

Zaradi obrabe se spektri razsipanja spreminjajo, rezalna sposobnost brusov pa se zmanjša pod 1. Ta lastnost se da izraziti kot inverzna prenosna funkcija obrabe, in sicer:

$$\{[\Phi(i\omega)]^{-1} = \frac{S_x(\omega)}{S_{y_{gr}}(\omega)} \cdot \frac{D_x}{D_{y_{gr}}} \quad (23)$$

Spremembo rezalne sposobnosti brusa 32 A 60 J 8 nad frekvenco kaže slika 19. Doba obstojnosti brusa je funkcija oblike krivulje za rezalno sposobnost. Vsakokratni prerezi odrezkov so — kakor kažejo raziskave — bistveno odvisni od tega, kakšne oblike je prenosna funkcija brusilnega postopka oz. njena inverzna funkcija obrabe.

Prenosne funkcije za hrapavost in obrabo omogočajo vpogled v transformacije spektrov razsipanj. Tako je mogoče opisati postopek brušenja, ki je karakteriziran z izrazito stohastičnimi lastnostmi vhodnih in izhodnih veličin, s prenosno funkcijo, ki jo je mogoče optimirati. Za določanje optimalnih pogojev brušenja ne bodo več potrebni dolgotrajni in dragi eksperimentalni poskusi, temveč bo možno reševati ta vprašanja z analognimi računskimi stroji.

8. Literatura

1. Pahlitzsch, G. und Helmerdig, H., Bestimmung und Bedeutung der Spandicke beim Schleifen, Der Betrieb Nr. 11/12, 1943.
2. Reichenbach, G. S., Mayer, J. E., Kalpakcioglu, S. and Shaw, M. C., The Role of Chip Thickness in Grinding, Trans. ASME 1956, S. 847—859.
3. Sato, K., On the Surface Roughness in Grinding, The Technology Reports of the Tohoku University, Vol. XX, 1955, No. 1.
4. Orioka, T., On the Grinding Geometry for the Random Spacing of Abrasive Grains on Wheel Surface, Report of the Faculty of Eng., Yamanashi University, No. 8, July, 1957.
5. Peklenik, J., Versuchsergebnisse zur Ausbildung der Schneidelemente an Schleifwerkzeugen, Ind. Anz. 1961, Nr. 97, S. 1929—1936.

6. Brückner, K., Der Schleifvorgang und seine Bewertung durch die auftretenden Schnittkräfte, Dissertation T. H. Aachen, 1962.

7. Pugačev, V. S., Theorie der Zufallsfunktionen und ihre Anwendung in der Regelungstechnik, Mašgiz Moskau, 1957.

8. Pahlitzsch, G. und Appun, J., Einfluß der Abrichtbedingungen auf Schleifvorgang und Schleifergebnis beim Rundschleifen, Werkstattstechnik und Maschinenbau 53/9, S. 396.

9. Schwartz, K. E., Zerspanungsablauf und Schleifergebnis beim Außenrundschleifen, Dissertation T. H. Aachen, 1959.

10. Brückner, K., Betrachtungen zum Verschleißvorgang beim Schleifen, Industrie-Anzeiger, 1960, p. 553—558.

11. Peklenik, J., Neue statische und dynamische Prüfmethode der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Schleifkörpern, Industrie-Anzeiger 1960, Nr. 28, S. 425—430.

12. Peklenik, J., Opitz, H., Testing of Grinding Wheels, Proc. 3rd Int. Prod. Conf. in Birmingham, 1962 September, S. 163—177, Pergamon Press, Oxford, London 1963.

13. Opitz, H. und Saljé, E., Wesen und Bedeutung der Rauhtiefe beim Außenrundschleifen, Ind. Anz. 52/1, S. 8.

14. Saljé, E., Grundlagen des Schleifvorganges, I. Teil: Die Rauhtiefe beim Schleifen. Wt. u. Betr. 53/2, 45.

15. Pahlitzsch, G., Über die Wirtschaftlichkeit stufenloser Einstellbarkeit von Schleifscheiben- und Werkstückdrehzahl beim Rundschleifen, Microtecnic, 1956, Nr. 6, S. 276—282.

