

УДК 658.52

Prof. dr hab. inż. **Antoni Świć***, dr inż. **Jarosław Zubrzycki***, prof. dr hab. inż. **Marek Opielak***,
Dr inż. **Sadi Majdalawi****

*Politechnika Lubelska, Polska

**Palestyna

METODA KWALIFIKACJI CZĘŚCI DO WYTWARZANIA W ELASTYCZNYM SYSTEMIE PRODUKCYJNYM (ESP)

Przedstawiono sposób określania celowości obróbki przedmiotów w elastycznym systemie produkcyjnym (ESP), bez konieczności projektowania procesów technologicznych, w oparciu o ich złożoność technologiczną. Opracowano metodykę określania złożoności granicznej części. Pokazano, że w przypadku kiedy złożoność przedmiotu jest większa od złożoności granicznej wyznaczonej dla danego systemu produkcyjnego to obróbka jest opłacalna

Elastyczny system produkcyjny, przedmioty, efektywność.

Wstęp

Efektywność pracy elastycznych systemów produkcyjnych w znacznym stopniu jest uwarunkowana właściwym doбором przedmiotów, które będą w nich obrabiane. Przeprowadzenie analizy ekonomicznej w przypadku każdego z przedmiotów wdrażanych do produkcji lub już produkowanych jest kosztowne i czasochłonne. Wymaga ono opracowania procesów technologicznych zarówno dla obróbki w elastycznym systemie produkcyjnym jak i na obrabiarkach konwencjonalnych.

Opracowana metoda pozwala określić przydatność części do obróbki w ESP bez opracowywania procesu technologicznego (określana jest technologiczna złożoność części i porównywana z technologiczną złożonością graniczną wyznaczoną dla systemu produkcyjnego). Mimo, że jest to metoda prosta, to umożliwia otrzymanie wystarczająco dokładnych wyników (dokładniejszych od otrzymywanych w wyniku zastosowania metod stosowanych przy doborze części do obróbki na obrabiarki sterowane numerycznie), ponieważ uwzględnia się w niej więcej czynników, określających technologiczną złożoność części.

1. Określenie kryteriów oceny celowości obróbki przedmiotów w elastycznym systemie produkcyjnym

Znaczne koszty elastycznych systemów produkcyjnych powodują, że należy starannie dobrać części do obróbki; niektóre przedmioty można wykonać z większym efektem ekonomicznym na innych obrabiarkach. Przed wdrożeniem przedmiotu do obróbki w elastycznym systemie produkcyjnym należy więc oszacować jej opłacalność.

Jako kryterium oceny przyjęto jednostkowy koszt obróbki przedmiotu (K) i jednostkowy czas jego wykonania (T). Proces obróbki przedmiotu jest uzasadniony w przypadku wariantu obrabiarek technologicznie zamiennych, dla którego obróbka będzie mniej kosztowna. Wystąpi to wówczas, gdy:

$$K = K_{\min} \quad (1)$$

$$T = T_{\min} \quad (2)$$

Czas realizacji zadania technologicznego to czas od rozpoczęcia prac nad technologicznym przygotowaniem produkcji aż do dostarczenia ostatniej części do montażu (zbytu) [2, 8, 9].

Koszt realizacji zadania technologicznego jest sumą kosztów powstałych podczas przygotowania produkcji oraz kosztów realizacji procesu technologicznego [3, 10].

W wielu pracach (np. [4, 6]) autorzy uznają za istotne dwa ww. kryteria, tzn. czas i koszt realizacji zadania technologicznego.

Najczęściej stosowanym kryterium wyboru wariantu procesu technologicznego jest koszt jego realizacji [1, 5, 9], zwłaszcza w odniesieniu do jednej części (jednostkowy koszt wykonania części) [4, 6, 10]. Ograniczenie do jednego kryterium (kryterium kosztu) związane jest z tym, że w praktyce w większości zakładów przemysłowych wszystkie koszty określone są w funkcji czasu wykonania części.

W związku z tym, że jest to kryterium najczęściej stosowane, jako kryterium kwalifikacji części do obróbki w ESP przyjęto jednostkowy koszt wykonania części (K).

Przypisanie różnych składników kosztów do poszczególnych obrabianych części określa kalkulacyjny układ kosztów. Wyodrębnia on [8]:

- koszty bezpośrednie, które ponosi się przy produkcji konkretnych części (materiały bezpośrednie, robocizna),
- koszty pośrednie (np. amortyzacja, zużycie energii, koszty administracyjne, odsetki bankowe i inne), które są rozliczane na poszczególne części według klucza (najczęściej proporcjonalnie do robocizny bezpośredniej lub materiałów bezpośrednich).

Proces obróbki jest bardziej opłacalny w tym systemie, w którym jednostkowy koszt wykonania części będzie mniejszy.

Koszt wykonania części jest funkcją zmiennych wejściowych:

$$K=K(S, Z, P, L, O), \quad (3)$$

gdzie: K – koszt wykonania części, S – system produkcyjny, Z – złożoność technologiczna obrabianych części, P – program produkcyjny, L – liczebność partii produkcyjnej, O – warunki organizacyjne, ekonomiczne i techniczne.

Pod pojęciem złożoności technologicznej części rozumie się stopień skomplikowania przy uzyskaniu wymaganego kształtu, wymiarów, chropowatości oraz wzajemnego położeniu powierzchni części zgodnie z przyjętymi warunkami technicznymi jej obróbki na posiadanych (bazowych) urządzeniach technologicznych.

W przypadku konkretnego przedsiębiorstwa o znanych warunkach organizacyjnych (O) i rozpatrywania wytwarzania części w konkretnym systemie (S) koszt wykonania części (K) zależy od jej technologicznej złożoności (Z) oraz od wielkości programu produkcyjnego (P) i liczebności partii produkcyjnej (L).

Zależność (3) sprowadza się więc do:

$$K=K(Z, P, L), \quad (4)$$

gdzie: K, Z, P, L – oznaczenia jak wyżej.

Parametry (Z, P, L) określające akceptowalne koszty określają zakres racjonalnego wytwarzania części w systemie produkcyjnym (S), w warunkach organizacyjnych, ekonomicznych i technicznych (O) rozpatrywanego przedsiębiorstwa.

Celowość obróbki części w danym systemie produkcyjnym może być określona na podstawie złożoności technologicznej części obrabianych (Z), przy uwzględnieniu zależności pomiędzy kosztem wykonania części, a ich złożonością technologiczną, programem produkcyjnym i wielkością partii produkcyjnej.

Części, których złożoność technologiczna jest większa od złożoności technologicznej granicznej dla danego systemu kwalifikują się, ze względów ekonomicznych, do obróbki w ESP. W przeciwnym przypadku należy je obrabiać w innych systemach (na innych obrabiarkach).

Technologiczna złożoność graniczna elastycznego systemu produkcyjnego jest określana technologiczną złożonością części obrabianych, w przypadku których przy danej wielkości programu produkcyjnego i wielkości partii produkcyjny koszt wykonania części w ESP jest równy kosztowi ich wykonania w systemie bazowym.

Aby określić technologiczną złożoność graniczną systemu produkcyjnego należy:

- wybrać kilka reprezentatywnych rodzajów części spośród przewidywanych do obróbki w systemie (wyboru dokonuje technolog – ekspert zakładowy),
- określić koszty jednostkowe w przypadku rozpatrywanych rodzajów złożoności technologicznej części przy różnych wielkościach programu produkcyjnego i wielkości partii dla elastycznego systemu obróbkowego oraz systemu bazowego,
- na podstawie uzyskanych danych określić zależność funkcjonalną opisującą technologiczną złożoność graniczną systemu.

2. Analiza celowości obróbki przedmiotów w elastycznym systemie produkcyjnym w oparciu o ich złożoność

Celowość obróbki przedmiotów w ESP można określić na podstawie ich złożoności (Z). Złożoność uwzględnia takie cechy przedmiotu, jak: ilość powierzchni obrabianych, ich kształt

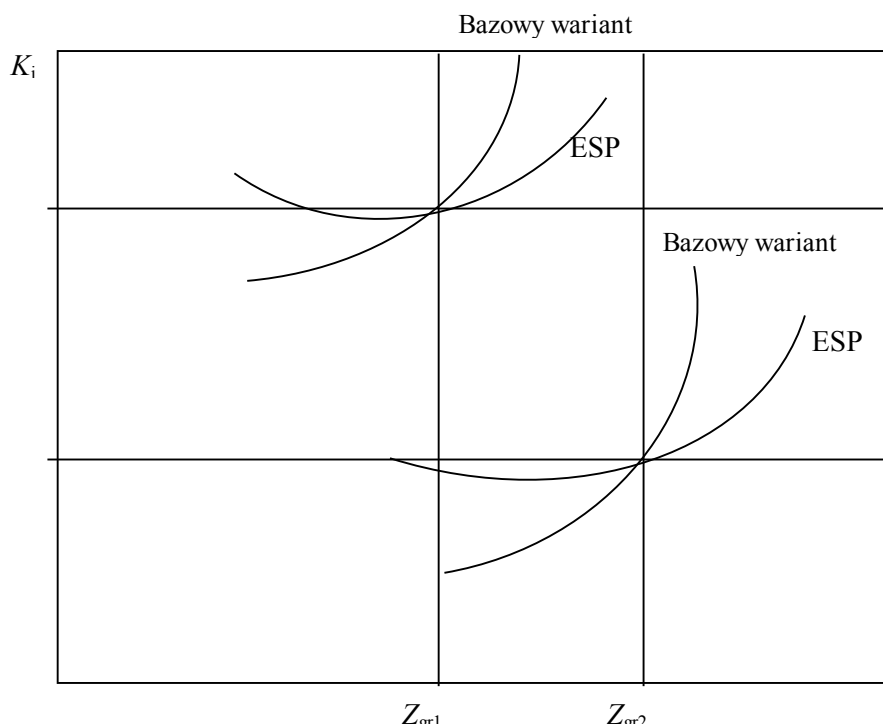
i wymiary oraz chropowatość. Analiza celowości obróbki przedmiotu w ESP sprowadza się do określenia racjonalnego obszaru ich zastosowania wyznaczonego poprzez zależności:

$$\Delta K = K_{baz} - K_{ESP} > 0 \quad (5)$$

$$\Delta T = T_{baz} - T_{ESP} > 0 \quad (6)$$

Obróbka przedmiotów o złożoności, w przypadku której są spełnione powyższe warunki w elastycznym systemie produkcyjnym jest ekonomicznie uzasadniona.

Wyznaczanie kosztu i czasu obróbki przedmiotu jest pracochłonne i uciążliwe. Próg opłacalności obróbki przedmiotów można w dość prosty sposób określić w oparciu o złożoność graniczną (Z_{gr}) czyli złożoność przedmiotów o znanym programie produkcyjnym i wielkości partii, po osiągnięciu której ich obróbka w systemie będzie opłacalna.



Rys. 1. Graficzna ilustracja metody określania kosztu K_j w zależności od złożoności Z

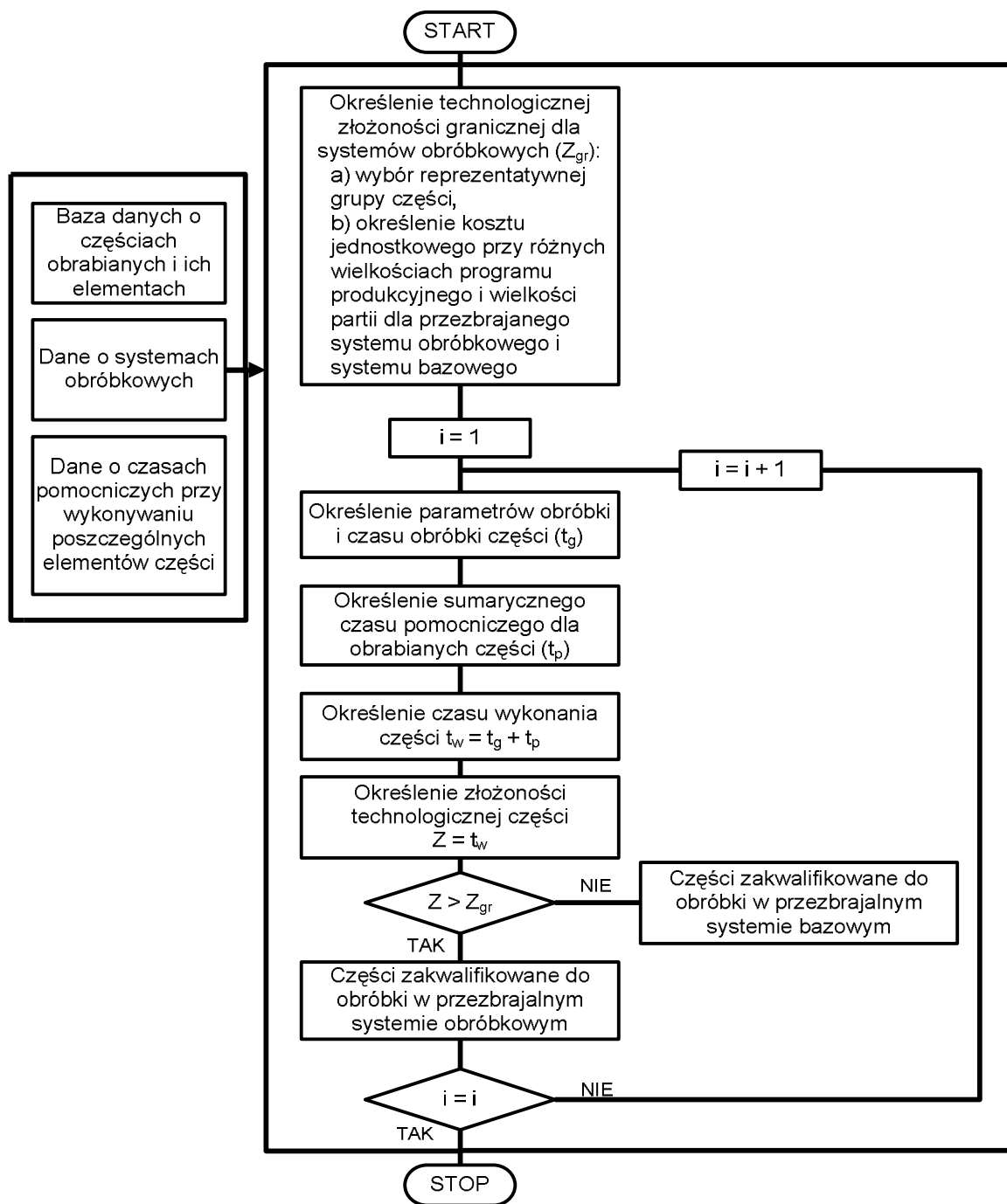
W celu określenia złożoności granicznej przedmiotów obrabianych w danym systemie należy określić koszt jednostkowy obróbki, przy różnych wielkościach partii produkcyjnych, w systemie i w przypadku wariantu bazowego (na przykład obrabiarek konwencjonalnych). Uzyskane wyniki umożliwiają ustalenie funkcjonalnej zależności pomiędzy kosztem i czasem obróbki a złożonością, wielkością partii i programem produkcyjnym. Przedmiot, którego złożoność Z jest większa niż Z_{gr} , odpowiada warunkom obróbki w ESP (jego obróbka jest opłacalna) – rys. 1. Złożoność graniczną należy określać dla konkretnego ESP i reprezentatywnej grup przedmiotów, tak aby otrzymany wynik można było odnieść do całego zbioru przedmiotów danej klasy, obrabianych w systemie.

Ogólny algorytm określania celowości obróbki przedmiotów przedstawiony jest na rys.2.

3. Koncepcja określania złożoności przedmiotów przy ich doborze do obróbki w elastycznym systemie produkcyjnym

Analiza metod określania złożoności przedmiotów wykazała, że każda z nich akcentuje pewne cechy przedmiotu lub obróbki. Stosowane metody określania złożoności przedmiotów oparte są na kilku wskaźnikach (technologicznych, subiektywnej ocenie pracownika bądź nietechnologicznych). Przyrosty złożoności określane według różnych metod znacznie się różnią dla różnych przedmiotów.

Metoda proporcjonalności złożoności przedmiotu do liczby przejść jest metodą szacunkową – otrzymane wyniki w znacznym stopniu są uzależnione od subiektywnej oceny projektanta; metoda „wagowa” nie uwzględnia wymiarów przedmiotu oraz wymiarów obrabianych powierzchni, przy tym podział powierzchni na obrotowe i czołowe jest mało przekonujący [8].



i – numer rodzaju części
j – ilość rodzajów części

Rys. 2. Algorytm kwalifikacji części do obróbki w ESP

Pokazuje to, że metody te nie w pełni są wiarygodne i nie należy ich stosować przy kwalifikowaniu przedmiotów do obróbki w elastycznym systemie produkcyjnym, należy więc opracować nową metodę dostosowaną do warunków ESP.

Przy opracowywaniu takiej metody, jako parametr określający technologiczną złożoność części przyjęto jednostkowy czas ich wykonania na obrabiarkach bazowych przy zastosowaniu parametrów i wytycznych do obróbki, zalecanych w literaturze. Uwzględniono w ten sposób: kształt powierzchni obrabianych, ich wymiary, ilość, chropowatość i dokładność ich wzajemnego położenia oraz rodzaj materiału obrabianego. Kształt części jest określany przez odpowiednio ukształtowane i usytuowane powierzchnie. W trakcie skrawania są obrabiane poszczególne powierzchnie przedmiotu, w celu nadania im odpowiednich kształtów, wymiarów i wymaganej chropowatości. Czas wykonania części jest sumą czasów wykonania jej powierzchni.

Każda część, niezależnie od klasy, do której należy, wymiarów oraz kształtów składa się z powierzchni elementarnych. Powierzchnie te mogą być identyczne u różnych części należących do różnych klas. Mogą być one jednak uzyskiwane za pomocą innej technologii. W takim przypadku, pomimo że ich kształty, wymiary oraz dokładność są identyczne, to czas ich wykonania, będący miarą ich złożoności technologicznej, będzie różny.

Opracowana metoda określania złożoności technologicznej części obrabianych jest metodą uniwersalną. Tok postępowania jest identyczny niezależnie od rodzaju części. Różnorodność części wymaga jednak opracowania baz danych z technologiczną złożonością elementarnych powierzchni części różnych klas.

Przeprowadzono analizę określania złożoności technologicznej kół zębatych walcowych. W oparciu o literaturę dokonano podziału powierzchni obrabianych części klasy „koła zębate walcowe”.

Z typowymi powierzchniami obróbkowymi ściśle są związane zestawy typowych zabiegów technologicznych, koniecznych do obróbki powierzchni o danym kształcie i wymaganej chropowatości. Wymiary poszczególnych powierzchni podzielono na przedziały (tab. 1).

Tab. 1. Przedziały wymiarowe oraz wartości przyjęte do obliczeń

Średnica [mm]	zakres	0÷6	6÷10	10÷18	18÷30	30÷50	50÷80	80÷120	120÷180	180÷260
	wartość do obliczeń	3	8	14	24	40	65	100	150	220
Długość [mm]	zakres	0÷6	6÷10	10÷18	18÷30	30÷50	50÷80	80÷120	120÷180	180÷260
	wartość do obliczeń	3	8	14	24	40	65	100	150	220
Otwór z rowkiem wpustowym ¹	zakres	5x5÷8x7			10x8÷16x10			18x11÷22x14		25x14÷32x18
	wartość do obliczeń	6x6			12x8			20x12		28x16
Otwór wielorowkowy ²	zakres	6x16x20÷6x21x25		6x23x28÷6x28x34		8x32x38÷8x42x48		8x46x54÷8x56x65		10x72x82÷10x92x102
	wartość do obliczeń	6x18x22		6x26x32		8x36x42		8x52x60		10x82x92
Zbieżność powierzchni stożkowych	zakres	poniżej 1:20			1:20÷1:40			Powyżej 1:40		
	wartość do obliczeń	1:10			1:30			1:50		
Moduł uzębienia ³ [mm]		1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	
Kąt pochylenia linii zębów [°]	zakres	0			poniżej 22		23÷37		powyżej 37	
	wartość do obliczeń	0			15		30		45	
Liczba zębów	zakres	13÷25		26÷35		36÷50		51÷95		96÷125
	wartość do obliczeń	19		30		43		73		110

¹Oznaczenie zgodne z PN-70/M-85005; ²oznaczenie zgodne z PN-ISO 14:1994, ³wartości zgodne z PN-78/M-88502

W przypadku średnich wartości wymiarów z poszczególnych przedziałów obliczono czasy ich wykonania. Czas wykonania powierzchni jest sumą czasów głównych i pomocniczych wszystkich operacji i zabiegów technologicznych koniecznych do uzyskania powierzchni z półfabrykatu (obróbka zgrubna, kształtująca, wykańczająca). Obliczenia przeprowadzono przy różnych wartościach chropowatości powierzchni obrobionej ($Ra = 20 - 0,63\mu m$). Jako półfabrykat przyjęto odkuwkę matrycową.

Czas wykonania elementarnych powierzchni części jest miarą ich złożoności technologicznej:

$$Z_i = t_{wi} \quad (7)$$

gdzie: Z_i – złożoność technologiczna i -tej elementarnej powierzchni części, t_{wi} – czas wykonania i -tej powierzchni części.

Złożoność technologiczna całej części jest sumą złożoności technologicznych elementarnych powierzchni:

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i, \quad (8)$$

gdzie: Z – złożoność technologiczna części,
 Z_i – złożoność technologiczna i -tej elementarnej powierzchni części,
 i – numer powierzchni,
 n – ilość powierzchni.

W tab. 2 przedstawiono wyniki obliczenia ww. metodami złożoności w przypadku sześciu różnych przedmiotów.

Dla przykładu w przypadku 6 korpusów obliczona została ich złożoność czterema różnymi sposobami – tab. 2. W celu porównania obliczonych różnymi metodami złożoności wyrażono je w jednolitych jednostkach. Jak widać, wyniki różnią się od siebie, spowodowane jest to tym, że każda z metod akcentuje pewne inne właściwości złożoności. Konieczne jest więc opracowanie nowej metody określania złożoności części wytwarzanych w ESP, uwzględniającej specyfikę tych systemów.

Na każdej stronie obrabianego przedmiotu można wyodrębnić pewne elementy, na przykład takie jak: płaszczyzny, otwory i otwory gwintowane. Złożoność części jest sumą złożoności tych elementów i otrzymywana jest w wyniku sumowania na jednej stronie obróbki, a następnie wszystkich pozostałych stron obróbki.

Wymiary geometryczne wyodrębnionych powierzchni: szerokość (średnica) i długość podzielono w zależności od rodzaju powierzchni na kilka do kilkunastu przedziałów.

Algorytm kwalifikacji części do obróbki w ESP przedstawiony na rys. 2 wykorzystano do opracowania programu komputerowego. Program ten służy do określania technologicznej złożoności obrabianych części, która po porównaniu z technologiczną złożonością graniczną systemu produkcyjnego decyduje o zakwalifikowaniu przedmiotu do obróbki w ESP.

Określenie racjonalnego zakresu zastosowania ESP znacznie ułatwia procesy decyzyjne, związane z kwalifikacją części do wytwarzania w ESP. Znajomość tego zakresu w przypadku konkretnego systemu produkcyjnego umożliwia podjęcie szybkiej, a przede wszystkim trafnej decyzji o kwalifikacji części do obróbki w ESP lub też w systemie bazowym.

Tab.2. Wyniki obliczeń złożoności według różnych metod sprowadzone do wspólnych jednostek

Numer przedmiotu	Nazwa lub numer metody			
	Metoda I [8]	Metoda proporcjonalności złożoności przedmiotu do liczby przejść	Metoda wagowa	Metoda bloków i składów
1	19,9	39,2	37,3	44,4
2	42,5	67,6	63,0	76,1
3	100,0	100,0	100,0	100,0
4	125,1	134,6	131,4	145,7
5	173,5	200,2	192,8	190,1
6	175,4	227,0	210,4	216,6

W przypadku średnich wartości z każdego przedziału obliczono czas główny obróbki potrzebny do uzyskania powierzchni. Obliczenia te przeprowadzono przy różnych wartościach chropowatości powierzchni obrobionej ($Ra = 20-0,63 \mu m$). Przy obliczeniach uwzględniono także przelotowość; w przypadku powierzchni gwintowanych skok (zwykły lub drobny); powierzchni stożkowych – zbieżność; rowków głębokość. Można określić czas wytwarzania każdego elementu składowego przedmiotu, przy tym czas główny w większym stopniu jest określany chropowatością i wymiarami gabarytowymi, a czas pomocniczy ilością elementów i dokładnością, złożoność przedmiotu jest więc proporcjonalna do czasu wytwarzania.

Czas wytwarzania należy określić w przypadku wszystkich elementów technologicznych, stron obróbki i przedmiotu w całości – określa on złożoność przedmiotu. Czas pomocniczy zawiera tylko te składowe, które można uzyskać bez konieczności opracowania procesu technologicznego obróbki przedmiotu i charakteryzuje on takie właściwości złożoności, jak dokładność wymiarową i ilość

powierzchni. Dlatego, czas pomocniczy przywiązuje się do przejścia narzędzia i jego ustawienia na wymiar z określoną dokładnością, na przykład: ustawienie prędkości obrotowej, wielkości posuwu, szybkiego posuwu i odsunięcia narzędzia, ustawienia narzędzia w otworze wrzeciona. Uzyskano w ten sposób elementarne złożoności poszczególnych powierzchni. Złożoność całego przedmiotu jest sumą odpowiednich złożoności elementarnych.

Uzyskane czasy wykonania elementarnych powierzchni będących miarą ich złożoności umożliwiają obliczenie złożoności przedmiotu po wprowadzeniu danych określających rodzaj, wymiary gabarytowe, ilość i chropowatość poszczególnych powierzchni występujących w danym przedmiocie.

Opracowany sposób ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ pozwala, bez konieczności projektowania procesów technologicznych wytwarzania części, określić opłacalność ich obróbki w elastycznym systemie produkcyjnym.

Wnioski

1. Efektywność pracy elastycznego systemu produkcyjnego w znacznym stopniu zależy od odpowiedniego doboru obrabianych części. Kwalifikacja obrabianych części powinna być prowadzona w oparciu o rentowność ich obróbki w systemie.

2. Przy dokonywaniu analizy efektywności obróbki w ESP zwykle stosuje się kryterium kosztu wykonania części. Tradycyjna analiza polegająca na porównaniu i zbilansowaniu nakładów jest niewystarczająca, ponieważ znacznej części efektów wynikających z zastosowania ESP nie daje się wyrazić w jednostkach pieniężnych (finansowych), np. elastyczność reagowania na potrzeby rynku, polepszenie warunków pracy, warunków BHP (zmniejszenie liczby wypadków).

3. Określenie celowości obróbki wymaga opracowania technologii (zarówno dla wariantu bazowego, jak i ESP), a to związane jest z przeprowadzeniem kosztownej analizy ekonomicznej. Opracowana metoda pozwala określić przydatność części do obróbki w ESP bez opracowywania procesu technologicznego (określana jest technologiczna złożoność części i porównywana z technologiczną złożonością graniczną wyznaczoną dla systemu produkcyjnego). Metodę tę można przedstawić w formie algorytmu i opracowanego na jego podstawie programu komputerowego, umożliwiającego przeprowadzenie niezbędnych obliczeń. Mimo, że jest to metoda prosta, to pozwala otrzymać wystarczająco dokładne wyniki (dokładniejsze od otrzymywanych w wyniku zastosowania metod stosowanych przy doborze części do obróbki na obrabiarki sterowane numerycznie), ponieważ uwzględnia się w niej więcej czynników, określających technologiczną złożoność części.

1. Bocewicz G., Banaszak Z. Declarative approach to cyclic steady state space refinement: periodic process scheduling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, Issue 1-4, 2013, pp 137-155.

2. Gola A., Świć A.: Brief preliminary design for a method of FMS machine tools subsystem selection. *PAMM Volume 9, Issue 1*, 2009, p. 663-664.

3. Gola A., Świć A., Kramar V.: A multiple-criteria approach to machine-tool selection for focused flexible manufacturing systems. *Management & Production Engineering Review*. Vol. 2, No 4, 2011, p. 21 – 32.

4. Kanada J. R., Sullivan W.G.: *Economic and Multiattribute Evolution of Advanced Manufacturing Systems* Englewood Cliffs. New Jersey, Prentice Hall 1989.

5. Świć. A., Gola A. A method of qualification of parts for production in a flexible manufacturing system. *Actual Problems of Economics/Актуальні Проблеми Економіки* 2013, 11 (149). s. 576-585.

6. Świć A., Gola A.: Elements of design of production systems – methodology of machine tool selection in casing-class FMS. *Management and Production Engineering Review*. Vol. 1, No 2, 2010, p. 72 – 80.

7. Świć. A., Gola A. Economic analysis of the production of parts of casings in a flexible manufacturing system. *Actual Problems of Economics/Актуальні Проблеми Економіки* 2013, 3(141), s. 526-533.

8. Świć A.: *Elastyczne systemy produkcyjne. Technologiczno-organizacyjne aspekty projektowania i eksploatacji*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej 1998, 229 s.

9. Świć A.: Wpływ struktury podsystemu obrabiarek na efektywność obróbki w elastycznym systemie produkcyjnym. *Zeszyty Naukowe AGH. Nr 1313. Automatyka. Zeszyt 4. -s. 331-339*

10. Świć A., Taranenko W.: Projektowanie technologiczne elastycznych systemów produkcyjnych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2003, 320 s.