

UDK 620.178.6:621.98.011

Kontinuirni izbočevalni preizkus za avtomatično snemanje krivulj plastičnosti

FRANC GOLOGRANC

1. UVOD

Pri preoblikovanju tanke pločevine je pravilna izbira materiala in preoblikovalnih pogojev osnova za njeno gospodarno izkoriščanje. Zato moramo že pred načrtovanjem preoblikovalnih procesov imeti na voljo potrebne snovne in tehnološke podatke o materialu preoblikovancev. Zlasti pri globokem vlečenju večjih, zapletenih in dragih delov je vnaprejšnje poznavanje preoblikovalnih karakteristik velikega pomena za uspešnost, kakovost in cenenost izdelave. Kompleksnost ugotavljanja preoblikovalnih karakteristik, ki se med drugim kaže v razmeroma velikem številu vplivnih dejavnikov, pa terja ustrezne in ponavadi zelo obsežne, dolgotrajne in sistematizirane raziskave [1].

Pomembna značilnost preoblikovanja v hladnem je postopna utrditev materiala. Zato so krivulje utrjanja ali krivulje plastičnosti, ki ponazarjajo zvezo med resničnimi napetostmi in deformacijami v plastičnem področju $k_t = k_t(\varphi_e)$ izhodna informacija za obravnavanje preoblikovalnih procesov [2, 3, 4]. Brez njih ni mogoče zanesljivo oceniti pričakovane preoblikovalne sile, deformacijskega dela, obremenitve preoblikovalnih orodij, dopustnih deformacij in trdnostnih lastnosti preoblikovancev, niti izbrati ustreznega izhodnega stanja surovcev. Ker so te karakteristike potrebne tako pri snovanju tehnoloških procesov kakor tudi pri konstruiranju in izkoriščanju preoblikovalnih orodij in strojev, ima njihova opredelitev odločilen pomen za tehnično dovršeno, učinkovito in gospodarno uporabo preoblikovalnih postopkov.

V prispevku predstavljamo novo, doma zasnovano in izdelano preizkuševalno napravo za kontinuirno dvoosno raztezanje tanke pločevine, ki omogoča hitro in avtomatizirano snemanje krivulje plastičnosti z neposredno obdelavo eksperimentalnih podatkov na procesnem mini računalniku. Napravo smo razvili v laboratoriju za preoblikovanje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani v okviru raziskovalne naloge [5] in ob sodelovanju industrije.

2. HIDRAVLIČNI IZBOČEVALNI PREIZKUS

Na velikost in spremembo napetosti tečenja med hladnim preoblikovanjem vplivajo poleg kemične sestave in strukture materiala predvsem tehnolo-

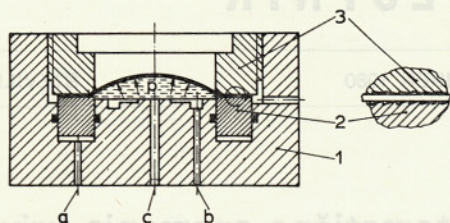
ški pogoji preoblikovanja, tj. temperatura, stopnja in hitrost deformacije, pri pločevini pa tudi njena anizotropnost. Funkcijo napetosti tečenja k_t lahko izrazimo v obliki

$$k_t = k_t(M_k, M_s, T_p, \varphi_e, \dot{\varphi}_e, R) \quad (1)$$

iz katere izhaja, da vpliva na potek krivulje plastičnosti vsaj pet kompleksnih parametrov. Čeprav je napetost tečenja ali preoblikovalna trdnost k_t definirana kot dejanska napetost pri enoosnem napetostnem stanju, jo načelno lahko določamo tudi pri bolj zapletenih obremenitvah. Ekvivalentne velikosti so namreč invariantne glede na napetostno in deformacijsko stanje. Pogoji za dobivanje zanesljivih in natančnih vrednosti pa je enolična določljivost vseh komponent napetosti pri danih pogojih preoblikovanja, iz katerih izračunamo ustrezno primerjalno napetost po enem izmed veljavnih kriterijev za plastičnost [2].

