UDK 621.98.01:669—415

O pomenu snovnih in tehnoloških karakteristik pri hladnem preoblikovanju tanke pločevine

FRANC GOLOGRANC

Uvod

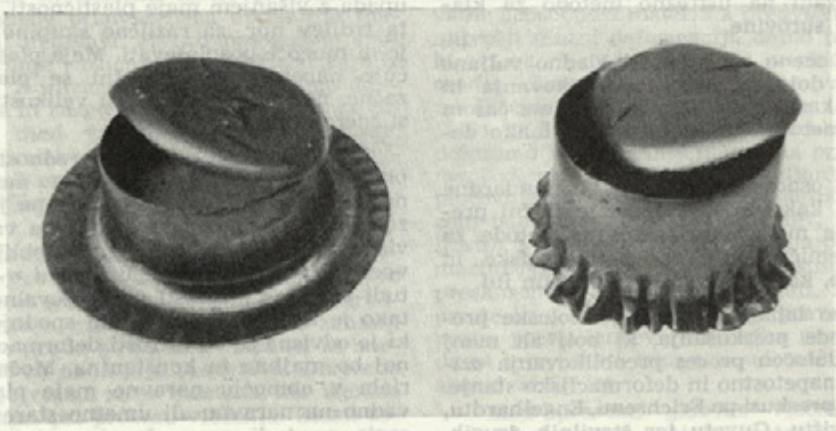
Pri izdelavi in predelovanju hladno valjane tanke pločevine se srečujemo s številnimi vplivnimi veličinami, ki odločajo ne le o poteku preoblikovalnega procesa, temveč tudi o kvaliteti in natančnosti končnih izdelkov, o obremenitvi in obstojnosti preoblikovalnih orodij, o pravilnem izkoriščanju preoblikovalnih strojev itd. Zelo pomembno vlogo pri tem imajo njene snovne in tehnološke karakteristike, ki jo usposabljajo za določen način preoblikovanja. Zlasti plastičnost oziroma preoblikovalnost ter preoblikovalna trdnost odločilno vplivata na potek preoblikovalnega procesa.

Če preoblikujemo kovine v hladnem, se v splošnem utrjujejo, zaradi česar v njih narašča odpor proti plastični deformaciji oziroma napetost, ki je potrebna za ohranitev plastičnega stanja. Ta pojav, ki je posledica kristalne strukture kovin ter množice mrežnih defektov, je velikega pomena za preoblikovanje. Spremembo resničnih napetosti v materialu med preoblikovanjem ponazarjamo s krivuljo plastičnosti, ki podaja za določen material in preoblikovalne pogoje zvezo med plastično napetostjo (preoblikovalno trdnostjo) in ustrezno efektivno deformacijo. Te krivulje so izhodna informacija za analitično obravnavanje preoblikovalnih postopkov. Po njih je mogoče sklepati ne samo o obremenitvah, kakršnim so izpostavljena orodja in stroji, ampak tudi o trdnostnih lastnostih materialov po preoblikovanju.

Pomembna tehnološka značilnica je preoblikovalnost, ki odloča o največji možni plastični deformaciji, to je o mejni stopnji deformacije, do kakršne je še mogoče preoblikovati material v danih pogojih, ne da bi razpokal ali se porušil (slika 1). Ta največja možna deformacija je odvisna od kemične sestave materiala ter njegove tehnološke preteklosti, zlasti pa od pogojev, v katerih ga preoblikujemo, tj. od temperature in preoblikovalne hitrosti. Pomemben vpliv nanjo ima tudi napetostno stanje, ki izhaja iz vrste in značilnosti preoblikovalnega procesa ter geometrije izdelka. Preoblikovalnost je povsem izčrpana, ko prekoračijo tangencialne napetosti v vseh možnih drsnih ravninah kritično strižno napetost ali, če dosežejo natezne napetosti v preoblikovalni coni zlomno trdnost materiala. Praktično seveda tolikšne deformacije pri večini preoblikovalnih postopkov niso dopustne, izjema je rezanje ali striženje materiala. Deformabilnosti torej v realnih pogojih sploh ni mogoče povsem izkoristiti. Za mejno stopnjo deformacije, ki jo lahko dosežemo v eni operaciji, so namreč mimo splošnih preoblikovalnih lastnosti materiala pogosto odločilne povsem druge okoliščine, npr. dopustna obremenitev materiala zunaj preoblikovalne cone (napetost v steni izdelka pri vlečenju), stabilnost preoblikovancev (gubanje pločevine pri globokem vlečenju, slika 2), lokalne kontrakcije pri raztezanju, dopustna hrapavost površin ter druge omejitve, kakršne lahko narekujejo konstrukcijska izvedba, dopustna obremenitev ter natančnost orodij in preoblikovalnega stroja. Slednjič je lahko zelo pomembno, ali je obremenitev statična, dinamična ali celo pulzirajoča. Vse te vplivne veličine in možnosti za kvalitativno ocenjevanje preoblikovalnih sposobnosti kovin se ta čas zelo intenzivno raziskujejo, saj je njihovo poznavanje nadvse pomembno za vse vnaprejšnje napovedi o izdelavi poljubnega predmeta s preoblikovanjem.

Preskusne metode, ki rabijo za ugotavljanje preoblikovalnih sposobnosti kovin, imajo velik praktični pomen pri določanju najustreznejše vrste obremenitve, pravilne oblike orodij in optimalnih preoblikovalnih pogojev pri posameznih postopkih. Hkrati pa omogočajo vnaprejšnje izločanje neprimernih surovin oziroma polizdelkov iz proizvodnje ter dopuščajo uporabo manj kvalitetnih in cenejših materialov, katerih preoblikovalnost ravno še zadošča pogojem za nadaljnjo predelavo. Problem optimalne izbire kovinskih materialov, ki prihajajo v poštev za plastično preoblikovanje je ta, da je treba njihove lastnosti prilagoditi vsakokratnemu preoblikovalnemu procesu. Potemtakem ni mogoče podati nekih splošno veljavnih značilnic, s katerimi bi lahko ocenjevali sposobnost kovin za hladno preoblikovanje. Prav postopki preoblikovanja pločevine kažejo povsem specifične obremenitve, katerim mora ustrezati izbrani material, če hočemo preprečiti njegovo predčasno onesposobitev ali porušitev.

Z naraščanjem pomembnosti, ki jo imajo postopki preoblikovanja pločevine za sodobno množinsko proizvodnjo, se je večala tudi potreba po ustreznih preskusnih metodah za ugotavljanje in ocenjevanje preoblikovalnih sposobnosti. Zato je razumljivo, da je ta problem, vzporedno s temeljnimi raziskavami preobli-



Sl. 1. *Porušitev dna pri globokem vleku okrogle posode*

Sl. 2. *Gubanje pločevine zaradi pojava nestabilnosti*

kovalnih procesov samih, že dolgo predmet intenzivnega raziskovanja, kar vse se kaže tudi v novejši literaturi [1, 2, 3]. Kljub nenehno naraščajoči potrošnji tanke pločevine in trakov pa doslej ni standardiziran noben postopek, s katerim bi bilo mogoče npr. enolično določati njihove preoblikovalne sposobnosti. Znane so nevšečnosti in težave, ki jih imajo zato uporabniki jeklene in neželezne pločevine. Zaradi tega tečejo skoraj v vseh industrijsko razvitih deželah obsežne raziskave, ki naj bi osvetlile vpliv vseh tistih parametrov, ki so bistveni za preoblikovalnost. V novejšem času stopata v ospredje zlasti problem utrjanja kovin pri različnih pogojih hladnega preoblikovanja in ugotavljanje krivulje plastičnosti. Vendar je bila osnova za uspešno raziskovalno delo ustvarjena šele, ko so spoznali pomen plastične anizotropije za preoblikovalnost kovin, ki je najbolj izrazita in zapletena ravno pri pločevinah. Čeprav se mnenja raziskovalcev v marsičem še razhajajo, bo najnovejša spoznanja o vplivu teh karakteristik v prihodnje neogibno treba upoštevati tudi pri izdelavi ter pogojih za dobavo in prevzem hladno valjane pločevine in trakov, ki terjata enotne kriterije za primerjavo različnih kvalitet pločevine, ne glede na postopke predelave. Zlasti predelovalci pločevine različnih vrst in izvorov so navezani na ustrezno metodo za klasifikacijo te izhodne surovine.

Za vnaprejšnjo oceno uporabnosti hladno valjane tanke pločevine za določen način preoblikovanja in ugotavljanje njenih karakteristik so se razvile s časom številne preskusne metode, ki jih po bistvu lahko delimo na dve skupini.

V prvo spadajo osnovne raziskave, tj. standardne metode preskušanja, kakršne so natezni in tlačni preskus za ugotavljanje mehanskih lastnosti, metode za merjenje trdote, kemična analiza, metalografske in rentgenske preiskave, kontrola kvalitete površin itd.

V drugo skupino lahko uvrstimo tehnološke preskuse, tj. take metode preskušanja, ki bolj ali manj uspešno simulirajo določen proces preoblikovanja oziroma temu ustrezno napetostno in deformacijsko stanje. Mednje sodijo zlasti preskusi po Erichsenu, Engelhardtu, Olsenu, Fukuiju, Swiftu, Guyotu ter številnih drugih, ki omogočajo kvalitativno ocenjevanje vlečnih sposobnosti pločevin in trakov le, če deformacijska shema pri preskusu ustreza dejanskim razmeram pri preoblikovanju. Specifične lastnosti, pomen in uporabnost najvažnejših tehnoloških preskusov in njihovo medsebojno povezanost so obravnavali že mnogi avtorji [4, 5].

1. Mehansko-fizikalne lastnosti pločevin

Preoblikovalnost pločevin je v določeni meri odvisna od njenih mehanskih lastnosti. V praksi pravimo, da se preoblikuje kovina dobro ali slabo ter lahko ali težko, kar pa je zelo subjektivna ocena za njeno preoblikovalnost. Praviloma se opirajo take ocene na vrednosti za mehanske lastnosti, ki jih določamo z nateznim ali ustreznim drugačnim preskusom. Raznovrstne oblike obdelovancev in načini preoblikovanja pločevine pa lahko terjajo različne lastnosti materiala. Mnoge preoblikovalne operacije se pričnejo z raztezanjem, druge z istočasnim raztezanjem in krčenjem materiala. Koristno je torej vedeti, katere lastnosti vplivajo bolj na prvi oziroma drugi proces plastične deformacije. Le tako lahko material natančneje opredelimo po njegovih sposobnostih.

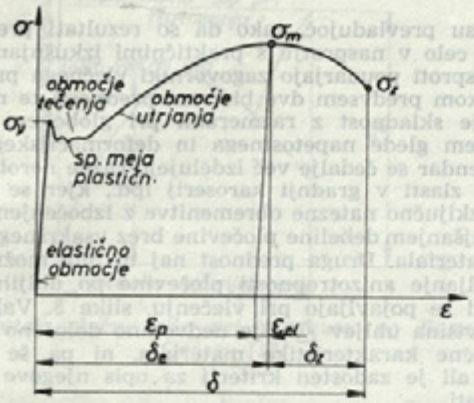
Ta čas veljavni standardi za tanke pločevine vsebujejo predvsem določila o naslednjih lastnostih materiala:

kemična sestava		
meja plastičnosti	σ_v	(kp/mm²)
natezna trdnost	σ_m	(kp/mm²)
maksimalni raztezek (po diagr.)	δ	(%), $L = 80/20$
trdota	HB, HV	(kp/mm²)
vlečna sposobnost	IE	(mm)
upogibna sposobnost	D/d	($\alpha = 180°$)
kvaliteta površine		

Pregled standardnih lastnosti za najnavadnejše vrste jeklenih pločevin in trakov za hladno preoblikovanje dajejo npr. JUS C.B4.016—017, DIN 1623, GOST 1050-60 in drugi. Novi evropski stardard (EURONORM 32-66) pa že predpisuje tudi dodatna dobavna določila npr. glede pridobivanja, načina in pogojev valjanja (konvencionalno ali kontinuirno), glede obstojnosti mehanskih lastnosti ipd., ki so za nadaljnjo predelavo in preoblikovalnost zelo pomembna.

Meja plastičnosti σ_v je merilo za začetno plastično napetost materiala, ki je skupno s trenjem in drugimi odpori pri preoblikovanju odločilna samo glede minimalne preoblikovalne sile in deformacijskega dela. Splošno izkustveno pravilo je, da preoblikovalnost upada z višanjem meje plastičnosti. Čeprav lahko velja ta trditev npr. za različne skupine različnih jekel, pa je ni mogoče posploševati. Meja plastičnosti samo označuje napetost, pri kakršni se plastična deformacija začne, ne more pa označiti velikosti deformacij v plastičnem območju.

V standardih določene vrednosti za σ_v se nanašajo pri materialih z izrazito naravno mejo plastičnosti vedno na njeno zgornjo mejo, kjer pa je napetostno stanje zelo labilno, tako da so ustrezne vrednosti močno odvisne od preskusnih pogojev, oblike epruvet, načina vpenjanja itd. Navadni diagrami $\sigma - \varepsilon$ skrivajo v sebi tudi togostne lastnosti preskuševalnega stroja [6]. Prav tako je težavno določiti tudi spodnjo mejo plastičnosti, ki je odvisna še od hitrosti deformacije, za katero velja, naj bo majhna in konstantna. Močno raztezanje materiala v območju naravne meje plastičnosti kaže navadno na naravno ali umetno staranje materiala, opozarja pa tudi na možnost nastajanja deformacijskih (drsnih) črt (lis), ki so pri pločevinah vedno nezaželene.



Sl. 3. *σ — ε diagram za mehko jeklo (nepomirjeno)*

Natezna trdnost σ_m je načelno fiktivna napetost, ki nima pravega fizikalnega pomena. Računana je glede na začetni prerez, ki pa se med preoblikovanjem zmanjšuje. Z vidika trdnosti izdelkov je potrebna včasih neka minimalna natezna trdnost pločevine ali traku, ki pa zaradi boljše preoblikovalnosti tudi ne sme preseči določene zgornje meje. Ugodno je, če je razpon med mejo plastičnosti in natezno trdnostjo tj. med začetkom tečenja in začetkom lokalnega zoževanja čim večji, tj. razmerje σ_r/σ_m čim manjše.

Tudi totalna deformacija δ je uporabna le za grobo oceno preoblikovalnosti v hladnem. Sestavljena je iz homogenega dela δ_e in nehomogenega dela δ_r, od katerih pa je za preoblikovanje zanimiv samo prvi del, to je območje enakomernih raztezkov, ki je hkrati merilo za žilavost materiala, slika 3. Vrednost δ je odvisna tudi od merilne dolžine. Korelacija med totalno deformacijo in preoblikovalnostjo je v splošnem slaba.

Po različnih metodah ugotovljene vrednosti za trdoto ne dajejo nobenih zanesljivih podatkov o primernosti pločevine ali trakov za hladno preoblikovanje. Le posredno lahko rabijo za primerjavo med posameznimi vrstami materialov.

Tudi rezultati upogibnih in torzijskih preskusov so uporabni samo v posebnih primerih. Z udarno upogibnim preskusom v paket zloženih poskusnih vzorcev lahko ugotavljamo predvsem potek staranja materiala v odvisnosti od temperature, tako da je ta postopek omejen predvsem na preskušanje toplo valjanih materialov.

Preiskave strukture (zrnine) pločevin in trakov, morebiti tudi materiala pred valjanjem, lahko dajejo pri zadostnem številu in smotrni izbiri preskušancev dragocene podatke glede predvidenega obnašanja materiala pri nadaljnji predelavi. Hkrati omogočajo spoznavanje in razločevanje različnih napak, ki izvirajo iz poprejšnje obdelave. Z ultra zvokom ugotavljamo dandanes razne vključke in razpoke v pločevini in trakovih že kontinuirno, tj. med valjanjem. Tudi kemijske, teksturne in druge preiskave, ki se v glavnem opravljajo pri proizvajalcih pločevine, rabijo posredno za ocenjevanje in klasifikacijo preoblikovalnih sposobnosti materiala.

Pomembno vlogo za nadaljnjo predelavo imajo površinske lastnosti pločevine, ki se med preoblikovalnim procesom lahko močno spremenijo. V standardih predvideni predpisi zadevajo predvsem podobo in zunanji videz ter izključujejo grobe površinske napake, ki onesposabljajo pločevino za nadaljnjo predelavo. Določena hrapavost površine je včasih sicer zaželena, ker ugodno vpliva na mazanje npr. pri procesu vlečenja. Zlasti sodobni avtomatizirani preoblikovalni postopki terjajo pločevino in trakove z ustreznimi in čim enakomernejšimi površinskimi lastnostmi. Makroskopski efekti na površini, ki jih zaznavamo s prostim očesom, pa niso zadosten kriterij za kvalitativno oceno izhodnega materiala glede na primernost za nadaljnjo predelavo s preoblikovanjem.

Rezultati številnih raziskav v zadnjih letih [7, 8, 9] kažejo, da standardne vrednosti za mehanske in druge lastnosti same navadno ne zadoščajo za klasifikacijo pločevine in trakov glede njihove preoblikovalnosti v hladnem. Dobljene vrednosti so največkrat odvisne od primernosti izbranih metod ter od možnosti za ocenjevanje dejanske povezave med njimi in lastnostmi materiala. Mnoge pločevine za vlečenje z enakimi ali enakovrednimi mehanskimi lastnostmi se obnašajo pri preoblikovanju različno, kar se kaže tudi na samih izdelkih [10]. Za ustaljeno in nemoteno proizvodnjo pa je neogibno potrebna nedvoumna in hitra opredeljivost izdelkov glede preoblikovalnih sposobnosti, ne glede na izvor pločevine, iz katere so izdelani. To je še posebno pomembno pri nas, kjer uvažamo pločevino iz raznih evropskih in izvenevropskih dežel ter dostikrat menjavamo dobavitelje, ne da bi kupec mogel izbirati kvaliteto in jo prilagajati potrebam svojih izdelkov.

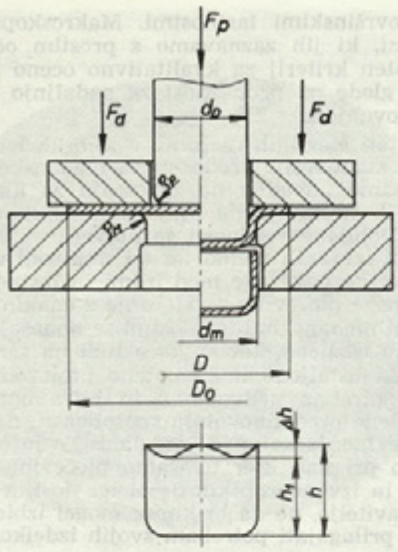
2. Preoblikovalne karakteristike

Hladno preoblikovanje pločevine v votla telesa in lupinaste oblike sestavljajo navadno zelo kompleksni procesi preoblikovanja, pri katerih povzroča zunanja obremenitev dve značilni, v glavnem ravninski napetostni stanji: čisti dvoosni nateg, kakršnega srečujemo pri različnih postopkih vlečnega oblikovanja (raztezanje) ter kombinacijo natega in tlaka, ki je značilna za proces globokega vlečenja, pri katerem pa je tlačno-nateznim deformacijam superponirano še upogibanje vzdolž zakrivljene upogibne linije. Pri mnogih izdelkih se pojavljata obe napetostni in deformacijski stanji hkrati, kar še posebej otežuje vnaprejšnjo oceno obnašanja materiala pri preoblikovanju.

Tudi pri mehanskih in tehnoloških postopkih preskušanja ustrezajo razmere deloma prvemu, deloma drugemum napetostnemu stanju oziroma njuni kombinaciji. Tako simulirajo nekateri tehnološki preskusi (npr. Erichsenov preskus s sferičnim in eliptičnim pestičem, hidrostatični preskus, KWI-preskus razširjanja lukenj) čisto natezno oblikovanje, torej v glavnem samo dvoosno napetostno stanje, pri katerem se povečuje površina vlečenca, zmanjšuje pa debelina pločevine. Tabela I prikazuje razdelitev najpomembnejših preskusov za določanje vlečnih sposobnosti [11].

