

Wyznaczanie funkcji trwałości ostrza przy toczeniu

RYSZARD FILIPOWSKI, STANISŁAW ZIĘTARSKI *

Przedstawiono algorytm tworzenia metodą skróconą funkcji trwałości ostrza przy toczeniu. Funkcję trwałości ostrza dla toczenia określają trzy parametry (v_c , f , a_p). Ich przestrzeń badań jest ograniczona wartościami minimalną i maksymalną. Materiałem obrabianym była stal C55, ostrze narzędzia wykonane było z węgla spiekane S10. Przyjęto plan badań z punktami gwiazdnymi o ramieniu $a=1,414$. Liczba badań wynosi 24 punkty. W punkcie centralnym planu wykonuje się pełny eksperyment zużycia ostrza. Za pomocą programu regresji wielomianowej REG6IJ5 tworzy się bezwymiarową charakterystykę zużycia ostrza. W pozostałych punktach planu wykonuje się eksperymenty krótkie, mierząc przyrost zużycia ostrza (ΔVB) i czas skrawania (Δt).

Trwałość ostrza w punkcie centralnym planu badań T , jej charakterystykę bezwymiarową oraz rezultaty krótkiego eksperymentu skrawania wykorzystuje się do obliczenia trwałości T_i w pozostałych punktach planu badań. Uzyskana funkcja trwałości ostrza przy toczeniu ma formę wykładniczą lub wielomianową drugiego stopnia. Funkcję trwałości ostrza wykorzystuje się do obliczenia parametrów skrawania w badanej przestrzeni czynnikowej oraz do obliczenia normy czasu w operacji toczenia.

Wstęp

Trwałość narzędzia skrawającego jest istotną wielkością gdyż w dużym stopniu determinuje ona efektywność obróbki. Zdeterminowana jest trwałością jego ostrza skrawającego. Z tego powodu określenie jej wartości ma duże znaczenie przy opracowywaniu procesów technologicznych obróbki skrawaniem. Przykłady ostrzy używanych do toczenia przedstawiono na rys. 1.

Przedstawione na rys. 1 wymienne ostrza narzędzi skrawających różnią się geometrycznymi cechami konstrukcyjnymi, w zależności od rodzaju obróbki do jakiej są przeznaczone. Występują także płytki z różnymi powłokami, przy czym najczęściej stosowanymi są: azotek tytanu (TiN), węgiel azotku tytanu (Ti(C,N)) oraz tlenek aluminium (Al_2O_3) [2]. Zwiększa to w istotnym stopniu trwałość ostrzy w rezultacie zmniejszenia tarcia między ostrzem a materiałem obrabianym.

W artykule przedstawiono skróconą metodę definiowania funkcji trwałości ostrza, przyjmując następującą jej formę:

$$T = f(v_c, f, a_p) \quad (1)$$

* Dr inż. Ryszard Filipowski, filipowski@meil.pw.edu.pl, dr inż. Stanisław Ziętarski, Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Zakład Obróbek Wykańczających i Erozyjnych, al. Niepodległości 222, 00-663 Warszawa

Jest to więc funkcja określona w przestrzeni czynnikowej trzech zmiennych niezależnych o granicznych wartościach:

$$v_c \in \langle v_{cmin}, v_{cmax} \rangle, \quad f \in \langle f_{min}, f_{max} \rangle, \quad a_p \in \langle a_{pmin}, a_{pmax} \rangle.$$

W przestrzeni czynnikowej przyjęto pięciopozomowy plan badań z punktami gwiazdnymi o ramieniu $\mu = 1,414$. Plan badań zawiera 24 eksperymenty. Materiałem wykorzystywanym w badaniach były wałki ze stali C55 o średnicy 120 mm, toczone do średnicy 75 mm, a ostrza skrawające narzędzia miały kształt kwadratowych płytek z węgla spiekane S10 bez powłoki.

Eksperymenty polegały na pomiarze zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia VB i czasów skrawania t . Pełny eksperyment wykonano w punkcie centralnym planu badań $(-1, +1, +1)$ – oznaczenie kodowane parametrów skrawania: $v_c = 92,8$ m/min, $f = 1,06$ mm/obr, $a_p = 1,83$ mm, jako graniczną wartość zużycie ostrza przyjęto $VB_{gr} = 0,3$ mm, odpowiadający czas skrawania stali C55 zwany trwałością ostrza wynosi $T = 29,75$ sek.

Na podstawie wyników badań w punkcie centralnym zdefiniowano funkcję bezwymiarową zużycia ostrza $TB = t/T$, jak funkcję wielomianową piątego stopnia, w której zmienną niezależną jest zużycie ostrza, tj. $TB = F(VB)$. Wykorzystano do tego celu program autorski REG6IJ5 napisany w języku Fortran. Jest to program regresji wielomianowej z dwoma



Geometria krawędzi skrawającej / Rodzaj obróbki	a) obróbka zgrubna	b) obróbka średniokładna	c) obróbka wykończeniowa
Ujemny kąt natarcia			
Dodatni kąt natarcia			

Rys. 1. Przykładowe ostrza skrawające przeznaczone do toczenia: a) obróbka zgrubna, b) obróbka średniokładna, c) obróbka wykończeniowa [2]

więzami (punktami), deklarowanymi przez użytkownika programu, przez które przechodzi funkcja wielomianowa.

W pozostałych punktach planu badań wykonano krótkie eksperymenty skrawania rejestrując przyrost zużycia ostrza ΔVB_i oraz odpowiadający mu czas toczenia t_i . Trwałości ostrza ΔT_i w eksperymentach skróconych obliczono za pomocą programu autorskiego TRBEZ2. Na podstawie danych ($\Delta VB_i, \Delta t_i$) pozyskanych w eksperymentach skróconych oraz bezwymiarowej funkcji zużycia ostrza $TB=F(VB)$ program oblicza trwałości T_i dla $i=1,2,\dots,23$.

Uzyskane trwałości ostrza T_i oraz odpowiadające im parametry skrawania we wszystkich punktach planu badań (T_i, v_{ci}, f_i, a_{pi}), $i=1,2,\dots,24$ wprowadza się do programu krokowej regresji wielokrotnej REGSTEP. Jest to program autorski wykonany na bazie podprogramów IBM [5]. Uzyskane funkcje regresji $T=f(v_c, f, a_p)$ mogą mieć postać wykładniczą lub wielomianową drugiego stopnia. Funkcje mogą być wykorzystane do generowania tabel zalecanych parametrów skrawania oraz normy czasu dla operacji toczenia.

Pięciopozomowy plan doświadczeń trzech zmiennych

Plan eksperymentu na pięciu poziomach dla zmiennych niezależnych (v_c, f, a_p) w zapisie kodowanym ma formę:

$$(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$$

gdzie: α – tzw. ramię gwiazdne (np. $\alpha = 1,414$).

Dla każdego parametru (v_c, f, a_p) dla stali C55 ustala się graniczne wartości ($-\alpha, +\alpha$) zmiennych rzeczywistych:

- prędkość skrawania $v_c \in \langle 80,0; 220 \rangle$ m/min,
- posuw $f \in \langle 0,1; 1,5 \rangle$ mm/obr,
- głębokość skrawania $a_p \in \langle 0,3; 2,5 \rangle$ mm.

Wartości zmiennych dla poziomów pośrednich ($-1, 0, +1$) ustala się przez podział naturalny lub logarytmiczny:

– dla podziału naturalnego stosuje się zależność:

$$XN = \frac{x_{max} - x_{min}}{2\alpha} (XK + \alpha) + \ln x_{min} \tag{2}$$

– dla podziału logarytmicznego stosuje się zależność:

$$XN = \exp \frac{\ln x_{max} - \ln x_{min}}{2\alpha} (XK + \alpha) + \ln x_{min} \tag{3}$$

gdzie:

- XN – zmienna naturalna,
- XK – zmienna zakodowana,
- x_{max} – wartość maksymalna zmiennej,
- x_{min} – wartość minimalna zmiennej,
- α – promień gwiazdny.

Przytoczone zależności (2) i (3) wynikają z linearyzacji prostej przez dwa graniczne punkty ($-\alpha, +\alpha$). Dla przyjętych wartości granicznych parametrów (v_c, f, a_p) dla stali C55 wartości parametrów pośrednich dla wartości kodowanych ($-1, 0, +1$) dla podziału logarytmicznego (3) zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Pięciopozomowy plan badań dla stali C55

Kody	v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]	T [min]
$\sqrt{2}$	80,000	0,130	0,300	80,000
-1	92,769	0,185	0,409	92,700
0	132,664	0,441	0,866	132,700
+1	189,717	1,048	1,832	189,700
$\sqrt{2}$	219,999	1,500	2,500	220,000

Do ich wyznaczenia wykorzystano autorski program VKDREL3D (w języku Fortran).

Plany eksperymentów w przestrzeni czynnikowej przyjmowane przez autorów badań są różne, niemniej muszą spełniać trzy podstawowe warunki:

1) warunek symetrii eksperymentów w planie badań,

$$\sum_{u=1}^n x_{iu}, \quad i=1,2,\dots,k$$

2) warunek ortogonalności eksperymentów w kolumnach macierzy badań,

$$\sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju}, \quad i \neq j, \quad i, j=0,1,\dots,k$$

3) warunek normalności:

$$\sum_{u=1}^n x_{iu}^2 = n.$$

Symetryczność polega na tym, że wszystkie zmienne niezależne są rozłożone symetrycznie względem centrum planu badań.

Ortogonalność oznacza, że iloczyny skalarnie wektorów kolumnowych w macierzy badań są równe zeru.

Normalność oznacza, że suma kwadratów zmiennych w kolumnach jest równa liczbie pomiarów n .

W Tabeli 2 przytoczono plan eksperymentu w formie zakodowanej przyjęty przez autora [6] dla trzech zmiennych niezależnych (v_c , f , a_p). Zawiera on 24 eksperymenty i podzielony jest na cztery tablice składowe. Kolejność prób w Tabeli 2 dobierana jest wg zasady liczb losowych. Taka kolejność eliminuje powtarzane w badaniach błędy systematyczne.

W Tabeli 3 zamieszczono natomiast wartości parametrów naturalnych przyporządkowane wartościom zakodowanym (Tabela 2). Wartości zostały obliczone przez program VKDREL3D wykorzystywany do obliczenia wartości naturalnych dla pośrednich wartości zakodowanych planu badań. Wspomniany program opracowano w celu uniknięcia pomyłek przy ustaleniu parametrów naturalnych w punktach przestrzeni badań.

W celu skrócenia czasu badań w 24 punktach pomiarowych, pełny eksperyment wykonuje się w punkcie centralnym zaś 23 eksperymenty skrócone w pozostałych punktach planu badań. Wyniki badań w punkcie centralnym macierzy badań zamieszczono w Tabeli 4.

Czas mierzono w minutach (t_m) i w sekundach (t_s), a do wyznaczenia funkcji trwałości przyjmowano czas łączny (t_z). Całkowity czas skrawania, odpowiadający zużyciu ostrza $VB=0,3$ mm, wynosi $T=29,75$ min, który nazywamy trwałością ostrza T^{10} .

Bezwymiarowa funkcja zużycia ostrza $\hat{t} = F(VB)$

W Tabeli 5 przedstawiono wyniki pełnego eksperymentu zużycia ostrza VB w funkcji trwałości bezwymiarowej t/T . Eksperyment wykonano w punkcie centralnym planu badań (oznaczenie kodowane $(-1,+1,+1)$), w którym stosowano parametry: v_c , f , a_p , o wartościach odpowiednio: 92,8 m/min, 1,06 mm/obr, 1,83 mm. Trwałość bezwymiarową oznaczano dalej \hat{t} .

Tabela 2. Zmienne kodowane w planie eksperymentu oraz wyznaczona trwałość; parametry: $v_c \langle 80,0; 220,0 \rangle$, $f \langle 0,15; 1,0 \rangle$, $a_p \langle 0,3; 2,5 \rangle$

v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]	T [min]
0	0	0	58,50
1	-1	-1	28,83
1	1	1	2,50
0	0	0	60,50
-1	1	-1	49,33
-1	-1	1	71,08
1	-1	1	6,33
-1	-1	-1	85,08
0	0	0	56,50
-1	1	1	28,21
1	1	-1	11,50
0	0	0	59,17
0	-1,414214	0	31,58
0	1,414214	0	3,67
0	0	1,414214	3,75
1,414214	0	0	3,33
0	0	-1,414214	53,22
-1,414214	0	0	76,90
-1,414214	0	0	73,50
0	0	1,414214	3,75
0	0	-1,414214	56,92
1,414214	0	0	3,83
0	-1,414214	0	33,25
0	1,414214	0	3,33

Tabela 3. Wartości parametrów naturalnych przyjęte w planie badań

v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]	T [min]
132,7	0,44	0,87	58,50
189,7	0,19	1,83	28,83
189,7	1,05	1,83	2,50
132,7	0,44	0,87	60,50
92,8	1,05	0,41	49,33
92,8	0,19	0,41	71,08
189,7	0,19	1,83	6,33
92,8	0,19	0,41	85,08
132,7	0,44	0,87	56,50
92,8	1,05	1,83	28,21
189,7	1,05	0,41	11,50
132,7	0,44	0,87	59,17
132,7	0,13	0,87	31,58
132,7	1,50	0,87	3,67
132,7	0,44	2,50	3,75
220,0	0,44	0,87	3,33
132,7	0,44	0,30	53,22
80,0	0,44	0,87	76,90
80,0	0,44	0,87	73,50
132,7	0,44	2,50	3,75
132,7	0,44	0,30	56,92
220,0	0,44	0,87	3,83
132,7	0,13	0,87	33,25
132,7	1,50	0,87	3,33

Tabela 4. Wyniki badań zużycia ostrza VB w funkcji czasu t w punkcie centralnym planu badań (-1,1,1)

Czas			Zużycie
t_m [min]	t_s [sek]	t_z [min]	VB [mm]
0	0	0	0
2,0	15,0	2,25	0,115
2,0	10,0	2,17	0,130
2,0	10,0	2,17	0,150
4,0	5,0	4,08	0,170
2,0	5,0	2,08	0,190
2,0	0	2,00	0,210
3,0	50,0	3,83	0,220
3,0	50,0	3,83	0,250
3,0	50,0	3,83	0,270
3,0	30,0	3,50	0,300

Tabela 5. Wartości współrzędnych punktów na krzywej bezwymiarowej

VB	t
0,0000	0,0000
0,1150	0,0756
0,1300	0,1485
0,1500	0,2213
0,1700	0,3585
0,1900	0,4286
0,2100	0,4958
0,2200	0,6246
0,2500	0,7535
0,2700	0,8824
0,3000	1,0000

Na rys. 2 przedstawiono graficzny obraz uzyskanych rezultatów.

Na podstawie danych (\hat{t}, VB) tworzy się formę analityczną krzywej zużycia ostrza. W tym celu wprowadza się wartości z eksperymentu (Tabela 5) do autorskiego uniwersalnego programu o nazwie REG6IJ5 (w języku Fortran) [1, 3] generującego równania regresji z dwoma więzami, którymi są dwa punkty o indeksach: k i l . Równanie regresji 5-go stopnia dla współrzędnych \hat{t} ma formę:

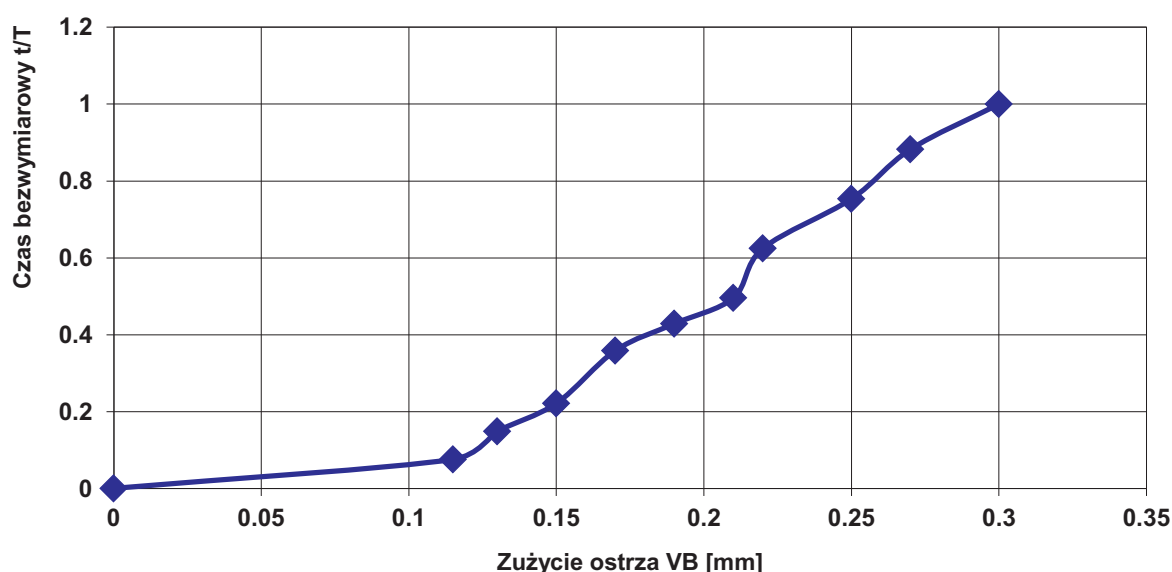
$$\hat{t} = p_1 + p_2 \cdot VB + p_3 VB^2 + p_4 VB^3 + p_5 VB^4 + p_6 VB^5 \quad (4)$$

Analiza przebiegu krzywej zużycia (rys. 2) wykazuje dwa wyraźnie różne okresy przebiegu krzywej: przebieg początkowy od wartości $VB=0$ do wartości zużycia ostrza $VB=0,13$ mm, oraz kolejny – od wartości $VB=0,13$ do wartości granicznej $VB=0,3$ mm. Dlatego dane (Tabela 5) wprowadza się dwukrotnie do programu REG6IJ5. Przy pierwszym wprowadzeniu więzami są punkty $(VB=0, \hat{t}=0)$, oraz $(VB=0,13, \hat{t}=0,1485)$. Współczynniki uzyskanej funkcji wielomianowej 5-tego stopnia Lagrange'a mają wtedy następujące wartości:

$$\begin{aligned} p_1 &= 0,117914E-11, & p_4 &= 0,114896E+04, \\ p_2 &= 0,348009E+01, & p_5 &= -0,430666E+04, \\ p_3 &= -0,102726E+03, & p_6 &= 0,537629E+04. \end{aligned} \quad (5)$$

Przy drugim wprowadzeniu danych (Tabela 5) więzami są punkty $(VB = 0,13, \hat{t} = 0,1485)$, oraz $(VB = 0,3, \hat{t} = 1,0)$. Współczynniki uzyskanej funkcji wielomianowej 5-tego stopnia Lagrange'a mają wówczas wartości:

$$\begin{aligned} p_1 &= -0,683109E-04, & p_4 &= 0,114095E+04, \\ p_2 &= 0,344785E+01, & p_5 &= -0,427544E+04, \\ p_3 &= -0,101863E+03, & p_6 &= 0,533286E+04. \end{aligned} \quad (6)$$

Rys.2. Krzywa zużycia ostrza $\hat{t} = f(VB)$ dla stali C55

W eksperymentach skróconych planu badań mierzone są przyrosty zużycia ostrza od wartości początkowej VB_0 do kolejnych wartości VB_i ($i=1, 2$) oraz odpowiadające im czasy skrawania materiału t_i . Głównym założeniem metody skróconego obliczania trwałości ostrza T_i jest tożsamość we wszystkich punktach planu badań, w których wykonuje się skrócone badania skrawania.

Algorytm obliczania trwałości ostrza T_i

W prezentowanej metodzie obliczania trwałości ostrza wykorzystuje się funkcję $\hat{t} = f(VB)$ oraz wyniki skróconego eksperymentu, na który składają się dwa pomiary zużycia ostrza VB_i oraz odpowiadające im czasy skrawania t_i . W każdym punkcie planu badań muszą być utrzymane stałe wartości parametrów skrawania (V_c, f, a_p).

Warunki kolejnych eksperymentów:

- zużycie ostrza początkowe VB_0 w mm, czas próby nieznaną t_0 w min,
- zużycie ostrza VB_1 po pierwszej próbie skrawania w mm i odpowiadający czas t_1 w min,
- zużycie ostrza VB_2 po drugiej próbie skrawania w mm i odpowiadający czas t_2 w min,

Trwałość ostrza T_i w min oblicza się z układu równań:

$$\begin{aligned} t_0 &= \hat{t}_1(VB_0)T \\ t_0 + t_1 &= \hat{t}_2(VB_1)T \\ t_0 + t_1 + t_2 &= \hat{t}_3(VB_2)T \end{aligned} \quad (7)$$

Z układu (7) eliminuje się nieznaną czas t_0 i oblicza wartość trwałości ostrza T z otrzymanego wzoru:

$$T = 0,5 \frac{t_1}{\hat{t}_2 VB_1 - \hat{t}_1 VB_0} + \frac{t_1 + t_2}{\hat{t}_3 VB_2 - \hat{t}_1 VB_0} \quad (8)$$

Wykorzystując zależności (5) i (6) oraz (8), opracowano uniwersalny program o nazwie *TRBEZ2* (w języku Fortran), do którego wprowadza się współczynniki krzywej bezwymiarowej oraz wyniki badań skróconego eksperymentu.

Trwałość ostrza obliczona przez program *TRBEZ2* dla punktu centralnego planu badań wynosi $T_{skr} = 28,208$ min. Trwałość ostrza zmierzona podczas skrawania pełnego dla punktu $(-1, +1, +1)$ wyniosła $T_{pef} = 29,75$ min. Porównanie wyników obliczeń (różnica wynosiła ok. 5%) potwierdzają poprawność metody obliczania trwałości metodą skróconą bazowaną na bezwymiarowej krzywej zużycia ostrza w punkcie wybranym planu badań.

Funkcja trwałości ostrza przy toczeniu w badanej przestrzeni czynnikowej

Funkcję trwałości ostrza $T = f(v_c, f, a_p)$ tworzy się za pomocą programu krokowej regresji wielokrotnej *REGSTEP* [5]. W wyniku obliczeń uzyskuje się funkcję trwałości ostrza w formie wykładniczej lub wielomianowej drugiego stopnia. Wyboru rodzaju funkcji trwałości ostrza przyjmuje się na podstawie oceny wartości testów statystycznych (R^2 , F *Snedecora*, t *Studenta*) obliczanych przez program.

Dla danych uzyskanych w przeprowadzonym eksperymencie uzyskano funkcję wykładniczą trzech zmiennych w następującej formie:

$$T = \left(\frac{11,607 \cdot 10^5}{v_c^{2,38116} \cdot f^{0,691369} \cdot a_p^{0,811808}} \right) \quad (9)$$

Dla tych samych danych wejściowych uzyskano funkcję wielomianowa drugiego stopnia trzech zmiennych w formie:

$$\begin{aligned} T = & 116,478 - 0,48908v_c + 50,7162f - \\ & - 20,2416a_p + 0,11046v_c f + 0,279802v_c a_p + \\ & - 0,56402f a_p - 0,00103053v_c^2 - 59,2225f^2 - \\ & - 13,8184a_p^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Przeprowadzona analiza testów statystycznych obydwóch podanych powyżej form równań regresji wykazała, że funkcja regresji wielomianowa drugiego stopnia trzech zmiennych (10) jest bardziej predestynowana do obliczania trwałości ostrza przy toczeniu dla stali C55.

Uzyskane funkcje trwałości (9) lub (10) można wykorzystać do generowania tabel zalecanych parametrów skrawania przy toczeniu stali C55, zakładając oczekiwaną trwałość ostrza, a samą metodę – także dla innych obrabianych materiałów.

Podsumowanie

Przedstawiona metoda tworzenia funkcji trwałości ostrza na podstawie 24 eksperymentów (jeden pełny i 23 skrócone), pozwala uzyskać funkcję trwałości ostrza $T = f(v_c, f, a_p)$ o poprawnych wynikach testów statystycznych. Wiąże się to z dużą oszczędnością materiału toczony oraz liczby ostrzy narzędziowych – w opisywanym przypadku z węgla spiekane, używanych do badań. Metodę można stosować także dla materiałów dotąd nie przebadanych. Liczbę 24 eksperymentów przyjętą przez Autora [6] w planie badań dla trzech zmiennych można by zmniejszyć przyjmując na przykład plany Hartleya [4]. Programy komputerowe wymienione w treści są dostępne w Zakładzie OWE Politechniki Warszawskiej.

Literatura

1. Filipowski R.: Metoda ekstrapolacyjna określania trwałości ostrza oparta na bezwymiarowej krzywej zużycia ostrza z dwoma więzami. w: Cichosz P. (red.): *Obróbka Skrawaniem 6. Efektywne Wytwarzanie*. Szkoła Obróbki Skrawaniem, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
2. Materiały szkoleniowe firmy SANDVIK Coromant. Wydawnictwo firmy SANDVIK Polska, sp. z o.o., Warszawa 2010.
3. Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*, WNT, Warszawa 1976.
4. Polański Zb.: *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa 1984.
5. System 360 Scientific, Subroutine Package (360-A-CM 03X) Version III, IBM Technical Publication Department, fifth Edition, 1970.
6. Ziętański St.: *Zastosowanie matematycznego planowania doświadczeń do optymalizacji parametrów skrawania*. Praca doktorska, Biblioteka Główna Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1974. ■