

rotów czy wielkości posuwów. Otóż kierować się tutaj należy głównie zasadą opłacalności czasu. Czas zmiany prędkości obrotowej czy wielkości posuwów wynosi $0,06 \div 0,10$ minuty. Zatem wtedy wskazane jest zmieniać n czy p , kiedy ta zmiana da zysk na czasie większy od czasu trwania samej zmiany. Przy obliczeniach normy bez posługiwania się charakterystyką obrabiarki ta zasada również powinna mieć zastosowanie. Wtedy projektowane czynności pomocnicze zmian warunków obróbki będą zgodne z rzeczywistą potrzebą.

III. Optymalizacja parametrów skrawania przy specyficznych warunkach obróbki

1. Dobór parametrów skrawania przy zmiennych warunkach obróbki

W obróbce przedmiotów skrawaniem występują przypadki, kiedy to w czasie trwania tej obróbki zachodzą systematycznie ciągle lub skokowe zmiany w warunkach przebiegu procesu skrawania. Zmiany te mogą wynikać na skutek zmian w wymiarach, kształtach i kierunkach obróbki. Zmieniać się może przekrój warstwy skrawanej (np. przy cięciu piłą tarczową prętów profilowych), szybkość skrawania (np. przy toczeniu poprzecznym) czy też posuw rzeczywisty (np. przy toczeniu kopiowym przedmiotów kształtowych). W dążeniu do polepszenia warunków eksploatacji obrabiarek konieczne jest uwzględnienie tych okoliczności czy to przez urządzenie do automatycznej zmiany parametrów skrawania (np. przez hydrauliczny posuw ustawiony na określoną siłę skrawania) czy też przez odpowiedni dobór wyjściowych stałych parametrów skrawania.

Osobnym zagadnieniem nie omawianym w tym punkcie jest sterowanie adaptacyjne parametrów skrawania w obrabiarkach sterowanych programowo. Automatyczna zmiana w czasie obróbki jednego lub kilku parametrów następuje w wyniku zakłóceń w przebiegu procesu skrawania na skutek zużywania się ostrza narzędzia, zmian charakteru wióra, tworzenia się narostu na powierzchni natarcia czy też powstawania drgań.

Tym niemniej zarówno przy systematycznych zmianach jak i przy sterowaniu adaptacyjnym konieczne jest wybranie kryteriów, wg których kierować się będziemy w optymalizacji parametrów skrawania w czasie obróbki. Oto możliwe kryteria optymalizacji warunków obróbki:

a) zachowanie stałego momentu skręcającego na wrzecionie np. przy głębokim wierceniu, gdzie regulacji podlega minutowy posuw narzędzia,

b) zachowanie stałej siły skrawania P_z przy zmieniającej się głębokości skrawania g i posuwie p , a niezmiennych obrotach n , dla lepszego wyzyskania mocy obrabiarki, np. przy toczeniu kopiowym, gdzie wg stałej mocy skrawania zmienia się posuw i głębokość skrawania,

c) zachowanie stałej szybkości skrawania v przy zmieniającej się średnicy obróbki D , a stałym posuwie p , np. przy specjalnych przecinarkach do prętów i tokarkach do stożków.

d) zachowanie stałej szybkości skrawania v przy zmieniającej się średnicy obróbki D oraz przy posuwie p dostosowującym się do zmian głębokości skrawania g czy zmian średnicy D ; ten przypadek przedstawia jak dotąd raczej możliwość teoretyczną.

Przy zmieniających się warunkach obróbki zazwyczaj automatycznej zmianie podlega prędkość obrotowa n albo posuw p .

A zatem spotkać się można z automatyczną zmianą prędkości obrotowej oraz wielkości posuwów.

