

UDK 620.178.6:621.98.011

Eksperimentalno teoretična analiza deformacij in opredelitev preoblikovalnosti tanke pločevine

FRANC GOLOGRANC

1. UVOD

Hladno valjana pločevina v ploščah ali trakovih, iz kakršne je izdelan dandanes večji del jeklenih izdelkov in delov iz neželeznih kovin, je izredno pomembna oblika polizdelkov za predelovalno industrijo. Odlične uporabne lastnosti pločevin iz raznovrstnih kovinskih materialov z različnimi fizikalnimi in kemičnimi lastnostmi in strukturami površin so prednosti, ki jih lahko uspešno izkoriščajo avtomobilska, elektro- in strojna industrija, industrija bele tehnike, embalaže itd. Težavnost votlih in lupinastih izdelkov, kakršne je mogoče napraviti iz tanke pločevine, in zahtevnost glede trdnostnih in drugih lastnosti nenehno naraščata. Hkrati s tem raste tudi njihova množičnost, kar dokazuje porast letne porabe in proizvodnje tanke pločevine v svetu, pa tudi pri nas. Medtem ko se je svetovna proizvodnja jekla v zadnjih letih nekaj več kakor podvojila, se je poraba tanke pločevine v enakem obdobju povečala kar za štirikrat. Energetska kriza utegne še bolj zaostri konkurenčni boj na tehnološkem področju in pospešiti uporabo najgospodarnejših izdelovalnih metod, med katere sodi prav gotovo predelovanje pločevine.

Pri preoblikovanju je material obdelovavec eden izmed osnovnih elementov kompleksnega sistema dejavnikov, ki vplivajo na preoblikovalni proces. Gospodarna izdelava pločevinskih delov je možna le, če so glavni vplivni faktorji npr. material, mazivo, orodje in stroj (slika 1) med seboj čim bolj usklajeni. Poznati moramo predvsem zvezo med preoblikovalnimi karakteristikami materiala in parametri tehnološkega procesa. Pri tem imajo določeno vlogo tudi zunanji vplivi (strega, okolje itd.), katerih niti pri avtomatizirani proizvodnji ni mogoče povsem izločiti. Šele rezultat preoblikovalnega procesa, ki je glavna neznanka celotnega sistema, lahko pokaže, ali smo zares dosegli optimalne razmere pri preoblikovanju.

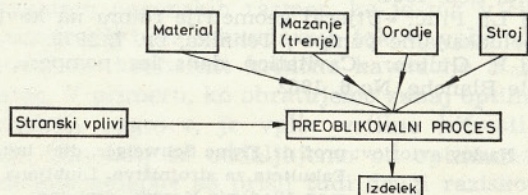
Vse bolj zahtevne oblike in konstrukcije izdelkov, racionalno združevanje manjših preoblikovancev v večje in gospodarna izdelava le-teh postavljajo izdelovalce in predelovalce tanke pločevine pred težavne naloge. V industrijskem svetu zato nenehno iščejo zanesljivejša merila za ocenjevanje

preoblikovalnih sposobnosti in razvijajo nove natančnejše metode za ugotavljanje preoblikovalnih karakteristik pločevine [1, 2, 3, 4]. Poznavanje in pravilno vrednotenje preoblikovalnih karakteristik ima izjemen pomen, saj je ne le osnova za uspešen razvoj pločevinskih materialov in raziskovanje parametrov preoblikovalnega procesa, temveč tudi za optimalno izbiro materialov za preoblikovanje. Še posebej velja to za avtomatizirano predelavo v večstopenjskih orodjih, na transfernih strojih in avtomatih, kjer mora pločevina ustrezati vsem fazam preoblikovalnega procesa, da ne bi prišlo do zastojev v izdelovalnem procesu. Pri izdelavi karoserijskih delov in drugih zapletenih delov z nepravilnimi oblikami znašajo stroški za material včasih tudi več kakor 75 % vseh stroškov za preoblikovanje, kar 25 % materialnih stroškov pa izgubimo v povprečju z odpadki, ki nastajajo pri preoblikovanju. Pogoji za gospodarno proizvodnjo izdelkov te vrste je torej čim boljše izkoriščanje izhodnega materiala, predvsem tudi njegovih lastnosti, kar praktično pomeni, da je treba rezerve plastičnosti pri preoblikovanju zmanjšati na minimum.

