

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, posuwu 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.

Jakość parametrów skrawania wobec niestosowania matematycznych metod obliczeniowych nie może być wówczas właściwie oceniona. Niewątpliwie dla racjonalnej eksploatacji drogich obrabiarek, jakimi są wszelkiego rodzaju automaty i półautomaty wielonarzędziowe, konieczne jest ustalenie parametrów skrawania w sposób techniczny, w oparciu o teorię skrawania jak to zaproponował np. G.I. Tiomczin (55), czy E.I. Feldstein (58). W obróbce wielonarzędziowej występują na ogół dwa zjawiska: zmniejszanie szybkości skrawania i zmniejszanie wielkości posuwu.

Ograniczenie wielkości posuwu p wynika najczęściej z następujących faktów:

a) wszystkie narzędzia bez względu na ich rodzaj pracują z jednakowym posuwem i wobec tego posuw musi być ustalony po uwzględnieniu narzędzia najsłabszego,

b) wszystkie narzędzia pracują przy jednakowej liczbie obrotów wrzeciona i wskutek tego może zachodzić konieczność zmniejszenia posuwu na skutek zwiększonej szybkości skrawania jednego czy kilku narzędzi.

c) z szeregu powierzchni o niejednakowej chropowatości powierzchnia o najniższej przewidzianej chropowatości (przy tych samych rodzajach narzędzi) wyznacza wielkość posuwu dla całego zespołu narzędzi,

d) przy zespołowej pracy narzędzi sumaryczny przekrój warstw skrawanych musi być dostosowany do dopuszczalnej siły skrawania P_z , względnie szybkość skrawania do mocy obrabiarki,

e) konstrukcja obrabiarki przewidziana na wielonarzędziowe uzbrojenie w wielu rozwiązaniach nie wykazuje wystarczającej sztywności, co wynika z ogólnych warunków konstrukcyjnych, np. jednowrzecionowe automaty wzdłużne, poprzeczne.

Zmniejszenie szybkości skrawania v jest spowodowane koniecznością zwiększania okresowej trwałości ostrzy T_{ew} tak, by straty wydajności obrabiarki wskutek wymiany stępionych narzędzi nie przekraczały dopuszczalnych wielkości. Innymi słowami można to wyrazić następująco: jeśli zespół narzędziowy składa się z i_N jednakowych narzędzi jednakowo obciążonych, to trwałość ich ostrzy T_e ustalona dla każdego narzędzia pracującego oddzielnie (nie w zespole) powinna być powiększona i_N razy, tzn.

$$T_{ew} = i_N T_e \quad [0.63]$$

Jeśli więc w głowicy wiertarskiej wielowrzecionowej jest 12 wiertel $\varnothing 10$ mm, to przy obróbce stali (wykładnik $s = 5$ – tabl. 0-2) i przy $T_e = 10$ min dla pojedynczego wiertła $\varnothing 10$, trwałość poszczególnych wiertel pracujących w zespole powinna być

$$T_{ew} = 12 \cdot 10 = 120 \text{ min}$$

i w myśl wzoru [0.10]

$$v_{120} = v_{10} \sqrt[5]{\frac{10}{120}} = 0,61 v_{10}$$

Znaczy to, że normatywną szybkość skrawania v_{10} należy zmniejszyć o 39%.

Jednakże trzeba wyjaśnić, że zalecany okres trwałości T_e dla pojedynczego narzędzia nie jest taki sam dla obrabiarek pracujących normalnie jednym narzędziem, jak dla obrabiarek pracujących zespołami narzędzi. Najlepiej można to zrozumieć np. przy przeprowadzeniu obliczeń za pomocą wzoru [0.9] dla noża tokarskiego

zastosowanego na czterech różnych obrabiarkach: na zwykłej tokarce uniwersalnej, na tokarce wielonarzędziowej, na wielowrzecionowym półautomacie tokarskim i na specjalnym agregacie tokarskim składającym się z wielu jednostek obróbkowych – przy założeniu, że obliczenia przeprowadzane są na raz dla przypadku, jak gdyby te obrabiarki pracowały jednym tylko narzędziem.