16. Opitz, H. und Frank, H., Richtwerte für das Außenrundschleifen, Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 965, Westdeutscher Verlag Köln und Opladen, 1961.

17. Peklenik, J., Contribution to the Correlation Theory for the Grinding Process, Journal of Engineering for Industry, Trans ASME, Series B, vol. 86, 1964, pp. 97—106.

18. Peklenik, J., Grundlagen zur Korrelations-theorie technischer Oberflächen. Industrie-Anzeiger 1965, 30. III.

Avtorjev naslov: Prof. dr. ing. Janez Peklenik, University of Birmingham, Anglija

DK 621.951.002

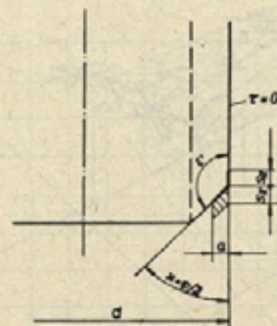
Prispevek h geometriji povrtala

EVGEN MAREK

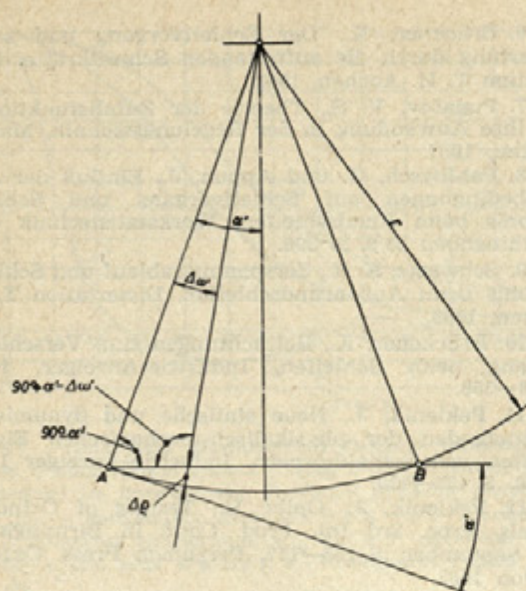
Povrtalo je orodje za fino izdelavo površine v luknji. Luknja mora biti izdelana navadno v ozki toleranci, vrhu tega pa mora biti površina gladka. Ze velikost dodatka vpliva na kvaliteto obdelane ploskve. Premajhen dodatek po nepotrebnem utrjuje površino, prevelik dodatek pa čezmerno obremenjuje povrtalo; oba pogoja pa slabita obstojnost povrtala.

Po geometriji je povrtalo navidezno enostavno orodje. Povrtalo reže samo z označenim rezalnim robom na površini in v dolžini podajanja na zob s_z na valjastem delu rezalnega roba (slika 1). Ker je aktivni del konice majhen, mnogokrat pozabljajo na najvažnejše elemente.

Slika 1 prikazuje tri kote v konvencionalni obliki. S skice je razvidno, da je prednji nastavni kot $\alpha = \frac{\varphi}{2}$.



Slika 1



Slika 2

zadnji nastavni kot $\tau = 0$. Zato je kot konice — v primeru, če povrtalo ni dvakrat prirezano — $\varepsilon = \varepsilon' = 180 - \alpha$. Že ta prikaz kaže, da je del rezalnega roba zaradi $\tau = 0$ izpostavljen močnejšemu trenju kakor pri normalni rezalni konici.

Lego cepilne ploskve določata radialni cepilni kot γ' in aksialni cepilni kot γ_a . Ker lega cepilne ploskve pri obrabi nima odločilne vloge, jemljemo za analizo, da je oblikovan samo radialni cepilni kot γ' . Aksialni cepilni kot $\gamma_a = 0$.

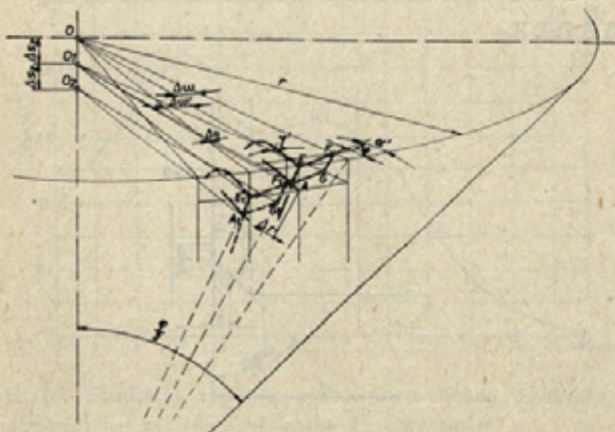
Odločilno vlogo pri obrabi konice ima lega prostih ploskev. Le-ta ima na valju prosti kot α' , prosta ploskev na stožcu pa prosti kot α .

Oblikovanje radialnega prostega kota α' je enostavnejše. Po sliki 2 vidimo, da prosta ploskev ne sme biti preširoka. Preširoka prosta ploskev bi že v točki B zadevala v obdelano ploskev, pri večji širini pa bi povrtalo na valju delalo s hrbtom. Izpolnjevanje tega pogoja za rezanje pri brušenju hrbta ni težavno. Geometrični pogoj po vsej širini hrbta je mogoče izraziti z enačbo:

$$\Delta\varphi \geq 0$$

Po sliki 2 izračunamo $\Delta\varphi$ iz enačbe:

$$\frac{r - \Delta\varphi}{r} = \frac{\sin(90 - \alpha')}{\sin(90 + \alpha' - \Delta\omega')} = \frac{\cos \alpha'}{\cos(\alpha' - \Delta\omega')}$$



Slika 3

Izhaja:

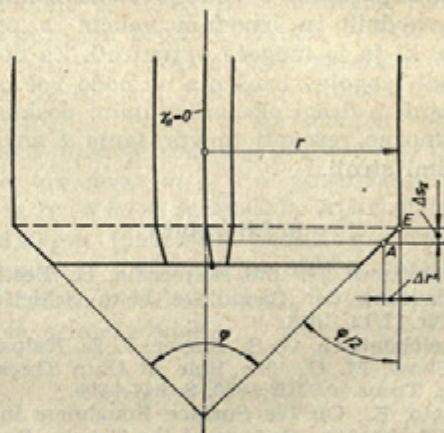
$$\Delta\varphi = r \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos(\alpha' - \Delta\omega')} \right] \geq 0 \quad (1)$$

Vrednost $\Delta\varphi = 0$ je v primeru, kadar je

$$\Delta\omega' = 2\alpha'$$

Središčni kot hrbta $\Delta\omega'$ sme biti največ enak dvojnemu prostemu kotu α' .

Mnogo težavnejše je oblikovanje proste ploskve na stožčastem prirezu povrtala. Geometrijo proste ploskve zapleta podajanje povrtala. Na sliki 3 so aksonometrično prikazane razmere, ki nastajajo pri zasuku povrtala za kot $\Delta\omega'$ in sočasnem podajanju za vrednost Δs_z . Pri tej operaciji se premakne točka E na rezalnem robu do mesta E₁, točka A na rezalnem robu pa do mesta A₁. Točka F na prosti ploskvi, ki zaostaja za točko E za kot $\Delta\omega$, se premakne na enak polmer, kakor je bila prej točka A, ki je sočasno točka na obdelani ploskvi. Pogoj, da točka F₁ ne zadene na obdelano ploskev, je, da je na manjšem polmeru od polmera točke A.



Slika 4

Zaradi boljšega ponazarjanja je lega točk A in E na povrtalu prikazana še v smeri pravokotno na cepilno ploskev (slika 4) in v smeri osi povrtala (slika 5). Na sliki 5 vidimo, da je treba pri natančnejšem računanju upoštevati še cepilni kot. Točka A ne leži na stožcu, temveč na polmeru, manjšem za vrednost $\Delta\varphi$.

Če hočemo primerjati prejšnjo lego točke A in novo lego točke F po zasuku povrtala za vrednost $\Delta\omega'$, moramo za vsako točko posebej izračunati njune oddaljenosti od kroga s polmerom r , na katerem je točka E povrtala.

Polmer točke A (r_A) je razlika med polmerom r in razdaljo $\Delta r = \Delta r' + \Delta\varphi$.