Medsebojna povezava primerjalnih napetosti in deformacij in odvisnosti od preoblikovalnih pogojev sta zelo zapleteni in ju je mogoče ugotavljati samo s preizkusi. Načelno so za to uporabne skoraj vse metode statičnega preizkušanja kovin, ki pa so največkrat modificirane in prilagojene posebnim preizkusnim razmeram. Na posebne zahteve naletijo pri preizkušanju tanke pločevine, ki dopušča le določene obremenitve in oblike preizkušancev. Tu se je poleg enoosnega nateznega preizkusa ploščatih epruvet ter tlačnega preizkusa valjastih preizkušancev, sestavljenih iz pločevinskih lamel, uveljavil hidravlični preizkus z izbočenjem [6, 7], ki omogoča večje kritične deformacije, ima pa tudi to prednost, da ne terja posebne oblike in priprave preizkušancev.

Preizkus izbočenja pločevine s hidravličnim tlakom sodi med postopke čisto nateznega preoblikovanja [8]. Namesto s togim pestičem preoblikujemo pločevino s tlačnim medijem, pri čemer lahko vpliv trenja povsem izločimo. Tlačni medij pritiska neposredno na eno stran pločevine in jo polagoma izboči v odprtino matrice (sl. 1). Preizkušanelec je po obodu trdno vpet, tako da se aktivna površina povečuje samo na račun debeline pločevine. Ta se od roba proti sredini enakomerno tanjša. Geometrija izbočine je odvisna od oblike odprtine v matrici, ki je lahko okrogla, eliptična ali pravokotna. Preizkus lahko opravimo postopoma (diskontinuir-



Sl. 1. Izbočevanje s tlačnim medijem

- 1 — vpenjalni valj
- 2 — bat
- 3 — matrica
- a — dovod tlaka za vpenjanje
- b — dovod tlaka za izbočevanje
- c — zračenje

no) ali zvezno, tj. brez prekinitev (kontinuirno). Glede na to se močno razlikujeta tudi metodologija preizkušanja in potrebna merilna oprema.

3. NAPRAVA ZA KONTINUIRNO IZBOČEVANJE

Dosedanje izkušnje pri hidravličnem izbočevanju so pokazale, da je postopni način preizkušanja dokaj zamuden, standardni pripomočki in metode merjenja plastičnih deformacij in geometrije preizkušancev pa navadno ne zadoščajo zahtevani merilni natančnosti [6, 9]. Večkratno snemanje in ponovno vpenjanje vzorcev lahko povzroča v posameznih fazah preizkusa nehomogeno napetostno in deformacijsko stanje in vpliva na spremembo preizkusnih pogojev. Tudi grafometrična metoda [1] in optično merjenje koordinat merilnega kroga [9] sta za snemanje krivulj plastičnosti prepočasni in za merilne pogreške preobčutljivi. Zato smo razvili preizkuševalno napravo za neprekinjeno sne-

manje in registriranje vseh potrebnih veličin med izbočevanjem [5].

Naprava sestoji iz hidravličnega izbočevalnega sistema, električnega merilnega sistema in enot za registriranje, vrednotenje in obdelavo podatkov (sl. 2). Naloga hidravličnega sistema je, da posreduje tlačni medij za vpenjanje in izbočevanje pločevinskih preizkušancev. Vpenjalno orodje, katerega glavni del je hidravlični valj z obročastim batom in matrico, rabi za vpenjanje rondel s premerom okoli 200 mm. Uporabljamo okrogle matrice z odprtinami $\varnothing 80$, $\varnothing 100$ in $\varnothing 125$ mm ter tri eliptične matrice, katerih glavne osi so v razmerjih 1,25, 1,54 in 2. Hidropnevmatični akumulator LEDUC vzdržuje potreben tlak v vpenjalnem sistemu in preprečuje drsenje preizkušanca. Največja vpenjalna sila je okoli 250 kN. Potrebni tlačni medij (olje) daje večbatna aksialna regulacijska črpalka s pretokom $Q = 0 \dots 2$ l/min in tlakom do 250 bar. Za optično kontrolo in odbiranje tlakov v vpenjalnem in izbočevalnem krogu rabijo manometri, za snemanje izbočevalnega tlaka pri kontinuirnem preizkušanju pa induktivni merilnik tlaka HBM P/11-200. Hidravlični sistem krmilimo za zdaj ročno, pripravlja pa se rekonstrukcija, ki bo omogočala krmiljenje z elektromagnetnimi ventili.