2. DEFINICIJA PREOBLIKOVALNOSTI

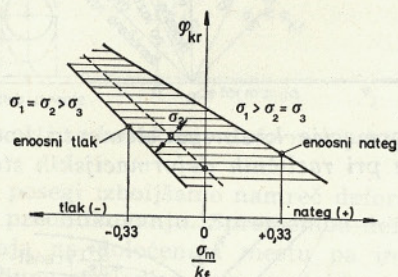
Sposobnost za uspešno industrijsko predelavo pločevin je močno odvisna od specifičnih preoblikovalnih pogojev, ki pa se med preoblikovanjem pogosto zelo spreminjajo. Zato ni čudno, če pojem preoblikovalnost in njegovi količinski kazalniki še danes niso povsem jasno določeni. S pojmom preoblikovalnost (deformabilnost) označujemo v splošnem velikostno zvezo med obremenitvijo materiala in njenimi posledicami, ki se kažejo v spremembi oblike in dimenzij obdelovancev.

Preoblikovalne lastnosti pločevine ugotavljamo praviloma z nateznim preizkusom in z ustreznimi simulacijskimi preizkusi [5]. Mehanske in tehnološke karakteristike, ki jih dobimo iz teh preizkusov, npr. razmerje σ_T/σ_M , celotni relativni raztezek δ , eksponent utrditve n , koeficient normalne plastične anizotropije R , kazalniki globokovlečnosti, včasih tudi trdota, rabijo kot merilo pri izdelavi z vlečenjem. Vendar se je pokazalo, da preoblikovalnosti s temi preprostimi parametri v splošnem ni mogoče opisati dovolj natančno, ker je odvisna od kemičnih in mehanskih lastnosti materiala pa tudi od njegove tehnološke preteklosti in pogojev preoblikovanja. Pri modelnih preizkusih, kakršni so npr. preizkus po Erichsenu, Fukuiju, Olsenu [1], je rezultat odvisen še od oblike preizkušanca in njegovih površinskih lastnosti, od trenja in mazanja, pa tudi od drugih vplivov, medtem ko sta pri



Sl. 1. Vplivni faktorji pri preoblikovanju

hidravličnem preizkusu [6, 7] pomembni geometrija in velikost orodja za izbočenje. Ne glede na to, da snovne karakteristike same niso zadostno merilo za kakovostno oceno primernosti izhodnega materiala za nadaljnjo predelavo s preoblikovanjem, pa le posredujejo vrsto koristnih informacij, ki jih do nedavna nismo imeli na voljo [1].



Sl. 2. Vpliv relativne srednje vrednosti glavnih normalnih napetosti σ_m/k_f na kritično deformacijo pri preoblikovanju

Dokaj zanesljivo merilo za preoblikovalnost pločevine je kritična primerjalna deformacija ob raztrgu φ_{kr} , ki je odvisna od snovnih karakteristik in preoblikovalnih pogojev pa tudi od napetostnega stanja pri preoblikovanju. To se vidi v tem, da je najprej izčrpana na tistih mestih, kjer so napetostne razmere najbolj neugodne. Vpliv napetostnega stanja na kritično deformacijo prikazuje shematično slika 2 [8]. Z naraščanjem relativne srednje vrednosti glavnih normalnih napetosti σ_m/k_f , kjer je $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, se preoblikovalnost kovin slabša. Vendar preoblikovalnosti materiala največkrat niti ne moremo povsem izkoristiti. Za mejno stopnjo deformacije φ_m , ki jo lahko dosežemo pri določeni preoblikovalni operaciji, so namreč mimo splošnih preoblikovalnih lastnosti materiala odločilna pogosto druga merila npr. dopustna obremenitev zunaj preoblikovalne cone, stabilnost preoblikovancev, kakovost površine itd. [1]. Zato velja ob sicer enakih pogojih (material, temperatura, hitrost deformacije, napetostno stanje) odvisnost

