

UDK 621.83.062.2:621.9

Izbira optimalnega načina stopnjevanja pri odrezovalnih strojih

HINKO MUREN

Uvod

Zaradi očitnih prednosti geometričnega stopnjevanja je bilo to predpisano kot obvezno z vsemi znanimi nacionalnimi standardi. Znano pa je, da geometrično stopnjevanje ni idealno in kaže tudi svoje pomanjkljivosti. Že Kronenberg [1] je opozoril na to, da pri geometričnem načinu stopnjevanja dobivamo sicer ustrezno stopnjevanje vrtilne hitrosti, hkrati pa neustrezno stopnjevanje premerov, zato je kot primernejše predlagal tako imenovano logaritmčno stopnjevanje. V svojem delu razlaga, kako pridemo do tega stopnjevanja, ne navaja pa preproste računske metode za določitev številčnih vrednosti. Ker je razmišljanja omejil na struženje, dobljenih sklepov o boljši ustreznosti logaritmčnega stopnjevanja ne smemo posploševati na vse odrezovalne stroje. Naslednji sestavek skuša pojasniti, kako bi bilo treba dobiti vsakokrat najustreznejši način stopnjevanja.

1. Aritmetično stopnjevanje

Vrtilno hitrost izračunamo po enačbi:

$$n_i = n_{min} + (i - 1) c,$$

pri čemer je

$$c = \frac{n_{max} - n_{min}}{z - 1}$$

Aritmetično stopnjevanje ne prihaja v poštev za glavne pogone, ker pri večjih premerih šele po zelo veliki spremembi premera dobimo spet ustrezno vrtilno hitrost. Nasprotno srečujemo pri podajalnih pogonih strojev za rezanje navojev (npr. univerzalni stružnici) nekakšno psevdo-aritmetično

stopnjevanje. Vrtilna hitrost oziroma podajanje sta v določenem omejenem območju stopnjevana aritmetično, v naslednjem območju pa se konstanta stopnjevanja spreminja (tabela 1).

2. Geometrično stopnjevanje

Vrtilno hitrost računamo po enačbi:

$$n_i = n_{min} \cdot \varphi^{i-1},$$

pri čemer je:

$$\varphi = \sqrt[z-1]{\frac{n_{max}}{n_{min}}}$$

Ker je premer obratno proporcionalen vrtilni hitrosti, dobimo tiste premere, za katere imamo ustrezne vrtilne hitrosti, po enačbi:

$$d_i = \frac{d_1}{\varphi^{i-1}}$$

pri čemer je:

$$d_1 = \frac{v_c}{\pi \cdot n_{min}}$$

Premeri, pri katerih nahajamo ustrezne vrtilne hitrosti, so torej stopnjevani geometrično, kar pomeni, da bo spet skok pri večjih premerih prevelik, tako da pri delu na področju velikih premerov zelo pogosto ne bomo mogli delati z ustrezno hitrostjo.

Ker standardi za frezala predpisujejo zunanje premere orodij po decimalnem geometričnem zaporedju s faktorjem stopnjevanja $\varphi = 1,25$, bo za frezalne stroje edino primerno geometrično stopnjevanje vrtilne hitrosti z istim faktorjem stopnjevanja.

Tabela 1. Velikosti podajanj menjalnika za rezanje metrskega navoja

Območje	Podajanja s [mm]	Konstanta c
I	0,25 — 0,3 — 0,35 — 0,4 — 0,45 — 0,5	0,05
II	0,5 — 0,6 — 0,7 — 0,8 — (0,9) — 1	0,1
III	1 — 1,25 — 1,5 — 1,75 — 2	0,25
IV	2 — 2,5 — 3 — 3,5 — 4 — 4,5 — 5 — 5,5 — 6	0,5

3. Recipročno stopnjevanje

Pri vrtilnih strojih uporabljamo orodja (svedre, grezila, povrtala), ki so stopnjevana aritmetično (čeprav z različnimi konstantami stopnjevanja za posamezne premere). Premere, za katere bomo morali imeti na stroju ustrezne vrtilne hitrosti, lahko računamo po enačbi:

$$d_i = d_{max} - (i - 1) \cdot \Delta d,$$

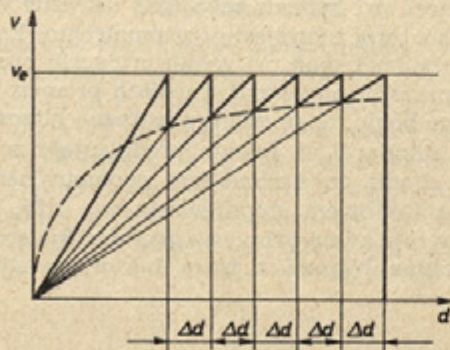
pri čemer je $\Delta d = \text{konst.}$ in pomeni skok med dvema standardnima premeroma orodij.

Iz tega izhaja, da dobivamo standardne vrtilne hitrosti po enačbi:

$$n_i = \frac{v_{min}}{\pi} \cdot \frac{1}{d_{max} - (i - 1) \cdot \Delta d}$$

Tako izračunane vrtilne hitrosti tvorijo zaporedje, ki ga bomo imenovali recipročno zaporedje. Bistvo tega stopnjevanja je razvidno iz žagastega diagrama na sliki 1. Kakor vidimo, zobje žagaste črte sicer nimajo vseskozi enake višine, kar pomeni, da bodo pri majhnih premerih odstopki od zaželenih hitrosti v_e nekaj večji kakor pri večjih premerih, širina zob pa je po vsem območju enaka Δd .

Za stroje, pri katerih uporabljamo orodja, ki imajo premere standardizirane aritmetično, bi bilo idealno samo recipročno stopnjevanje vrtilne hitrosti.



Slika 1

4. Logaritmično stopnjevanje

Bistvo logaritmičnega stopnjevanja je pojasnil Kronenberg v svojem delu [1], vendar ni podal preproste metode za računanje vrtilnih hitrosti. Iz njegovih predpostavk je mogoče izpeljati po razmeroma preprosti poti, da se premeri pri logaritmičnem stopnjevanju lahko računajo po enačbi:

$$d_i = d_{i-1} - k \cdot d_{i-1}^m,$$

pri čemer je treba izbrati $d_i = d_{max}$. Vrtilne hitrosti lahko potem računamo po enačbi:

$$n_i = \frac{v_{min}}{\pi \cdot d_i}$$

V zgornjih enačbah je m eksponent logaritmičnega stopnjevanja, k pa konstanta, ki pomeni:

$$k = \frac{\varphi d - 1 \text{ mm} - 1}{\varphi d - 1 \text{ mm}}$$

kjer je $\varphi d = 1 \text{ mm}$ razmerje dveh sosednjih vrtilnih hitrosti pri premeru $d = 1 \text{ mm}$ (če bi zaporedje podaljšali do tega premera).

Pri numeričnem izračunu, če se naslonimo na primer, ki ga navaja Kronenberg, izberemo najprej nekje v sredini območja premerov premer d_i , pri katerem je vrednost $d_{i-1} - d_i$ enaka kakor pri geometričnem stopnjevanju za enako območje. Če izberemo potem še vrednost za eksponent m , lahko izračunamo iz enačbe za d_i konstanto k .

Eksponent m lahko izberemo poljubno med vrednostma $m = 0$ in $m = 1$. Za $m = 0$ se logaritmično stopnjevanje spreminja v recipročno, za $m = 1$ pa v geometrično stopnjevanje. Obe poprej opisani stopnjevanji sta torej samo posebna primera logaritmičnega stopnjevanja. Razen tega ne govori v prid izbire logaritmičnega stopnjevanja nobena zakonitost, ki bi bila zasnovana na razmerah pri odrezavanju.

5. Aplicirana stopnjevanja

Pri struženju valjastega obdelovanca na vse manjši in manjši premer bi bilo treba globino rezanja izbrati za vsak naslednji sloj tako, da bi bil povprečni upogib konstanten. Pri struženju med konicami je povprečni:

$$f = \frac{F_a}{EI} \cdot \frac{l^3}{48} = \frac{4}{3\pi E} \cdot \frac{F_a l^3}{d^4}$$

Če vzamemo, da je odzivna rezalna sila:

$$F_a = k_a a s f_s = K_a \frac{d_{i-1} - d_i}{2} \cdot s f_s,$$

dobimo za povprečni upogib (če ne upoštevamo, da se je medtem zaradi struženja premer spremenil):

$$f = \frac{2 l^3 \cdot K_a \cdot s \cdot f_s}{3 \pi E} \cdot \frac{d_{i-1} - d_i}{d_i^4}$$

Iz tega izhaja:

$$d_{i-1} = d_i + \frac{3 \pi E f}{2 l^3 K_a \cdot s \cdot f_s} \cdot d_i^4$$

ali tudi:

$$d_i = d_{i+1} + \frac{3 \pi E f}{2 l^3 K_a \cdot s \cdot f_s} \cdot d_{i+1}^4$$

S to enačbo lahko izračunamo ustrezno zaporedje premerov, iz tega pa tudi vrtilne hitrosti po enačbi:

$$n_i = \frac{v_{min}}{\pi d_i}$$

Tako dobljeno stopnjevanje bi utegnilo biti dobro npr. za stroj za težko struženje valjarniških valjev, pri katerem je treba odstružiti veliko materiala v več plasteh.

Stroj, ki bi stružil na poprej obdelanih kosih samo eno plast, bi moral imeti premere stopnjevanje glede na dodatek za obdelavo. Če predpostavimo, da bi bil dodatek za obdelavo proporcionalen premeru, velja enačba:

$$d_i - d_{i+1} = 2 a_0 + K d_i$$

Vsakokratna globina rezanja je po tej enačbi enaka neki osnovni globini rezanja a_0 , povečani za dodatek, ki je proporcionalen premeru.

Iz gornje enačbe izhaja:

$$d_{i+1} = (1 - K) d_i - 2 a_0$$

To enačbo bi lahko pisali tudi v obliki:

$$d_i = (1 - K) d_{i-1} - 2 a_0$$

Če izhajamo iz tega, da je $d_1 = d_{max}$, lahko hitro izračunamo stopnjevanje premerov, iz njega pa na že znani način stopnjevanje vrtilnih hitrosti.

6. Sklep

Pri določanju numeričnih vrednosti za optimalno stopnjevanje je treba izhajati iz zaželenega stopnjevanja premerov. Šele po numeričnem izračunu zaporedja premerov lahko v vsakem primeru izračunamo tudi ustrezno stopnjevanje vrtilnih hitrosti.

Optimalni način stopnjevanja ni niti geometrično niti logaritmčno stopnjevanje, ampak ga je treba od primera do primera posebej določati glede na delovne zahteve. Pri tem je priporočljivo najprej določiti ustrezne premere. Žal je praktična uporabnost gornjih izvajanj precej omejena, ker za dobljeno optimalno zaporedje vrtilnih hitrosti ni mogoče vedno izdelati menjalnika, ki bi ustrezal tudi vsem drugim zahtevam. Znano je, da je za večje število prestav mogoče izdelati ustrezen menjalnik

v vsakem primeru le za geometrično stopnjevanje, vendar bi se v nekaterih primerih dalo idealnim zahtevam vsaj približati, npr. če konstruiramo menjalnik z dvojnimi ali morebiti celo s trojnimi geometričnim stopnjevanjem, pri katerem bi bili faktorji stopnjevanja izbrani tako, da bi bil žagasti diagram čim bližje žagastemu diagramu idealnega stopnjevanja.

7. Označbe

a	... globina rezanja
a_0	... začetna globina rezanja
c	... konstanta aritmetičnega stopnjevanja
d	... premer
d_{max}	... maksimalni premer
f	... povprečje obdelovanja
f_s	... specifična rezalna sila
k	... konstanta logaritmčnega stopnjevanja
k_a	... koeficient za izračun odzivne sile (razmerje med odzivno in glavno silo)
l	... dolžina obdelovanca pri struženju med konicami
m	... eksponent logaritmčnega stopnjevanja
n	... vrtilna hitrost (indeks označuje vrstni red)
n_{max}	... maksimalna vrtilna hitrost
n_{min}	... minimalna vrtilna hitrost
s	... podajanje
v_0	... zaželena rezalna hitrost (optimalna ali ekonomska, glede na siceršnje razmere)
v_{min}	... minimalna rezalna hitrost
z	... število stopenj
E	... modul elastičnosti
F_a	... odzivna sila
I	... vztrajnostni moment
K	... konstanta apliciranega stopnjevanja
φ	... faktor stopnjevanja

8. Literatura

- [1] ... M. Kronenberg: Grundzüge der Zerspansungslehre I. Springer-Verlag, Berlin, 1954.
- [2] ... F. Koenigsberger: Berechnungen, Konstruktionsgrundlagen und Bauelemente spanender Werkzeugmaschinen. Springer-Verlag, Berlin, 1961.
- [3] ... P. Stanković: Mašine alatke I. Građevinska knjiga, Beograd, 1965.

Avtorjev naslov:

prof. dr. ing. Hinko Muren,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani