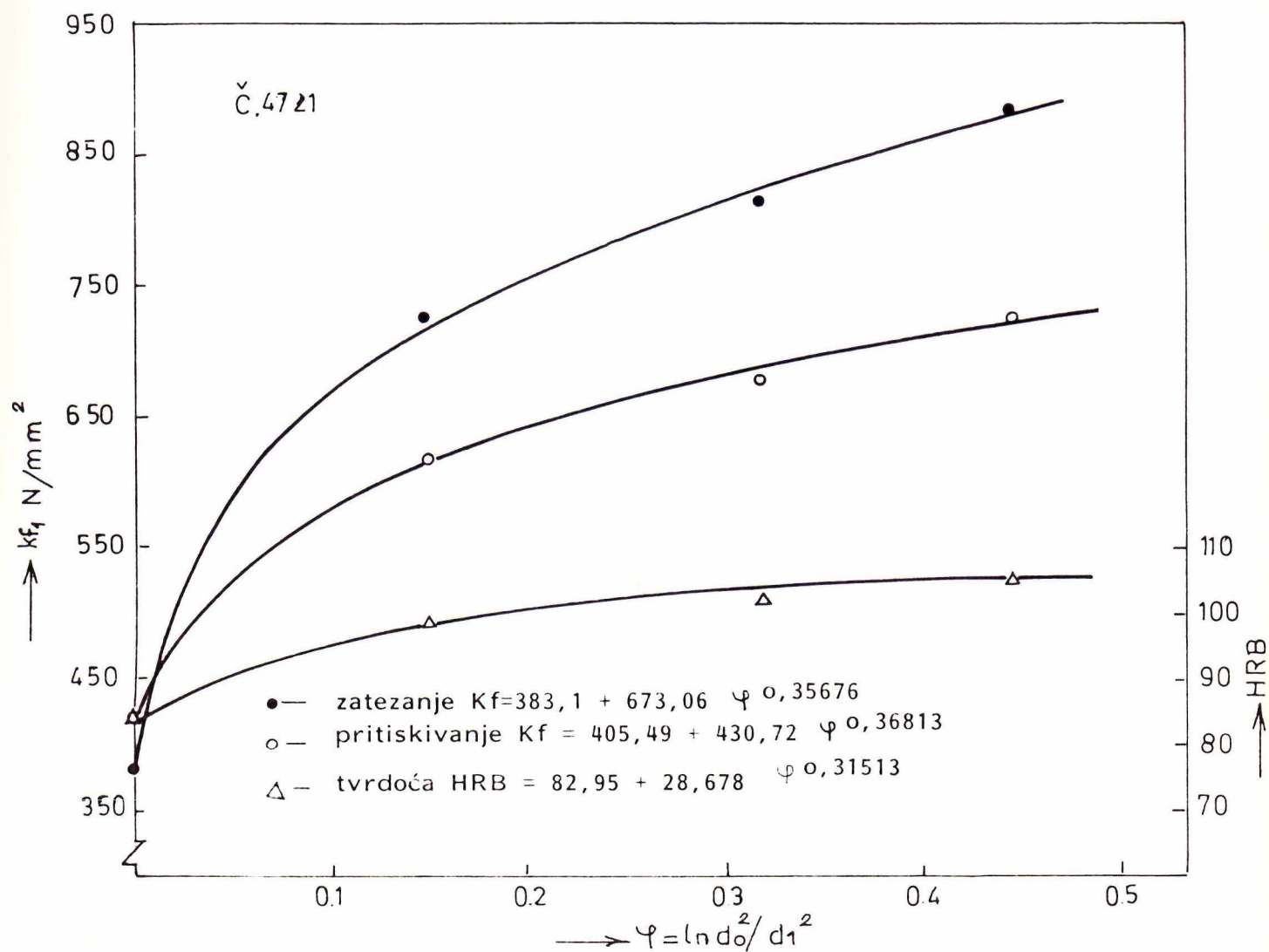
Podaci o otporu metala deformacije dati u tabeli 3 su dobijeni kao početak plastičnog tečenja uzoraka izradjenih od šipki koje su izvučene sa odgovarajućim stepenom deformacije. Na osnovu oblika dijagrama zavisnosti



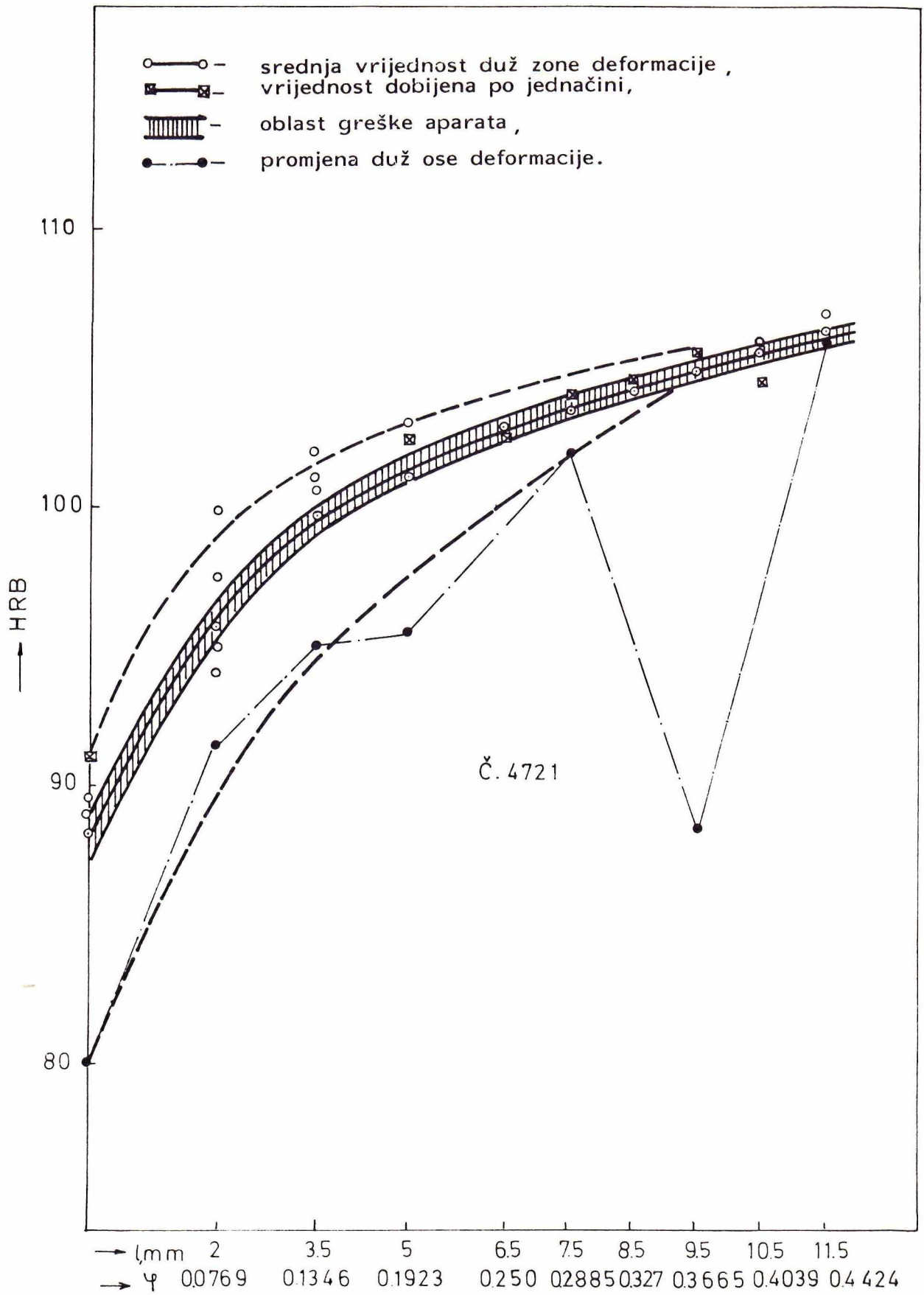
Sl.6. Dijagrami zavisnosti otpora deformaciji čelika Č.1220 od stepena deformacije pri izvlačenju.



Sl.7. Dijagrami zavisnosti otpora deformaciji čelika Č.4120 od stepena deformacije pri izvlačenju.



Sl. 8. Dijagrami zavisnosti otpora deformaciji čelika Č. 4721 od stepena deformacije pri izvlačenju.



Sl.9. Promjena tvrdoće duž zone deformacije čelika Č.4721  
( $d_0 = 16$  mm;  $d_1 = 13$  mm)

otpora deformacije od stepena deformacije određen je zakon deformacionog ojačavanja, koji je identičan za pokazatelje dobijene zatezanjem pritiskivanjem i tvrdoću, i može se prikazati jednačinom:

$$K_f = K_{to} + A\phi^n \quad (33)$$

gdje je:

- $K_{fo}$  - otpor deformaciji polaznih uzoraka;
- $A$  i  $n$  - koeficijenti.

Vrijednosti koeficijenata  $A$  i  $n$  su određene metodom najmanjih kvadrata i dati su u jednačinama na odgovarajućim dijagramima, slika 6, 7 i 8.

U cilju verifikacije ovako definisanog zakona deformacionog ojačavanja sa ojačavanjem duž zone deformacije izvršeni su eksperimenti određivanja tvrdoće duž zone deformacije. Kako je tehnički bilo neizvodljivo mjerenje tvrdoće po meridijalnoj ravni (zahtijevalo je konstrukciju specijalnog alata čije ležište treba idealno da odgovara profilu zone deformacije jer se u protivnom, javljaju velike vrijednosti elastičnih deformacija koje onemogućavaju dobijanje tačnih rezultata) mjerenje je izvršeno na punim uzorcima od istog materijala. U tu svrhu su napravljeni uzorci čija prva mjerna površina odgovara izlasku iz zone deformacije. Na takvoj mjernoj površini su na nanešeni koncentrični krugovi duž kojih je izmjerena tvrdoća u cik-cak rasporedu sa rastojanjem pri kojem ne dolazi do uticaja jednog otiska na drugi. Najmanji broj otisaka izuzimajući osu je bio tri. Prelazak na sljedeću mjernu površinu je vršen skidanjem na strugu sloja debljine 1, 1,5 ili 2 mm. Mjerenje je vršeno do ulaska u zonu deformacije. Položaj mjernog mjesta je preračunat na odgovarajući stepen deformacije.

Detaljan prikaz rezultata za čelik Č.1220 sa srednjim vrijednostima tvrdoće kod većeg broja otisaka je dat u tabeli 4 i na dijagramu, slika 9.

Na dijagramu su uporedo prikazane srednje vrijednosti dobijene pri formiranju krive tečenja, oblast greške aparata i srednje vrijednosti duž zone deformacije. Očigledno, poklapanje govori o ispravnosti načina formiranja zakona deformacionog ojačavanja.

Promjene tvrdoće po poprečnom presjeku, kako se mislilo da može dati sliku o otporu deformaciji u svakoj tački zone, nije omogućilo izvodjenje jasnih zaključaka pošto uočene razlike predstavljaju stanje naslijedjeno prije deformacije. Variranje vrijednosti tvrdoće u većem opsegu je uočeno za osu uzorka gdje su se mogli desiti svi slučajevi: naglog povećanja, naglog smanjenja ili zadržavanja na konstatnu vrijednost. U cilju potvrde o mogućnostima ovakvih promjena izvršeno je ispitivanje na uzorcima znatno izvan zone deformacije sa ulazne i izlazne strane. Dobijeni rezultati su pokazali istu mogućnost rasipanja pa je zaključeno da ono može biti posledica slučajnih veličina (npr. načina pripreme uzorka, tj. mogućnosti stvaranja kalote u centru uzorka pri struganju), pošto naknadna metalografska ispitivanja strukture duž zone deformacije nijesu pokazala mogućnosti većeg rasipanja rezultata.

Navedeni eksperiment sa tvrdoćom nije omogućio kvantifikaciju rezultata i formiranje korelacione krive tvrdoća - otpor metala ali je potvrdio zakon deformacionog ojačavanja.

Sve vrijednosti i jednačine su dobijene na uzorcima nominalnog prečnika 16 mm, pošto su, zbog ograničenja sile izvlačenja, samo kod njih mogli biti ostvareni visoki stepeni deformacije. Ispitivanja za ostale nominalne prečnike polaznog i deformisanog stanja su pokazala izvjesna odstupanja. Medjutim, ona su zanemarena pošto nije potpuno pouzdano da su vjerodostojna bez detaljnijeg ispitivanja uticaja mjesta uzimanja npr. proporcionalne epruvete prečnika 8 mm ili uzorka za pritiskivanje prečnika 10 mm iz šipke prečnika 30 ili 40 mm, na vrijednosti ili ponašanje otpora deformaciji.

Posebna teškoća u formiranju krive tečenja pri pritiskivanju je bila određivanje dimenzija uzorka, pošto su se dobijeni rezultati znatno razlikovali u zavisnosti od prečnika uzorka, pri istom odnosu  $h/d=1,5$ . Na kraju, kao mjerodavne, su usvojene vrijednosti dobijene pritiskivanjem uzoraka nominalnog prečnika prije i poslije izvlačenja.

#### 4.6. MATEMATIČKI MODEL TEČENJA METALA

##### 4.6.1. Postavka modela

Izloženi rezultati omogućavaju opis procesa izvlačenja numeričkim rešavanjem potrebnih jednačina uz odgovarajuću definiciju početnih i graničnih uslova. Pri tome se stalno mora imati u vidu uticaj greške mjerenja, greške proračuna sa konačnim umjesto diferencijalnim veličinama, i greške korišćenja brojnih vrijednosti umjesto funkcija. Tako postaju jasne i opravdane teorijske metode pretpostavljanja polja brzina ili polja napona koje se, u konačnom, verifikuje pouzdanim mjernim parametrom npr. silom izvlačenja. Nesumnjiv značaj imaju i eksperimentalni rezultati i modeli formirani na osnovu njih. Medjutim, u tom pravcu se radilo veoma malo, što je i jasno ukoliko se postave ciljevi koje model mora da zadovolji i mogućnosti njegovog uopštavanja. U našim razmišljanjima, postavljene zahtjevi koje model mora da zadovolji su:

- mora biti formiran za polazne eksperimentalno određene veličine, kako bi se iz funkcija njihove promjene određivale ostale veličine;
- mora odgovarati eksperimentalnim rezultatima sa tačnošću koja je određena greškom mjerenja;
- mora odraziti sve značajne promjene polaznih podataka;
- mora biti diferencijalan kako bi se mogla vršiti integracija veličina.

Za postizanje prvog zahtjeva su postojale dvije mogućnosti:

- odredjivanje funkcije koja opisuje kretanje tačke u  $r$ - $z$ -koordinatnom sistemu  $i$
- odredjivanje funkcije koja opisuje promjenu koordinata u datom koordinatnom sistemu.

Analiza profila zone deformacije je ukazala na složenost promjene polja kretanja tačaka, narocito u osnom pravcu, tako da se odustalo od prve mogućnosti, dok je promjena koordinata imala dosta zajedničkih karakteristika, što je prikazano, analizirano i zaključeno preko brzina deformisanja. U ispitivanju oblika prikazivanja promjene koordinata najupečatljiviju sličnost su pokazale promjene ukupnih vrijednosti priraštaja  $\Delta r$  i  $\Delta z$  u zavisnosti od položaja na osi simetrije. Dobijeni dijagrami  $\Delta z$ , za uslove izvlačenja kao na slici 3 (najsloženiji profil mreža u zoni deformacije je dobijen pri deformaciji sa tom redukcijom nominalnog prečnika) su prikazani na slici 10. Jasno se uočava da sve krive  $r=\text{const}$  imaju sličan oblik i tok promjene. Kako je broj eksperimentalnih tačaka ograničen određeni su položaji međučvorova po metodi optimizacija izloženog u radu [45]. Pri tome su konstruisani dijagrami koji su potpuno potvrdili polaznu eksperimentalnu sličnost, slika 11. Fenomenološki, kriva ima tri oblasti: početni dio kada vrijednost priraštaja sporo raste, srednji dio intenzivnog rasta i kranji dio kada priraštaj lagano postiže konačnu vrijednost. U cilju boljeg upoznavanja toka funkcije određeni su parcijalni priraštaji duž pojedinih krivih. Dobijen je oblik prikazan na slici 11. Početna sličnost sa krivom normalne raspodjele je praktično i opredijelila oblik funkcije. Funkcija normalne raspodjele ima tri bitne karakteristike koje ovdje nalaze potpunu potvrdu:

- maksimum vrijednosti prikazan za  $\Delta r$ -pomjeranje preko brzine na dijagramima slika 3a, odnosno za  $\Delta z$  pomjeranje na slici 11;
- položaj maksimuma kao rastojanje od ulaza u zonu deformacije;
- širina maksimuma kao dužina zone u kojoj leži srednji dio krive.

Integral funkcije normalne raspodjele predstavlja vrijednost ukupnih pomjeranja. Tako se konačni oblik funkcije ukupnog pomjeranja može prikazati jednačinom:

$$\Delta = a_1 + a_1 \operatorname{erf}(z - a_2/a_3), \quad (34)$$

gdje je:

$a_1$  - koeficijent koji određuje visinu maksimuma parcijalnog priraštaja ili prevojnu tačku na krivoj ukupnog priraštaja;

$a_2$  - koeficijent koji određuje položaj maksimuma odnosno širina drugog dijela krive izraženo  $z$ -rastojanjem;

$\operatorname{erf}x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  - integral vjerovatnoće.

#### 4.6.2. Provjera modela

U cilju provjere postavljenog modela izabrani su rezultati dobijeni za tri karakteristična slučaja:

- izvlačenje šipke čelika Č.4732 sa prečnika 16,3 mm kroz matricu prečnika 12,89 mm (prečnik izvučene šipke je iznosio 12,92 mm pri podmazivanju sa parafinom pošto se u ovom slučaju postižu najveći stepeni deformacije;
- izvlačenje šipke čelika Č.4120 sa prečnika 16,10 mm kroz matricu prečnika 13,89 mm (prečnik izvučene šipke je iznosio 13,91 mm) pri podmazivanju sa parafinom i
- izvlačenje šipke čelika Č.4120 kao u predhodnom ali bez podmazivanja, pošto u tom slučaju sile trenja imaju maksimalan uticaj.

Proračun je obuhvatio određivanje koeficijenata krive po metodi minimalnog kvadratnog odstupanja standardne devijacije i izvršen je na računaru.

Rezultati pojedinačnih krivih za navedene slučajeve je prikazan u tabelama 5, 6 i 7.

Odstupanje u zanemarljivom broju tačaka za vrijednost koja je znatno veća od greške mjerenja (0,5 mm pri datom uvećanju) je potvrdilo pravilan izbor funkcije. Tako je ispunjen drugi zahtjev koji je postavljen

pred model. Takodje je ispunjen treći zahtjev naveden kod izbora funkcije, a pošto je funkcija  $\text{erfx}$ -neprekidna znači diferencijalna i integrabilna postignut je i četvrti zahtjev.

#### 4.6.3. Uopštavanje modela

Bez obzira na dobru korelaciju eksperimentalnih i proračunatih vrijednosti vršeno je dalje ispitivanje modelne jednačine. Prvi korak za formiranje jedinstvenog modela koji će obuhvatiti polje promjene  $\Delta r$  i  $\Delta z$  pomjeranja je bio uključivanje  $r$ -koordinate u modelnu jednačinu. U tom smislu su ispitane promjene koeficijenata  $a_1$ ,  $a_2$ , i  $a_3$  sa promjenom polazne vrijednosti  $r$ -nivoa. Dobijene su zavisnosti prikazane na dijagramima, slika 12, 13, 14. Sa dijagrama se vidi da je promjena koeficijenta  $a_1$  za  $\Delta r$ -pomjeranje linearna funkcija  $r$ -koordinate. Isto tako je jasno da koeficijent  $a_1$  za  $\Delta z$ -pomjeranja ima konstantnu vrijednost.

Promjena ostalih koeficijenata za  $\Delta r$  nije tako jasna kao promjena koeficijenta  $a_1$ , naročito u oblasti malih vrijednosti  $r$ , gdje se javlja periodična oscilacija vrijednosti. U analizi ovakvog ponašanja nije nadjena odgovarajuća fizička mogućnost za navedene oscilacije već je sve upućivalo na mogućnost pravljenja greške pri očitavanju vrijednosti. Ovo je naročito moguće ako se uzme u obzir cik-cak raspored čvorova mreže i male vrijednosti pomjeranja. Pri takvom očitavanju jednostavno je moguće da se očita veličina pomjeranja na drugom položaju bez obzira što je ona mogla biti postignuta na nekom medju-položaju. Ovo ne možemo uopštiti za svaku tačku, jer bi u protivnom mogli proglasiti pogrešnom svaku očitavanu vrijednost, da bi pokazali što boljim izvedeni model, što pogrešnijim eksperimentalne rezultate ili uopštiti model. Radi se o mogućnosti očitavanja karakterističnih tačaka: prevojne tačke na krivoj i širini drugog dijela krive odnosno maksimuma. Posebno pitanje je što se dešava sa koeficijentima za osu simetrije. Logično je da su vrijednosti  $\Delta r$  na osi jednake nuli.

Medjutim, tok promjene koeficijenta ostavlja mogućnost njihovih pozitivnih vrijednosti i na tom položaju. Objašnjenje za ovakve promjene može biti povezano sa geometrijom polaznog profila i razlikom u dimenzijama zavisno od pravca mjerenja (što je mjerenjem dimenzija potvrđeno). Nepravilni profil poprečnog presjeka može izazvati pomjeranje ose u odnosu na njen polazni položaj u jednom ili drugom pravcu meridijalne ravni, odnosno njenoj oscilaciji oko polaznog položaja kod punih uzoraka, zavisno od presjeka na kojem je prečnik veći. Između izvlačenja u uslovima tačne geometrije i geometrije toplo-valjanih šipki mi smo se odlučili na drugu varijantu. Tako se zavisnosti promjene aproksimirani pravim linijama koji sijeku pozitivni dio ose koeficijenata u tačku  $r=0$ .

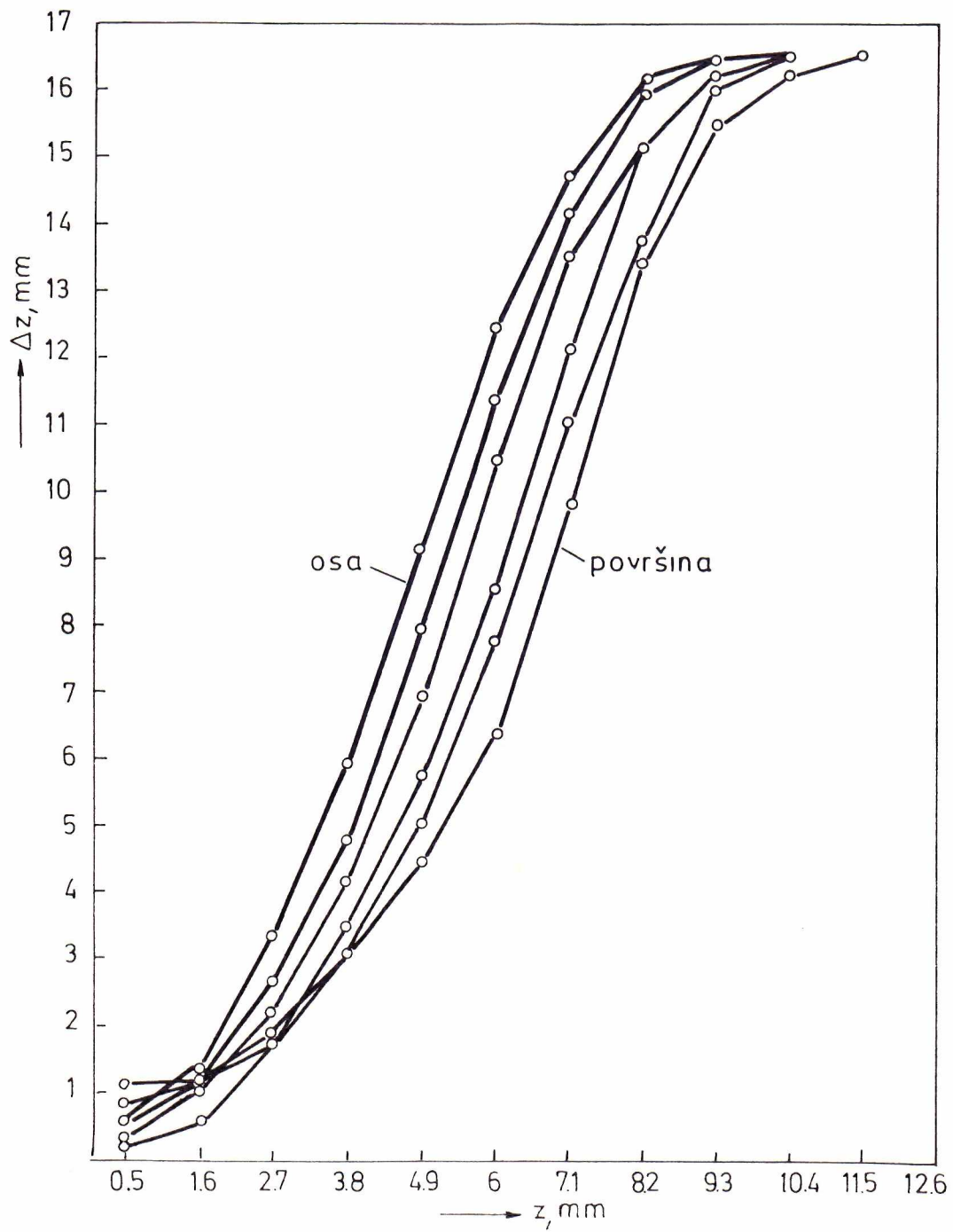
Kod  $\Delta z$ -pomjeranja  $a_1$  i  $a_2$  imaju pravilniji tok u zavisnosti od polaznog položaja  $r$ -koordinate, tako da je linearna aproksimacija zavisnosti sasvim opravdana. Uopštavanje modela je ocijenjeno kao veoma značajno i ono je do kraja sprovedeno bez obzira na mogućnost povećanja greške koja se pravi pri pojedinačnoj aproksimaciji krivih. Ujedno zbog komplikovanog polaznog matematičkog zakona, opisivanje promjene koeficijenata je izvršeno što jednostavnijim funkcijama. Ovo je još jedan razlog linearizacije funkcija  $a_1$  i  $a_2$  sa promjenom  $r$ -a. Konačni oblik matematičkog modela promjene koordinata u zoni deformacije glasi:

- za ukupno  $\Delta r$ -pomjeranje:

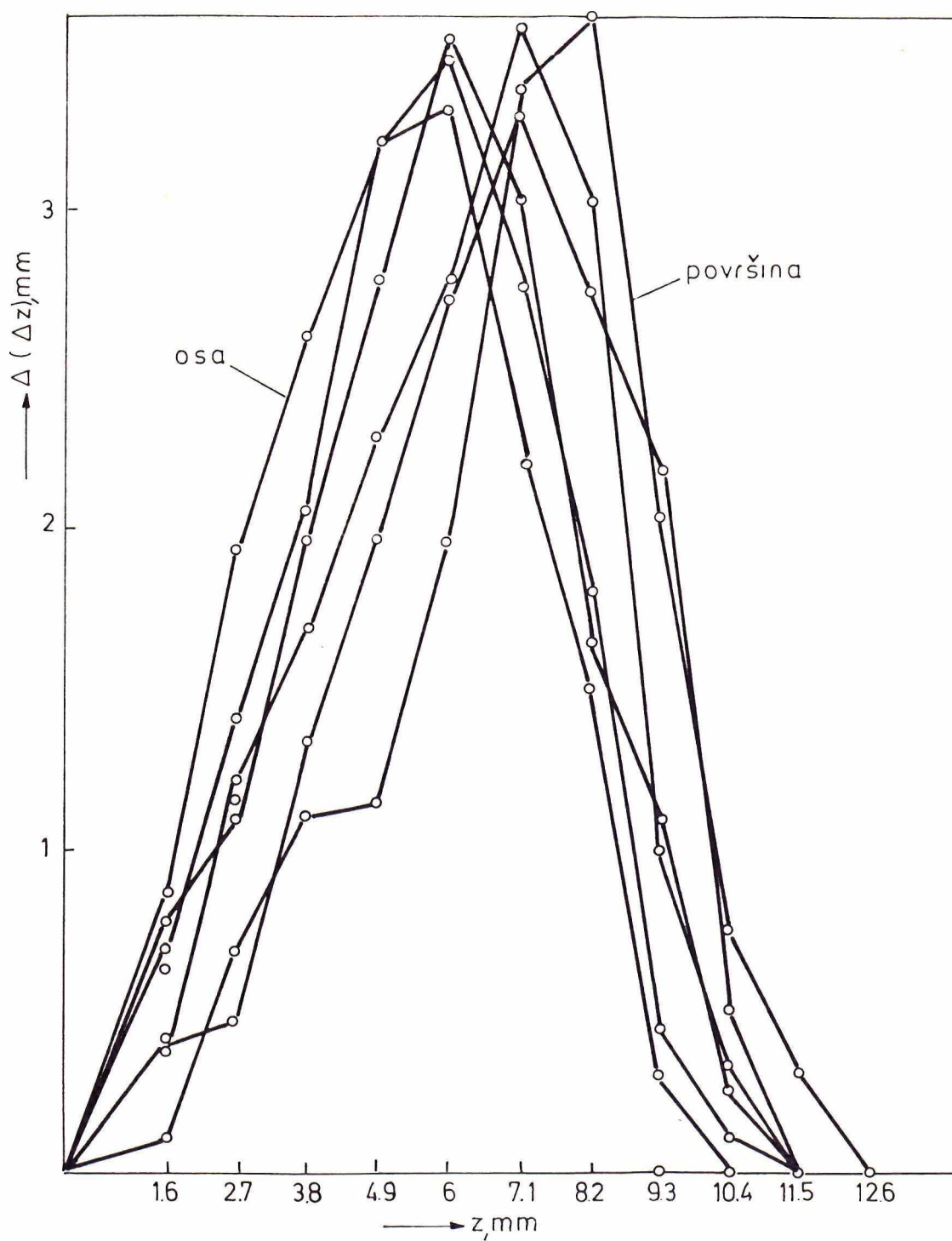
$$\Delta r = (a_1 r + a_2) \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z - a_3 r - a_4}{a_5 r + a_6} \right) \right); \quad (35)$$

- za ukupno  $\Delta z$ -pomjeranje:

$$\Delta z = b_1 \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z - b_2 r - b_3}{b_4 r + b_5} \right) \right). \quad (36)$$



SI.10. Dijagrami promjene ukupnog  $\Delta z$  pomjeranja.



Sl.11. Dijagrami promjene parcijalnog priraštaja  $\Delta z$  duž zone deformacije u zavisnosti od položaja  $r$ -a.



Odredjivanje koeficijenata  $a_1$ - $a_6$  i  $b_1$ - $b_5$  je vršeno po istom programu kao odredjivanje koeficijenata kod pojedinačne obrade krivih. Provjera modela je izvršena na istim uzorcima kao kod provjere polaznog modela.

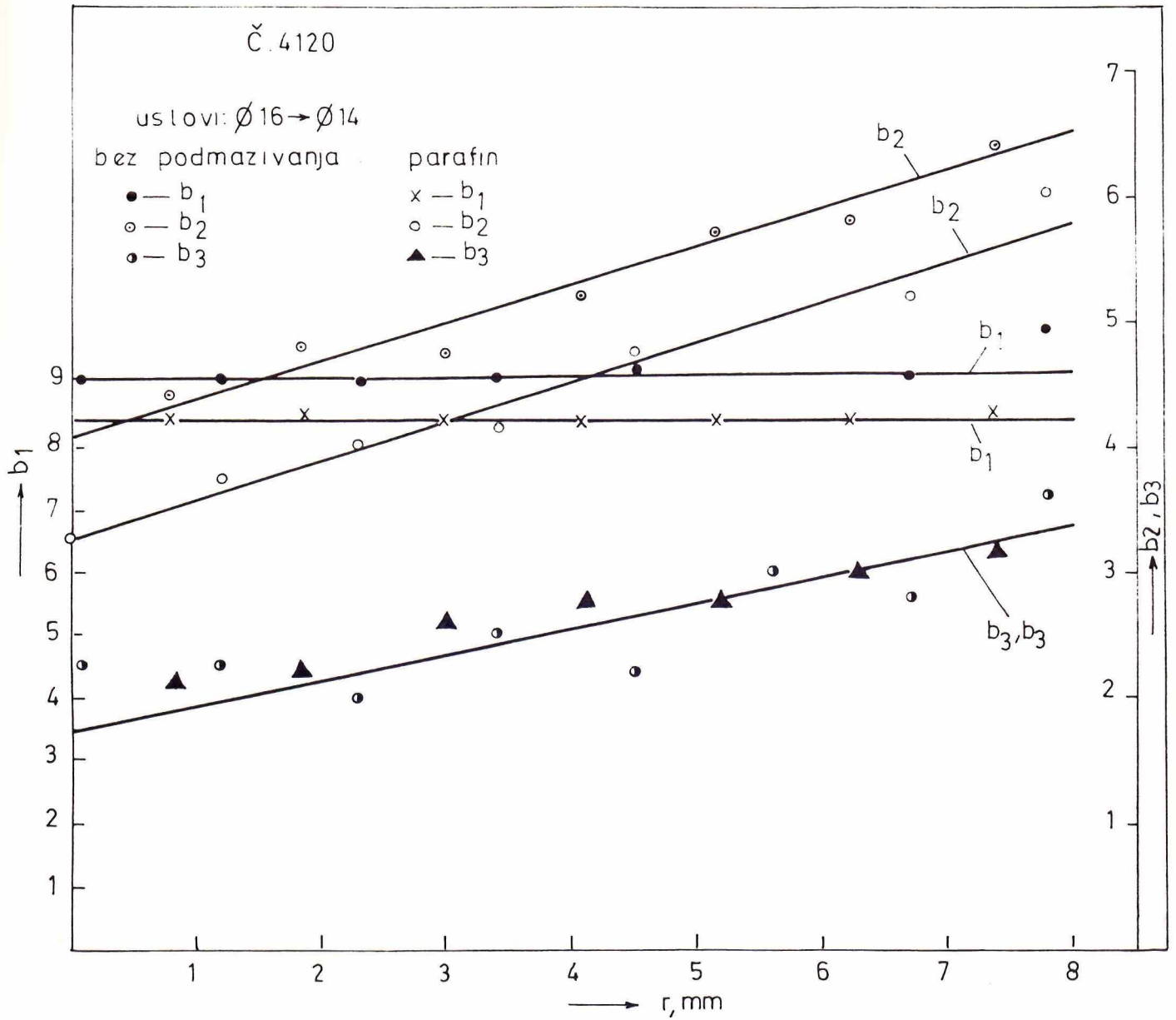
Rezultati proračuna po jednačinama (35) i (36) zajedno sa polaznim eksperimentalnim podacima dobijenim pri izvlačenju čelika Č.4721, u uslovima navedenim u tabeli 5, su dati u tabelama 8 i 9. Očigledno je da se odstupanje proračunatih i izmjerenih vrijednosti znatno povećalo u odnosu na pojedinačnu aproksimaciju (odstupanja su ovdje bila najveća od svih testiranih uzoraka), ali su zadržane sve bitne specifičnosti promjene veličine pomjeranja koji su navedene u poglavlju analize profila zone deformacije.

U ispitivanju dalje mogućnosti uprošćavanja modela dobijeni su podaci koji znatnije odstupaju od uopštenog oblika datog jednačinom (35) i (36).

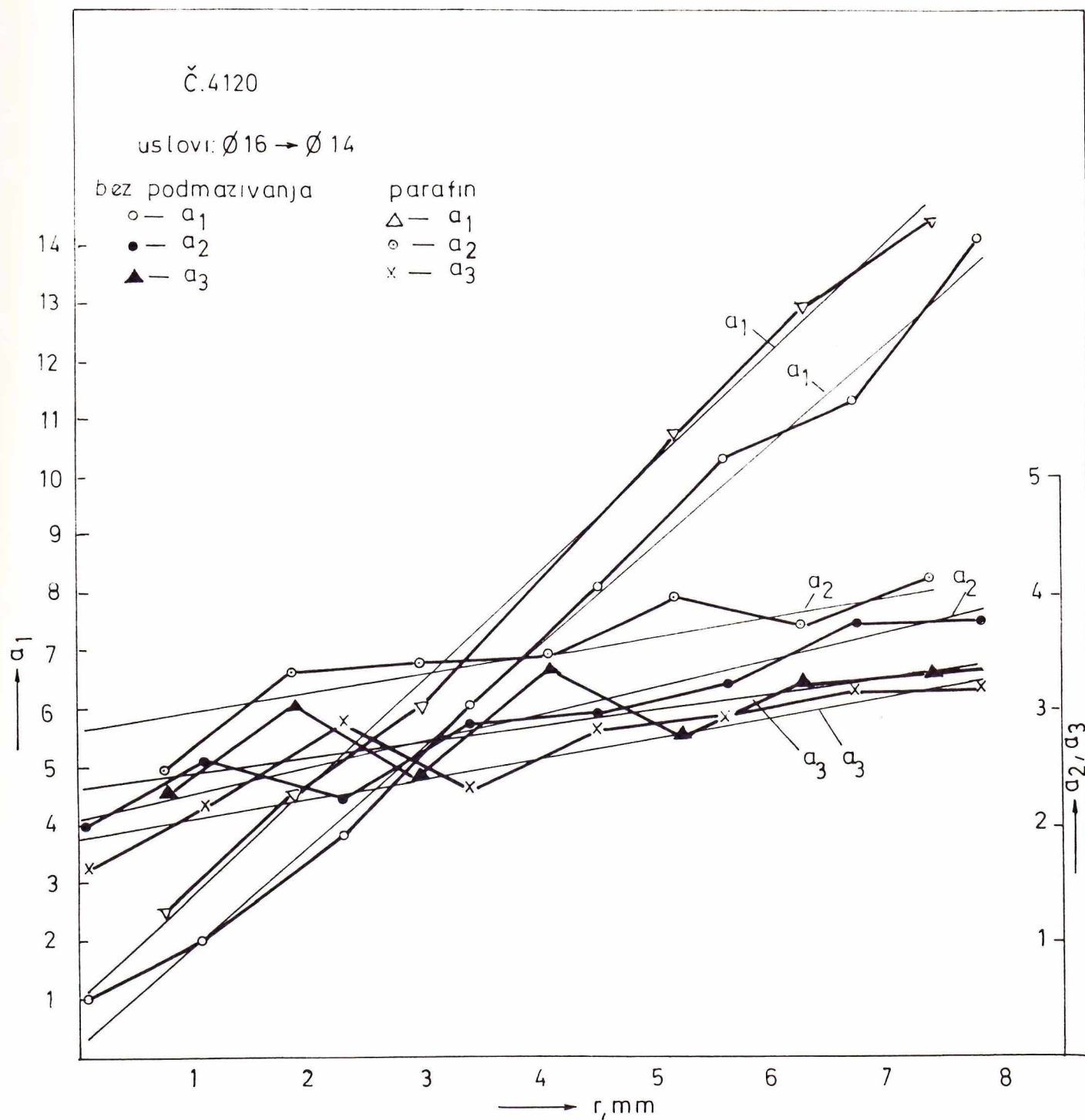
Proračunate vrijednosti su prikazane na dijagramima slika 15, 16, 17, 18. Usporedjivanjem oblika krivih, npr.  $\Delta z$ - $z$  za različite vrijednosti  $r$  sa rezultatima datim u radu [41] se jasno uočava podudarnost u najvećem broju kriterijuma za uslove podudarnosti. Isto to se može reći za eksperimentalne krive koje su date na dijagramima i detaljno prikazane i analizirane u radu [50]. Zaključno je usvojeno da formirani model pruža kvalitativni i kvantitativni zakon promjene koordinata u procesu izvlačenja i kao takav je primijenjen na sve slučajeve izvlačenja date u planu eksperimenta.

Nastavak rada je vršen na identičan način za sve uzorke i to:

- na osnovu eksperimentalnih rezultata su odredjeni koeficijenti  $a$  i  $b$ ;
- formirane su funkcije promjene  $\Delta r$  i  $\Delta z$ ;
- formirane su funkcije promjene brzina  $V_r$  i  $V_z$ , kao polaznog podatka;
- izvršen je proračun potrebnih veličina datih u poglavlju - primjena metode vizioplastičnosti.



Sl. 12. Dijagrami promjene koeficijenta  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  u zavisnosti od poluprečnika



Sl.13. Dijagrami promjene koeficijenta  $a_1, a_2, a_3$  u zavisnosti od poluprečnika

Č. 4721

Uslovi:  $\varnothing 16$  na  $\varnothing 13$  mm  
podmazivanje parafinom

$a_1$

$a_1$

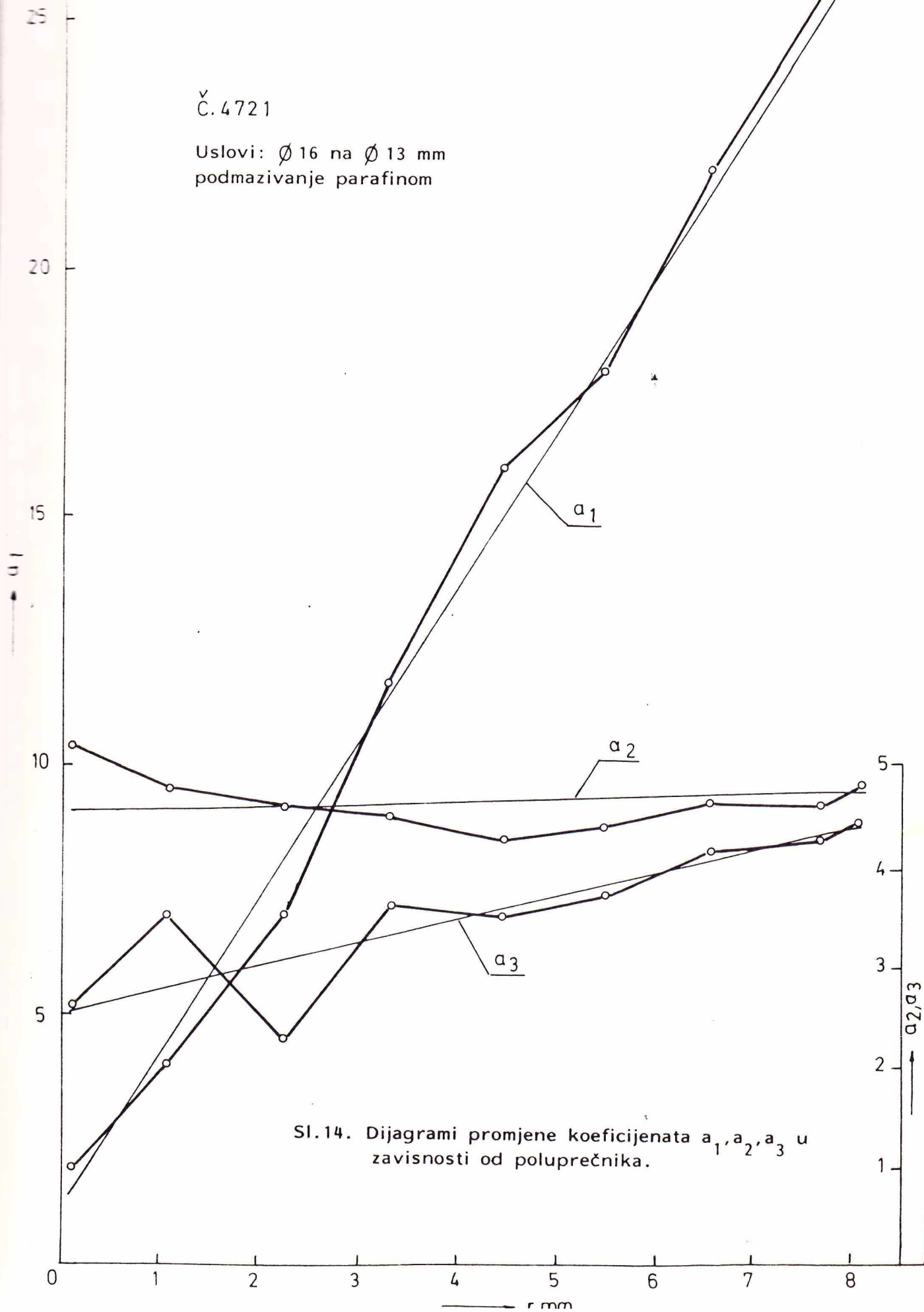
$a_2$

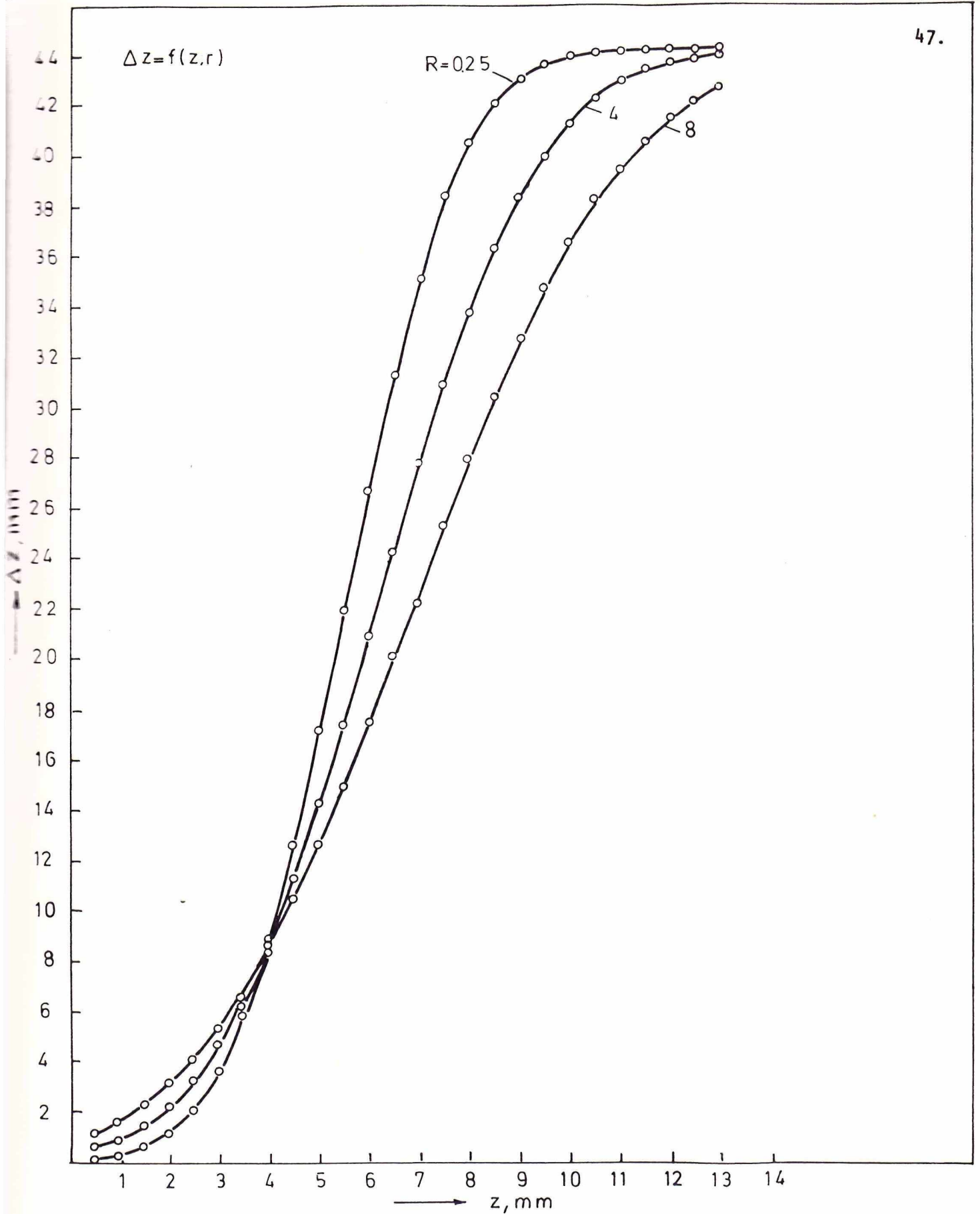
$a_3$

$a_2, a_3$

Sl. 14. Dijagrami promjene koeficijenta  $a_1, a_2, a_3$  u zavisnosti od poluprečnika.