Najbolj znan in največ uporabljen je tako imenovani Erichsenov postopek (tudi z imeni Guillery, Avery, Amsler in Olsen), pri katerem je kriterij za preoblikovalno sposobnost materiala predvsem vlečna globina pri največji možni deformaciji, delno pa tudi velikost zrn, ki vpliva na videz površine in obliko razpoke. Oblika orodja, dimenzije ter preskusne vrednosti za preskus po Erichsenu so standardizirane (JUS C.A4.021, DIN 50101 in 50702). Očitno je, da lahko s tem preskusom določamo le obnašanje materiala pri čisti natezni obremenitvi, medtem ko za ugotavljanje globoke vlečnosti pločevine ni primeren, ker manjka v preoblikovalni coni istočasna tlačna obremenitev, ki povzroča pri valjastih vlečencih največjo in najpomembnejšo deformacijo [4]. Tudi anizotropnih lastnosti materiala s tem preskusom ni mogoče ugotavljati. Le razmeroma preproste in cenene preskusne naprave ter enostavna priprava preskušancev in izvedba preskusa so omogočile, da se je v praksi tako zelo udomačil in obdržal veljavo skoraj že 60 let.

Med pravimi globoko vlečnimi preskusi velja omeniti predvsem metodo vlečenja lončka po SWIFTu [12], ki po naravi napetostnega in deformacijskega sta-



Sl. 4. *Vlečni preskus po SWIFTu [12]*

nja povsem ustreza globokemu vleku valjastih votlih teles. Osnova za meritve in primerjavo je maksimalni možni premer rondele $D_{o\,max}$, ki jo še lahko uspešno povlečemo skozi vlečno matrico s pestičem določene oblike in velikosti, slika 4.

Mejno vlečno razmerje $\beta_{max} = D_{o\,max}/d$, ki je kriterij za vlečno sposobnost pri tem preskusu, je odvisno od materiala, debeline pločevine, oblike prireza oziroma vlečenca, mazanja ipd. Praktične vrednosti za β_{max} so med 1,65 . . . 2,2, medtem ko je pri laboratorijskih preskusih mogoče doseči še ugodnejša razmerja. Natančnih vrednosti za β_{max} ni mogoče določiti z enim samim preskusom, vendar se dajo ugotoviti že z majhnim številom preskušancev, če vzamemo domnevno linearno odvisnost med vlečno silo F_v in vlečnim razmerjem β. Ker so dimenzije preskusnega orodja navadno manjše od dimenzij samega vlečnega orodja, medtem ko je debelina pločevine enaka, so pri takem modelnem preskusu dosežena vlečna razmerja zaradi manjšega razmerja d_o/s_o, ugodnejša kakor pri praktičnem preoblikovanju. Razlog za to je v različnem vplivu trenja, ki je odvisen od porazdelitve ploščinskega pritiska po drsni ploskvi in poti. Nasploh je vpliv trenja pri tem preskusu prevladujoč, tako da so rezultati preskusov včasih celo v nasprotju s praktičnimi izkušnjami. Temu nasproti poudarjajo zagovorniki vlečnega preskusa z lončkom predvsem dve bistveni prednosti te metode. Prva je skladnost z razmerami pri globokem vleku, predvsem glede napetostnega in deformacijskega stanja. Vendar se čedalje več izdelujejo razne nerotacijske oblike, zlasti v gradnji karoserij ipd., kjer se pojavljajo izključno natezne obremenitve z izbočenjem stene in stanjšanjem debeline pločevine brez vsakršnega krčenja materiala. Druga prednost naj bi bila možnost za ugotavljanje anizotropnosti pločevine po uhljih (škricih), ki se pojavljajo pri vlečenju, slika 5. Valovitost robu (višina uhljev $\triangle h$) je nedvomno določeno merilo za vlečne karakteristike materiala, ni pa še dovolj jasno, ali je zadosten kriterij za opis njegove anizotropnosti.

Pomanjkanje postopka, ki bi sam lahko zadovoljivo rešil problem kontrole kvalitete pločevine, je še pospešilo razvoj novih kombiniranih preskusnih metod. Pri tem velja omeniti metodo po Engelhardtu in Grossu [13], ki temelji na določanju tako imenovanega »vlečnega potenciala«

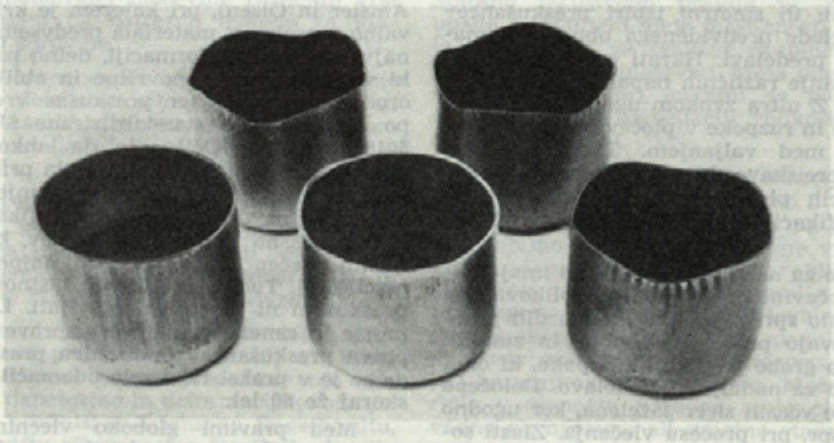
$$T = \frac{F_m - F_{v\,max}}{F_m} \quad [\%] \qquad (1.1)$$

kjer sta F_m = zrušilna sila za dno lončka,
$F_{v\,max}$ = maksimalna vlečna sila.

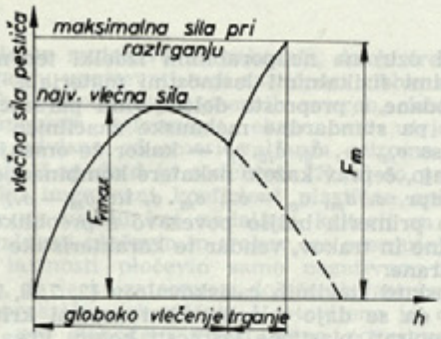
Z ravnim pestičem povlečemo rondelo v lonček do globine, pri kateri vlečna sila preseže maksimum $F_{v\,max}$, slika 6. Nato preostali del prirobnice trdno vpnemo med vlečno matrico in držalo ter vlečemo naprej. Ker je vlečni potencial močno odvisen od dimenzij orodja, zraka, vlečnega razmerja, pritiska držala in maziva, so pogoji preskušanja standardizirani (TGL 8715). Vrstni red kvalitete kaže za tanjše pločevine iste vrste boljše vlečne sposobnosti kakor za debelejše, kar pa nasprotuje izkušnjam iz prakse.

Pomanjkljivost tega postopka v primerjavi z vlečenjem lončka po Swiftu je, da z njim ni mogoče direktno oceniti mejnega vlečnega razmerja. V primerjavi z Erichsenovim preskusom pa je Engelhardt-Grossova metoda znatno boljša, njeni rezultati se vsaj kvalitativno ujemajo tudi s praktičnimi izkušnjami. Vrh tega zadošča že en sam preskus.

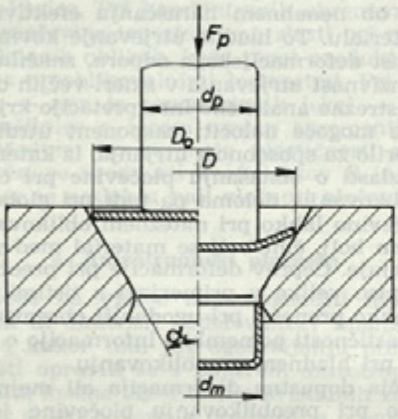
Med prave globoko vlečne postopke spada tudi Fukuijev test, pri katerem potiskamo pločevino z rav-



Sl. 5. *Vpliv anizotropnosti pločevine na višino vlečenca rotacijsko-simetrične oblike (D_o = konst)*

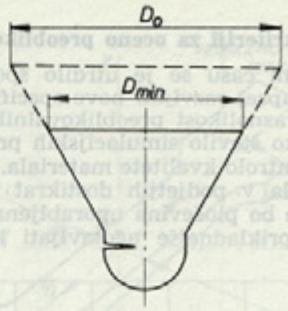


Sl. 6. *Potek vlečne sile pri preskusu po Engelhart-Grossu [13]*

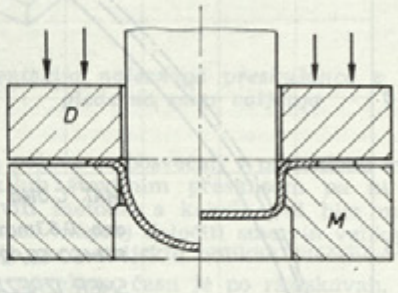


Sl. 7. *Preskus vlečnosti pločevine po FUKUIju z ravnim vlečnim pestičem*

nim pestičem skozi konično vlečno matrico s kotom $2\alpha = 60°$ brez pločevinskega držala, slika 7. Kriterij za vlečno sposobnost pločevine je lahko zopet mejno vlečno razmerje $\beta_o = D_o/d_p$, kjer je D_o največji začetni premer še uspešno potegnjene rondele, d_p pa je premer pestiča. Po drugi metodi rabi za oceno vlečne sposobnosti tako imenovano diametrično razmerje, tj. razmerje med premerom D_{min} ob porušitvi lončka ter začetnega premera D_o. Vendar kažejo novejše raziskave, da tudi



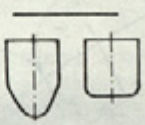
Sl. 8. *Preskus vlečnosti po FUKUIju s sferičnim vlečnim pestičem*



Sl. 9. *SWIFTov preskus vlečenja lončka s sferičnim ozir. ravnim pestičem*

diametrično razmerje ni zanesljiv kriterij za ocenjevanje vlečnih sposobnosti. Swift in Fukui sta predlagala tudi uporabo pestičev s polokroglim ali močno zaokroženim profilom, sliki 8 in 9, kjer pa je deformacijsko in napetostno stanje nekje med obema skrajnima a in e, tabela I.

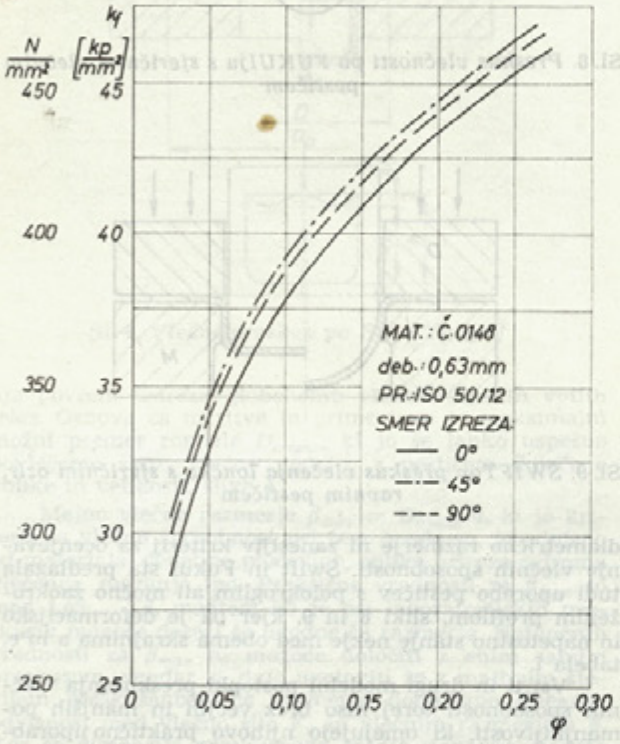
Vsi ti in drugi modelni postopki preskušanja vlečnih sposobnosti torej niso brez večjih in manjših pomanjkljivosti, ki omejujejo njihovo praktično uporabnost. Le redkokdaj je mogoče prenesti rezultate miniaturnih laboratorijskih preiskav na dejanske razmere pri preoblikovanju večjih oziroma velikih delov iz pločevine in trakov.

	a	b	c	d	e
	čisto raztezanje	kombinirani preskusni postopki			čisti globoki vlek
izrez oblika po preoblikovanju					
profil pestiča	pol-okrogel	polokrogel	eliptičen paraboličen cilindričen	pol-okrogel	raven z majhno zaokrožitvijo
kriterij	globina izbočitve	globina pri porušitvi	mejno vlečno razmerje	mejno vlečno razmerje	mejno vlečno razmerje
ime	Erichsen Olsen (trdno vpet)	Fukui konični preskus	modific. Swift	Swift Fukui	Swift Fukui

Tab. I. *Pregled nekaterih najpomembnejših preskusov za določanje vlečnih sposobnosti [11]*

3. Novi kriteriji za oceno preoblikovalnosti

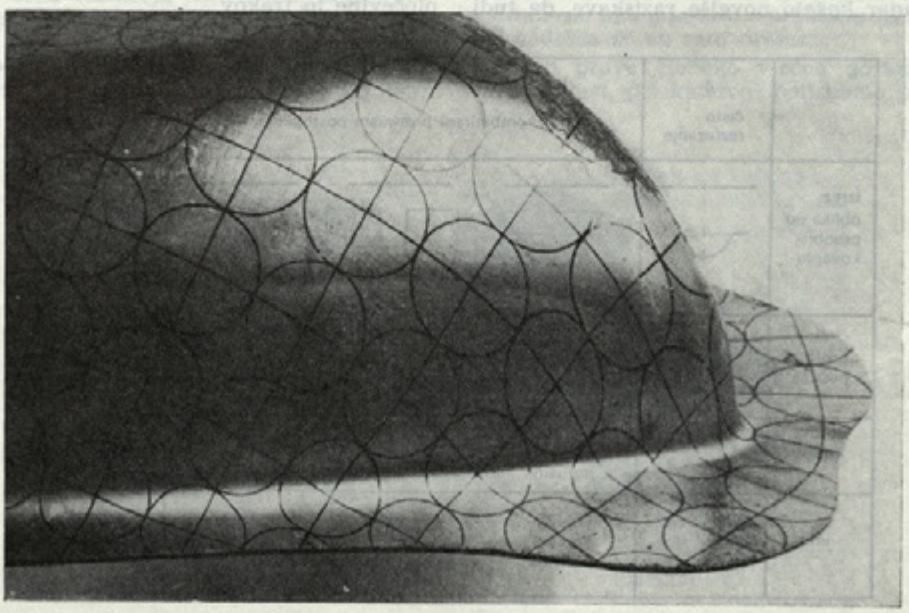
V novejšem času se je utrdilo spoznanje, da ni umestno kar naprej razvijati nove specifične preskusne metode, kajti raznolikost preoblikovalnih postopkov bi terjala preveliko število simulacijskih preskusov, to pa bi podražilo kontrolo kvalitete materiala. Povrh tega pa vhodna kontrola v podjetjih dostikrat niti ne ve, za kakšne namene bo pločevina uporabljena. Ugotovili so, da je mnogo prikladnejše ugotavljati korelacijo med slabimi oziroma neuporabnimi izdelki ter nekaterimi osnovnimi fizikalnimi lastnostmi materiala, ki naj bi bile podane s preprosto določljivimi parametri. Za ta namen pa standardne mehanske značilnice nateznega preskusa σ_m, σ_r, δ_5, δ_{10}, ψ — kakor že omenjeno — ne zadoščajo, čeprav kažejo nekatere kombinacije teh značilnic npr. σ_r/σ_m, $\sigma_m - \sigma_r$, $\sigma_m \cdot \sigma_r$ in $(\sigma_m - \sigma_r)/\delta$ v posameznih primerih boljšo povezavo s preoblikovalnostjo pločevine in trakov, vendar te karakteristike niso standardizirane.



Sl. 10. *Krivulja plastičnosti za pločevino Č.0148 (deb. 0,63 mm, ϑ = 20 °C, natezni preskus, φ = 0,01)*

Poskusi številnih raziskovalcev [2, 7, 8, 14] so pokazali, da se dajo z nekaterimi novimi kriteriji zelo dobro opisati plastične lastnosti kovin. Prva taka karakteristika je krivulja plastičnosti materiala, ki ima za določene preoblikovalne pogoje značilno obliko, slika 10. Kakor je znano, lahko plastično stanje v hladnem vzdržujemo le ob nenehnem naraščanju efektivnih napetosti v materialu. To hladno utrjevanje kovin spremlja stalen porast deformacijskega odpora, značilno zanj pa je, da intenzivnost utrjevanja v smeri večjih deformacij upada. Z ustrezno analitično interpretacijo krivulje plastičnosti je mogoče določiti eksponent utrditve n, ki pomeni merilo za sposobnost utrjanja, iz katerega lahko sklepamo zlasti o obnašanju pločevine pri čistem nateznem oblikovanju, deloma pa tudi pri globokem vlečenju. Pločevino lahko pri nateznem oblikovanju obremenimo tem bolj, čim bolj se material med preoblikovanjem utrjuje. Čeprav deformacije pri preoblikovanju pločevine niso velike v primerjavi s tistimi, ki bi jih material lahko prenesel pri ugodnejši obremenitvi, daje krivulja plastičnosti pomembno informacijo o njegovem obnašanju pri hladnem preoblikovanju.

Največja dopustna deformacija ali mejna stopnja deformacije pri preoblikovanju pločevine je odvisna predvsem od meje enakomernega raztezanja materiala, ki pomeni nadaljnjo realno veličino za ocenjevanje plastičnosti in preoblikovalnih sposobnosti. Zato posvečajo dandanes še posebno pozornost problemu preciznejšega določanja vrednosti enakomernega raztezka ter analizi lokalne porazdelitve plastičnih deformacij preoblikovancev z deformacijsko mrežo [15]. Iz deformacije krožnih elementov, narisanih na prirezu, je npr. mogoče določiti ne le velikost lokalnih deformacij, ampak tudi smeri in razmerja glavnih napetosti ter kritične deformacije v opazovanem območju, slika 11.



Sl. 11. *Lokalne deformacije krožnih elementov pri nerotacijski obliki vlečenca*

Dolgoletne raziskave so pokazale, da je treba pri preoblikovanju upoštevati tudi različnost mehanskih in tehnoloških lastnosti v posameznih smereh, zlasti plastičnih napetosti, deformacij, eksponenta utrjevanja idr., ki so odvisne od smeri valjanja oziroma smeri obremenitve. Lankford in sodelavci [7], ki so prvi definirali tako imenovani koeficient plastične anizotropije R ter ga uvedli kot nadaljnji kriterij za oceno preoblikovalnosti pločevin in trakov, ne ocenjujejo anizotropnih lastnosti pločevin samo negativno, temveč poudarjajo, da je anizotropnost določenih lastnosti mogoče tudi praktično izkoriščati. Ugotovljeno je, da obstaja npr. pri globokem vleku tesna povezava med koeficientom anizotropije in globoko vlečnostjo pločevine, medtem ko je pri čistem dvoosnem raztezanju eksponent utrditve, tj. intenzivnost utrjevanja prevladujoča značilnica. Pri kombiniranih obremenitvah, kakršnim je pločevina izpostavljena zlasti pri nesimetričnih in zapletenih oblikah, kaže zopet produkt Rn dobro korelacijo s preoblikovalnimi lastnostmi. Pri nekaterih pločevinah — npr. iz nepomirjenih jekel — se seveda tudi te značilnice s časom močno spremenijo, tj. poslabšajo. Medtem ko se meja plastičnosti zaradi staranja poveča, se vrednosti koeficientov R in n zmanjšajo, s čimer se poslabša tudi vlečnost pločevine.

4. Anizotropnost pločevin

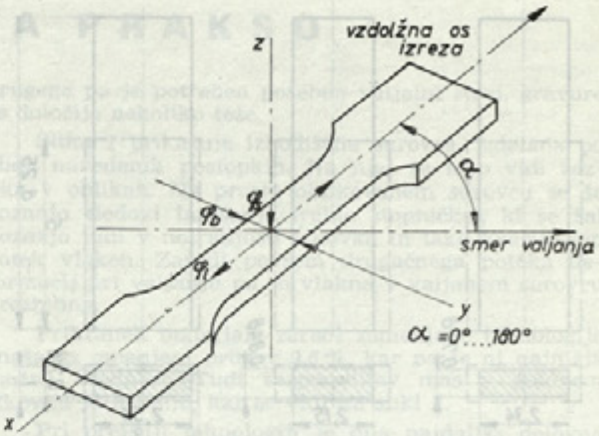
Ne glede na vplive nehomogenosti materiala in vplive oblik in dimenzij obdelovancev imamo pri preoblikovanju kakor tudi pri ugotavljanju preoblikovalnih lastnosti opraviti še s pojavom anizotropije materiala. Izrazito močne deformacije kristalnih zrn v smeri valjanja ter s tem povezana prednostna orientacija raznih nečistoč, izcej ipd., povzročajo tako imenovano geometrično ali mehansko anizotropnost hladno valjane pločevine. Povrh tega pa se pri preoblikovanju, zlasti pri hladnem valjanju ter naknadnem rekristalizacijskem žarjenju trakov, spreminja tudi kristalografska orientacija posameznih kristalnih zrn, ki povzroča večjo ali manjšo strukturno anizotropijo njihovih fizikalnih lastnosti. Kolikor močnejša je tekstura tj. izrazita istosmernost vseh kristalnih zrn večkristalne snovi, in kolikor manjša je stopnja simetrije kristalne rešetke, toliko bolj se razlikujejo tudi preoblikovalne karakteristike pločevine v posameznih prostorskih smereh. Razlike plastičnih lastnosti v smereh, v katerih deluje obremenitev, imajo lahko ugoden ali pa tudi zelo neugoden vpliv na celotno preoblikovalnost pločevine [16].

Neenakost mehanskih lastnosti v ravnini pločevine ali traku ugotavljamo z nateznimi vzorci, izrezanimi iz pločevine pod različnimi koti glede na smer valjanja. Največje razlike mehanskih lastnosti so navadno med koti 0°, 45° in 90°. Izražamo jo lahko v enotah trdnosti, meje plastičnosti, razteznosti ipd. Tako je

$$\triangle\sigma_v = \frac{\sigma_{v\,\alpha\beta} - \sigma_{v\,\beta 0}}{\sigma_{v\,\beta 0}} \cdot 100 = \frac{\triangle\sigma_v}{\sigma_{v\,\beta 0}} \cdot 100 \qquad (1.2)$$

kjer sta σ_v — meji plastičnosti pri 0° in 90°.

Z ravninsko anizotropijo plastičnih lastnosti pločevine je neposredno povezano nastajanje uhljev (škricev) na gornjem robu valjastih vlečencev (slika 5), ki so z vidika proizvodnje skrajno nezaželeni. Povrh tega da povzročajo lokalno stanjšanje stene, so čista izguba materiala, za njihovo odstranitev pa je potrebna dodatna tehnološka operacija — obrezovanje. Pojav sam je že dolgo znan, prav tako pa tudi ugotovitev, da vodijo določene teksture do neke čisto določene lege uhljev. Tako nastajajo uhlji pri kristalih s ploskovno centrirano kubično rešetko pod kotom 0° in 90° k smeri valjanja, če imajo kristalne osi orientacijo (100) [001] glede na ravnino pločevine in smer valjanja. Odpravljanju tega pojava so posvečali v preteklosti mnogo pozornosti, kljub številnim preskusom pa ni nikomur uspelo razviti metode, s kakršno bi bilo mogoče po znani teksturi vnaprej določiti smer in velikost uhljev pri različnih geometrijskih oblikah vlečencev.



Sl. 12. *Orientacija nateznega preskušanca v pločevini glede na smer valjanja*

Šele v novejšem času je po raziskavah, ki so jih opravili Hosford in Backofen ter drugi [17], uspelo z analizo napetostnega stanja priti do zadovoljivih razlag o anizotropiji pločevine in z njo povezanimi posledicami. Tako so ugotovili, da je pri oblikovanju nesimetričnih votlin teles iz pločevine ravninska anizotropija lahko celo dobrodošla in koristna, če izrezujemo surovce iz pločevine tako, da se mesta maksimalnih deformacij na vlečencu ujemajo s smerjo, v kateri nastajajo uhlji. Tako je mogoče znatno bolje izkoristiti preoblikovalnost materiala [18].

Za celotno vlečno sposobnost pločevine pa je še pomembnejša tako imenovana *normalna (ortogonalna) anizotropija*, ki je merilo za neenakost deformacij v ravnini pločevine v smeri njene debeline (normale). Ker pri tankih pločevinah ni mogoče izdelati preskušancev v smeri debeline, se ocenjuje normalna anizotropija posredno, tj. s koeficientom R, ki je definiran kot razmerje med dejansko deformacijo preskušanca v smeri širine in debeline pri nateznem preskusu

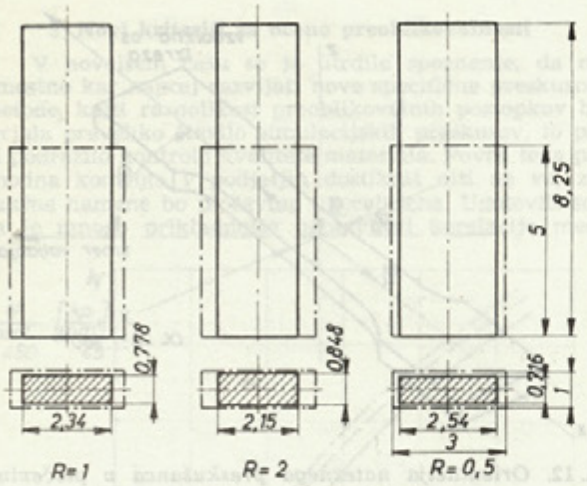
$$R = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \dfrac{b_o}{b_f}}{\ln \dfrac{s_o}{s_f}} \qquad (1.3)$$

kjer pomenijo

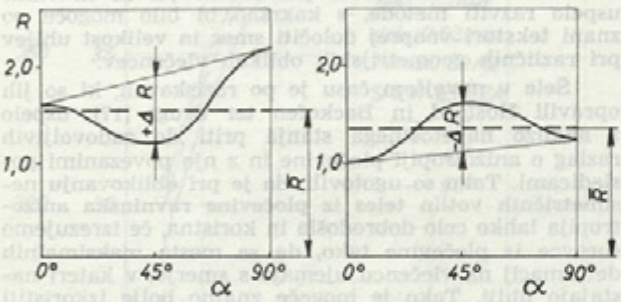
b_o in b_f — začetno in trenutno širino,
s_o in s_f — začetno in trenutno debelino preskušanca.

Vrednost koeficienta R iz gornje enačbe velja seveda samo za smer vzdolžne osi preskušanca, slika 12.

S koeficientom R izražamo torej odpornost pločevine proti stanjšanju pri preoblikovanju. Čim večji je R, tem manjša je nevarnost, da bi se pri vlečenju pločevine stanjšala in na kritičnih mestih pretrgala. Vrednosti $R < 1$ pomenijo, da se poskusni vzorec pri neovirani plastični deformaciji podaljšuje predvsem na račun debeline (φ_s), medtem ko se pri vrednostih $R > 1$ deformira bolj na račun širine (φ_b). Vrednost $R = 1$. obeležuje kvazi-izotropen material. Ker pomeni najmanjša vrednost za faktor R najšibkejšo smer v pločevini, ima prav ta karakteristika velik praktični pomen.



Sl. 13. *Vpliv koeficienta normalne anizotropije R na prečne deformacije preskušanca* ($\varphi_l = 0{,}5$)



Sl. 14. *Vpliv smeri izreza na koeficient normalne anizotropije*

saj neposredno zmanjšuje mejno stopnjo deformacije v tej smeri. Vpliv koeficienta normalne anizotropije na plastično deformacijo pločevine pri enaki dolžinski deformaciji ($\varphi_l = 0{,}5$) je prikazan s primerom na sliki 13.

S preskušanci, izrezanimi iz pločevine pod različnimi koti v smeri valjanja, je mogoče ugotavljati koeficiente normalne anizotropije za posamezne smeri, iz njih pa tudi stopnjo ravninske anizotropije

$$\triangle R = \frac{R_0 + R_{90}}{2} - R_{45} \tag{1.4}$$

ki pove, ali in kako močno se pločevina nagiba k uhljavosti. Uhlji se pojavljajo vedno v smeri z večjo normalno anizotropijo. Pri pozitivnem $\triangle R$ dobimo uhlje v smeri 0° in 90°, pri negativnem $\triangle R$ v smeri 45° k smeri valjanja, medtem ko uhljev ni, če je $\triangle R = 0$, slika 14.

Poprečje koeficientov R za različne smeri pločevine, ki je za vlečenje zelo pomembno, pomeni srednjo vrednost koeficienta normalne anizotropije

$$R = \tfrac{1}{4}\,(R_{0°} + R_{90°} + 2\,R_{45°}) \tag{1.5}$$

oziroma

$$R = \frac{R_0 + R_{90} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n} R}{2\,(n+1)} \tag{1.6}$$

kjer je n število smeri izreza (razen 0° in 90°).

Dobre preoblikovalne lastnosti ima pločevina s čim manjšo planarno anizotropijo ($\triangle R \to 0$) ter čim večjo srednjo vrednostjo normalne anizotropije R ($R \gg 1$). Pločevine, ki bi povsem izpolnjevala ta teoretični pogoj, pa ni mogoče izdelati, ker si posamezni vplivi deloma nasprotujejo. Lahko pa se proizvodni postopek usmerja tako, da dobi pločevina čim ugodnejšo kristalografsko strukturo, na katero vplivajo predvsem tehnološki pogoji izdelave, tj. končna temperatura pri toplem valjanju, hitrost pri hladnem valjanju ter pogoji žarjenja, hlajenja in navijanja.

Glede na to, da je razmerje med efektivnimi deformacijami, ki je podano z enačbo 1.3, odvisno od kristalne zgradbe kovine oziroma od določene orientacije kristalnih zrn, je koeficient normalne anizotropije v bistvu snovna karakteristika, ki sama tudi ne more biti zadosten kriterij za ocenjevanje preoblikovalnosti. V zvezi z drugimi značilnicami, ki jih prav tako lahko ugotavljamo z nateznim preskusom, zlasti s parametri krivulje plastičnosti, pa daje nove bistvene informacije o plastičnih lastnostih kovin pri hladnem preoblikovanju in izpolnjuje zlasti vrzel na področju metodologije preskušanja in identifikacije vlečnih sposobnosti pločevine.

LITERATURA

[1] Pommey, G., Grumbach, M.: Recherches récentes sur l'emboutissabilité des tôles minces, Méc. Ind. 3 (1966).

[2] Butler, R. D.: Relationship between Sheet Metal Formability and Certain Mech. Properties. Sheet Metal Ind. 41 (1964), 449.

[3] Keeler, S. P.: Understanding Sheet Metal Formability. Machinery and Production Eng. 114 (1969) 2937, s. 322.

[4] Shawki, G. S. A.: Assessing Deep Drawing Qualities of Sheet. Sheet Metal Ind. 42 (1965) 457, s. 363, 458, s. 448, 459, s. 525.

[5] Beisswänger, H.: Zur Tiefziehprüfung von Blechen. Werkstatt u. Betrieb 99 (1966), H. 10, S. 693.

[6] Lange, G.: Der Einfluß der Prüfmaschinenhärte auf die Ergebnisse des Zugversuchs. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen, 43 (1972), H. 1, S. 67.

[7] Lankford, W. T., Snyder, C., Bauscher, B.: New Criteria for Predicting Press Performance of Deep Drawing Sheets. Steel Processing 35 (1949), 10, S. 550.

[8] Lilet, L., Wybo, M.: La qualification des tôles d'acier doux pour emboutissage. C. N. R. M. (1965), Nr. 4, S. 59.

[9] Lilet, L.: Suitability of Sheet for Pressing. Sheet Metal Ind. 43 (1966), 12, S. 949.

[10] Bertram, C. H., Wülfert, D.: Bemerkungen zur Umformbarkeitsprüfung von Feinblechen. Fert. u. Betrieb 17 (1967), H. 1, S. 36.

[11] Wilson, D. V.: Development and present Status of Formability Tests of the Swift type. Sheet Metal Ind. 40 (1963), 432, S. 249.

[12] Swift, H. W.: The Mechanism of a simple Drawing Operation. Engineering 178 (1954), S. 435.

[13] Engelhardt, W.: Ein neues Tiefziehprüfverfahren. T. Z. für prakt. Metallbearb. 54 (1960), N. 11, S. 564.

[14] Warwick, J. D., Alexander, J. M.: Predicting of the Limiting Drawing Ratio from the Strees/Strain Curve. Journal of the Inst. Met. 91 (1962), S. 1—10.

[15] Keeler, S. P.: Determination of forming limits in automotive stampings. Sheet Metal Ind. 42 (1965), 9, S. 683.

[16] Wassermann, G., Grewen, J.: Texturen metallischer Werkstoffe. 2. Aufl. Springer-Verlag, 1962.

[17] Backofen, W. A., Hosford, W. F., Burke, I. J.: Texture Hardening. Trans. ASM 55 (1962), S. 264.

[18] Croussard, C. G., Pomey, G., Lajeunesse, D.: Influence de l'anisotropie des tôles sur leur déformation plastique. Mém. Scient. Rev. Mét. 58 (1961), S. 183.

Avtorjev naslov:

doc. dipl. ing. Franc Gologranc,
Fakulteta za strojništvo Univerze
v Ljubljani