W tabl. 0-22 podano zestawienie składników obliczeniowych oraz wyniki. Z tych wyników wypływają następujące wnioski:

a) im droższa obrabiarka, tym okres trwałości ekonomicznej T_e jednego narzędzia jest mniejszy, co pozwala na zwiększenie szybkości skrawania (liczonej z punktu widzenia jednego rozpatrywanego narzędzia).

b) zmiana narzędzia i jego ustawienie dokonywane w czasie przerwy ogólnej w pracy powoduje zmniejszenie okresu trwałości ekonomicznej T_e tego narzędzia, a zatem pozwala na zwiększenie szybkości skrawania.

c) w liniach automatycznych koszt godzinowy wytwarzania stanowiska K_w jest tak wysoki, że stosunek $(K_{os} + K_n)/K_w$ staje się wartością nieznaczną w stosunku do t_{zm} tak, że $T_e \rightarrow (s-1)t_{zm}$ (to znaczy, że T_e dąży do trwałości maksymalnej wydajności T_w).

Tablica 0-22. Ekonomiczne okresy trwałości T_e noży tokarskich bocznych nakładanych płytą z węglików spiekanych (o wykładniku potęgowym $s = 5$) przy pracy jednym narzędziem na różnych rodzajach obrabiarek wielonarzędziowych

Okres zmiany narzędzia	Czas zmiany noża z ustawieniem t_{zm} min	Koszt eksploatacji noża $= K_{os} + K_n$ zł	Rodzaj obrabiarki		
			Tokarka wielonożowa	Półautomat tokarski wielowrzecionowy	Obrabiarka zespołowa wielopozycyjna
			Godzinowy koszt wytwarzania stanowiska K_w , zł		
			60,0	100,0	180,0
			Ekonomiczna trwałość T_e , min		
W czasie ogólnej pracy	5	10	60	44	33
W czasie przerwy ogólnej	—	10	40	28	13
Dla tokarki uniwersalnej przy $t_{zm} = 1,5$ min i $K_w = 45$ zł/h; $T_e = 59$ min					

W przypadku pracy pojedynczym nożem tokarskim o wykładniku $s = 5$, szybkość skrawania dla automatu tokarskiego wielopozycyjnego zalecana jako v_{30} będzie wynosiła w stosunku do szybkości v_{60} zalecanej obecnie przy tokarce uniwersalnej (dawniej liczono v_{90}).

$$v_{30} = v_{60} \sqrt[5]{\frac{60}{30}} = 1,15 v_{60}$$

Zmienia się w sposób istotny baza wyjściowa szybkości skrawania przy przejściu obróbki jednonarzędziowej na tokarce uniwersalnej na obróbkę wielonarzędziową

na automatach różnego rodzaju. Szybkość skrawania należałoby powiększać z uwagi na krótszy okres trwałości ekonomicznej T_{e1} dla pojedynczego narzędzia i następnie trzeba ją korygować (zmniejszać) zależnie od liczby narzędzi i_N biorących jednocześnie udział w obróbce. To już komplikuje sprawę. Lepiej wtedy dla tego rodzaju obrabiarek w ogóle oddzielnie opracować tablice normatywów szybkości skrawania, najpierw dla pracy jednym narzędziem i potem zastosować odpowiednie współczynniki poprawkowe zależnie od ilości narzędzi.

A zatem szybkość skrawania v_w w obróbce wielonarzędziowej można by określać wprost jako

$$v_w = \frac{v_{1(w)}}{i_N} \quad [0.64]$$

gdzie $v_{1(w)}$ — ekonomiczna szybkość skrawania dla pracy jednym narzędziem.

Bardziej złożony jest przypadek narzędzi jednorodnych, ale niejednakowo obciążonych pracą skrawania. Rozwiązanie tego przypadku można znaleźć w pracach G.I. Tiomczina (55,56) czy też J. Witthoffa (28). U podstaw ich rozwiązań leży optymalizacja szybkości skrawania w oparciu o zasadę najmniejszego kosztu operacji i dobór ekonomicznego okresu trwałości w warunkach niejednakowego obciążenia narzędzi.

Istotę rozwiązania zagadnienia można przedstawić następująco.