$r$  mm

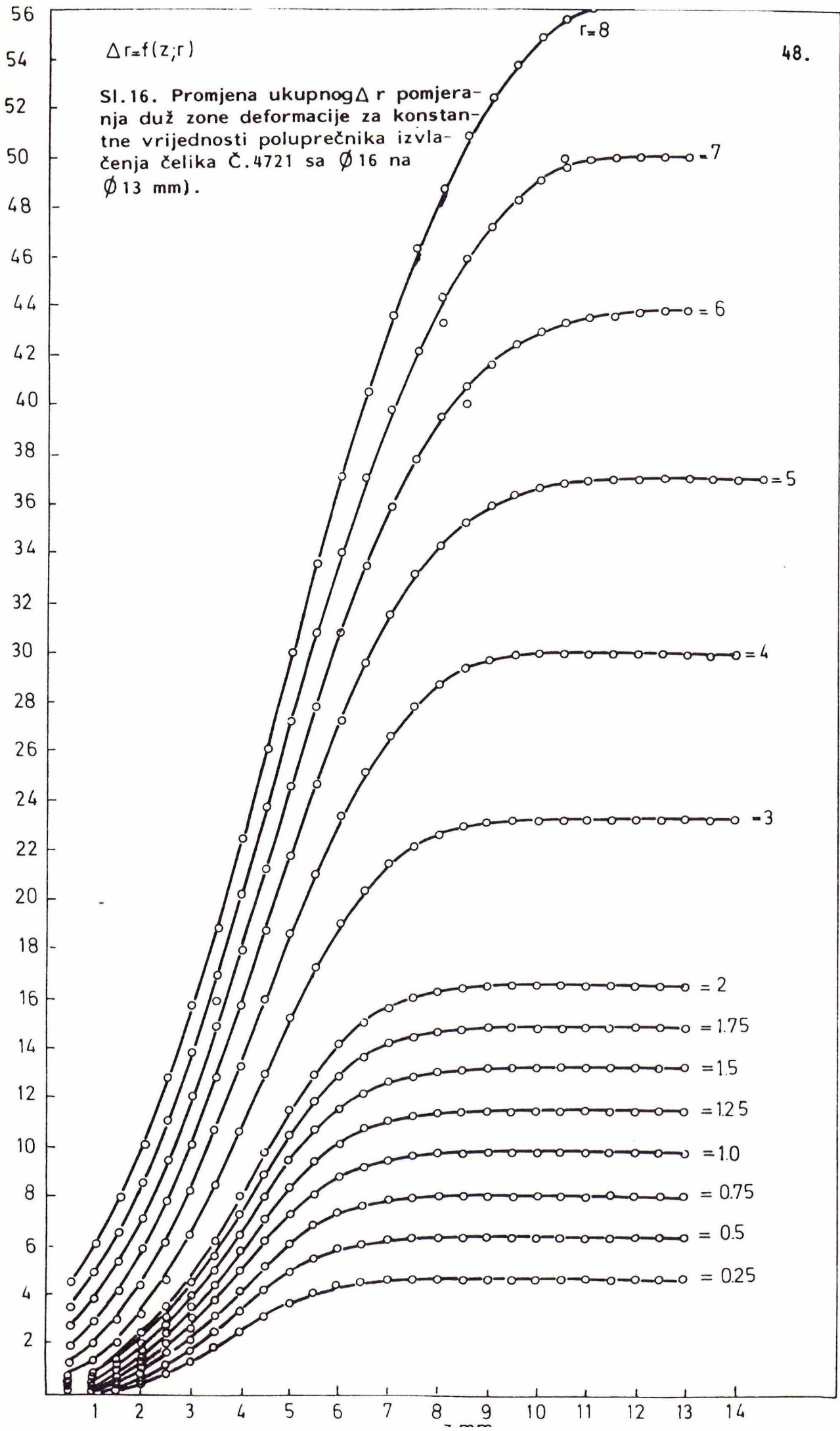


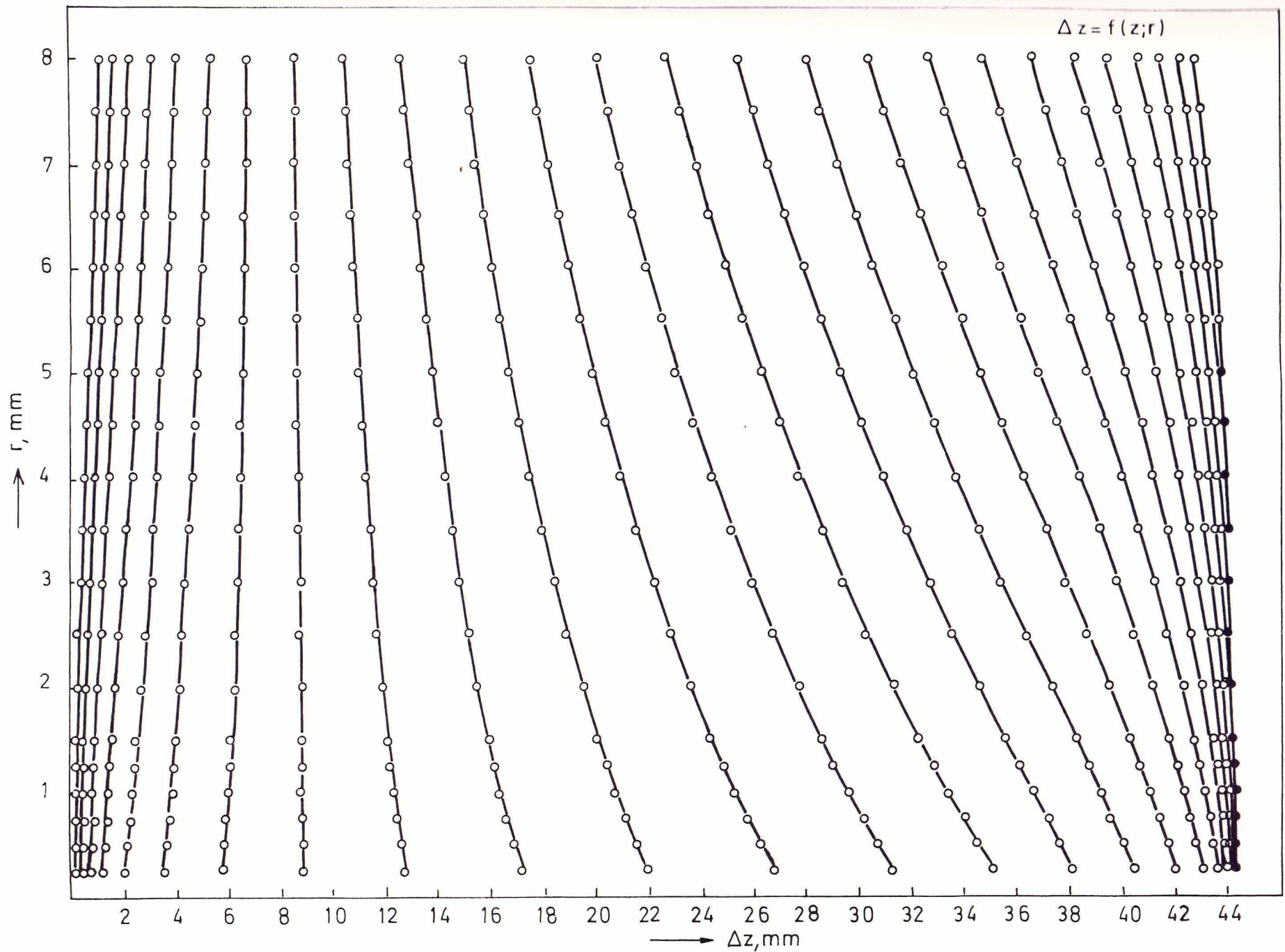


Sl.15. Promjena ukupnog pomjeranja  $\Delta z$  duž zone deformacije za konstantne vrijednosti poluprečnika (izvlačenje čelika Č.4721 sa  $\phi 16$  na  $\phi 13$  mm; sredstva za podmazivanje parafin; ugao matrice  $\alpha/2=0.147$  rad).

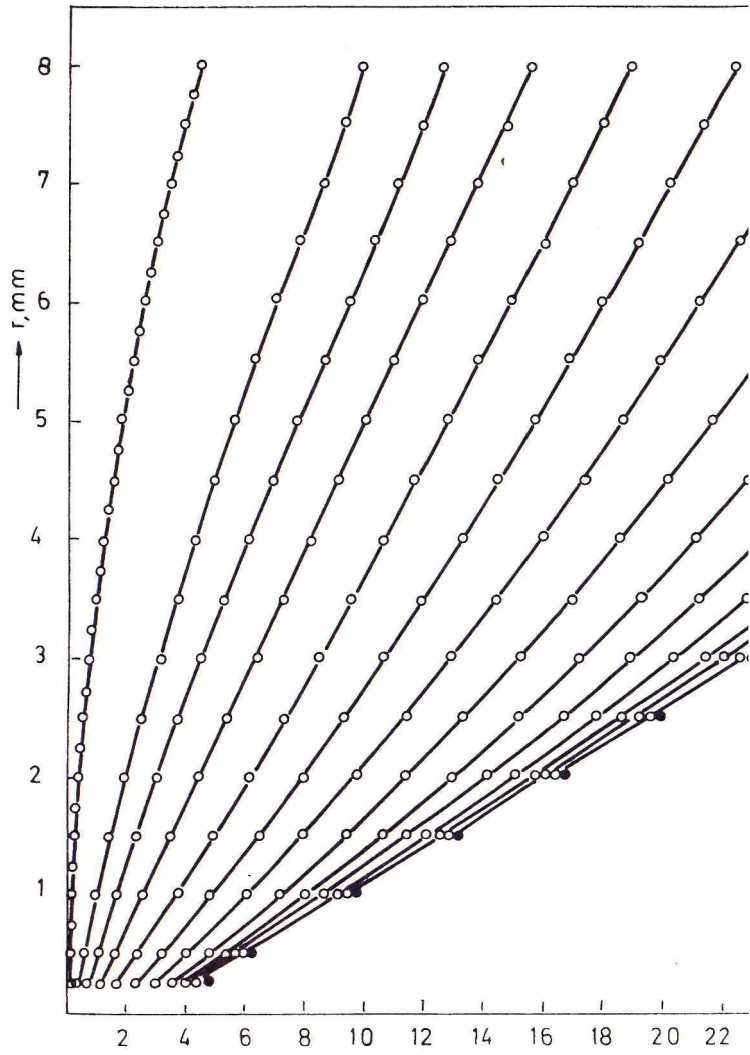
$\Delta r = f(z; r)$

Sl.16. Promjena ukupnog  $\Delta r$  pomjerna duž zone deformacije za konstantne vrijednosti poluprečnika izvlačenja čelika Č.4721 sa  $\phi 16$  na  $\phi 13$  mm).





Sl.17. Promjena ukupnog pomjeranja  $\Delta z$  duž zone deformacije u zavisnosti od poluprečnika pri izvlačenju čelika Č.4721 sa  $\varnothing 16$  na  $\varnothing 13$  mm.



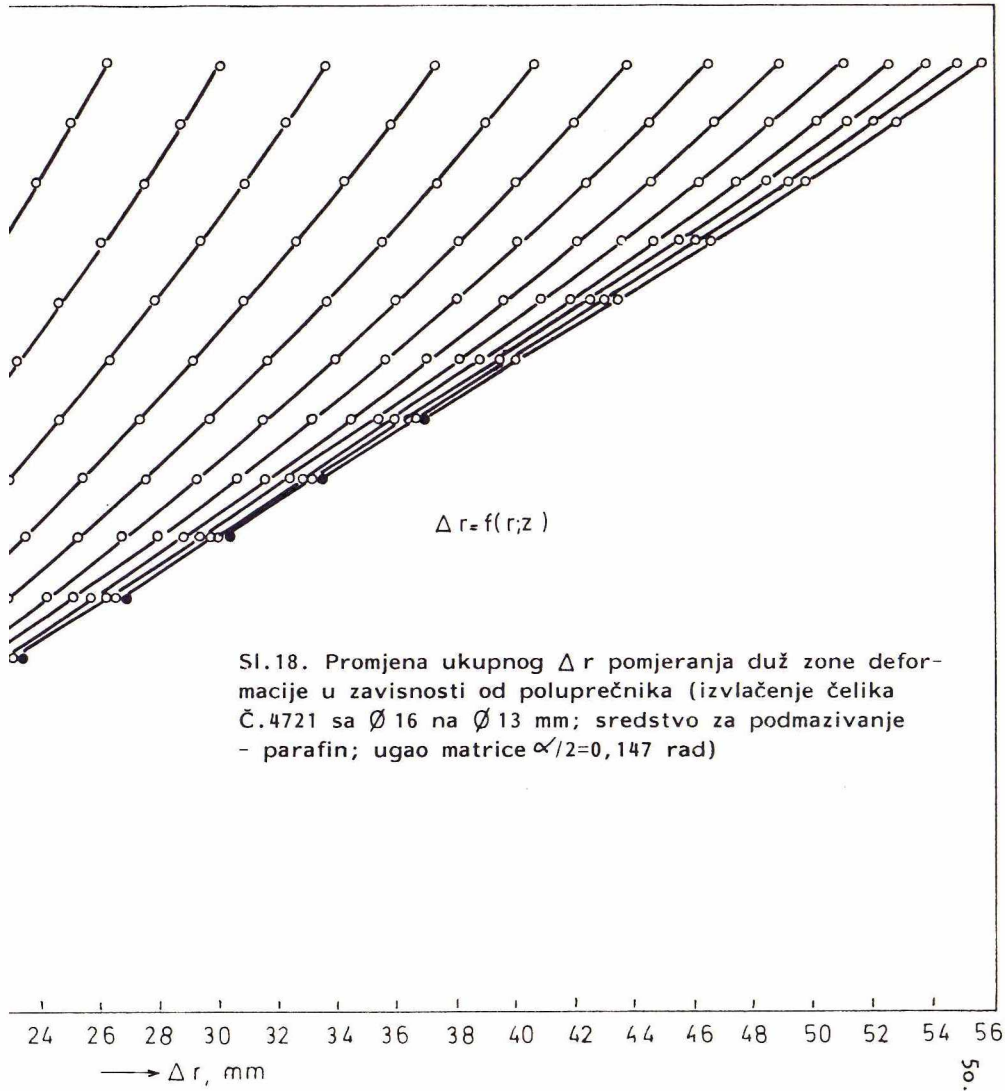


Tabela 3. Otpor deformaciji ispitivanih čelika

Čelik	Metod određivanja	Pokazatelj	Deformacije pri izvlačenju, $\gamma = z \ell n(d_0/d_1)$					
			0	0,0867	0,1299	0,197	0,2674	0,4147
Č.1220	Zatezanje	$\sigma_{o,2}$ N/mm <sup>2</sup>	294,44	490,83	538,0	582,5	609,41	652,84
	Pritiskivanje	$\sigma_{pv}$ N/mm <sup>2</sup>	273,88	478,0	517,93	614,25	539,91	560,58
	Tvrdoća	HRB	68,95	89,04	90,75	92,60	92,60	95,48
Č.4120			0	0,0405	0,146	0,199	0,2981	0,4523
	Zatezanje	$\sigma_{o,2}$ N/mm <sup>2</sup>	364,55	510,08	555,48	604,81	443,05	678,00
	Pritiskivanje	$\sigma_{pv}$ N/mm <sup>2</sup>	345	483,56	528,69	539,67	562,56	571,22
Č.4721	Tvrdoća	HRB	71,85	85,41	93,65	93,93	96,03	98,08
			0	0,1173	0,148	0,197	0,289	0,4424
	Zatezanje	$\sigma_{o,2}$ N/mm <sup>2</sup>	383,1	675,53	753,91	768,87	816,62	887,39
Č.4721	Pritiskivanje	$\sigma_{pv}$ N/mm <sup>2</sup>	405,49	610,34	629,39	645,4	671,89	723,41
	Tvrdoća	HRB	82,95	96,33	99,84	100,33	102,4	104,35

Tabela 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće HRB duž zone deformacije uzorka čelika Č.4721 pri izvlačenju sa 16 mm na 13 mm

Rastojanje od ulaza u zonu deformacije		ULAZ									IZLAZ			
		0	2	3,5	5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	14	16,5	
Odgovarajući stepen deformacije		0	0,0769	0,1346	0,1923	0,250	0,2885	0,327	0,3655	0,4039	0,4424	0,4424	0,4424	
Poprečni presjek, tj. mjesto na uzorku na kojem je mjere- na tvrdoća	0	80	91,5	95	95,5	-	102	96,5	88,5	-	106	106,5	101,5	
	1,5	89	94	100	102,5	102,5	104	104,5	105,5	106	107	107	105	
	3	89,5	95	100,5	103,	104,	104,5	105,5	106	106,5	104,5			
	4,5	91	97,5	101	103	104	104,5	105,5	106	106	104,5			
	(5.5) 6	91	100	102	102,5	102,5	104	103	103	104,5	102	105	105	

Tabela 5. Eksperimentalne i proračunate vrijednosti ukupnih  $\Delta r$  pomjeranja za čelik Č.4721 (izvlačenje sa 16 na 13 mm;  $\alpha/2=0,147$  rad; podmazivanje parafinom)

$r$ (mm)	Z, mm	$\Delta r \times 35, \text{mm}$			Odstupanje	
		Eksperiment	Po jednač. (34)	Po jednač. (35)	Po jednač. (34)	Po jednač. (35)
1	2	3	4	5	6	7
8.01	0,6	0	2,8	3,5	2,8	3,5
	0.451	3	3,8	4,4	0,8	1,4
	2.651	15	12,7	13,7	-2,3	-1,3
	4.851	28	27,8	28,8	-0,2	0,8
	7.051	41	42,8	44	1,8	3
	9.251	53	51,5	53,3	-1,5	0,3
	11.451	54	54,4	56,8	0,4	2,8
7.672	0	0	2,9	3,0	2,9	3,0
	1.351	9	7,7	7,7	-1,3	-1,3
	3.751	22	20,7	20	-1,3	-2
	5.951	35	36,9	35,9	1,9	0,9
	8.151	50	48,8	48	-1,2	-2
	10.351	54	53,7	53,6	-0,3	-0,4
	11.451	54	54,5	54,5	0,5	0,6
6.544	0	0	2,3	2,1	2,3	2,1
	0,451	1,5	3,1	3	1,6	1,5
	2.651	13	11,3	11,1	-1,7	-1,9
	4.851	26	25,2	25,1	-0,8	-0,9
	7.051	37	38,4	38,4	1,4	1,4
	9.251	45	45,2	45,3	0,2	0,3
	11.451	48	47,2	47,8	-0,8	-0,2
5.472	0	0		1,5		1,5
	1.551	0,5		4,8		4,3
	3.751	17		15,4		-1,6
	5.951	28,5	-	28,8		0,3
	8.151	38	-	37,3		-0,7
	10.351	40		39,9		-0,1
4.456	0	0	1,2	0,97	1,2	0,97
	0.451	2	1,9	1,5	-0,1	-0,5
	2.651	9,5	8,8	7,6	-0,7	-1,9
	4.851	21	21,3	19,3	0,3	-0,7
	7.051	31,5	31,4	29,2	-0,1	-2,3
	9.251	34,5	35	32,8	0,5	-1,7
	11.451	36	35,5	33,5	-0,5	-2,7

Nastavak tabele 5.

1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0.9	0.54	0,9	0,54
	1.551	3	3.1	2,5	0,1	-0,5
3.342	5.951	19	19.6	10.4	-0,7	-1,6
	8.151	25.5	25,3	25	0,6	1,4
	10.351	27	26.9	25,8	-0,2	-0,5
	-	-	-	-	-0,1	-1,2
	0	0	0.03	0.25	0.03	0,25
	0.451	0	0.08	0.45	0,08	0,45
	2.651	2	1.9	3,9	-0,1	1,9
2.256	4.851	10	10	12	0	2
	7.051	17	16.9	17,4	-0,1	0,4
	9.251	18	18	18,3	0	0,3
	0	0	0.28	0.08	0,28	0,08
	1.551	0.5	1	0.76	0,5	0,26
	3.751	4.5	3.9	4.9	-0,6	0,4
1.185	5.951	8	8.1	9.8	0,1	1,8
	8.151	10.5	10.9	11	0,4	0,5
	10.351	12	11.6	11	-0,4	-1
	0	0	0.01	0.01	0,01	0,01
	0.451	0	0.02	0.03	0.02	0.03
	2.651	0	0.35	0.75	0,35	0,75
0.113	4.851	2	1.7	2.9	-0,3	0,9
	7.051	3	3.2	3,7	0,2	0,7
	9.251	4	3.85	3,7	-0,15	-0,3

Tabela 6. Eksperimentalne i proračunate vrijednosti ukupnih  $\Delta z$  pomjeranja za čelik Č.4721

$r$ (mm)	$Z$ , mm	$\Delta r \times 35$ , mm		Odstupanje		
		Eksperiment	Po jednač. (34)	Po jednač. (36)	Po jednač. (34)	Po jednač. (36)
1	2	3	4	5	6	7
8.01	0	0	0.89	1.15	0,89	1,15
	0.451	1	1.2	1.54	0,2	0,54
	2.651	5	4,4	5.21	-0,6	0,21
	4.851	11.5	11,5	12,8	0	1,3
	7.051	22	22.3	23.4	0,3	1,4
	9.251	34	33.8	33.8	-0,2	-0,2
	11.451	42	42	20.6	0	-1,4
7.672	0	0	1.4	1.1	1,4	1,1
	9	2	3,2	2.87	1,2	9,87
	22	9.5	7,9	8.45	-2,6	-1,05
	35	16.5	16	18.1	-0,5	1,6
	50	25,5	26.7	29,3	1,7	3,8
	54	38	37,5	38.1	-0,5	0,1
	54	42	42	40.9	0	-1,1
6.544	0	0	0.76	0.88	0,76	0,88
	0.451	0	1.1	1.23	1,1	1,23
	2.651	5.5	4.4	4.87	-1,1	-0,63
	4.851	13,5	12.4	13,1	-1,1	-0,4
	7.051	22	24.4	24.9	2,4	2,9
	9.251	38	35.8	35.7	-2,2	-2,3
	11.451	42	42.8	41.96	0,8	-0,04
5.472	0	0	0.92	0.69	0.92	0,69
	1.551	1	2.6	2.27	1,6	1,27
	3.751	11	8.3	8.3	-2,7	-2,7
	5.951	17	18.8	14.8	1,8	-2,2
	8.151	32.5	31.7	32,3	-0,8	-0,2
	10.351	42	42.2	40.7	0,2	-1,3
4.456	0	0	0.46	0.53	0,46	0,53
	0,451	0	0.71	0.8	0,71	0,8
	2.651	45	4.2	4.3	-0,3	-0,2
	4.851	14.5	14.1	13.7	-0,4	-0,8
	7.051	28	28.6	27.5	0,6	-0,5
	9.251	40.5	39.6	38.6	-0,9	-1,9
	11.451	42	42.5	41.8	0,5	-0,2

Nastavak tabele 6

1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0.19	0.36	0,19	0,36
	1.551	0	1.2	1.64	1,2	1,64
	3.751	8.5	8	8.03	-0,5	-0,47
3.342	5.951	23.5	23.5	21.6	0	1,9
	8.151	37	37.2	35.7	0,2	-1,3
	10.351	42	41.8	42.0	-0,2	0,9
	0	0	0.12	0.23	0,12	0,23
	0.451	0	0.22	0.4	0,22	0,4
	2.651	2	2.9	3.54	0,9	1,54
2.256	4.851	15	14.3	14.6	-0,7	-0,4
	7.051	31.5	32	31.1	0,5	-0,4
	9.251	42	41.8	41.7	-0,2	-0,3
	0	0	0.03	0.13	0,03	0,13
	1.551	0	0.48	0.99	0,48	0,99
	5.951	26	25.6	24,5	0,2	1,2
1.185	8.151	38.5	39.4	39.6	0,9	1,1
	10.351	42	41,3	42.97	-0,7	0,97
	0	0	0.024	0.058	0,024	0,058
	0.451	0	0.06	0.13	0,06	0,13
	2.651	0.5	1.93	2.63	1,43	2,13
0.113	4.851	15.5	14,7	15.99	-0,8	0,49
	7.051	34	34,6	35.76	0,6	1,76
	9.251	42	41.7	43.94	-0,3	1,94

Tabela 7. Eksperimentalne i proračunate vrijednosti ukupnih  $\Delta r$  pomjeranja za čelik Č.4120(izvlačenje sa 16 mm na 14  $\alpha/2=0.157$  rad, bez podmazivanja)

r mm	z mm	$\Delta r \times 20$		Odstupanje, mm
		Eksperiment	Po jednač. (35)	
1	2	3	4	5
7,34	0	0,0	1.26	1.26
	1.6	3.5	4.24	7.4
	6.0	12.0	23.04	1.04
	8.2	27.0	28.58	1.58
	10.4	29.0	30.00	1,00
	12.6	29.0	30.18	1,18
6,24	0.5	1.5	1.67	0.17
	2.7	9.0	7.50	-1.50
	4.9	17.5	17.02	-0.48
	7.1	24.5	23.70	-0,80
	9.3	26.0	25.70	-0,30
	11.5	26.0	25.96	-0.04
5,14	0	0.0	0.90	0.9
	1.6	2.5	3.52	1.2
	3.8	10.5	11.20	0.7
	6.0	18.0	18.63	0.63
	8.2	21.5	21.36	-0.14
	10.4	21.5	21.74	0.24
4,04	12.6	21.5	21.76	0.26
	0.5	2.0	1.21	-0.79
	2.7	8.0	6.18	-1.82
	4.9	15.5	13.44	-2.06
	7.1	19.0	16.96	-3.04
	9.3	21.0	17.52	-3.44
2,94	11.5	21.0	17.54	-3,46
	0	0.0	0.55	0.55
	1.6	2.0	2.57	0.57
	3.8	7.0	8.39	1.39
	6.0	11.5	12.49	-0.01
	8.2	12.0	13.30	1.30
10.4	12.0	13.33	1.33	

Nastavak tabele 7.

1	2	3	4	5
	0.5	1.0	0.66	-0.32
	2.7	3.5	4.06	0.56
1.84	4.9	7.0	8.01	1.01
	7.1	9.0	0.06	0.06
	9.3	9.0	9-1	0.10
	0	1.5	9.20	-1.30
	1.6	3.5	1.20	-2.30
	3.8	4.5	3.77	-0.73
0.74	6.0	4.5	4.83	0.33
	8.2	4.5	4.90	0.40
	10.4	4.5	4.90	0.40

Tabela 8. Eksperimentalne i proračunate vrijednosti ukupnih  $\Delta z$  pomjeranja za čelik Č.4120 (izvlačenje sa 16 mm;  $\alpha/2=0.157$  rad, bez podmazivanja)

r mm	z, mm	$\Delta z \times 20, \text{ mm}$		Odstupanje mm
		Eksperiment	Po jednač. (34)	
7.34	0.0	0.0	1,07	1.07
	1.6	3.5	3.89	0.39
	3.8	13.0	12.56	-0.44
	6.0	22.0	22.52	0.52
	8.2	27.0	27.53	-0.47
	10.4	29.0	28.64	-0.36
	12.6	29.0	28.75	-0.25
6.24	0.5	1.50	2.04	-0.54
	2.7	9.0	8.44	-0.54
	4.9	17.5	17.99	-0.51
	7.1	24.5	24.02	-0.48
	9.3	25.0	25.63	0.63
	11.5	26.0	25.81	-0.19
5.14	0.0	0.0	0.50	0.50
	1.6	2.5	2.57	0.07
	3.8	10.5	10.20	0.30
	6.0	18.0	18.37	0.37
	8.2	21.5	21.22	-0.28
	10.4	21.5	21.54	0.04
	12.6	21.5	21.55	0.05
4.04	0.5	2.0	2.27	0.27
	2.7	8.0	7.90	-0.10
	4.9	15.5	15.26	-0.24
	7.1	19.0	19.60	0.60
	9.3	21.0	20.75	-0.25
	11.6	21.0	20.88	-0.12
2.94	0.0	0.0	0.28	0.28
	1.6	2.0	1.77	-0.33
	3.8	7.0	7.16	0.16
	6.0	11.5	11.30	-0.20
	8.2	12.0	12.04	0.04
	10.4	12.0	12.07	0.07

Nastavak tabele 8.

1	2	3	4	5
	0.5	1.0	0.89	-0.11
	2.7	3.5	3.56	0.06
	4.9	7.0	7.04	0.04
1.84	7.1	9.0	8.80	-0.20
	9.3	9.0	9.15	0.15
	0.0	0.0	0.28	0.25
	1.6	1.5	1.33	-0.67
	3.8	3.5	3.60	0.10
0.74	6.0	4.5	4.44	-0.06
	8.2	4.5	4.50	0
	10.4	4.5	4.50	0

Tabela 9. Eksperimentalne i proračunate vrijednosti ukupnih  $\Delta r$  pomjeranja za čelik Č.4120 (izvlačenje sa  $16\text{mm } 14$ ,  $\alpha/2 = 0.157$ , bez podmazivanja)

1	r, mm	z mm	$\Delta r \times 20$ , mm		Odstupanje, mm
			Eksperiment	Po jednač. (34)	
		0.0	0.0	0.04	0.04
		1.6	1.0	0.28	-0.72
		3.8	3.0	2.06	-0.94
7.34		6.0	6.0	7.16	1.16
		8.2	14.0	13.25	-0.75
		10.4	16.5	16.30	-0.20
		12.6	16.5	16.93	0.43
		0.5	1.0	0.09	-0.91
		2.7	1.5	1.10	-0.40
		4.9	5.0	5.33	0.33
6.24		7.1	12.0	11.92	-0.08
		9.3	16.0	15.75	-0.25
		11.5	16.5	16.64	0.14
		0.0	0	0,03	0.03
		1.6	0	0.30	0.30
		3.8	3.5	2.75	-0.75
5.14		6.0	8.5	9.35	0.85
		8.2	16.0	15.07	0.93
		10.4	16.5	16.67	0.17
		12.6	16.5	16.68	0.18
		0.5	0.0	0.14	0.14
		2.7	2.0	1.67	-0.33
		4.9	7.0	7.25	0.25
4.04		7.1	14.0	13.84	-0.16
		9.3	16.5	16.37	-0.13
		11,5	16,5	16.68	0.18
		0.0	0.0	0.09	0.09
		1.6	1.0	0.74	-0.26
		3.8	5.0	5.08	0.08
		6.0	12.5	12.55	0.05
2.94		8.2	16.5	16.22	-0.28
		10.4	16.5	16.72	0.22

Nastavak tabele 9.

1	2	3	4	5
	0.5	0.5	0.05	- 0.45
	2.7	2.0	1.50	- 0.50
	4.9	8.5	8.93	0.43
1.84	7.1	16.5	15.81	- 0.69
	9.3	16.5	16.96	0.46
	0.0	0.0	0.02	0.02
	1.6	1.5	1.23	-0.27
	3.8	6.0	6.16	0.16
0.74	6.0	13.0	13.02	0.02
	8.2	16.5	16.23	-0.27
	10.4	16.5	16.72	0.22

Tabela 10. Eksperimentalne i proračunate vrijednosti ukupnih  $\Delta r$  pomjeranja za čelik Č.4120 (izvlačenje za 16 mm na 14 mm,  $\alpha/2 = 0.147$  rad; bez podmazivanja)

r mm	z, mm	$\Delta r \times 20, \text{ mm}$		Odstupanje mm
		Eksperiment	Po jednač. (34)	
1	2	3	4	5
7.34	0.0	0.0	1.25	1.25
	1.4	4.0	3.99	-0.01
	3.6	14.0	13.14	-0.86
	5.8	22.0	23.02	1.02
	8.0	28.0	27.36	-0.64
	10.2	28.0	28.13	0.13
6.24	0.3	1.5	1.38	-0.12
	2.5	6.5	6.52	0.02
	4.7	15.0	15.08	0.08
	6.9	21.0	20.86	-0.14
	9.1	22.5	22.45	-0.05
	11.3	22.5	22.63	0.13
5.14	0.0	0.0	0.65	0.65
	1.4	3.5	3.05	-0.45
	3.6	12.0	12.23	0.23
	5.8	19.5	19.27	-0.23
	8.0	20.5	20.54	0.04
	10.2	20.5	20.59	0.09
4.04	0.3	1.5	1.43	-0.07
	2.5	6.5	6.53	0.03
	4.7	13.0	13.04	0.04
	6.9	16.0	15.79	-0.21
	9.1	16.0	16.17	0.17
2.94	0.0	0.06	0.46	0.46
	1.4	2.5	2.20	-0.30
	3.6	8.0	8.18	0.18
	5.8	12.0	11.74	-0.26
	8.0	12.0	12.17	0.17



Nastavak tabele 10.

1	2	3	4	5
1.84	0.3	1.5	1.36	-0.14
	2.5	4.0	4.23	0.23
	4.7	7.0	6.76	-0.24
	6.9	7.5	7.52	0.02
	9.1	7.5	7.60	0.10
0.74	0.0	0.0	0.18	0.18
	1.4	1.0	0.90	-0.1
	3.6	3.0	3.05	0.05
	5.8	4.0	3.96	-0.04
	8.0	4.0	4.02	0.02

Tabela 11. Eksperimentalne i proračunate vrijednosti ukupnih  $\Delta z$  pomjeranja za čelik Č.4120 (izvlačenje za 16 mm na 14 mm;  $\alpha/2=0.147$  rad; bez podmazivanja).

r mm	z mm	$\Delta z \times 20, \text{ mm}$		Odstupanje mm
		Eksperiment	Po jednačini (34)	
1	2	3	4	5
7.34	0.0	0.0	0.37	0.37
	1.4	1.0	1.08	0.08
	3.6	5.0	3.99	-1.01
	5.8	8.0	9.33	1.33
	8.0	16.0	14.97	-1.03
	10.2	18.0	18.37	0.37
6.24	0.3	1.0	0.13	-0.87
	2.5	2.0	1.65	-0.35
	4.7	7.0	7.41	0.41
	6.9	15.0	14.73	-0.27
	9.1	18.0	17.83	-0.17
	11.3	18.0	18.26	0.26
5.14	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
	-	-	-	-
4.04	0.3	0.0	0.04	0.04
	2.5	2.5	1.44	-1.06
	4.7	8.5	9.27	0.77
	6.9	18.5	17.50	-1.0
	9.1	18.5	19.13	0.63
2.94	1.4	1.5	1.08	-0.42
	3.6	6.5	6.75	0.25
	5.8	15.0	14.84	-0.16
	8.0	18.0	17.88	-0.12
	10.2	18.0	18.18	0.18

Nastavak tabele 11.

1	2	3	4	5
	0.3	1.5	0.08	-1.42
	2.5	2.5	2.62	0.12
1.84	4.7	12.5	12.50	0.0
	6.9	18.0	17.81	-0.19
	9.1	18.0	18.18	0.18
	1.4	2.0	1.30	-0.7
	3.6	8.0	8.49	0.49
0.74	5.8	17.0	16.43	-0.57
	8.0	18.0	18.14	0.14
	10.2	18.0	18.20	0.20

#### 4.7. ANALIZA PROFILA ZONE DEFORMACIJE

Mogućnosti korišćene eksperimentalne metode su, jednim dijelom, ograničile dobijanje pouzdanih zaključaka o uticaju svih ispitivanih faktora na profil zone pošto se čvorne tačke nijesu, u većim slučajevima, nalazile na istim položajima zone deformacije. Zbog toga će biti prikazani samo oni uticajni faktori kod kojih nije uticalo ograničenje eksperimenta.

##### 4.7.1. Uticaj stepena deforamcije

Izvlačenje šipki prečnika 16 mm sa različitim stepenima deformacije bitno utiče na profil zone deformacije. Već su istaknute karakteristike za najveći stepen deformacije ( $\phi = \ln d_0^1/d_1^2 \approx 0.45$ ). Kod nižih stepena deformacije profil zone deformacije se pojednostavljuje. Tako je za izvlačenje sa redukcijom prečnika od 2 mm ( $\approx 0,25$ ) karakteristično odsustvo intenzivnijeg z-pomjeranja na ulazu u zonu deformacije već početak deformacije odgovara ravnomjernoj deformaciji izdvojenog poprečnog presjeka. U nastavku zone deformacija odgovara najvećim stepenima poslije "homogenog presjeka", s tim što se konačne razlike z-pomjeranja na osi i površini nešto manje.

Manji stepeni deformacije (pri redukciji prečnika 1 i 0.6 mm) odmah na ulazu u zonu deformacije počinje nehomogeno z-pomjeranje stvarajući konveksan oblik u odnosu na osu izvlačenja. Konačno formirane razlike površine i ose se smanjuju sa smanjenjem redukcije pokprečnog presjeka.

Promjene u pravcu r-koordinate u svim slučajevima zadržavaju istaknute karakteristike za najveće stepene deformaciji s tim što se oblasti promjene mijenjaju saglasno promjeni dužine zone deformacije. Profili zona su prikazani na slici 19.

#### 4.7.2. Uticaj polaznog prečnika

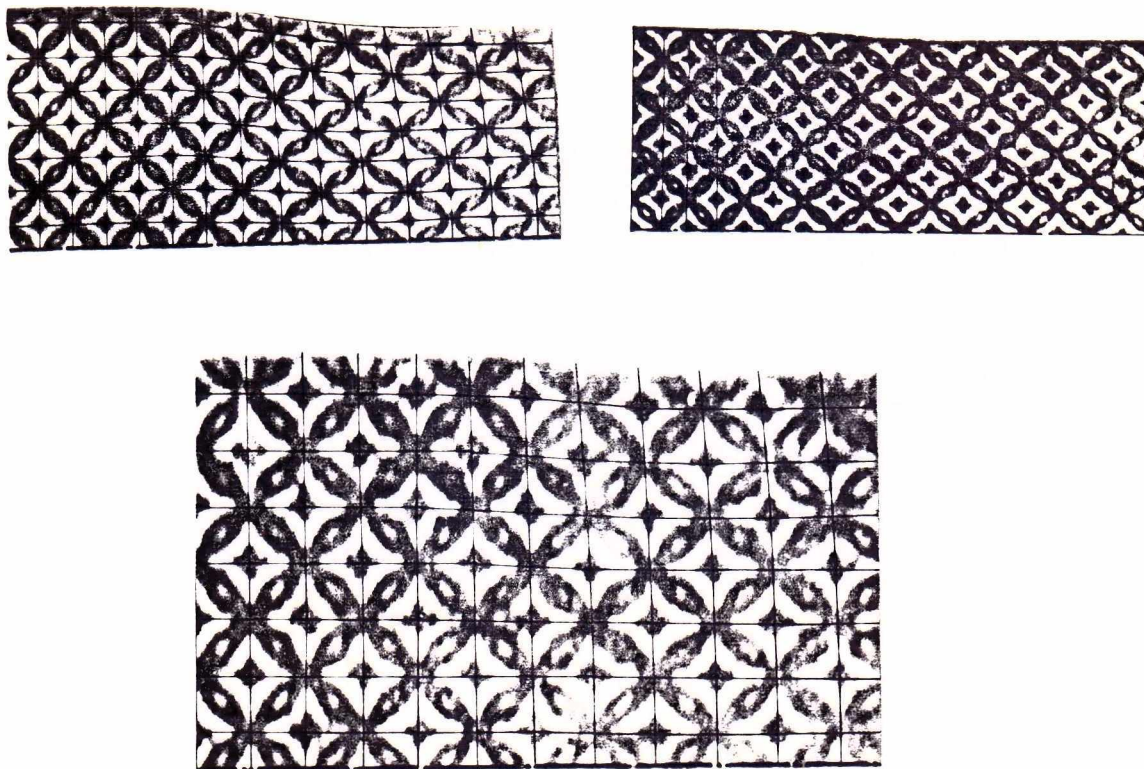
Pri izvlačenju šipki prečnika 32 i 42 mm stepen deformacije izražen redukcijom poprečnog presjeka ne pokazuje jasno uočljive razlike na profil zone deformacije. Medjutim, u svim uslovima izvlačenja šipki ovakvog poprečnog presjeka se uočava početak z-pomjeranja znatno prije početka geometrijske zone deformacije. Ovakva vankontaktna deformacija započinje na osi šipke i na udaljenosti od zone deformacije koje može biti veće od same geometrijske zone. Približavanje geometrijskom ulazu oblast obuhvaćena deformacijom se znatno širi u r-pravcu, sa stalnim povećanjem razlika između ose i ostalih r-nivoa. Na ulazu u geometrijsku zonu deformacije dobija se navedeni konveksan oblik. Duž geometrijske zone površina jednim dijelom ima veće  $\Delta z$ -pomjeranje od potpovršinskih slojeva a manje od pomjeranja na osi. Formirani profil linije koja odgovara vertikalnom presjeku se sastoji od dva dijela:

- centralni koji je konveksan u odnosu na osu i obuhvata najveći dio meridijalne ravni, i
- periferni koji je konkavan u odnosu na osu šipke i nalazi se neposredno pri površini.

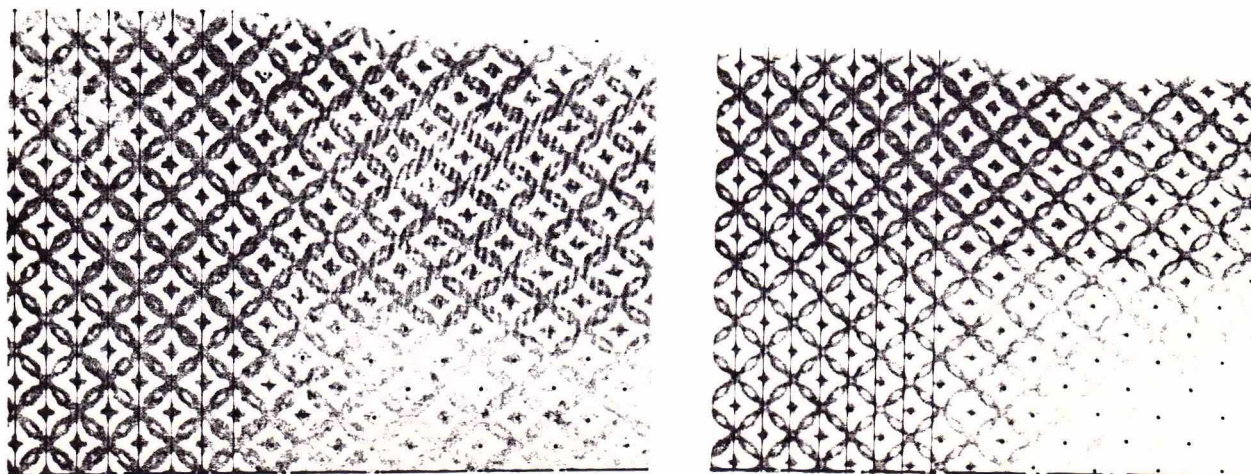
Ovakav profil se zadržava praktično do izlaza iz geometrijske zone deformacije. Na prelazu sa koničnog u cilindrični dio periferna oblast dobija karakteristike kao na ulazu u zonu deformacije tako da se, konačno, formira jedinstven oblik linije koja odgovara nehomogenoj deformaciji sa jednom kontaktnom površinom pokretnog metala i nepokretnog alata.

Profil zona za različite uslove izvlačenja su prikazani na slikama 20 i 21.

Uočena vankontaktna deformacija znatno razdvaja uslove tečenja pri izvlačenju šipki prečnika 32 i 42 mm u odnosu na šipke prečnika 16 mm.



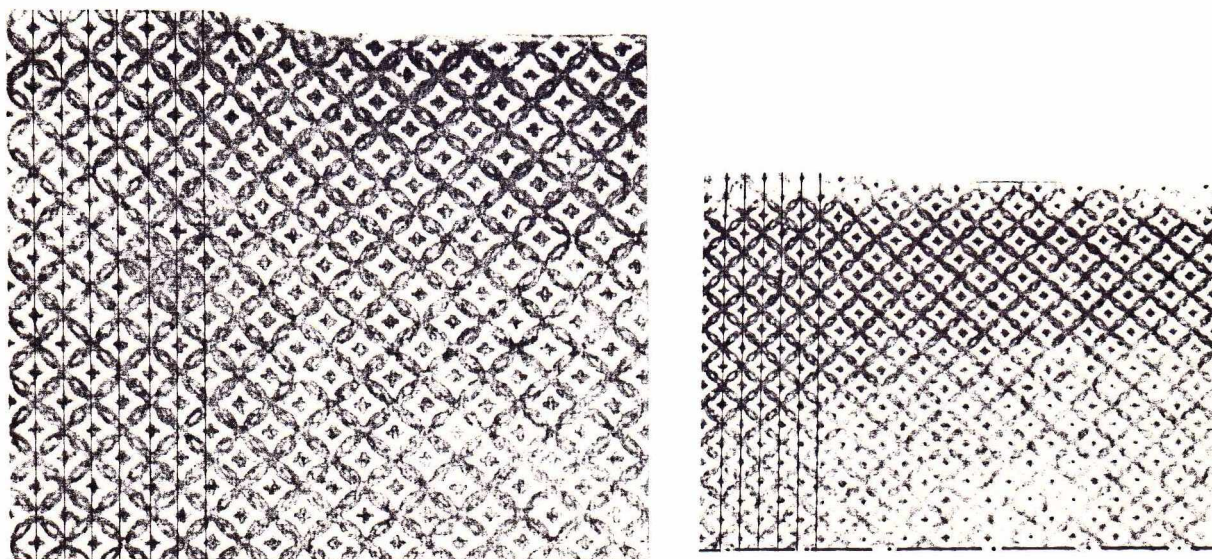
Slika 19. Profili zona deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 polaznog prečnika  $d_0 = 16$  mm sa različitim stepenima deformacije:  
 a)  $\phi = 0,25$  (  $d = 2$  mm); b)  $\phi = 0,13$  (  $d = 1$  mm); c)  $\phi = 0,87$  (  $d = 0,6$  mm)



Slika 20. Profili zona deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.4120 polaznog prečnika  $d_0 = 32$  mm sa različitim stepenima deformacije:  
 a)  $\phi = 0,129$  (  $d = 2$  mm); b)  $\phi = 0,635$  (  $d = 1$  mm).



Slika 21. Profil zone deformaciji pri izvlačenju šipki čelika Č.4721 polaznog prečnika  $d_0 = 32$  mm sa stepenom deformacije  $\phi = 0.2$  ( $d = 3$  mm).



Slika 22. Profili zone deformaciji pri izvlačenju šipki čelika Č.4721 polaznog prečnika  $d_0 = 42$  mm sa stepenom deformacije

- a)  $\phi = 0.975$  ( $d = 2$  mm)
- b)  $\phi = 0.48$  ( $d = 1$  mm)

Druga karakteristika istaknuta za geometrijsku zonu deformacije šipka većeg prečnika ne može se u potpunosti odbaciti za prečnike 16 mm zbog ograničenosti eksperimenta sa stanovišta gustine čvorova u potpovršinskom sloju.

Sljedeća karakteristika deformacije pri izvlačenju koja nije uočena samo kod najvećih ispitivanih stepena deformacije je formiranje u centralnom dijelu šipke oblasti čija površina leži ispod nivoa površine meridijalne ravni. Dobijeni oblik centralnog "korita" ima širinu koja zavisi od ostalih uslova deformacija. Kod šipki prečnika 32 i 42 mm njegova širina se neznatno mijenja pri nastavljanju deformacije. Centralno "korito", kako je već istaknuto, se kod izvlačenja punih šipki manifestuje formiranjem "čaše" na njenom kraju. Detaljnija ispitivanja pokazuju da se ravnomjernost pomjeranja u oba pravca znatno veća u ovoj, nego u ostalim oblastima. Ovakvo ponašanje može biti objašnjeno samo detaljnim poznavanjem naponskog stanja pošto je sigurno njegova posledica. Centralni dio je prikazan kao svijetli dio meridijalne ravni na slici 21.

Pored navedenih specifičnosti, kao zajednička karakteristika svih profila zone nezavisno od polaznog prečnika i uslova deformacije, može se uočiti veća vrijednost konačnog  $\Delta z$ -pomjeranja na ose nego na površini.

Na slikama 20 do 22 se to uočava po savijanju linije čvorova, pri površini posmatrano pod uglom u odnosu na osu izvlačenja.

#### 4.8. KINETIČKI PARAMETRI PROCESA

Eksperimentalno određene vrijednosti koordinata tačaka su preračunate na odgovarajuće priraštaje, a zatim određeni koeficijenti modelnih jednačina (35) i (36). Dobijeni rezultati su prikazani u tabelama 12, 13 i 14. U tabelama su uporedo prikazani geometrijski parametri zone deformacije i izmjerene vrijednosti sile izvlačenja.

Pošto modelne jednačine predstavljaju polje mjernih veličina, stvarna je mogućnost njihovog proračuna u svakoj tački zone deformacije. Sve veličine koje se određuju na osnovu modelnih veličina su prevedene na odgovarajuće jednačine, a zatim proračunate zadavanjem konačnog koraka  $r$  i  $z$  koordinata, tj. oblast deformacije je predstavljeno odgovarajućim čvornim tačkama kao mjestima presjeka  $r$  i  $z$  koraka. U tom smislu, korak po  $z$ -osi je zadržan kao konstantan i iznosio je  $1/24$  geometrijske zone deformacije. Korak po  $r$ -osi je varirao zavisno od prečnika šipke i iznosio je  $r_o/34$  za  $d_o=16$  mm,  $r_o/64$  za  $d_o=32$  mm i  $r_o/84$  za  $d_o=42$  mm. Izbor koraka je izvršen tako da omogući dovoljnu preciznost pri određivanju integralnih veličina.

##### 4.8.1 BRZINE POMJERANJA

Radikalna brzina pomjeranja čestice  $V_r$  se dobija iz jednačine (35) diferencijom po  $z$ -u prevedenom na vremensku osu:

$$V_r = \frac{\partial(\Delta r)}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\partial(\Delta r)}{\partial z} = - \frac{1}{K.U.V_o} \frac{Y_1}{Y_3} \exp(-(Y_2/Y_3)^2). \quad (37)$$

gdje je:

- $c$  - konstanta za preračunavanje  $z$  na vrijeme;
- $k$  - koeficijent koji uzima u obzir prelazak sa jedne na drugu brzinu izvlačenja;
- $U$  - korišćeno uvećanje pri očitavanju koordinata čvorova;
- $V_o$  - brzine izvlačenja kao brzina ulaska metala u zonu deformacije;

promjene  $V_z$ -brzina na početku zone deformacije gdje se uočava znatno manja nehomogenost njihovog rasporeda po poprečnom presjeku. Međutim, nehomogeno polje se stvara u samoj zoni sa povećanjem razlika između površine i ose u najvećem dijelu zone deformacije. Tek pošto brzina ose dostigne konačnu vrijednost

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= a_1 r + a_2 \\ Y_2 &= z - a_3 r - a_4 \\ Y_3 &= a_5 r + a_6 \end{aligned} \right\} \text{ - funkcija } r \text{ - koordinate u izrazu za veličinu pomjeranja}$$

Diferenciranje izraza za  $\Delta r$ , radi određivanja brzine  $V_r$ , je neophodno zbog toga što je  $\Delta r$  određeno kao ukupna vrijednost pomjeranja.

Ozna brzina je određena iz jednačine (36) svodjenjem na pomjeranje po jediničnom koraku mreže u odgovarajućem vremenskom intervalu:

$$V_z = \frac{\Delta z}{K \cdot Z_o \cdot V_o}, \quad (38)$$

gdje je:

$$z = b_1 + b_2 \operatorname{erf}(V_1/V_2) \text{ - jednačina pomjeranja u } z\text{-pravcu};$$

$$z_o \text{ - korak mreže pri korišćenom uvećanju};$$

$$\left. \begin{aligned} V_r &= z - b_2 r - b_3 \\ V_2 &= b_4 r + b_5 \end{aligned} \right\} \text{ - funkcija } r\text{-koordinate u veličini } z\text{-pomjeranja.}$$

Kako je minimalni broj čvornih tačaka u kojima je proračunata jedna komponenta brzine iznosio 814 to će rezultati biti prikazani na odgovarajućim slikama.

Saglasno planu eksperimenta, svaki uzorak je izvlačen u različitim uslovima zbog toga je analiza vršena sa stanovišta uticaja variranih veličina procesa na osnovu zakonitosti promjene date veličine.

Tabela 12. Vrijednosti koeficijenata, geometrijskih parametara zone deformacije i sila izvlačenja za čelik Č.1220.

Koef. brz. SIFRA <sub>12</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	μ	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	μ <sub>11</sub>
1111	0,99941	0,6253	0,39842	3,9704	0,05592	2,6254	5,0554	0,36174	6,0392	-0,32018	2,8952	8,0000	30	65	270,5	186,5	116,5
1112	1,2752	-0,41982	-0,13231	7,8356	0,19245	0,18235	4,3684	0,41272	6,9875	-0,057328	2,2585	8,0000	30	66	277,5	153,5	21,167
1121	0,98594	0,2311	0,2253	3,738	-0,114	2,1798	5,5854	0,29662	5,6851	0,21088	1,2195	7,45	30	75	226	121,5	28,3
1122	1,0359	-0,21195	0,12434	5,6674	-0,55445	2,0347	6,1112	0,19479	8,2016	0,024589	2,5545	7,45	30	74,5	270	157	32,5
1131	1,0349	0,15672	0,07844	6,1763	0,033433	1,6972	6,7187	0,71393	7,614	-0,092583	2,3617	6,9667	30	86,5	317	156	27,50
1132	1,0081	0,08462	-0,10386	9,8269	-0,27311	3,2623	7,6597	0,30743	10,445	-0,083762	2,6072	6,9667	30	86,5	386	228	27,50
1142	2,9418	0,41526	0,019073	12,002	0,28375	2,0349	18,182	0,2055	13,148	0,28139	2,9163	8,000	30	66	566	185	47,50
1142	2,7982	0,001666	0,14577	8,3135	0,29542	2,1402	18,0591	-0,05277	8,8395	0,26744	1,1152	8,000	28,89	61,5		35	35
1161	1,1716	0,057773	0,30305	5,7521	0,029218	2,2025	6,3138	0,35967	7,3697	0,18954	1,6285	7,85	20	43	234,5	101	36,67
1162	1,2858	0,35874	0,30583	7,1748	0,14151	1,9079	7,6018	0,074467	10,164	-0,42306	3,3317	7,875	20	43	297	102	28,33
1171	0,8245	0,53431	0,079446	9,0280	0,20892	1,2507	5,4559	0,15843	10,139	0,41832	1,7426	6,95	20,0	55,5	259	143,5	30,5
1172	0,73274	0,2944	-0,07835	9,6521	0,17635	1,1478	4,842	0,078588	10,507	0,15821	1,1942	6,95	20	56,5	244	130	
1182	0,52729	0,14525	0,085641	5,99585	-0,09932	2,5526	2,7855	0,24964	7,2077	0,28642	3,5389	7,933	30	64,5	242,5	167	16,67
1211	1,0133	0,55085	0,2261	5,0339	0,1712	3,2341	5,5176	0,40324	5,6486	0,0016562	2,0403	7,933	30	65	260	1315	
1221	1,2095	1,0883	0,36964	4,6778	0,53723	0,18633	5,9383	0,20448	6,6602	0,029339	2,6616	7,44	30	775	222	120	
1241	2,8462	1,5497	0,16524	6,2518	0,25623	2,6853	1,84672	0,12883	8,2531	0,27789	2,9288	8,0305	28,89	61	410	59	
1311	1,0409	0,49931	0,26657	5,3736	0,032387	1,937	4,0021	0,40259	7,0561	0,0063492	1,7616	8,000	30	66	270,5	108	44,17
1321	1,0032	0,001725	0,12216	5,7259	0,129939	2,4859	5,9212	0,11832	7,8407	0,074482	2,7825	7,45		74	260	137	17,835
1331	1,1254	0,15495	0,028907	6,5975	0,10235	1,3291	8,0463	0,02809	8,6605	0,21531	2,1738	6,9667	30	84	366	1465	22,17
1341	2,7143	0,13228	0,031873	6,5857	0,34886	1,18852	1,5070	0,19799	8,4122	0,33574	2,4372	7,9266	28,89	61,5	394,5	197,5	19,83
1411	0,88144	0,13932	0,50006	4,94435	0,02234	1,889	5,2307	0,35697	6,4521	0,029564	3,5481	7,9333	30	64,5	248,5	1185	36,667
1421	0,95432	0,53113	0,10172	3,3148	0,017105	1,6712	5,12766	0,29904	4,0575	0,14762	2,3771	7,45	30	75	171	28,41	22,083
1441	2,6858	0,55389	0,19602	7,4968	0,29199	2,0783	1,7541	0,13671	1,0413	0,32244	2,5962	7,8774	28,89	61,0	434,5	107,5	28,41
2111	0,9265	0,1923	0,3244	7,7772	0,052975	3,6799	4,6568	0,37626	1,0926	0,020662	3,6235	1,5952	355	126	34,5	20	35
2331	0,34115	0,015172	0,061914	7,8321	0,30844	6,3654	11,229	2,7295	19,272	3,5823	0,79509	15,5					43,33
2351	0,6712	0,14609	0,27866	6,9550	0,012046	3,7952	3,5523	0,32095	8,8566	0,093379	2,8700	16,075	306	126	43,5	20	150
2361	0,28548	0,33814	0,12301	5,6334	0,057797	0,67874	1,8245	0,27213	5,5702	0,28708	4,5711	15,0					136,8
3111	0,19210	0,70497	0,15425	5,9903	0,19374	7,15573	1,04300	0,27939	6,4149	0,38937	7,7568	19,925					136,63
3311	0,20586	0,13197	0,26433	0,353	0,16459	6,6548	0,69241	0,23128	8,4516	0,050403	3,4216	19,900					208,75

Tabela 13. Vrijednosti koeficijenata, geometrijskih parametara zone deformacije i sila izvlačenja za čelik Č.4120.

Šifra	Koef. brzine	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	R <sub>0</sub>	U	Z <sub>0</sub>	Z <sub>k</sub>	Z <sub>h</sub>	
4111	1	1,2384	0,70475	0,37666	4,5963	0,076526	2,8706	3,5346	0,38277	7,1734	0,24181	3,1023	6,0833	30	64,5	285	145,5	22
4112	2	1,165	0,49802	0,31305	3,7296	0,063101	2,3762	4,2642	0,43270	5,4332	0,11641	2,6897	8,0667	30	65,5	244,5	120	24,17
4131	1	1,1176	0,029214	0,15882	6,5683	0,23237	0,5236	7,4496	0,15770	8,5670	0,0726	5,1207	6,950	30	83	311,5	161	33
4132	2	1,0240	0,52494	0,44903	6,2809	0,46316	0,01942	6,16063	0,17787	9,7548	0,35091	3,1020	6,95	30	86	349,0	202,5	33,3
4161	1,399	0,41795	0,19406	0,19406	7,425	0,24609	1,2324	6,1502	0,33232	8,4120	0,13675	2,4156	8,075	20	43	275	114	30,2
4162	1,3782	0,13761	0,21884	6,8048	0,24324	0,24324	1,1873	5,8279	0,29576	8,6300	0,25472	2,8236	8,0050	20	43	254,5	101	44,6
1171	0,78435	0,55274	0,25803	7,7532	0,19086	0,19086	1,6762	5,0399	0,039621	11,4000	0,25903	2,0714	6,95	20	56	245	153,5	35,83
1241	2,2688	4,1885	0,31516	10,733	0,27502	0,27502	5,866	17,714	0,13335	9,8188	0,29263	3,0113	7,9958	28,89	62	439,5	118,5	35,83
1311	1,2208	0,63486	0,18393	5,2752	0,017757	0,017757	2,543	5,2895	0,29752	6,6533	0,084103	2,1479	8,050	30	64	361,5	136,5	28,33
4321	1,0594	0,52828	0,17720	5,9918	0,000673	0,000673	1,6686	4,7854	0,26284	7,2793	0,014599	1,5023	7,45	30	75	280	140,5	44,17
4331	1,0944	0,46522	0,061873	7,1286	0,079011	0,079011	2,3085	6,9838	0,073142	8,7062	0,064549	2,1674	6,9667	30	85,5	329	171,5	20,41
4341	2,7018	0,51624	0,10031	7,02129	0,20568	0,20568	2,3663	16,274	0,000538	9,2853	0,0433134	2,5944	7,9612	28,89	61,5	409,5	92	22,25
436.	1,3902	0,60353	0,26255	7,1776	0,1774	0,1774	1,6144	7,3702	0,30272	9,1624	0,19754	1,9874	8,050	20	43	278,5	116,5	20,33
4371	0,73399	0,50854	0,11814	7,9239	0,36803	0,097861	4,5408	4,5408	0,24546	9,5879	0,48874	1,0636	6,950	20	58	248	1365	44,17
4381	0,72960	0,52744	0,22126	5,5110	0,0032585	0,0032585	1,5780	2,1204	0,33936	6,8216	0,24628	37351	8,000	30	65	290	165	30,33
4382	0,58949	0,53242	0,19539	5,7927	0,0035947	0,0035947	2,1107	1,786	0,15503	7,7471	0,31319	26375	8,000	30	64,5	282	1625	23,33
4411	1,1653	0,043242	0,264	4,4569	0,19702	0,19702	1,0152	5,6853	0,35571	5,902	0,029305	2,0164	8,050	30	64,5	259,5	122	14,17
4421	1,1272	0,008845	0,17393	6,0426	0,10491	0,10491	1,3131	5,0068	0,26305	7,7476	0,06636	1,8428	7,45	30	765	280	148	11,67
4431	1,1575	0,47882	0,23001	65461	0,016788	0,016788	0,98036	6,0528	0,088235	1,0061	0,32577	18310	695	30	87	299	170	20
4441	2,4696	2,7316	0,0040332	8,3728	0,45136	0,45136	1,3831	1,3505	0,083976	1,0097	0,58576	2,0032	79958	2889	625	4215	85,	33,33



Tabela 14. Vrijednost koeficijenata, geometrijskih parametara zone deformacije i sila izvlačenja za čelik Č.4721.

Sifra	K	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	R <sub>0</sub>	Z <sub>k</sub>	Z <sub>n</sub>	Z <sub>0</sub>	U	Sila
7111		1,6269	0,68885	0,21555	4,4443	0,10638	2,01333	4,6641	0,24090	6,5959	0,13669	1,8144	8,3667	262	88	655	30	36
7112		1,3593	0,23364	0,29145	3,8632	0,13735	1,3462	5,0519	0,40982	5,2318	0,10465	2,8858	8,200	280	110	66	30	36,7
7121		1,0491	0,34273	0,37889	4,0073	0,044042	2,3969	4,9717	0,30593	7,6261	0,08196	2,3408	7,45	269,5	114,5	75	30	42,5
7522		1,0281	0,2199	0,050336	5,7012	0,025836	1,826	5,1271	0,15942	7,2507	0,0037075	1,6115	7,45	235	104	77,5	30	37,5
7131		0,53748	3,6263	0,03389	11,317	0,06111	1,6695	6,6261	0,11021	9,5722	0,033049	2,6684	6,95	317	172,5	85	30	38,33
7132		1,0758	0,00384	0,0060254	6,8958	0,13646	0,13646	0,83311	6,5032	0,23639	7,9476	0,20718	6,9667	288,5	139,5	88	30	34,5
7141		2,8674	0,031338	0,079285	7,4584	0,15729	3,0753	17,632	0,15906	9,5969	0,2773	2,9618	7,9958	426	98,5	62	28,89	66,67
7161		1,5413	0,11995	0,17739	8,3384	0,29879	8,5197	8,5197	0,23507	10,111	6,27581	2,4196	7,0075	287,5	111,5	43	20	31,83
7175		0,729	0,56091	0,043403	9,6461	0,033523	2,4392	3,6558	0,085344	10,854	1,13339	0,86934	6,850	263,5	158	59,5	20	38,33
7181		0,69181	0,023742	0,27552	5,1706	0,13057	2,6553	3,1399	0,51286	4,8953	0,56928	5,9574	7,950	295,5	173,5	64,5	30	25,42
7182		0,82373	0,11175	0,0595	5,9948	0,28664	3,4961	2,39	0,14569	6,72333	0,33226	2,7021	8,050	279	124,5	65	30	24,75
7211		1,5080	0,80814	0,44589	4,4312	0,23084	2,2577	4,94	0,23264	8,4119	0,055124	2,5168	8,100	301	147	65	30	28,75
7221		0,98146	0,4119	0,17301	5,4759	0,16505	2,831	4,919	0,1725	7,8765	0,14778	1,249	7,45	263	129	75	30	28,75
7381		0,86157	0,84732	0,37375	3,4758	0,094564	1,2633	3,6748	0,29288	6,2352	0,17223	3,2896	8,100	268	125,5	64,5	30	37,5

Sifra	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$k_0$	$z_k$	$z_{11}$	$z_0$	$U$	$\mu_{11}$
7382	0,62680	0,38931	0,26303	5,4661	0,047134	2,4038	1,3074	0,19686	7,6536	0,38827	3,0837	8,000	295,5	169,5	65	30	15,33
7411	0,18793	0,22820	5,1845	0,35271	4,4132		5,5350	0,40516	5,9828	0,05594	2,3014	8,0050	280	140	65,5	30	50,5
7421	0,96593	0,28077	0,13032	3,6246	0,016129	1,8295	5,5013	0,18787	5,5622	0,11593	20942	7,45	203	68,5	77	30	51,667
7431	1,0740	0,25400	0,024965	8,1684	0,17665	0,65881	6,5922	0,11227	9,7145	0,029858	1,885	6,950	328	191	89	30	45,833
7441	2,8932	0,054157	0,014042	9,1346	0,33019	2,0194	1,6159	0,27959	10,342	0,24879	6,4347	7,9958	470	123	62,5	28,89	67,5
8111	0,92829	0,39831	0,34134	5,1608	0,049889	4,5252	5,5443	0,4303	7,0803	0,01185	3,7352	16,000	304	100	43,5	20	147
8121	0,35825	0,19666	0,38412	3,5083	0,32270	7,3158	1,9935	0,51708	4,1081	0,35734	6,1543	16,050	247,5	161,5	43,5	20	100
8171	0,63919	0,51259	0,21536	7,1474	0,12526	4,9896	3,415	0,39449	7,9083	0,20636	5,2295	16,000	192,5	11,0	43,5	20	143,75
8181	0,76426	0,67947	0,15474	5,709	0,083044	5,3316	3,2247	0,47581	4,9271	0,064935	3,1558	16,000	238	113	44	20	143,75
8321	0,32588	0,47907	0,098504	38933	0,31259	7,0565	1,9492	0,44323	1,6359	0,09599	2,7818	16,0000	168	60	43,5	20	62,5
8351 8361	0,93683	0,34298	0,16671	7,1144	0,15996	6,5361	5,3473	0,38835	7,3174	0,12344	5,7668	16,000	315	93,5	43,5	20	98,75 62,5
9111	1 0,51043	0,69571	0,074928	9,8265	0,42090	1,1972	1,88335	0,29167	29,2780	0,30041	6,4813	21,000	319	11,8	43,5	20	218,75
9311	0,45248	0,78012	0,18133	6,1483	0,49451	0,424	2,5402	0,38405	7,5013	0,22045	7,1407	21,35	295,5	129	44	20	231,25
9321	0,33330	0,37363	0,25064	4,1371	0,31609	8,8169	2,0876	0,43382	0,74864	0,12681	1,6932	21,40	220,5	76	43,5	20	156,25
9341	0,21567	1,4676	0,09406	6,9914	0,1139	5,2031	1,1127	0,34029	4,9371	0,10227	5,9740	20,000	223	121,5	49	20	154,37

Nastavak tabele 14.

Rezultati ispitivanja za  $V_r$  i  $V_z$  brzine su prikazani na slikama 21–28. U svim slučajevima gornji dio dijagrama predstavlja  $V_z$  a donji  $V_r$  brzine.

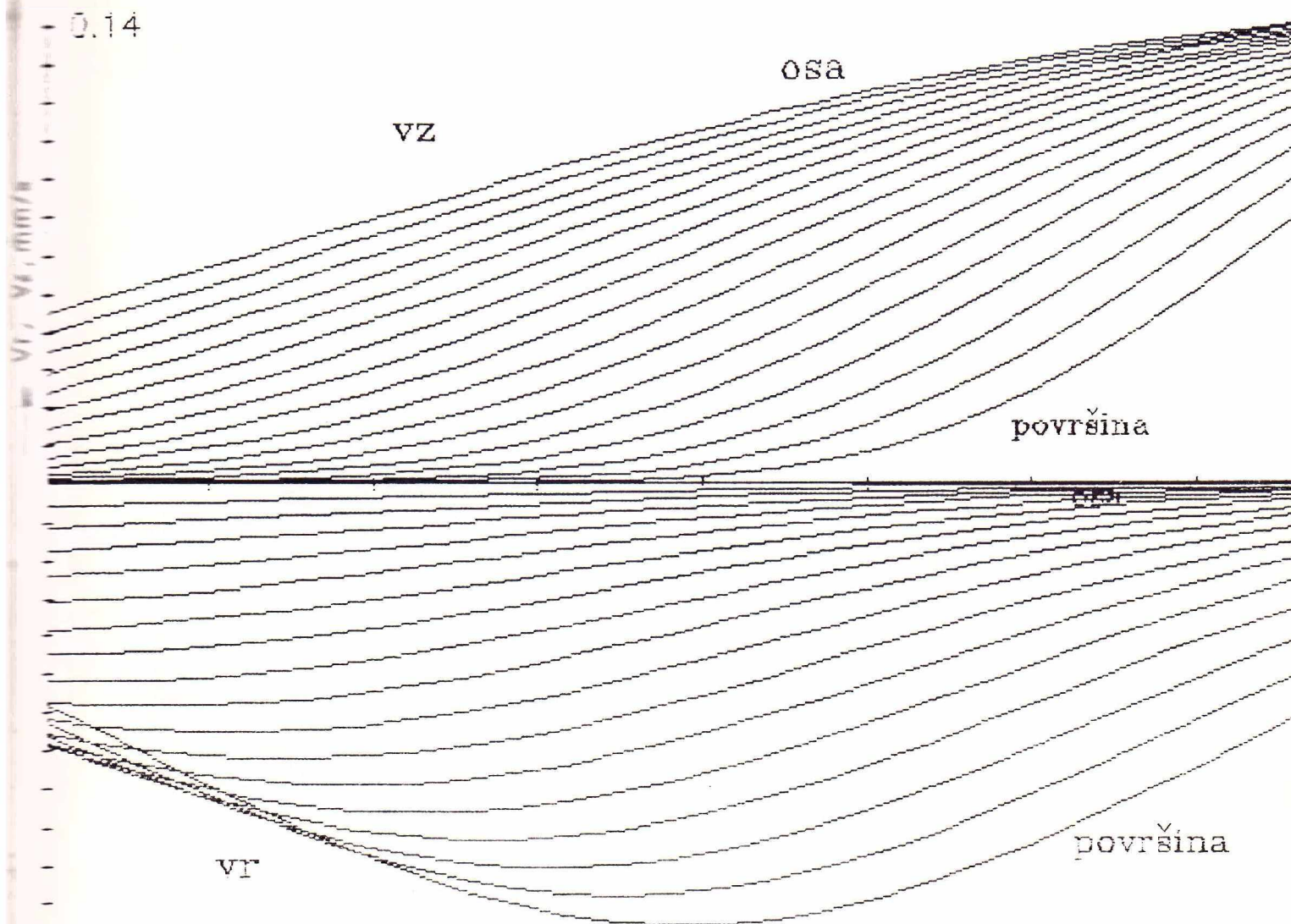
#### 4.8.1.1. Uticaj stepena deformacije na brzine pomjeranja

Dijagrami na slici 21 predstavljaju polje brzina dobijeno za sepen deformacije  $2\ln(d_0/d_1) = 0,13$ .

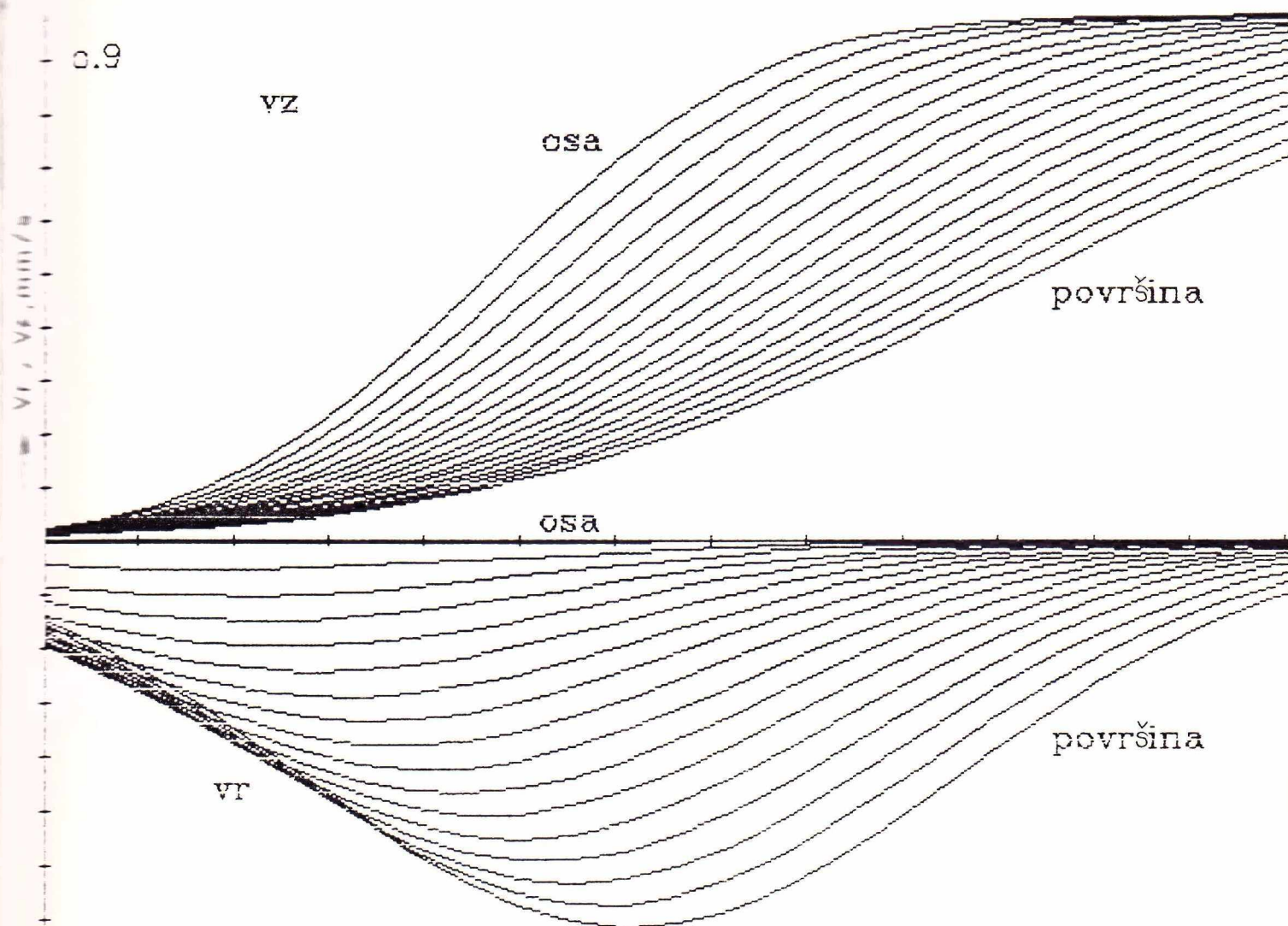
Na dijagrama se uočava da se  $V_z$  brzine kontinuirano povećavaju od ulaza do izlaza iz zone deformacije, sa jasno izraženom razlikom za svaki položaj  $r$ -koordinate. Na ulazu u zonu deformacije uočavaju se konačne brzine čak do polovine polaznog poluprečnika. Približavanjem površini početak konačnih brzina se pomjera u zonu deformacije, i za površinu on se praktično nalazi na polovini dužine zone. Metal izlazi iz geometrijske zone deformacije sa brzinama koji su nehomogene analogno nehomogenosti na ulazu u zonu.

Radialne brzine imaju oblik krive sa maksimumom čija veličina i položaj zavisi od  $r$ -a. Za najveći dio presjeka šipke maksimum se nalazi na samom ulazu u zonu deformacije, a pomjera se unutar zone sa povećanjem poluprečnika do površine. Maksimum za samu površinu se nalazi u središnjem dijelu zone. Za ulaz u zonu deformacije je karakteristična manja brzina površine od brzine podpovršinskih slojeva, što ukazuje na mogućnost obrazovanja zadebljanja na površini neposredno prije ulaska u zoni deformacije.

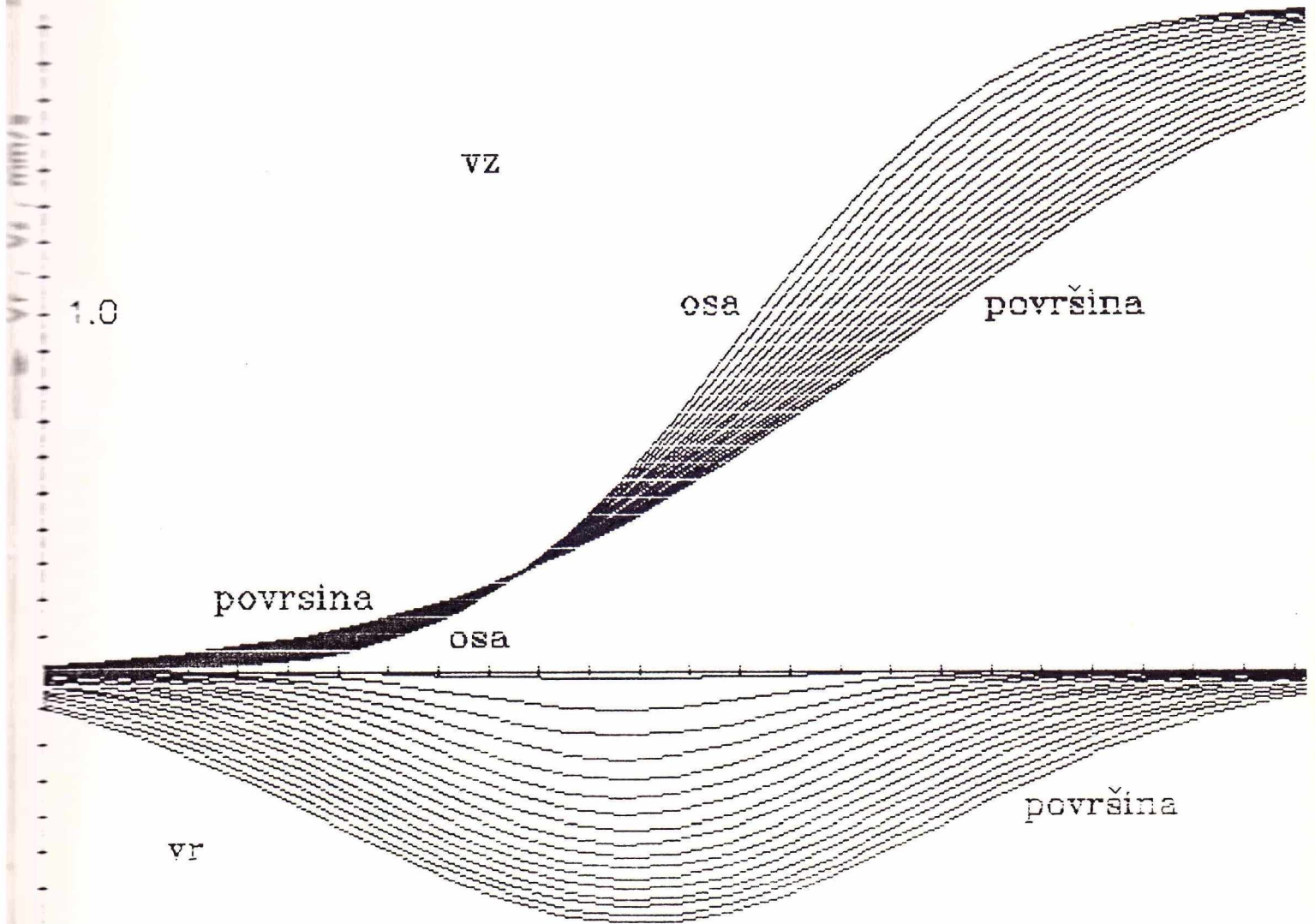
Uopšteno, za ovakav stepen deformacije se može istaći znatna nehomogenost brzina koja se stvara prije ulaza u geometrijsku zonu deformacije. Ovo podrazumijeva početak i postizanje konačne vrijednosti brzina u djelovima koji je odvajaju od nedeformisanog i deformisanog metala.



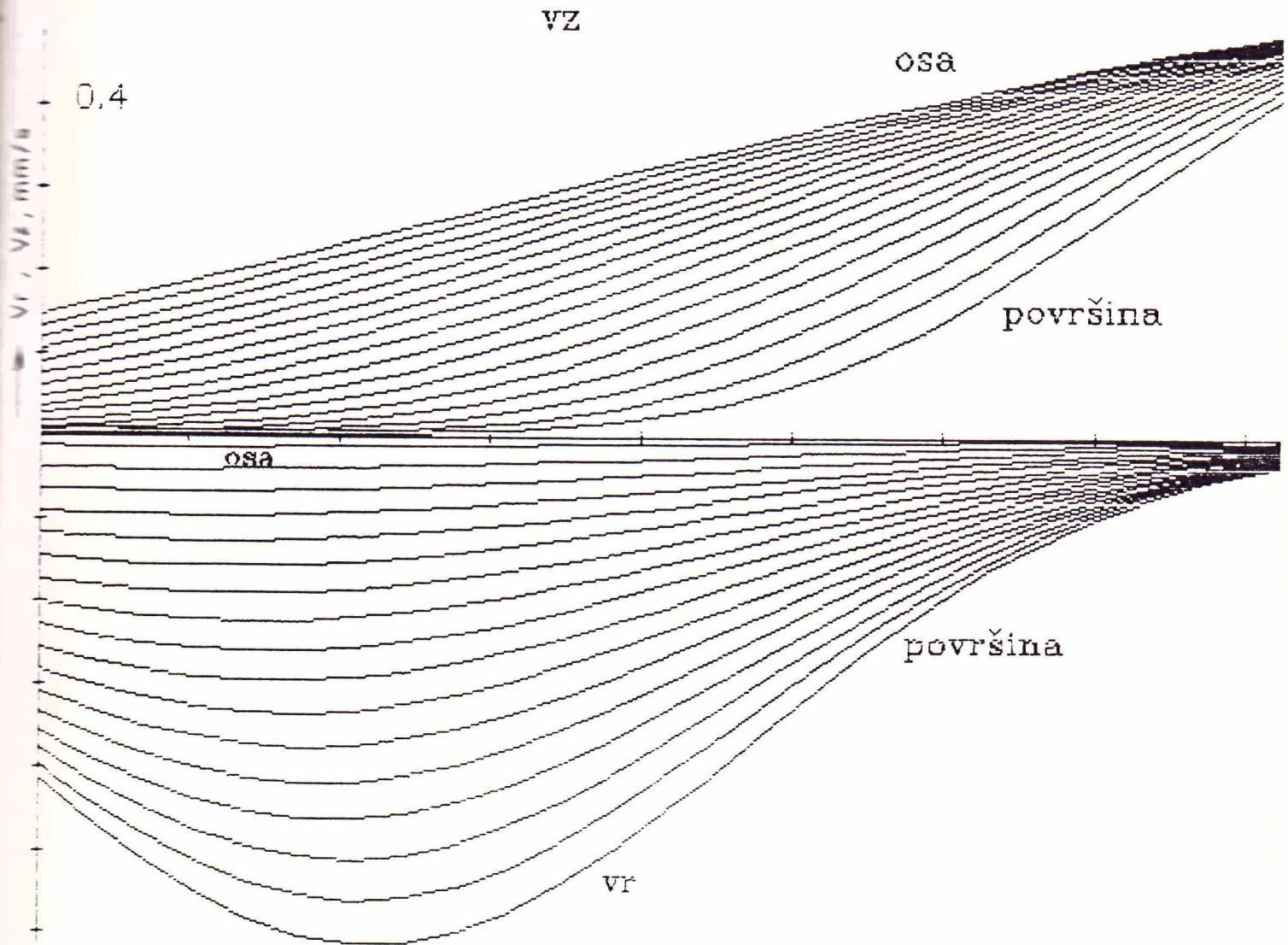
S1.21. Promjena osnih  $v_z$  i radijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220  
 ( $d_o = 16 \text{ mm}$   $d_i = 15 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0.157 \text{ rad}$   
 $v_o = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



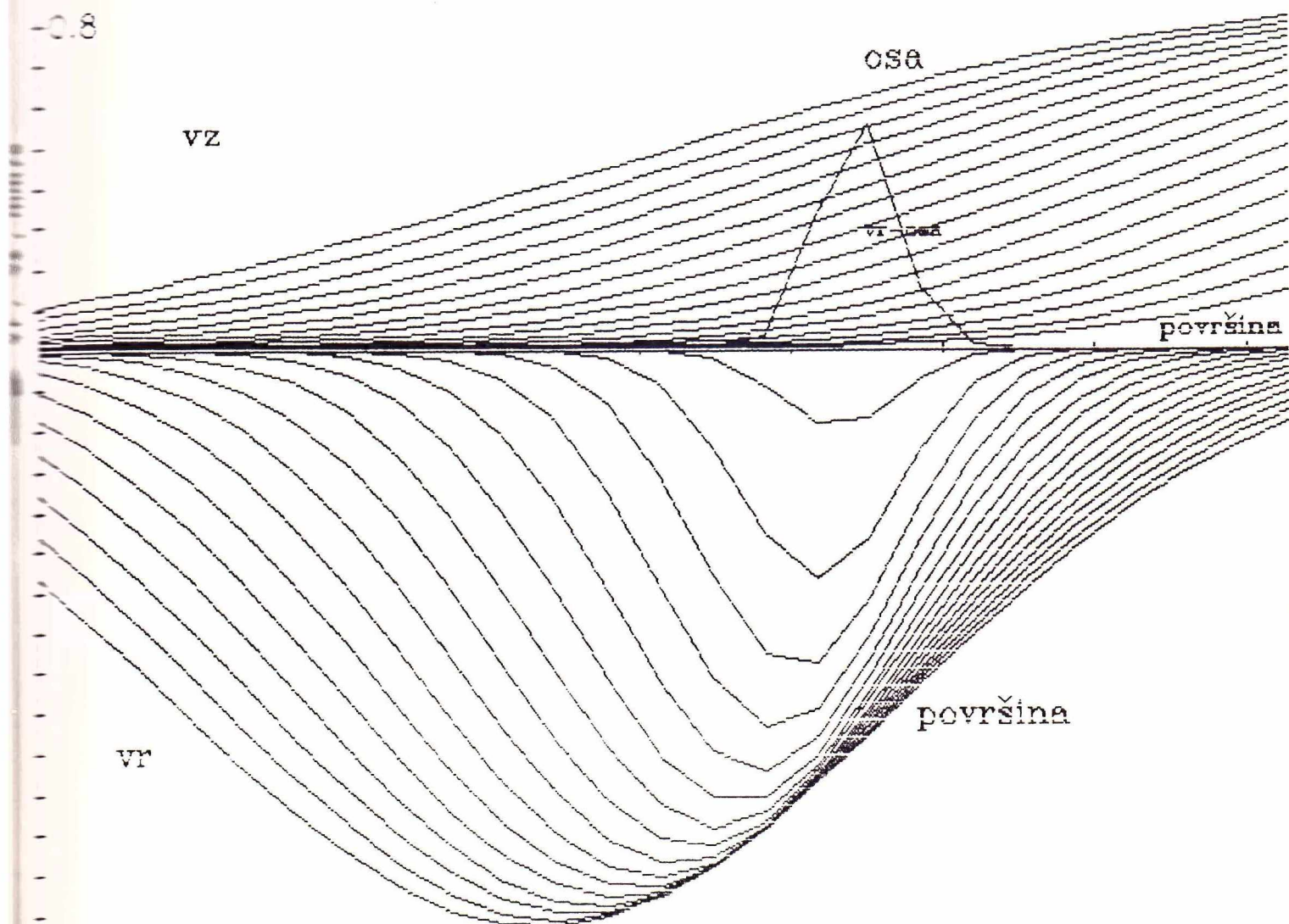
Sl.22. Promjena osnih  $v_z$  i radijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16 \text{ mm}$   $d_1=14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0.157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



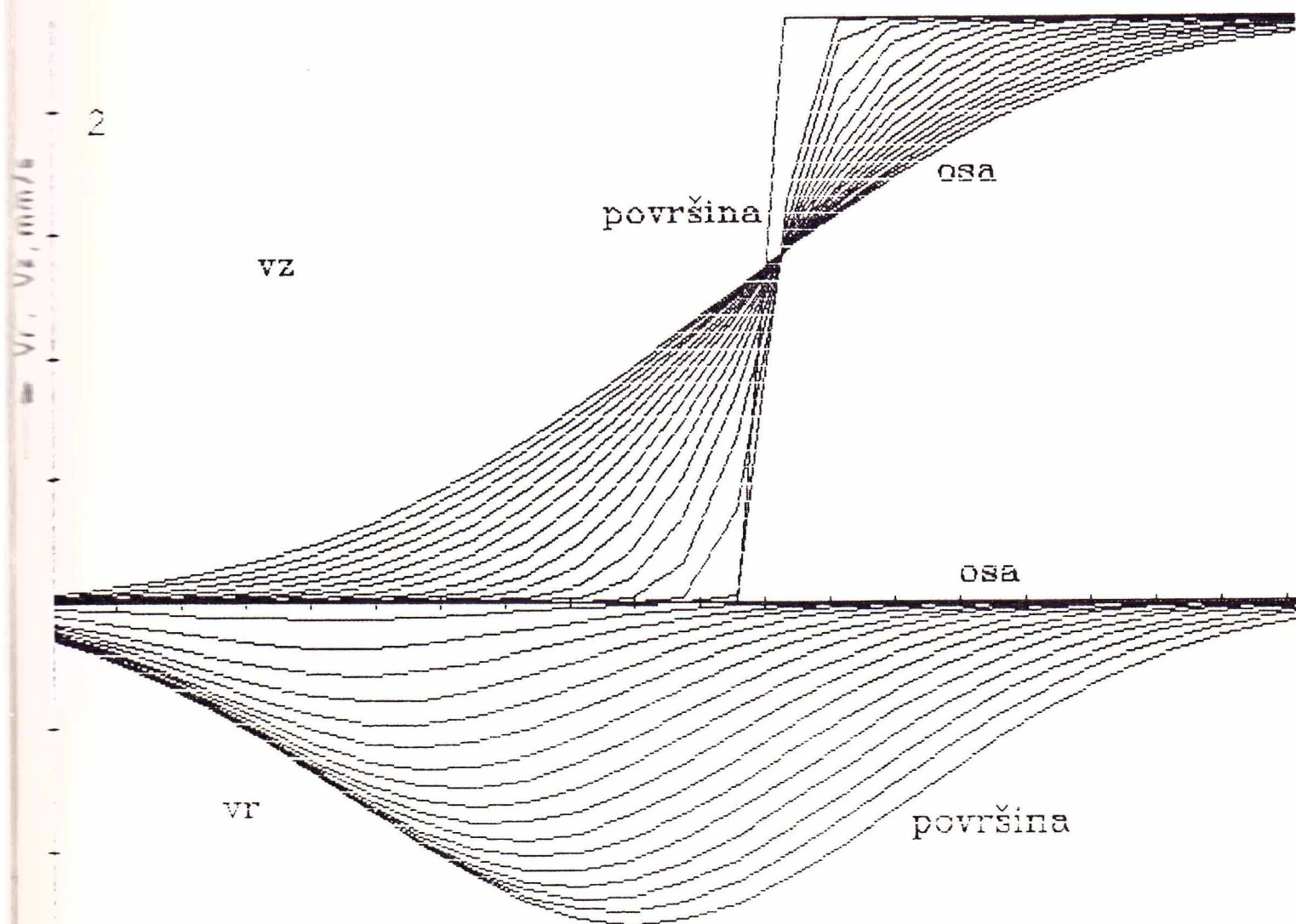
Sl.23. Promjena osnih  $v_z$  i rdijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_o=16$  mm  $d_1=13$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2=0.157$  rad;  $v_o=3,33$  mm/s)



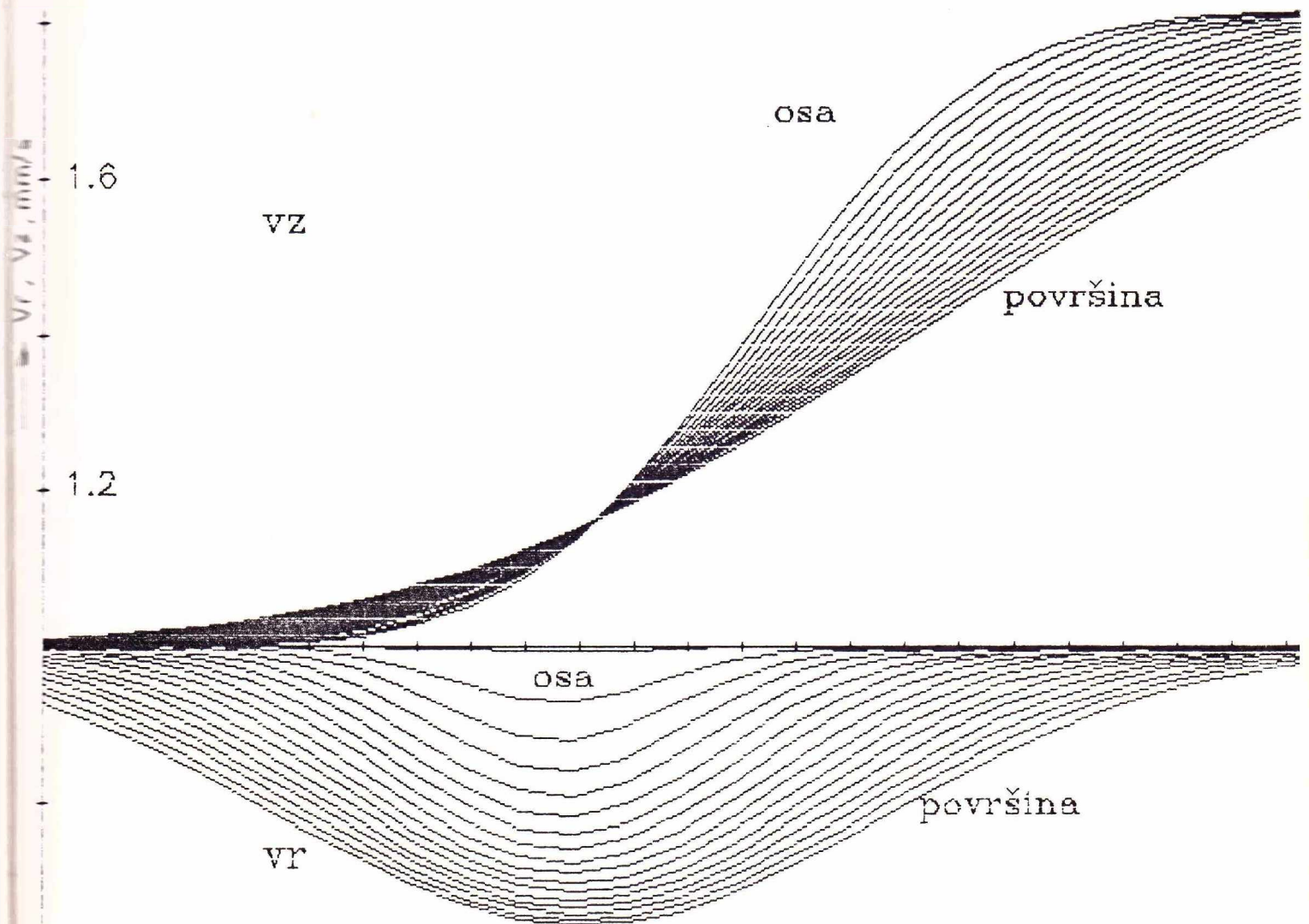
Sl.24. Promjena osnih  $v_z$  i radijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220  
 ( $d_0=16$  mm  $d_1=15,4$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2=0,157$  rad;  
 $v_0 = 6,66$  mm/s).



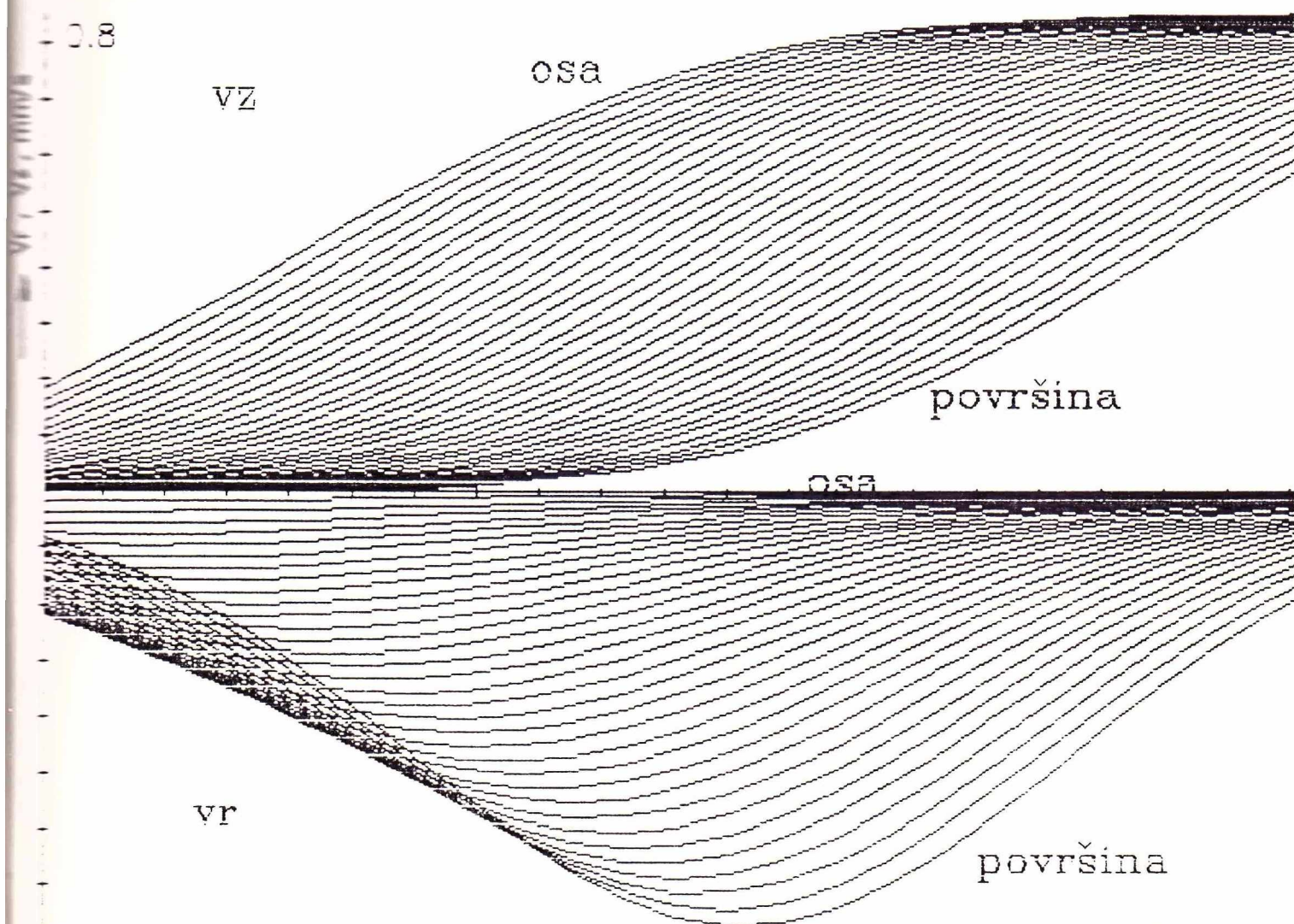
Sl.25. Promjena osnih  $v_z$  i radijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=15$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2=0.157$  rad;  $v_0=6,66$  mm/s).



Sl.26. Promjena osnih  $v_z$  i radijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16 \text{ mm}$   $d_1=14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2=0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0=6,66 \text{ mm/s}$ ).



Sl.27. Promjena osnih  $v_z$  i radijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č. 1220 ( $d_0=16 \text{ mm}$   $d_1=13 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje parafin; ugao matrice  $\alpha/2=0.157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



Sl.28. Promjena osnih  $v_z$  i radijalnih  $v_r$  brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=32$  mm  $d_1=29$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2=0,157$  rad  $v_0=3,33$  mm/s).

Promjena radijalnih brzina površine ukazuje na mogućnost obrazovanja zadebljanja na ulazu u zonu deformacije.

Povećanjem stepena deformacije na  $\approx 0,25$  (slika 22) uočavaju se promjene u kvantitativnim vrijednostima polja brzina. Značajne su promjene  $V_z$  brzina na početku zone deformacije gdje se uočava znatno manja nehomogenost njihovog rasporeda po poprečnom presjeku. Medjutim, nehomogeno polje se stvara u samoj zoni sa povećanjem razlika između površine i ose u najvećem dijelu zone deformacije. Tek pošto brzina ose dostigne konačnu vrijednost (znatno prije geometrijskog izlaza) razlike se smanjuju. Izlaz iz zone deformacije, zbog izražene nehomogenosti upućuje na zaključak o mogućnostima deformacije u vankontaktним djelovima u ovom slučaju kalibrirajućem pojasu matrice.

Promjena radijalnih brzina zadržava karakteristike predhodnog stepena deformacije sa promjenama veličine maksimuma i njegovom položaju sa smanjenjem prečnika od površine do ose. Ujedno se povećava debljina podpovršinskog sloja sa većim radijalnim brzinama u odnosu na površinu.

Dijagrami prikazani na slici 23, odgovaraju stepenu deformacije od  $\approx 0,45$ . I ovdje se uočava znatnija promjena  $V_z$  nego  $V_r$  u odnosu na predhodna dva stepena. Karakteristike rasporeda brzina za ovakav stepen deformacije su već analizirane kod polaznih podataka. Bez obzira na drugi kvalitet čelika i različite uslove podmazivanje zadržane su sve istaknute karakteristike: veće  $V_z$  brzine površine nego ose na ulaznom dijelu zone, presjek homogenih uslova deformacija, postizanje konačnih brzina osnih djelova prije geometrijskog izlaza iz zone. Kod radijalnih brzina obalst položaja maksimuma odgovara sredini zone deformacije. Najveće vrijednosti, duž čitave zone, su na površini.

#### 4.8.1.2 Uticaj brzine izvlačenja na brzine pomjeranja

Povećanje brzine izvlačenja na vrijednost  $2V_0$  izaziva znatne promjene polja brzina, izuzev pri malim stepenima deformacije (0,09, slika 24).

Dva tipična slučaja znatnijih promjena su prikazana na slikama 25 i 26. Slika 25 odgovara stepenu deformacije 0,13 i prikazuje izrazite promjene radijalnih brzina kada ujedno dolazi do pomjeranja ose iz njenog početnog položaja (pik označen sa  $V_r$ -osa). Položaj na kome se ovo dešava stvara maksimalne vrijednosti brzina za slojeve koji se nalaze u okolini ose, a ujedno mijenja raspored položaja maksimuma.

Kod  $V_z$ -brzina se uočava znatnije zaostajanje ose i kontinuirano povećanje nehomogenosti duž zone deformacije. Očigledno je da se znatan dio promjena sa ovakvim rasporedom brzina prenosi u oblasti kalibrirajućeg pojasa matrice.

Slika 26 pokazuje polje brzina za stepen deformacije 0,25. U ovom slučaju radijalne brzine zadržavaju karakteristike kod manje brzine izvlačenja dok se kod osnih brzina javljaju znatne razlike. Naime, početni odnos ose i površine se mijenja oko sredine zone deformacije kada površina praktično trenutno postiže vrijednost izlazne brzine, a brzina osa kontinuirano raste do konačne vrijednosti. Očigledno do povećanja brzine izvlačenja stvara mogućnost izrazito nehomogenih promjena koji mogu da se manifestuju na način uočen u ova dva primjera.

Promjena sredstava za podmazivanje izaziva neznatne promjene kod  $V_z$  brzina i to na ulazu u zonu deformacije. Ovo se može zaključiti upoređenjem dijagrama na slici 23 i 27. Prva slika odgovara podmazivanju uljem a druga podmazivanju parafinom. Promjene se manifestuju u povećanju razlika brzina površine i ose i pomjeranju presječne tačke na veću dužinu zone.

Kod radijalnih brzina se ne uočavaju promjene.

Povećanje polaznog prečnika na 32 mm i deformaciji sa stepenom  $\approx 0,2$  se dobijaju rezultati prikazani na slici 28. Očigledna sličnost sa dijagramima datim na slikama 21 i 22 pokazuje da nema razlika pri deformaciji

većih prečnika u samoj zoni. Međutim, jasna razlika se uočava na ulazu u zonu deformacije zbog visokih ulaznih  $V_z$  brzina i maksimalnih vrijednosti  $V_r$  na položaju koji je znatno ispod površine. Ovo ukazuje na znatnije promjene u vankontaktnom dijelu na ulazu u zonu, i veću mogućnost obrazovanja zadebljanja.

Iste zakonitosti promjene se uočavaju kod ostala dva ispitivana čelika.

#### 4.8.2. Brzine deformacije

Komponente brzina deformacije su određene promjenama brzina pomjeranja i mogu se prikazati sljedećim jednačinama:

- radijalna brzina deformacije:

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial}{\partial r} \left( - \frac{1}{KUV_0} \frac{Y_1}{Y_2} \exp \left( - (Y_2/Y_3)^2 \right) \right); \quad (39)$$

- osna brzina deformacije

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Delta z}{KZ_0 V_0} \right) \quad (40)$$

- ugaona brzina deformacije

$$\dot{\epsilon}_\phi = - (\epsilon_r + \epsilon_z); \quad (41)$$

- brzina smicanja:

$$\dot{\gamma}_{zr} = \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r}. \quad (42)$$

Dijagrami zavisnosti radijalnih i osnih brzina su prikazani na slikama 29 - 36, a ugaonih i smicajnih brzina na slikama (37-42).

#### 4.8.2.1. Uticaj stepena deformacije na brzine deformacije

Brzine deformacije i kao računске veličine pružaju jasnu sliku o izmjenama koje se javljaju duž zone deformacije.

Radialne i osne brzine deformacije se mijenjaju po istim zakonitostima za sve stepene deformacije. Kvantitativne razlike se uočavaju za karakteristične tačke njihove promjene i povećavaju se sa povećanjem stepena deformacije.

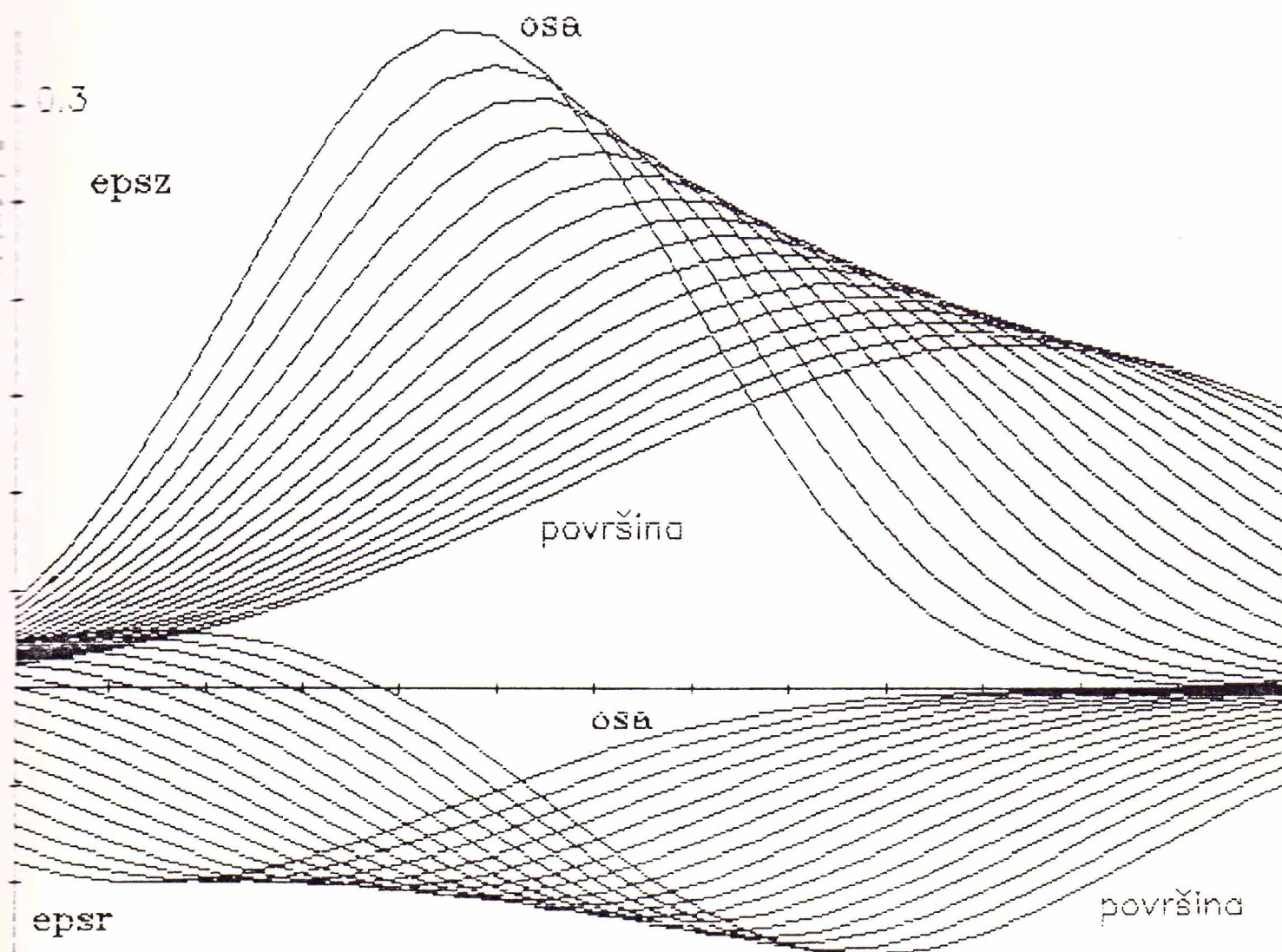
Kod stepena deformacije 0,13 osne brzine zadržavaju sve karakteristike brzina pomjeranja. Radialne brzine na početku zone deformacije imaju pozitivnu vrijednost za površinske djelove što je u skladu sa promjenom radialnih brzina pomjeranja, odnosno priraštajem deformacije u suprotnom smjeru.

Unutar zone njihova vrijednost raste u negativnom pravcu do maksimalne vrijednosti. Maksimum se kontinuirano povećava od ose prema površini i pomjera prema izlazu iz zone deformacije, slika 29.

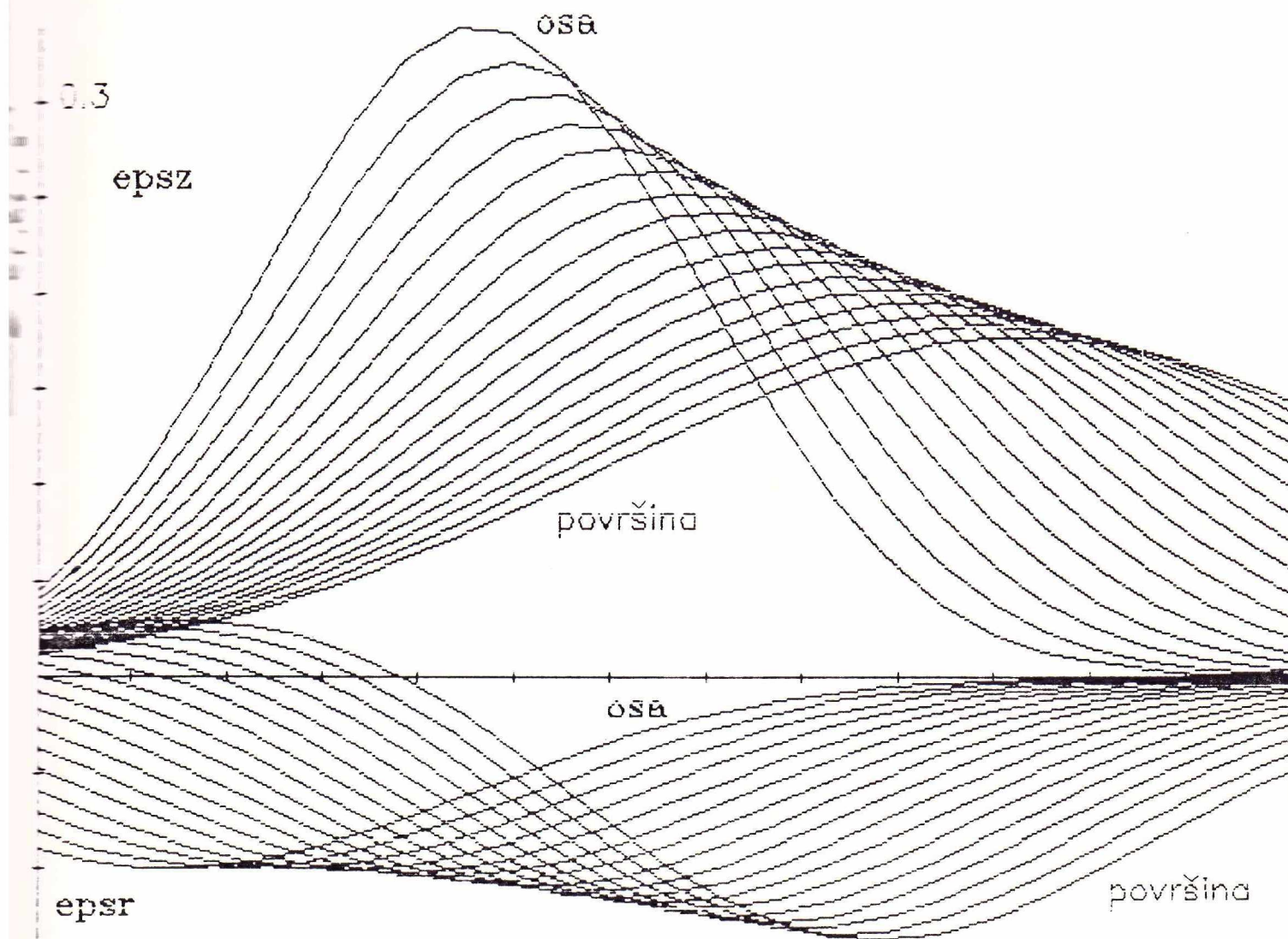
Kod stepena deformacije 0,25 radialne brzine na ulazu zadržavaju isti oblik. Maksimalne vrijednosti se pomjeraju unutar zone, a veličina maksimuma je praktično konstantna. Izlaz iz zone deformacije odgovara najnižim vrijednostima brzina, slika 30.

Na slici 31 je prikazano polje radialnih brzina koje se može podijeliti na tri približno ista dijela zone deformacije. U prvom dijelu je ravnomjeran raspored brzina sa povećanjem vrijednosti od površine prema osi. U drugom dijelu se povećava razlika brzina i mijenja odnos površine i ose. Promjena se manifestuje maksimumom (površina i slojevi u njenoj brzini), zadržava konstantna (srednje vrijednosti poluprečnika) ili opada (osa šipke).

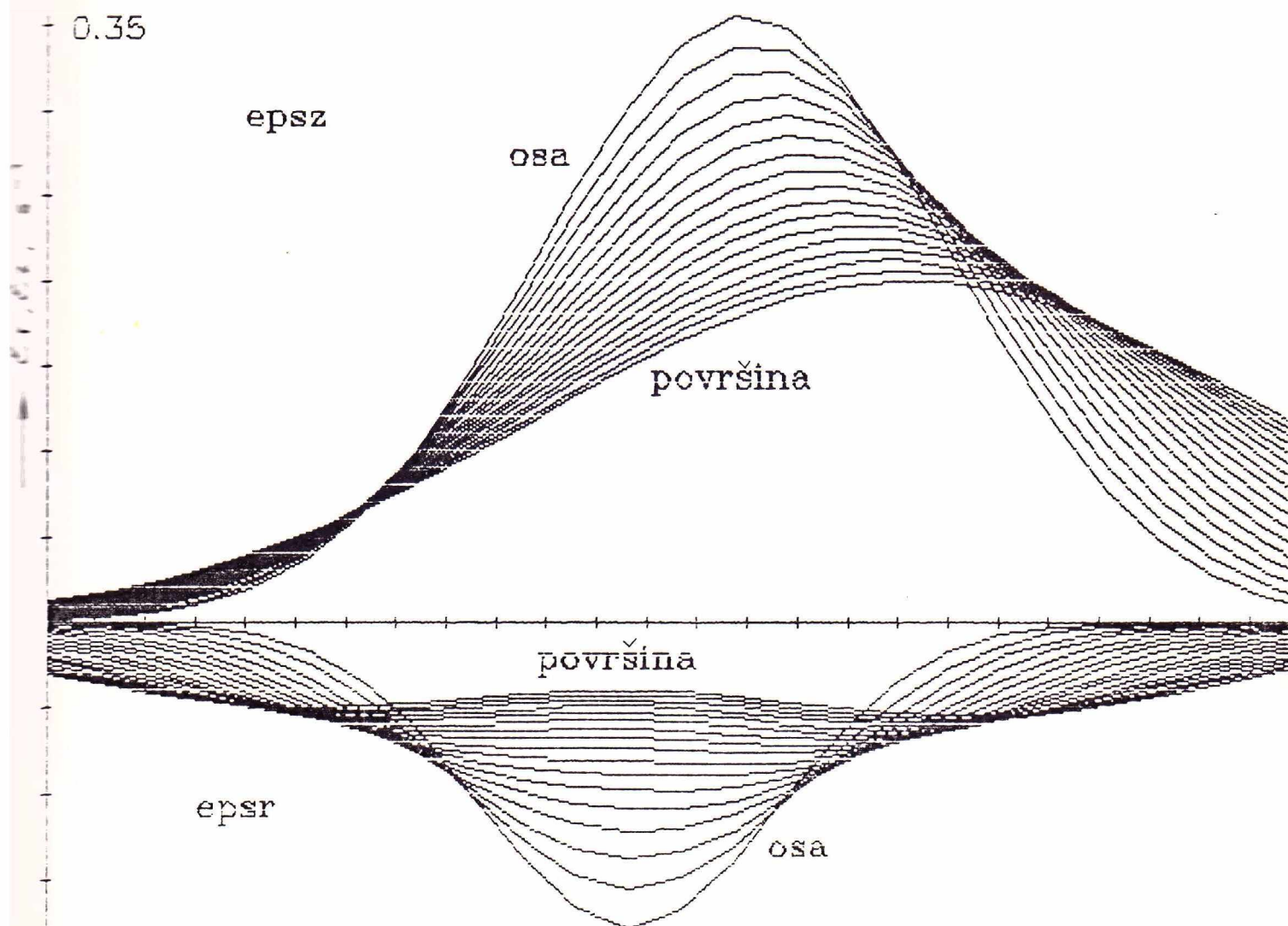




Sl.30. Promjena radialnih ( $\epsilon_{psr}$ ) i osnih ( $\epsilon_{psz}$ ) brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=14$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0=3,33$  mm/s).



Sl.30. Promjena radijalnih ( $\epsilon_{psr}$ ) i osnih ( $\epsilon_{psz}$ ) brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=14$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0=3,33$  mm/s).



Sl.31. Promjena radijalnih ( $\epsilon_{psr}$ ) i osnih ( $\epsilon_{psz}$ ) brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm.  $d_1=13$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3,33$  mm/s).

epsz

osa

DOVT.

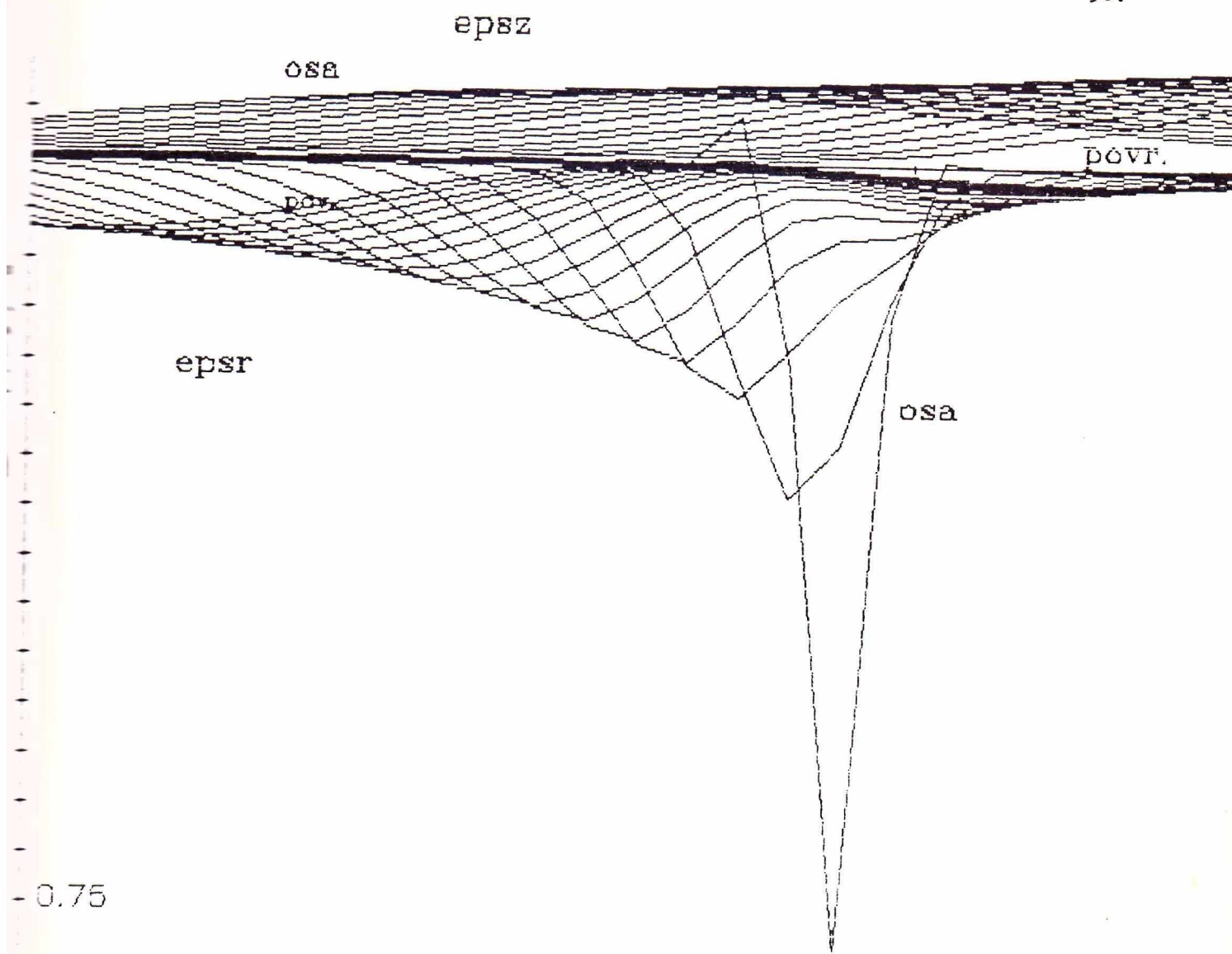
DOVT.

epsr

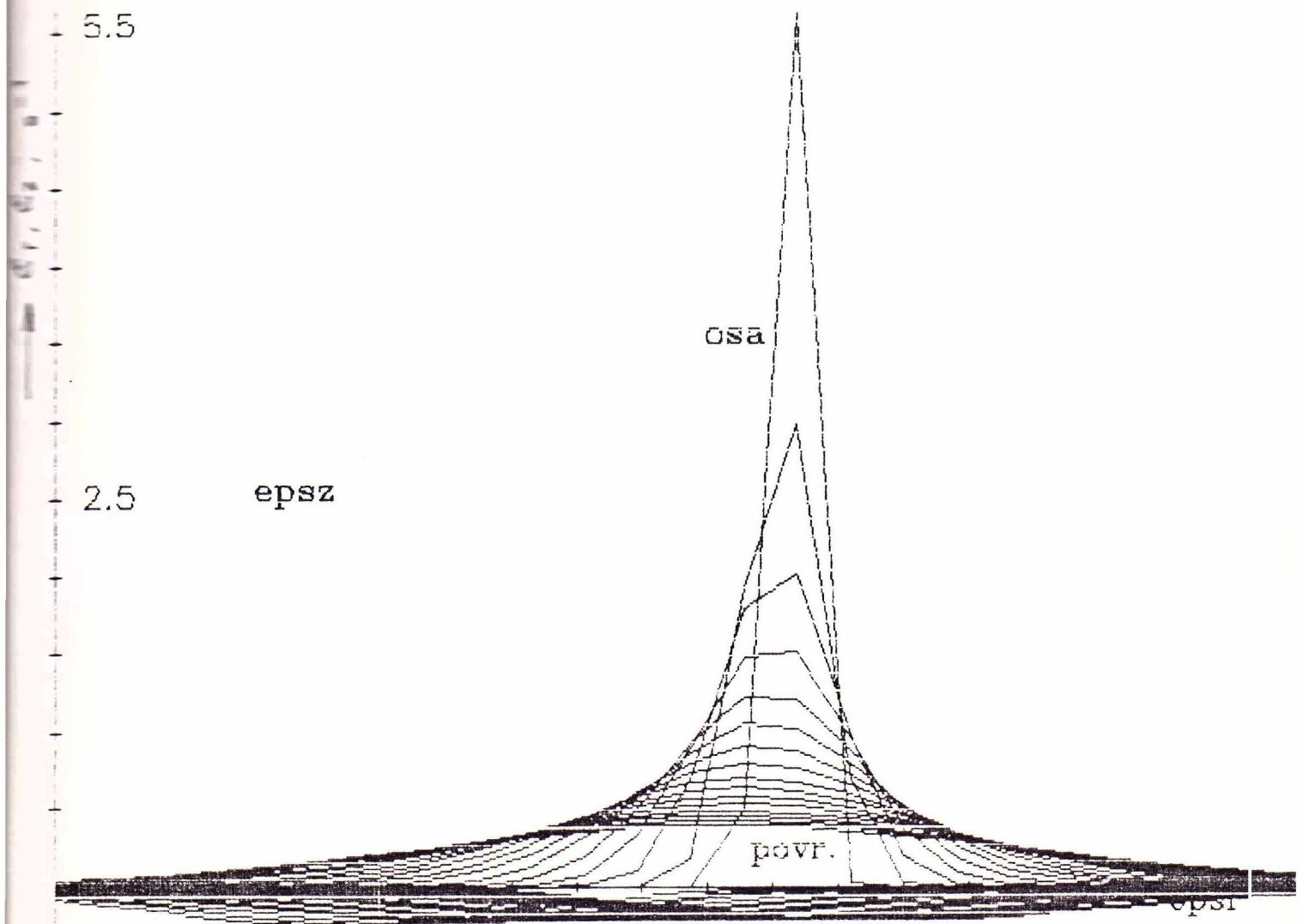
osa

-0.75

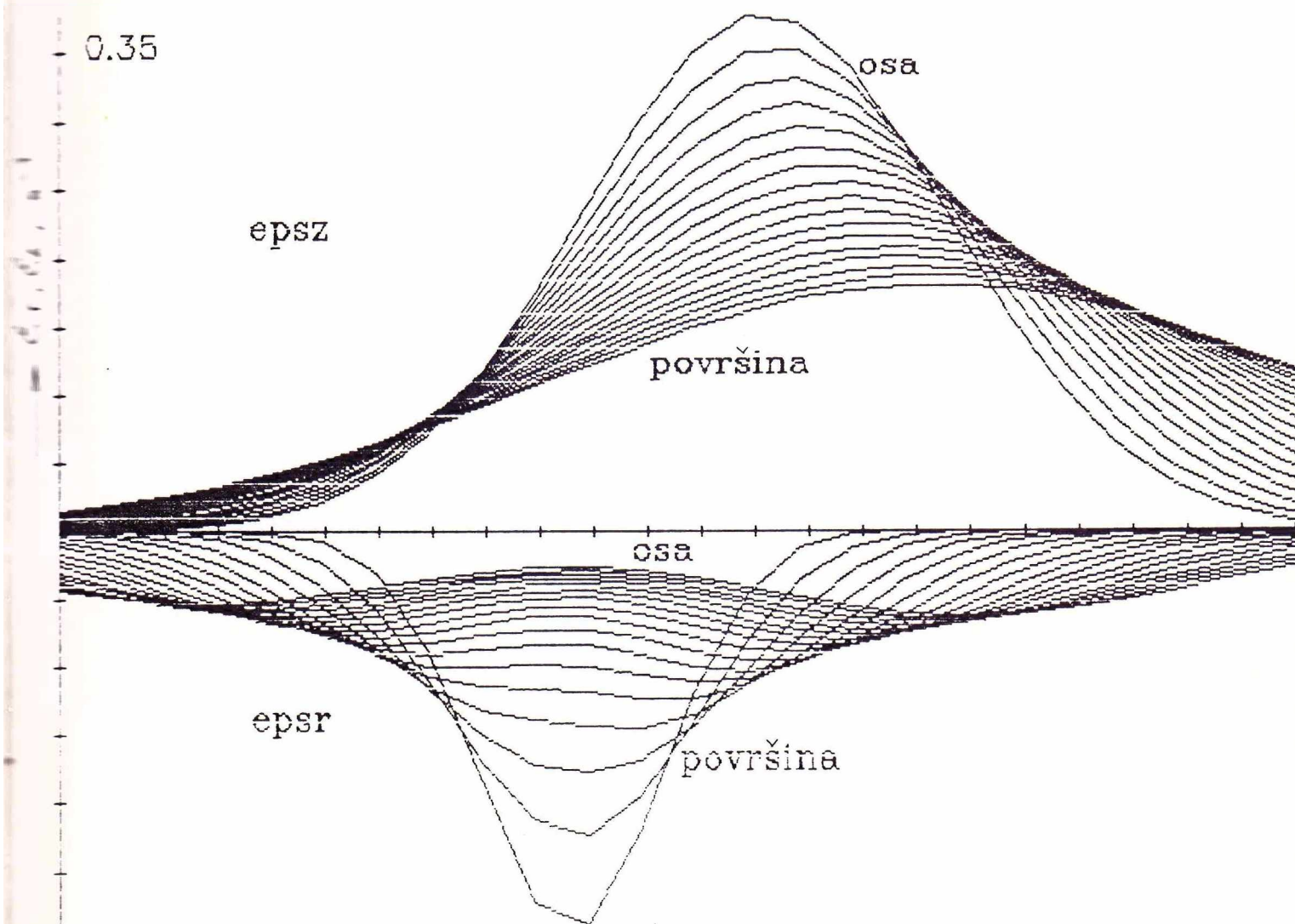
Sl.33. Promjena radijalnih (epsr) i osnih (epsz) brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=15$  mm, sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0=6,66$  mm/s)



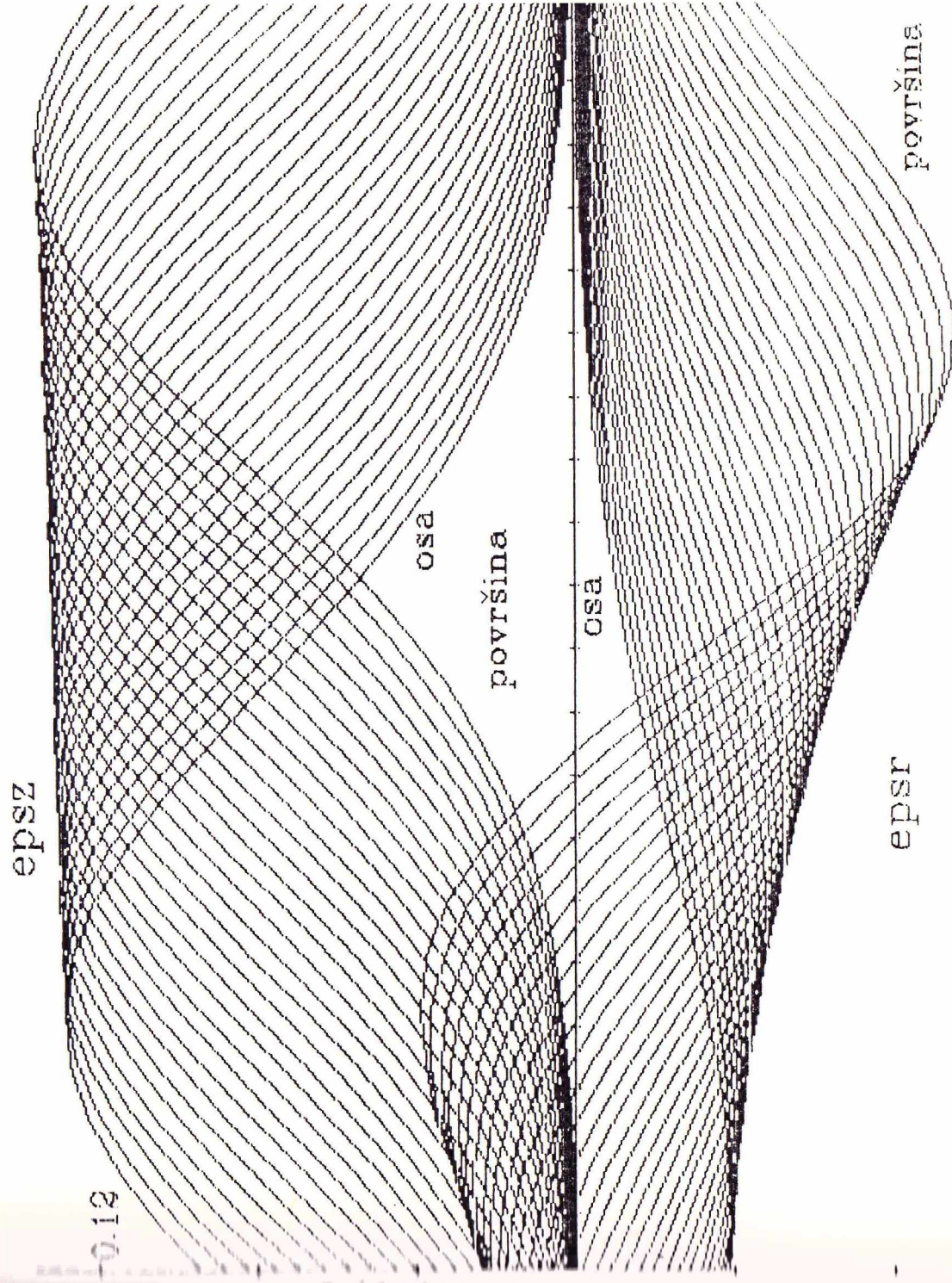
Sl.33. Promjena radijalnih ( $\epsilon_{sr}$ ) i osnih ( $\epsilon_{sz}$ ) brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=15$  mm, sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0=6,66$  mm/s)



Sl.34. Promjena radijalnih ( $\epsilon_{pr}$ ) i osnih ( $\epsilon_{pz}$ ) brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=14$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje: ugao matrice  $\alpha/2=0,157$  rad;  $v_0=6,66$  mm/s).



Sl.35. Promjena radialnih ( $\epsilon_{psr}$ ) i osnih ( $\epsilon_{psz}$ ) brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=13$  mm; sredstvo za podmazivanje parafin; ugao matrice  $\alpha/2=0,157$  rad;  $v_0=3,33$  mm/s).



Sl.36. Promjena radijalnih i osnih brzina pri izvlačenju šipki čelika Č.1220  
 ( $d_0 = 32 \text{ mm}$   $d_1 = 29 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje parafin; ugao matrice  
 $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).

Osne brzine se znatnije mijenjaju kod stepena deformaciji 0,13 u odnosu na ostala dva, po odnosu površine i ose, i položaju maksimuma. Maksimalna vrijednost brzine površine se postiže na izlazu iz zone deformacije, što ujedno predstavlja i maksimalnu vrijednost brzine svih poprečnih presjeka.

Povećanjem stepena deformaciji na 0,25, prvo se postiže maksimum brzina na na osi i to u prvoj polovini zone deformacije. Maksimum ose je ujedno i najveća vrijednost brzina. Idući prema površini maksimum se smanjuje i pomjera prema izlazu iz zone deformacije (slika 30).

Za stepene deformacije 0,45 promjena se uočava u formiranju tri oblasti kao kod radijalnih brzina. U prvoj oblasti površina ima veće brzine od ose ali je nivo razlika mali. U drugoj oblasti vrijednosti brzina se povećava do maksimuma uz promjenu odnosa površina osa. U trećoj oblasti se ponovo mijenja odnos površine i ose.

Maksimum vrijednosti osnih brzina kod ovog stepena deformacije je pomjeren prema izlazu iz zone deformacije u odnosu na maksimum radijalnih brzina.

Ugaone brzine deformacije i brzine deformacije smicanja imaju duž zone deformacije znatno složenije promjene nego radijalne i osne brzine.

Budući da ugaona brzina deformacije nije mjerena veličina zakon njene promjene je određen zakonom stalnosti zapremine, tj. ugaona brzina vrši uskladjivanje zakona promjene radijalne i osne brzine. Pri stepenu deformacije 0,13 vrijednosti ugaonih deformacija u okolini osi uzorka su neznatno različiti od nule i imaju negativnu vrijednost.

Promjene za poluprečnike izvan osne oblasti imaju složeniji oblik i na početnu zonu deformacije imaju pozitivnu vrijednost koja je takodje neznatno različita od nule. Duž zone deformacije one rastu do maksimuma

pozitivnih vrijednosti, a zatim opadaju do maksimalne negativne vrijednosti. Svaki položaj  $r$  od ose do površine ima različite karakteristične tačke, sl.37.

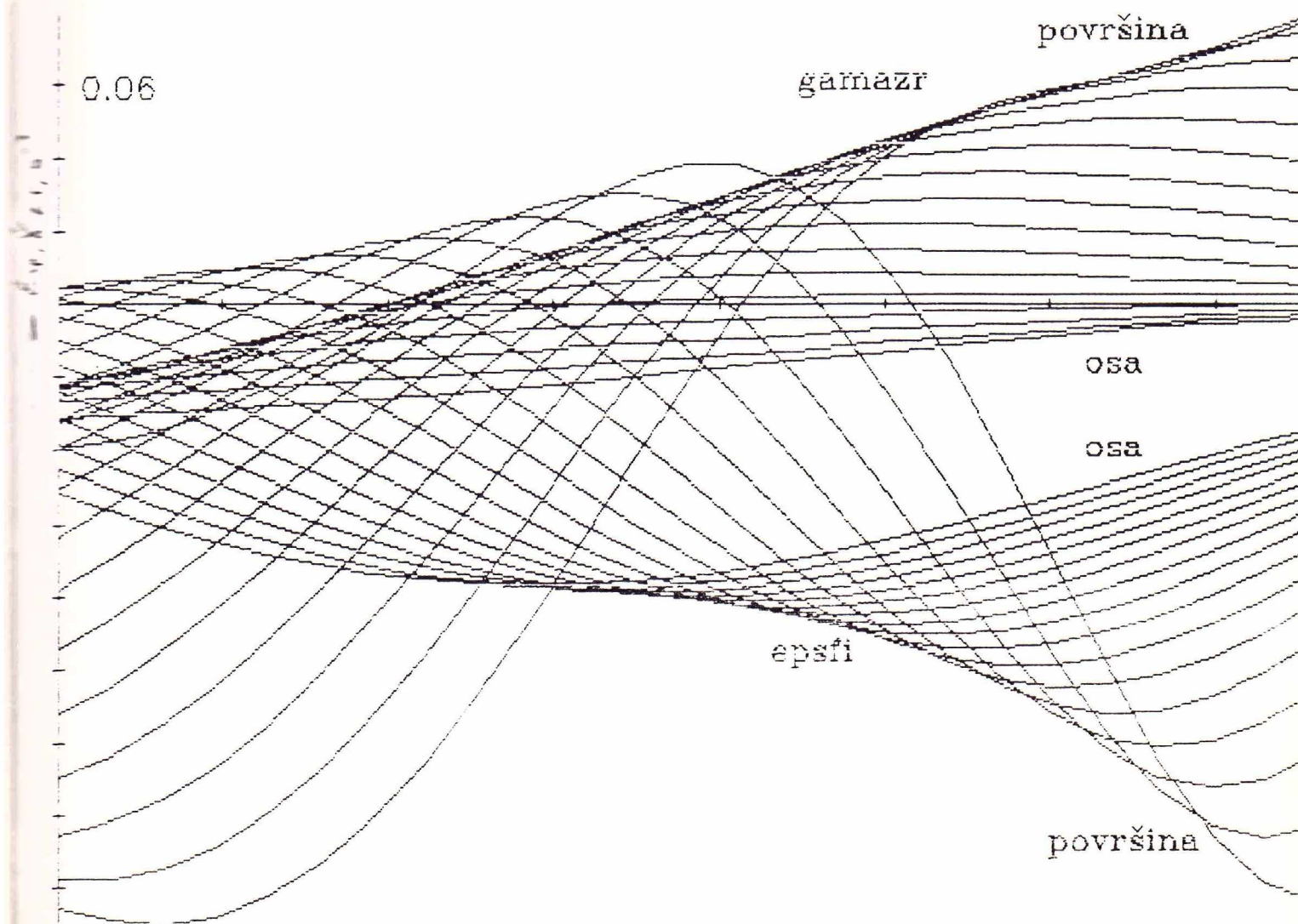
Na znatnom izlaznom dijelu zone deformacije ugaone brzine imaju vrijednosti veće od radijalnih brzina. Maksimum negativnih vrijednosti u blizini izlaza iz zone deformacije je u saglasnosti sa maksimumom osnih brzina i niskih vrijednosti radijalnih brzina.

Povećanje stepena deformacije na 0,25 (slika 38) izaziva promjene ugaonih brzina tako da se dio sa pozitivnim vrijednostima nalazi na samom ulazu u zonu deformacije.

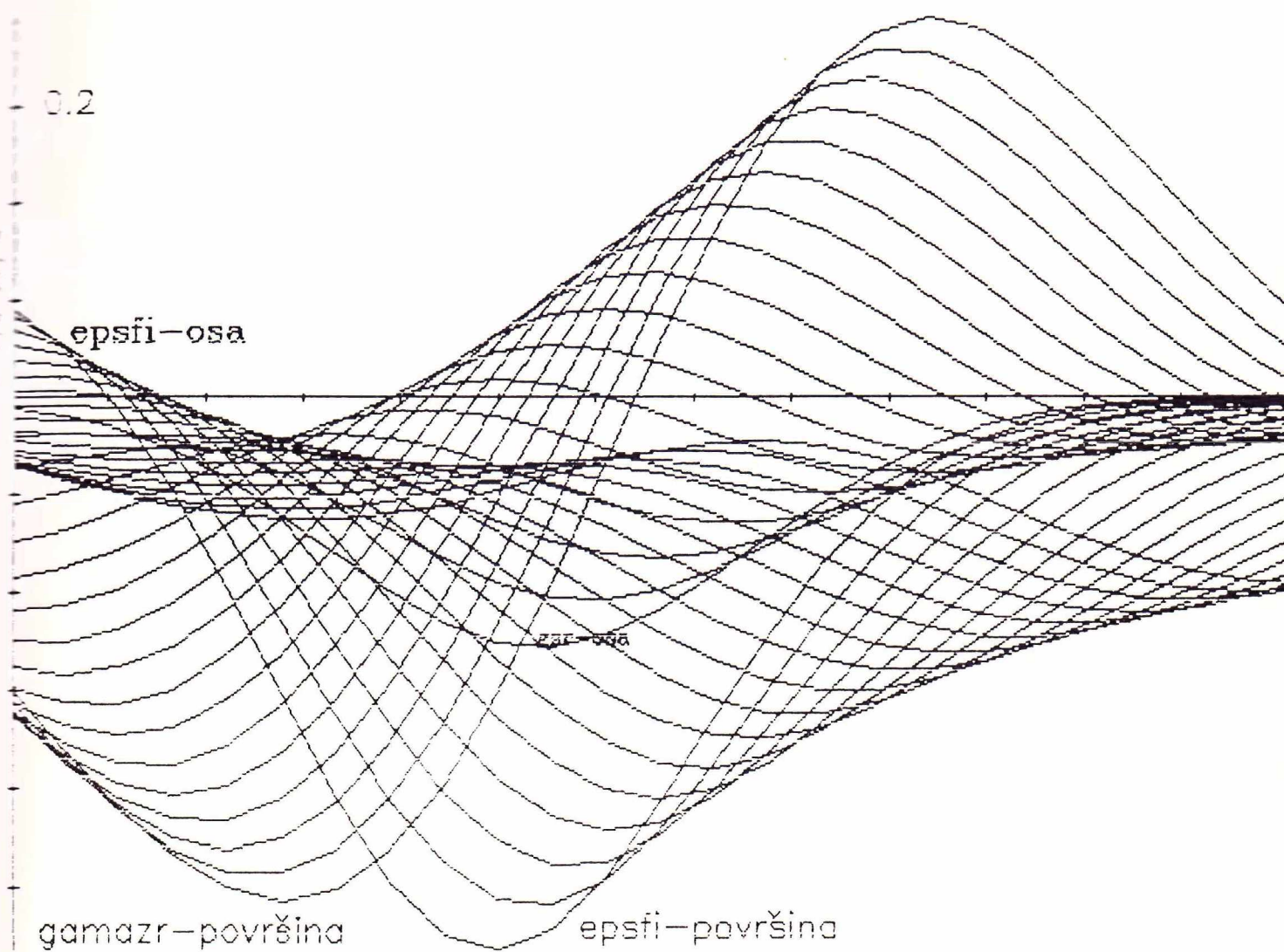
Ujedno se maksimum negativnih vrijednosti pomjera: za površinu ka sredini zone deformacije a za ostale položaje prema izlazu iz zone deformacije:

Za stepen deformacije 0,45 (slika 39) promjena ugaonih brzina je ravnomjerna po poprečnom presjeku i znatnom dijelu zone deformacije. Maksimum negativnih vrijednosti se nalazi na izlaznom dijelu zone deformacije i praktično je dva puta veći od maksimuma radijalnih brzina.

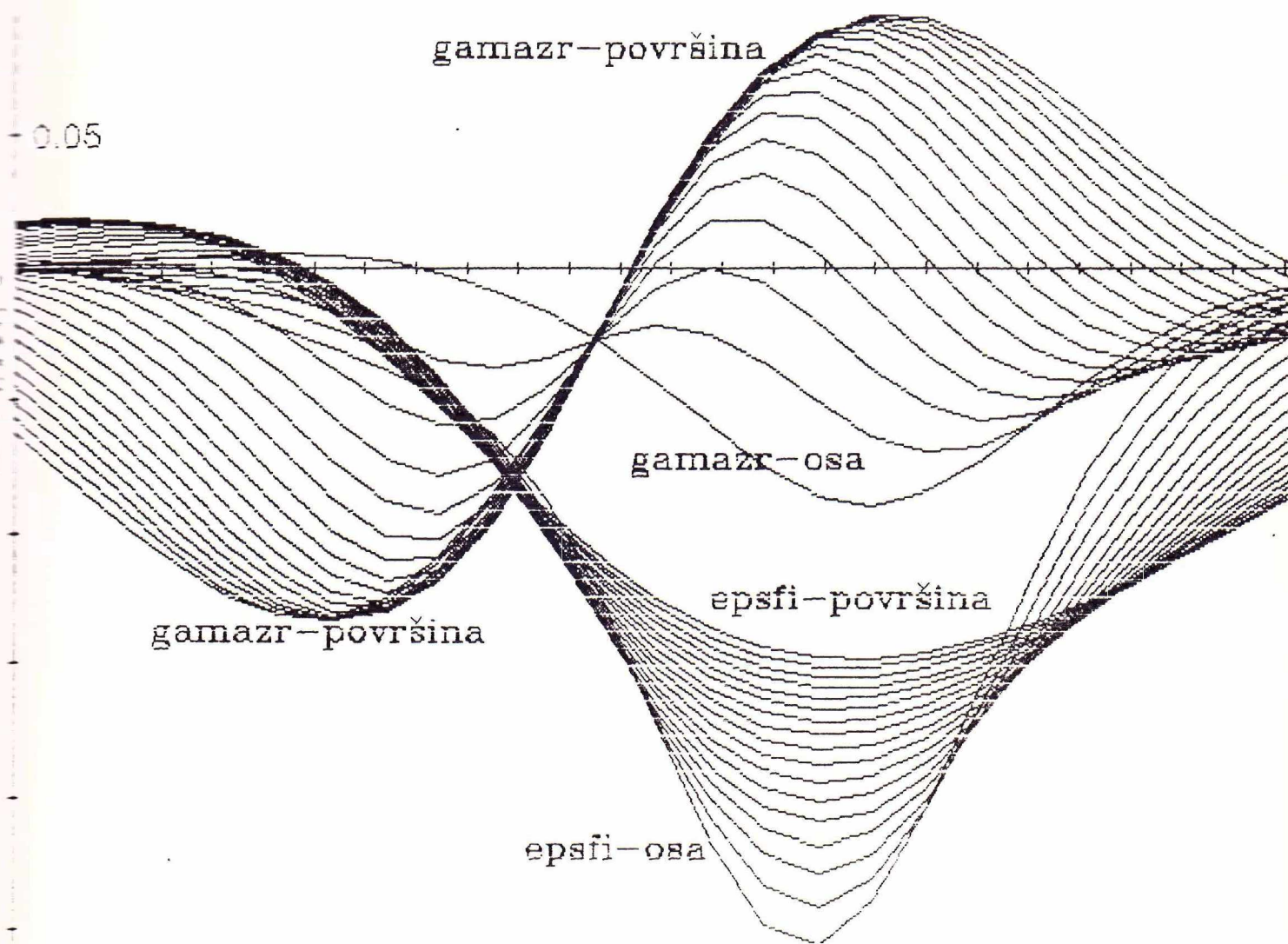
Brzina deformacije smicanja ima oblik krive sa periodičnim maksimalnim negativnim i pozitivnim vrijednostima. Za sve stepene deformacije u ulaznom dijelu zone se postižu maksimumi negativnih vrijednosti a izlaznom maksimum pozitivnih vrijednosti. Maksimalne negativne vrijednosti se neznatno razlikuju od maksimuma radijalnih brzina za veće stepene deformacije, a znatno je veći za najmanji stepen deformacije (37-39). Maksimalne pozitivne vrijednosti se postižu poslije postizanja maksimuma osnih brzina. U svim slučajevima osne brzine imaju znatno veće vrijednosti od brzina smicanja.



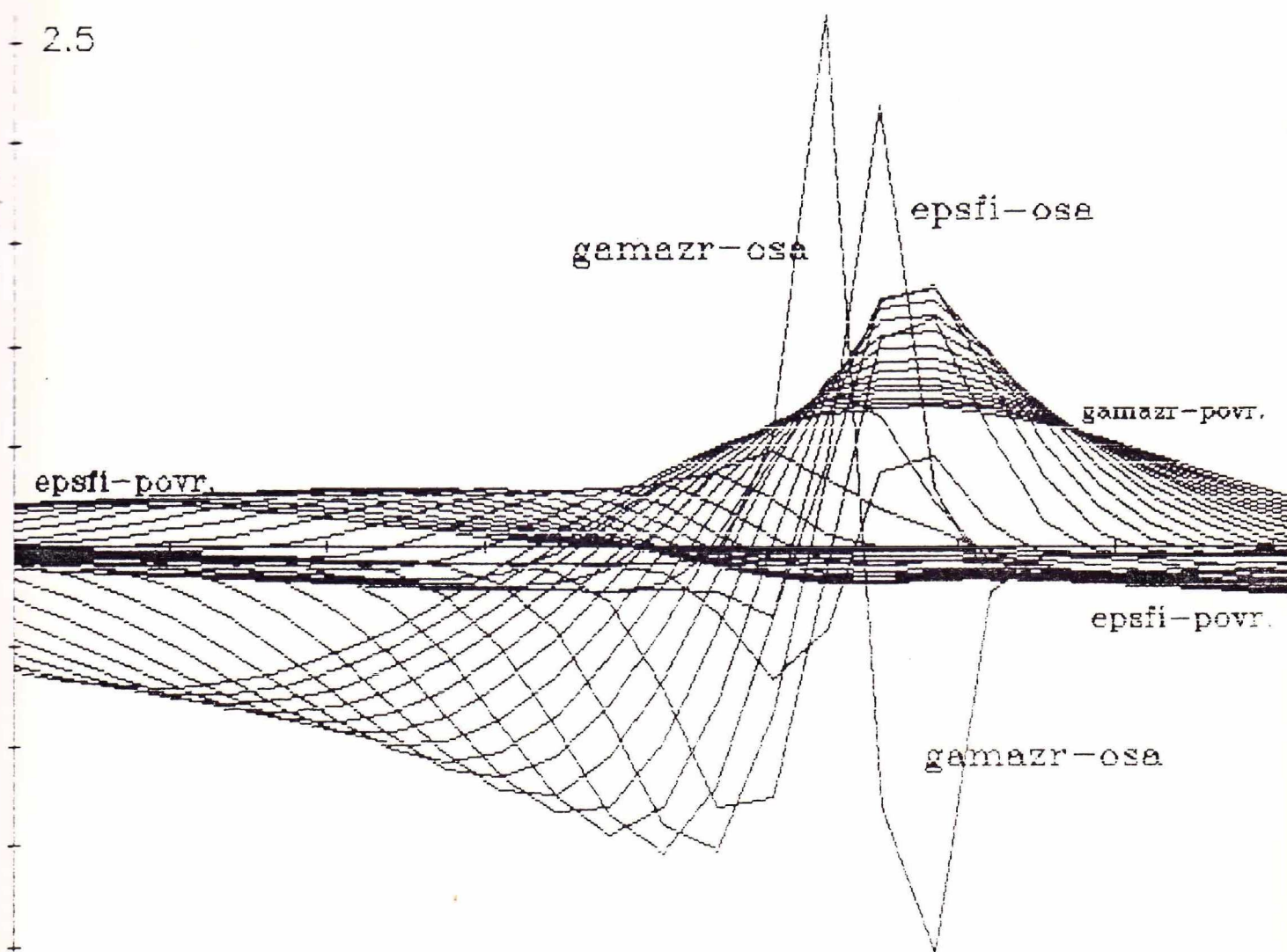
Sl.37. Promjena ugaonih i smicajnih brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=15$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3,33$  mm/s).



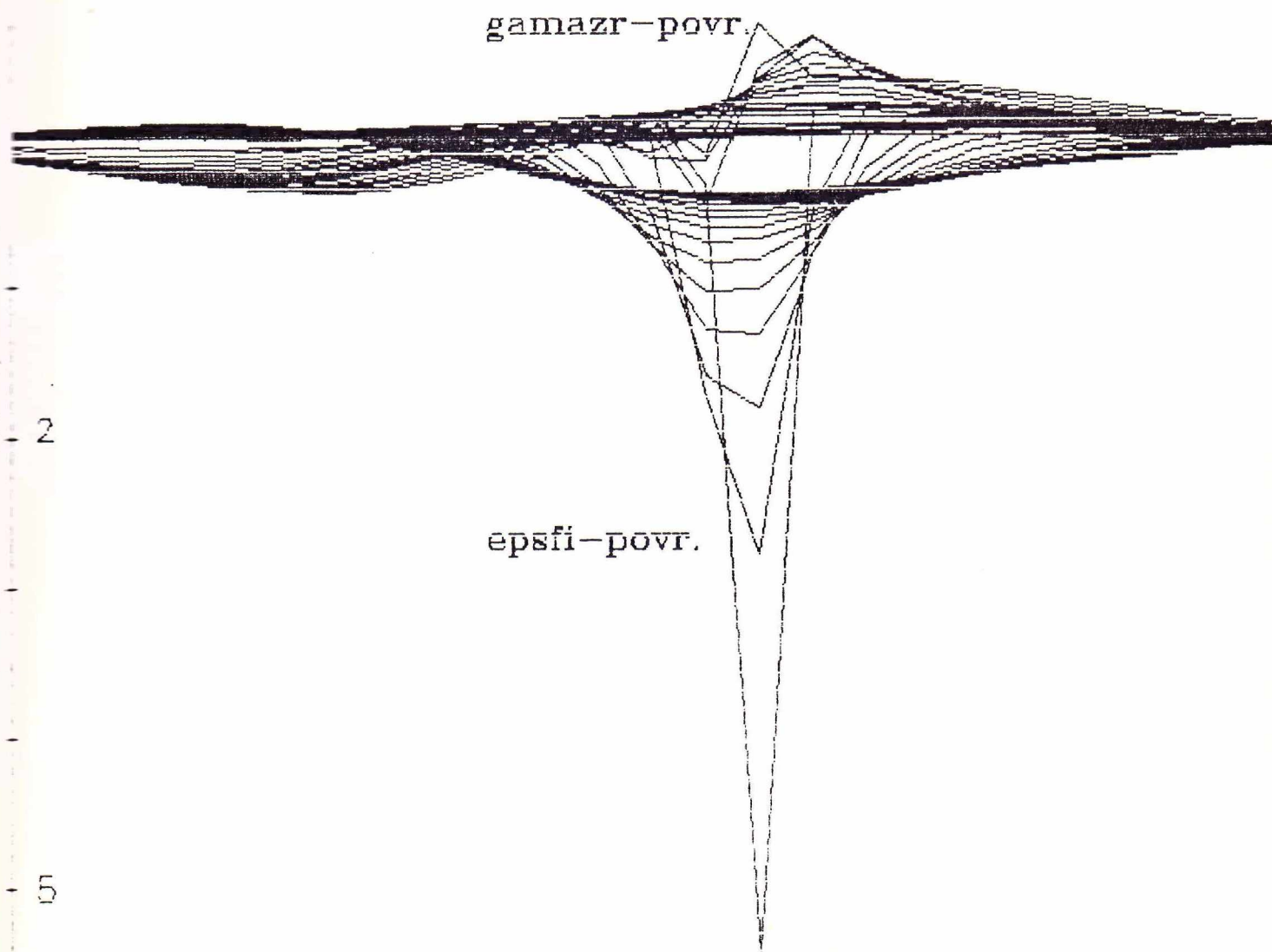
Sl.38. Promjena ugaonih (epsfi) i smicajnih (gamazr) brzina pri izvlačenju šipki Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



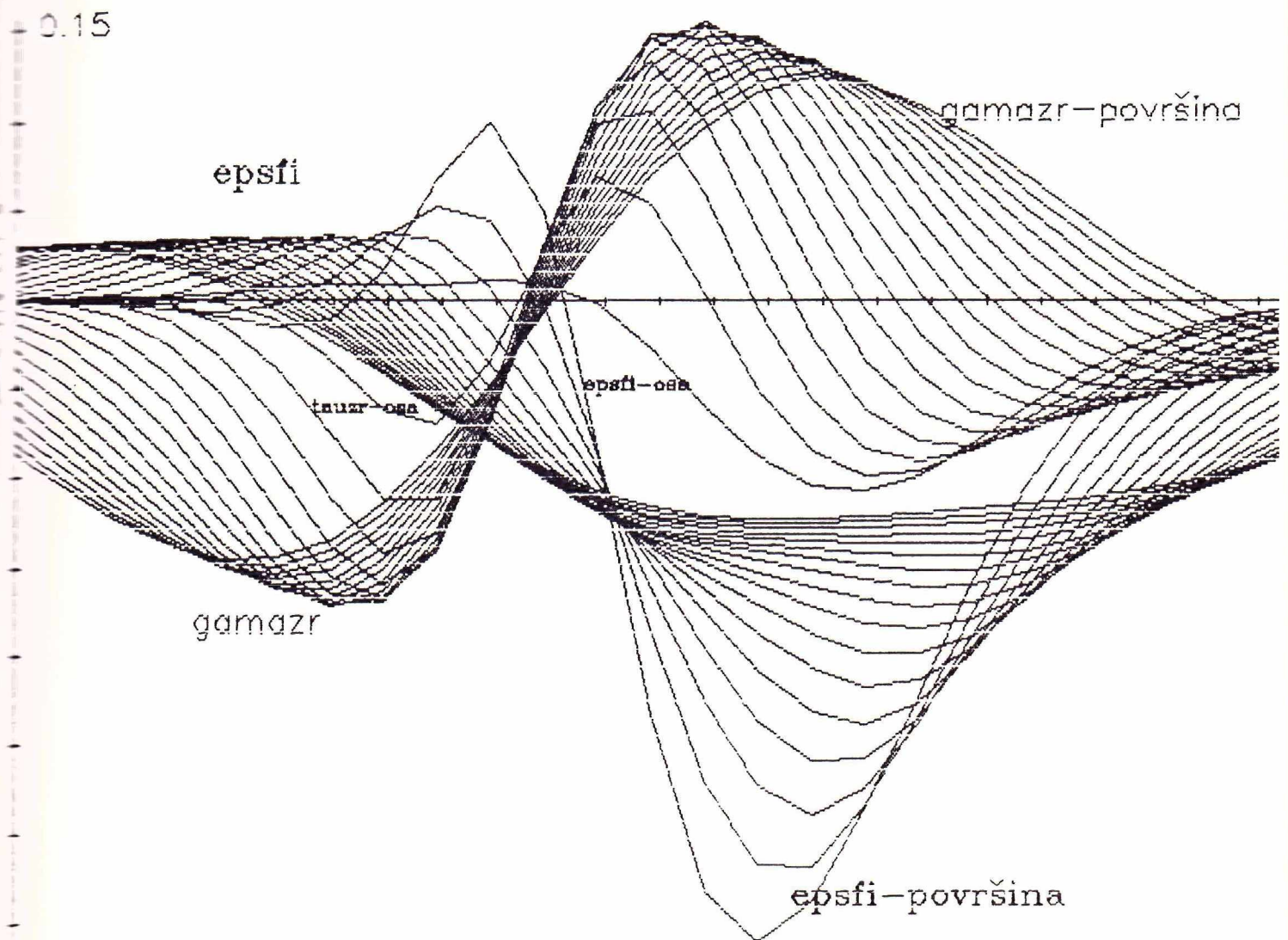
Sl.39. Promjena ugaonih i smicajnih brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=13$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3,33$  mm/s).



Sl.40. Promjena ugaonih (epsfi) i smicajnih (gamazr) brzina pri izvlačenju č.1220  
 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$ ;  $d_1 = 15 \text{ mm}$  sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  
 $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 6,66 \text{ mm/s}$ ).



SI.41. Promjena ugaonih i smicajnih brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16$  mm  $d_1 = 14$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3,33$  mm/s).



Sl.42. Promjena ugaonih i smicajnih brzina deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16$  mm  $d_1 = 13$  mm; sredstvo za podmazivanje parfin; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3,33$  mm/s).

Na osnovu izložene analize promjene brzina deformacije mogu se uopštiti sljedeće zakonitosti.

Radijalne brzine za sve stepene deformacije imaju ravnomjieran raspored po poprečnom presjeku sa naizmjeničnim promjenama odnosa ose i površine. Ravnomjernost je najviše izražena kod srednjeg stepena deformacije.

Osnne brzine se znatno mijenjaju sa promjenom stepena deformacije po obliku krive, vrijednosti maksimuma i odnosu između površine i ose. Najravnomjernija promjena je kod najvećeg stepena deformacije. Ugaone brzine se mijenjaju saglasno promjeni osnih i radijalnih brzina. Kod većih stepena deformacije njihove vrijednosti su negativne; promjena ima oblik krive sa maksimumom pri čemu se različiti položaji maksimuma i odnos površine i ose.

Brzinu smicanja imaju oblik S krive sa maksimalnom negativnom vrijednošću na početku zone deformacije a maksimalnom pozitivnom vrijednošću na izlaznom dijelu zone deformacije. Osa šipke u svim slučajevima ima najniže vrijednosti ovih brzina.

#### Uticao brzine izvlačenja na brzinu deformacije

Već je istaknuto da povećanje brzine izvlačenja izaziva različite promjene radijalnih i osnih brzina tečenja. Saglasno odredjenosti promjena brzina deformacije brzinama tečenja efekat brzine izvlačenja na brzinu deformacije je praćen naglim skokovima kako je to prikazano na dijagramima slika 33, 34, 40, 41. Očigledno je da takvi efekti mogu dovesti do vrijednosti brzina deformacije koje do pet puta prelaze srednje vrijednosti. Takvi efekti su mogući samo na osi i na površini uzorka.

Na taj način postoji jasna veza obrnute proporcionalnosti između brzine izvlačenja i tačnosti geometrijskog profila komada.

### Uticaj polaznog prečnika na brzinu deformacije

Dijagrami prikazani na slici 36 prikazuju promjenu radijalnih i osnih brzina pri deformaciji u istim uslovima kao na slici 28. Očigledna je sličnost u zakonu promjene osnih brzina sa polaznim prečnicima 16 mm, s tom razlikom što se oblast pozitivnih radijalnih brzina na ulazu u zonu deformacije proširuju na znatan potpovršinski sloj. Kod osnih brzina je ravnomjeran položaj maksimuma, a oblast njihovog prostiranja je, praktično, čitava zona deformacije.

Promjena sredstva za podmazivanje kao i kod brzina tečenja ne izaziva znatnije promjene brzina deformacije.

Na kraju je potrebno istaći da se navedene zakonitosti promjene kinetičkih parametara neznatno razlikuje za sva tri kvaliteta navedenih čelika. Zbog toga je u analizi uzet samo jedan čelik.

#### 4.8.3. Intenziteti brzina deformacije i deformacija

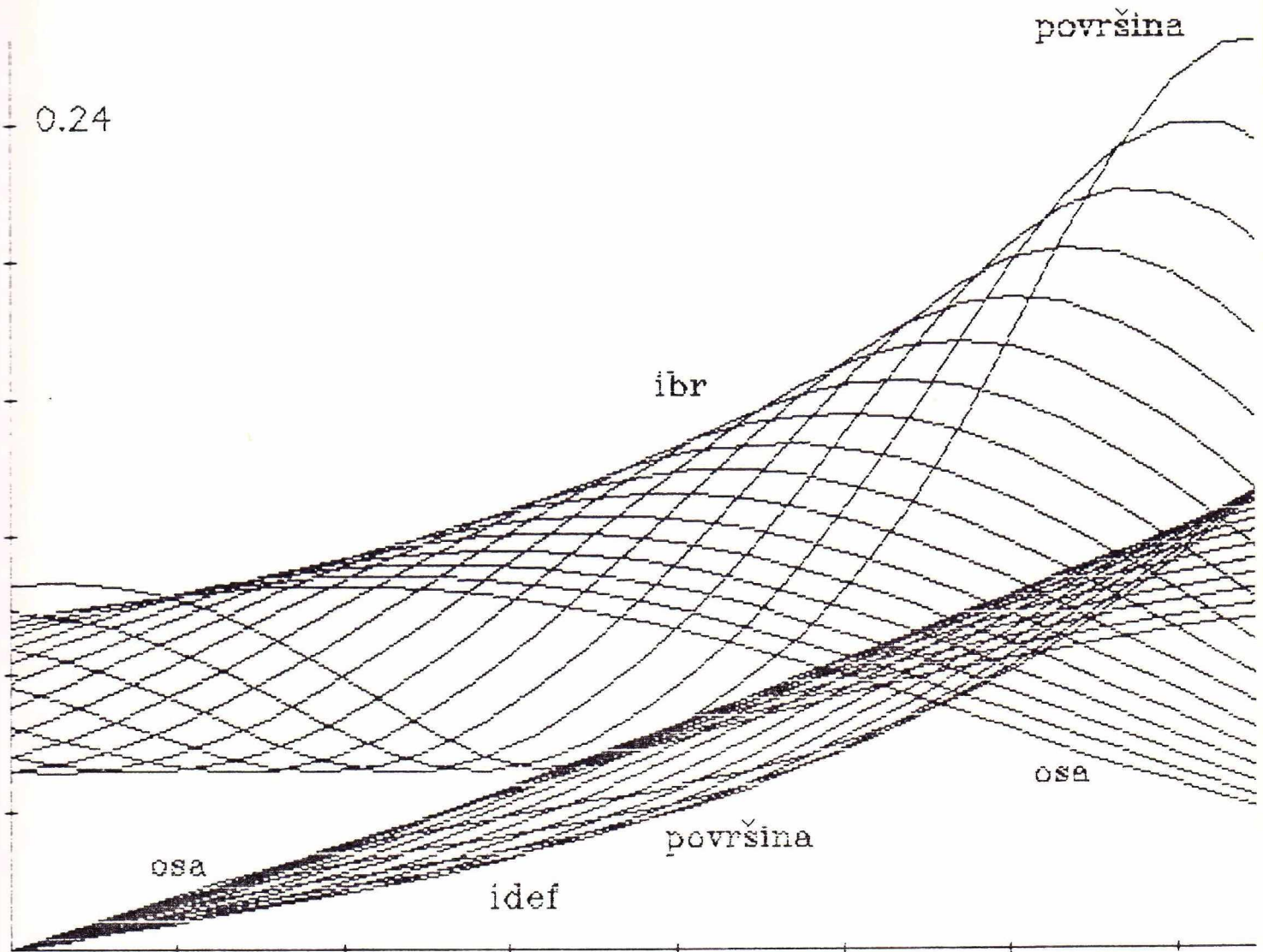
Intenzitet brzina deformacije je proračunat po jednačini intenziteta linijskih deformacija prilagodjenoj za osnosimetrične procese:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_z^2 + \dot{\epsilon}_\phi^2 + \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zr}^2)} \quad (43)$$

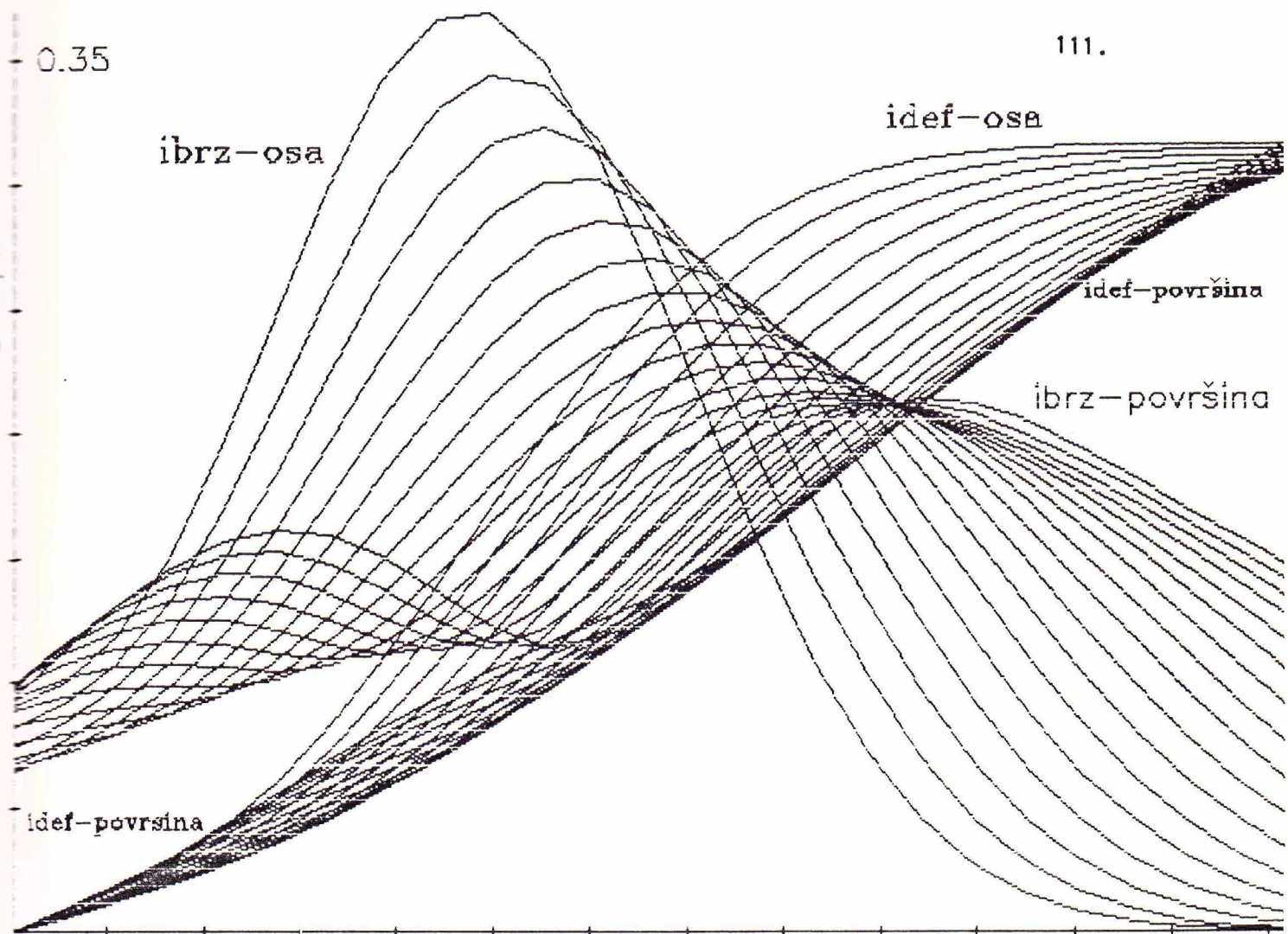
Intenzitet deformacije je proračunat na osnovu intenziteta brzine deformacije po izrazu:

$$\bar{\epsilon} = \int_0^{\tau} \dot{\bar{\epsilon}} d\tau = \int_0^z \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{V_0} dz \quad (44)$$

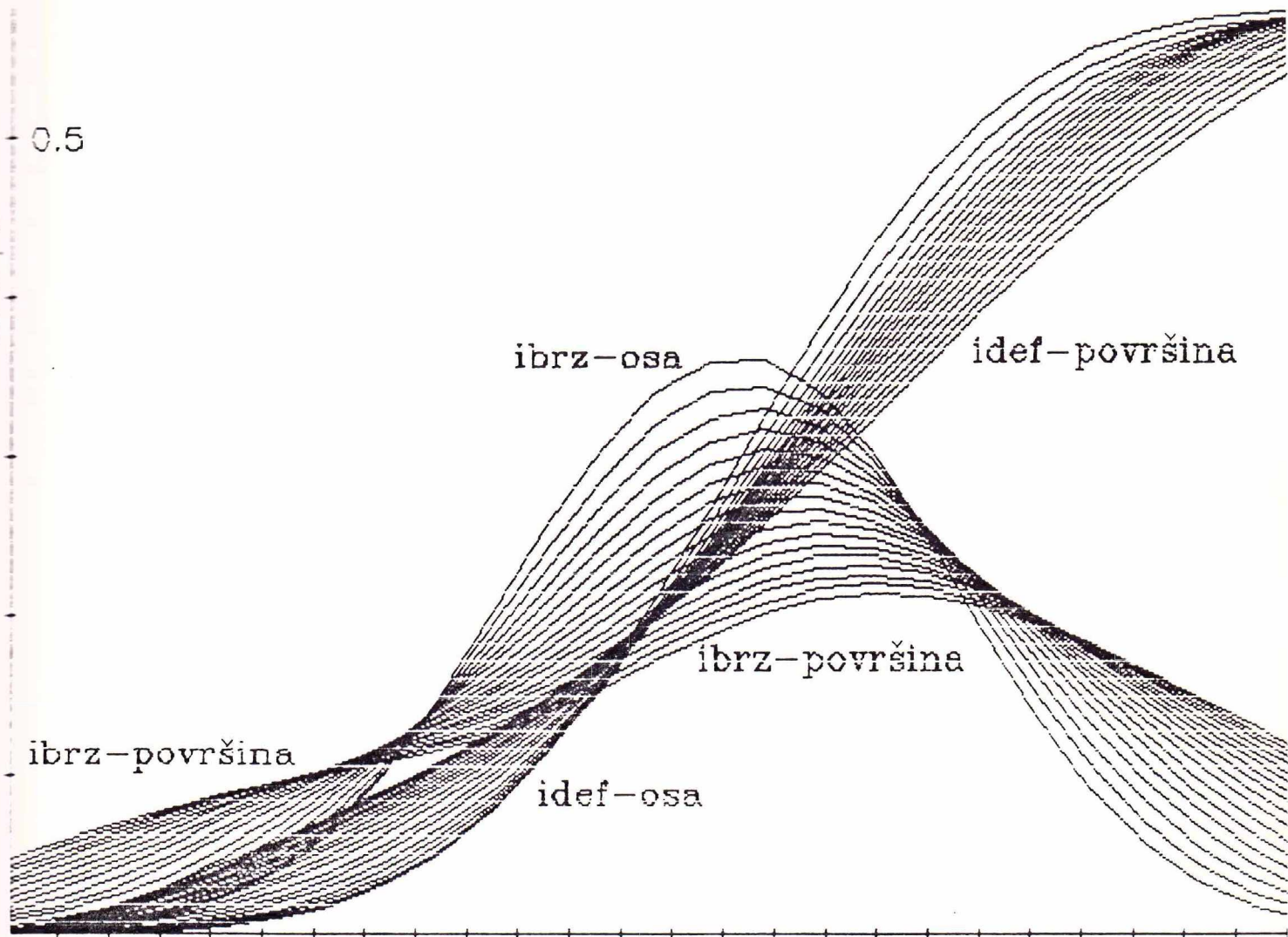
Integracija je vršena duž ose-z po Simsonovom pravilu. U cilju povećanja tačnosti integracije interval 1/24 dužine zone deformacije je podijeljen na polovinu. Vrijednost funkcije u datim tačkama je određena kao



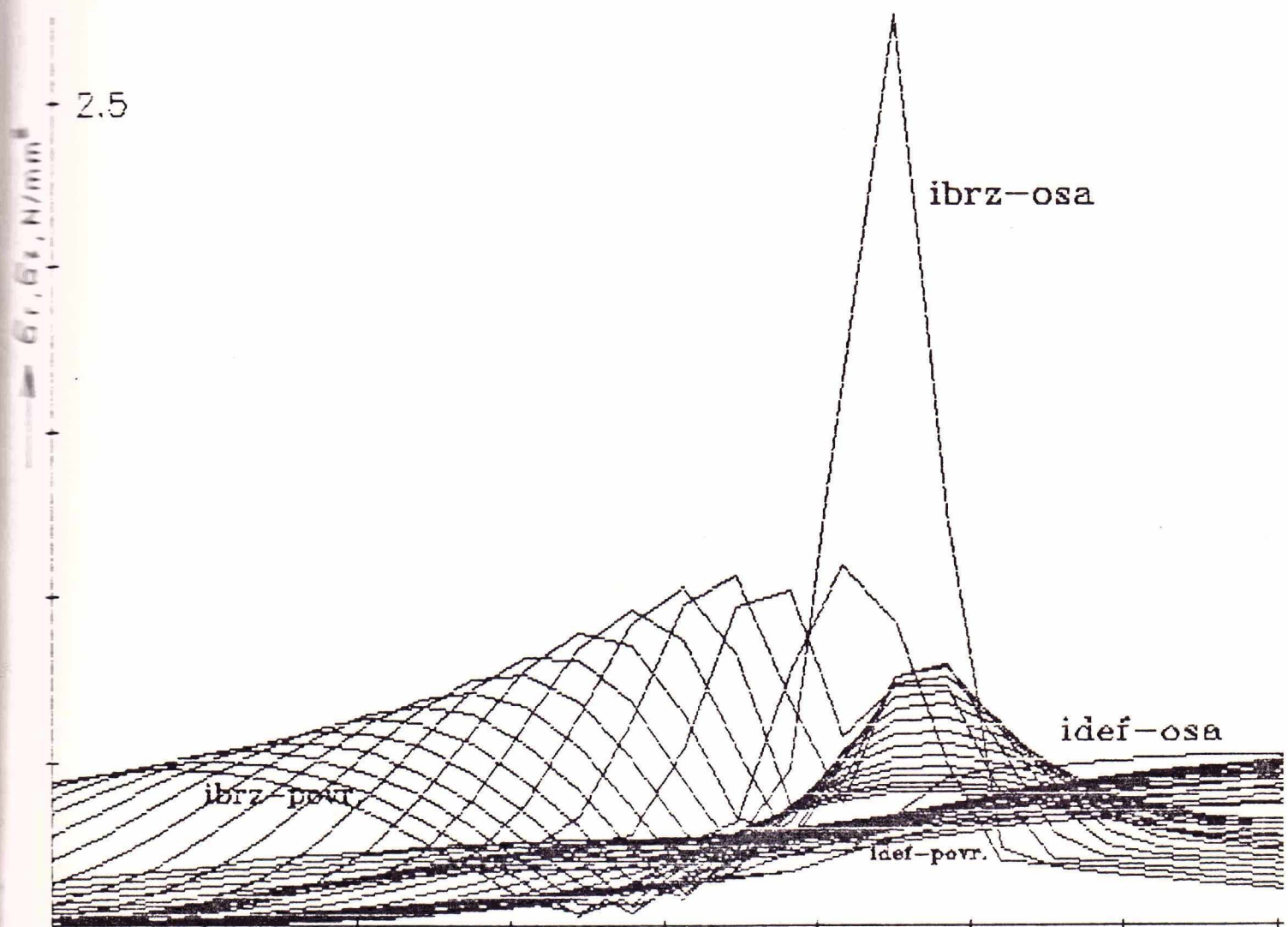
Sl.43. Promjena intenziteta brzina deformacije ( $i_{br}$ ) i intenziteta deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 15 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje;  $u_{g00}$  matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



Sl. 44. Promjena intenziteta brzina deformacije ( $i_{br}$ ) i intenziteta deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=14$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2=0,157$  rad;  $v_0=3,33$  mm/s).



