

## WPŁYW PARAMETRÓW SKRAWANIA W PROCESIE FREZOWANIA WALCOWO-CZOŁOWEGO DLA NAJWIĘKSZEJ WYDAJNOŚCI OBRÓBK I TRWAŁOŚCI EKONOMICZNEJ

### Streszczenie

*W artykule omówiona została optymalizacja wielokryterialna, która pozwoliła na sformułowanie zadania dla uzyskania jak najlepszych wyników procesu skrawania przy założonych kryteriach polioptymalizacji i ustalonych warunkach ograniczających. Opisano model fizyczny z przedstawieniem założeń i uproszczeń oraz podano model matematyczny. Polioptymalizowanymi parametrami były obroty narzędzia  $n$ , głębokość skrawania  $a_p$ , oraz prędkość posuwu  $v_f$ , z uwagi na okres trwałości ostrza  $T$ , wydajności obróbki  $W$  i trwałości ekonomicznej  $Kj/Km$  w procesie frezowania walcowo-czołowego.*

### WSTĘP

W przemyśle kolejowym, okrętowym, lotniczym, elektrotechnicznym wytwarzanie części maszyn i urządzeń wymaga wstępnej i końcowej obróbki ich powierzchni.

W warunkach przemysłowych do kształtowania powierzchni płaskich stosowane są narzędzia, które spełniają ważną rolę w procesie technologicznym. Jedną z odmian obróbki takich powierzchni jest frezowanie walcowo – czołowe, ciągle unowocześniane i doskonalone dla zapewnienia wysokiej i dużej dokładności wytwarzanych części maszyn.

Wśród podstawowych metod wytwarzania części maszyn jest obróbka skrawaniem i ocenia się, że stanowi około 50% ogólnej liczby operacji stosowanych w produkcji. Związane z nią są dziedziny dotyczące produkcji - obrabiarek, narzędzi, metrologii warsztatowej, oprzyrządowania i projektowania procesów produkcyjnych. Należy ona do rodzajów obróbek uniwersalnych, umożliwiających stosowanie narzędzia o zdefiniowanej geometrii i liczbie ostrzy [1].

Od dziesiątków lat prowadzone są badania dążące do uogólnienia zjawisk w procesach skrawania [2] w oparciu o prawa fizyki, badania własności mechanicznych materiałów skrawanych [3], [4]. Ocenia się przydatność nowych materiałów narzędziowych i tworzenie wieloparametrowych modeli optymalizacji przy doborze warunków obróbki. Wyraźnie to jest widoczne w materiałach publikowanych przez ostatnie lata z zakresu rozwoju badań obróbki skrawaniem, zwłaszcza dotyczące wzrostu wydajności i jakości obróbki [5-10]. Dotyczą one także zastosowania nowoczesnych wysokowydajnych materiałów na narzędzia skrawające i uwzględniają zmiany konstrukcyjne i geometryczne ostrzy [11].

Celem niniejszej publikacji było oszacowanie największej wydajności i trwałości ekonomicznej obróbki dla frezowania walcowo-czołowego głowicą frezową z płytkami wymiennymi przy wybranych parametrach skrawania.

### 1. MODEL FIZYCZNY

#### 1.1. Zjawiska fizyczne zachodzące podczas procesu frezowania

- ruch posuwisty stołu frezarki,
- ruch obrotowy głowicy frezowej,
- tarcie suche,
- wydzielanie się ciepła w wyniku tarcia,

- naprężenia w materiale obrabianym i płytce skrawającej,
- odkształcenia plastyczne,
- zjawisko zgniotu,
- przewodzenie ciepła,
- zjawiska adhezji i dyfuzji,
- zużycie ostrza,
- powierzchniowe płynięcie materiału na narożu ostrza,
- poślizg ostrza,
- zjawisko narostu materiału na ostrzu skrawającym,
- drgania obróbkowe.

#### 1.2. Założenia

- ruch roboczy stołu frezarki tylko w prawo,
- ruch roboczy obrotowy głowicy frezowej tylko w prawo,
- zmienne decyzyjne: obroty narzędzia  $n=100\div 3000$  obr./min, głębokość skrawania  $a_p=1, 2$  i  $4$  mm, prędkość posuwu  $v_f=50\div 2950$  mm/min,
- materiał obrabiany: EN C 45,
- układ nie podlega chłodzeniu cieczami obróbkowymi,
- promień zaokrąglenia ostrza  $r_e=1,5$  mm,
- powierzchnia dogładzająca ostrza  $b_s=2,1$  mm,
- średnica głowicy frezowej  $D_c = 125$  mm,
- liczba płytek skrawających w głowicy frezowej  $z_n=8$ ,
- koszt pracy obrabiarki przez 1 minutę  $K_m=100$  zł,
- wykładnik dla stali obrabianej na sucho  $m = 0,1$ ,
- głowica frezowa wykonuje tylko jedno przejście w kolejnej operacji,
- długość materiału obrabianego wynosi  $L=200$  mm,
- szerokość materiału obrabianego wynosi  $a_e=100$  mm,
- długość wybiegu narzędzia  $l_w=0,04D_c$ ,
- zużycia ostrzy nie przebiegają jednakowo dla poszczególnych płytek wymiennych w głowicy frezowej,
- dopuszczalne zużycie ostrza  $VB_{dop}=0,6$  mm.

#### 1.3. Uproszczenia

- ruch posuwisty stołu frezarki,
- pominięto pracę tarcia wióra o powierzchnię natarcia,
- pominięto pracę odkształceń plastycznych materiału oraz odkształceń,
- pominięto poślizg ostrza,
- pominięto ciepło odprowadzane przez wiór,
- pominięto ciepło odprowadzane przez przedmiot obrabiany,

- pominięto ciepło odprowadzane pozostałymi drogami (straty do otoczenia),
- pominięto bicie płytek skrawających (promieniowe i osiowe),
- zużycie ostrza jest wartością średnią dla wszystkich płytek wymiennych w głowicy frezowej,
- ruch stołu frezarki i ruch obwodowy wrzeciona frezarki przebiega bez żadnych luzów,
- zmienne decyzyjne: obroty narzędzia  $n=100; 200; 300 \text{ obr./min}$ , prędkość posuwu  $v_f=50; 150; 300 \text{ mm/min}$ .

## 2. MODEL MATEMATYCZNY

### 2.1. Optymalizacja z uwagi na największą wydajność

Tab. 1. Czynności wykonywane i ich pomiar

Czynność wykonywana	Czas [s]	Czas [min]
Mocowanie płytki podporowej	25	0,41
Mocowanie płytki wymiennej	42	0,7
Mocowanie uchwytu do głowicy frezowej	30	0,5
Czas ustawienia narzędzia	20	0,33
Bieg jałowy powrotny	17	0,28
Zamocowanie głowicy we wrzecionie frezarki	11	0,18
Zamocowanie przedmiotu	12	0,2
Włączenie / wyłączenie frezarki	5	0,08

Wydajność  $W$  (1), gdzie  $t_j$  - czas jednostkowy obróbki w  $\text{min}$ .

$$W = \frac{1}{t_j}, \frac{\text{szt.}}{\text{min}} \quad (1)$$

Czas jednostkowy obróbki  $t_j$  (2), gdzie  $t_m$  - czas maszynowy jednozabiegowej operacji w  $\text{min}$ ,  $t_z$  - czas wymiany zużytego ostrza w  $\text{min}$ ,  $i_o$  - liczba operacji wykonanych w okresie trwałości  $T$ ,  $t_p$  - czas pomocniczy, niemaszynowy obejmujący przebiegi luzem, zakładanie i zdejmowanie przedmiotów, który dla konkretnej operacji przyjmuje się jako stały w  $\text{min}$ .

$$t_j = t_m + \frac{t_z}{i_o} + t_p, \text{min} \quad (2)$$

Czas maszynowy  $t_m$  (3), gdzie  $i_p$  - liczba przejść,  $i_m$  - długość frezowania w  $\text{mm}$ ,  $v_f$  - posuw minutowy w  $\text{mm/min}$ ,  $T$  - trwałość w  $\text{min}$ ,  $m$  - wykładnik dla stali obrabianej na sucho  $m = 0,1$ .

$$t_m = i_p \cdot \frac{i_m}{v_f} \cdot T^m, \text{min} \quad (3)$$

Długość frezowania  $i_m$  (4), gdzie  $l_d$  - długość dobiegu frezu w  $\text{mm}$ ,  $L$  - długość frezowanej powierzchni w  $\text{mm}$ ,  $l_w$  - długość wybiegu frezu w  $\text{mm}$ .

$$i_m = l_d + L + l_w, \text{mm} \quad (4)$$

Długość dobiegu frezu  $l_d$  (5), gdzie  $a_p$  - głębokość frezowania w  $\text{mm}$ ,  $D_c$  - średnica frezu w  $\text{mm}$ .

$$l_d = \sqrt{a_p(D_c - a_p)}, \text{mm} \quad (5)$$

Długość wybiegu frezu  $l_w$  (6).

$$l_w = (0,03 \div 0,05)D_c, \text{mm} \quad (6)$$

Trwałość ostrza  $T$  (7), gdzie  $v_c$  - prędkość skrawania w  $\text{m/min}$ .

$$T = \exp\left(13,93 - 2,27 \cdot \ln v_c - 0,46 \cdot \ln\left(\frac{v_f}{n}\right) - 0,56 \cdot \ln a_p\right), \text{min} \quad (7)$$

### 2.2. Optymalizacja z uwagi na trwałość ekonomiczną

Tab. 2. Koszty narzędziowe

Nazwa	Symbol	Ilość w paczce	Cena brutto [zł]	Cena za sztukę [zł]	Cena netto za sztukę [zł]
Płytki wymienne	R245-12 T3 M-PM	10	490	49	40,1
Uchwyt do głowicy frezowej	392.5505-40 40 060A	1	852	852	700
Głowica frezowa	R245-125Q401-12M	1	3580	3580	2935
Śruba mocująca płytkę	5513 020-01	10	75,64	7,56	6,2
Płytki podporowa	5322 472-01	10	77	7,7	6,31
Śruba mocująca płytkę podporową	5512 090-09	10	140	14	11,5

Koszt operacji jednozabiegowej  $K_j$  (8) i udział kosztu operacji do kosztu pracy obrabiarki (9), gdzie  $K_m$  - koszt pracy obrabiarki przez 1 minutę w  $\text{zł}$ ,  $K_n$  - koszty narzędziowe dla jednego okresu trwałości (cena zakupu lub wykonania z kosztami ostrzenia) w  $\text{zł}$ ,  $t_m$  - czas maszynowy w  $\text{min}$ ,  $t_z$  - czas wymiany zużytego ostrza w  $\text{min}$ ,  $i_o$  - liczba operacji w okresie trwałości.

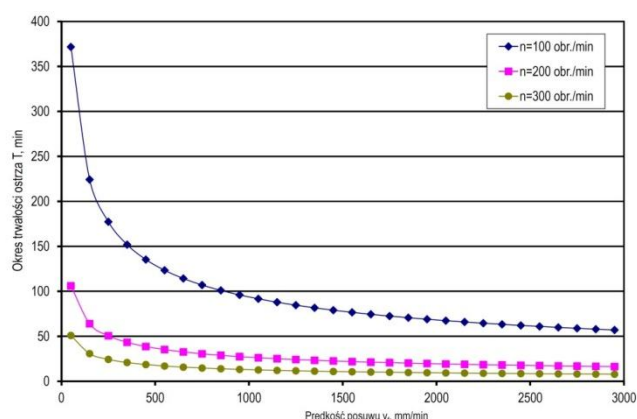
$$K_j = t_m \cdot K_m + t_z \cdot \frac{K_m}{i_o} + \frac{K_n}{i_o}, \text{zł} \quad (8)$$

$$\frac{K_j}{K_m} = t_m + \frac{t_z}{i_o} + \frac{K_n}{i_o \cdot K_m}, \text{min} \quad (9)$$

## 3. WYNIKI BADAŃ

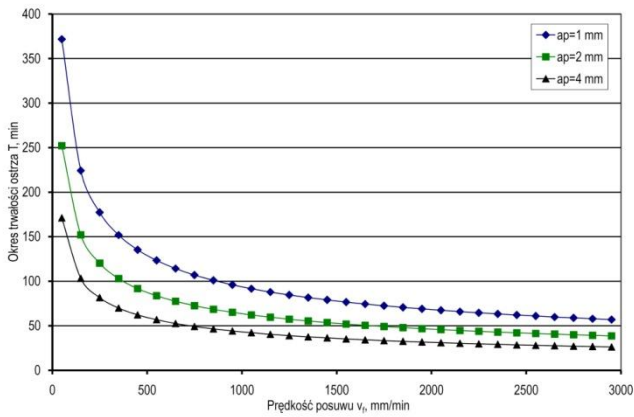
Wyniki przykładowych obliczeń zostały przedstawione na rysunkach 1-10 i zostały uwzględnione zależności takich parametrów jak: prędkość posuwu  $v_f$ , obroty narzędzia  $n$ , głębokość skrawania  $a_p$  i prędkość skrawania  $v_c$ .

Przy zmiennych obrotach narzędzia  $n$  i stałej głębokości skrawania  $a_p$  największą wartość trwałość ostrzy  $T = 371 \text{ min}$  uzyskano dla prędkości posuwu  $v_f = 50 \text{ mm/min}$  podczas obrotów narzędzia  $n=100 \text{ obr./min}$  (rys.1). Znaczny spadek wartości trwałość ostrza  $T = 106$  i 50 minut uzyskano przy obrotach narzędzia  $n = 200$  i 300 obr./min.

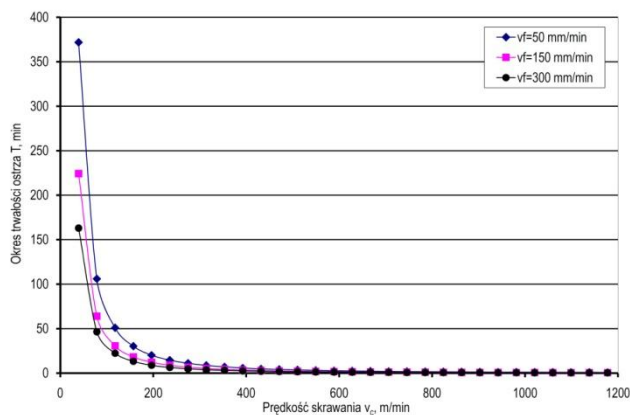


Rys. 1. Zależność trwałości ostrzy do prędkości posuwu  $T=f(v_f)$  przy zmiennych obrotach narzędzia  $n \text{ obr./min}$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1 \text{ mm}$

Przy zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  i stałych obrotach  $n = 100 \text{ obr./min}$  wartość trwałość ostrza  $T$  wynosi 371  $\text{min}$  dla  $a_p=1 \text{ mm}$ , zaś dla głębokości skrawania 2 i 4  $\text{mm}$  wartość trwałości  $T$  spada odpowiednio do 252 i 171 minut (rys. 2). Charakterystyki linii funkcji przebiegają do siebie równoległe od około  $v_f=1500 \text{ mm/min}$  prędkości posuwu.

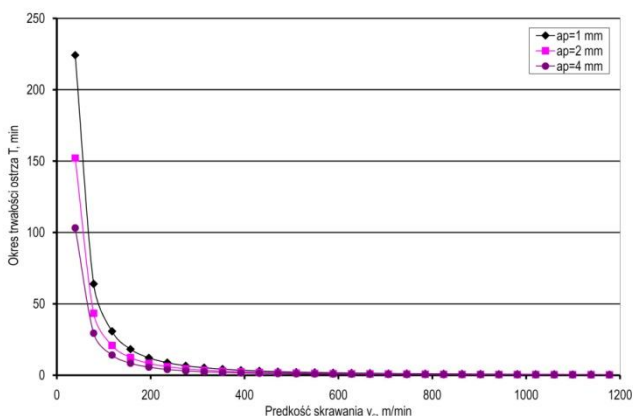


**Rys. 2.** Zależność trwałości ostrzy do prędkości posuwu  $T=f(v_f)$  przy zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  i stałej prędkości obrotowej  $n=100$  obr./min



**Rys. 3.** Zależność trwałości ostrzy do prędkości skrawania  $T=f(v_c)$  przy zmiennych prędkościach posuwu  $v_f$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1$  mm

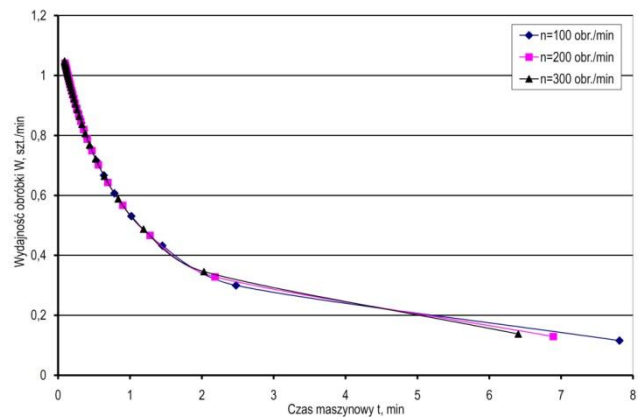
Dla zależności trwałości ostrzy  $T$  do prędkości skrawania przy zmiennych prędkościach posuwu  $v_f$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1$  mm charakterystyki funkcji są do siebie zbliżone (rys. 3). Od około  $510$  m/min prędkości skrawania  $v_c$  wartość trwałości ostrza  $T$  zbliża się do zera.



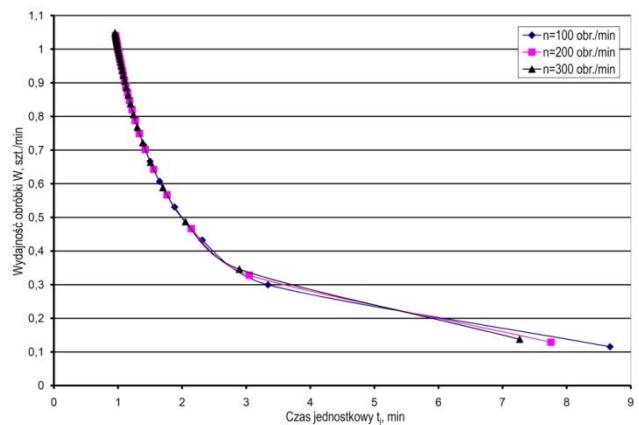
**Rys. 4.** Zależność trwałości ostrzy do prędkości skrawania  $T=f(v_c)$  przy zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  i stałej prędkości posuwu  $v_f=150$  mm/min

Wyznaczone charakterystyki trwałości ostrzy  $T$  w funkcji prędkości skrawania  $T=f(v_c)$  przy stałej prędkości posuwu  $v_f = 150$  mm/min i zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  przebiegały podobnie

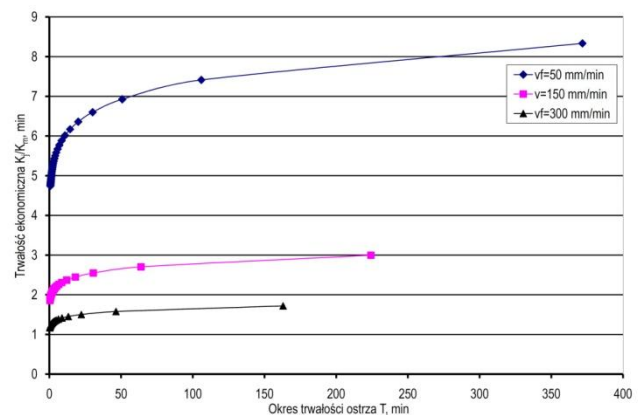
jak dla poprzednich funkcji. Trwałość ostrzy  $T$  przy około  $400$  m/min prędkości skrawania  $v_c$  zbliżyły się do zera (rys. 4).



**Rys. 5.** Zależność wydajności obróbki do czasu maszynowego  $W=f(t_m)$  przy zmiennych obrotach narzędzia  $n$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1$  mm



**Rys. 6.** Zależność wydajności obróbki do czasu jednostkowego  $W=f(t_j)$  przy zmiennych obrotach narzędzia  $n$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1$  mm

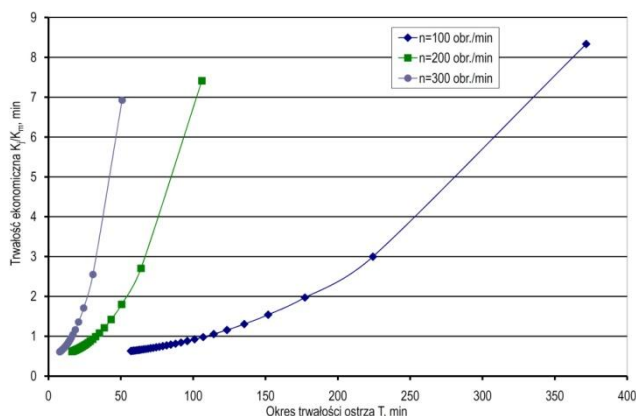


**Rys. 7.** Zależność udziału kosztu operacji i kosztu pracy obrabiarki do trwałości ostrzy  $K_j/K_m=f(T)$  przy zmiennych prędkościach posuwu  $v_f$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1$  mm

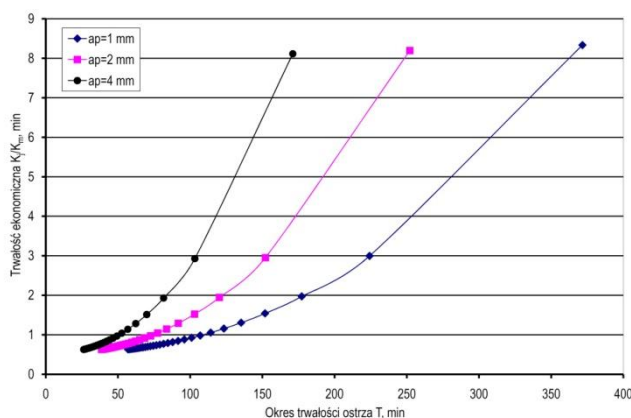
Dla przyjętych zmiennych prędkości obrotowych  $n = 100, 200$  i  $300$  obr./min zaprezentowano trzy charakterystyki funkcji wydajności obróbki  $W$  i czasu maszynowego  $t_m$   $W=f(t_m)$ , gdzie wartości pokrywają się dla przebiegu funkcji (rys. 5). Podobne charakterystyki uzyskano dla zależności funkcji wydajności obróbki  $W$  do czasu jednostkowego obróbki  $W=f(t_j)$  przy zmiennych obrotach narzędzia  $n$  i głębokości skrawania  $a_p=1$  mm (rys. 6).

Analizując przebiegi funkcji udziału kosztów operacji do kosztów obrabiarki w funkcji trwałości  $K_j/K_m=f(T)$  zauważono, że największą trwałość ostrzy  $T=371 \text{ min}$  uzyskano dla najmniejszej prędkości posuwu  $v_f=50 \text{ mm/min}$ , a najmniejszą  $T=163 \text{ min}$  dla prędkości posuwu  $v_f=300 \text{ mm/min}$  (rys. 7).

Zależność udziału kosztu operacji do kosztu pracy obrabiarki do trwałości ostrzy  $T$   $K_j/K_m=f(T)$  przy zmiennych obrotach narzędzia  $n$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1 \text{ mm}$  zaprezentowano na rysunku 8. Początkowe wartości trwałości ostrzy  $T$  przy zmiennych obrotach narzędzia  $n$  stanowiły odpowiednio 7, 16 i 56 min. Różnice te rosną wraz ze wzrostem stosunku  $K_j/K_m$ , a szczególnie widoczne jest to dla prędkości obrotowej  $n=300 \text{ obr./min}$ .



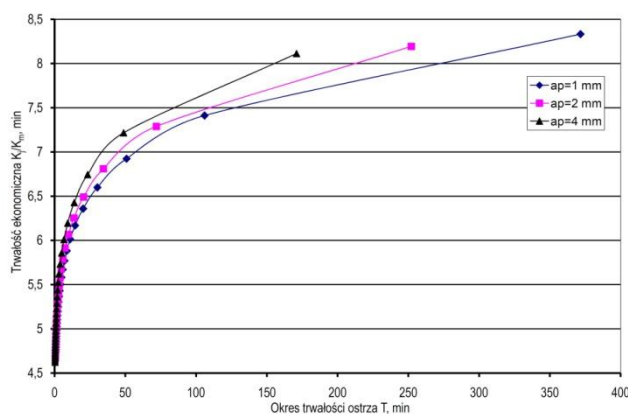
**Rys. 8.** Zależność udziału kosztu operacji i kosztu pracy obrabiarki do trwałości ostrzy  $K_j/K_m=f(T)$  przy zmiennych obrotach narzędzia  $n$  i stałej głębokości skrawania  $a_p=1 \text{ mm}$



**Rys. 9.** Zależność udziału kosztu operacji i kosztu pracy obrabiarki do trwałości ostrzy  $K_j/K_m=f(T)$  przy zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  i stałej prędkości obrotowej narzędzia  $n=100 \text{ obr./min}$

Przebieg wartości charakterystyk funkcji udziału kosztu operacji  $K_j$  i kosztu pracy obrabiarki  $K_m$  do trwałości ostrzy  $T$  przy zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  i stałych obrotach narzędzia  $n=100 \text{ obr./min}$  rozpoczynają się dla  $K_j/K_m=0,62 \text{ min}$ . Po zakończeniu obliczeń uzyskano zbliżone wartości trwałości ekonomicznej  $K_j/K_m$  dla zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  (rys. 9).

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi krzywych zależność udziału kosztu operacji i kosztu pracy obrabiarki do trwałości ostrzy  $T$   $K_j/K_m=f(T)$  przy zmiennych głębokościach skrawania  $a_p$  i stałej prędkości posuwu  $v_f=50 \text{ mm/min}$ . Początkowe wartości funkcji dla odpowiednich wartości argumentów pokrywają się do około  $K_j/K_m=5,5 \text{ min}$ . Dla większej trwałości ostrza  $T$  wartości funkcji są od siebie różne dla zmiennej głębokości skrawania  $a_p$ .



**Rys. 10.** Zależność udziału kosztu operacji i kosztu pracy obrabiarki do trwałości ostrzy  $K_j/K_m=f(T)$  przy zmiennej głębokości skrawania  $a_p$  i stałej prędkości posuwu  $v_f=50 \text{ mm/min}$

## PODSUMOWANIE

Porównując zależności  $T=f(v_f)$  zaobserwowano, że trwałość ostrzy  $T$  znacznie maleje przy zwiększeniu obrotów narzędzia  $n$  niż przy zwiększaniu głębokości skrawania  $a_p$ . Wraz ze wzrostem obrotów narzędzia  $n=200$  i  $300 \text{ obr./min}$  przy głębokości skrawania  $a_p=1 \text{ mm}$  dla zależności  $T=f(v_f)$  postać funkcji zbliża się kształtem do funkcji liniowej, zaś dla obrotów  $n=100 \text{ obr./min}$  kształt linii ma przebieg hiperboliczny.

Przebiegi trwałości ostrzy  $T=f(v_c)$  przy zmiennych prędkościach posuwu  $v_f$  i głębokościach skrawania  $a_p$  mają kształt funkcji w postaci hiperboli ale różnią się początkowymi wartościami dla przedstawionych przebiegów. Największe różnice trwałości ostrzy  $T$  widoczne są na wykresie zależności  $T=f(v_c)$  dla  $a_p=1 \text{ mm}$  przy prędkościach skrawania  $v_c$  od około 40 do 160  $m/min$ , natomiast zbliżone wartości argumentów występują w przedziale od około 550 do 1170  $m/min$  prędkości skrawania  $v_f$ . Podobnie przebiegała funkcja przy stałej prędkości posuwu  $v_f=150 \text{ mm/min}$ . Jest to przedział największego spadku trwałości ostrzy  $T$  dla wybranych głębokości skrawania  $a_p$ .

Zależność wydajności obróbki  $W$  do czasu maszynowego  $t_m$   $W=f(t_m)$  i czasu jednostkowego obróbki  $t_j$   $W=f(t_j)$  tworzyły przebiegi hiperboliczne. Na przebiegi wydajności obróbki  $W$  nie miały wpływu obroty narzędzia  $n$ .

Dla obliczeń trwałości ekonomicznej  $K_j/K_m=f(T)$  uzyskano hiperboliczną postać funkcji, a ich wartości rosną w całej jej dziedzinie. W zależności od rozpatrywanych prędkości posuwu  $v_f$  przy stałej głębokości skrawania  $a_p=1 \text{ mm}$  występują duże różnice w trwałości ostrzy  $T$ .

Wzrost wartości argumentu trwałości ostrzy  $T$  uzyskano w zależności udziału kosztu operacji do kosztu pracy obrabiarki  $K_j/K_m$  dla zmiennych obrotów narzędzia  $n=100, 200$  i  $300 \text{ obr./min}$  i przy głębokościach skrawania  $a_p=1, 2$  i  $4$ . Największą trwałość ostrzy  $T$  uzyskano przy głębokości skrawania  $a_p=1 \text{ mm}$ .

## BIBLIOGRAFIA

1. Żebrowski H., i inni, Techniki wytwarzania. Obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
2. Storch B., Uogólnienie zjawiska tworzenia nierówności na powierzchni obrobionej podczas toczenia. Obróbka Skrawaniem 3 – Zaawansowana Technika. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.

3. Kukielka L., Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin, 1994.
4. Kukielka L., Podstawy badań inżynierskich. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002.
5. Storch B., Podstawy obróbki skrawaniem. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
6. Cichosz P., Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego. Obróbka Skrawaniem 1 – Wysoka Produktivność. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007.
7. Danis M., Ekonomiczne aspekty obróbki skrawaniem. Obróbka Skrawaniem 3 – Zaawansowana Technika. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.
8. Danis M., Wpływ produktywności (wydajności) i żywotności (trwałości) narzędzi skrawających na wydajność obrabiarki. Obróbka Skrawaniem 4 – Współczesne Problemy. Prace poligraficzno-wydawnicze agencja „MAGA”, Łódź, 2010.
9. Koziański A., Koziański T., Niedoceniane uwarunkowania ekonomiczne w procesie technologicznym. Obróbka Skrawaniem 4 – Współczesne Problemy. Prace poligraficzno-wydawnicze agencja „MAGA”, Łódź, 2010.
10. Koziański A., Styczyński A., Aspekt ekonomiczny wyboru narzędzi skrawających. Obróbka Skrawaniem 5 – Nauka a Przemysł. Wydawnictwo Sutoris, Wrocław/Opole, 2011.
11. Żurawski Ł., Analiza topografii powierzchni kształtowanych z użyciem wielostrzowych narzędzi frezerskich z ostrzami o zróżnicowanym ukształtowaniu, Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2013.

## INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS FOR THE HIGHEST PERFORMANCE ECONOMIC AND DURABILITY IN THE MILLING PROCESS

### *Abstract*

*The article discussed of the multi-criteria optimization, which helped to formulate of the task to get the best results with the assumed criteria poly optimization and determine conditions restriction from the cutting process. The physical model with the assumptions and simplifications and mathematical model was described. Parameters polyoptimalization were rotate tool  $n$ , cutting depth  $a_p$  and feed speed  $v_f$  for the tool life  $T$ , performance cutting process and durability economic  $K_j/K_m$  in the milling process.*

Autorzy:

dr inż. **Łukasz Żurawski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Monitorowania Procesów Technologicznych, Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, lukasz.zurawski(at)tu.koszalin.pl

dr inż. **Jarosław Chodór** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, Raclawicka 15-17, 75-620, Koszalin, jaroslaw.chodor(at)tu.koszalin.pl

dr inż. **Agnieszka Kułakowska** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, Raclawicka 15-17, 75-620, Koszalin, agnieszka.kulakowska(at)tu.koszalin.pl