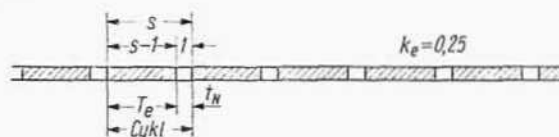
Wzór [0.9] na określenie ekonomicznego okresu trwałości ostrza skrawającego daje się przedstawić w postaci

$$\frac{t_N}{T_e} = \frac{1}{s-1} = k_e \quad [0.65]$$

gdzie

$$t_N = \left(t_{zm} + \frac{K_{os} + K_n}{K_w} 60 \right) \quad [0.66]$$

Wyrażenie [0.66] oznacza wielkość przerwy w pracy obrabiarki, jaka jest równoważna czasowi wymiany narzędzia i kosztów jego eksploatacji przeliczanych na jednostki czasu pracy obrabiarki. Współczynnik k_e ekonomiczności eksploatacji narzędzia można rozumieć jako dopuszczalny stosunek wielkości przerw narzędziowych t_N do wielkości okresu trwałości T_e . Wielkość tego współczynnika jest określona dla danego narzędzia i danych warunków obróbki przez wykładnik potęgowy s zależnością podaną we wzorze [0.65]. Rys. 0/32 jest graficzną interpretacją tego wzoru.



Rys. 0/32. Harmonogram czasu T_e pracy pojedynczego narzędzia i czasów jego zmian t_N przy współczynniku ekonomiczności $k_e = 0,25$

Jeśli więc $s = 5$ to wtedy ekonomicznie będzie przebiegała obróbka, gdy $k_e = 1/(s-1) = 0,25$. Znaczy to, że straty postojowe t_N obrabiarki równoważne czasowi wymiany narzędzia i czasowi pracy obrabiarki, odpowiadające wartości kosztów zużycia i ostrzenia narzędzia, muszą się utrzymywać w granicach 0,25 czasu okresu trwałości ekonomicznej T_e .

Gdy w pracy skrawania bierze udział zespół i_N jednakowych narzędzi o tym samym charakterystycznym wykładniku potęgowym s i jednakowo pracujących, to przerwy spowodowane wymianą poszczególnych narzędzi także nie mogą przewyższać ani być niższe od tego współczynnika ekonomiczności k_e , określanego w zależności od wykładnika s .

Wobec tego

$$k_e = \frac{1}{s-1} = \frac{t_{N1} + t_{N2} + \dots + t_{Nn}}{T_{ew}} = \frac{i_N t_N}{T_{ew}} \quad [0.67]$$

gdzie T_{ew} — trwałość ekonomiczna w przypadku obróbki wielonarzędziowej.

Na rys. 0/33 podano graficzną interpretację tego wzoru dla przypadku pracy trzech narzędzi takich samych, jak w przypadku rys. 0/32 i $k_e = 0,25$. Porównując długości odcinków można przekonać się, że w tym przypadku okres trwałości poszczególnych noży T_e w pracy zespołowej musi być powiększony trzy razy, jeśli chce się zachować ten sam współczynnik ekonomiczności $k_e = 0,25$ jak na rys. 0/32.



Rys. 0/33. Harmonogram czasów T_e pracy trzech narzędzi i czasów ich zmian t_N oraz harmonogram wynikowy dla całego zespołu narzędziowego przy współczynniku ekonomiczności $k_e = 0,25$

Jeśli poszczególne narzędzia o niejednakowym wskaźniku t_N nie będą miały jednakowego obciążenia czasem pracy skrawania, to na jeden cykl pracy zespołu narzędzi odpowiadający okresowi trwałości dla pracy wielonarzędziowej, udział przerw w pracy obrabiarki t_{Ni} dla poszczególnych narzędzi (o liczbie i w granicach od 1 do n) będzie wypadł różnie, stosownie do ich udziału u_{Ni} w pracy zespołu. W takim razie wzór [0.67] należy napisać w postaci

$$k_e = \frac{1}{s-1} = \frac{u_{N1} t_{N1} + u_{N2} t_{N2} + \dots + u_{Nn} t_{Nn}}{T_{ew}} \quad [0.68]$$