Najprostszym przykładem do analizy efektu, jakim będzie zmniejszenie czasu głównego obróbki i wskazanie metody postępowania, jest ciągła zmiana posuwu p przy toczeniu powierzchni stożkowej o zmieniającej się wielkości nadkładu materiałowego g . Dla uproszczenia rozumowania przyjmuje się stałą prędkość obrotową n oraz warunek $pg = \text{const}$ (stały przekrój warstwy skrawanej). W przypadku toczenia stożka jak na rys. 0/25 wielkością posuwu wyjściowego będzie posuw p_1 odpowiadający największej głębokości skrawania g_1 . W takim razie można napisać dla posuwu średniego $p_{sr}g_{sr} = p_1g_1$, czyli

$$p_{sr} = p_1 \frac{g_1}{\frac{g_1+g_2}{2}} = p_1 \frac{2g_1}{g_1+g_2} \quad [0.37]$$

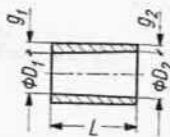
i wobec tego czas główny t'_g wyniesie

$$t'_g = \frac{L}{np_{sr}} = \frac{L}{np_1} \cdot \frac{g_1+g_2}{2g_1} \quad [0.38]$$

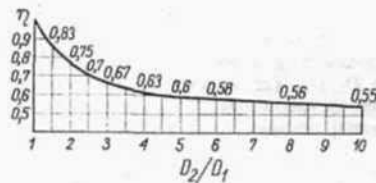
Porównując czas t'_g z czasem toczenia t_g ze stałym posuwem p_2 otrzymamy

$$\eta = \frac{t'_g}{t_g} = \frac{\frac{L}{np_1} \cdot \frac{g_1+g_2}{2g_1}}{\frac{L}{np_1}} = \frac{g_1+g_2}{2g_1} \quad [0.39]$$

Jeśli $g_1 = 2g_2$ to $\eta = 0,75$, to znaczy, że przez zastosowanie ciągłej zmiany posuwów czas główny obróbki t_g został zmniejszony o 25% w stosunku do przypadku obróbki ze stałym posuwem określanym wg największej głębokości skrawania.



Rys. 0/25. Przykład toczenia powierzchni stożkowej ze zmienną głębokością skrawania g



Rys. 0/26. Wykres do określenia współczynnika η skrócenia czasu głównego obróbki przy obróbce powierzchni stożkowej ze stałą szybkością skrawania v w zależności od stosunku skrajnych średnic D_1 i D_2

Rozpatrzenie efektu w zmniejszeniu czasu głównego dla przypadku stałej szybkości skrawania ($v = \text{const}$) daje następujące zależności

$$n_{sr} = n_2 \frac{2D_2}{D_1 + D_2} \quad [0.40]$$

$$t'_g = \frac{L}{pn_2} \cdot \frac{D_1 + D_2}{2D_2} \quad [0.41]$$

$$\eta = \frac{t'_g}{t_g} = \frac{\frac{L}{p_2 n_2} \cdot \frac{D_1 + D_2}{2 D_2}}{\frac{L}{n p_2}} = \frac{D_1 + D_2}{2 D_2} \quad [0.42]$$

Gdy więc $D_2/D_1 = 2$, to $\eta = 0,75$. Wzór [0.42] jest graficznie zilustrowany na rys. 0/26.

Badane dwa przypadki $pg = \text{const}$ i $v = \text{const}$ są najprostszymi przypadkami.

Rozwiązanie takich zagadnień jak obróbka przy stałej sile skrawania ($P_z = \text{const}$) czy stałej trwałości zalecanej ($T = \text{const}$) wymaga zastosowania rachunku całkowego nawet dla najprostszego kształtu obrabianej powierzchni, jaką jest powierzchnia stożkowa. Przyczyną tego faktu są złożone (nieliniowe) zależności zachodzące między parametrami obróbki p , g i v w stosunku do P_z i T , gdzie nie można przyjmować wartości średnich tak jak we wzorach [0.37] i [0.40].

Niech przykładem będzie toczenie poprzeczne. Przy stałej prędkości obrotowej n w miarę przejścia od średnicy większej D_2 do mniejszej D_1 następuje ciągła zmiana szybkości skrawania od maksymalnej wartości v_2 do minimalnej v_1 . Chodzi o takie dobranie początkowej szybkości v_2 , wyższej od normalnej v_z zalecanej dla toczenia zewnętrznego wzdłużnego, aby uwzględniając zmniejszenie się szybkości v przy toczeniu $L = (D_2 - D_1)/2$ do szybkości v_1 uzyskać taki sam stopień zużycia ostrza jak przy toczeniu wzdłużnym na tej samej drodze L z szybkością v_z .

Jak wynika z przeglądu różnych metod badania trwałości ostrzy przy toczeniu ze zmienną szybkością skrawania v , toczeniu poprzecznemu nie przypisuje się powstawania innych niż przy toczeniu wzdłużnym (przy tej samej geometrii skrawania) fizycznych zjawisk procesu skrawania. Jedynie występuje zmienność w trwałości ostrza T wg zależności $T = f(v)$. A zatem zależnie od stosunku średnic toczenia D_1/D_2 można wyjść przy średnicy zewnętrznej D_2 z wyższej szybkości v_p określonej jako

$$v_p = K_D v_z \quad [0.43]$$

gdzie: v_z — szybkość skrawania dla toczenia wzdłużnego w analogicznych warunkach (głębokość g , posuw p , geometria skrawania), a K_D — współczynnik poprawkowy zależny właśnie od stosunku D_1/D_2 . Ten współczynnik występuje np. w poradnikach radzieckich jak i w tablicach niniejszego opracowania. Uzasadnieniem doboru wartości K_D jest zasada zachowania stałej równoważnej trwałości ostrza noża tokarskiego.

Korzystając z zależności Taylora

$$v = \frac{C_v}{T^m} \quad [0.44]$$

($m = 1/s$ w przypadku wzoru [0.8]) można napisać, że na długości toczenia L trwałość ostrza T będzie wykorzystana odpowiednio do czasu trwania obróbki t_g

$$Z = \int_0^{t_g} \frac{dt}{T} = \int_0^{t_g} \left(\frac{v}{C_v} \right)^{\frac{1}{m}} dt \quad [0.45]$$

Dla toczenia zewnętrznego wzdłużnego przy stałej szybkości

$$v = \frac{\pi D_2 n_z}{1000}$$

wykorzystanie trwałości ostrza Z_z na długości toczenia L będzie

$$Z_z = \int_0^{t_g} \left(\frac{\pi D_z n_z}{1000 C_v} \right)^{\frac{1}{m}} dt = \left(\frac{\pi D_z n_z}{1000 C_v} \right)^{\frac{1}{m}} t_g \quad [0.46]$$

Natomiast przy toczeniu poprzecznym szybkość v ulega zmianie zależnie od średnicy D obróbki przy stałych obrotach n_p , a zatem w tym przypadku występuje zmieniająca się intensywność wykorzystania trwałości ostrza T i dlatego wzór na wykorzystanie tej trwałości Z_p trzeba napisać jako

$$Z_p = \int_0^{t_g} \left(\frac{\pi D n_p}{1000 C_v} \right)^{\frac{1}{m}} dt \quad [0.47]$$

Ponieważ czas trwania obróbki t od średnicy D_2 do średnicy D wynosi

$$t = \frac{D_2 - D}{2n_p p}$$

z tego wyliczając

$$D = D_2 - 2n_p p t$$

i podstawiając do wzoru [0.47], otrzyma się

$$Z_p = \left(\frac{\pi n_p}{1000 C_v} \right)^{\frac{1}{m}} \int_0^{t_g} (D_2 - 2n_p p t) dt \quad [0.48]$$

Korzystając ze wzoru na całkę nieokreśloną o postaci ogólnej

$$\int (a + bx)^n dx = \frac{(a + bx)^{n+1}}{b(n+1)} + C$$

można wyrażenie [0.48] przedstawić jako

$$\begin{aligned} Z_p &= \left[\left(\frac{\pi n_p}{1000 C_v} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{m}{m+1} \cdot \frac{1}{-2n_p p} (D_2 - 2n_p p t)^{\frac{m+1}{m}} \right]_0^{t_g} = \\ &= \left(\frac{\pi n_p}{1000 C_v} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{m}{m+1} \cdot \frac{1}{-2n_p p} \left[(D_2 - 2n_p p t_g)^{\frac{m+1}{m}} - \right. \\ &\quad \left. - D_2^{\frac{m+1}{m}} \right] \quad [0.49] \end{aligned}$$

Ale dla toczenia poprzecznego na drodze od D_2 do D_1 czas obróbki t_g będzie

$$t_g = \frac{D_2 - D_1}{2n_p p}$$

więc wykorzystując tę zależność wzór [0.49] daje się napisać w prostszej postaci

$$Z_p = \left(\frac{\pi n_p}{1000 C_v} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{m}{m+1} \cdot \frac{t_g}{D_2 - D_1} \left(D_2^{\frac{m+1}{m}} - D_1^{\frac{m+1}{m}} \right) \quad [0.50]$$

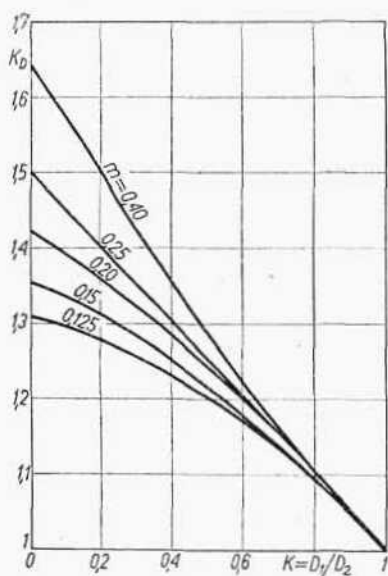
Przyjmując zasadę takiego doboru n_z/n_p , aby wykorzystanie trwałości ostrza w obu przypadkach było jednakowe czyli $Z_z = Z_p$, tj. zestawiając ze sobą wyrażenia [0.46] i [0.50] można potem przekształcając napisać

$$K_D = \frac{n_p}{n_z} = \left[\frac{m+1}{m} \cdot \frac{D_2^{\frac{1}{m}} (D_2 - D_1)}{D_2^{\frac{m+1}{m}} - D_1^{\frac{m+1}{m}}} \right]^m \quad [0.51]$$

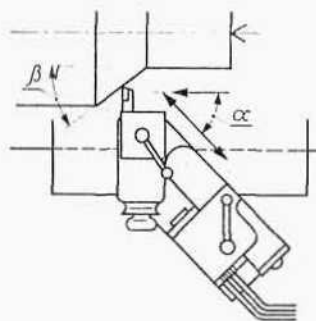
Jeśli stosunek średnic D_1/D_2 wyrazić ilorazem K , to wzór [0.51] da się przedstawić jako

$$K_D = \left(\frac{m+1}{m} \right)^m \left(\frac{1-K}{1-K^{\frac{m+1}{m}}} \right)^m \quad [0.52]$$

Podstawiając różne wartości K od 0 do 1,0 dla różnych wykładników potęgowych $m = 0,125 \div 0,5$ otrzyma się odpowiednie wartości współczynnika poprawkowego K_D , co ilustruje rys. 0/27. Dla $D_1 \rightarrow D_2$ wartość $K_D \rightarrow 1$, czyli zbliża się do utożsamiania prędkości obrotowych n_z i n_p .