$$\varphi_m < \varphi_{kr}$$

Pri preoblikovanju tanke pločevine srečujemo v glavnem tri vrste od velikosti deformacij odvisnih pojavov, zaradi katerih postane izdelek neuporaben:

a) drsne pasove (Lüdersove pasove) kot posledico dinamičnega deformacijskega staranja (Portevin Le Chatelierjev efekt),

b) pojav nestabilnosti npr. gubanja pločevine zaradi prevelikih tangencialnih tlačnih napetosti v prirobnici in

c) zlom zaradi lokalnih kontrakcij pri raztezanju.

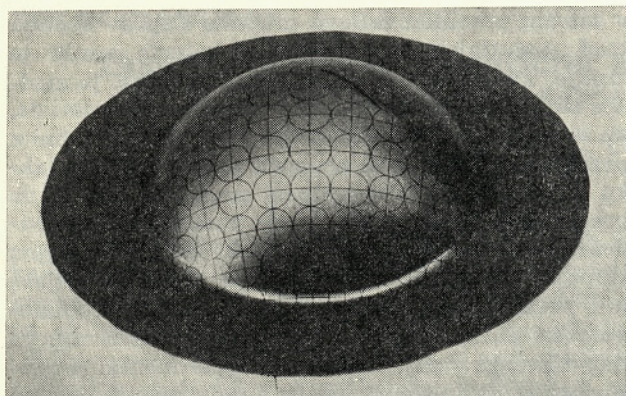
Medtem ko je prvi pojav pogojen z lastnostmi pločevinskega materiala, sta druga dva posledica določenih značilnosti ali nepravilnosti na orodju ali

v samem preoblikovalnem procesu. Čeprav obstaja med materialom in napakami, katerih vzrok je orodje, kvečjemu posredna vzročna zveza, je slednje treba upoštevati tudi pri preiskavah materiala, da bi se izognili napačnim sklepom in nepotrebnim preizkusom. Vzroki za neuspeh pri vlečenju so lahko v samem preoblikovalnem postopku, bodisi da preoblikovalnost materiala ne zadošča za predvideno deformacijo ali pa, da je že dosežena mejna stopnja deformacije pri vlečenju. Splošno veljavni preizkusni metod za ugotavljanje preoblikovalnosti ni, ker je le-ta odvisna od vsakokratnega napetostnega stanja. Uporaba eksperimentalno ugotovljenih vrednosti za kritično deformacijo postavlja zato pogoj, da so laboratorijski preizkusni pogoji prenosljivi na praktične preoblikovalne postopke. Čim bolj se napetostne in deformacijske razmere pri modelnih preiskavah ujemajo z onimi v proizvodnji, tem bolj zanesljiva je lahko napoved. Prenašanje pogojev trenja iz modela na dejansko orodje pa v nobenem primeru ni mogoče. Geometrično sicer lahko pomanjšamo dimenzije preoblikovancev, ne pa tudi debeline pločevine in njenih površinskih lastnosti.