4. NAPETOSTI IN DEFORMACIJE PRI IZBOČENJU

Teoretične osnove hidravličnega izbočenja tanke pločevine so podrobneje obravnavane v [7]. Za opredelitev krivulje plastičnosti zadošča, da zasledujemo napetostno in deformacijsko stanje na enem samem mestu nastajajoče izbočine. Najprimernejši za to je njen vrh, kjer so napetosti in deformacije največje in je tudi meritvam najlažje dostopen. Značilni geometrični veličini v temenu sta oba glavna krivinska polmera ter debelina pločevine, medtem ko je zunanja obremenitev podana s hidravličnim izbočevalnim tlakom. Če je debelina pločevine v primerjavi z dimenzijami matrice dovolj majhna in so izpolnjeni tudi preostali pogoji, ki veljajo v teoriji lupin, lahko predpostavimo, da vlada v vrhu izbočine membransko napetostno stanje [10]. Tretjo glavno napetost, ki deluje normalno na površino izbočine ($\sigma_n = -p/2$), zaradi $s/\varrho \ll 1$ zanemarimo.

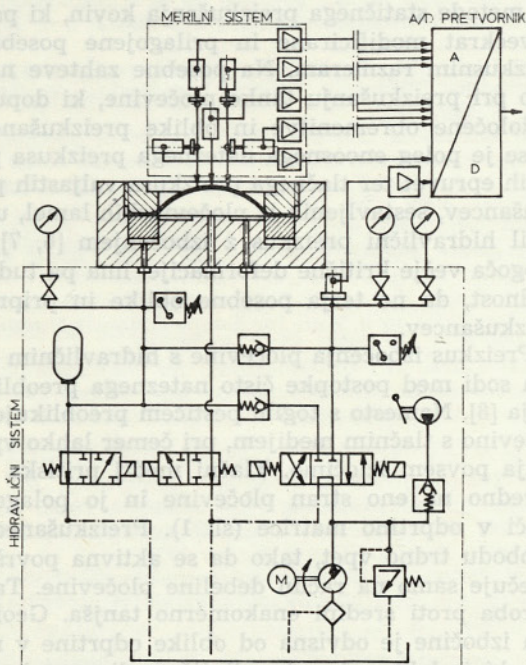
Za predpostavljeno dvoosno napetostno stanje in glavne osi 1 in 2 je primerjalna ali ekvivalentna napetost po v. Misesu [2]

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1 \sigma_2 \quad (2)$$

Glavni normalni napetosti σ_1 in σ_2 sta povezani z znano Laplaceovo enačbo [10]

$$\frac{p}{s} = \frac{\sigma_1}{\varrho_1} + \frac{\sigma_2}{\varrho_2} \quad (3)$$

kjer so p — hidravlični izbočevalni tlak, s — debelina pločevine, ϱ_1 in ϱ_2 — glavna krivinska pol-



Sl. 2. Shema preizkuševalne naprave

mera izbočine. Primerjalna napetost mora biti med plastično deformacijo enaka preoblikovalni trdnosti pločevinskega materiala. Če označimo razmerje $\varrho_2/\varrho_1 = \delta$, dobimo

$$\sigma_e = k_t = \frac{p \varrho_1}{2s} \delta \sqrt{\delta^2 - 3\delta + 3} \quad (4)$$

Enačba (4) je uporabna načelno tudi za lupine z nekroglim tlorisom, če so v opazovanem območju izpolnjeni pogoji membranske teorije.

Ekvivalentno deformacijo za proporcionalno obremenitev in izotropen material določimo iz enačbe [2]

$$\varphi_e = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)} \quad (5)$$

oziroma

$$\varphi_e = 2\varphi_1 \sqrt{\frac{1 + \beta + \beta^2}{3}} \quad (6)$$

kjer pomeni $\beta = \varphi_2/\varphi_1$ razmerje obeh logaritemskih deformacij v smeri glavnih osi v ravnini pločevine.

Ker debeline pločevine pri kontinuirnem preizkusu ne moremo meriti neposredno, jo določimo posredno po zakonu o stalnosti prostornine ter dveh deformacij majhnega ploskovnega elementa v temenu izbočine. Pri tem velja

$$-\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 = \ln(s/s_0) \quad (7)$$

Tu je φ_3 integralna srednja vrednost glavne logaritemske deformacije, ki je odvisna od dimenzij opazovanega elementa.