Udział pracy poszczególnego narzędzia u_{Ni} w pracy zespołu narzędzi określa się — przyjmując, że wszystkie narzędzia pracują z takim samym posuwem minutowym — jako stosunek długości skrawania tym narzędziem L_i do ogólnej długości obróbki zespołem narzędzi L_w

$$u_{Ni} = \frac{L_i}{L_w} \quad [0.69]$$

Ponieważ wyrażenie $(s-1)t_{Ni} = T_{ei}$, więc wzór [0.68] można wyrazić w następujący sposób

$$\frac{T_{e1}}{T_{ew}} u_{N1} + \frac{T_{e2}}{T_{ew}} u_{N2} + \dots + \frac{T_{en}}{T_{ew}} u_{Nn} = 1 \quad [0.70]$$

gdzie T_{ei} — trwałość ekonomiczna i -tego narzędzia na danej obrabiarce w warunkach obróbki jednonarzędziowej.

Przykład: pracują 3 noże o udziałach $u_1 = 0,4$, $u_2 = 0,9$ i $u_3 = 0,6$, okres trwałości ekonomicznej na danej obrabiarce w warunkach obróbki jednonarzędziowej jest dla nich jednakowy $T_{e1} = T_{e2} = T_{e3} = 45$ min. (obliczany jak w przypadku tabl. 0-22). Określić okres trwałości ekonomicznej dla zespołu narzędzi.

Rozwiązanie: stosując wzór [0.70] otrzymamy

$$\frac{45}{T_{ew}} \cdot 0,4 + \frac{45}{T_{ew}} \cdot 0,9 + \frac{45}{T_{ew}} \cdot 0,6 = 1$$

Skąd wypada $T_{ew} = 85,5$ min. Znaczy to, że należy tak dobrać warunki obróbki, aby każdy nóż uzyskał trwałość $T_{ew} = 85,5$ min. Oczywiście skutek różnego udziału noży w skrawaniu okresy ich wymiany będą różne, co w eksploatacji nie jest dogodne.

Ale sprawa komplikuje się przez bardziej istotny fakt, że przedmiot może mieć tylko jedną prędkość obrotową n_w , a poszczególne narzędzia skrawają na określonych średnicach, przez co z góry jest narzucony stosunek szybkości skrawania u tych narzędzi niezależnie od ich udziału w pracy skrawaniem i tym samym różną trwałość T_{ew} przy obróbce wielonarzędziowej. Jak więc dobrać optymalną prędkość obrotową n_w , spełniając zarazem warunek zachowania współczynnika ekonomiczności k_e podanego we wzorze [0.68]. Odpowiedź na to pytanie daje dalsze rozumowanie.

Z zależności typu [0.8] wynika, że stosunek trwałości

$$\frac{T_{ei}}{T_{ewi}} = \left(\frac{v_{wi}}{v_i} \right)^s = \left(\frac{n_w}{n_i} \right)^s \quad [0.71]$$

i wobec tego wzór [0.70] można ująć w postaci

$$\left(\frac{n_w}{n_1} \right)^s u_{N1} + \left(\frac{n_w}{n_2} \right)^s u_{N2} + \dots + \left(\frac{n_w}{n_n} \right)^s u_{Nn} = 1 \quad [0.72]$$

czyli

$$\left(\frac{1}{n_1} \right)^s u_{N1} + \left(\frac{1}{n_2} \right)^s u_{N2} + \dots + \left(\frac{1}{n_n} \right)^s u_{Nn} = \left(\frac{1}{n_w} \right)^s \quad [0.72a]$$

Dla udogodnienia obliczeń przyjmuje się nie $1/n_i$, a $1000/n_i$

$$\left(\frac{1000}{n_1} \right)^s u_{N1} + \left(\frac{1000}{n_2} \right)^s u_{N2} + \dots + \left(\frac{1000}{n_n} \right)^s u_{Nn} = \left(\frac{1000}{n_w} \right)^s \quad [0.73]$$

oznaczając wyrażenia

$$\left(\frac{1000}{n_i} \right)^s = W_i \quad [0.74]$$

otrzymamy ostatecznie użytkowe wzory

$$W_1 u_{N1} + W_2 u_{N2} + \dots + W_n u_{Nn} = W_w \quad [0.75]$$

$$n_w = \frac{1000}{\sqrt[s]{W_w}} \quad [0.76]$$

Otrzymany wzór [0.76] oznacza, że dla wszystkich narzędzi wybiera się ostatecznie wspólną prędkość obrotową n_w ale za to nie uzyskuje się dla nich jednakowej trwałości T_{ew} . Jest ona dla każdego narzędzia zróżnicowana. Zazwyczaj jej wartość znajduje się w pobliżu trwałości narzędzia T_{ei} najniższej prędkości obrotowej n_i , jeśli udział tego narzędzia w pracy skrawaniem jest dostatecznie duży.