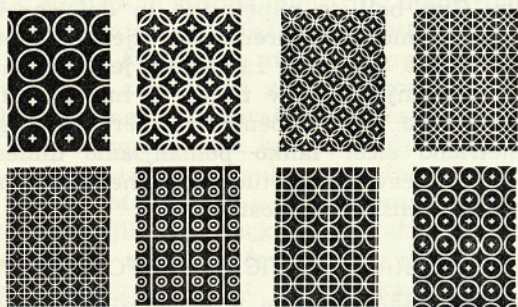
3. DIAGRAM KRITIČNIH DEFORMACIJ

S tehnološkega vidika je nezadostna preoblikovalnost materiala oziroma prekoračitev mejne deformacije na kritičnem mestu glavni faktor, ki omejuje stopnjo deformacije pri preoblikovanju. Pri vlečenju valjastih in velikih nepravilnih pločevinskih izdelkov, kakršne nahajamo zlasti v avtomobilski proizvodnji, je — za razliko od bolj preprostih geometrijskih oblik — težko določiti natančna merila za optimalno izkoriščanje preoblikovalnosti materiala. Napetosti in deformacije na takih izdelkih so lokalno zelo različne in omejene na povsem določena mesta izdelka. V odvisnosti od napetostnega stanja se lahko na izdelku pojavijo lokalne kontrakcije, podobno kakor pri enoosnem nateznem preizkusu, vendar prenese pločevina večsah tudi večje raztezke, ne da bi prišlo do lokalnih zožitev. Ker so razmere pri industrijskih preoblikovalnih procesih ponavadi precej drugačne, je opisovanje obnašanja materiala s karakteristikami nateznega preizkusa in simulacijskih metod pri takih izdelkih dokaj nezanesljivo.

V zadnjih letih se je uveljavil kakovostno nov pristop k teoretično preizkusnemu opisu deformacijskih stanj v kritični coni vlečencev. Pri tem opredeljujemo deformacijsko napetostne razmere pri preoblikovanju s tako imenovano grafometrično analizo plastičnih deformacij, iz katere je mogoče izpeljati tudi ustrezne kriterije za zanesljivo oceno preoblikovalnosti materiala. Kritične deformacije na posameznih mestih določamo iz deformacij koordinatne mreže (slika 3), ki jo pred preoblikovanjem nanesimo na ravno pločevino [1]. Razviti so različni postopki za nanašanje mreže npr. elektrokemično jedkanje, fotokemični postopek, ofsetni



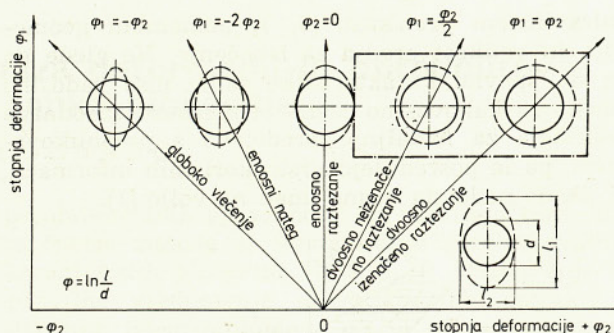
Sl. 3. Primer koordinatne mreže na rotacijski lupini, izdelani s hidravličnim izbočenjem



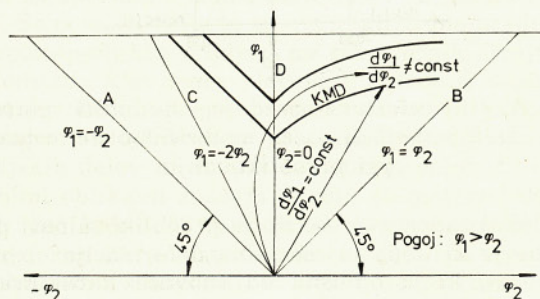
Sl. 4. Značilne oblike koordinatne merilne mreže

tisk [5, 9]. Grafometrična metoda temelji na predpostavki, da so največje deformacije ob pričetku lokalne kontrakcije pločevine odvisne samo od domnevnega ravninskega napetostnega stanja na kritičnem mestu. Kot osnovni geometrijski element koordinatne mreže je najprimernejši krog, pri čemer se krogi lahko med seboj dotikajo, ali pa se prekrivajo (slika 4). Med preoblikovanjem se ti krogi deformirajo v elipse, katerih glavne osi imajo smer glavnih deformacij. Spremembe oblike osnovnega elementa koordinatne mreže za vsa deformacijska stanja, ki so mogoča pri preoblikovanju pločevine, prikazuje slika 5.

