

OPTIMALIZACJA PROCESU OBRÓBKI SKRAWANIEM Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMÓW GENETYCZNYCH

Piotr WITTBRODT

Streszczenie: W artykule opisano problemy związane z optymalizacją procesu obróbki skrawaniem na przykładzie łożyska tocznego. Przeprowadzono analizę kosztów jednostkowych poszczególnych operacji tokarskich. Podjęto próbę optymalizacji operacji ze względu na koszty jednostkowe, przy zachowaniu takiej samej jakości wyrobu. Przedstawiono wyniki badań zmniejszenia kosztów obróbki wykorzystując w tym celu algorytmy genetyczne.

Słowa kluczowe: optymalizacja kosztów, algorytmy genetyczne, koszt jednostkowy.

1. Wprowadzenie

Większość współczesnych maszyn i urządzeń posiadające wały i osie są łożyskowane. Zadaniem łożysk jest przenoszenie na kadłub maszyny sił działających na części maszynowe osadzone w łożyskach lub na nich oraz zmniejszenie tarcia podczas ruchu względnego czopów i łożysk [2, 7]. Powszechne stosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, maszynowym czy gospodarstwie domowym powoduje duże zapotrzebowanie na różnego rodzaju łożyska toczne. Produkowane w milionach sztuk rocznie (kilka tysięcy odmian) przynoszą znaczny dochód.

W celu zwiększenia opłacalności produkcji zwrócono uwagę na optymalizację technologii wykonania. Optymalizacja to metoda poszukiwania ekstremum funkcji z punktu widzenia określonego kryterium jakości i już na początku lat 80 ubiegłego wieku podjęto pierwsze próby optymalizacji procesów technologicznych [14]. Wyniki prób były obiecujące, lecz metodyka badań była pracochłonna a przez to nie adekwatna do pozytywnych aspektów prac optymalizacyjnych. Szybki rozwój dziedziny informatyki, sprzętu komputerowego a także zwiększenie możliwości metod optymalizacyjnych przyczynił się, że na nowo podjęto badania.

Do rozwiązywania zadań optymalizacyjnych stosowane są różne metody, w zależności od przestrzeni poszukiwań, stopienia skomplikowania zadania jak również od rodzaju parametrów wejściowych. Spośród stosowanych metod można wyróżnić [16]:

- metody analityczne,
- przeglądowe,
- losowe.

Wspomniane techniki były i są używane z powodzeniem do wielu zastosowań. Jednak w miarę jak stajemy wobec coraz to bardziej złożonych problemów, będą potrzebne nowe metody. Lepsze efekty przy rozwiązywaniu takiego typu zadań daje zastosowanie metod sztucznej inteligencji – algorytmów genetycznych. Algorytmy genetyczne są bardziej odporne na zakłócenia, bardziej efektywne, wykazują większą elastyczność w porównaniu z tradycyjnymi metodami optymalizacyjnymi i różnią się od nich pod kilkoma względami. Algorytmy genetyczne:

- nie przetwarzają bezpośrednio parametrów zadania, lecz ich zakodowaną postać,

- prowadzą poszukiwania, wychodzą nie z pojedynczego punktu, lecz z pewnej ich populacji,
- korzystają tylko z funkcji celu, nie zaś jej pochodnych lub innych pomocniczych informacji,
- stosują probabilistyczne, a nie deterministyczne reguły wyboru.

Algorytmy genetyczne wymagają zakodowania zbioru parametrów zadania optymalizacyjnego w postaci skończonego ciągu znaków z pewnego skończonego zbioru. W przeciwieństwie do wielu metod optymalizacyjnych, algorytmy genetyczne określają poszukiwania stosując wybór probabilistyczny. Algorytmy genetyczne posługują się wyborem losowym, aby uzyskiwać poprawę wyników.

Przedstawione cechy składają się w końcowym efekcie na odporność algorytmu genetycznego i wynikającą stąd jego przewagę nad innymi, powszechnie stosowanymi technikami sztucznej inteligencji [4, 8, ÷ 10].

Algorytmy genetyczne, od momentu powstania, wykorzystywane były do procesów optymalizacyjnych. Stosowane były do symulacji procesów genetycznych, w technice poprzez implementację w metodzie rozpoznawania obrazu przetworzonego do postaci cyfrowej czy optymalizacji funkcji dwóch zmiennych przy zastosowaniu mechanizmów dominowania, krzyżowania, mutacji oraz różnych metodach reprodukcji. Holland J. H., który uważany jest za twórcę algorytmów genetycznych, postawił tezę, iż poprzez odpowiednie przedstawienie problemu w formie algorytmu komputerowego otrzymamy nową metodę rozwiązywania złożonych problemów tą samą drogą jaką kroczy natura – drogą ewolucji. W pierwszym modelu, uważanym za model klasyczny, chromosomy reprezentowane były w formie ciągów zer i jedynek, które kodowały dopuszczalne rozwiązania danego problemu. Algorytmy używające prostej metody kodowania i prostych mechanizmów reprodukcji okazały się bardzo skuteczne w działaniu i rozwiązywaniu wielu złożonych problemów.

Dalsze badania nad algorytmami genetycznymi przyczyniły się do ich rozpowszechnienia. Obecnie znajdują zastosowanie wszędzie tam gdzie istnieje potrzeba optymalizacji lub tam gdzie konieczne jest przeszukanie bardzo dużego zbioru możliwych rozwiązań, np. w medycynie, inżynierii produkcji, politologii a klasyczne metody okazują się nieefektywne [1, 4, 8].

Charakterystyczne dla algorytmu genetycznego jest, że przy jednakowych ustawieniach parametrów i identycznych populacjach początkowych można obserwować różne zachowania algorytmu w niezależnych uruchomieniach. Powodem jest element losowości obecny zarówno w selekcji jak i w operacjach genetycznych. Aby dokonać rzetelnej oceny algorytmu genetycznego wymaga się wielu niezależnych uruchomień dla losowej próby różnych populacji początkowych. Rezultaty działania algorytmu genetycznego często przedstawiane są za pomocą krzywych zbieżności, które są wykresem zmian rozwiązania generacji w czasie. Krzywe zbieżności kreśli się dla pojedynczego uruchomienia lub dla uśrednionych wielu niezależnych uruchomień algorytmu.

Analizując dostępną literaturę należy stwierdzić, że mimo powstania nowych metod sztucznej inteligencji (sieci neuronowe, logika rozmyta) algorytmy genetyczne nadal są często wykorzystywane w zadaniach optymalizacyjnych ze względu na ich łatwość implementacji.

Prace badawcze ukierunkowane są w dwóch kierunkach: na binarnym kodowaniu chromosomu oraz odpowiednim wyborze metody kodowania i definiowania operatorów genetycznych. W pierwszym jak i w drugim kierunku, celem jest znalezienie takiej postaci

algorytmu która będzie się charakteryzować dużą „mocą” rozwiązywania i będzie równie efektywna dla szerokiej klasy problemów [6, 9, 13, 17, 18].

2. Koszt jednostkowy w operacjach tokarskich

Rozwiązanie problemu optymalizacji wymaga sformułowania zależności między wielkościami wejściowymi procesu skrawania. Za wielkości wejściowe w obróbce skrawaniem należy uznać:

- wielkości związane z przedmiotem obrabianym (długość l , średnica d),
- wielkości związane z narzędziem (geometria ostrza, promień zaokrąglenia wierzchołka ostrza r_e , właściwości materiałowe),
- wielkości związane z obrabiarką (zakres prędkości ruchu głównego V_c i posuwowego v_p),
- wielkości związane z warunkami skrawania (prędkość ruchu głównego V_c , prędkość ruchu posuwowego v_p , głębokości skrawania a_p i posuwu p).

Wielkości wejściowe procesu skrawania mogą występować w postaci złożonej tworząc zależność: trwałość narzędzia – prędkość skrawania. Wartości prędkości ruchu głównego oraz posuwu uważane są za zmienne wielkości wejściowe. Wyniki procesu skrawania będące wielkościami wejściowymi są oceniane przez następujące wskaźniki:

- koszt jednostkowy K_j ,
- czas maszynowy t_m ,
- okres trwałości ostrza T_{rz} ,
- chropowatość powierzchni.

Spośród przedstawionych wskaźników wybiera się kryteria optymalizacji oraz warunki ograniczające lub uzupełniające. Przyjmując, jako kryterium koszt jednostkowy, można w następujący sposób sformułować problem *optymalizacji jednokryterialnej z ograniczeniami*:

$$K_j = f(V_c, p) \rightarrow E_{min} \quad (1)$$

$$T_j = f(V_c, p) \leq t_0 \quad (2)$$

$$R_z = f(V_c, p) \leq R_{z dop.} \quad (3)$$

$$p_{min} \leq p \leq p_{max} \quad (4)$$

gdzie: E_{min} – minimum kosztów jednostkowych,

t_0 – planowany czas wykonania zabiegu obróbkowego,

$R_{z dop.}$ – wymagana przez konstruktora wartość parametru chropowatości powierzchni.

Koszt jednostkowy K_j w obróbce skrawaniem obejmuje tylko te składniki kosztu produkcji, które zależą od czasu maszynowego t_j :

$$K_j = \frac{1}{J_o} \times (K_m + K_R) [zł] \quad (5)$$

gdzie: J_o – wskaźnik jakości,

K_m – koszty maszynowe,

K_R – koszty narzędziowe.

Uzupełniając wzór (5) o wskaźnik jakości oraz koszty maszynowe i koszty narzędziowe otrzymujemy koszt jednostkowy w funkcji czasu:

$$K_j = \left[1 / \left(1 - \left(\frac{B}{100} \right) \right) \right] \times (K_o \times t + K_N \times t_m) [\text{zł}] \quad (6)$$

gdzie: B – procent braków na podstawie danych kontroli technicznej,

K_o – koszt minuty pracy obrabiarki [zł/min],

K_N – koszt minuty pracy narzędzia [zł/min].

Koszt minuty pracy narzędzia odniesiony do okresu trwałości ostrza możemy obliczyć ze wzoru:

$$K_N = \frac{K_{N'}}{(i \times T_{rz})} [\text{zł/min}] \quad (7)$$

gdzie: $K_{N'}$ - koszt narzędzia [zł],

i – liczba naroży,

T_{rz} – rzeczywisty okres trwałości ostrza dla założonych parametrów skrawania.

Rzeczywisty okres trwałości ostrza przedstawia się następująco:

$$T_{rz} = T_N \times \left(\frac{V_N}{V_{rx}} \right)^s [\text{min}] \quad (8)$$

gdzie: T_N – okres trwałości ostrza w minutach odpowiadająca prędkości skrawania V_N ,

V_N – prędkość skrawania odpowiadająca okresowi trwałości ostrza [m/min] (parametry dostępne w katalogach producentów narzędzi),

V_{rx} – prędkość skrawania rzeczywista [m/min],

s – wykładnik potęgowy ustalony doświadczalnie – dla węglików spiekanych $s = 3 \div 6$.

Przyjmując liczbę braków na poziomie zerowymi i uwzględniając powyższe zależności, otrzymujemy zależność na koszty jednostkowe w funkcji minutowej trwałości narzędzia:

$$K_j = [K_o \times (t_m + t_z \times \left(\frac{t_m}{T_{rz}} \right))] + [(K_{N'} \times t_m) / (i \times T_{rz})] [\text{zł}] \quad (9)$$

Analizując ogólny koszty operacji należy zauważyć, że największy wpływ na koszty jednostkowe ma prędkość skrawania, a w mniejszym stopniu posuw. Funkcja $K_j = f(V_{rz})$ posiada pewne minimum lokalne, przy którym koszt jednostkowy jest najmniejszy. Przy wyznaczonym minimum możemy odczytać prędkość skrawania, która zawiera się w przedziale $V_{min} \leq V \leq V_{max}$. Ustalona wartość prędkości skrawania jest zależna również od trwałości narzędzia.

3. Charakterystyka narzędzia optymalizującego

Narzędziem optymalizacyjnym w przeprowadzonym badaniu był program komputerowy Optima_AG, działający w oparciu o algorytmy genetyczne w formie tzw. dodatku do Microsoft Excel [5]. Za pomocą tego narzędzia można zoptymalizować:

- zyski,
- koszty,

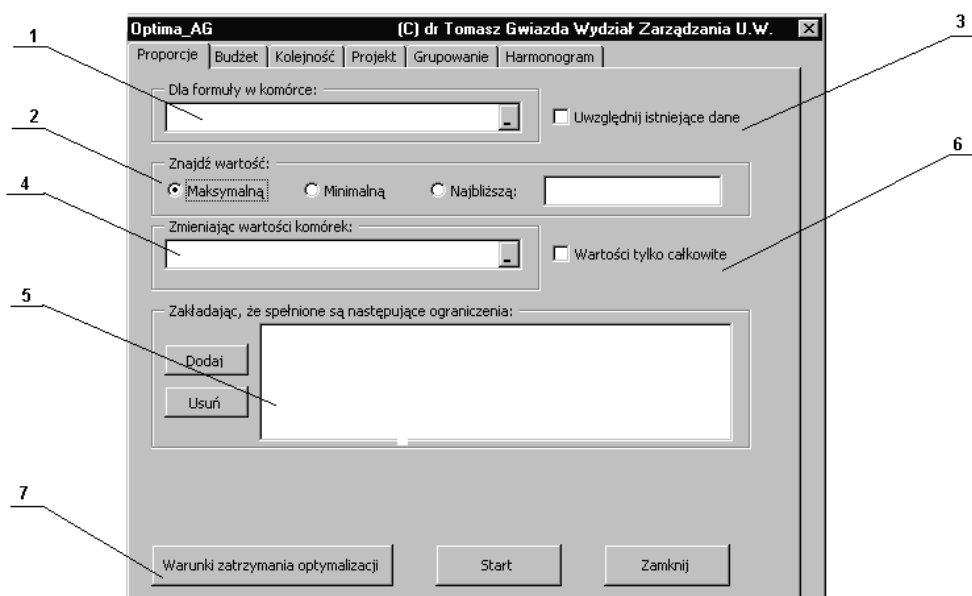
- proces produkcyjny,
oraz wiele innych problemów, których model można przedstawić w Excelu.

Program Optima_AG jest narzędziem uniwersalnym i obejmuje szeroką grupę problemów optymalizacyjnych. Z tego względu program został podzielony na kilka oddzielnych modułów, z których każdy jest przeznaczony do optymalizacji problemów o innym charakterze, np.: budżet, grupowanie, harmonogram.

Działanie programu oraz jego konfiguracja są zależne od postawionego problemu. Określenie warunków zatrzymania narzędzia Optima_AG jest uzależnione od problemu optymalizacyjnego i określa się na dwa sposoby:

- optymalizacja zostanie przerwana po określonej liczbie iteracji,
- optymalizacja zostanie przerwana po określonej liczbie minut.

Na rysunku 1 przedstawiono podstawowe okno programu, które składa się z kilku części: 1 – optymalizowana formuła, 2 – charakter zadania optymalizacyjnego, 3 – uwzględnienie istniejących danych, 4 – zakres komórek zmienianych, 5 – ograniczenia, 6 – wartości tylko całkowite, 7 – warunki zatrzymania procesu optymalizacyjnego.



Rys. 1. Okno programu Optima_AG [5]

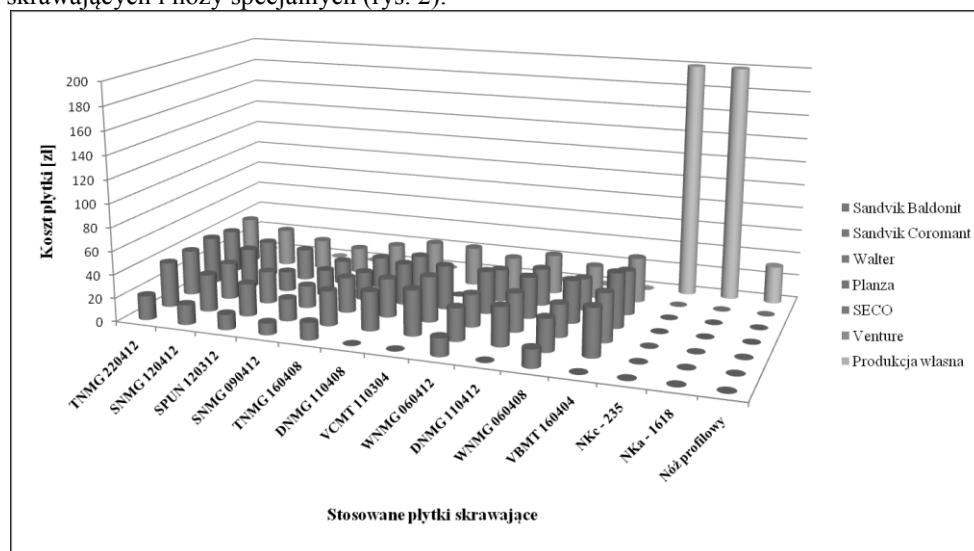
4. Metodyka badań

Głównym celem przeprowadzonego eksperymentu była optymalizacja kosztów wykonania pierścienia zewnętrznego łożyska tocznego. Technologia produkcji elementu jest złożonym procesem, na etapie planowania badań zostały wprowadzone uproszczenia i założenia pozwalające w sposób miarodajny na analizę otrzymanych wyników eksperymentu. Analizie zostały poddane jedynie główne zabiegi operacji tokarskich z pominięciem zabiegów pomocniczych tj. obróbka promieni i faz. Czynności te w sposób nieznaczny wpływają na zwiększenie kosztów, natomiast znacznie wydłużają proces obliczeniowy. Równie ważnym założeniem w analizie kosztów jednostkowych było

wprowadzenie tzw. nominalnej trwałości narzędzia, zwanej trwałością katalogową. Wyznacznikiem tej wartości, są parametry prędkości skrawania i posuwu wykazane w katalogu producentów narzędzi. Wytwórcy ustalili tą wartość na poziomie 15 minut pracy ostrza.

Wykonanie pierścienia zewnętrznego łożyska tocznego prowadzono według trzech procesów technologicznych. Pierwszy proces polegał na obróbce elementu z wykorzystaniem trzech operacji tokarskich, w których użytych zostało piętnaście różnych typu narzędzi. Obróbka została przeprowadzona na obrabiarkach o sterowaniu krzywkowym. Drugi polegał na obróbce elementu z wykorzystaniem obrabiarki o sterowaniu NC zachowując warunki obróbki z. procesu pierwszego. Ostatni etap polegał na obróbce pierścienia zewnętrznego z wykorzystaniem dwudziestu dwóch narzędzi a proces obróbki przeprowadzono na obrabiarence o sterowaniu CNC.

Łącznie w badaniach zostało wykorzystanych w różnej konfiguracji czternaście płytek skrawających i noży specjalnych (rys. 2).



Rys. 2. Wykaz stosowanych narzędzi oraz ich koszt

Materiałem obrabianym była stal ŁH15, o twardości około 15 HRc.

Analizie kosztów poddane zostały zabiegi główne trzech procesów technologicznych. Uzyskane podczas obróbki skrawaniem wyniki posłużyły, jako dane wejściowe dla narzędzia optymalizującego Optima_AG. Wprowadzone dane były analizowane według schematu (rys. 3.):

- wykonujemy jedną czynność na jednym elemencie,
- celem jest zminimalizowanie kosztów jednostkowych – komórka: B32,
- dane wejściowe potrzebne do obliczeń zawiera zakres komórek: B5: B15,
- parametry zmieniane i ich zakres w analizowanym problemie to zakres komórek: F5: G6,
- zakres komórek B18: B28 zawierają formuły obliczające koszt jednostkowy.

4. Analiza i wyniki badań

Tabela 1 przedstawia wybrane wyniki obliczeń wartości parametrów technologicznych dla kilku zabiegów. Wartości danych, przedstawione w złotych nie odzwierciedlają rzeczywistych kosztów, lecz są pomniejszone o pewien, stały wskaźnik.

Tab. 1.

Płytką skrawająca	d [mm]	l [mm]	K_{N1} [zł]	i	V_N [m/min.]	p [mm/obr.]	t_m [min.]	K_j [zł]
SNMG 120412	49,5	39,8	31,60	8	107	0,05	1,156	0,782
SNMG 120412	62	11,2	31,60	8	214	0,05	0,410	0,277
SNMG 120412	49,8	38	31,60	8	198	0,22	0,252	0,171
TNMG 220412	54,8	43,2	38,40	6	190	0,22	0,316	0,146
SNMG 120412	60,8	36,4	31,60	8	209	0,22	0,295	0,199
SNMG 120412	60,8	5,8	31,60	8	214	0,05	0,207	0,140
SNMG 090412	60,6	34,1	20,20	8	214	0,22	0,275	0,185

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono okno programu Optima_AG, które zawiera pełną formułę obliczeń kosztów jednostkowych poszczególnych zabiegów.

Zastosowane ograniczenia wewnętrzne, w celu zmniejszenia liczby obliczeń, były realizowane według następujących wzorów:

- dla prędkości skrawania:

$$\min G5 \leq F5 \leq \max G5 ;$$

- dla posuwu:

$$\min G6 \leq F6 \leq \max G6.$$

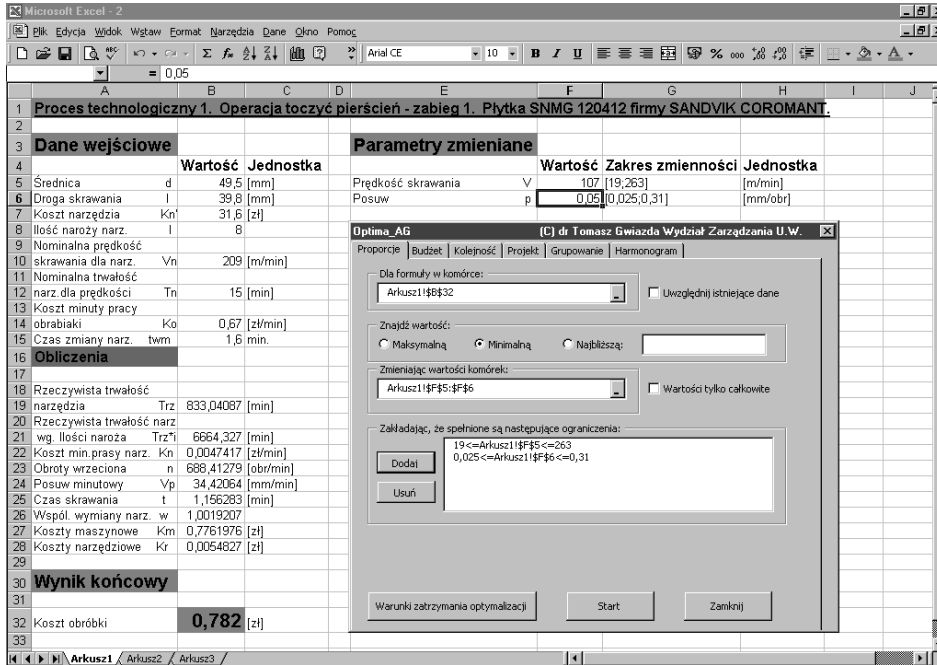
Kryterium zatrzymania procesu optymalizacyjnego zostało ustalone na czas $t = 2 \text{ min}$. Powyżej tego okresu wynik optymalizacji nie ulegał zmianie. Należy przyjąć, że wyniki obliczeń uzyskane w czasie t są optymalne dla analizowanego problemu.

Wynik uruchomienia optymalizatora przedstawia rysunek 4.

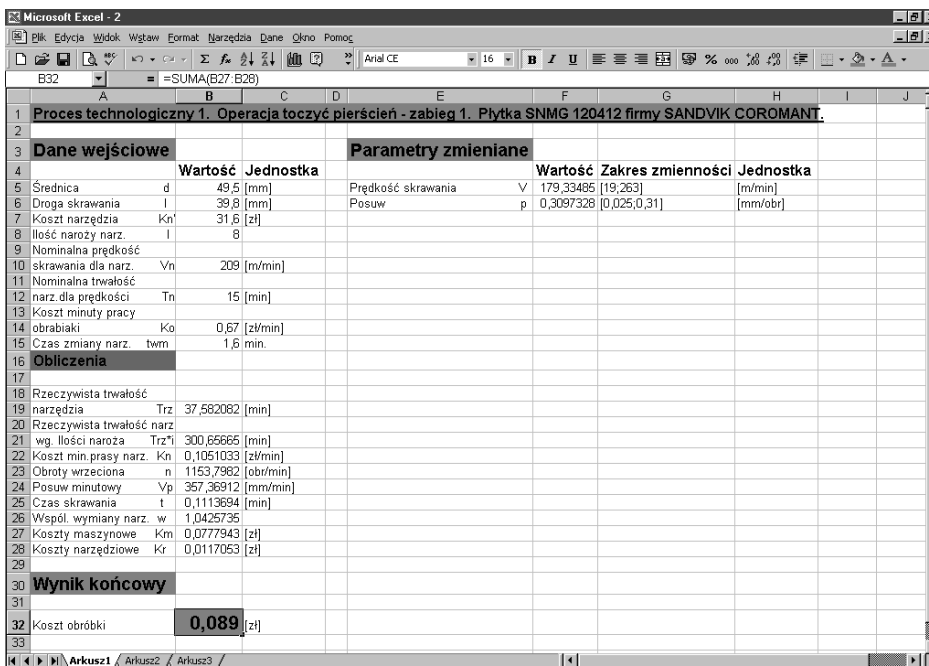
W komórkach B5 ÷ B15 można zauważyć stałe, które są wspólne dla wszystkich operacji. Niezmienne przedstawiają się następująco: $T_N = 15 \text{ min}$ – okres trwałości nominalnej ostrza (wartość katalogowa); $K_o = 0,67 \text{ zł/min}$ – koszt minutowy pracy obrabiarki, $t_z = 1,6 \text{ min}$ – czas wymiany narzędzia, $s = 6$ – wykładnik potęgowy.

Tabela 2 przedstawia wybrany, przykładowy fragment wyników optymalizacji kosztów jednostkowych.

Analizując tabelę 2 należy zwrócić uwagę, że wartość V_{rz} jest wartością optymalną, dla której koszt jednostkowy jest najmniejszy. Jest to ekstremum funkcji $K_j = f(V_{rz})$, a krzywa tej funkcji przyjmuje kształt podobny do paraboli. Dla pełnego zobrazowania funkcja ta przedstawiona jest na wykresach dla poszczególnych zabiegów procesów technologicznych. Przedstawione wykresy składają się z kilku krzywych, do których przyporządkowani są kolejni producenci narzędzi.



Rys. 3. Dane podlegające optymalizacji wraz z oknem Optima_AG



Rys. 4. Wynik optymalizacji kosztów jednostkowych

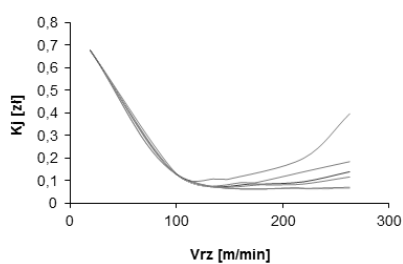
Zaskakująca jest wartość posuwu, która jest dla wszystkich przedstawionych obliczeń jednakowa. Wartość ta jest wartością maksymalną posuwu, jaką można uzyskać na danej obrabiarce. Algorytm optymalizujący „uznał” tą wartość za wartość optymalną.

Poniżej, na rysunkach 5 ÷ 7, przedstawiono wybrane wyniki obliczeń wartości kosztów jednostkowych operacji tokarskich analizowanych procesów technologicznych.

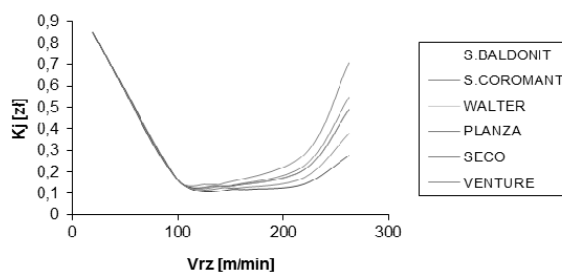
Tab. 2. Fragment wyników optymalizacji kosztów jednostkowych

Zabieg	Producent	Wynik optymalizacji				
		T_{rz} [min]	t_m [min]	K_j [zł]	V_{rz} [m/min]	p [mm/obr]
1	Sandvik Baldonit	23,76	0,115	0,093	172,2	0,309
	Sandvik Coromant	37,59	0,111	0,089	179,3	0,309
	Walter	36,89	0,119	0,096	163,8	0,309
	Planza	39,41	0,132	0,107	150,6	0,309
	SECO	36,45	0,087	0,070	228,5	0,309
	Ventura	38,25	0,138	0,111	144,5	0,309
2	Sandvik Baldonit	23,91	0,038	0,031	182,2	0,309
	Sandvik Coromant	37,45	0,003	0,031	183,7	0,309
	Walter	36,60	0,040	0,032	175,8	0,309
	Planza	39,58	0,034	0,028	204,1	0,309
	SECO	36,51	0,036	0,030	191,4	0,309
	Ventura	37,88	0,041	0,033	171,3	0,309

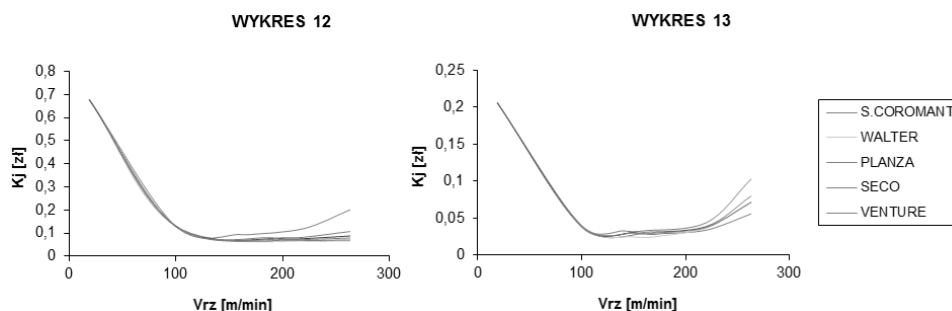
WYKRES 3



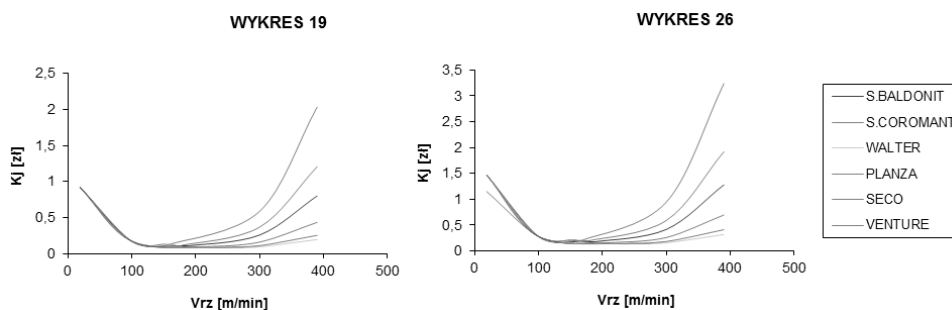
WYKRES 4



Rys. 5. Proces technologiczny pierwszy



Rys. 6. Proces technologiczny drugi



Rys. 7. Proces technologiczny trzeci

Po analizie wyników eksperymentu należy stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania koszt jednostkowy maleje do osiągnięcia pewnego minimum, a następnie rośnie do nieskończoności. Wyznaczona, na podstawie otrzymanych wyników, krzywa paraboliczna pozwala w sposób jednoznaczny określić relacje pomiędzy rzeczywistą prędkością skrawania a kosztem jednostkowym operacji.

Dążenie do ograniczenia kosztów jednostkowych powoduje, że dowolnie zwiększana jest wartość prędkości skrawania. Taka dowolność skutkuje radykalnym zmniejszeniem trwałości narzędzia. Przedstawione narzędzie optymalizacyjne pozwala zachować relację: minimalny koszt jednostkowy – maksymalna trwałość narzędzia. Uzyskana wartość prędkości skrawania można nazwać ekonomiczną prędkością skrawania.

Na wartość kosztu jednostkowego wpływa także wartość posuwu, jednak jego wpływ jest bardziej jednoznaczny. Przy wzroście wartości posuwu, wartość kosztów jednostkowych maleje. Pewnym ograniczeniem w dowolnym zmienianiu wartości posuwu jest dokładność wymiarowo – kształtowa oraz dopuszczalna chropowatości powierzchni narzucona przez technologia.

Wyznaczenie tych parametrów było celem prowadzonych badań.

5. Wnioski

W artykule zostały przedstawione wyniki badań zwiększenia rentowności wytwarzania elementów łożysk z zastosowaniem jednej z metod optymalizacyjnych. Analizie poddano proces technologiczny łożyska tocznego w trzech wariantach, na obrabiarkach o sterowaniu: krzywkowym, NC oraz CNC. Pozwoliło to na racjonalny wybór struktury i

organizacji procesu technologicznego. Eksperyment pozwolił przeanalizować narzędzia skrawające produkowane przez kilka wiodących, losowo wybranych firm. Ułatwiło to dobór nie tylko samych parametrów skrawania, ale także wybór odpowiedniej trwałości i jakości narzędzi.

Artykuł stanowi pewne wprowadzenie w obszerną i ciągle rozwijającą się problematykę, jaką stanowi optymalizacja parametrów skrawania. Stanowi także pewien przykład pokazujący możliwą drogę optymalizacji. Zaproponowano prowadzenie procesu optymalizacji za pomocą algorytmów genetycznych. Wybór tej metody nie jest przypadkowy, lecz spowodowany cechą jaką jest skuteczność w przypadku modeli wielowymiarowych, co do których można oczekiwać ekstremów lokalnych. Ponadto należy wspomnieć o takich zaletach metody jak: odporność na zakłócenia, efektywność, skuteczność, dokładność itd. Innym powodem zastosowania metody algorytmów genetycznych jest łatwość generowania programów aplikacyjnych. Metodę tą można stosować bezpośrednio w przemyśle na komputerze średniej klasy, wyposażonym w arkusz kalkulacyjny Excel.

Wprowadzenie nowych metod optymalizacji do przemysłu jest w pewien sposób ograniczone. Ograniczenia te wynikają z tego, że brak jest dostatecznie pełnych i wiarygodnych danych opisów matematycznych charakteryzujących związki parametrów skrawania z wielkościami ograniczającymi te parametry. Dlatego też opieranie się na teoretycznym charakterze związków prowadzi do rozwiązań różniących się od rozwiązań praktycznych. Jednak pomimo wielu trudności, szczególnie w ostatnich latach obserwuje się znaczne nasilenie prac badawczych poświęconych problemowi optymalizacji parametrów skrawania, gdyż rozwiązanie tych problemów pozwoli wytwarzać taniej przy akceptowalnym przez klienta poziomie jakości wyrobów.

Literatura

1. Arabas J., Wykłady z algorytmów ewolucyjnych. Oficyna wydawnicza P.W. Warszawa. 1999.
2. Dietrich M., Podstawy Konstrukcji Maszyn. Tom 2. WNT Warszawa. 1999.
3. Gajdy J. B., Jadczyk R., Optymalizacja, klasyfikacja, logistyka: przykłady zastosowań. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2011.
4. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. 1998.
5. Gwiazda T., Optima_AG. Wydawnictwo P.W. Warszawa 1999.
6. Jędrkowiak L., Algorytmy genetyczne, <http://wombat.ict.pwr.wroc.pl/internet/flash/index1.html>
7. Krzemiński – Freda H., Łożyska toczne. PWN Warszawa. 1985.
8. Masters T., Sieci neuronowe w praktyce. WNT Warszawa 1996.
9. Michalewicz Z., Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
10. Osowski S., Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna wydawnicza P.W. Warszawa. 2000.
11. Pająk E., Wieczorowski K., Podstawy optymalizacji operacji technologicznych w przykładach. PWN Warszawa. 1982.
12. Poradnik inżyniera. Obróbka skrawaniem. Tom 1. WNT 1999.
13. Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt, Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons 1998

14. Sałaciński T., Optymalizacja produkcji w czasach kryzysu. Wydawnictwo Wiedza i Praktyka, Warszawa 2012.
15. Seidler J., Badach A., Metody rozwiązywania zadań optymalizacyjnych. WNT Warszawa.1980.
16. Stachurski A., Wierzbicki A. P., Podstawy optymalizacji. Oficyna wydawnicza P.W. Warszawa.1999.
17. Vose M. D., The simple genetic algorithm. Foundations and theory, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1999.
18. Wprowadzenie do algorytmów genetycznych
<http://panda.bg.univ.gda.pl/~sielim/genetic/index.htm>

Dr inż. Piotr Wittbrodt
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Politechnika Opolska
45-370 Opole, ul. Ozimska 75
tel./fax.: (0-77) 449 88 45
e-mail: p.wittbrodt@po.opole.pl