Trwałość T_{ew} wypada dla jednych narzędzi nieco mniejsza od T_{ei} , a dla drugich ulega znacznemu powiększeniu: $(T_{ew})_i > T_{ei}$ nawet wielokrotnie. W sumie warunek zachowania współczynnika ekonomiczności k_e wg wzoru [0.68] jest spełniony.

Przy danej prędkości obrotowej n_w można z kolei obliczyć skorygowane szybkości skrawania $(v_w)_i$ dla każdego i -tego narzędzia

$$(v_w)_i = v_i \frac{n_w}{n_i} \quad [0.77]$$

i na podstawie nich — trwałość $(T_{ew})_i$ posługując się wzorem [0.10].

Sprawa staje się trudniejsza, gdy narzędzia wchodzące w skład zespołu mają różne wykładniki potęgowe s . Dla celów praktycznych w produkcji średnioseryjnej G.I. Tiomczin proponuje prowadzić obliczenia n_w wg wykładnika s tego narzędzia, które jest najbardziej obciążone i ogranicza wydajność obróbki.

Dalsze doświadczenia wykazały, że tę regułę można przyjąć i przy wyższych typach produkcji, a nadto w przypadku udziału pracy narzędzi $u_N > 0,7$, wystarcza przyjmować dla tego narzędzia $u = 1,0$.

Przykład. Niech będą trzy noże tokarskie na wspólnym suporcie, dla których w analizie technologicznej określono wstępnie następujące warunki obróbki:

noż nr 1: $D_1 = 106 \text{ mm}$ $n_1 = 150 \text{ obr/min}$ $L_1 = 20 \text{ mm}$

noż nr 2: $D_2 = 50 \text{ mm}$ $n_2 = 320 \text{ obr/min}$ $L_2 = 45 \text{ mm}$

noż nr 3: $D_3 = 64 \text{ mm}$ $n_3 = 250 \text{ obr/min}$ $L_3 = 30 \text{ mm}$

przy czym długość przesuwu roboczego zespołu noży wynosi $L_w = 50 \text{ mm}$. Prędkości obrotowe n_i obliczono wychodząc z okresowej szybkości skrawania $v_{45} = 50 \text{ m/min}$ (tzn. $T_{ei} = 45 \text{ minut}$ dla każdego noża). Wykładnik potęgowy $s = 4$. Określić optymalną prędkość obrotową n_w dla wrzeciona tokarki wielonożowej.

Rozwiązanie. Wg wzoru [0.69] obciążenia poszczególnych noży będą: $u_1 = 0,4$ $u_2 = 0,9$ $u_3 = 0,6$. Dla noża nr 2 przyjmuje się $u_2 = 1,0$, gdyż spełnia warunek $u_i > 0,7$. Stosując wzór [0.73] otrzymujemy

$$W_w = \left(\frac{1000}{150}\right)^4 \cdot 0,4 + \left(\frac{1000}{320}\right)^4 \cdot 1,0 + \left(\frac{1000}{250}\right)^4 \cdot 0,6 = 1049$$

Stąd prędkość obrotowa wrzeciona wg wzoru [0.76] będzie wynosiła

$$n_w = \frac{1000}{\sqrt[4]{1049}} = 177 \text{ obr/min}$$

Po znalezieniu optymalnej prędkości obrotowej n_w można z kolei określić rzeczywiste szybkości skrawania poszczególnych noży i rzeczywiste okresy trwałości. W tym celu wykorzystujemy wzory [0.77] i [0.10], na podstawie których otrzymuje się następujące wyniki:

$$(v_w)_1 = 59 \text{ m/min} \quad (T_{ew})_1 = 23 \text{ min}$$

$$(v_w)_2 = 27,6 \text{ m/min} \quad (T_{ew})_2 = 480 \text{ min}$$

$$(v_w)_3 = 35,4 \text{ m/min} \quad (T_{ew})_3 = 185 \text{ min}$$

Okazuje się, że każdy noż ma inny okres trwałości $(T_{ew})_i$ mierzonej czasem skrawania, przy czym noż nr 1 ma okres trwałości $T_{ew1} = 23 \text{ min}$ mniejszy od ekonomicznego okresu $T_{e1} = 45 \text{ min}$. zalecanego w przypadku obróbki jednonarzędziowej. Za to noże nr 2 i 3 mają okresy $(T_{ew})_i$ znacznie wydłużone. W sumie warunek ekonomiczności ujęty wzorem [0.72] jest spełniony, co można sprawdzić podstawiając znaną wartość $n_w = 177 \text{ obr/min}$.

Ekonomiczny okres trwałości i -tego narzędzia w warunkach obróbki wielonarzędziowej n -narzędziami można zgodnie z podejściem J. Witthoffa (28) najogólniej przedstawić jako

$$T_{ewi} = u_i(s-1) \left[\sum_{j=1}^n (t_{zm})_j w_{ij} + \frac{\sum_{j=1}^n (K_{os} + K_n)_j w_{ij}}{K_w} \right] \quad [0.78]$$

gdzie w_{ij} — wskaźnik wagi poszczególnych j narzędzi pod względem czasu zmiany narzędzia t_{zm} i kosztów narzędziowych $(K_{os} + K_n)$ w stosunku do okresu trwałości danego i -tego narzędzia.

Przy stosowaniu wspólnej prędkości obrotowej n_w i posuwu minutowego dla zespołu narzędzi skrawających na różnych średnicach D_i i różnym obciążeniu u_i , wskaźnik ten daje się wyliczyć wg wzoru

$$w_{ij} = \frac{u_j D_j}{u_i D_i} \quad [0.79]$$

Wskaźnik wagi w_{ij} jest niezbędny, gdy okresy wymiany poszczególnych narzędzi są niejednakowe.

Wzór [0.78] w warunkach jednakowej jednoczesnej pracy takich samych narzędzi da się przekształcić w postać [0.63], przyjmując $u_i = 1$ i $w_{ij} = 1$. Wtedy $T_{ei} = T_{ew}$. Trwałość każdego narzędzia T_{ei} odpowiada ekonomicznemu okresowi trwałości obróbki wielonarzędziowej.

Podejście ujęte wzorem [0.78] daje wyniki zgodne z założeniem wzoru [0.72].

Wypracowane przez G.I. Tiomczina czy J. Witthoffa zasady przeliczeń w doborze optymalnych prędkości obrotowych n_w , czy posuwów minutowych $(p_m)_w$ w obróbce wielonarzędziowej nie znajdują praktycznie szerszego zastosowania w przemyśle mimo przyjęcia stosowania zaleceń upraszczających. Zawiłość obliczeń stała się przeszkodą nie do pokonania. Nie korzystano także z pomocy EMC.

Okazuje się, że decydującym czynnikiem w doborze szybkości skrawania w obróbce wielonarzędziowej stała się przyjęta w praktyce taka organizacja obsługi narzędziowej na stanowisku roboczym, gdzie wymiana podstawowych narzędzi następuje w sposób planowy z określoną częstością 2÷4 razy w ciągu zmiany roboczej. Stosuje się więc system przymusowej wymiany grup narzędzi nie czekając na sytuacje awaryjne oraz wykorzystuje się wszelkiego rodzaju urządzenia i oprawki, pozwalające na szybką wymianę narzędzi już uprzednio przygotowanych na wymiar obróbki.

W konsekwencji tego np. najnowsza metodyka radziecka z 1967 r. (44) dla określonych obrabiarek z góry określa okres trwałości narzędzi T_w , zależnie od ilości narzędzi i stopnia równomierności ich obciążenia (tabl. 0-23). Okres trwałości wyraża się przy tym w minutach pracy maszynowej obrabiarki T_m (a więc $T_w = T_m$), co odpowiada okresowi trwałości T w minutach czasu skrawania narzędzi limitujących (tj. najbardziej obciążonych o udziale ich pracy $u_N \approx 1,0$). Dla narzędzi o słabszym obciążeniu ($u_i \leq 0,7$), okres trwałości T mierzonej czasem skrawania przyjmuje się jako

$$T_i = T_{wi} = T_m u_i \quad [0.80]$$

i wg tej trwałości dobiera się szybkości skrawania. Oczywiście w dalszych etapach obliczeń następuje odpowiednia synchronizacja prędkości obrotowych zależnie od charakterystyki obrabiarki i rozplanowania przebiegu procesu na obrabiarce.

Dla określonych rodzajów obrabiarek, przy założonej przeciętnie liczbie narzędzi, uczestniczących w obróbce wielonarzędziowej i przy średnim poziomie co do równo-

mierności ich obciążenia, można normatywnie ustalić jeden okres trwałości $T_w = T_m$ dla narzędzi limitujących. Np. dla automatów tokarskich wielowrzecionowych metodyka radziecka z 1970 r. (43) przyjmuje $T_w = 150$ minut.

Tablica 0-23. Okresy trwałości narzędzi T_w w obróbce wielonarzędziowej na obrabiarkach grupy tokarek z cyklem automatycznym (wg normatywów radzieckich z 1967 r.)

Nr stopnia	Stopień równomierności obciążenia narzędzi	Charakterystyka opisowa	Ilość narzędzi						
			3	5	8	10	15	20	> 20
			Zalecana trwałość T_w min						
I	wysoki	Mała różnica średnic obróbki $D_{max}/D_{min} < 2$; narzędzi poprzecznych mniej niż 20%	150	200	300	350	400	—	—
II	średni	warunki pośrednie między stopniem I i III	100	120	150	180	230	260	300
III	mały	Duże różnice średnic obróbki $D_{max}/D_{min} > 2$; kształtowych i nielimitujących > 50% ogólnej ilości narzędzi	70	90	110	130	150	170	180

Uwaga: trwałość T_w mierzona w minutach czasu pracy obrabiarki i dotyczy narzędzi limitujących o udziale w cyklu obróbki $u > 0,7$.

W rezultacie analityczna obliczeniowa metodyka G.I. Tiomczina, umożliwiająca wybór szybkości skrawania na zasadach najmniejszego kosztu operacji, zostaje zastąpiona przez metodykę opierającą się o organizacyjne warunki grupowych i przymusowych wymian narzędzi limitujących i założony z góry udział postojów obrabiarek na dokonanie tych czynności.

Przykład. Rozpatrzony przypadek obróbki trzema nożami na tokarce wielonarzędziowej przeanalizujemy wg metody narzędzia limitującego. Wg wskazań tabl. 0-23 przy stopniu równomierności obciążenia II, należy przyjąć okres trwałości $T_w = 100$ minut. Poszczególne noże mają obciążenia $u_1 = 0,4$, $u_2 = 0,9$ i $u_3 = 0,6$. Limitującym narzędziem będzie więc nóż nr 2 i dla niego okresem trwałości ma być $T_w = T_2 = 100$ min. Dla innych noży zgodnie ze wzorem [0.80] wypadnie: $T_1 = 40$ min i $T_3 = 60$ min. Przy wyjściowej okresowej szybkości skrawania $v_{45} = 50$ m/min dla zmienionych okresów nowe wielkości szybkości skrawania będą odpowiednio

$$v_{40} = 50 \sqrt[4]{\frac{45}{40}} = 51 \text{ m/min}$$

$$v_{100} = 50 \sqrt[4]{\frac{45}{100}} = 41,2 \text{ m/min}$$

$$v_{60} = 50 \sqrt[4]{\frac{45}{60}} = 46,5 \text{ m/min}$$

Prędkości obrotowe dla średnic $D_1 = 106$ mm, $D_2 = 50$ mm, $D_3 = 64$ mm wypadną jako $n_1 = 153$, $n_2 = 296$ i $n_3 = 204$ obr/min.