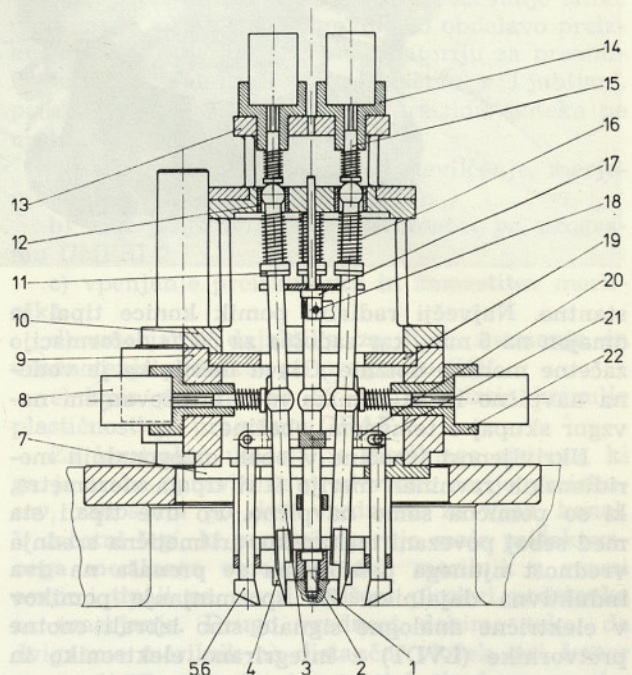
Z enačbama (4) in (6) lahko določimo primerjalno napetost in deformacijo v vsakem trenutku preizkusa, zvezo med njima pa prikažemo v obliki krivulje plastičnosti. Pri tem je treba kontinuirno ali postopoma meriti naslednje spremenljivke: hidravlični izbočevalni tlak p , krivinska polmera ϱ_1 in ϱ_2 ter deformaciji φ_1 in φ_2 opazovanega elementa. Če predpostavimo, da je krivina ploskovnega elementa v temenu izbočine del krožnega loka s polmerom ϱ , zadoščajo za njegovo opredelitev koordinate treh točk na meridianu. Zaradi natančnosti merjenja ne sme biti ploskovni element ne premajhen ne prevelik. Izbrani element izbočine ima obliko kroga z začetnim premerom $d_0 = 20$ mm, ki tudi pri najmanjši matrici še ustreza zahtevanim pogojem. Z uporabo Hillove teorije anizotropne plastičnosti je enačbi (4) in (6) mogoče razširiti tudi na ortotropne pločevine [3].

Čeprav je geometrija nastajajoče izbočine zlasti pri rotacijski simetriji na videz preprosta, povzroča nestacionarni proces izbočenja precej težav, ker se dimenzijska razmerja in oblika lupine s časom spreminjajo. Natančnejše raziskave geometrije izbočine so pokazale, da le-ta tudi pri rotacijski simetriji nima pravilne oblike krogelnega odseka, temveč je del rotacijskega elipsoida, ki prehaja iz

sploščene ($a = b > c$) v raztegnjeno obliko ($a = b < c$) [7]. To si razlagamo z vplivom robnih motenj in upogibanja pločevine na robu matrice ter anizotropnosti tanke pločevine.

5. MERILNI SISTEM

Ker morajo preizkušanci med kontinuirnim izbočevanjem ostati v orodju, je bilo treba razviti poseben tenzo- in sferometrični sistem, ki nenehno sledi spremembam geometrije in dimenzij izbrane ploskovnega elementa v temenu izbočine (sl. 3).

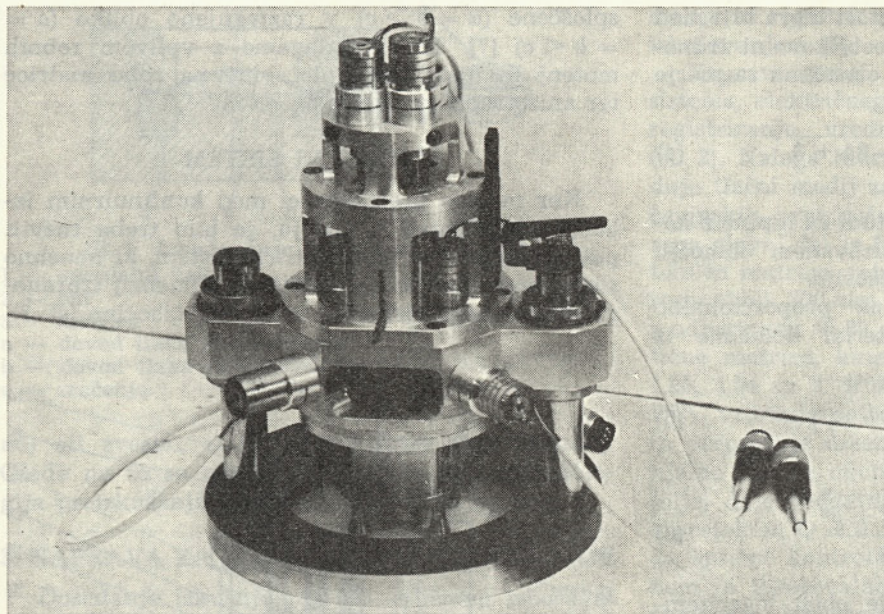


Sl. 3. Tenzo-sferometer v prerezu (merilna ravnina 0°)