Rys. 0/27. Współczynnik poprawkowy K_D do szybkości skrawania przy toczeniu poprzecznym zależnie od stosunku średnic $K = D_1/D_2$ i wykładnika potęgowego m w warunkach zachowania trwałości ostrza, jak przy toczeniu wzdłużnym



Rys. 0/28. Toczenie profilowego zarysu pod kątem β suportem kopiowym ze sterowaniem hydraulicznym przy ustawieniu go pod kątem α

Jeśli więc założyć się odpowiednie stopniowanie stosunku $K = D_1/D_2$, to dla każdego przedziału wartości K , można przy uśrednionych wartościach $m = 0,125 \div 0,25$ zalecić stosowanie następujących współczynników poprawkowych K_D dla toczenia poprzecznego

K	$< 0,2$	$0,2 \div 0,5$	$0,55 \div 0,8$	$> 0,8$
K_D	1,4	1,25	1,15	1,05

W ten sposób uzyskuje się utożsamianie warunków trwałości ostrza między toczeniem wzdłużnym i poprzecznym przy tej samej drodze skrawania.

Jeśli przy toczeniu poprzecznym przyjmowano by szybkość wyjściową v_p taką jak szybkość v_z dla toczenia wzdłużnego, to efekt w skróceniu czasu głównego byłby

$$\eta = \frac{1}{K_D} \quad [0.53]$$

np. przy stosunku $D_1/D_2 = 0,2$, efekt w czasie głównym będzie $\eta = 0,71$, tzn. oszczędność czasu wyniesie 29%.

Przy przyjęciu analogicznych założeń zachowując np. stałą siłę skrawania ($P_z = \text{const}$) i prędkość obrotową, zmieniając posuw p zależnie od głębokości skrawania g , efekt w czasie obróbki będzie

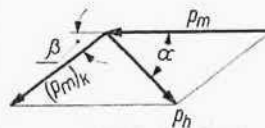
$$\eta = \frac{u_p}{u_p + 1} \cdot \frac{K^{\frac{u_p + 1}{u_p}} - 1}{\frac{1}{K^{u_p}} (K - 1)} \quad [0.54]$$

gdzie: $K = \frac{g_2}{g_1}$, a u_p — wykładnik potęgi przy posuwie p we wzorze [0.16].

Jeśli więc przyjąć dla noży tokarskich $u_p = 0,80$, to przy $k = 2$ ($g_1/g_2 = 1/2$) $\eta = 0,70$, tzn. przy dwukrotnym zmniejszaniu głębokości skrawania, zastosowanie odpowiednio wzrastającego posuwu p (tak, by zachować $P_z = \text{const}$) daje zmniejszenie czasu głównego o 30%.

Oczywiście wzrastanie posuwu jest ograniczone wymaganiami odnośnie chropowatości obrabianej powierzchni. Powyżej granicznej wartości posuwu, określonej ze względu na chropowatość powierzchni, należałoby toczyć ze stałym posuwem.

Na tokarkach kopiowych z hydraulicznym sterowaniem suportów umieszczonych na saniach, zachowanie stałego posuwu sań p w mm/obr. przy stałej prędkości obrotowej n daje stały posuw minutowy p_m w mm/min, co powoduje, że przy toczeniu przedmiotów profilowych powierzchnie ich [nie są obrabiane z jednakowym posuwem, a więc i z niejednakową chropowatością.



Rys. 0/29. Rozkład minutowych szybkości posuwowych sań p_m i suportu hydraulicznego p_h oraz ich wypadkowa szybkości kopiująca $(p_m)_k$ w przypadku toczenia powierzchni pod kątem β

Jeśli suport kopiowy będzie ustawiony pod kątem α względem ruchu sań (rys. 0/28), a powierzchnia obrabiana przedmiotu będzie tworzyć z kierunkiem ruchu kąt β , to szybkość kształtująca $(p_m)_k$ po tej powierzchni zachowa zależność (rys. 0/29),

$$\frac{p_m}{(p_m)_k} = \frac{\sin [180^\circ - (\alpha + \beta)]}{\sin \alpha} = \cos \beta + \text{ctg } \alpha \sin \beta \quad [0.55]$$

gdzie p_m — posuw minutowy sań w mm/min; stąd

$$(p_m)_k = \frac{p_m}{\cos \beta + \text{ctg } \alpha \sin \beta} = \frac{pn}{\cos \beta + \text{ctg } \alpha \sin \beta} \quad [0.56]$$

Przy stałej prędkości obrotowej n można napisać $(p_m)_k = p_k n$, a więc

$$p_k = \frac{p}{\cos \beta + \operatorname{ctg} \alpha \sin \beta} \text{ mm/obr} \quad [0.57]$$

Wielkość posuwu kształtującego p_k mm/obr wzdłuż zarysu przedmiotu zmienia się w zależności od kątów α i β .