Sl.45. Promjena intenziteta brzina deformacije (ibr) i intenziteta deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 13 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



Sl.46. Promjena intenziteta brzina deformacije (ibr) i intenziteta deformacije pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 15 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 6,66 \text{ mm/s}$ ).

šestina zbira vrijednosti funkcije na početku, četverostruke vrijednosti na sredini i vrijednosti funkcije na kraju intervala.

Prikaz rezultata za tri analizirana stepena deformacije je dat na slikama (43-46).

Na dijagrama se uočava da zakonitosti promjene intenziteta brzina deformacije i intenziteta deformacije u potpunosti odražavaju promjene osne brzine deformacije i osne brzine tečenja, što znači da u potpunosti odražavaju karakter procesa sa stanovišta naponskog stanja, i najveće glavne deformacije. U svim slučajevima početak zone deformacije odgovara najvećim vrijednostima intenziteta na površini; taj odnos se mijenja duž zone deformacije, a da pri tome površina ima najkompliciraniju trajektoriju sa dva izražena maksimuma na krajevima zone deformacije i minimumom u sredini zone deformacije.

#### 4.9. NAPONSKE KARAKTERISTIKE PROCESA

U uvodnom dijelu su date diferencijalne jednačine komponenta napona za proces izvlačenja. Rješavanje jednačina zahtijeva definisanje graničnih i početnih uslova. Budući da je u postavci modela ostavljena mogućnost radijalne deformacije ose to početni uslov da je radijalni napon na osi jednak nuli nije mogao biti primijenjen zato je prvo određena vrijednost osnog napona iz druge jednačine uslova ravnoteže:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = - \left( \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\tau_{zr}}{r} \right), \quad (45)$$

odakle je

$$\sigma_z = \int_0^z \left( \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{zr}) + \frac{\tau_{zr}}{r} \right) dz, \quad (46)$$

gdje je

$$\tau_{zr} = \frac{1}{3\lambda} \gamma_{zr}.$$

Diferenciranjem  $\tau_{zr}$  po r-koordinati je određena podintegralna funkcija. Kao početni uslov za određivanje integracione konstante je usvojena jednakost osnog napona i otpora metala deformaciji na ulazu u zonu deformacije. Ostale komponente napona su na ulazu u zonu deformacije izjednačene sa nulom, a duž zone deformacije proračunate iz jednačina Levy-Misesa.

Integracija za osni napon je vršena po Simsonovom pravilu sa istim korakom intervala kao kod intenziteta deformacija.

Budući da u modelu plastičnosti  $\lambda$  figuriše otpor metala deformacije neophodno je bilo usvojiti zakon njegove promjene. Na raspolaganju su bile jednačine dobijene laboratorijskim ispitivanjem pri zatezanju i pritiskivanju. Usvojena je jednačina dobijena zatezanjem iz razloga što su vrijednosti pri zatezanju, u svim slučajevima veće od vrijednosti pri pritiskivanju. Ujedno karakter dejstva spoljašnje sile (odnosno najvećeg glavnog napona) upućuje na uslove zatezanja i kao reakciju odgovarajući otpor. Saglasno ovako usvojenom zakonu kao odgovarajući stepen deformacije je uzet vrijednost ukupnog  $\Delta z$ -pomjeranja od ulaza do izlaza iz zone deformacije. Tako je diferenciranje otpora metala deformacije po r i z koordinati prevedeno na diferenciranje funkcije ukupnog  $\Delta z$ -pomjeranja, tj.:

$$K_f = K_p + A\phi^n = K_{fo} + A \ln\left(\frac{z_0 + \Delta z}{z_0}\right)^n \quad (47)$$

$$\frac{\partial K_f}{\partial r} = A \frac{\partial \left( \ln\left(\frac{z_0 + \Delta z}{z_0}\right) \right)}{\partial r} \cdot \frac{\partial \Delta z}{\partial r} \quad (48)$$

Proračunata vrijednost otpora deformacije je kontrolisana duž zone deformacije, korelacijom sa intenzitetom napona.

Na osnovu vrijednosti osnovog napona su proračunate ostale komponente napona po jednačinama Levy-Misesa.

Provjera proračuna je vršena upoređenjem vrijednosti otpora deformaciji po jednačini (47) i otpora deformacije određenog kao intenzitet normalnih napona.

Rezultati za osni i radijalni napon su prikazani na slikama 47-53. Rezultati za ugaoni i tangencijalni napon su prikazani na slikama 54-59.

Rezultti za otpor metala deformacije su prikazani na slikama 63 - 65.

#### 4.9.1. Analiza uticaja stepena deformacije na napone

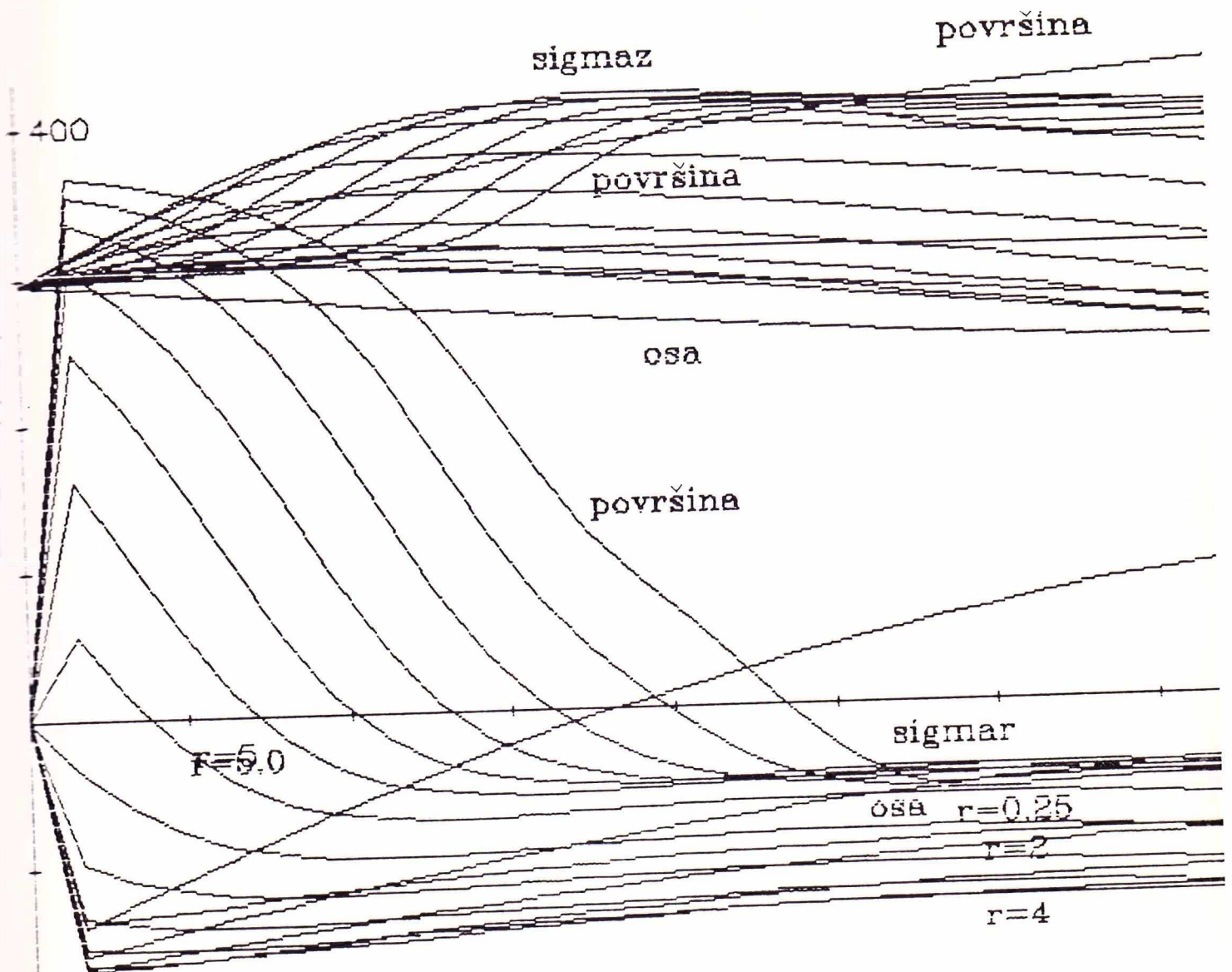
Sa dijagrama datih na slikama 47-59 se vide da su zakonitosti promjene komponente osnovog i radijalnog napona imaju oblik koji je fenomenološki veoma sličan u zavisnosti od stepena deformacije.

Pri stepenu deformacije 0,13 promjena osnih napona je ravnomjerna do rastojanja  $\approx 3,5$  mm ispod površine u tom dijelu osni naponi neznatno rastu od ulaza u zonu do sredine zone deformacije a zatim neznatno padaju do izlaza iz zone deformacije. U dijelu od površine do navedenog rastojanja promjena napona je na jednom dijelu intenzivna pri čemu se početak rasta pomjera duž zone sa približavanjem površini. U nastanku zone deformacije ova oblast ima praktično bliske vrijednosti koje se ne mijenjaju do izlaza iz zone deformacije slika 47.

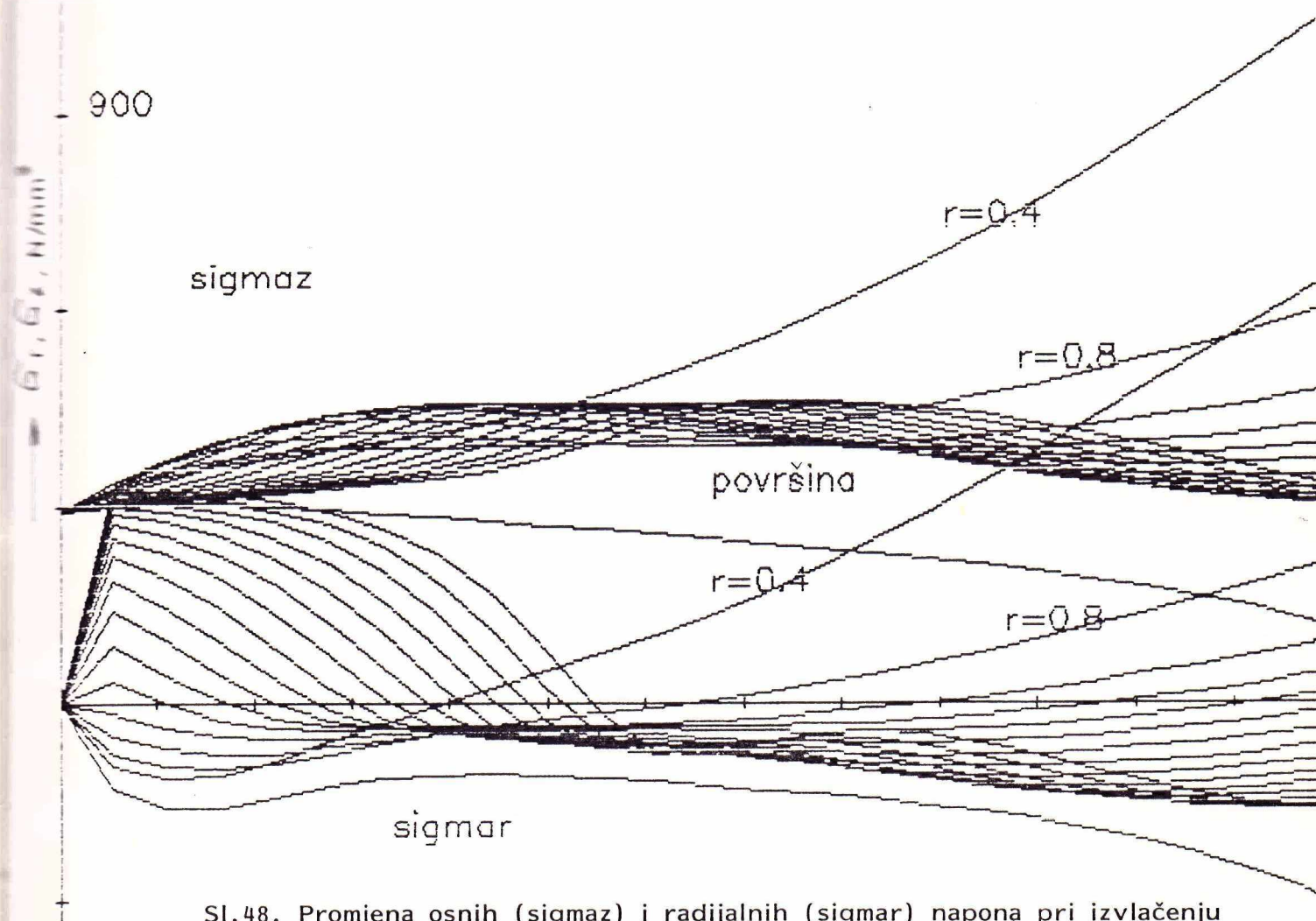
U poredjenju sa otporom metala deformacije vrijednost osnih napona se u svim slučajevima, izuzev za prvi sloj iznad ose, manja od vrijednosti otpora metala deformaciji.

Radijalni naponi na ulazu u zonu deformacije imaju pozitivnu vrijednost za površinski sloj iste debljine koji je naveden kod osnih napona.

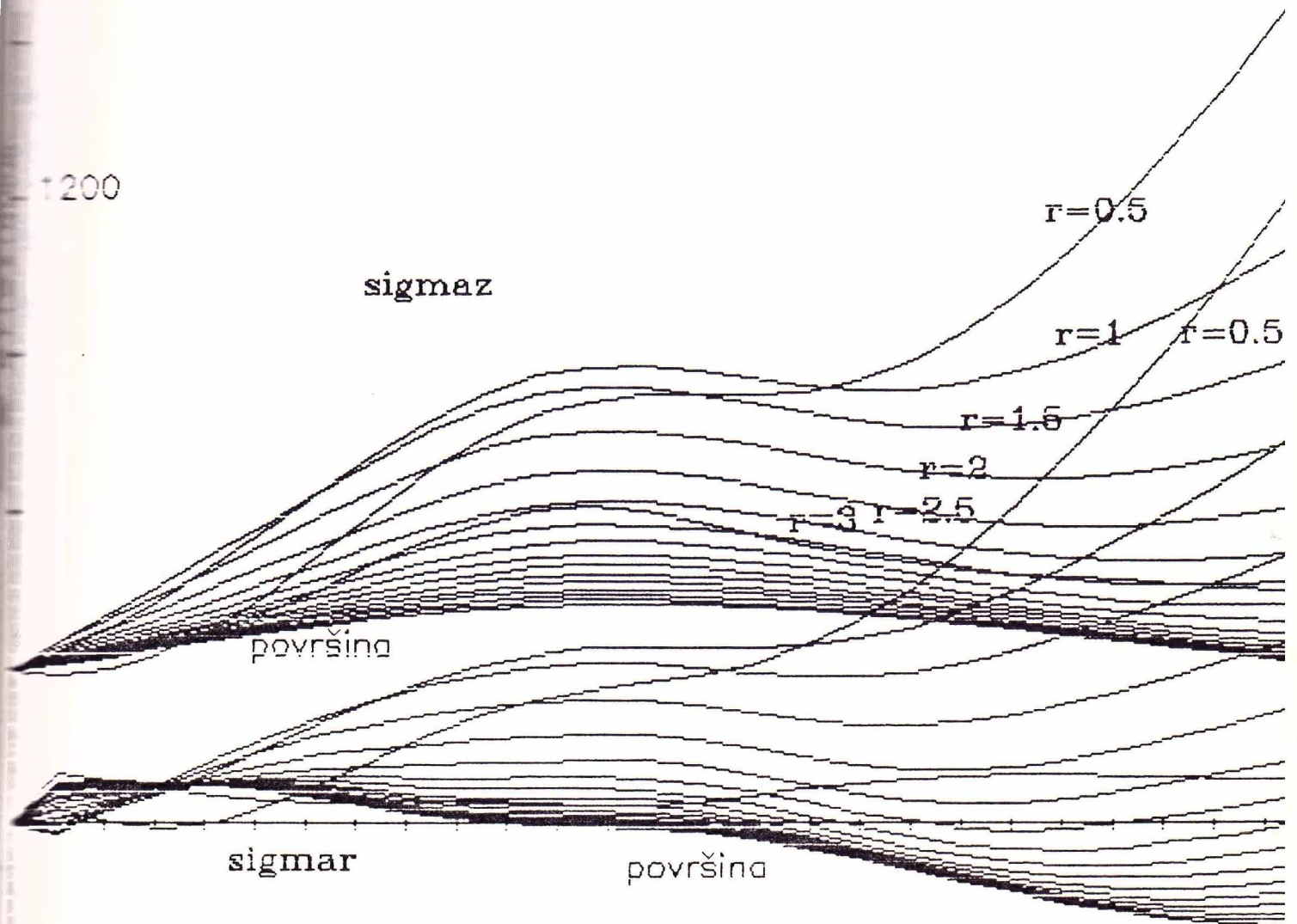




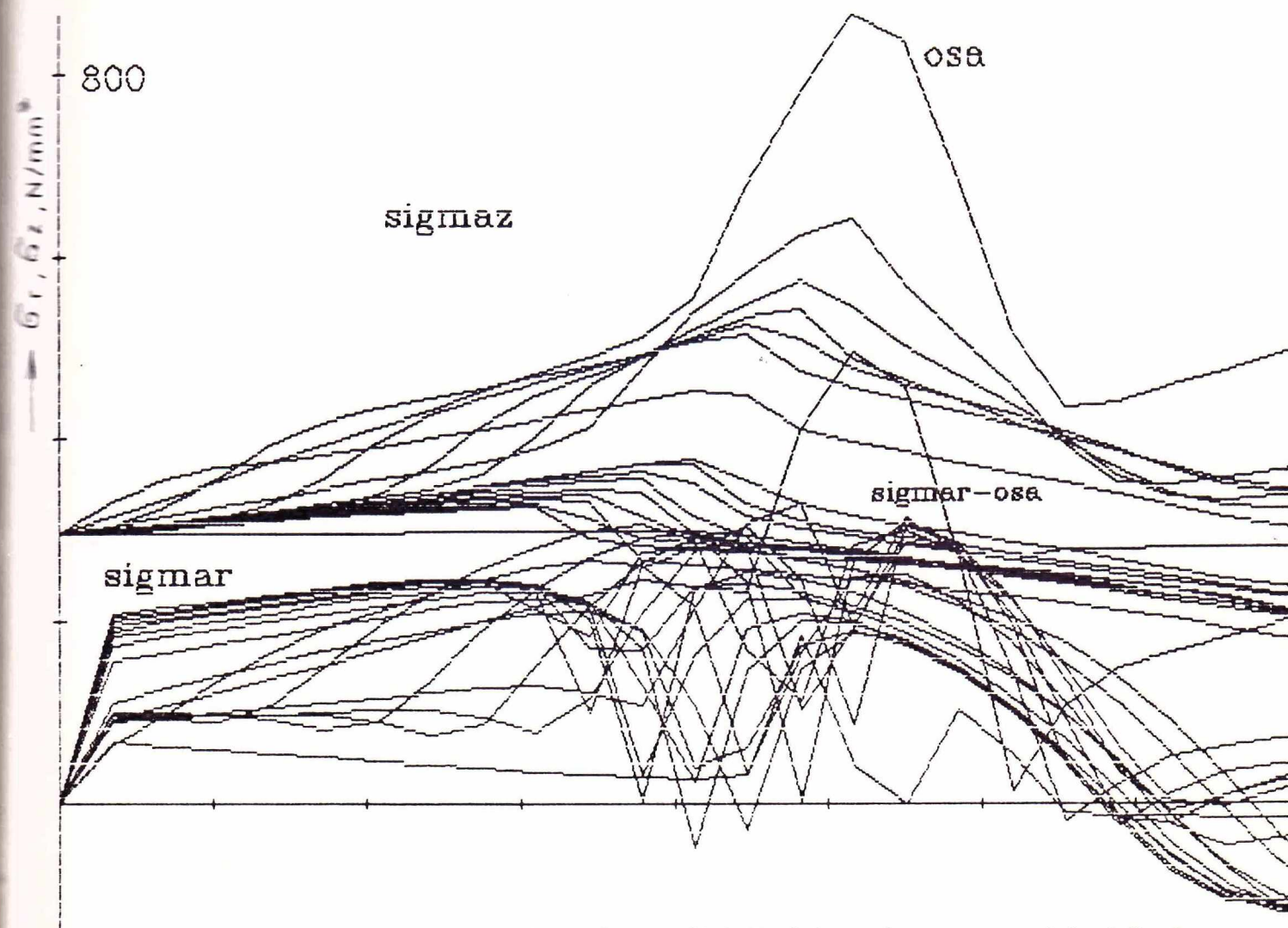
Sl.47. Promjena osnih ( $\sigma_{maz}$ ) i radijalnih ( $\sigma_{mar}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=15$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3,33$  mm/s).



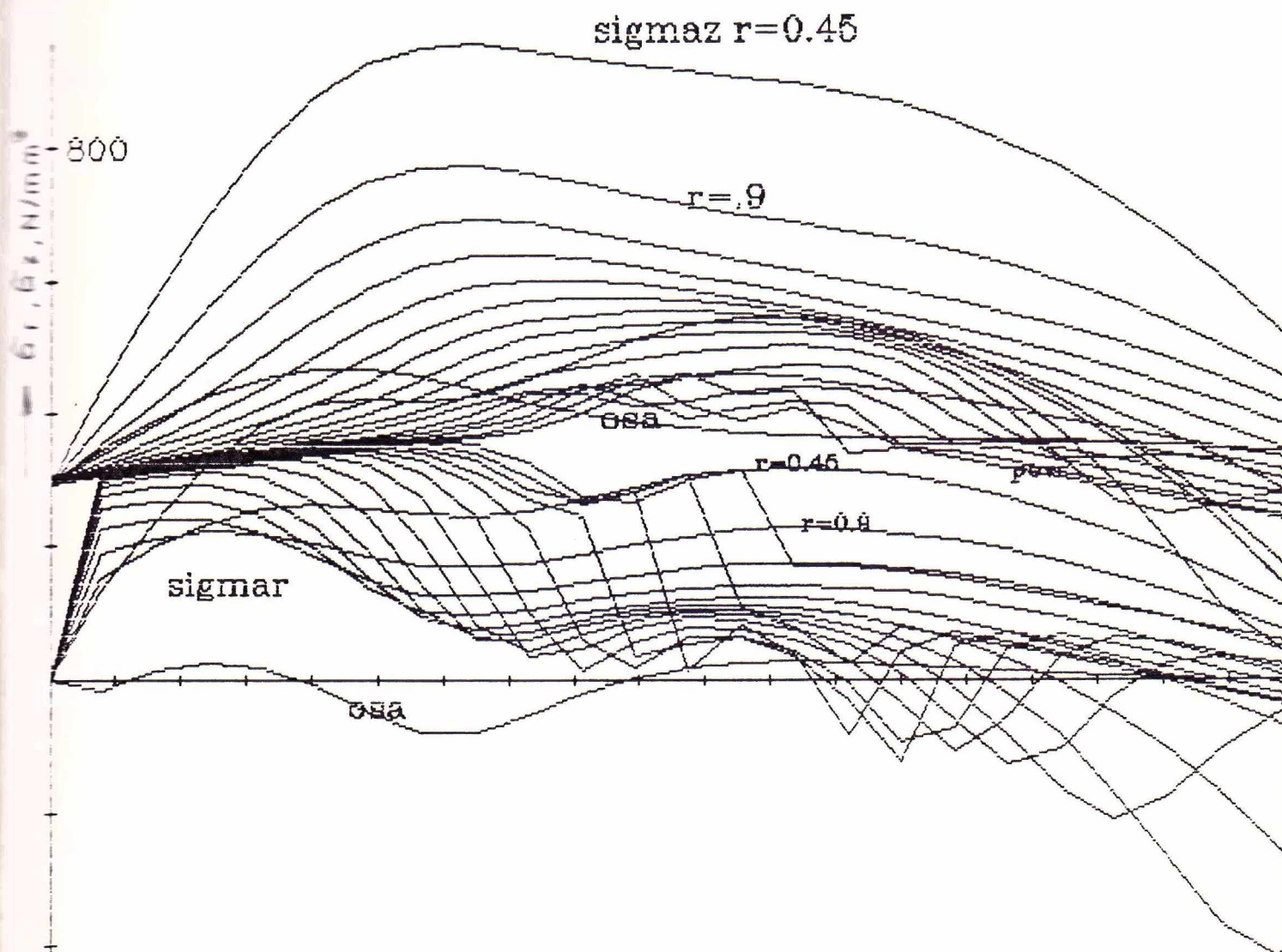
Sl.48. Promjena osnih ( $\sigma_{\text{maz}}$ ) i radijalnih ( $\sigma_{\text{mar}}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 14 \text{ mm}$ ; sredsvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



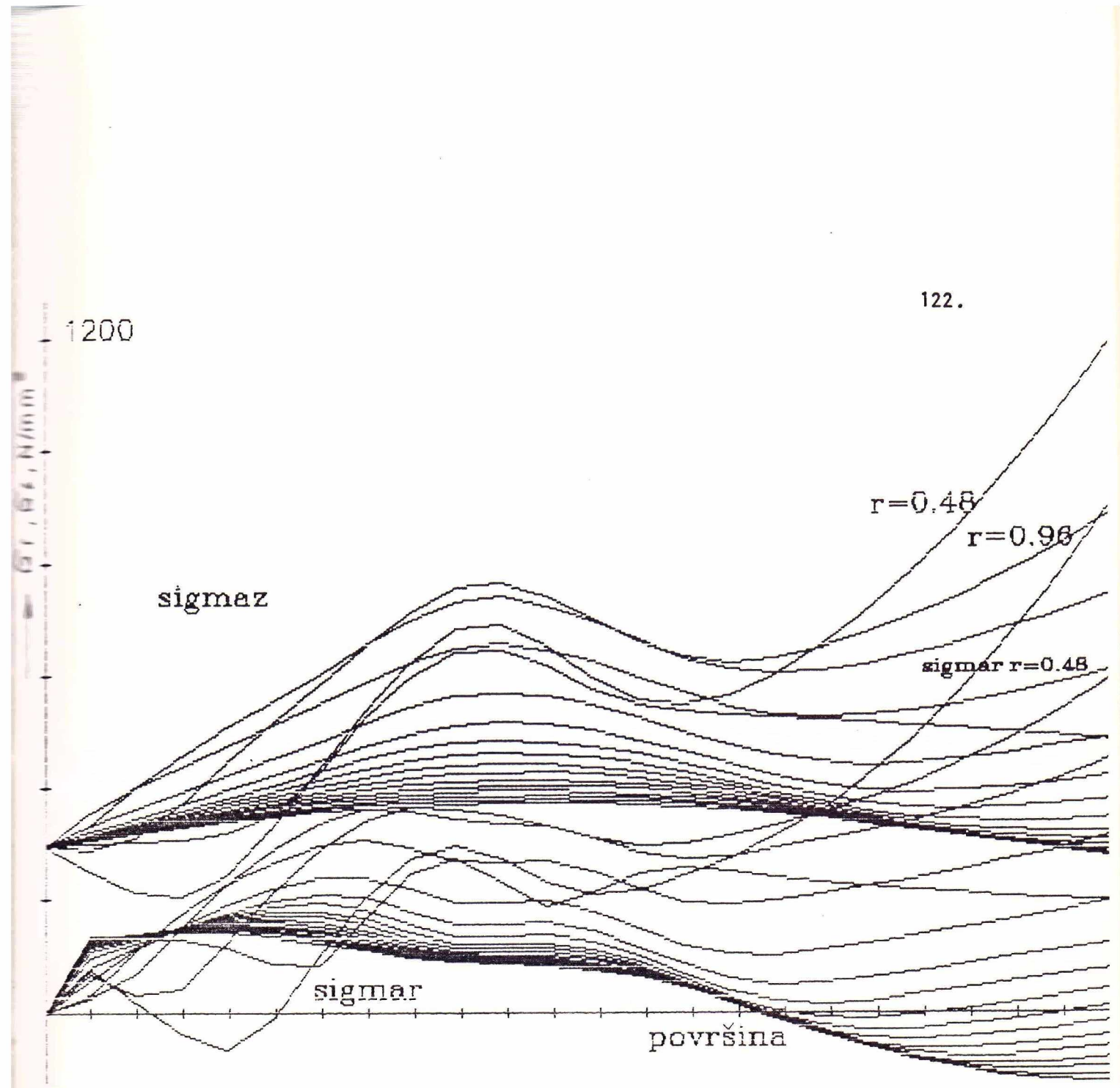
Sl.49. Promjena osnih ( $\sigma_{maz}$ ) i radijalnih ( $\sigma_{mar}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16$  mm  $d_1 = 13$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3,33$  mm/s).



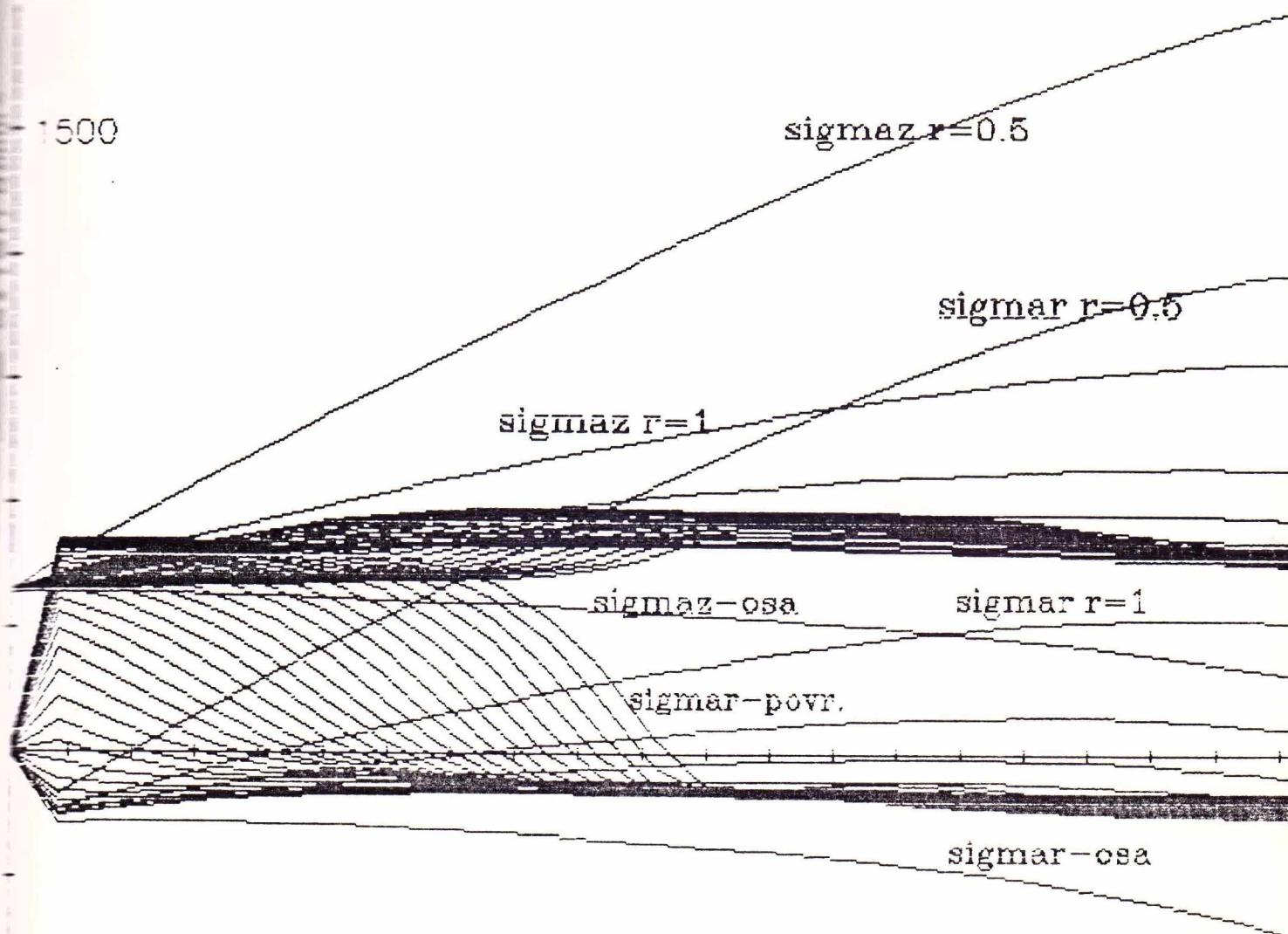
Sl.50. Promjena osnih ( $\sigma_{maz}$ ) i radijalnih ( $\sigma_{mar}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č:.1220 ( $d_0=16$  mm  $d_1=15$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 6,66$  mm/s).



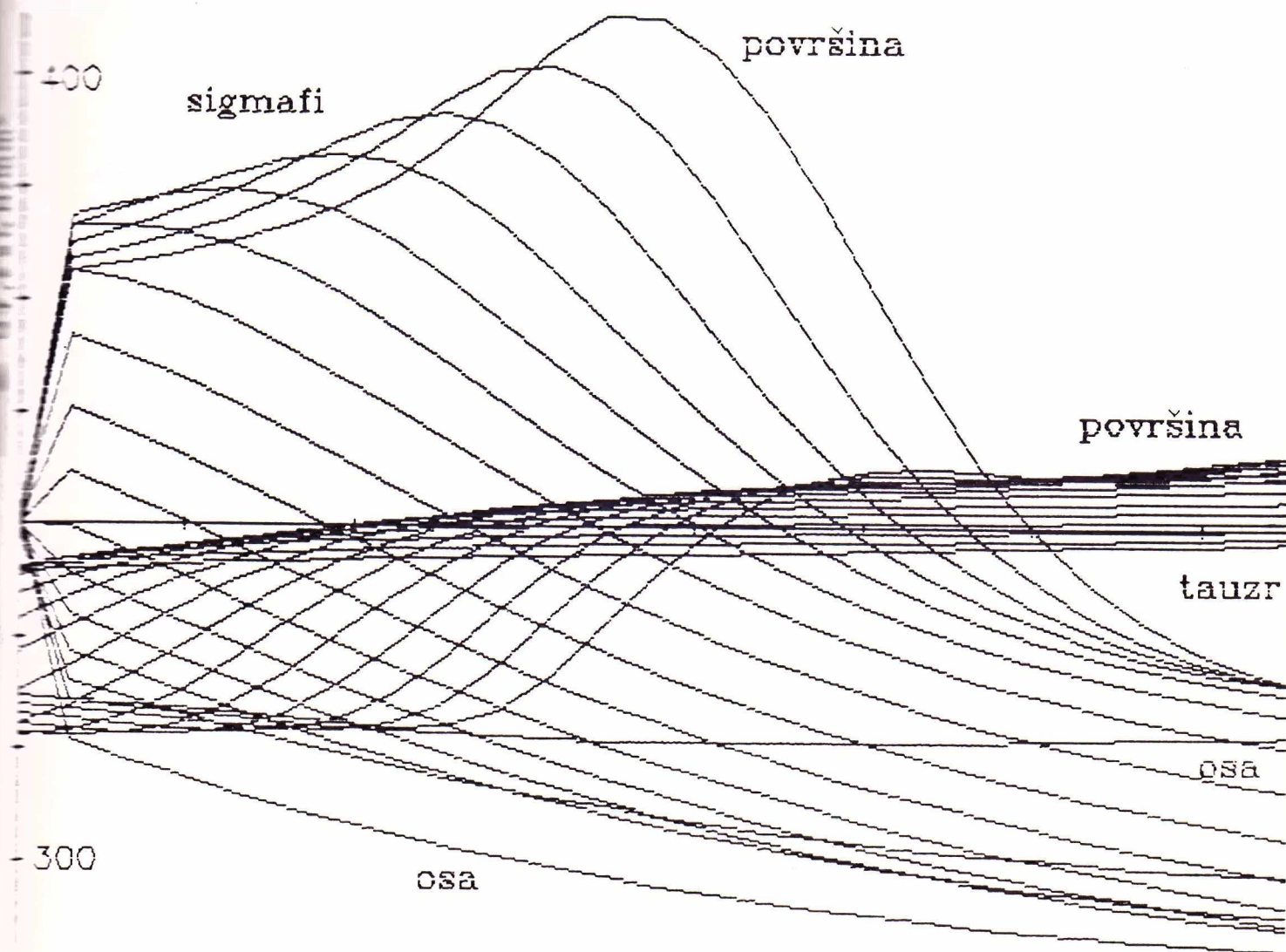
Sl.51. Promjena osnih ( $\sigma_{maz}$ ) i radijalnih ( $\sigma_{mar}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0=16 \text{ mm}$   $d_1=14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 6,66 \text{ mm/s}$ ).



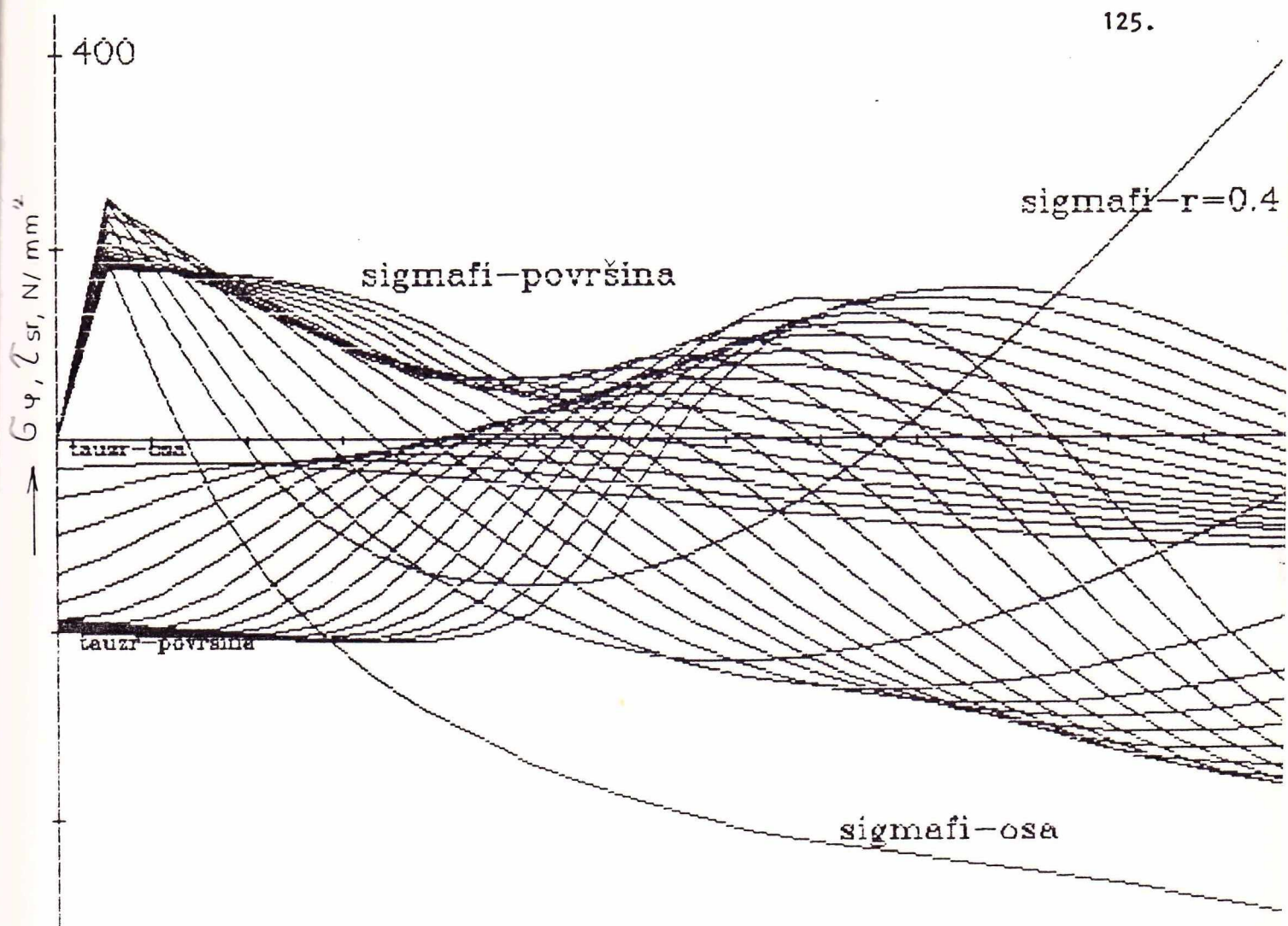
Sl.52. Promjena osnih ( $\sigma_{maz}$ ) i radijalnih ( $\sigma_{mar}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 13 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje parafin; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



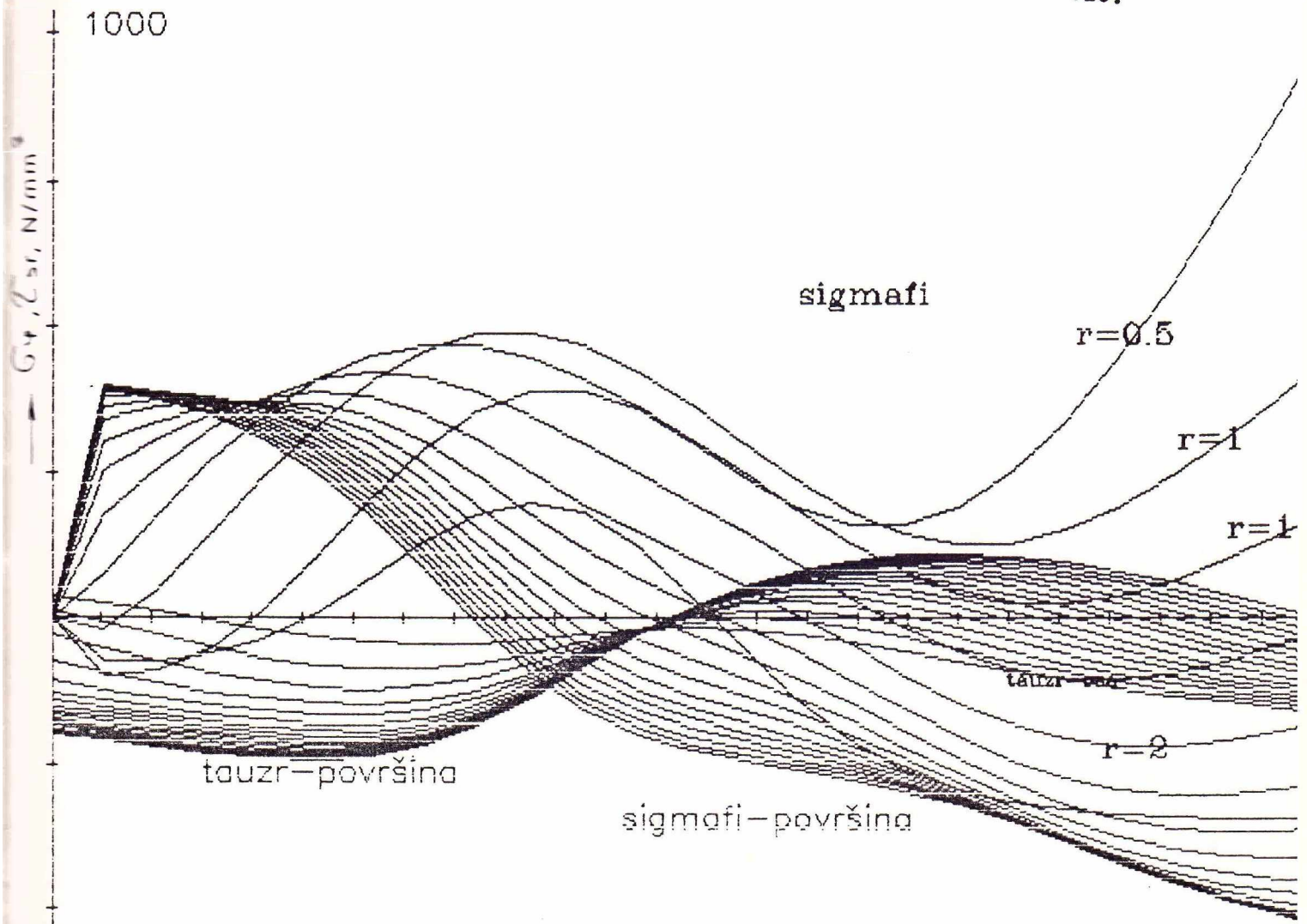
S1.53. Promjena osnih ( $\sigma_{maz}$ ) i radijalnih ( $\sigma_{mar}$ ) napona pri izvlačenju šipki Č.1220 ( $d_0=32$  mm  $d_1=29$  mm; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157$  rad;  $v_0 = 3.33$  mm/s).



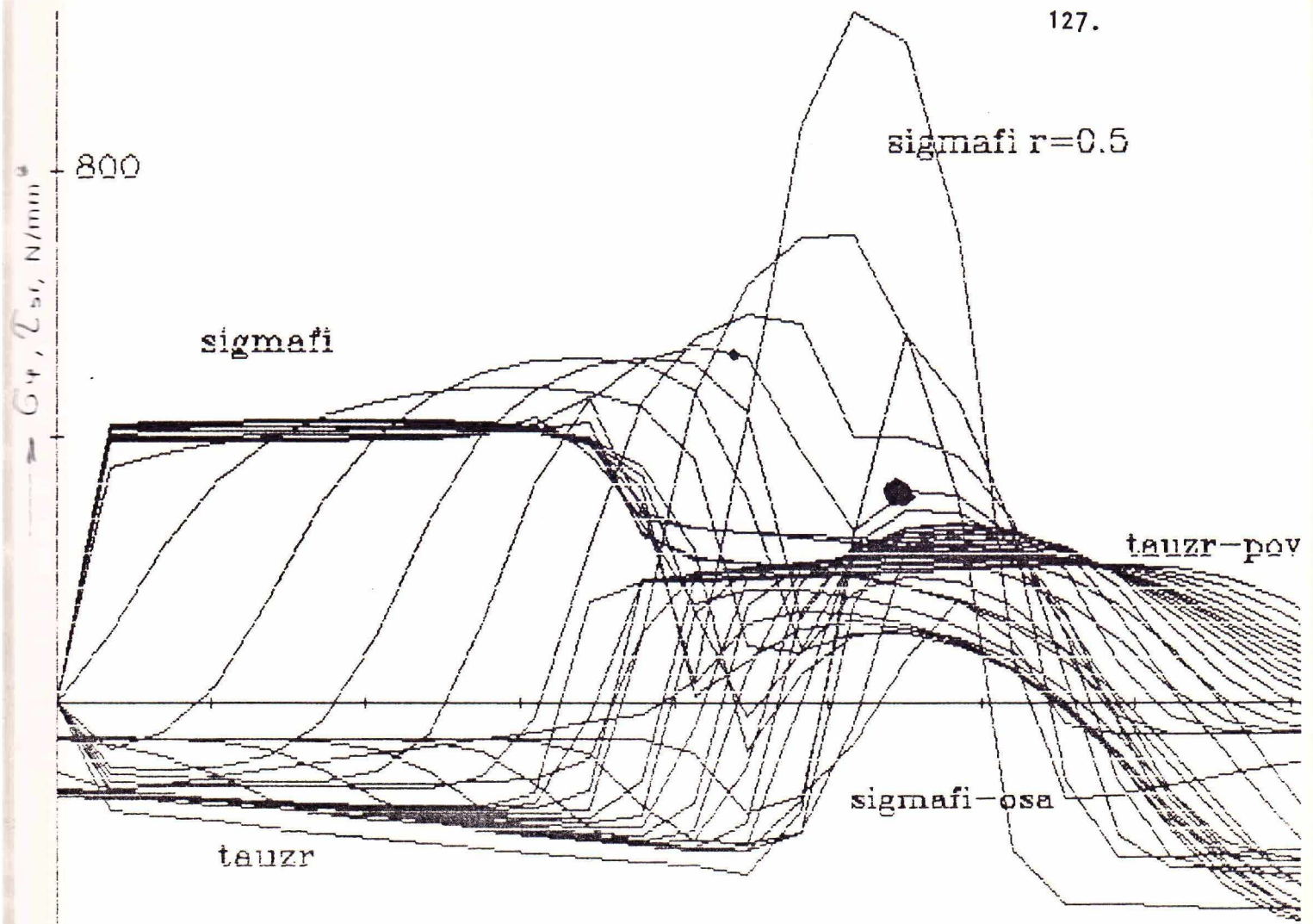
S1.54. Promjena ugaonih (sigmafi) i tangencijalnih (tauzr) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 15 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



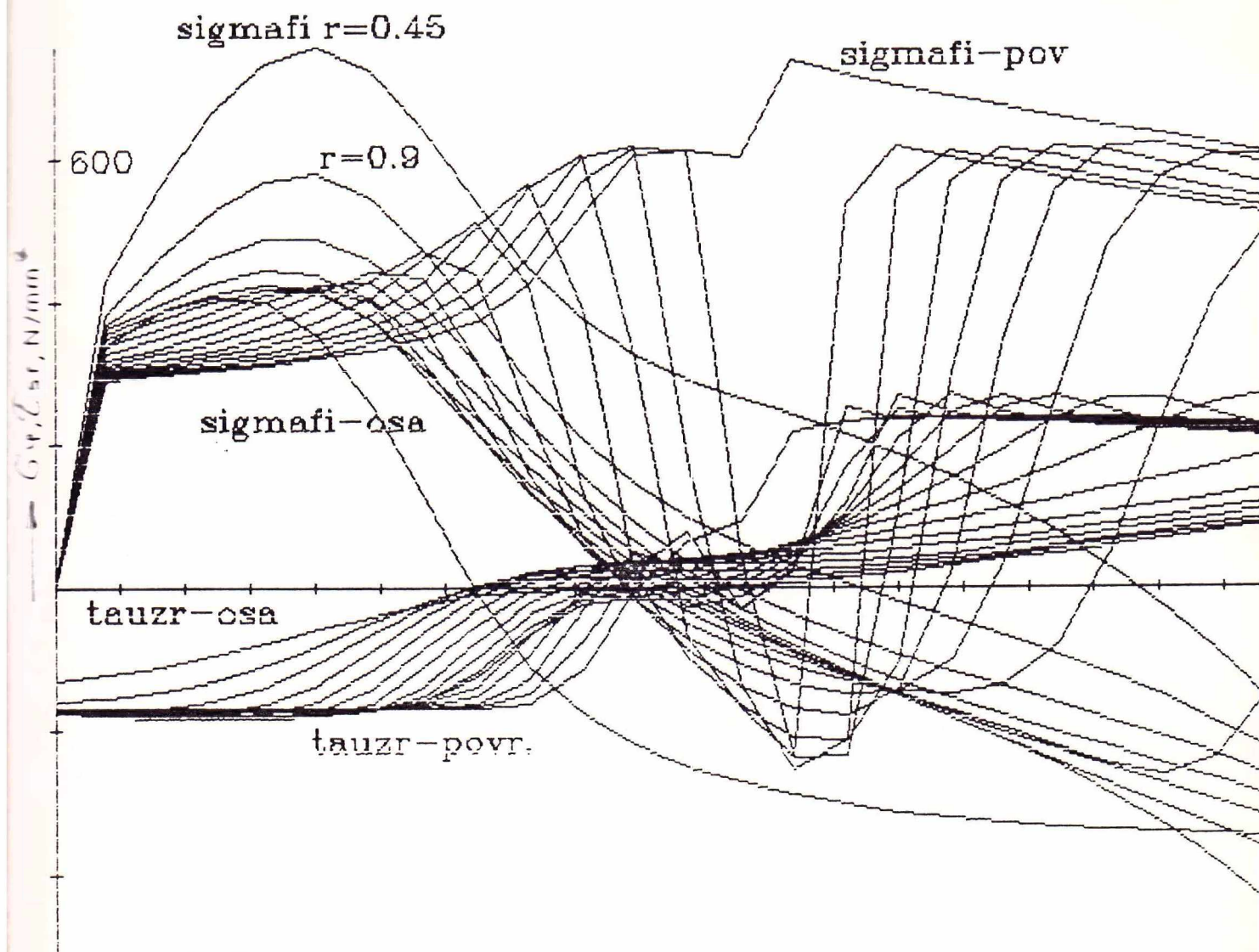
S1.55. Promjena ugaonih (sigma) i tangencijalnih (tau) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



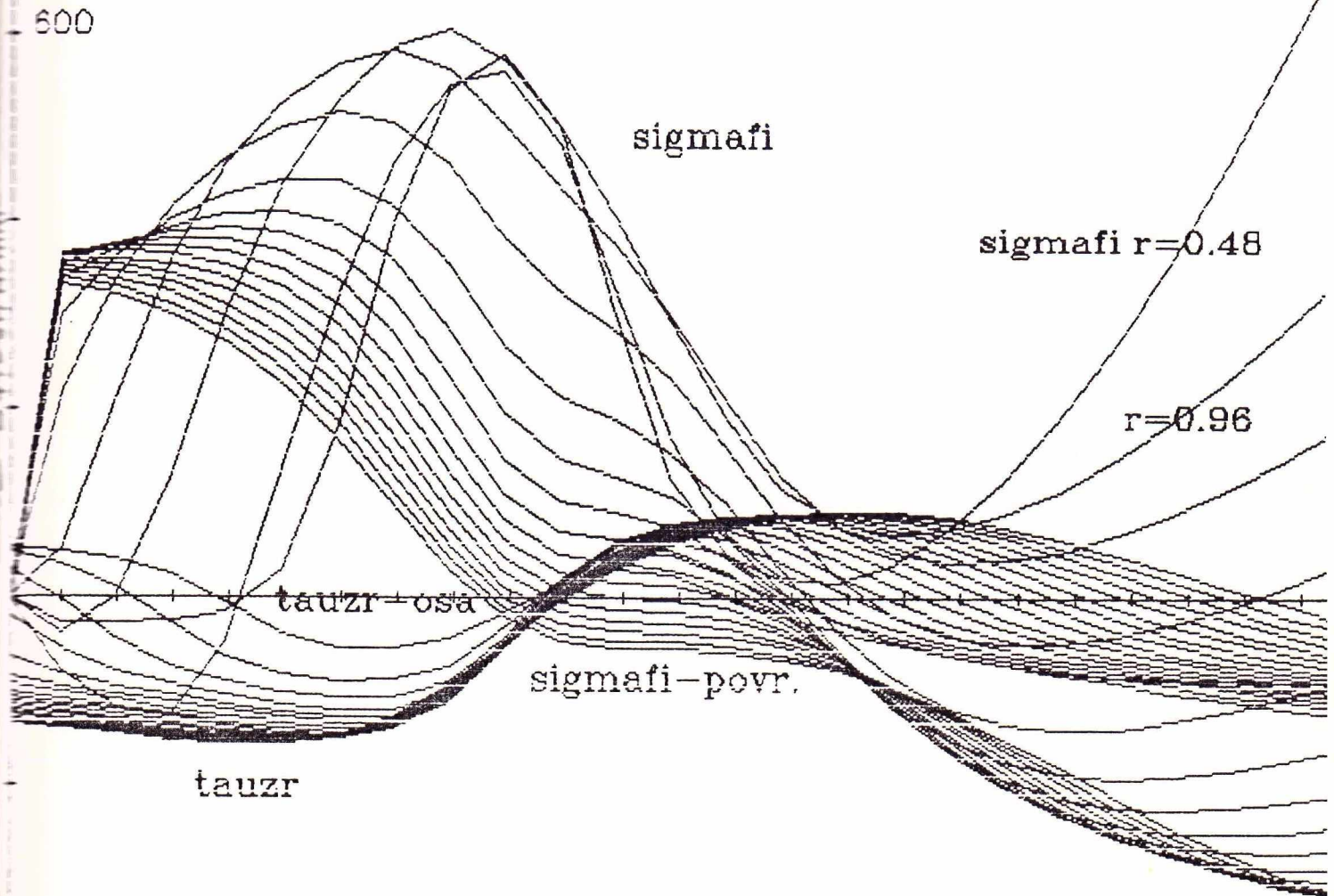
Sl. 56. Promjena ugaonih ( $\sigma_{\text{mafi}}$ ) i tangencijalnih ( $\tau_{zr}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 13 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



S1.57. Promjena ugaonih ( $\sigma$ ) i tangencijalnih ( $\tau$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 15 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 6,66 \text{ mm/s}$ ).



Sl.58. Promjena ugaonih ( $\sigma_{fi}$ ) i tangencijalnih ( $\tau_{zr}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 6,66 \text{ mm/s}$ ).



S1.59. Promjena ugaonih ( $\sigma_{\text{mafi}}$ ) i tangencijalnih ( $\tau_{\text{zr}}$ ) napona pri izvlačenju šipki čelika Č.1220 ( $d_0 = 16 \text{ mm}$   $d_1 = 13 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje parafin; ugao matrice  $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).

Površina i neposredni potpovršinski sloj imaju vrijednosti radijalnog napona koja je veća od osnog napona. Početni pik na dijagramu je posljedica navedenog graničnog uslova. Vrijednost radijalnog napona opada sa uočenog pika prolazeći kroz nulu na z-položaju koji zavisi od rastojanja od površine. Najveća pozitivna vrijednost, i najduži dio zone u kome se ona zadržava ima površina šipke. Van istaknutog dijela poprečnog presjeka i poslije prelaska radijalnih napona u negativni dio njihova vrijednost ostaje ravnomjerna.

U okolini ose šipke se uočava sloj sa znatnim vrijednostima osnih napona kao i pozitivnim radijalnim naponima. (Najgornja kriva na dijagramima  $\sigma_z$  i  $\sigma_r$ ).

Očigledno je da ova oblast ima komponente napona znatno veće od ostalih djelova, ali pojedinačno one su manje od otpora metala. Ugaoni napon po zakonu promjene odgovara radijalnom naponu. Medjutim, oblast pozitivne vrijednosti je proširena do rastojanja koje je  $\approx 5\text{mm}$  ispod površine, slika 54.

Tangencijalni naponi imaju isti tok promjene kao osni naponi i u izlaznom dijelu zone deformacije imaju vrijednosti bliske nuli.

Na taj način, naponsko stanje pri datom stepenu deformacije se može razdvojiti po  $r$  i  $z$  koordinati na sljedeći način. Površina i slojevi neposredno uz nju u prvoj polovini zone deformacije ima naponsko stanje troosnog zatezanja sa maksimalnim radijalnim naponima na početnu, maksimalnim ugaonim naponima na sredini i maksimalnim osnim naponima na kraju. Približavanjem osi udio radijalnih i ugaonih napona se smanjuje i to ugaonih na znatno manjim položajima  $r$ -a. Tangencijalni naponi u ovom dijelu i maju negativnu vrijednost, najveći su na površini i smanjuju se do nule ili prelaze u oblast malih pozitivnih vrijednosti na sredini zone deformacije. U drugoj polovini zone deformacije osni naponi dostižu konačne vrijednosti, radijalni i ugaoni naponi imaju

male pozitivne vrijednosti. Neposredna okolina ose ( $\approx 1$  mm) u ovom dijelu zone ima visoke pozitivne vrijednosti osnih napona, pozitivne vrijednosti radijalnih napona i visoke negativne vrijednosti ugaonih napona.

Ovako složeno naponsko stanje je izazvalo složen oblik profila zone deformacije i odgovarajućeg rasporeda brzina. U centralnoj zoni veće vrijednosti izduženja koje su praćene formiranjem uočenog korita; neravnomjernu deformaciju pri površini sa znatnim krivljenjem mreže i različite odnose površine i ose duž zone deformacije.

Izvlačenje sa stepenom deformacije 0,25, slika 48 i 54 izaziva sljedeće promjene:

- Osnih naponi za svaki poprečni presjek, imaju najveće vrijednosti;
- Oblast početnih pozitivnih vrijednosti radijalnih napona je promjena do  $\approx 5$  mm od ose;
- Oblast pozitivnih vrijednosti ugaonih napona obuhvata čitav poprečni presjek pri čemu na osi oni brzo prelaze u negativni dio dijagrama a na površini na samom izlazu iz zone deformacije;
- Tangencijalni naponi u drugom dijelu zone deformacije imaju pozitivne vrijednosti samo za oblast rastojanja od površine koja obuhvata pozitivne vrijednosti radijalnih napona;
- Centralna oblast visokih osnih napona je oblast visokih radijalnih i ugaonih napona;
- U ovoj oblasti vrijednost osnovog napona su veća od vrijednosti otpora metala deformaciji duž čitave zone deformacije a na izlazu ova razlika dostiže 1,5 vrijednosti otpora deformacije;
- Naponsko stanje svestranog zatezanja sa visokim vrijednostima svih komponenti može biti posljedica stvaranja nestabilnih uslova u ovom dijelu.

Na slici 49 i 55 je prikazan raspored napona pri deformaciji sa najvećim stepenom deformacije. Ovdje se mogu izdvojiti sljedeće karakteristike naponskog stanja:

- Vrijednost osnih napona dostiže otpor metala deformaciji na znatnom dijelu poprečnog presjeka i dužine zone deformacije;
- Oblast negativnih vrijednosti radijalnih napona je svedena na okolinu površine i izlazni dio zone deformacije;
- Ugaoni naponi imaju pozitivnu vrijednost na ulaznom dijelu zone deformacije;
- Tangencijalni naponi imaju isti raspored kao kod stepena deformacije 0,25.
- Oblast centralnog dijela visokih napona se proširuje do poluprečnika 3 mm;
- U ovom dijelu vrijednost osnih napona dostiže vrijednost 2 puta veću od otpora metala deformaciji.

#### 4.9.2. Uticaj brzine deformacije

Promjene brzine izvlačenja izaziva znatne promjene naponskih stanja slika 50, 51, 57 i 58. Pri tome, najveće oscilacije se javljaju kod ugao-  
nih napona. Veće oscilacije se javljaju pri promjenama u okolini ose  
(pomjeranje ose) nego pri pojavama na površini.

Svaka oscilacija može povećati vrijednost normalnih napona do vrijednosti koje su veće od otpora metala deformaciji.

#### 4.9.3. Uticaj sredstava za podmazivanje na napone

Na slikama 52 i 59 su prikazane promjene napona pri deformaciji sa stepenom deformacije 0,45 i pri prelasku za podmazivanje uljem na podmazivanje parafinom. Uočavaju se najveće promjene u rasporedu ugao-  
nih napona na ulaznom dijelu zone deformacije povećanjem vrijednosti i oblasti maksimuma, kod drugog sredstva za podmazivanje.

#### 4.9.4. Uticaj polaznog prečnika na napone

Kod prečnika 32 mm se uočavaju promjene u centralnoj oblasti povećanjem vrijednosti osnih napona do trostruke vrijednosti otpora metala deformaciji. Zakonitosti promjene ostalih komponenti napona su kao kod prečnika 16 mm, slika 53.

#### 4.9.5. Promjena otpora metala deformaciji

Otpor metala deformaciji određen po jednačini (47) i po jednačini intenziteta napona je prikazan na slikama 60.62. Potpuno poklapanje ove dvije vrijednosti su potvrdile tačnost proračuna napona. Na početku zone postoje izvjesne razlike, međutim, one su neznatne i obuhvataju samo prvi podatak na zoni deformacije, a posledica su postavljenih graničnih uslova na ulazu u zoni deformacije.

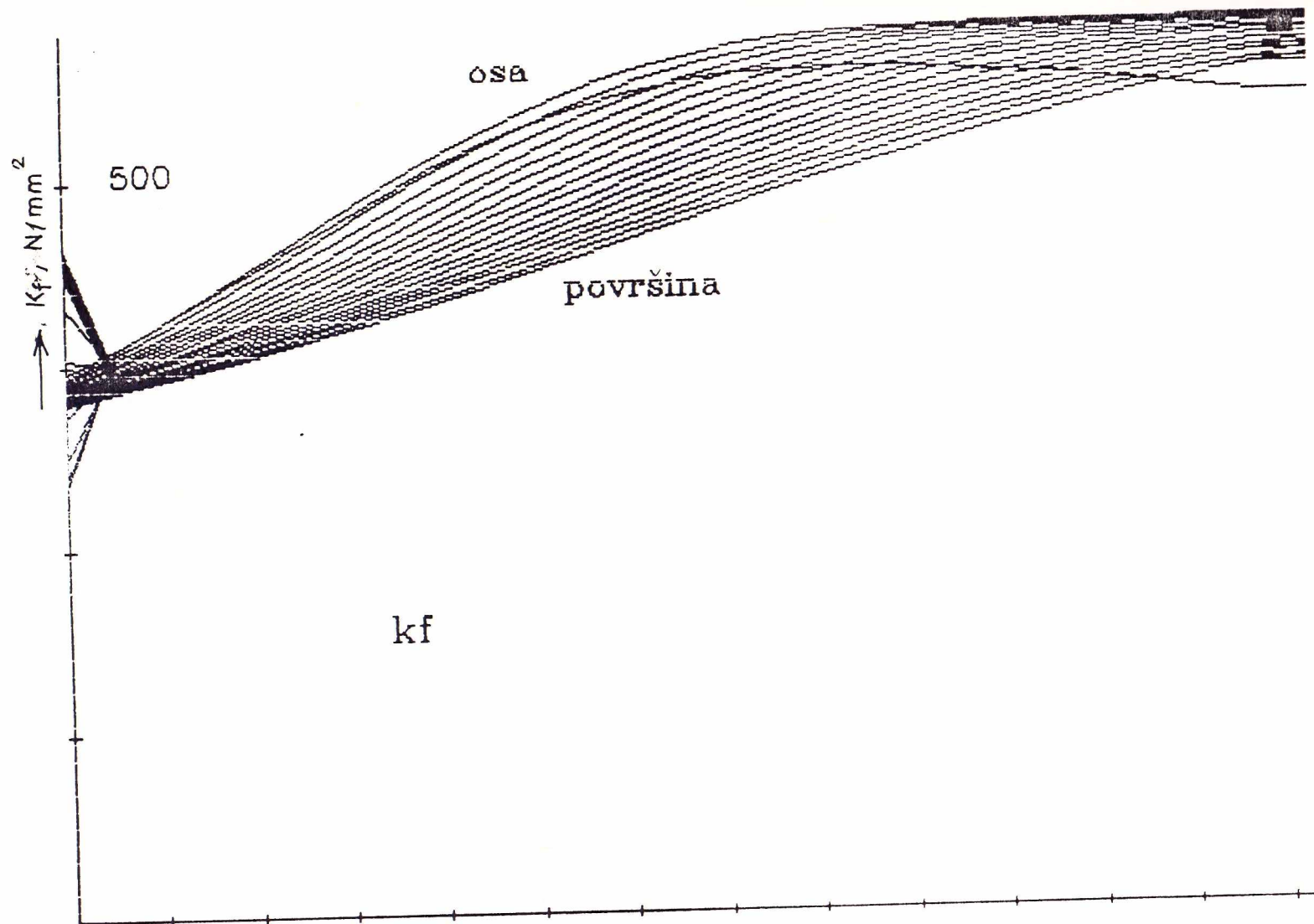
#### 4.10. ENERGETSKI USLOVI DEFORMACIJE

Bilans energija dat jednačinom (29) je prilagodjen na proces izvlačenja i formira se proračunom odgovarajućih bilansnih komponenti sve integracije naponskih i kinetičkih veličina su izvršene po Simsonovom pravilu.

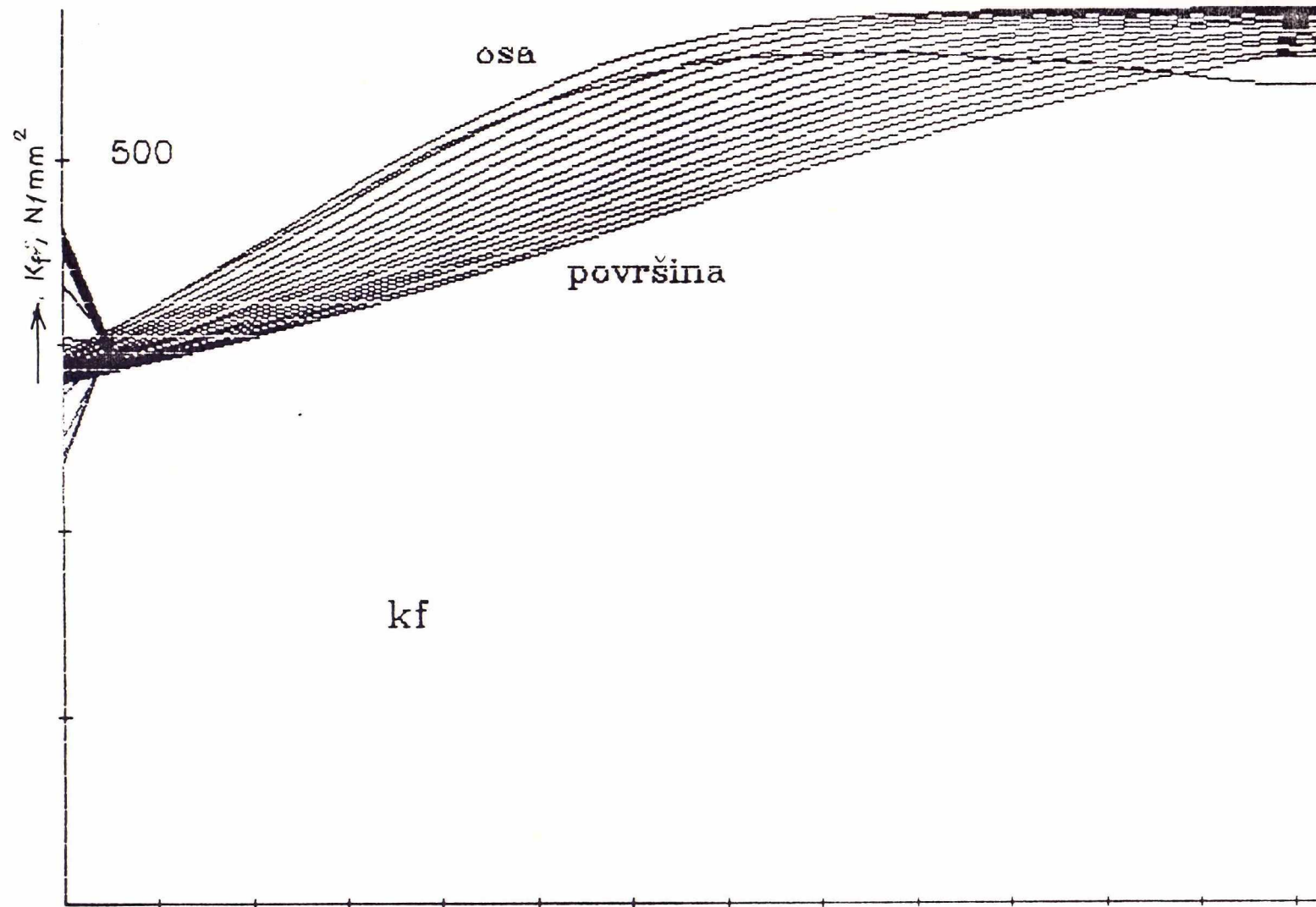
Rezultati proračuna su dati u tabeli 15.

Na osnovu proračunate vrijednosti koeficijenta trenja konstruisani su dijagrami prikazani na slici 63, 64, 65, za šipke polaznog prečnika 16 mm. Brojne vrijednosti koeficijenta trenja su mjera tačnosti ukupnog modela deformacije pri izvlačenju šipki. Tačnost proračuna koeficijenta trenja je određena sa tri osnovna faktora:

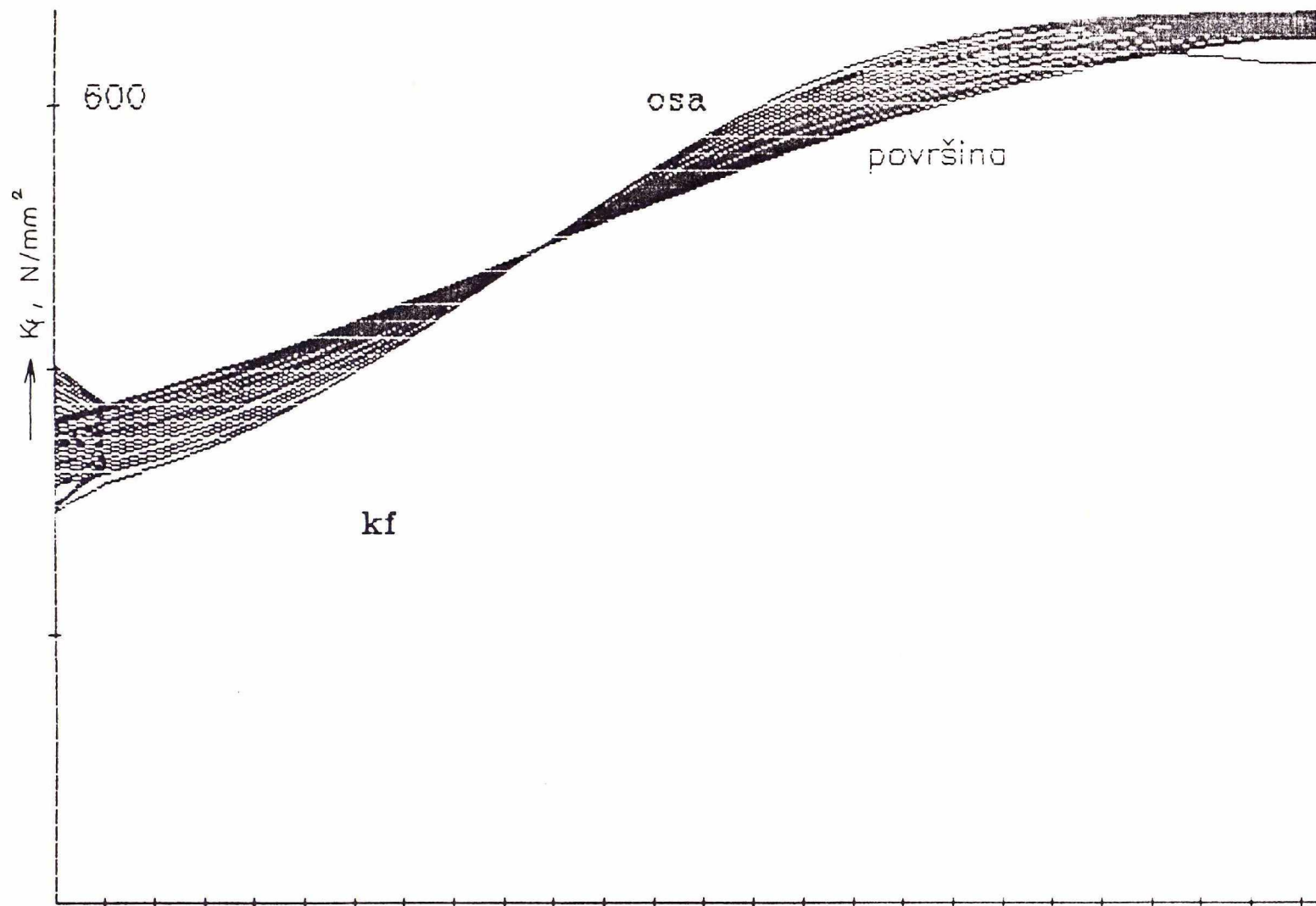
- tačnošću modela,
- tačnošću mjerenja sile i
- tačnošću pretpostavke o početku i završetku deformacije u geometrijskoj zoni.



Sl.61. Promjena otpora metala deformaciji pri izvlačenju šipki čelika Č.1220  
 $d_0 = 16 \text{ mm}$ ;  $d_1 = 14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  
 $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ .



Sl.61. Promjena otpora metala deformaciji pri izvlačenju šipki čelika Č.1220  
 $d_0 = 16 \text{ mm}$ ;  $d_1 = 14 \text{ mm}$ ; sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  
 $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).



Sl.62. Promjena otpora metala deformaciji pri izvlačenju šipki čelika Č.1220

( $d_0 = 16 \text{ mm}$ ;  $d_1 = 13 \text{ mm}$  sredstvo za podmazivanje ulje; ugao matrice  
 $\alpha/2 = 0,157 \text{ rad}$ ;  $v_0 = 3,33 \text{ mm/s}$ ).

U cilju ispitivanja osjetljivosti koeficijenta trenja na ova tri faktora ispitani su uticaji:

- promjene geometrijskog ulaza i izlaza iz zone deformacije njihovim povećanjem ili smanjenjem. Utvrđeno je da one neznatno utiču u realnim granicama povećanja i smanjenja, (npr. 1 mm na ulazu i izlazu iz zone deformacije što pri datom uvećanju iznosi 20 odnosno 30 mm). Povećanje izvan ovih granica izaziva nestabilnost kod modela zbog nedefinisanog deformacionog ojačavanja;
- tačnost mjerenja sile je limitirajući faktor koji određuje tačnost proračunatog koeficijenta trenja. Variranje sile u granicama navedenih promjena elastičnih deformacije smanjuje vrijednost koeficijenta trenja čak do 25%.
- tačnost pretpostavke o isključivom tečenju u zoni deformacije utiče na koeficijent trenja smanjivanjem rada deformacije u odnosu na njegovu stvarnu vrijednost. Međutim, ne može se još utvrditi nivo uticaja vankontaktne zone zbog nepoznavanja oblasti njihovog prostiranja i naponskog stanja.

Rezultati prikazani na dijagramima 63, 64 i 65 jasno pokazuju visoku osjetljivost koeficijenta trenja sa promjenom uticajnih parametara. Dijagrami na slici 63a pokazuju analogno ponašanje sa promjenom stepena deformacije za sva korišćena sredstva za podmazivanje. Smanjenje koeficijenta trenja odgovara uslovima uticaja sile na koeficijent trenja u oblasti malih vrijednosti sila. Analogno promjenama se uočava sa povećanjem brzine slika 63b.

Predhodna deformacija izaziva promjene koeficijenta trenja zavisno od primijenjenog sredstva za podmazivanje.