Pri zasnovi merilnega sistema smo postavili naslednje zahteve:

1. raztezanje merilnega kroga, ki se deformira v krog ali elipso, je treba meriti v dveh prednostnih ortogonalnih smereh,
2. krivine izbočine naj se merijo koaksialno z deformacijami,
3. vse veličine za izračun poteka krivulje plastičnosti je treba snemati hkrati in zvezno,
4. omogočeno naj bo hkratno vrednotenje merilnih informacij in obdelava podatkov na procesnem računalniku,
5. zagotovljena naj bo potrebna natančnost.

Tenzometrični del sistema sestoji iz štirih tipal, ki sledijo radialnim raztežkom in navpičnim pomikom merilnega kroga v dveh med seboj pravokotnih meridianskih ravninah. Pomiki njihovih konic se prenašajo na induktivne dajalnike, ti pa jih spreminjajo v analogne električne napetosti. Posebna oblika tipal omogoča, da ostane prestavno razmerje v predvidenem merilnem območju kon-



Sl. 4. Posnetek merilnika

stantno. Največji radialni pomik konice tipal je omejen na 5 mm, kar zadošča za 50 % deformacijo začetne merilne dolžine. Glava merilnika je vodena navpično in se pomika med izbočevanjem navzgor skupaj s temenom izbočine.

Ukrivljenost izbočine v obeh ortogonalnih meridianskih ravninah merijo štiri tipala sferometra, ki so pomična samo navpično. Po dve tipali sta med seboj povezani mehansko, aritmetična srednja vrednost njunega pomika pa se prenaša na dva induktivna dajalnika. Za spreminjanje pomikov v električne analogne signale smo izbrali enotne pretvornike (LVDT) z integrirano elektroniko in razmeroma veliko izhodno močjo (50 mW), ki omogočajo neposreden priključek na računalnik (registrirno napravo, XY-pisalnik). Posnetek novega merilnika prikazuje slika 4.

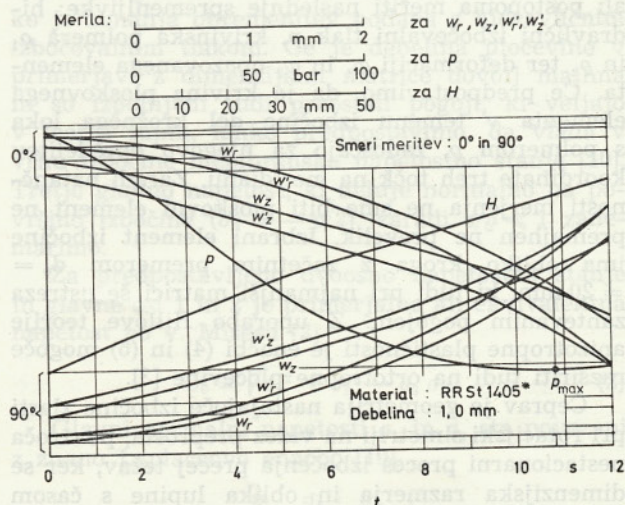
6. VREDNOTENJE MERILNIH REZULTATOV

Pri kontinuirnem preizkusu, ki naj bi se razvijal pri konstantnih preoblikovalnih pogojih ($T_p = \text{const}$, $\dot{\varphi} = \text{const}$), je treba merilne signale na izhodu merilnega sistema na določen način registrirati. Za ta namen smo doslej uporabljali svetlobni oscilograf, ki zapisuje časovni potek merilnih signalov za vsak kanal posebej (sl. 5). Ker obsega tak zapis veliko informacij, je ročno vrednotenje merilnih rezultatov, tabeliranje in prenašanje podatkov na luknjane kartice kljub poznejši obdelavi podatkov na digitalnem računalniku zelo zamudno in nepriljubeno. Zlasti pri serijskih preizkusih je avtomatizacija snemanja in vrednotenja preizkusnih podatkov ne le zaželeno, ampak celo nujno potrebna.

S hitrim razvojem računalniške tehnologije so se v zadnjih letih pojavile nove možnosti za avtomatizacijo merilnih postopkov in vrednotenja re-

zultatov [11]. Z vključitvijo digitalnega procesnega računalnika v merilni sistem je mogoče doseči pomembne prednosti: možnost shranjevanja preizkusnih podatkov za nadaljnjo obdelavo, pripravo podatkov za statistično vrednotenje rezultatov posameznih meritev ali večje skupine, sprotne vrednotenje signalov in takojšen izris diagramov. Konfiguracija računalniškega sistema je odvisna od zahtev, ki jih je treba realizirati pri avtomatizaciji preizkusa. Pri hidravličnem preizkusu smo morali upoštevati naslednje funkcije:

— ročno vnašanje podatkov o meritvi (označba vzorca, material, debelina, šarža, koeficienti anizotropije, smer meritve glede na smer valjanja, pogostost odbiranja vrednosti),

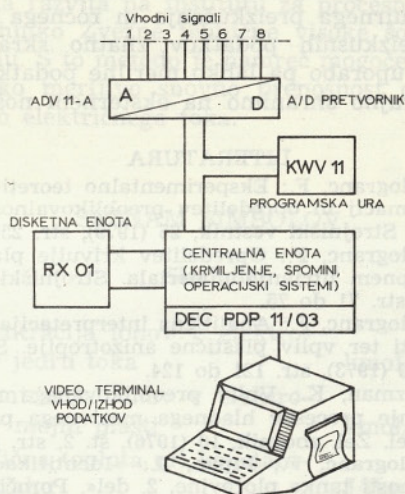


Sl. 5. Časovni potek merilnih signalov pri izbočevanju

* Označba jekla po standardu DIN ustreza naši označbi Č.0148.

- kontrola poteka preizkusa (začetek, konec, prekinitev),
- avtomatično merjenje posameznih pomikov,
- procesiranje analognih vrednosti (multipleksiranje, A/D konverzija, tabeliranje),
- izračun posameznih sestavljenih vrednosti,
- shranjevanje in priprava digitalnih podatkov za statistično vrednotenje,
- izris diagramov krivulje plastičnosti, izpis parametrov.

Zgornjim zahtevam je lahko v celoti zadostil procesni mini računalnik DEC PDP 11/03 Laboratorija za tehnično kibernetiko in obdelovalne sisteme na fakulteti. Blok shema povezave računalnika z napravo za hidravlično izbočevanje je prikazana na sliki 6. Analogno lahko digitalni pretvornik ADV 11-A bere 14 kanalov s spremenljivo pogostostjo vzorčenja. V enoti je vgrajen multiplekser, ki izbira številko kanala, medtem ko daje krmilna ura signale za spremembo po ukazih centralne enote. Podatke, ki se med meritvijo spreminjajo v številčne vrednosti, shrani računalnik



Sl. 6. Blok shema povezave merilnega sistema s procesnim računalnikom

v hitrem spominu, nato pa jih zapiše na disketo. Tako so rezultati meritev trajno zapisani in jih lahko uporabljamo v poljubnih programih za vrednotenje. Vse informacije, ki nas zanimajo, tudi končne rezultate meritve, prikaže računalnik na zaslonu, kopirna enota pa jih po potrebi zapiše na papir. Tako so nekaj sekund po končanem preizkusu na voljo ustrezni podatki o preizkušeni pločevini.

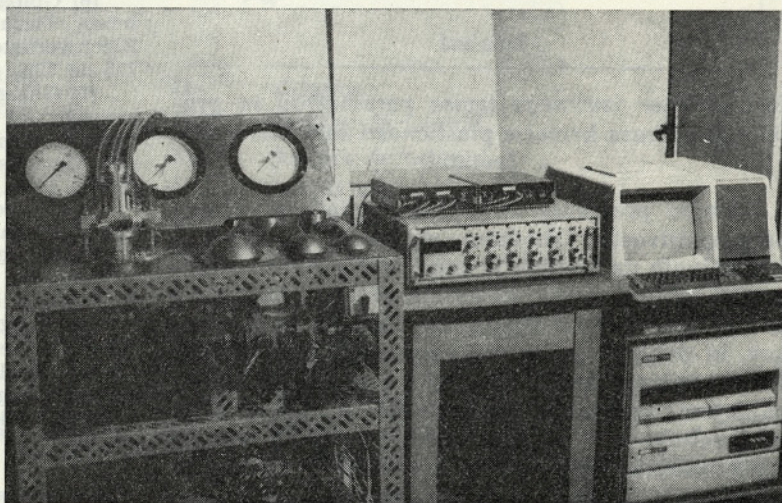
7. POTEK IN REZULTATI PREIZKUSOV

Novi preizkuševalni sistem za izbočevanje tanke pločevine s simultano računalniško obdelavo preizkusnih podatkov, posnet v laboratoriju za preoblikovanje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, prikazuje slika 7. Kontinuirni preizkus poteka po naslednjem zaporedju:

- a) priprava preizkušancev (oštevilčenje, merjenje debeline, namestitvev v orodju),
- b) umerjanje tenzo- in sferometra po programu UMERI 2,
- c) vpenjanje preizkušanca in namestitvev merilnika,
- d) umerjanje dajalnika za tlak, snemanje in vrednotenje podatkov po programu GOL,
- e) izpis parametrov in grafični izris krivulje plastičnosti po programu GRAF.

Za kontrolno umerjanje merilnega sistema, ki ga je treba opraviti le pred vsako serijo preizkusov, zadoščata po dve vrednosti za vsak kanal. V začetni legi, ki pomeni zgornjo mejo pričakovane merilnega območja, stoji merilnik z vsemi osmimi tipali na ravni brušeni ploskvi podstavka za umerjanje. Drugo vrednost dobimo tako, da dvignemo merilnik na distančni vložek, pri čemer se vsa tipala pomaknejo navzdol, tipala za merjenje deformacij pa tudi za določeno mero navzven. Merilnik za tlak lahko kalibriramo z merilnim ojačevalnikom HOTTINGER KWS 682.D.8.

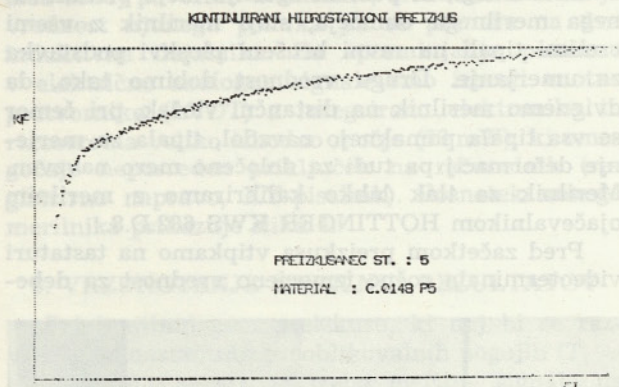
Pred začetkom preizkusa vtiskamo na tastaturi videoterminala ročno izmerjeno vrednost za debe-



Sl. 7. Posnetek celotne naprave v laboratoriju

lino pločevine, čas trajanja preizkusa, podatke o parametrih normalne plastične anizotropije in druge geometrijske konstante merilnega sistema. Merilnik postavimo nato na preizkušane, ki smo ga pred tem vpeli v matrico. Odbiranje posameznih signalov poteka s frekvenco 2 kHz. Vklopi se avtomatično, ko doseže tlak določeno vrednost. Odbiranje preneha po preteku časa, ki je bil predviden za preizkus. Med preizkusom računalnik sproti računa vrednosti za preoblikovalno trdnost k_t , primerjalno deformacijo φ_e ter razmerja glavnih napetosti, deformacij in krivin v smeri glavnih osi. Ko se program meritve ustavi, izriše računalnik na zaslonu periferne enote krivuljo plastičnosti $k_t - \varphi_e$, s programom LOGREG pa izračuna koeficient korelacije in parametre regresijske krivulje, s katero želimo aproksimirati preizkusno funkcijo.

Delovanje celotnega sistema za kontinuirno snemanje krivulj plastičnosti smo preizkusili na vzorcih pločevine Č.0148 P5 z debelino 0,61 mm, ki smo jih izbočevali v okroglih matricah s premerom $\varnothing$ 125 mm. Merilnik smo postavili na pločevino tako, da se je ena merilna ravnina ujemala s smerjo valjanja pločevine. Rezultat preizkusa za eno epruveto, ki je trajal 30 sekund, je podan na sliki 8. Izvirni zapis podaja parametre krivulje plastičnosti vključno s koeficientom korelacije r ter grafični prikaz regresijske krivulje, ki je aproksimirana s potenčno funkcijo $k_t = C \varphi^n$. Krivulje plastičnosti je mogoče aproksimirati tudi z drugimi primernimi empiričnimi enačbami [3].