Gdy ustawienie suportów jest pod kątem $\alpha = 45^\circ$, wtedy posuw kształtujący na powierzchni obrabianej

$$p_k = \frac{p}{\cos \beta + \sin \beta} \quad [0.58]$$

Przy kącie powierzchni obrabianej $\beta = 0^\circ$ i 90° posuw kształtujący $p_k = p$, a przy $\beta = 45^\circ$

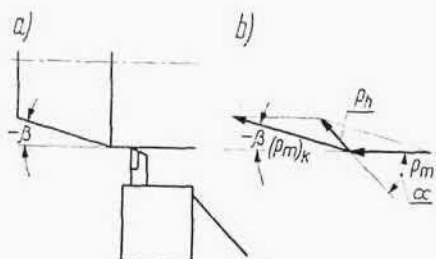
$$p_k = \frac{p}{\cos 45^\circ + \sin 45^\circ} = \frac{p}{\sqrt{2}} \text{ mm/obr}$$

Znaczy to, że przy toczeniu zarysów przedmiotów odchylonych od osi obróbki o kąt β , rzeczywisty posuw kształtujący p_k wzdłuż tego zarysu jest zmniejszony proporcjonalnie do wartości wyrażenia $(\cos \beta + \sin \beta)$. Największe zmniejszenie następuje przy kącie $\beta = 45^\circ$ i wynosi ono $\sqrt{2}$ razy. W takim razie obliczając czas główny obróbki pewnego zarysu przedmiotu nie wystarczy jako długość toczenia przyjąć długość rozwinięcia zarysu, ale trzeba również uwzględnić zmniejszone wielkości posuwu przy zarysach odchylonych od osi w granicach kątów $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

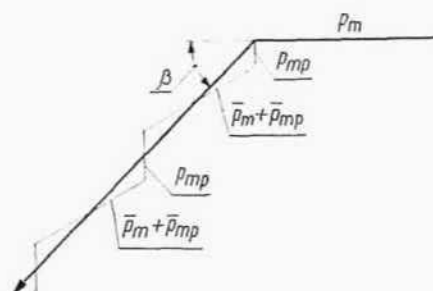
Przy ustawieniu suportu kopiowego pod kątem $\beta = 57,5^\circ$, rzeczywisty posuw kształtujący na obrabianej powierzchni kształtowanej będzie

$$p_k = \frac{p}{\cos \beta + 0,637 \sin \beta} \quad [0.59]$$

Gdy odchylenie toczzonego zarysu było $-\beta$ (rys. 0/30a), to rozkład szybkości ruchów posuwowych byłby taki, jak na rys. 0/30b, z czego widać, że rzeczywista szybkość posuwu kształtującego $(p_m)_k$ znacznie wzrasta w stosunku do posuwu



Rys. 0/30. Toczenie kopiowe zarysu z ujemnym kątem odchylenia $(-\beta)$; a) położenie suportu kopiującego, b) rozkład szybkości posuwowych



