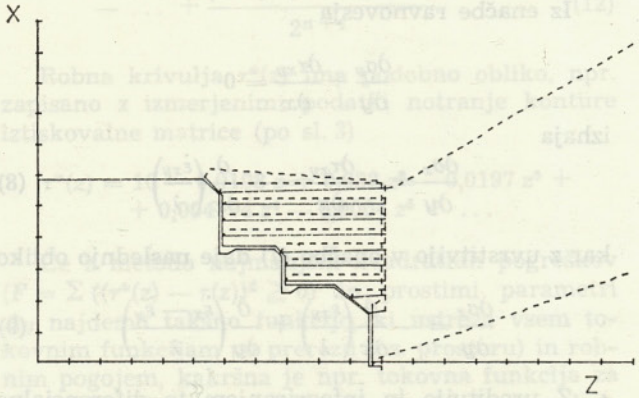
5. STROŠKOVNA ANALIZA OBDELAVE NA NUMERIČNO KRMILJENEM STROJU

V celotni model avtomatične porazdelitve rezov je vključen sistem za natančno stroškovno analizo obdelave. Stroškovna ocena se izvede pred obdelavo na numerično krmiljenem stroju po posebni metodi, ki je podrobno opisana v [3].



Sl. 2. *Porazdelitev rezov pri struženju*
Obdelovani material iz 1. skupine (σ_M = 700 N/mm²), rezalni material: ploščica iz karbidne trdine P 10
P = 30 kW, T = 60 min, v_c = 182 m/min, f = 5 mm, a = 5 mm, TTA = 2,96 min

6. PRIMER

Na sliki 2 je prikazana risba porazdelitve rezov, ki jo nariše risalnik, kot rezultat iz sistema avtomatične porazdelitve rezov. Izdelavni stroški na numerično krmiljeni stružnici NDM-7/50 na VTŠ Maribor so 898,98 din/kos.

LITERATURA

[1] Depiereux W. R.: Ermittlung optimaler Schnittbedingungen . . ., Dissertation, TH Aachen, 1969.

[2] Balič, J.: Raziskava optimalne avtomatske porazdelitve rezov pri NC-struženju, magistrsko delo, VTŠ Maribor, 1983.

[3] Polajnar, A.: Poseben način oblikovanja optimalne ocene uvajanja numerično krmiljenih strojev v proizvodnjo, doktorska disertacija, VTŠ Maribor, 1982.

Avtorjev naslov: mag. Jože Balič, dipl. inž. str.
višji predavatelj,
VTŠ Maribor — VTO strojništvo

UDK 539.374.6

Uporaba visioplastične metode pri aksialno simetričnem iztiskovanju

PETER LEŠ — ANDRO ALUJEVIČ

1. UVOD

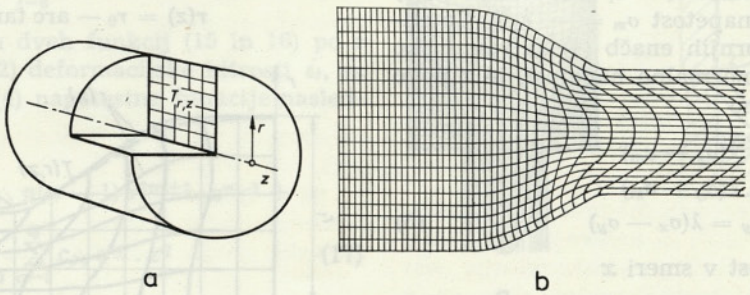
S kvadratno mrežo, ki je nanesena po prerezu simetričnega izdelka (sl. 1), opisujejo mrežne točke pred in po preoblikovanju elementarne deformacije oz. deformirane elemente. Z merjenjem velikosti teh deformacij dobimo polje deformacij po prerezu obdelovanca. Z dodatno znanimi robnimi pogoji, tj. po znani obliki preizkušanca, orodni geometriji, vrsti preoblikovalnega materiala in drugih veličin (npr. koeficient trenja maziva, hitrost gibanja orodja), lahko izračunamo druge neznane veličine, kakor so npr. deformacijska, napetostna in temperaturna polja v preoblikovancu.

2. NAČELO RAČUNANJA PO VISIOPLASTIČNI METODI

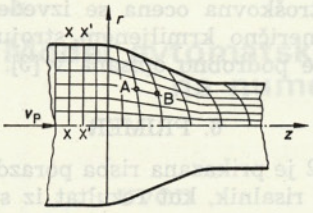
V stacionarnem delu preide linija X—X v času $\Delta t = v/\Delta s_0$ v linijo X′—X′. Hkrati potuje točka A v B (sl. 2). Če sta projekciji poti AB na obe osi (r in z) označeni z Δs_r in Δs_z, sta hitrostni komponenti posameznih mrežnih točk enaki

$$v_{ri} = \frac{\Delta s_{ri}}{\Delta t} \quad \text{in} \quad v_{zi} \frac{\Delta s_{zi}}{\Delta t} \tag{1}$$

ki so toliko natančnejše vrednosti, kolikor finejša je izbrana začetna kvadratna mreža.



Sl. 1. *Mreža po prerezu preizkušanca*
a — kvadratna mreža, b — deformirana mreža



Sl. 2. *Premik mrežnih točk*

V nestacionarnem delu ali procesih dobimo hitrosti materialnih delcev na podoben način, ugodno pa je, da uporabimo še finejšo začetno kvadratno mrežo. Da bi določili deformacijske hitrosti in iz njih tudi druge veličine, je več načinov računanja.

2.1. Izračun hitrostnega in napetostnega polja iz koordinat deformacijske mreže

Če prenesemo za vsako deformirano mrežno točko vrednosti v_r in v_z na osi r in z in vrednosti povežemo s krivuljo, dobimo iz vzpona teh krivulj deformacijske hitrosti iz naslednjih izrazov:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial_r}, \quad \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial_z}, \quad \dot{\varepsilon}_\vartheta = \frac{v_r}{r} \quad \text{in}$$

$$\dot{\varepsilon}_{rz} = \tfrac{1}{2}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}\right) \tag{2}$$

ter primerjalno deformacijsko hitrost iz

$$\dot{\varepsilon}_V = \sqrt{\tfrac{2}{3}(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\vartheta^2 + \dot{\varepsilon}_z^2 + 2\dot{\varepsilon}_{rz})} \tag{3}$$

Ker pa so komponente deformacijskih hitrosti proporcionalne komponentam napetostnega deviatorja, lahko zapišemo naslednje izraze:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= \lambda(\sigma_r - \sigma_m) \\ \dot{\varepsilon}_z &= \lambda(\sigma_z - \sigma_m) \\ \dot{\varepsilon}_\vartheta &= \lambda(\sigma_\vartheta - \sigma_m) \\ \dot{\varepsilon}_{rz} &= \lambda\, \tau_{rz} \end{aligned} \tag{4}$$

pri čemer je λ proporcionalni faktor enak $\lambda = \sqrt{E_2/k}$.

E_2 je druga invarianta hitrosti deformacijskega tenzorja, k pa je strižna napetost materiala. Na začetku je aksialna napetost $\sigma_z = 0$, zato izhaja iz (4) za srednjo normalno napetost $\sigma_m = -\dot{\varepsilon}_z/\lambda$. Če eliminiramo iz dveh zgornjih enačb (4) za ravninsko deformacijsko stanje normalno napetost, je z novo označbo indeksa pisano

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_x &= \lambda(\sigma_x - \sigma_m) \\ \dot{\varepsilon}_y &= \lambda(\sigma_y - \sigma_m) \\ \dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y &= \lambda(\sigma_x - \sigma_y) \end{aligned} \tag{5}$$

iz česar izhaja napetost v smeri x

$$\sigma_x = \sigma_y + \frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda} \tag{6}$$

Z odvajanjem te enačbe po y dobimo

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial}{y}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda}\right) \tag{7}$$

Iz enačbe ravnovesja

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0$$

izhaja

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = -\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xy}}{\lambda}\right) \tag{8}$$

kar z uvrstitvijo v enačbo (7) daje naslednjo obliko

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xy}}{\lambda}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda}\right) \tag{9}$$

Z ureditvijo in integriranjem te diferencialne enačbe dobimo napetost v smeri x

$$\sigma_x = \int_{y_1}^{y} \left(\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y}{\lambda}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xy}}{\lambda}\right)\right) dy + K(x) \tag{10}$$

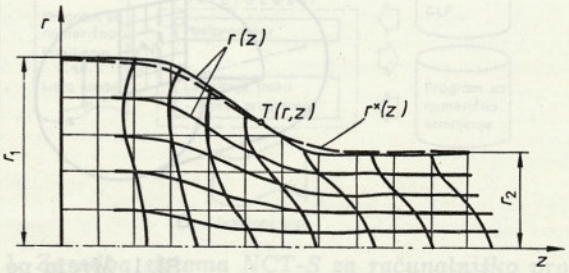
To vrednost moramo preračunati za vsako deformirano mrežno točko. Podobni izračun izvedemo še za preostali napetostni komponenti σ_y in σ_ϑ. Tako dobljene vrednosti vpišemo v deformirano mrežo ter enake vrednosti med seboj povežemo. Taka povezava predstavlja napetostno polje v različnih smereh po prerezu preizkušanca. Iz enačbe (10) vidimo, da lahko takoj izračunamo napetostno polje, če le poznamo deformacijske hitrosti.

2.2. Izračun hitrostnega in napetostnega polja iz znane tokovne funkcije

Druga možnost izračunavanja deformacijskih hitrosti in napetosti je v tem, da razporejenost hitrostnih komponent v_r in v_z aproksimiramo s tokovno funkcijo, ki obsega hitrostne komponente $v_r(r, z)$ in $v_z(r, z)$ in gre skozi točko $T(r, z)$ (sl. 3).

V primeru iztiskovanja rotacijsko simetrične oblike lahko tokovno funkcijo grobo opišemo s funkcijo arc tan

$$r(z) = r_0 - \arctan(z - z_0) \tag{11}$$



Sl. 3. *Robna krivulja in tokovnice*

ta ima v razviti vrsti naslednjo obliko

$$r(z) = r_0 - (z - z_0) - \frac{(z - z_0)^3}{3} + \frac{(z - z_0)^5}{5} - \ldots + \frac{(-1)^n (z - z_0)^{2n+1}}{2^{n+1}} \quad (12)$$

Robna krivulja $r^*(z)$ ima podobno obliko, npr. zapisano z izmerjenimi podatki notranje konture iztiskovalne matrice (po sl. 3)

$$r^*(z) = 10 - 0{,}0108\, z + 0{,}032\, z^2 - 0{,}0197\, z^3 + 0{,}004174\, z^4 - 0{,}0004\, z^5 + \ldots$$

Če z metodo najmanjših kvadratnih pogreškov ($F = \Sigma\, ((r^*(z) - r(z))^2 \geqq 0)$ in prostimi parametri A_{ij} najdemo takšno funkcijo, ki ustreza vsem tokovnim funkcijam po prerezu (oz. prostoru) in robnim pogojem, kakršna je npr. tokovna funkcija za rotacijsko simetrično iztiskovanje, ki ima naslednjo obliko

$$\psi = \psi_0 \frac{r^2}{r^*(z)^2} + (r^2 - r^*(z) \sum_{i=0}^{I} \sum_{j=0}^{J} A_{ij}\, r^{2i+2} \,.\, z^{j+1} \quad (13)$$

pri kateri velja

$$\psi_0 = \tfrac{1}{2}\, v_p \,.\, r^*(z)^2 \quad (14)$$

lahko iz nje izračunamo tudi hitrostne komponente v_r in v_z iz naslednjih zapisov

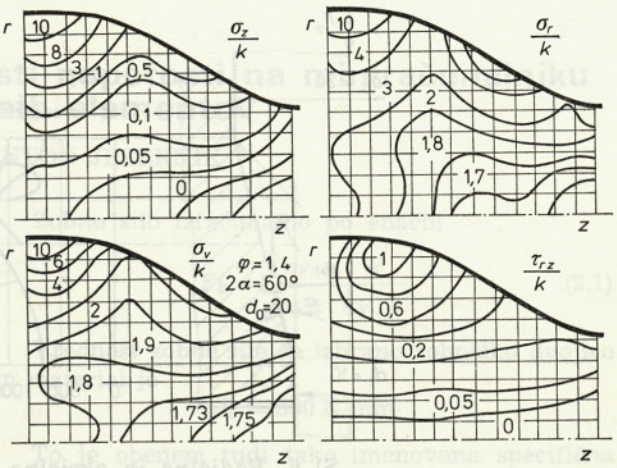
$$v_r = \frac{2\,\psi_0\, r}{r^*(z)^3} \frac{\partial r^*(z)}{\partial z} + 2\, r^*(z) \frac{\partial r^*(z)}{\partial z} \sum_{i=0}^{I} \sum_{j=0}^{J} A_{ij}\, r^{2i+1} \,.\, z^{j+1} - (r^2 - r^*(z)^2 \sum_{i=0}^{I} \sum_{j=0}^{J} A_{ij}\, (j+1)\, r^{2i+1} \,.\, z^j \quad (15)$$

$$v_z \frac{2\,\psi_0}{r^*(z)^2} + 2 \sum_{i=0}^{I} \sum_{j=0}^{J} A_{ij}{}^{2i+2}\, z^{j+1} + (r^2 - r^*(z)^2 \sum_{i=0}^{I} \sum_{j=0}^{J} A_{ij}\, (2\,i + 2)\, r^{2i} \,.\, z^{j+1} \quad (16)$$

Z odvajanjem teh dveh funkcij (15 in 16) po r oz. po z dobimo po (2) deformacijske hitrosti $\dot{\varepsilon}_r$, $\dot{\varepsilon}_z$, $\dot{\varepsilon}_{rz}$ in ε_ϑ ter nato iz (4) napetostne funkcije naslednjih oblik

$$\sigma_r = \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{N} B_{mn} \,.\, n(n-1)\, r^{2m+2} \,.\, z^{n-2} + \sum_{p=0}^{P} \sum_{q=0}^{Q} c_{pq}\, r^{2p} \,.\, z^q \quad (17)$$

$$\sigma_z = \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{N} B_{mn}\, (2\,m + 3)\, (2\,m + 2)\, r^{2m} \,.\, z^n \quad (18)$$

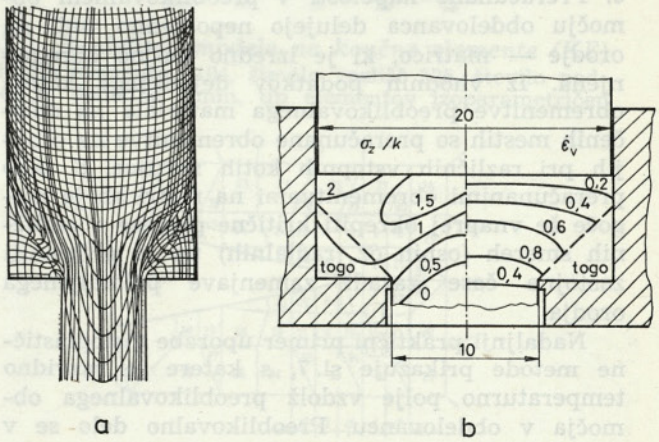


Sl. 4. *Napetostna polja po preoblikovalnem prerezu*

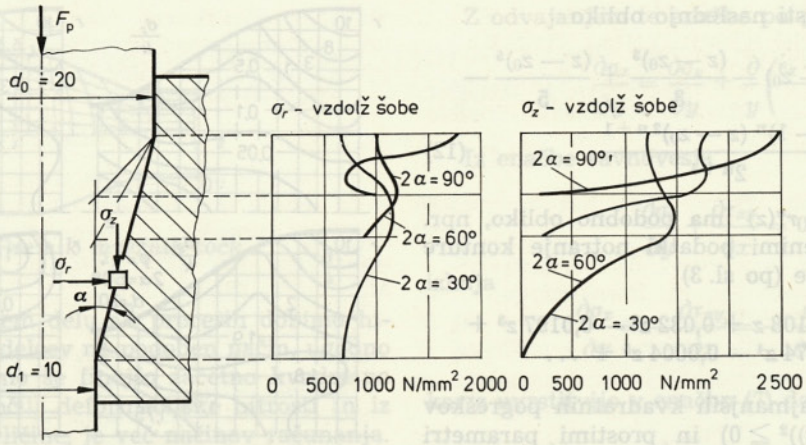
ter preračunamo njihove vrednosti za čim več točk deformiranega prostora. Dobljene vrednosti vpišemo v deformirano mrežo ter nato še med seboj povežemo enake vrednosti. Tako nastale krivulje predstavljajo napetostno polje po preoblikovalnem prerezu (sl. 4).

Ob tem je treba poudariti, da napetosti po celotnem prerezu niso konstantne veličine, kakor se o tem v praksi velikokrat na hitro in površno odloča (misleč predvsem na podobnost s hidrostatičnim tlakom).

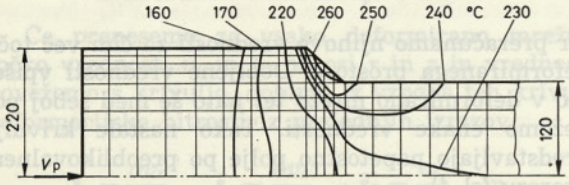
Za hitrostno in napetostno stanje upoštevamo predvsem naslednje robne in simetrijske pogoje: enakomerna vstopna hitrost pestiča v_p = const; na osi z je $v_r = 0$; tokovna funkcija mora biti simetrična glede na os z; z matrico določena robna krivulja $r^*(z)$ je tokovnica, za katero velja $\psi = \psi_0 =$ = const; normalne napetosti kakor tudi hitrosti so simetrične glede na vzdolžno os z; osne napetosti na izhodu iz matrice morajo imeti vrednost nič.



Sl. 5. *Razmere pri iztiskovanju (2 a = 180°)*



Sl. 6. *Radialne in aksialne napetosti v matrici — orodju*



Sl. 7. *Temperaturno polje pri iztiskovanju aluminijeve zlitine ($v_p = 0.017$ m/s, $2\alpha = 90^0$)*

Napetostno polje pri enosmernem iztiskovanju (sl. 4) prikazuje napetostno stanje pri vstopnem in izstopnem polmeru $r_1 = 10$ mm oz. $r_2 = 5$ mm, kar povzroča logaritmično deformacijo $\varphi = 1{,}38$ pri dvojnem kotu vstopnega stožca $2\alpha = 60^0$.

Pri matricah z večjimi vstopnimi koti ($2\alpha > 90^0$) se pojavljajo že težave pri preračunavanju po celotnem preoblikovalnem območju zaradi zastojnih območij v ostrejših prehodih. V takih primerih, kjer so pogoji tečenja zelo slabi, lahko vzamemo, da so ta mesta toga (sl. 5).

Praktični primer uporabe računanja napetostnega stanja z visioplastično metodo prikazuje slika 6. Preračunane napetosti v preoblikovalnem območju obdelovanca delujejo neposredno tudi na orodje — matrico, ki je izredno močno obremenjena. Iz vhodnih podatkov dejanskega stanja obremenitve preoblikovalnega materiala na določenih mestih so preračunane obremenitve na orodjih pri različnih vstopnih kotih matrice. S tako preračunanimi obremenitvami na matricah je mogoče že vnaprej okrepiti kritične prereze v različnih smereh (osnih oz. radialnih) ter si prihraniti zastojne čase zaradi zamenjave polomljenega orodja.

Nadaljnji praktični primer uporabe visioplastične metode prikazuje sl. 7, s katere je razvidno temperaturno polje vzdolž preoblikovalnega območja v obdelovancu. Preoblikovalno delo se v preoblikovalnem območju skoraj v celoti spremeni v toploto. Ker so preoblikovalna dela oz. zanjo porabljene energije zelo velike, je tudi poznavanje poteka temperaturnih polj izredno pomembno, saj so matrice dejansko hkrati obremenjene z velikimi dinamičnimi temperaturnimi kakor tudi napetostnimi obremenitvami.

Pri iztiskovanju aluminijevih zlitin in drugih kovinskih profilov moramo poznati odvisnost med temperaturo, ki je navzgor omejena, in hitrostjo, ki jo omejuje in daje stroj. Temperaturne in druge spremembe, ki presegajo dovoljene, lahko (posebno pri aluminijevih zlitinah) vplivajo na lokalna taljenja, spremembe kristalnih faz, nastajanju in širjenju razpok ipd. Raziskavo smo izvedli tako, da smo z ustreznim računalniškim modelom opazovali parametrično spreminjanje temperaturnega polja med delovnim procesom iz dobljenih rezultatov sklepali npr. o primerni hitrosti stroja.

LITERATURA

[1] K. Lange: Lehrbuch der Umformtechnik, Band 1, 2; Springer-Verlag, Berlin 1972.

[2] M. Geiger: Näherungsrechnung zur Ermitlung des Spannungs- und Bewegungszustandes beim Fliessen eines starrplastischen Werkstoffes; Ind. Anz. 89 (1967) Nr. 81 (str. 1778—1781).

[3] E. Steck: Numerische Bechandlung von Verfahren der Umformtechnik; Girardet, Essen 1971.

[4] P. Leš: Povezava med deformacijami, deformacijskimi hitrostmi in napetostmi v plastičnem področju za izotropne in nestisljive materiale; SV, Ljubljana 1983/7—9.

[5] P. Leš: Nekatere zakonitosti plastičnega tečenja anizotropnih stisljivih kovin; Ljubljana, SV 1983/10—12.

[6] P. Leš in sodelavci: Računalniški model temperaturnega polja izohorne ekstruzije aluminija; Raziskovalna naloga RSS, E 785/532—1979.

Naslova avtorjev: izr. prof. dr. Peter Leš, mag., dipl. inž.
red. prof. dr. Andro Alujevič, dipl. inž.
oba VTŠ Maribor