Slika 8. Primer izvirnega izpisa parametrov in grafičnega prikaza krivulje plastičnosti za jekleno pločevino

Uvodni preizkusi so pokazali določene začetne pomanjkljivosti. Izhodnim signalom posameznih induktivnih dajalnikov je superponiran visokofrekvenčni motilni signal, ki ga nismo mogli odstraniti iz meritve. Ta šum izhaja iz konstrukcije dajalnikov, ki delujejo po načelu linearnega variabilnega diferencialnega transformatorja z enosmernim napajanjem, vgrajenim oscilatorjem in operacijskim ojačevalnikom. Z ustreznimi filtri bo treba te motnje odpraviti. Prvi preizkusi so tudi pokazali, da so rezultati boljši, če narašča izbočevalni tlak ena-

komerneje in hitreje, kar pa je pri dosedanji izvedbi ročne regulacije pretoka težko doseči. Zato bo treba v hidravlični sistem vgraditi elektromagnetne ventile in sistem za avtomatično krmiljenje procesa preizkušanja.

8. SKLEP

Pri preizkusnem ugotavljanju krivulje plastičnosti pločevinskih materialov se je poleg enoosnega nateznega preizkusa uveljavil zlasti preizkus izbočenja s hidravličnim tlakom. Opisana nova preizkuševalna naprava, ki smo jo razvili na Fakulteti za strojništvo, omogoča, da lahko snemamo krivulje plastičnosti neposredno, tj. s kontinuirnim preizkusom. Z uporabo ustreznih elektronskih in računalniških enot je bilo mogoče preizkušanje in vrednotenje povsem avtomatizirati. Priključitev na mini procesni računalnik dopušča sprotno obdelavo preizkusnih podatkov, aproksimacijo preizkusnih krivulj z ustreznimi analitičnimi modeli ter numerično in grafično izpisovanje rezultatov. Čas preizkusa se je v primerjavi z dosedanjim načinom diskontinuirnega preizkušanja in ročnega vrednotenja preizkusnih podatkov znatno skrajšal, za poznejšo uporabo pa lahko merilne podatke in rezultate trajno shranimo na eksternem nosilcu informacij.

LITERATURA

- [1] Golgranc, F.: Eksperimentalno teoretična analiza deformacij in opredelitev preoblikovalnosti tanke pločevine. *Strojniški vestnik*, 25 (1979), str. 258 do 262.
- [2] Golgranc, F.: Opredelitev krivulje plastičnosti pri izotropnem utrpanju materiala. *Strojniški vestnik*, 19 (1973), str. 71 do 75.
- [3] Golgranc, F.: Analitična interpretacija krivulje plastičnosti ter vpliv plastične anizotropije. *Strojniški vestnik*, 19 (1973), str. 121 do 124.
- [4] Kuzman, K.: Vpliv preoblikovanega materiala na snovanje procesov hladnega masivnega preoblikovanja jekel. *Žel. zbornik*, 10 (1976), št. 2, str. 83 do 92.
- [5] Golgranc, F.; Pipan, J.: »Identifikacija preoblikovalnosti tanke pločevine, 2. del«. Poročilo o raziskovalni nalogi, Ljubljana, 1980. Financerji: RS Slovenije, TAM Maribor, IMV Novo mesto, SATURNUS Ljubljana, TOMOS Koper.
- [6] Golgranc, F.: Untersuchungen der hydraulischen Tiefung zur Aufnahme von Fließkurven an Blechwerkstoffen. *Industrie Anzeiger*, 90 (1968), str. 775 do 779.
- [7] Golgranc, F.: Beitrag zur Ermittlung von Fließkurven im kontinuierlichen hydraulischen Tiefungsversuch. *Berichte aus dem Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart*, Nr. 31. Verlag, Girardet, Essen, 1975.
- [8] Lange, K.: Begriffe und Benennungen in der Umformtechnik, Teil 2. *BLECH*, 26 (1979), str. 576—580.
- [9] Golgranc, F.: Raziskava plastičnih lastnosti pločevin pri hladnem preoblikovanju. Raziskovalna naloga SBK, 1972.
- [10] Flüge, W.: *Statik und Dynamik der Schalen*. Springer Verlag, Berlin, 1962.
- [11] Peklenik, J.: Automatisierung der Messwertverarbeitung in der fertigungstechnischen Forschung und Entwicklung. *Wt-Z. ind. Fertig.* 61 (1971), str. 154 do 157.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Franc Golgranc, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani