Mr Vlado Radić,
kapetan I klase,

Uticaj velikih brzina deformisanja na promenu karakteristika metala

Uvod

Pri obradi metala plastičnom deformacijom sve veću primenu imaju eksplozivne materije. Upravo, korišćenje energije eksplozije umnogome proširuje mogućnosti obrade plastičnom deformacijom, jer je eksplozijom moguće ostvariti pritiske u dijapazonu od nekoliko bara do megabara. Takav nivo dostignutih pritisaka omogućava obradu plastičnom deformacijom i onih materijala koji se primenom klasičnih postupaka nisu mogli obrađivati.

Fizika čvrstoće i plastičnosti proučava strukturu metala i njen uticaj na mehaničke karakteristike, odnosno na ponašanje metala pod uticajem naprezanja. Nakon manjeg stepena elastične deformacije metali se pod uticajem naprezanja plastično deformišu i lome, pri čemu lomu, po pravilu, prethodi manji ili veći stepen plastične deformacije. Plastična deformacija i lom mogu se javiti pod uticajem kvazistatičkih (zateznih, pritiskih), udarnih, dinamičkih, trajnih statičkih naprezanja na povišenim temperaturama, itd.

Plastična deformacija metala, kod najrazličitije sheme spoljnih uslova, nastaje na do sada poznata tri načina: klizanjem, dvojnikanjem i difuzionim puzanjem [7]. Mehanizam nastanka plastične deformacije monokristala i polikristala može biti važniji nego spolj-

ni uslovi — temperatura i brzina opterećenja. Kod polikristalnih materijala plastična deformacija se ostvaruje ne po jednom, nego preko nekoliko mehanizama i preko većeg broja oblika jednog te istog procesa.

Uzimajući u obzir da realizacija jednog ili drugog mehanizma deformacije zavisi od uslova deformacije, mnogi autori su pokušali da opišu novi proces deformacije svojstven samo visokobrzinskom opterećenju, kada napon dostiže nekoliko kilobara, a brzina opterećenja je bliska brzini zvuka.

Određivanje zavisnosti između napona i deformacija

Ponašanje metala koji se najčešće koriste u mašinogradnji pri statičkom deformisanju je poznato i dovoljno je izučeno. Međutim, ako se ti isti metali izlože trenutnom, impulsnom opterećenju, njihovo ponašanje se menja. Impulsno opterećenje dovodi do promene mehanizma deformacije i razaranja metala. Pri velikim brzinama opterećenja, koje su praćene visokim pritiscima, u materijalu se javljaju velike brzine deformisanja. To dovodi do strukturnih promena u metalu, a i do promene njegovih mehaničkih karakteristika.

U svojim radovima Zajcev i Paškov su posvetili posebnu pažnju stvarnoj deformaciji u trenutku stvaranja lokal-

ne deformacije, tj. kada stabilna deformacija prelazi u nestabilnu. Kao što je poznato, stabilna deformacija karakteriše sposobnost materijala ka očvršćavanju.

Na osnovu dijagrama koji se dobija pri ispitivanju epruvete na istezanje, može se napisati:

$$F = \sigma \cdot A$$

gde su:

A — površina poprečnog preseka epruvete,

σ — stvarni napon u određenom trenutku ispitivanja na istezanje.

Ako se stvarni napon izrazi kao funkcija deformacije stepenom zavisnošću, dobija se:

$$K = \sigma = C \cdot \varphi^\alpha$$

gde je za deformaciju uzeta stvarna ili logaritamska deformacija

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} \text{ ili } \varphi = \ln \frac{A_0}{A}$$

Na osnovu toga, trenutna površina epruvete za vreme istezanja je

$$A = \frac{A_0}{e^\varphi}$$

Posle odgovarajućih zamena dobija se izraz za silu

$$F = C \cdot \varphi^\alpha \cdot \frac{A_0}{e^\varphi}$$

U trenutku stvaranja lokalne deformacije prirast sile po deformaciji jednak je nuli. Ako se izvod sile po deformaciji izjednači sa nulom, dobija se:

$$\frac{dF}{d\varphi} = C \cdot A_0 \cdot \left(\frac{\varphi^\alpha}{e^\varphi} \right) \cdot \left(\frac{\alpha}{\varphi} - 1 \right) = 0$$

odakle proizilazi da je $\alpha = \varphi_m$ (φ_m — maksimalna ravnomerna deformacija).

Holoman je pokazao da za većinu plastičnih materijala i deformacije do $\varphi = 0,3$ odgovara sledeća zavisnost, koja je i eksperimentalno potvrđena:

$$K = C \cdot \varphi^\alpha \text{ za } \alpha = \varphi_m$$

Zajcev je potvrdio zavisnost očvršćavanja materijala od eksponenta $\alpha = \varphi_m$ i pri drugim naponskim stanjima, različitim od istezanja. Na osnovu toga može se, u konačnom obliku, izraziti veza između napona i deformacije pri bilo kojim naponskim stanjima:

$$K = C \cdot \varphi_i^\alpha$$

gde su:

K — specifični deformacioni otpor ili intenzitet napona,

φ_i — intenzitet deformacije,

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2}$$

Konstante C i α određuju se istezanjem epruvete, pri čemu je $\alpha = \varphi_m$, a C izračunava u trenutku stvaranja lokalne deformacije po jednačini:

$$C = \sigma_m \frac{e^\alpha}{\varphi^\alpha}$$

$$K_m = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{A_0} \cdot e^\alpha = \sigma_m \cdot e^\alpha$$

Određivanje konstanti C i α na ovakav način daje zadovoljavajuće rezultate za plastične materijale. Za maloplastične materijale, ako se uzmu $\alpha = \varphi_m$, to dovodi do određene greške, naročito kod malih deformacija. Za takve materijale konstante C i α određuju se individualno na osnovu krive stvarnih napona.

Deformacioni rad

Za približan proračun tehnoloških parametara procesa oblikovanja lima može se iskoristiti bilans energije. Prema njemu se energija oslobođena eksplozijom troši na plastičnu deformaciju obratka i na gubitke. Većina gubitaka može se približno odrediti kao i rad utrošen na tehnološki proces. Energetski metod omogućava da se za većinu tehnoloških procesa dobiju odgovarajuće formule za proračun. Glavni nedostatak

tog metoda je što ne daje potpunu predstavu o deformisanju obratka. Međutim, korišćenje metode analize energije dobilo je u praksi obrade metala deformisanjem široku primenu. Analiza procesa vrši se na osnovu specifičnog rada ili specifične energije.

Deformacija izduženja (Δl) jedinačne zapremine ostvarena je opterećenjem silom F . Ako je sila F trenutna, onda će rad koji se odnosi na jedinicu zapremine biti jednak proizvodu sile i izduženja:

$$a = F \cdot \Delta l$$

Pošto pri deformaciji zapremine sila F nije ništa drugo nego napon σ , a Δl — deformacija φ , to se može napisati:

$$a = \sigma \cdot \varphi$$

Ako je deformacija u granicama elastičnosti, popravni koeficijent koji uzima u obzir to da sila ne deluje trenutno nego postepeno je 0,5 (sl. 1a). Slika 1b pokazuje istezanje iza granice elastičnosti.

Sl. 1 Karakter delovanja opterećenja

Površina ispod te krive predstavlja rad jedinačne zapremine. Ako bi sila delovala trenutno, tada bi površina dijagrama bila jednaka površini pravougaonika (sl. 1b isprekidano). Pošto opterećenje ne deluje trenutno, tada dijagram ima oblik krive.

Postavlja se pitanje kakav je, u stvari, karakter delovanja opterećenja pri obradi metala eksplozijom? Na prvi pogled čini se da opterećenje deluje trenutno. Međutim, dijagram dobijen pri istezanju dinamičkim opterećenjem je krivolinijski i, po pravilu, sa većom granicom tečenja. Oblik takvog dijagrama objašnjava se inertnošću epruvete. U trenutku prestanka delovanja dinamičkog opterećenja, čije je vreme delovanja veoma kratko, epruveta dobija određenu kinetičku energiju potrebnu za plastičnu deformaciju. Zato je vreme deformacije, a time i vreme prirasta napona u epruveti, znatno veće od vremena delovanja opterećenja. To uzrokuje krivolinijski karakter dijagrama.

Specifični deformacioni rad može se odrediti na dva načina. Prvi je dat izrazom:

$$a = \Psi \cdot \sigma \cdot \varphi = \varphi \cdot C \cdot \varphi^{1+\alpha}$$

gde je:

Ψ — koeficijent punoće dijagrama, veličina koja predstavlja odnos površine stvarnog dijagrama prema površini pravougaonika.

Drugi način određivanja specifičnog deformacionog rada može se koristiti, ako je poznata zavisnost između napona i deformacije, pa je [4]:

$$a = \int_0^{\varphi} \sigma \cdot d\varphi = \int_0^{\varphi} C \cdot \varphi^{\alpha} d\varphi = \frac{C \cdot \varphi^{1+\alpha}}{1+\alpha}$$

Da bi se mogao odrediti specifični deformacioni rad za bilo koje naponsko stanje, potrebno je da se deformacija kod osnog naprezanja zameni intenzitetom deformacije odgovarajućeg naponskog stanja:

$$a_i = C \cdot \frac{\varphi_i^{1+\alpha}}{1+\alpha}$$

Ukupni deformacioni rad biće jednak proizvodu specifičnog rada i zapremine:

$$W = a_i \cdot V$$

Deformaciono stanje i rad pri oblikovanju sfernog dna

Ako se pretpostavi da je kružni primerak od lima čvrsto vezan po konturi, onda se može govoriti pre o razvlačenju, nego o izvlačenju. Povećanje površine odradka nastaje prevashodno na račun smanjenja debljine lima. Na osnovu eksperimentalnih podataka došlo se do zaključka da su deformacije u radijalnom i tangencijalnom pravcu približno jednake (sl. 2).

Sl. 2 Deformaciono stanje obratka pri oblikovanju sfernog dna

Glejzel je utvrdio eksperimentalnu zavisnost između deformacije u svakoj tački i deformacije u centru kupole, koja je maksimalna:

$$\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \varphi \approx \varphi_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right)$$

Na osnovu zakona o konstantnoj zapremini može se napisati

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0,$$

pa veličina deformacije, koja karakteriše smanjenje materijala, iznosi:

$$\varphi_3 = -2\varphi$$

Intenzitet deformacije na svakom krugu radijusa r menja se od nule, pri nekom radijusu, od maksimalne vrednosti, pri $r=0$. Za određivanje veličine deformacije čitave sfere treba odrediti njenu srednju vrednost.

Kada se odredi veličina deformacije na svakom krugu dobiće se dijagram kao na slici 2. Da bi se odredila srednja vrednost deformacije, potrebno je odrediti površinu dijagrama ispod krive, odnosno zameniti je površinom pravougaonika sa stranicama φ_{isr} i r_0 .

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{isr}} &= \frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} \varphi_i \cdot dr = \frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} 2\varphi_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) dr = \\ &= \frac{2}{r_0} \int_0^{r_0} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) dr = \frac{4}{3} \cdot \frac{f^2}{r_0^2} \end{aligned}$$

Poznato je da se najveća deformacija pojavljuje u centru kupole i da prelazi vrednost od 20%. Tada se gornja jednačina za φ_{isr} može sa dovoljnom tačnošću koristiti do odnosa $f/r_0 = 0,4$.

Na osnovu toga, specifični rad izražava se kao

$$a = \frac{C}{1+\alpha} \left[\frac{4}{3} \frac{f^2}{r_0^2} \right]^{1+\alpha}$$

odnosno ukupni rad kao

$$W = \frac{C}{1+\alpha} \left[\frac{4}{3} \frac{f^2}{r_0^2} \right]^{1+\alpha} \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot S$$

Deformaciono stanje i rad pri izvlačenju danaca

U ovom slučaju oblikovanje lima iz ravne ploče u sud sa dnom nastaje na račun smanjenja debljine materijala i

Sl. 3 Deformaciono stanje obratka u procesu izvlačenja danaca

pomeranja, tj. deformacije materijala na vencu obratka. Na slici 3 prikazan je obradak u procesu deformisanja. Srednji intenzitet deformacije može se odrediti korišćenjem zakona o konstantnoj zapremini.

Kroz svaki poprečni presek $2\pi x_1 \cdot S$ prođe ista količina materijala. U određenom trenutku izvlačenja radijus venca R_0 smanjiće se na veličinu R , tako da kroz presek radijusa x_1 prođe količina materijala $\pi \cdot (R_0^2 - R^2) \cdot S$. Ako se uzme da je debljina lima približno konstantna, može se napisati:

$$\pi(R_0^2 - R^2) \cdot S = \pi(x_1^2 - x^2) \cdot S,$$

odakle je

$$x_1 = \sqrt{R_0^2 - R^2 + x^2}$$

Tada deformacija po krugu iznosi

$$\varphi_0 = \ln \frac{x_1}{x} = \frac{1}{2} \ln \frac{R_0^2 - R^2 + x^2}{x^2}$$

Ako se uvedu koeficijenti — k izvlačenja, k_v i k_x , dobija se

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \ln \frac{k_1^2 - k_v^2 - k_x^2}{k_v^2}$$

gde su:

$$k_1 = \frac{R_0}{r_0} \text{ — početni koeficijent izvlačenja,}$$

$$k_v = \frac{R}{r_0} \text{ — koeficijent izvlačenja venca,}$$

$$k_x = \frac{x}{r_0} \text{ — tekući koeficijent izvlačenja.}$$

Pod pretpostavkom ravanskog deformacionog stanja, deformacije φ_r i φ_0 su u svakoj tački po apsolutnoj vrednosti jednake. Pod tim uslovima intenzitet deformacije je:

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(-\varphi_0 - \varphi_0)^2 + (\varphi_0 - 0)^2 + (0 + \varphi_0)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varphi_0$$

Srednji intenzitet deformacije biće jednak površini dijagrama φ_i i može se napisati kao:

$$\varphi_{\text{sr}} = \frac{1}{k_v - 1} \int_1^{k_v} \varphi_i d\varphi = \frac{2}{3(k_v - 1)} \int_1^{k_v} \varphi_0 d\varphi$$

Zamenom vrednosti za φ_0 rešenje integrala dobija oblik:

$$\varphi_{\text{sr}} = \frac{2}{\sqrt{3(k_v - 1)}} \left[k_v \cdot \ln \frac{k_1}{k_v} - \frac{1}{2} \cdot \ln (k_1^2 - k_v^2 + 1) \right] + \sqrt{k_1^2 - k_v^2} \cdot \arccos \frac{k_1^2 - k_v^2 + k_x^2}{k_1 \sqrt{k_1^2 - k_v^2 - 1}}$$

Proračun srednje deformacije pomoću izraza za φ_{sr} je složeno i nepraktično. Zbog toga se zavisnost srednje deformacije od koeficijenta izvlačenja, znajući da je njihov raspon u granicama od 1—2,5, može izraziti na sledeći način:

$$\varphi_{\text{sr}} = \frac{\varphi_{\text{sr}} \sqrt{3}}{2} = \frac{k_1 - k_v}{k_1 - 1} \cdot \ln k_1$$

Pri $k_v = 1$, jednačina za φ_{sr} dobija oblik

$$\lim \varphi_{\text{sr}} = \ln k_1$$

dok je pri $k_v = k_1$ srednji intenzitet deformacije jednak nuli.

Specifični deformacioni rad deformisanja venca može se izraziti preko

$$a_v = \frac{C}{1 + \alpha} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{k_1 - k_v}{k_1 - 1} \ln k_1 \right)^{1 - \alpha}$$

dok će ukupni rad za deformisanje venca biti:

$$W_v = \frac{\pi C}{1 + \alpha} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{k_1 - k_v}{k_1 - 1} \ln k_1 \right)^{1 - \alpha} \cdot r_0^2 \cdot (k_1^2 - 1) \cdot S$$

Pri izvlačenju danaca sa sfernim dnom, pored energije potrebne za deformisanje venca, treba uzeti u obzir i energiju potrebnu za obrazovanje sfere. Veličinu ugiba, u tom slučaju, treba odrediti kao razliku ukupne dubine (z) i visine dela (h).

Visina pojasa (h), pod pretpostavkom konstantne debljine materijala, određena je jednačinom:

$$h = \frac{D_0^2 - D_v^2 + 1,7 d \cdot r_m - 0,65 r_m^2}{4 d}$$

gde su:

- D_0 — prečnik pripremljena,
- D_v — prečnik venca,
- d — prečnik obratka,
- r_m — radijus zaobljenja matrice.

Rad potreban za savijanje

Pri izvlačenju tankih limova, rad utrošen na savijanje je, u odnosu na rad potreban za izvlačenje, zanemarljiv. Kod izvlačenja debljih limova taj rad je znatan i potrebno ga je uzeti u obzir.

Sl. 4 Savijanje elementa sfernog oblika

Svaki elemenat sfernog dela savija se u dva pravca — radijalnom i tangencijalnom (sl. 4). Momenti savijanja na jediničnu dužinu u radijalnom i tangencijalnom pravcu mogu se odrediti izrazima:

$$M_r^0 = \frac{\sigma_r \cdot S_0^2}{4}$$

$$M_0 = \frac{\sigma_0 \cdot S_0^2}{4}$$

Iz uslova simetričnosti sledi da je $\sigma_r = \sigma_0$, a iz uslova plastičnosti $\sigma_r^2 + \sigma_0^2 - \sigma_r \cdot \sigma_0 = K$, pa je $\sigma_r = \sigma_0 = K$. Momenti savijanja biće:

$$M_r = M_0 = M \cdot \frac{K \cdot S^2}{4}$$

Specifični deformacioni rad savijanja u centru elementa je:

$$a_s' = \frac{2M}{Rsf} = \frac{K \cdot S^2}{2Rsf}$$

Rad potreban za savijanje materijala obratka oko poluprečnika matrice dat je izrazom:

$$a_s'' = \frac{M}{r_m + \frac{S}{2}}$$

Ukupni specifični deformacioni rad savijanja jednak je zbiru $a_s' + a_s''$.

Veličina ukupnog deformacionog rada, potrebnog za izvlačenje jednog venca, biće jednaka zbiru radova za deformisanje srednjeg dela obratka ili oblikovanje sfere i rada potrebnog za deformisanje elementa:

$$W = K_s \cdot W_v + W_{sf},$$

gde su:

- W — ukupni rad,
- W_v — rad potreban za deformisanje venca,
- W_{sf} — rad potreban za deformisanje sfere.

Uticaj brzine deformisanja na mehaničke karakteristike metala

Analiza uticaja na mehaničke karakteristike pokazala je da sa smanjenjem vremena deformacije dolazi do njihovog poboljšavanja kod većine metala. To se objašnjava time što se javlja zakašnjenje pri tečenju metala. Kod dinamičkih ispitivanja ustanovljeno je da je granica tečenja, pri brzini udara od 100 m/s, za oko tri puta veća od gra-

nice tečenja pri statičkim uslovima ispitivanja. Za plastične materijale koeficijent dinamičnosti $K_D = \sigma_v^D / \sigma_v^{ST}$ naglo raste [2].

Veliki broj eksperimenata usmeren je ka određivanju dinamičke granice tečenja pri različitim pritiscima u udarnom talasu. U tabeli 3 date su veličine

Deformacija i jedinični rad razaranja pri statičkom opterećenju i opterećenju eksplozijom u vodi

Tabela 1

Materijal lima	S [mm]	a_{st} [daN/cm ²]	ϵ_{st}	ϵ_d	a_d [daN/cm ²]	a_d/a_{st}
Mesing	2,03	1110	0,255	0,537	2330	2,1
Bakar	0,915	120	0,045	0,563	1500	12,5
Nerđajući čelik	0,915	2820	0,455	0,445	2750	0,98
Titan	0,915	560	0,106	0,368	1960	3,50
Aluminijum	2,03	22	0,016	0,500	680	31,00
Ugljenični čelik	1,62	600	0,169	0,560	2000	3,30

U tabeli 1 dati su rezultati ispitivanja koja su vršena na okrugloj membrani prečnika 150 mm i čvrsto vezanoj po obodu. Vršena su poređenja deformacija i veličine jediničnog rada razaranja pri statičkom opterećenju i opterećenju pomoću eksplozije u vodi [2].

U tabeli 2 dati su rezultati ispitivanja čvrstoće i plastičnih karakteristika nekih metala pri impulsnom opterećenju i kod svih metala primećen je porast čvrstoće.

dinamičke granice tečenja za neke metale. Ispitivanja su pokazala [2] da postoji veza između brzine deformisanja i koeficijenta dinamičnosti granice tečenja. Povećanje brzine deformisanja kod skoro svih ispitivanja metala dovodi do povećanja granice tečenja. Primećeno je, takođe, da sa povećanjem brzine deformisanja dolazi do povećanja jedinične energije plastične deformacije.

Na osnovu eksperimenata o uticaju brzine deformisanja na čvrstoću metala

Rezultati ispitivanja čvrstoće i karakteristika plastičnosti nekih metala pri impulsnom opterećenju

Tabela 2

Materijal	Režim opterećenja	σ_v	σ_m	$K_D = \sigma_v^D / \sigma_v^{st}$
		[daN/mm ²]		
Bakar	statističko	7	22,5	4
	udarno pri P=22 GN/m ²	28,1	34,5	
Čelik, kaljen i otpušten na 220°C	statičko	4,6	81,7	1,28
	udarno	55,9	104,0	
Čelik, kaljen i otpušten na h50°C	statičko	96,0	104,1	1,4
	udarno	120,3	156,2	

Metal	σ_{1a}^*	σ_V^D	Metal	σ_{1a}^*	σ_V^D
	[kbar]			[kbar]	
Aluminijum	100	8,2	Bakar	340	18
	175	12,5		800	28
	300	17	Olovo	1220	16
	345	22		460	0
	685	29	Gvožđe	1110	11
				1850	27

* σ_{1a} — naprezanje u udarnom talasu.

i legura može se zaključiti da brzina deformisanja ima veći uticaj na metale nego na legure; zavisnost brzine deformisanja i čvrstoće jače je izražena kod lako topljivih nego kod teško topljivih metala.

Povećanje mehaničke čvrstoće, kod deformisanja velikim brzinama, pojedini autori [2, 5] povezuju sa procesima očvršćavanja i razočvršćavanja pri plastičnoj deformaciji. Proces razočvršćavanja, koji je povezan sa promenom unutrašnje strukture materijala, zbog kratkog vremena za koje se proces odvija, ne uspeva da se ostvari, što omogućava očvršćavanje, odnosno povećanje otpora materijala deformisanju. Povećanje otpora deformisanju sa porastom brzine deformisanja može se koristiti za objašnjavanje čvrstoće krtih tela. Saglasno toj teoriji, razaranje epruvete nastaje kada napon postane veći od jačine materijala na mestu sa defektom.

Iako materijal može da bude i bez uočljivih defekata, kod posmatranja delova strukture uočava se nejednorodnost i složeno naponsko stanje. Kod jednodirnog istezanja u različitim mikrodlovima materijala dolazi do nejednakog naponskog stanja.

Na osnovu statističke teorije čvrstoće, proces deformacije i razaranja metala može se predstaviti na sledeći način:

— komponente napona prvog reda (mikronaponi), određeni eksperimentalno ili računski na osnovu klasične teorije elastičnosti, predstavljaju srednje vrednosti odgovarajućih napona drugog reda;

— naponi prvog reda, kao srednje veličine, neposredno ne predstavljaju uzrok razaranja; razaranje izazivaju naponi drugog reda,

— mikronaponi predstavljaju slučajne veličine.

Druga pretpostavka potvrđena je i eksperimentalno. Zbog dejstva maksimalnih mikronapona proces mikroskopskog razaranja nastaje kod napona prvog reda, sa znatno manjom jačinom na kidanje. Mikropukotine u materijalima uočavaju se kod mikronapona reda granice tečenja.

Uzimajući u obzir sveukupnost komponenata drugog reda u posmatranom preseku, proces deformacije može se prikazati slikom 5.

Kao što se vidi, razaranje uzoraka nastaje pri kritičnom naponskom stanju, kada broj površina drugog reda, na

kojima deluje maksimalni napon $\sigma_{\max}$, dostigne graničnu vrednost. Pri statičkom deformisanju deformacija teče neravnomerno. Smanjenje vremena delovanja opterećenja dovodi do pojave kašnjenja tečenja u pojedinim zrnima polikristalnog tela i do izjednačavanja mikronapona po preseku uzorka. Smanjenje neravnomernosti raspodele mi-

Sl. 5 Proces deformisanja u posmatranom preseku

kronapona sa povećanjem brzine deformisanja može se izraziti u obliku zavisnosti disperzije mikronapona od brzine deformisanja [2]:

$$D \cdot \sigma = A \cdot e^{-\gamma_0 V} = \alpha^2$$

gde su:

- α^2 — disperzija napona,
- V — brzina deformisanja,
- A, γ_0 — konstante.

Jačina na kidanje pri nekoj brzini deformisanja v_2 , ako su poznati i napon kod neke brzine v_1 , može se izraziti formulom [2]:

$$\sigma_M = \sigma_{\max} - \sqrt{\frac{\exp[-\gamma_0 \cdot V_2]}{\exp[-\gamma_0 \cdot V_1]} (\sigma_{\max} - \sigma_3)^2 + A \gamma_0 \cdot \exp[-\gamma_0 V_2] (V_2 - V_1)}$$

Vrednost $\sigma_{\max}$ odgovara teoretskoj jačini na kidanje, pošto sa povećanjem brzine deformisanja, zbog kratkog vremena, dislokacioni mehanizam deformacije ne dolazi do izražaja. U krajnjem slučaju, razaranje nastaje pri jednovremenom smicanju dve površine, tj

pod uslovom teoretskog proračuna jačine na kidanje. Pri kritičnoj brzini razaranje nastaje skoro bez deformacije, a naponsko stanje ima minimalnu disperziju.

Paškov je, proučavajući procese koji se dešavaju u materijalima pri povećanju brzine deformisanja, uočio da povećanje otpora plastičnoj deformaciji dovodi do toga da se zrna iste jačine nađu u stanju plastičnosti istovremeno.

Granicu tečenja pri statičkim uslovima ispitivanja karakteriše otpor malih plastičnih deformacija ($\epsilon = 0,2\%$), tj. otpor najslabijih ili najbolje orijentisanih zrna u početnom periodu procesa istezanja. Istovremeno, jačina odražava srednji otpor plastičnom tečenju većine zrna. Kod visokobrzinske deformacije, kada zapremina zrna koja učestvuju u deformaciji, u početnom trenutku, naglo raste, nastaje povećanje granice tečenja.

Uticaj brzine deformisanja na plastične karakteristike metala

Izbor tehnoloških parametara i objašnjavanja uticaja brzine deformisanja, pri impulsnoj obradi metala, ima veliki praktični značaj. Danas ne postoji jedinstveno mišljenje o karakteru promena parametara plastičnosti sa povećanjem brzine deformisanja. To je, pre svega, zbog relativno malog broja eksperimentalnih podataka, kao i nedostatka jedinstvenog metoda ispitivanja.

Pri ispitivanju gvožđa, ugljenih i legiranih čelika, aluminijuma, bakra i njegovih legura, primećeno je smanjenje plastičnosti pri velikim brzinama deformisanja, što se objašnjava postojanjem »kritične« brzine za navedene materijale, pri kojoj razaranje nastaje trenutno. Ustanovljeno je da se kritična brzina za čelike nalazi u granicama 50—100 m/s, a za aluminijum 11 m/s.

Pri prelazu sa statičkog na dinamičko ispitivanje sa brzinom 3,8 m/s, primećeno je smanjenje relativnog izduženja. Daljim povećanjem brzine de-

formisanja dolazi do blagog porasta karakteristika plastičnosti. Relativno izduženje ugljeničnih i malolegiranih čelika, u odnosu na statičke vrednosti, povećava se za 26% pri brzini udara od 300 m/s.

Za kaljeni čelik, npr. kod brzine deformisanja od 650 m/s, epruvete se razaraju bez tragova plastične deformacije. To znači da za taj čelik navedena brzina predstavlja kritičnu brzinu. Takođe je pokazano da za taj čelik, povećanje brzine deformisanja do 200 m/s, dovodi do poboljšanja karakteristika plastičnosti. Najveće povećanje relativnog izduženja u odnosu na statička ispitivanja iznosi 80%. Dalje povećanje brzine deformisanja dovodi do naglog pada karakteristika plastičnosti. Kod brzine od 500 m/s, plastične karakteristike su u odnosu na statička ispitivanja 2—2,5 puta niže.

Kod kaljenog i otpušenog čelika karakteristike plastičnosti se, takođe, poboljšavaju porastom brzine deformisanja do 200 m/s. Pri toj brzini ravnomerno izduženje je u odnosu na statička ispitivanja veće za 65%, do se pri brzini od 500 m/s plastične karakteristike smanjuju u odnosu na statička ispitivanja za oko 1,7—2 puta.

Ispitivanje karakteristika plastičnosti legure titana pokazalo je da se plastične karakteristike povećavaju u proseku za 20% u odnosu na statičke, za brzine do 65 m/s. Dalje povećanje brzine negativno utiče na karakteristike plastičnosti. Pri brzini od 350 m/s karakteristike plastičnosti su niže u odnosu na statičke za oko 1,5—1,8 puta.

Za većinu ispitivanih materijala utvrđeno je da se poboljšavaju karakteristike plastičnosti u odnosu na statičke vrednosti sa povećanjem brzine deformisanja. Maksimalne brzine do kojih se poboljšavaju karakteristike plastičnosti metala su različite za različite metale. Povećanje brzine deformisanja iznad ovih brzina dovodi do naglog pada karakteristika plastičnosti i lokalizacije plastične deformacije.

Ispitivanje epruveta različitih prečnika pri visokim brzinama deformisanja pokazalo je da povećanje prečnika do 24 mm znatno smanjuje karakteristike plastičnosti. To se objašnjava uticajem poprečnih pomeranja epruveta većih prečnika, kao i uticajem sila inercije. Rezultati takvog ispitivanja dati su u tabeli 4 za određenu vrstu čelika.

Pored prečnika epruvete, u ispitivanjima su varirani i oblik epruveta i način vezivanja. Ispitivane su epruvete konusnog oblika, kao i epruvete koje su učvršćivane u kidalici preko navoja. Pri različitim brzinama došlo je do kidanja na raznim mestima, kao i do različitih naponskih stanja.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da oblik epruvete za ispitivanje suštinski ne utiče na karakter prostiranja plastične deformacije. Prostiranje plastične deformacije zavisi od veličine napona u talasu opterećenja i sheme naponskog stanja u procesu ispitivanja.

Zaključak

Primena eksploziva u obradi materijala počela je na polju spajanja metala i brzo se proširila na ostale postupke obrade metala plastičnom deformacijom. Brojna ispitivanja na polju stvaranja novih tehnologija sa impulsnim opterećenjem pokazala su da se energija eksplozije može koristiti u oblikovanju, površinskom ojačavanju delova, zavarivanju raznorodnih metala, plakiranju, probijanju otvora, dobijanju složenih oblika cevi, i dr.

Bez obzira na to što se slika o procesu obrade deformisanjem pomoću eksplozivnih materija umnogome razlikuje od ostalih postupaka klasične obrade, može se zaključiti da je vrlo važno poznavanje osnovnih relacija i mehanizma deformacije do kojih dolazi pri obradi eksplozivom. Pored karakteristika brizantnog eksploziva, oblika alata i dodatnih uređaja, sredine u kojoj se vrši oblikovanje, potrebno je poznavati i zavisnost između napona i deformacija,

Prečnik eprovete [mm]	Vid termičke obrade	Brzina deformi- sanja [m/s]	Karakteristike plastičnosti			
			δ_s	δ_m	δ_b	ψ
3	žaren	10^{-4}	15	14	50	60
		4	27	16	54	62
		65	32	20	60	66
		80	33	21	63	67
		140	20	10	57	64
		250	13	8	51	54
3	poboljšan	10^{-4}	13	2,5	30	48
		4	15	7,5	49	60
		100	21	9,0	58	68
		250	9	1,8	51	56
12	žaren	10^{-4}	23	13,5	41	51
		4	26	18	49	54
		65	31	20	59	60
		140	29	17	58	61
		250	12	6	48	47
12	poboljšan	10^{-4}	10	2,0	28	45
		4	12	4,5	37	50
		100	17	8,0	48	53
		250	8	1,0	46	50
18	žaren	10^{-4}	22,5	13	39	43
		4	25	17	43	53
		65	30	22	52	59
		200	12	6	53	50
18	poboljšan	10^{-4}	10	2,0	27	46
		4	11	3,5	35	49
		100	16	7,5	48	56
		200	8,5	1,2	45	48
24	žaren	10^{-4}	10	12	32	37
		60	30	21,5	50	53
		200	6	2	93	42
24	poboljšan	10^{-4}	8,5	1,6	30	34
		80	20	7,5	51	57
		200	8	1,0	42	47

deformaciono stanje i rad pri oblikovanju odradaka sfernog ili drugih oblika, deformaciono stanje i rad pri izvlačenju danaca, rad potreban za savijanje, te, konačno, uticaj brzine deformisanja na mehaničke osobine i osobine plastičnosti metala koji se koriste.

Ponašanje metala koji se najčešće koriste u mašinstvu, pri statičkom ispitivanju i deformisanju, poznato je i dovoljno izučeno. Međutim, izlaganje tih istih metala trenutnom, impulsnom opterećenju, dovodi do strukturnih promena, a samim tim i do promena meha-

ničkih karakteristika. Metali, kao nerđajući čelici i legure titana, skloni razaranju pri statičkim uslovima deformisanja pod dejstvom impulsnog opterećenja na njih, povećavaju stepen deformacije skoro dva puta. To omogućava dobijanje veće dubine izvlačenja, kao i složenijih oblika pri obradi lima eksplozijom. Skoro sva ispitivanja govore o tome da pri dinamičkom opterećenju metala dolazi do povećanja granice tečenja, čvrstoće i izduženja. Za većinu ispitivanih materijala utvrđeno je povećanje karakteristika plastičnosti.

Uticaj sila inercije na proces deformisanja ogleda se u tome što materijal deformisanja dovode u prostorno naponsko stanje. To je, u stvari, drugi razlog za promenu obradivosti metala pri deformisanju velikim brzinama. Međutim, pored uticaja brzine deformisanja, potrebno je razmatrati i uticaj temperature. Ovde treba naglasiti da su brzinski i temperaturni faktor nerazdvojni, te da je nemoguće izolovano posmatrati oba faktora, čije je dejstvo na karakteristike metala suprotno.

Literatura:

- [1] Ionov V. N., Ogibalov P. M.: »Naprjaženja v telah pri impul'snom nagraženii«, Moskva 1975.
- [2] Beljajev V. I.: »Visokoskorostnaja deformacija metallov«, Nauka i tehnika, 1976.
- [3] Rjibin V. V.: »Boljšie plastičeskie deformacii i razrušenie metallov« Mašinostroenie, 1971.
- [4] Deribas A. A.: »Fizika upročnenia i svarki vzrivom«, Novosibirsk, Nauka, 1980.
- [5] Epštejn G. N.: »Visokoskorostnaja deformacija i struktura metallov«, Mašinostroenie, 1971.
- [6] Nikolaevski B. N.: »Dinamičeskaja pročnost' i skorost' razrušenja«, Mir, Moskva, 1981.
- [7] Honeycombe R. W. K.: »The Plastic Deformation of Metall«, Eduard Arnold (Ed.), London, 1965.
- [8] Stojiljković V., Dimitrov B.: »Izrada danaca eksplozivom«, Obrada deformisanjem u mašinstvu, 9 (1984) 1, Novi Sad.
- [9] Radić V.: »Obrada metala eksplozijom«, VTG 4, 1990.
- [10] HERF '89.: Proceedings of 10th International Conference of High Energy Rate Fabrication, Ljubljana, 1989.
- [11] Rajnhart D., Pirson D.: »Vzrivnaja obrabotka metallov«, Mir, Moskva, 1966.
- [12] Krupin A. B. i dr.: »Deformacija metallov vzrivom«, Metalurgija, Moskva, 1975.
- [13] Stepanov G. V.: »Analiz naprjažnogo sostojanija obrasca pri visokoskorostnih ispitanijah v uslovija rastjaženija«, Problemi pročnosti, № 11, 1974.
- [14] Dimitrov B.: »Doktorska disertacija«, Mašinski fakultet Niš, 1987.
- [15] Hirth J. P., Lothe J.: »Theory of Deformations«, McGraw-Hill, New York, 1972.
- [16] Verhoeven J. D.: »Fundamentals of Physical Metallurgy«, Willey, New York, 1975.
- [17] Pihtovnikov R. V., Zavjalova V. N.: »Štampovka listovoga metalla vzrivom« Mašinostroenie, Moskva, 1964.