V pravokotnem koordinatnem sistemu tega diagrama so prikazane logaritemske deformacije krožnega elementa pločevine v smeri glavnih osi deformacij, pri čemer je φ_1 vedno največja in pozitivna deformacija ($\varphi_1 > \varphi_2$). Premica pod kotom 45° v desnem delu diagrama je prvi mejni primer za deformacijsko stanje $\varphi_1 = \varphi_2$, kakršnega imamo pri izenačenem dvoosnem raztezanju, premica v levem delu diagrama pa drug mejni primer, ki velja za vlečenje v globino $\varphi_1 = -\varphi_2$. S takim prikazom deformacijskih stanj lahko nazorno predočimo razmere pri različnih načinih preoblikovanja in na tej osnovi tudi sklepamo o napovedih posameznih preizkusnih metod [10]. Če določimo na kritičnih mestih vlečenega izdelka glavni deformaciji φ_1 in φ_2 , lahko ocenimo, kako blizu sta meji preoblikovalnosti, pri kateri material odpove. Odgovor na to vprašanje pa je mogoče dobiti šele,



Sl. 5. Deformacije krožnega elementa koordinatne mreže pri različnih deformacijskih stanjih



Sl. 6. Krivulje mejnih (kritičnih) deformacij

če poznamo kritične vrednosti za deformacije pločevine ob pričetku lokalne kontrakcije oziroma ob porušitvi materiala.

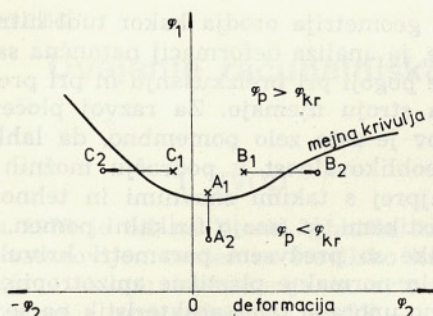
Na sliki 6 je prikazan diagram (Keeler-Goodwinov diagram), v katerem so vrisane krivulje kritičnih deformacij (FLC — *Forming Limit Curve*). Pri tem ustreza spodnja krivulja deformacijam, pri katerih je treba pričakovati lokalne kontrakcije, zgornja krivulja pa deformacijam pri raztrganju pločevine. Diagram mejnih deformacij, ki velja vedno le za določeno vrsto in debelino pločevine, ponazarja mejne stopnje deformacij, do kakršnih lahko v danih pogojih preoblikujemo pločevino. V območju med obema krivuljama se pločevina že lahko pretrga ali pa tudi ne, kar je odvisno od preoblikovalnih pogojev.

Na osnovi grafometrične analize največjih deformacij na najbolj kritičnih mestih izdelka, ki je bil izdelan npr. pri normalnih proizvodnih pogojih, lahko torej pridemo do kolikostnega podatka o stopnji izkoriščanja preoblikovalnosti materiala in ugotovimo, kolikšna je varnost, da material med preoblikovanjem ne bo odpovedal. V kritičnih primerih je treba torej spremeniti preoblikovalne pogoje (orodje, mazanje, kakovost površine, pritisk držala ipd.) ali pa izbrati drug material z višje ali nižje ležečimi mejami.

Kritičnim deformacijam na določenem mestu obdelovanca se lahko izognemo, če

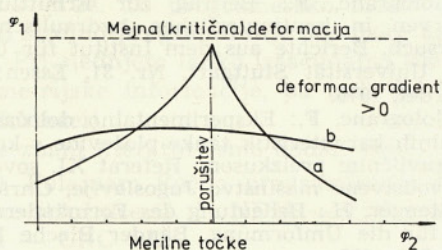
- zmanjšamo večjo deformacijo φ_1 ($A_1 \rightarrow A_2$),
- povečamo manjšo deformacijo φ_2 ($B_1 \rightarrow B_2$),
- zmanjšamo manjšo deformacijo φ_2 ($C_1 \rightarrow C_2$),

kakor prikazuje slika 7.