Prędkość obrotową n_w dla obróbki zespołem noży wybiera się wg najmniejszej obliczonej prędkości obrotowej n_1 , a więc w danym przypadku $n_w = n_1 = 153$ obr/min. Otrzymany wynik różni się o 14% względem $n_w = 177$ obr/min obliczonych metodą G.I. Tiomczina. Taka różnica mieści się w granicach normalnego stopniowania prędkości obrotowych na obrabiarkach do obróbki skrawaniem. Niewątpliwie przedstawiona metoda narzędzia limitującego jest prostsza w zastosowaniu.

Ale nie na tym koniec problemów doboru parametrów skrawania w obróbce wielonarzędziowej.

Okazuje się, że w procesach skrawania przebiegających automatycznie coraz większe znaczenie ma tzw. niezawodność pracy narzędzi. Lepiej jest częściej wymieniać narzędzia nawet nie w pełni stępione, ale w określonych odstępach czasu, niż dopuszczać do awaryjnego stanu ostrzy u narzędzi. Ponieważ zalecane okresy trwałości T_z , wg których są opracowywane normatywy szybkości skrawania, są rezultatem uśrednienia wyników badań zależności $v = f(T)$; więc trzeba się liczyć z obiektywnym faktem, że trwałości rzeczywiste T_{rz} ostrzy narzędzi podlegają zmienności, przyjmując wartości większe i mniejsze od normatywnej T_z . Przypadki wystąpienia $T_{rz} < T_z$ normatywnej są niepożądane i coraz częściej w obróbce automatycznej stosuje się taki współczynnik zmniejszający do szybkości skrawania, aby prawdopodobieństwo wystąpienia trwałości rzeczywistej $T_{rz} < T_z$ nie było większe niż np. od 2,5%.

Jeśli więc wymagać się będzie wysokiej niezawodności pracy narzędzi, to szybkość skrawania trzeba obniżyć względem wartości wynikających z normatywów dla danej trwałości T_z . Pytanie brzmi: o ile wtedy obniżyć szybkość skrawania? Sprawę tę wyjaśni uproszczony przykład.

Nóż tokarski o ostrzu z węglików spiekanych ($s = 4$) musi pracować niezawodnie przez $T_{min} = 105$ minut (ryzyko zawodności przyjęto na poziomie 2,5%). Z rozkładu empirycznego trwałości noży tokarskich normalnie ostrzonych w warunkach produkcyjnych przy obróbce danego rodzaju materiału z różnych dostaw wynika, że ten warunek może spełnić nóż, dla którego średni czas trwałości wynosi $T = 150$ minut. A zatem szybkość skrawania należy określić z tablic normatywów dla trwałości normatywnej $T_z = T = 150$ minut, choć rzeczywista trwałość eksploatacyjna została przyjęta na poziomie $T_{rz} = 105$ minut. Stosunek okresowych szybkości skrawania v_T wynosi

$$\frac{v_{150}}{v_{105}} = \sqrt[4]{\frac{105}{150}} = 0,91$$

Praktycznie nie wdając się w bliższą znajomość rozkładów empirycznych trwałości T , jeśli trwałość ostrza narzędzi odgrywa istotną rolę w niezawodności pracy kompletu narzędzi na zautomatyzowanej obrabiarence, to szybkość skrawania określoną z tablic normatywów dla pożądanego okresu trwałości należy dla uzyskania jego niezawodności zmniejszać o 10÷20%.

Na zakończenie trzeba ogólnie stwierdzić, że obecnie metodyka doboru warunków skrawania w obróbce wielonarzędziowej na liniach zautomatyzowanych zmierza do uwzględniania takich wymagań, jak niezawodność pracy zespołu narzędzi, trwałość wymiarowa i gładkościowa, optymalizacja ze względu na wydajność linii, przyjęty system wymiany narzędzi. Uwzględnienie tych wysokich wymagań możliwe jest ale przy użyciu odpowiednich programów obliczeniowych na elektronicznych maszynach cyfrowych. Interesujące w tym zakresie są prace G.I. Granowskiego (35), N.I. Paški (48), M.P. Bondaria i W.A. Dumańskiej (34). Oczywiście tego rodzaju przeliczenia są praktycznie przydatne dopiero dla warunków produkcji wielkoseryjnej i masowej.