Tabela 15. Rezultati proračuna energetskih uslova deformacije

Čelik Č.1220

Šifra	$W_d$ J	$W_{su}$ J	$W_s$ J	$W_{tr}$ J	$W_S$ J	$W_{tr}$ J	m	f	$\eta$ %
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1111	34,22	8,031	3,631	105,3	78,28	32,4	0,3076	0,1776	58,61
1112	106,9	6,233	0.4019	228,9	152,7	39,2	0.1712	0.09886	66,59
1121	50,46	14,23	8,034	169,0	104,3	31,55	0.1867	0.1078	69,75
1122	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1131	55,63	10,5	8,979	262,5	104,9	29,83	0.1137	0.06563	71,57
1132	126,1	14,56	0.4102	512,7	210,7	69.64	0.1358	0.07842	66,95
1141	124,9	1.1489	16.16	425,3	241	98,43	0.2314	0.1336	53,96
1142	358,9	8,072	26,89	1070	511,4	117,5	0,1098	0.06341	77,02
1161	75,59	5,645	13,81	196,6	148,5	53,43	0,2718	0.1569	64,01
1162	200,4	4,7	22,77	567,8	327,9	100,1	0.1763	0.1018	69,47
1171	52m94	7,128	0.9703	296,6	112,3	51,01	0.1720	0.09929	54,48
1172	118,9	6.094	0.962	552,03	243,2	123,2	0.2231	0.1288	50.55
1181	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1182	39,66	9,88	2,806	229,3	118,9	66,56	0.2903	0.1676	44,02
1211	41,67	4,705	4,437	119,2	69,29	18,48	0.1551	0.08952	73,32
1221	32,48	5.879	7.446	194,3	79.54	33,73	0.1736	0.1002	57,60
1311	29,6	0.203	9.471	185,9	64,22	24,94	0.1342	0.07747	61,16
1321	47,23	6.156	3.244	192,6	80,78	24,15	0.1254	0.0724	70.1
1231	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1241	162,3	3.549	4,456	595,8	232	61,72	0.1036	0.05981	73,39
1331	56,92	7.038	8.479	279,4	75.74	3.311	0.01185	0.006843	95,63
1341	103,6	1.959	0,6917	414,7	178,6	72,36	0.1745	0.1007	76,46
1411	39,99	2.319	7.196	136,5	8188	32,38	0.2372	0.1369	60,46
1421	47,6	3,834	19,99	185,7	102,7	31,27	0.1683	0.09719	69,55
1431	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1441	136,1	3.026	8.233	451,6	221,3	73,96	0.1638	0,094561	66,58
2111	232,9	13,51	52,12	641,8	596,16	297,6	0.4638	0.2677	50.07
2151	161,7	10,20	48,23	510,6	650,7	430,6	0,8433	0.4869	33,83

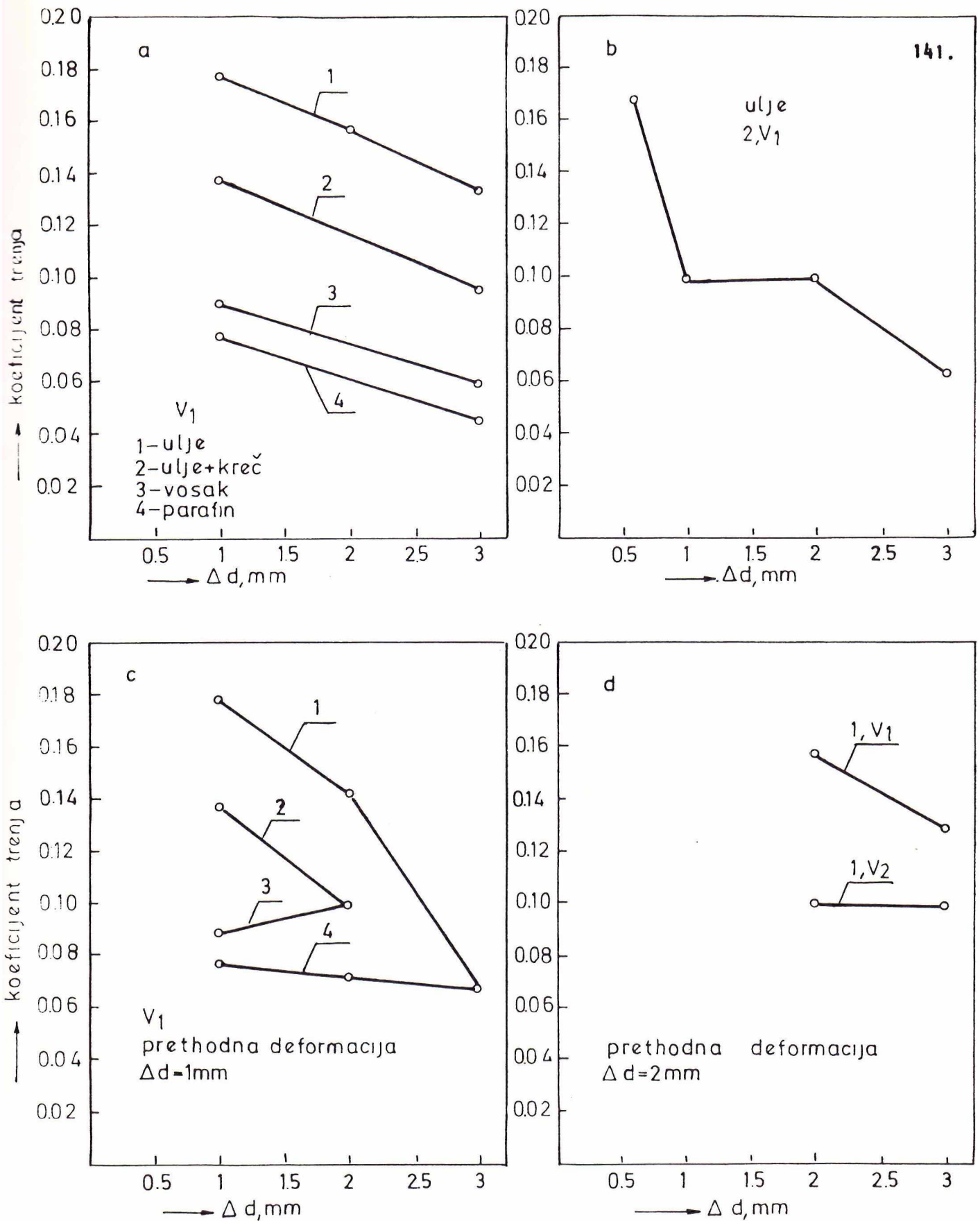
Nastavak tabele 15

Čelik Č.4120									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4111	32,30	8.051	6.333	160,1	78,41	31,73	0.1982	0.1144	59,54
4112	72,08	18,46	18,73	286,9	175,4	66,12	0.2305	0.1331	62,3
4122	125,3	19.78	15,75	545,5	244,6	83,7	0.1534	0.08859	65,77
4131	56,35	4,836	1.843	256,7	125,6	62,52	0.2436	0.1406	50,20
4132	98,43	21.25	15,4	496,0	225,3	104,1	0.2098	0.1211	53,81
4141	150,5	9.011	6.719	516,8	225,4	73,32	0.1419	0.08191	67,48
4162	180,1	11,86	3,367	513,8	302,9	77,24	0.1503	0.08679	-
4171	36,73	12,77	0.6753	235,4	105,3	55,13	0.2342	0.1352	47,64
4181	2461	5,179	0,2087	129,5	57,82	27,82	0.2149	0.1241	51,88
4241	146,4	5,937	14,4	301,8	226,7	59,95	0.1195	0.06897	73,55
4311	49,18	9.002	9.637	255,8	79,30	11,48	0.04486	0.02590	85,53
4331	54,02	8.789	4.155	269,2	77,52	10.55	0.0392	0.02263	86,39
4341	156,7	4,875	6.840	487,77	224,7	56,23	0.1153	0.06656	74,97
4362	187,4	15,29	38.49	569,0	338,2	97,04	0.1705	0.09847	71,31
4372	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4381	22,46	7,686	1.444	142,7	58,57	26,99	0.1891	0.1092	53,93
4382	42,03	10.61	1.876	270,4	81,57	27,06	0.1001	0.05779	66,82
4411	44,20	8.573	10.16	157,5	106,4	43,44	0.2758	0.1592	59,16
4421	45,14	6.438	2.501	214,6	120,9	66,79	0.3112	0.1797	44,73
4431	38,41	6.564	0.4948	223,3	108,9	63,43	0.2840	0.164	41,75
4441	109,5	4.061	7,046	531,1	201,0	80,45	0.1515	0.08745	59,98
5111	239,1	33,21	73,39	752,1	462,7	117	0.1556	0.08981	74,71
5121	92,93	36,45	10,04	317,1	287,9	158,5	0.4997	0.2885	44,96
5311	272	38,3	70,44	801,6	600,5	219,8	0.2742	0.1583	6340
5321	115,5	40,74	13,31	582,3	260,7	91,17	0.1556	0.0904	65,03
5351	177,3	41,56	61,12	602,7	462,3	182,3	0.3025	0,1747	60,56
6111	192,2	57,98	68,53	900,6	-	-	-	-	-
6311	196,4	86,37	90.60	645,4	-	-	-	-	-

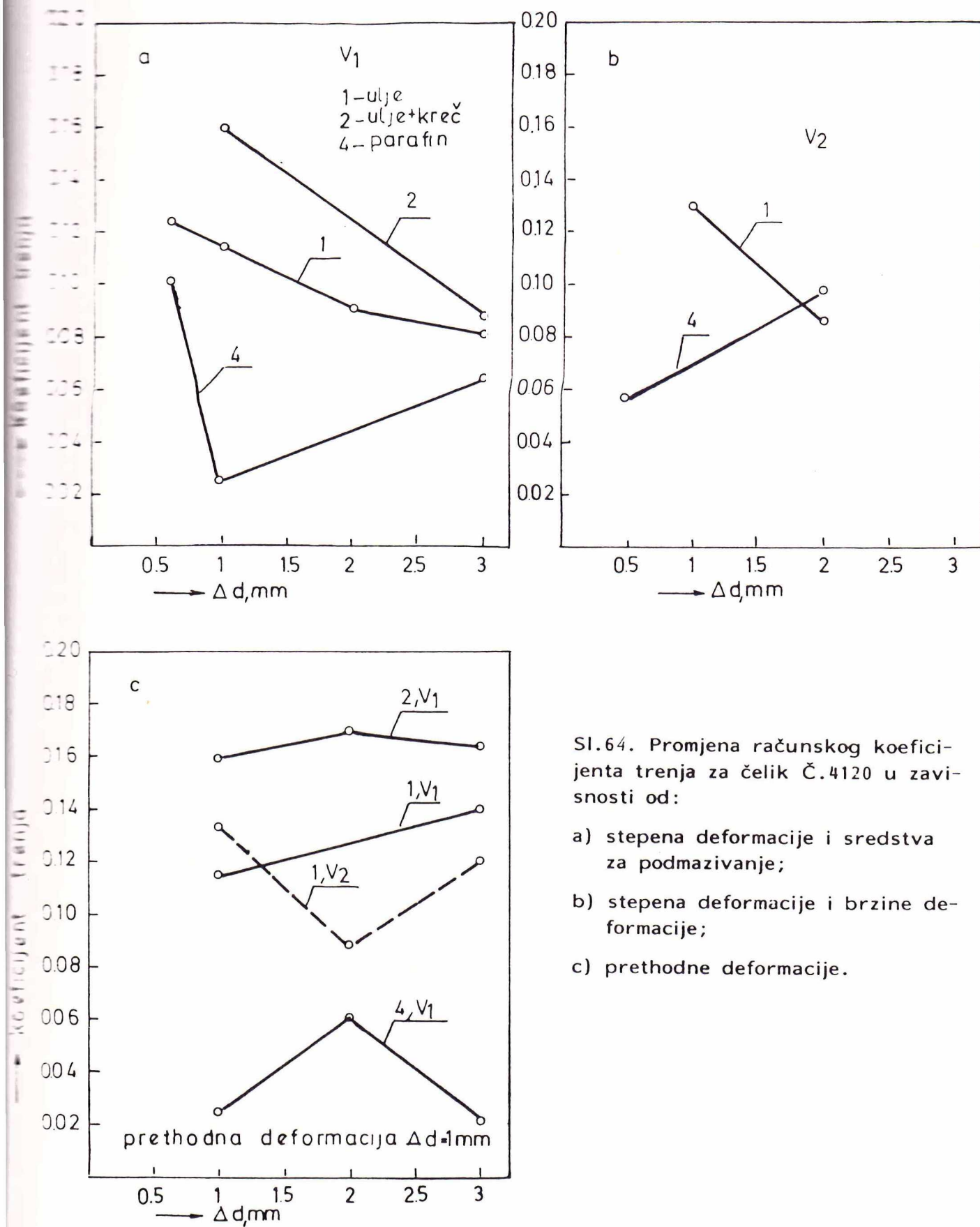
Nastavak tabele 15

## Čelik Č.4721

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7111	55,25	7,345	22,54	245,6	132,7	47,6	0.1938	0.1119	64,14
7112	121,7	19,38	4,094	440,3	278,5	96,5	0.2192	0.1265	65,36
1121	50,46	14,23	8,034	169,0	104,3	31,55	0.1867	0.1078	69,75
7122	127,4	5,977	18,36	551,7	267,5	115,8	0.2099	0.1212	56,71
7131	50,40	1,846	0,06	318,3	140,3	89,91	0.2825	0.1631	35,93
7132	145,1	6.651	7.603	668,1	254,8	95,45	0.1429	0.08249	62,54
7141	187,1	6,158	10,25	645,0	340,1	136,6	0.2117	0.1222	-
7142	353,9	9.204	12,87	1394	549,0	173,0	0.1241	0.07164	68,49
7161	136,5	3,704	27,6	391,7	252,3	84,49	0.2157	0.1245	65,51
7171	64,99	10,95	0.2914	342,7	143	66,78	0.1949	0.1125	53,30
7181	28,53	7,383	1.887	146,2	91,84	54,04	0.3697	0.2134	41,16
7182	80,9	5,535	13,54	383,6	176,8	76,79	0.1951	0.1126	56,56
7211	35,64	10,07	9,57	187,2	105,3	49,99	0.2671	0.1542	52,51
7221	55,64	7,036	7,459	284,5	134,8	64,62	0.2272	0.1311	52,04
7371	64,83	10,99	9.446	338,2	115,1	39,18	0.1159	0.0669	65,95
7381	46,57	9.178	13,51	176,3	87,68	18,42	0.3045	0.0603	78,99
7382	41,58	12,47	3,385	318,9	105,8	48,41	0.1518	0.08764	54,26
7421	65,31	6,639	21,84	285,8	188	94,26	0.3299	0.1904	49,87
7431	72,23	7.481	24,29	321,6	180	84.04	0.2614	0.1509	55,30
7411	53.07	4,5	4,1	169,9	192	130,4	0.7674	0.443	32,11
7421	65,31	6,639	21,84	285,8	188	94,26	0.3299	0.1904	49,87
7441	158,1	4,658	11,95	600,8	329,0	154,3	0.2568	0.1483	53.09
8111	393,5	28,61	89,96	819,4	605,4	93,3	0.1139	0.06574	84,59
8121	115,0	36,93	11,83	314,9	-	-	-	-	-
8151	254,3	26,15	46,12	571,9	550,4	223,8	0.3914	0.2260	59,33

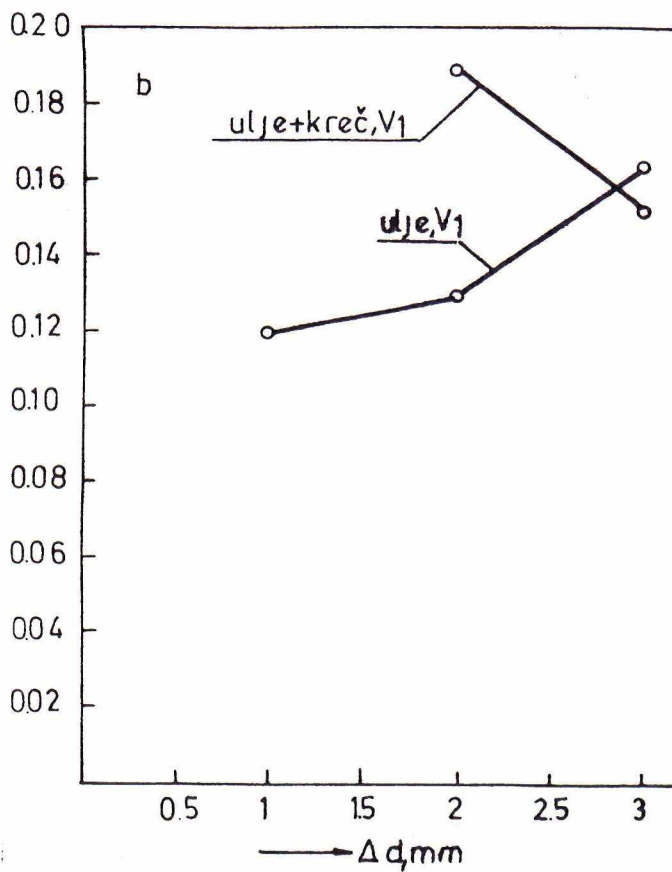
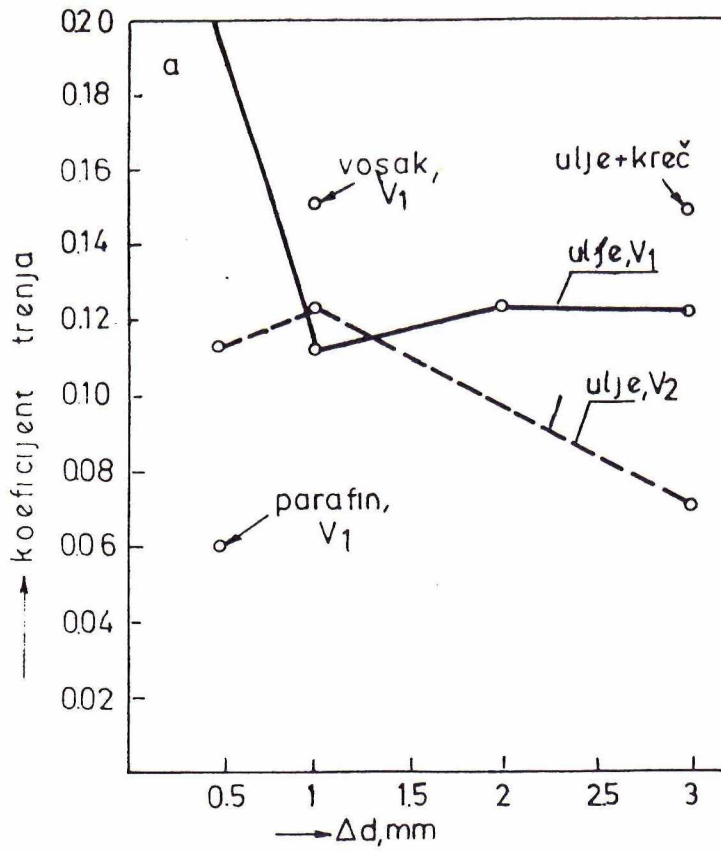


Sl.63. Promjena računskog koeficijenta trenja za čelik Č.1220 u zavisnosti od uticajnih parametara:  
 a) sredstva za podmazivanje i stepena deformacije;  
 b) stepena deformacije i brzine izvlačenja;  
 c i d) stepena deformacije i prethodne deformacije.



Sl.64. Promjena računskog koeficijenta trenja za čelik Č.4120 u zavisnosti od:

- stepena deformacije i sredstva za podmazivanje;
- stepena deformacije i brzine deformacije;
- prethodne deformacije.



Sl. 65. Zavisnost računskog koeficijenta trenja za čelik Č.4721 od uticajnih parametara:

- sredstva za podmazivanje, stepena deformacije i brzine izvlačenja;
- prethodne deformacije.

Koeficijent trenja zavisi od vrste materijala što se vidi uporedjenjem dijagrama za tri ispitivana čelika. U tom smislu najveće vrijednosti su kod čelika koji imaju najveći otpor deformaciji (slika 63a, 64a i 65a).

Kod šipki prečnika 32 mm samo su pojedinačnim slučajevima dobijene vrijednosti koeficijenta trenja u granicama koje su prihvaćene za hladno izvlačenje. U ostalim slučajevima vrijednosti su znatno veće i kreću se čak do 0.4869. Očigledno do predstava o ovakvom načinu određivanja koeficijenta trenja zahtijeva znatno veću preciznost, kod visokih vrijednosti sila izvlačenja.

Kao potvrdu navedenog se može navesti nemogućnost dobijanja podataka za šipke prečnika 42 mm, kod kojih tačnost eksperimenta tj. greške deformacije do 25% maksimalne vrijednosti. Samim tim, od modela se zahtijeva preciznost koja je neopravdana uzimajući u obzir greške mjernih parametara.

Zaključno se može istaći da navedeni sistem proračuna omogućava formiranje adekvatne slike procesa izvlačenja u svim slučajevima kada je tačnost mjerenja u granicama tolerantne greške.

Koeficijent iskorišćenja energije se ponaša obrnuto proporcionalno koeficijentu trenja. Njegova vrijednost se kreće u širokim granicama sa promjenom uticajnih parametara. Kao donja granica iskorišćenja energije se može uzeti 50%, što odgovara koeficijentu trenja 0,16.

Objašnjenje šifri datih u tabel i 15

Prvi broj označava vrstu čelika i prečnik polazne šipke

1	označava	Č.1220	do = 16 mm
2	"	"	do = 32 mm
3	"	"	" = 42 mm
4	"	Č.4120	" = 16 mm
5	"	"	" = 33 mm
6	"	"	" = 42 mm

7	označava	Č.4721	do = 16 mm
8	"	"	do = 32 mm
9	"	"	do = 42 mm

Drugi broj označava vrste maziva:

- 1 - ulje
- 2 - vosak
- 3 - parafin
- 4 - kreč + ulje

Treći broj označava uslove deformacije

1	deformacije	16 mm	na	15
2	"	15 mm	na	14
3	"	14 mm	na	13
4	"	16 mm	na	13
6	"	16 mm	na	14
7	"	14 mm	na	13
8	"	16 mm	na	15,4

Četvrti broj označava brzinu:

- 1 - brzina izvlačenja 3,33 mm/s
- 2 - brzina izvlačenja 6,66 mm/s

## 5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Na osnovu analize primjenljivosti postojećih metoda ispitivanja kinetičkih parametara, napona i energetske uslova deformacije izvlačenjem čeličnih šipki kao optimalna je izabrana metoda vizioplastičnosti. Za primjenu ove metode na deformacije šipki čelika Č.1220, Č.4120 i Č.4721, polaznih prečnika 16, 32 i 42 mm je neophodno bilo formirati eksperiment koji, na zadovoljavajući način, zadržava zonu deformacije u obliku kakav je važio u stacionarnom stadijumu, omogućava praćenje mjernih parametara i pruža dovoljnu tačnost mjernih veličina. Konstrukcija sopstvene aparature je omogućila postizanje traženih zahtjeva.

1. Polazni rezultati, dobijeni mjerenjem na reprezentativnim uzorcima, i analizirani preko zakonitosti promjene profila zone deformacije, brzina pomjeranja, sile izvlačenja i otpora metala deformaciji su pokazivali da:
  - profil zone deformacije pri najvećem stepenu deformacije ima složeni oblik z-pomjeranja podijeljen presjekom homogene deformacije na dva dijela: prvi, sa intenzivnim površinskim tečenjem i drugi sa zaostajanjem površinskih slojeva tako da se konačne vrijednosti postižu tek u zoni kalibrujućeg pojasa matrice;
  - radijalno pomjeranje ima, takodje, složen oblik i može se fenomenološki opisati krivom sa laganim prirastom na početku i kraju zone deformacije i intenzivnim prirastom u centralnom dijelu;
  - odnos radijalnih i osnih brzina ne odgovara geometrijskoj interpretaciji, kako se to najčešće usvaja;

- brzine tečenja u radijalnom i osnom pravcu imaju identičan oblik sa različitim vrijednostima u z-položajima karakterističnih tačaka;
- sila izvlačenja je predstavljena dijagramom koji je tipičan za stacionarne procese;
- sila pri povratnom hodu ima oblik sličan dijagramu sile izvlačenja i povezana je sa elastičnim deformacije metala i alata;
- elastične deformacije se manifestuju modifikacijom dijagrama sila - put i njihova vrijednost dostiže 17% ukupne sile izvlačenja uz uslov proporcionalnosti ukupne sile i sile elastičnih deformacija;
- otpor metala deformaciji određen metodom zatezanja, pritiskivanja i tvrdoćom se može opisati jednačinom  $K_f = K_{fo} + A\phi^n$ , koja je provjerena duž zone deformacije na osnovu promjene tvrdoće mjerene po poprečnom presjeku naizmjeničnim skidanjem slojeva od izlaza do ulaza u zoni deformacije.

2. Za povećanje tačnosti opisivanja kinetičkih i ostalih parametara procesa formiran je matematički model promjene ukupnih radijalnih i osnih pomjeranja koji u zadovoljavajućoj mjeri odražava sve bitne karakteristike najkomplikovanijeg profila zone, a ujedno u najvećem broju slučajeva, daje rezultate koji su u granicama greške mjerenja. Početni model formiran za pojedinačne trajektorije je uopšten na osnovu korelacije između koeficijenata i koordinata trajektorija. Konačni oblik modela je prikazan jednačinama:

$$\Delta z = b_1 + b_1 \operatorname{erf}(z - b_2 - r - b_3 / b_4 r + b_5) \quad i$$

$$\Delta r = a_1 r + a_2 (1 + \operatorname{erf}(z - a_3 r - a_4 / a_5 r + a_6)).$$

3. Analiza profila zone deformacije u odnosu na najveće stepene deformacije pokazala da se pri stepenima deformacije koji odgovaraju redukciji poprečnog presjeka od 1 mm odmah na ulazu formira konveksan oblik u odnosu na osu izvlačenja, a kod stepena koji odgovaraju redukciji od 2 mm u početku je ravnomjerna deformacija a u nastavku se formira konveksan oblik. U svim slučajevima je različita veličina nehomogenosti između površine i ose. Pri većim prečnicima polaznih šipki uočava se znatno z-pomjeranje prije ulaska u zonu što govori o većem udjelu vankontaktne deformacije. Profil ulaznog dijela zone za ove šipke je sastavljen iz dva dijala: centralnog-konveksnog u odnosu na osu izvlačenja i površinskog-konkavnog u odnosu na osu izvlačenja.
4. Rezultati obrade eksperimentalnih vrijednosti su prikazane preko koeficijenta modelnih jednačina određeni statističkom metodom minimuma srednjeg kvadratnog odstupanja svih mjernih tačaka podijeljenog sa greškom eksperimenta. Na osnovu modelnih jednačina su proračunati i prikazani rezultati o uticaju stepena deformacije, sredstava za podmazivanje, brzina izvlačenja i prečnika polazne šipke na:
- kinetičke parametre procesa;
  - napone;
  - energetske uslove deformacije.

Sve proračunate veličine su prikazane odgovarajućim jednačinama i rešavane su formiranjem čvornih tačaka zadavanjem koraka po z-u, koji je iznosio  $1/24$  dužine zone deformacije, i kordaka po r-u, koji je iznosio od  $1/34$  do  $1/84$  polaznog poluprečnika šipke. Najmanji broj čvorova je iznosio 814. Rezultati su prikazani na odgovarajućim dijagramima. Izvršena analiza je obuhvatila parametre na ulazu u zonu deformacije promjene duž zone deformacije, za karakteristične tačke, i ponašanje na izlazu iz zone deformacije.

Dobijeni su sljedeći uopšteni zaključci:

- pri stepenu deformacije koji odgovara redukciji prečnika od 1 mm se javlja znatna nehomogenost brzina pomjeranja sa visokim vrijednostima na ulazu i izlazu iz zone deformacije što podrazumijeva postizanje konačnih vrijednosti van geometrijske zone deformacije;
- pri većim stepenima deformacije tečenja svakog sloja se može opisati istim zakonom promjene a ujedno se konačne brzine postižu unutar zone deformacije i to prvo na osi šipke;
- promjena brzina izvlačenja na dva puta veću vrijednost ne utiče znatnije na kinetiku međjutim, može dovesti do znatnog uticaja drugih faktora npr. netačnosti profila šipke, što se manifestuje naglim promjenama izraženim na površini ili osi šipke;
- promjena sredstava za podmazivanje (analizirana je za najveći stepen deformacije) utiče na položaj karakterističnih tačaka kao: maksimalne vrijednosti, položaja presjeka homogenih uslova deformacije, širinu rasipanja vrijednosti;
- promjena brzina deformacije odražavanja promjenu brzina pomjeranja;
- radijalne brzine za sve stepene deformacije imaju ravnomjeran raspored po poprečnom presjeku sa naizmjeničnim promjenama odnosa površine i ose;
- osne brzine se znatno mijenjaju sa promjenom stepena deformacije po obliku, vrijednosti maksimuma i odnosu površine i ose;
- brzine smicanja imaju oblik S-krive sa maksimumom negativne vrijednosti na ulazu u zonu, a maksimumom pozitivnih vrijednosti na izlazu iz zone;

- efekti brzine izvlačenja koji se manifestuju na osi i površini stvaraju pikove vrijednosti brzina deformacije koji su i do pet puta veći od srednjih vrijednosti;
  - promjena sredstva za podmazivanje i polaznog prečnika ne utiče znatnije na brzine deformacije;
  - intenziteti brzina deformacije i deformacija odgovaraju osnim brzinama deformacije i osnim brzinama pomjeranja.
5. Na osnovu osnog napona, čija veličina je određena integracijom izraza iz diferencijalne jednačine ravnoteže u uslovima deformacionog ojačavanja po zakonu promjene određenim zatezanjem (prevedenom na z-pomjeranje) su proračunate komponente napona iz jednačina Levy-Misesa.

Njihovom analizom je utvrđeno da se naponsko stanje mijenja po poprečnom presjeku, dužini zone deformacije i sa promjenom uticajnih parametara, tako da se formiraju sljedeće karakteristične oblasti:

- centralna sa dvoosnim zatezanjem i vrijednostima osnih napona na izlazu iz zone deformacije od 1,5-3 puta veće od otpora metala deformaciji zavisno od stepena deformacije podmazivanja i prečnika polazne šipke;
- površinska sa troosnim zatezanjem u znatnom dijelu zone deformacije i vrijednostima svih komponenti znatno ispod vrijednosti otpora metala deformaciji;
- između centralne i površinske oblasti naponsko stanje varira sa mogućnošću pojave svih karakterističnih slučajeva.

6. Promjene koje izaziva veća brzina dovode do visokih vrijednosti komponenata napona i naglih promjena na malim rastojanjima.
7. Tačnost proračuna u svim slučajevima je kontrolisana upoređivanjem vrijednosti otpora deformacije i intenziteta napona. Dobijeno je potpuno slaganje ova dva rezultata izuzev na samom ulazu u zonu deformacije.
8. Za određivanje energetskog bilansa izračunate su vrijednosti radova, koeficijenta trenja, koeficijenta udjela napona trenja u maksimalnom smicajnom naponu na površini i koeficijenta iskorišćenja energije. Dobijeni podaci su pokazali:
  - visoku osjetljivost koeficijenta trenja na promjene uticajnih parametara kod šipki polaznog prečnika 16 mm;
  - koeficijent trenja kod šipki prečnika 32 mm, samo u pojedinačnim slučajevima, ima vrijednost karakterističnu za proces hladne deformacije. Odstupanje je posljedica uticaja spoljašnjih zona i tačnosti mjerenja sile izvlačenja;
  - iskorišćenje energije se kreće u granicama 50 - 90% u zavisnosti od promjene uticajnih parametara.
9. Formirani model proračuna ne daje tačne rezultate kod šipki prečnika 42 mm, zbog visokog udjela greške mjerenja u odnosu na maksimalnu vrijednost mjerne veličine i osjetljivosti proračuna izvoda višeg reda za veličine koje se malo mijenjaju.

## L I T E R A T U R A

1. AVITZUR B.,  
Study of flowthrough conical converging dies,  
Wire Industry, 1982., 49, No 583, 503-509.
2. BRIDGMAN P.W;  
Studies in Large Plastic Flow and Fracture with Special  
Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure, McGraw-  
Nill, New York, 1952.
3. PUGH H.LI (Ed.),  
Mechanical Behaviour of Materials under Pressure, Elsevier  
Publ., Amsterdam, New York, 1970.
4. HILL R.,  
The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Univerzity  
Pres, 1950.
5. SHABAIK A.H.,  
Mechanics of plastic deformation in metal forming processes:  
experimental and numerical methods, Curr Adv.Mech.Des.  
and RES. Proc. 1 st Int. Conf.Cairo 27-29 DEc.1979.  
Oxford e.a.1981, 447-457.
6. RICHMOND O and DEVENPECK M.L.,  
A die profile for maximum efficiency in strip drawing, Proc.  
4 th U.S.Congr.Appl.Mech.1053, Univ.California, Berkeley,  
A.S.M.E., 1962.
7. DEVENPECK M.L and RICHMOND O.,  
Strip drawing experiments with a sigmoidal die profile,  
Trans A.S.M.E. J. Engng Ind., 1965, 87B, 425.
8. SOWERBY R., SAMBASIVAN B. and CADELL R.M.,  
The influence of the die profile on the properties of  
extruded aluminium, Proc. 3rd Sym. Applications of Solid  
Mechs., 27. Univ. Toronto, Canada, 1976.
9. HILL R.,  
A remark of diagonal streaming in plane plastic strain.  
J.Mech.Phys Solids., 1966., 14, 246.
10. RICHMOND O. and MORISON H.L.,  
Streamlined wire drawing dies of minimum length J.Mech.  
Phys., Solids, 1967., 15, 195.

11. SOKOLOWSKI V.V.,  
Complete plane problems of plastic flow, *J.Mech. Phys. Solids.*, 1966., 14, 353.
12. JOHNSON W.,  
Some slip line fields for swaging or expounding, indenting, extruding and machining for tools with curved dies, *Int. J.Mech.Sci.*, 1962., 4, 323.
13. BARCHRACH B.I. and SAMANTRA S.K.,  
A numerical method for computing plane plastic slip line fields., *Trans. A.S.M.E., J.Appl., Mech.*, 1976, 43, 97.
14. HILL R.and TUPPER S.J.  
A new theory of plastic deformation in wire drawing  
*J.Iron Steel Inst.*, 1948., 159, 353.
15. JOHNSON R.W. and ROW G.W.,  
Bulge formation in strip drawing with light reductions in area, *Proc.Instn. Mech.Engrs.*, 1968.182. 521.
16. DODD B.and KUDO H.,  
A slip line field for mid-plane cracking of splitting in sheet drawing. *Int.J.Mech. Sci.*, 1980., 22, 67.
17. REGESS H.C. and COFFIN L.F.Jr.,  
An analysis of the effect of friction in sheet drawing, *Int. J.Mech.Sci.*, 1971., 13, 141.
18. KUDO H., NAGAHAMA T. and YOSHIDA K.,  
Comment on a Paper by H.C.Rogers and L.F.Cotfin, Jr., *Int. J.Mech.Sci.*, 1972., 14, 339.
19. DODD B.and SCIVIER D.A.,  
On the static inadmissibility of some slip line fields for sheet drawing, *Int. J.Mech. Sci.*, 1975., 17., 663.
20. IWATA K., OSAKADA K., and FUJINO S.,  
Analysis of hydrostatic extrusion by the finite element method, *Trans.ASME, Ser. B.*, 1972., 94., 697-703.
21. ABOU-EL-LAIL MOHSEN M.M., FARAG MAHMOUD M.,  
Analysis of direct extrusion by the finite element technique, *Cum.Adv.Mech.Des., and Prod.Proc. 1 st Int.Conf.*, Cairo 27-29 dec.1979., Oxford e.a. 1981., 139-246.

21. GORDON J.D. and WEINSTEIN A.S.,  
A finite element analysis of the plane strain drawing problem,  
Proc. 2nd NAMRC. Madison, 1974., 194-208.
22. ODELL E.I.,  
A study of wall ironing by the finite technique Trans. ASME,  
J. Engg. Ind., 1978. 100, 31-36.
23. LEE E.H., MALLETT R.L., and YANG W.H.,  
Stress and deformation analysis of the metal extrusion process  
Computer Methods in Appl. Mech. Engg., 1977., 10., 339-353.
24. KOBAYOSHI S.,  
Theories and Experiments on Friction Deformation and  
Fracture in Plastic Deformation Processes, Met. Forming: Interr.  
Betw. GTheori. an Practic., Plenum Press, 1971., 325-347.
25. OOTUBO H., HIRAKAWA T. and YAMADA Y.,  
An analysis of steady metal flow in material processing by finite  
element method, J. JSTP. 1979., Vol. 20., N 218, 235-242.
26. LEE C.H. and Kobayashi S.  
New solutions to rigid-plastic deformation problems using a  
matrix method, Trans. ASME., 1973., Ser. B. 95, 865-873.
27. AVITZUR B., WU R., TALBERT S., CHOU G.T.,  
Criterion for the prevention of core fracture during extrusion  
of bimetal rods, TRANS ASME, J. Engg., Ind. 1982., 104, No 3,  
293-304.
28. GENASKERA J.S., HOSHINO S.,  
Analyse of extrusion or drawing of polygonal sections through  
straightly converging dies, TRANS. ASME., J. Engg. Ind.  
1982., No 1, 38-42.
29. TAYAL A.K., NATARAJAN R.,  
A finite element analysis of axisymmetric extrusion of composite  
rods, Int. Mach. Tool. Des. REs., 1981. 21, No 3/4, 227-235.
30. CHEN C.C., KOBAYASHI SH.,  
Deformation analysis of multi-pass bar drawing and extrusion,  
CIRP Ann, 1978. 27., no 1, 151-155.
31. TSENG A.A.,  
A numerical analysis of the extrusion process, SME Manuf. Engg.  
Trans. Vol. 9: 9th North Amer. Manuf. Res. Conf. Proc., University  
Park, Pa, May 19-22, 1981. Dearborn, Mich., 1981. 467-474.

32. KOBAYASHI SH.,  
Metal working process modelling and the finite element method,  
SME Manuf. Eng. Trans. Vol.9: 9th North Amer. Manuf.REs.  
Conf.Proc., University Park, Pa, May 19-22, 1981., Dearborn,  
Mich., 1981., 16-21.
33. ROLL K., LANGE K.,  
Possibilities for the use of the finite element method for the  
analysis of bulk metal forming processes, CIRP Ann., 1982.  
31, No 1., 145-150.
34. CHABAIK ALY H. and THOMSEN ERICH G.,  
An Application of Potential Theory to Solution of Metal  
Flow Problems, Adv in Mach. Tool Design an Research  
Conference, Proceedings of lthe 6th International MTDR Con-  
ference, Manchester College of Science on Technology, 13-15  
Sept. 1965. Pergamon Press, 1966. 429-445.
35. FUEYO J. and AVITZUR B.,  
Limit Analysis of Flow Through Conical Converging Dies,  
Proceedings Second Canadian Congres of Applied Mechanics,  
20-23, May 1969. university of Waterloo Press, 13-14.
36. IKEDA SENRI, IKEDA KEISUKE, TANAKA EIACHIRO,  
Analysis of deformation in axisymmetric indirect extrusion  
based on an upper bound approach., Trans. Jap. Inst.Metals,  
1978. 19, No 4, 181.190.
37. KIUCHI M., KISHI H., ISHIKAWA M.,  
Study on non-symmetric extrusion and drawing, Ze sr. nauk.  
AGH. Met. i Odlew., 1982., 8, No 2, 357-379.
38. VAN TYNE C.J., AVITZUR B.,  
Ring forming: an upper bound approach, Part 1: Flow pattern  
an calculation of power, Trans. ASME, J.Eng Ind., 1982.  
104, No 3, 231-237.  
Pat 2: process analysis and characteristics, 238-247.
39. THOMSEN E.G., YANG CH.T., KOBAYASHI S.,  
Mechanics of plastic deformation in metal processing, the  
Macmillan company, New York Cahhier - Macmillan limited,  
London 1968. 193-195.
40. LECLERCQ G., SANZ G.  
Etude experimentale de laptitude a la mise en forme per etirage  
a froid des aciers, REvue de Metallurgie, Jan. 1976, 65-87.

41. ZIMMERMAN R.,  
Mechanik des Drahts, - Stab - und Rohrziehens, Draht, 1978, 29,  
4, 152-163.  
Teil II, Draht, 1978., 29, 5, 231-239.
42. EDER E.,  
Zur Berechnung der Schubspannung beim Ziehen, Neue  
Hütte, 1979. 24, Hef 4 141-143.
43. EDER E.  
Folgerungen aus dem plastizitätstheoretischen Grundgleichung  
ssystem im axialsymmetrischen Fall, Arch. Eisenh. 1979., 50,  
Nr.9, 379-383.
44. EDER E.  
Maschinen market, 1978., 84, 82, 1607-1608.
45. BOISSONNEAU P., OUDIN J., RAVALARD J.,  
Optimal use of viscoplasticity analysis, Proc.21 st.Int.Mach.  
Tool Des.and Res.Conf., Swansea, 1980, London-Basingstoke,  
1981., 7-12.
46. LEOPOLD J.  
Program dokumentation, TH. Karl.Marx-Stadt., Sektion FPM,  
Forschungsbilanz 1981.
47. CHEN C.C., OH S.I. KOBAYASHI S.,  
Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing.  
P1 Trans ASME J.Eng Ind., 1979. 101, No 1, 23-35.  
P2-Trans ASME J.Eng.Ind.1979., 101 No 2, 36-44.
48. PARK J.J., TABATA T., KOBAYASHI S.,  
Internal cracking in symmetrically opposed extrusion, CIRP Ann.  
1981., 30, No 1, 175-177.
48. WEBSTER W.D., DAVIS R.L.,  
Development of a friction element for metal forming analysis,  
TRANS.ASME J.Eng.Ind., 1982, 104, No 3, 253-256.
49. PUN N.D.,  
A Finite Element Method for Three-Dimensional Analysis of  
Metal Forming., Dissertation, University of Missouri - Rolla,  
1974, Microfilm No 75-15845.

50. MIŠOVIĆ M., BLEČIĆ S., VUKČEVIĆ R.,  
Kinetika tečenja metala u procesu izvlačenja čeličnih šipki,  
Zbornik radova V Medjunarodnog simpozijuma o plastičnosti  
i otporu deforamciji metala, Herceg Novi, 28, 29., 30. april  
1986., 158.
51. THOMSEN E.G., YANG CH.T., KOBAYASHI S.  
Mechanics of plastic deformation in metal processing, the  
Macmillan company, New York Cahhier-Macmillan Limited,  
London, 1968.
52. NIKIFOROV B.A.,  
Einfluss des Produktions verfahrens auf die Gesetzmässigkeiten  
der Verfestigung, die Eigen spannungsverteilung und die  
Eigenschaften von Draht, Neue Hutte, 28, Jahrgang, Heft 1,  
Januar 1983.
53. WOLMER H.,  
Einfluss hoher Ziehgeschwindigkeiten auf die mechanischen  
Eigenschaften von Stahldraht, disertacion, genehmigt von  
der Fakultat fur Bergbau, Huttenwesen und Maschinenwesen der  
Technischen Universitat Clausthal, 18.December, 1971.
54. LIPPMAN H., MAHRIENHOLTZ O.,  
Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe,  
Erster Band, Springer-Verlag, Berlin /Heidelberg/ New York,  
1967, 210-221.
55. VOLLMER H., PAWELSKI O.,  
Einfluss der Ziehgeschwindigkeit auf die Zichkraft und die  
mechanischen Eigenschaften von stahldraht, Stahl u Eisen 96,  
Nr 8, 1976., 392-397.
56. FEJGIN G.L., TARNOVSKIJ V.I.,  
Rasčet usilij i optimalnoj formi voloki pri voločenii prutka, Izv.  
V.U.Z.Č.M. , No-8, 1975., 86-90.
57. ŠEVAKIN JU.F., PIRJAZEV D.I.,  
Naprijaženno-deformirovanoe sostojanie privoločenii, Izv.  
V.U.Z.Č.M., No 9, 1978. 61 - 64.
58. KOLMOGOROV N., NOVOŽILOV V.I.,  
Nomogramma dlja opredeljenija silovih parametrov voločenija  
prutkov i provoloki, Cvetnie metalli, No 9, 1978., 75-78.
59. ESTRATOV V.A.,  
Teorija obrabotki metallov davleniem, Harkov, 1981. 188-196.



## PODACI POTREBNI ZA DIGITALIZACIJU DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora: Mitar Mišović

Godina rođenja: 1952. g.

E-mail: [mitarm@ac.me](mailto:mitarm@ac.me)

Organizaciona jedinica Univerziteta Crne Gore: Metalurško-tehnološki fakultet

Naslov doktorske disertacije:

ISTRAŽIVANJE KRITERIJUMA STABILNOG TEČENJA METALA U  
PROCESU HLADNOG IZVLAČENJA ČELIČNIH ŠIPKI

Datum odbrane: 11.12.1987. godine.

Signatura u Univerzitetskoj biblioteci<sup>1</sup>:

Napomena:

---

<sup>1</sup> Podatak o signaturi (lokaciji) može ispuniti biblioteka organizacione jedinice/Univerzitetska biblioteka

# PODACI POTREBNI ZA UNOS DOKTORSKE DISERTACIJE U DIGITALNI ARHIV UNIVERZITETA CRNE GORE

Prevod naslova disertacije na engleski jezik:

## RESEARCH CRITERIA OF STABLE METAL FLOW IN THE PROCESS OF COLD DRAWING STEEL BARS

Mentor i članovi komisija (za ocjenu i odbranu):

Prof. dr Svetozar Blečić, mentor  
Prof. dr Broivoje Mišković, predsjednik  
Prof. dr Paul Finke, član  
Prof. dr Jozef Zasadzinski, član

### Sažetak

U radu su prikazani rezultati istraživanja tečenja metalu u procesu hladnog vučenja čeličnih šipki. Ispitivanja je završeno primjenom metode vizoplastičnosti za tri grupe konstrukcionih čelike (C, Cr i Cr-Mo čelici) koji se široko koriste u metalnoj industriji kao hladno vučeni materijali. Korišćene su šipke tri prečnika (16, 32 i 42 mm) koji reprezentuju kompletnu oblast prečnika hladno vučenih šipki.

Ekperimentalno ispitivanje po metodi vizoplastičnosti za osnosimetrično naponsko stanje je realizovano postupkom glodanja šipki do  $\frac{1}{2}$  prečnika, a zatim nanošenjem rasterske mreže na meridijalnoj ravni. Spajanjem dvije formirane i pripremljene polovine zadržava se meridijalna ravan, a uslovi deformacije izjednačavaju sa kompaktnom geometrijom.

Vučenje je realizovano na posebno konstruisanoj laboratorijskoj opremi koja je obezbjeđivala stabilne uslove deformacije sa korišćenjem originalnih proizvodnih alata. Posebno je značajno bilo obezbijediti mjerenje sile vučenja i trenutno zaustavljanja procesa.

Na vučenim šipkama su pri pogodnom uvećanju očitane trajektorije čvornih tačaka i tako dobijeni podaci o tečenju metala u zavisnosti od ispitivanih uticajnih parametara.

Obrada rezultata je obuhvatila detaljnu analizu pomjeranja u X-Z ravni zone deformacije. Za modele  $\Delta x$  i  $\Delta y$  pomjeranja izabrane su erf-funkcije i određeni koeficijenti koji zadovoljavaju pojedinačne trajektorije duž zone deformacije. Takođe, izvršeno je prevođenje modela na funkcije dvije promjenljive. Na osnovu velikog broja eksperimentalnih rezultata uopštavanje modela je realizovao sa vikokom korelacijom eksperimentalnih i proračunatih vrijednosti.

Analitički postupak za osno-simetrično naponsko stanje je obezbijedio određivanje:

- Tenzora deformacija,
- Tenzora brzine deformacije,
- Tenzora napona.

Naponsko-deformacione (kinematske) veličine su provjerene kroz bilans energije i izvršeno upoređenje vrijednosti koeficijenta trenja u odnosu na eksperimentalno izmjerene vrijednosti.

Potvrđen je značaj i pouzdanost ovakvih istraživanja za sveobuhvatnu plastomehaničku analizu osnosimentričnih procesa.

Sažetak na engleskom jeziku:

### Summary

The paper presents the results of research flow metal in the process of cold drawing steel bars. Test is completed using the visoplasticity method for three groups structural steels (C, Cr and Cr-Mo steels), which is widely used in the metal industry, as cold-drawn material. Were used three diameters of bars (16, 32 and 42 mm) that represent the entire area diameter cold drawn bars.

Experimental testing by visoplasticity method for axisymmetrically stress state was conducted using the

method of milling bars to  $\frac{1}{2}$  in diameter, followed by application of raster network to meridional plane. By connecting the two formed and prepared half retains the meridional plane, and the conditions of deformation equated with compact geometry.

Drawing is carried on specially designed laboratory equipment which provided stable conditions deformation using the original production tools. It is especially important to provide any measure drawing forces and currently stopping process.

On drawn bars are at a suitable magnification read trajectories of nodes and so obtain data about the flow of metal in relation to the observed parameters.

Processing results included a detailed analysis of movements in the X-Z plane deformation of the zone. For models  $\Delta x$   $\Delta y$  displacements were selected erf-function and certain coefficients that meet individual trajectories along the deformation zone. Also, an interpretation model on two variable functions. Based on the large number of experimental results generalization model is implemented with high correlation of experimental and calculated values.

The analytical procedure for axial-symmetric stress state has provided the determination of:

- Strain tensor,
- Strain rate tensor,
- Stress tensor.

Stress-strain (kinematic) the components of the check only through the energy balance and performed a comparison of the value of the coefficient of friction compared to the experimentally measured values.

Confirmed the significance and reliability of such research for comprehensive Plastomechanics analysis axisymmetrically stress state.

### **Ključne riječi:**

Čelične šipke, hladno vučenje, metoda vioplacičnosti, pomjeranje, komponente i tenzori deformacije, brzina doformacija i naponi.

### **Ključne riječi na engleskom jeziku:**

Steel bars, cold-drawing, method visioplacity, displacements, components and tensors of strain, speed and stresses.

### **Naučna oblast/uža naučna oblast:**

Prerada metala deformacijom/naponsko-deformaciona analiza

### **Naučna oblast/uža naučna oblast na engleskom jeziku:**

Deformation processing of metals/stress-strain analysis

### **Ostali podaci:**

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore unese doktorsku disertaciju pod naslovom

### ISTRAŽIVANJE KRITERIJUMA STABILNOG TEČENJA METALA U PROCESU HLADNOG IZVLAČENJA ČELIČNIH ŠIPKI

koja je moj autorski rad.

Doktorska disertacija, pohranjena u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore, može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la<sup>1</sup>.

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/>            | Autorstvo  |
| <input type="checkbox"/>            | Autorstvo – bez prerada  |
| <input type="checkbox"/>            | Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima Autorstvo – nekomercijalno |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada                           |
| <input type="checkbox"/>            | Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima           |

Potpis doktoranda:  
  
Prof. dr Mitar Mišović

U Podgorici, 18. 02. 2015. godine

---

<sup>1</sup> Odabrati (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licence dat je na poledini ovog priloga).

### **Autorstvo**

Licenca sa najširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.

### **Autorstvo – bez prerada**

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

### **Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima**

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerade se moraju distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

### **Autorstvo – nekomercijalno**

Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

### **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada**

Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

### **Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima**

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija, javno saopštavanje i prerada djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.