Sl. 7. Možnosti za korekturo deformacijskega stanja

S temi posegi izboljšamo namreč deformacijsko stanje pri preoblikovanju. Sprememba deformacijskega stanja na določenem mestu pa ima lahko tudi negativne posledice npr. poslabšanje razmer na drugem mestu. Vendar je s tem, da se je povečala varnost proti pretrganju ali lokalni kontrakciji, glavni cilj ponavadi dosežen. Z vidika dobre preoblikovalnosti seveda ni dovolj, da je ekstremna deformacija na kritičnem mestu čim manjša, potrebna je tudi čim bolj ugodna razporeditev deformacij v okolici tega mesta. Gradient krivulje razporeditve deformacij (slika 8) mora biti čim bolj blag, tj. razporeditev deformacij na površini vlečencea naj bo čim enakomernejša. Oster gradient pomeni, da je nova oblika nastala predvsem na račun močnih lokalnih deformacij.



Sl. 8. Diagram razporeditve deformacij na površini vlečencev pri vlečenju dveh različnih pločevin

Potrebni ukrepi za ustrezno spremembo deformacijskega stanja pri preoblikovanju so odvisni zlasti od preoblikovalnih karakteristik pločevine. Te karakteristike so predvsem parametri krivulje plastičnosti in plastične anizotropije [1, 5]. Pomemben kazalnik razteznosti pločevine je poleg relativne globine izbočine po Erichsenu ali pri hidravličnem izbočenju predvsem eksponent utrjevanja n . Ta eksponent, ki je pri mnogih pločevinskih materialih po vrednosti enak homogeni logaritemski deformaciji φ_M , je merilo za intenzivnost utrjevanja materiala pri preoblikovanju [11]. Določamo ga običajno iz enosnega nateznega ali hidrostatskega preizkusa [5, 6, 7]. Pri majhnih vrednostih eksponenta n se razteza pločevina predvsem lokalno, zato je nevarnost, da se bo kje pretrgala, večja kakor pri večjih vrednostih n . Eksponent utrjevanja vpliva hkrati tudi na enakomernost razpore-

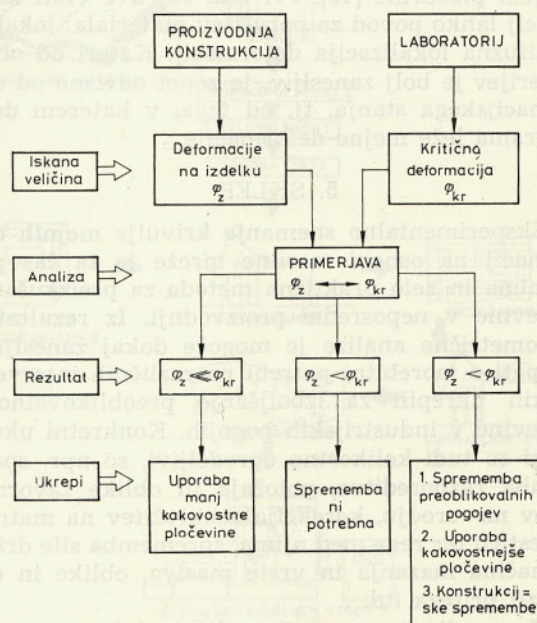
ditve plastičnih deformacij po površini preoblikovanja. Čim večji je, tem enakomernejša je razporeditev deformacij in tem manjši je deformacijski gradient. Pločevine z majhnimi vrednostmi n nagibajo k zelo neugodni razporeditvi deformacij, ki se osredotočijo na neko kritično mesto, kjer pride običajno tudi do porušitve.

Določen vpliv na kritično deformacijo pri preoblikovanju pločevine ima tudi normalna plastična anizotropija, ki karakterizira odpornost pločevine proti stanjšanju [12]. Koeficient normalne plastične anizotropije R je merilo za neenakost deformacij v smeri širine in debeline pri enosnem nateznem preizkusu [1, 5]. Čim večji je koeficient R , tem manjša je nevarnost, da bi se pločevina pri vlečenju stanjšala in na kritičnih mestih pretrgala. Večje vrednosti koeficienta R lahko zelo koristijo pri čistem globokem vleku, večje vrednosti eksponenta n pa pri čistem raztezanju [2].