Rys. 0/31. Schemat ruchów posuwowych przy toczeniu kopiowym suportem sterowanym elektrycznie

podłużnego p_m . Wzory $[0.56] \div [0.58]$ mają tu także zastosowanie, pamiętać tylko trzeba, by na miejsce β wstawić $(-\beta)$. Przy ustawieniu suportu pod kątem $\alpha = -\beta$ suport musiałby mieć szybkość przesuwu hydraulicznego $p_h = \infty$, co oczy-

wicie jest niemożliwe. Dlatego też do każdego toczenia kopiowego należy dla suportu hydraulicznego określić właściwy kąt ustawienia α jako

$$\alpha = 90^\circ - \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2) \quad [0.60]$$

gdzie: zakres kątów kształtowania zazwyczaj od $\beta_1 < 0$ do $\beta_2 > 0$; jeśli przyjmie się skrajny przypadek $\beta_1 = -25^\circ$ i $\beta_2 = 90^\circ$, to kąt ustawienia suportu kopiowego będzie $\alpha = 57,5^\circ$. Ograniczenia w szybkości przesuwu hydraulicznego (tzn. w szybkości ruchu kopiowego) suportu powodują $(p_k)_{\text{dop}}$, że istnieje maksymalny posuw minutowy p_m przy danym kącie ustawienia α , co można wyliczyć z rozkładu szybkości ruchów na rys. 0/29.

Przy sterowaniu elektrycznym suportów kopiowych, zarys toczzonego przedmiotu powstaje na skutek nakładania się dwóch ruchów: minutowego ruchu podłużnego p_m i minutowego ruchu poprzecznego p_{mp} (rys. 0/31), przy czym każdy z nich w zależności od pochylenia zarysu może być raz ruchem ciągłym, raz przezywanym.

Szybkość posuwu kształtującego $(p_m)_k$ jest wypadkową składania wektorowego dwóch szybkości

$$(p_m)_k = \bar{p}_m + \bar{p}_{mk} \quad [0.61]$$

Analiza dwóch rodzajów sterowania przy toczeniu kopiowym zarysów przedmiotów wykazuje, że wielkość posuwu rzeczywistego $(p_m)_{rz}$ po tym zarysie nie jest stała, a zmiany jej zależą albo od kąta ustawienia suportu hydraulicznego, albo od przełożenia między posuwem poprzecznym i podłużnym przy sterowaniu elektrycznym. Wybór wielkości posuwu p mm/obr musi więc uwzględniać wymaganą chropowatość w miejscu największego posuwu, a ponadto sposób sterowania kopiowania i kąt ustawienia suportu kopiującego.

Jeśli przy toczeniu zarysu jest zastosowane automatyczne urządzenie do utrzymania stałej szybkości skrawania ($v = \text{const}$), czyli ze zmianą średnicy obróbki D następuje proporcjonalna zmiana prędkości obrotowej, to najkorzystniejsza będzie wtedy automatyczna regulacja wielkości posuwu.

W warunkach automatycznej zmiany warunków skrawania należy przeto dokładniej zapoznać się z charakterystyką wyników pracy urządzenia automatycznego i odpowiednio do tego ustalać obroty, posuwy i ostateczny czas główny obróbki, posługując się odpowiednio zmodyfikowanymi wzorami obliczeniowymi.

Tak np. dla toczenia kopiowego suportem sterowanym hydraulicznie i ustawionym pod kątem α analiza kinematyki ruchów wykazuje, że czas główny t_g jest równy czasowi toczenia wzdłużnego na długości L powiększonej zależnie od skrajnej różnicy średnic obróbki $(D_2 - D_1)$ i kąta α

$$t_g = \frac{1}{np} \left(L + \frac{D_2 - D_1}{2 \tan \alpha} \right) \quad [0.62]$$

przy czym posuw p dobiera się wg limitującego posuwu p_k .

2. Dobór warunków skrawania przy obróbce wielonarzędziowej

Sprawę doboru warunków skrawania przy obróbce wielonarzędziowej — polegającej zasadniczo na równoczesnej pracy wielu narzędzi — w praktyce najczęściej rozwiązuje się doświadczalnie. Zwykle pracę automatów i innych obrabiarek pracujących zespołami narzędzi regulują wysokokwalifikowani ustawiacze, którzy również w oparciu o swe doświadczenie rozwiązują problem doboru warunków skrawania.