Vrednosti za $\Delta r'$ in $\Delta\varphi$ izračunamo vsako posebej.

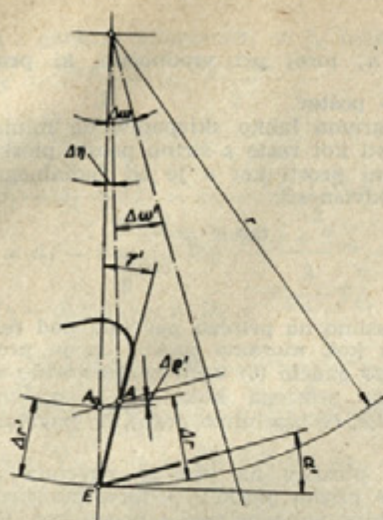
$$\frac{\Delta r'}{\Delta s_z} = \tan \frac{\varphi}{2}; \quad \Delta s_z = s_z \frac{\Delta\omega'}{360^\circ}$$

V drugi enačbi je s_z podajanje na zob pri enem

$$\text{vrtljaju povrtala } \Delta r' = \Delta s_z \cdot \tan \frac{\varphi}{2} = s_z \cdot \frac{\Delta\omega'}{360^\circ} \tan \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

Vrednost $\Delta\varphi$ izračunamo s kombinacijo kotov α' in γ' . Če uporabimo za sliko 5 sinusov izrek, dobimo:

$$\begin{aligned} \frac{r_A - \Delta\varphi}{r_A} &= \frac{\sin(90 - \alpha')}{\sin(90 + \alpha' - \Delta\eta)} = \frac{\cos \alpha'}{\cos(\alpha' - \Delta\eta)} \\ \Delta\varphi &= r_A \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos(\alpha' - \Delta\eta)} \right] = \\ &= (r - \Delta r) \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos(\alpha' - \Delta\eta)} \right] \end{aligned} \quad (3)$$



Slika 5

Iz enačb (2) in (3) izračunamo oddaljenost točke A od kroga s polmerom r .

$$\begin{aligned} \Delta r &= \Delta r' + \Delta \rho' = s_z \frac{\Delta \omega'}{360^\circ} \tan \frac{\varphi}{2} + \\ &+ \left(r - s_z \frac{\Delta \omega'}{360^\circ} \tan \frac{\varphi}{2} \right) \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \eta)} \right] \\ \Delta r &= r \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \eta)} \right] + \\ &+ s_z \frac{\Delta \omega'}{360^\circ} \tan \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \eta)} \end{aligned} \quad (4)$$

Povezavo vrednosti $\Delta \eta$ z radialnim cepilnim kotom γ' dosežemo, če — po sliki 5 — postavimo enačbo s sinusovim izrekom:

$$\begin{aligned} \frac{r - \Delta r}{r} &= \frac{\sin \gamma'}{\sin (180 - \gamma' - \Delta \eta)} = \frac{\sin \gamma'}{\sin (\gamma' + \Delta \eta)} \\ \Delta r &= r \left[1 - \frac{\sin \gamma'}{\sin (\gamma' + \Delta \eta)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Tu je treba še ugotoviti, če točka F zadene v obdelano ploskev. Točka F je od kroga s polmerom r oddaljena za razdaljo $\Delta \rho$. Razdaljo $\Delta \rho$ izračunamo s sinusovim izrekom, če upoštevamo podatke s slike 3:

$$\begin{aligned} \frac{r - \Delta \rho}{r} &= \frac{\sin (90 - \alpha')}{\sin (90 + \alpha' - \Delta \omega)} = \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \omega)} \\ \Delta \rho &= r \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \omega)} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Po zasuku za kot $\Delta \omega'$ in aksialnem premiku Δs_z je točka F v novi legi F_1 in leži na enakem polmeru, kakor je bila točka A pred zasukom in premikom. Če nečemo, da bi hrbet zoba zadela na obdelano ploskev, moramo izpolniti pogoj:

$$\Delta \rho > \Delta r$$

Ta pogoj sestavimo iz enačb (6) in (4):

$$\begin{aligned} r \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \omega)} \right] &> r \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \eta)} \right] + \\ &+ s_z \frac{\Delta \omega'}{360^\circ} \tan \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \eta)} \end{aligned} \quad (A)$$

Pogoj lahko sestavimo tudi iz enačb (6) in (5):

$$r \left[1 - \frac{\cos \alpha'}{\cos (\alpha' - \Delta \omega)} \right] > r \left[1 - \frac{\sin \gamma'}{\sin (\gamma' + \Delta \eta)} \right] \quad (B)$$

Pogoj iz enačb (A) in (B) lahko postavimo v takšni obliki, da mora biti kot α' večji od kota α'_{min} , ki ga dobimo, če spremenimo oboje neenačbi v enačbi. Dve enačbi sta potrebni zato, ker je tudi kot $\Delta \eta$ spremenljivka.

$$\begin{aligned} r \left[1 - \frac{\cos \alpha'_{min}}{\cos (\alpha'_{min} - \Delta \omega)} \right] &= r \left[1 - \frac{\cos \alpha'_{min}}{\cos (\alpha'_{min} - \Delta \eta)} \right] + \\ &+ s_z \frac{\Delta \omega'}{360^\circ} \tan \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{\cos \alpha'_{min}}{\cos (\alpha'_{min} - \Delta \eta)} \end{aligned} \quad (A')$$

$$r \left[1 - \frac{\cos \alpha'_{min}}{\cos (\alpha'_{min} - \Delta \omega)} \right] = r \left[1 - \frac{\sin \gamma'}{\sin (\gamma' + \Delta \eta)} \right] \quad (B')$$

Iz obeh enačb lahko izračunamo α'_{min} iz:

$$\begin{aligned} \tan \alpha'_{min} &= \frac{r (\cos \Delta \omega - \cos \Delta \eta) - s_z \frac{\Delta \omega - \Delta \eta}{360^\circ} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \cos \Delta \omega}{r (\sin \Delta \eta - \sin \Delta \omega) + s_z \frac{\Delta \omega - \Delta \eta}{360^\circ} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \Delta \omega} \end{aligned} \quad (A'')$$

$$\tan \alpha'_{min} = \frac{\sin \gamma' \cos \Delta \eta + \cos \gamma' \sin \Delta \eta - \sin \gamma' \cos \Delta \omega}{\sin \gamma' \sin \Delta \omega} \quad (B'')$$

Če izenačimo desni strani enačb, lahko izračunamo vrednost $\Delta \eta$. Ker pa je $\Delta \eta$ izražen neposredno s kotom in njegovo trigonometrično funkcijo, ga lahko določimo samo grafično. Z znano vrednostjo $\Delta \eta$ lahko v enačbi »A« izračunamo minimalno vrednost prostega kota. Račun poenostavimo, če vzamemo, da je tudi radialni cepilni kot $\gamma' = 0$. V tem primeru je tudi $\Delta \eta = 0$. Enačba A'' dobi poenostavljeno obliko:

$$\tan \alpha'_{min} = \frac{r - \cos \Delta \omega \left(r - s_z \frac{\Delta \omega}{360^\circ} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \right)}{\sin \Delta \omega \left(r - s_z \frac{\Delta \omega}{360^\circ} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (7)$$

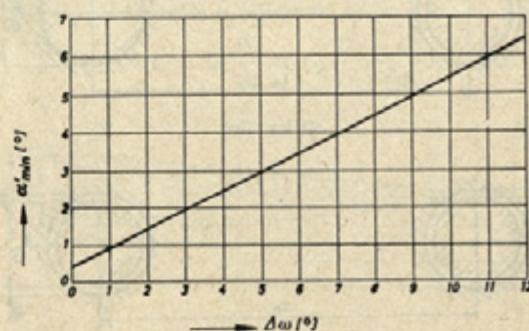
Da bi si ustvarili sliko, kakšen bi naj bil kot α'_{min} , smo izračunali zgled s pogojem, da se kot $\Delta \omega$ spreminja po 1° . Zgled je račun za povrtalo s podatki: $d = 20 \text{ mm}$, $\frac{\varphi}{2} = 45^\circ$, $s_z = 0,05 \text{ mm}$ (za povrtanje jekla).

Najprej je treba izračunati vrednost krivulje za kot $\Delta \omega = 0$

$$\tan \alpha'_{min} = \frac{r - \cos 0^\circ \left(r - s_z \frac{0^\circ}{360^\circ} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \right)}{\sin 0^\circ \left(r - s_z \frac{0^\circ}{360^\circ} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{0}{0}$$

Ker je rezultat nedoločen, je treba poiskati mejno vrednost:

$$\begin{aligned} \tan \alpha'_{min} &= \frac{r - \left(r - s_z \frac{\Delta \omega}{2\pi} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \right) \left(1 - \frac{\Delta \omega^2}{2!} + \frac{\Delta \omega^4}{4!} - \dots \right)}{\left(r - s_z \frac{\Delta \omega}{2\pi} \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \right) \left(\Delta \omega - \frac{\Delta \omega^3}{3!} + \frac{\Delta \omega^5}{5!} - \dots \right)} \end{aligned}$$



Slika 6

$$\tan \alpha'_{\min} = \frac{s_z \cdot \tan \frac{\varphi}{2}}{2\pi r} = \frac{0,05 \times 1}{2\pi \times 10} = 0,00796$$

$$\alpha'_{\min} = 27' 20''$$

Druge izračunane vrednosti so zbrane v razpredelnici.

$\Delta\omega$	0°	1°	2°	3°	4°	6°	8°	10°	12°
$\alpha'_{\min}$	27'20"	57'10"	1°27'40"	1°57'30"	2°27'50"	3°27'30"	4°27'30"	5°27'30"	6°27'30"

Medsebojna odvisnost je vrisana v diagramu (sl. 6).

Da bi imeli jasnejšo sliko o medsebojni odvisnosti, ki je pri manjših kotih linearna, je treba določiti osnovni enačbi za $\tan \alpha'_{\min}$ maksimum in minimum.

Zaradi enostavnejšega računanja nadomestimo:

$$\tan \alpha'_{\min} = y; \Delta\omega = x, \frac{s_z}{2\pi} \tan \frac{\varphi}{2} = a$$

Funkcija dobi potem obliko:

$$y = \frac{r - (r - ax) \cdot \cos x}{(r - ax) \cdot \sin x}$$

Če odvajamo, dobimo:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{[(r - ax) \sin x] \cdot [(r - ax) \sin x + a \cdot \cos x] - [(r - ax) \cos x] \cdot [(r - ax) \cos x - a \sin x]}{(r - ax)^2 \sin^2 x} = 0$$

$$(r - ax)^2 - r(r - ax) \cos x + ar \sin x = 0$$

Ker je v funkciji sočasno x in trigonometrična funkcija x , lahko x določimo grafično na mestih, na katerih je enačba

$$z = (r - ax)^2 - r(r - ax) \cos x + ar \sin x = 0.$$

Enačba je $z = 0$ pri vrednostih $x = 0, \frac{11}{12} \pi < x < \pi$,

$\pi < x < \frac{13}{12} \pi$; torej pri vrednostih, ki praktično ne prihajajo v poštev.

Iz diagrama lahko sklepamo, da minimalno potreben prosti kot raste s širino proste ploskve.

Resnični prosti kot α je od radialnega prostega kota α' v odvisnosti:

$$\tan \alpha' = \frac{\tan \alpha}{\cos \frac{\varphi}{2}} \quad (8)$$

Če brusimo na prirezu povrtala pod rezalnim robom prosti kot, moramo paziti, da je prosti kot α' izračunan po enačbi (8) večji za varnostno velikost od minimalnega prostega kota $\alpha'_{\min}$ izračunanega po enačbi (7). Le, če izpolnimo pogoje, bo povrtalo resnično rezalo.

Prosta ploskev na prirezu povrtala je izredno majhna. Če prosto ploskev podbrusimo strojno, tedaj še lahko oblikujemo primeren prosti kot. Ročno podbrusnje pa ne more zagotavljati pravilne lege proste ploskve, posebno ne zaradi tega, ker lege proste ploskve ni mogoče ugotoviti brez optične kontrole. Če se hočemo pri ročnem podbrusnje izogniti premajhnemu prostemu kotu in dobimo pri brušenju prevelik prosti kot, smo povrtalo oslabili proti mehanski obremenitvi na najbolj občutljivi točki, tj. na rezalni konici. Zato rezalno konico včasih jačimo z dvojnimi prirezom, ki zmanjšuje mehansko obremenitev ob prehodu v valjasti del povrtala. Posledica premajhnega kota pa je še neugodnejša. Povrtalo se prav ob prehodu iz prireza v valjasti del najbolj greje, pri čemer tudi dvojni prirez ne more dosti pomagati.

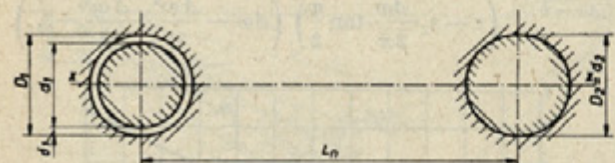
Avtorjev naslov: dipl. inž. Evgen Marek, DAJ, Iskra, Zavod za avtomatizacijo, Ljubljana

IZ PRAKSE ZA PRAKSO

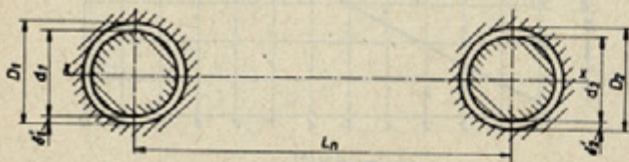
DK 621.91.07—229

POZICIONIRANJE OBDELOVANCEV Z ARETIRNIMI ČEPI

Pri serijski mehanični obdelavi bolj kompliciranih obdelovancev je obdelava po navadi razdeljena na več operacij. Obdelovanec je potrebno premeščati s stroja na stroj v zvezi z različnimi operacijami. Za pozicioniranje obdelovancev na stroj proti rezalnemu orodju in obdelovalnemu stroju rabijo razni sistemi, med njimi zelo pogosto aretirni čepi. V ta namen mora imeti obdelovanec dve aretirni luknji, ki imata enak ali različen premer. Luknji naj bosta kar mogoče oddaljeni med



Slika 1a



Slika 1b

seboj. Nekateri obdelovanci imajo funkcijske luknje, med katerimi je mogoče dve izbrati za aretirni. Aretirni luknji je treba navadno še posebej obdelati na natančnejši premer in natančnejše medsebojno razdaljo. S tem dajemo obdelovancu natančnejšo pozicijo.

Najenostavnejši primer pozicioniranja obdelovancev z aretirnimi čepi je prikazan na sliki 1. Oba aretirna čepa sta valjasta. Tako pozicioniramo obdelovance, ki nimajo predpisanih ozkih toleranc in je zato mogoče njihovo premikanje na aretirnih čepih. Pri tej izvedbi mora ohlap δ neposredno kompenzirati napako v medsebojni razdalji aretirnih lukenj in aretirnih čepov. Ohlap δ lahko določamo samo ob enem aretirnem čepu ali pa ob obeh.

Izvedba z ohlapom δ_1 samo ob enem aretirnem čepu (slika 1a):

$$\delta_1 = \frac{T_{L1} + T_{L2}}{2}$$

$$\delta_2 = 0$$

$$d_1 = D_1 - 2\delta_1 = D_1 - (T_{L1} + T_{L2})$$

$$d_{1max} = d_1 - 2\psi_1 = D_1 - (T_{L1} + T_{L2}) - 2\psi_1$$

$$d_2 = D_2$$

$$d_{2max} = D_2 - 2\psi_2$$

$$\Delta x_{max} = 2\psi_2 + T_{L2} + T_{L1}$$

$$\Delta y_{1max} = 2(\delta_1 + \psi_1) + T_{L1} + T_{L2}$$

$$\Delta y_{2max} = 2\psi_2 + T_{L2} + T_{L1}$$

$$\tan \alpha = \frac{2\delta_1 + 2\psi_1 + 2\psi_2 + T_{L1} + T_{L2} + T_{L2}}{2L_n}$$

$$\tan \alpha = \frac{2(\delta_1 + \psi_1 + \psi_2) + T_{L1} + T_{L2} + T_{L2}}{2L_n}$$