4. UPORABA GRAFOMETRIČNE ANALIZE DEFORMACIJ

Praktično rabo grafometrične analize plastičnih deformacij shematično prikazuje slika 9. Ko enkrat ugotovimo dejanske deformacije na izdelku ter kritične deformacije, kakršne prenese enak material, lahko iz analize rezultatov povzamemo določene sklepe, po katerih ukrepamo v proizvodnji, pri nabavi materiala oziroma pri konstrukciji izdelka in orodja.

Z metodologijo ugotavljanja kritičnih deformacij pri preoblikovanju pločevine se ukvarjajo dandanes po vsem svetu, zlasti načrtno v okviru mednarodne raziskovalne skupine za globoko vlečenje (IDDRG). Tudi pri nas se kaže določena aktivnost na tem področju [5, 13, 14]. Dosedanje raziskave



Sl. 9. Blok shema grafometrične analize deformacij

so med drugim pokazale, da za ocenjevanje preoblikovalnosti ni dovolj, če poznamo le končne vrednosti kritičnih deformacij. Največje možne deformacije pri preoblikovanju so namreč odvisne tudi od tega, kako je bila deformacija dosežena, tj. od vrstnega reda in predznaka posameznih deformacij v določeni smeri in od gradienta deformacije. Če si sledijo med preoblikovanjem različna deformacijska stanja (npr. pri večstopenjskih operacijah), če torej razmerje $d\varphi_1/d\varphi_2$ med preoblikovanjem ni konstantno, dobimo drugačne mejne krivulje. V takem primeru je treba potek plastične deformacije določiti postopoma, to je za vsako fazo preoblikovanja posebej. V diagramu na sliki 6 sta vrisana dva različna primera, ki pa vodita do enakega končnega stanja. Nadaljnje raziskave bodo morale razjasniti vpliv deformacijske poti (poprejšnjih deformacij) in preoblikovalne hitrosti, ki sta ta čas še veliki neznanki pri preoblikovanju in preizkušanju pločevin [4, 6, 7].

Diagram kritičnih deformacij lahko ugotavljamo na različne načine. Preizkusne metode se med seboj razlikujejo predvsem po obliki preizkušancev in vrsti obremenitve pri preoblikovanju, vendar nobena izmed njih ne more sama ustrezati celotnemu področju možnih mejnih deformacij. Rezultati posameznih preizkusnih metod se tudi redko ujemajo. Vzrok za odstopanja so predvsem različni pogoji trenja in geometrije preizkušancev, napestostni gradienti, zarezni učinek ipd. Novejše raziskave pripisujejo vzroke za porušitev materiala pri preoblikovanju pločevine tudi poroznosti materiala, ki je funkcija deformacijske poti in velikosti deformacije. Teoretična osnova za to domnevo sta diagram kritičnih deformacij in analitična opredelitev kontrakcij, ki se pojavljajo med preoblikovanjem pločevine [15]. Pri tem sta dve vrsti kontrakcij lahko povod za porušitev materiala: lokalna in difuzna lokalizacija deformacij. Kateri od obeh kriterijev je bolj zanesljiv, je zopet odvisno od deformacijskega stanja, tj. od tega, v katerem delu diagrama leže mejne deformacije.

5. SKLEP

Eksperimentalno snemanje krivulje mejnih deformacij na osnovi merilne mreže je ta čas pomembna in zelo praktična metoda za preizkušanje pločevine v neposredni proizvodnji. Iz rezultatov grafometrične analize je mogoče dokaj zanesljivo sklepati o morebitni potrebi po različnih intervencijskih ukrepih za izboljšanje preoblikovalnosti pločevine v industrijskih pogojih. Konkretni ukrepi, ki so tudi kolikostno opredeljivi, so npr. sprememba razporeditve, položaja in oblike zavornih robov na orodju, korekcija zaokrožitev na matrici in pestiču ter rege med njima, sprememba sile držala, načina mazanja in vrste maziva, oblike in dimenzij prireza itd.

Ker vplivajo na razporeditev deformacij ter lego in obliko krivulje mejnih deformacij zlasti

trenje in geometrija orodja kakor tudi hitrost deformacije, je analiza deformacij natančna samo tedaj, če se pogoji pri preizkušanju in pri preoblikovanju na stroju ujemajo. Za razvoj pločevinskih materialov je zato zelo pomembno, da lahko ocenimo preoblikovalnost v področju možnih deformacij najprej s takimi snovnimi in tehnološkimi karakteristikami, ki imajo fizikalni pomen. Te karakteristike so predvsem parametri krivulje plastičnosti in normalne plastične anizotropije. Pogoj za uspešno uporabo teh karakteristik pa je, da jih znamo povezati z diagramom mejnih deformacij in razporeditve deformacij na preoblikovancih.

LITERATURA

- [1] Gologranc, F.: O pomenu snovnih in tehnoloških karakteristik pri hladnem preoblikovanju tanke pločevine. Stroj. vest. 19 (1973), s. 5—12.
- [2] Keeler, S. P.: Properties related to forming. Sheet Metal Ind., 54 (1977), s. 511—517.
- [3] Hašek, V.: Über den Formänderungs- und Spannungszustand beim Ziehen von grossen unregelmässigen Blechteilen. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr. 25, Essen: Verlag W. Girardet, 1973.
- [4] Devedžić, B.: Tekući tehnološki problemi i perspektive daljeg razvoja u oblasti obrade metala deformisanjem. Uvodni referat, XI. sovetovanje za proizvodstveno mašinstvo Jugoslavije, Ohrid, 1977.
- [5] Gologranc, F.: Ugotavljanje preoblikovalnih karakteristik pri tanki pločevini. Stroj. vest. 20 (1974), s. 9—19.
- [6] Gologranc, F.: Beitrag zur Ermittlung von Fließkurven in kontinuierlichen hydraulischen Tiefungsversuch. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr. 31, Essen: Verlag W. Girardet, 1975.
- [7] Gologranc, F.: Eksperimentalno določanje preoblikovalnih karakteristik tanke pločevine s kontinuirnim hidravličnim preizkusom. Referat XI. sovetovanje za proizvodstveno mašinstvo Jugoslavije, Ohrid, 1977.
- [8] Stenger, H.: Bedeutung des Formänderungsvermögens für die Umformung. Bänder Bleche Rohre, 8 (1967), s. 599—605.
- [9] Keeler, S. P.: Circular grid system — a valuable aid for evaluating sheet metal formability. Sheet Metal Ind. 45 (1968), s. 633—641.
- [10] Keeler, S. P.: Predicting Forming Limits. Sheet Metal Ind. 48 (1971), s. 589—618.
- [11] Gologranc, F.: Opredelitev krivulje plastičnosti pri izotropnem utrjevanju kovin. Stroj. vest. 19 (1973), s. 71.
- [12] Gologranc, F.: Analitična interpretacija krivulje plastičnosti ter vpliv plastične anizotropije. Stroj. vest. 19 (1973), s. 121—124.
- [13] Devedžić, B., Stefanović, M.: Primer teorijsko-eksperimentalne analize deformacionog stanja i stepena tehnološke kritičnosti dela koji se izvlače. XIII. Savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Banja Luka, 1979.
- [14] Gologranc, F., Pipan, J.: Identifikacija preoblikovalnosti tanke pločevine — 1. del (poročilo o raziskovalni nalogi), Ljubljana, 1977 in 2. del (raziskava v teku).
- [15] Larsen, B.: Formability of Sheet Metal. Sheet Et. Ind. 54 (1977), s. 971—977.