DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.425

Dr hab. inż. Janusz CIELOSZYK,
dr inż. Krzysztof CHMIELEWSKI, (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny):

MODEL ZUŻYCIA PŁYTEK OBROTOWYCH NOŻY Z OSTRZEM SAMOOBROTOWYM SPRT W OBRÓBCE MATERIAŁÓW UTWARDZONYCH

Streszczenie

Zaprezentowano wyniki badań zużycia i trwałości narzędzia typu SPRT (self-propelled rotary tools) zastosowanego do obróbki ulepszonej cieplnie stali X20Cr13 o twardości 40÷42 HRC i stali 100 Cr6 (d. ŁH15) o twardości 50÷52 HRC. Na podstawie badań zużycia ostrzy płytek skrawających obrotowych wykonanych według planu quasi D-optymalnego opracowano zależności regresyjne opisujące zużycie płytek w funkcji czasu skrawania. Do opisu zależności zużycia ostrzy na powierzchni przyłożenia w funkcji czasu przyjęto model matematyczny wykładniczy, którego współczynniki wyznaczono doświadczalnie bądź metodami regresji nieliniowej – z wykorzystaniem oprogramowania STATISTICA. Na podstawie analizy wyznaczonych pojedynczych modeli zużycia, które dobrze odzwierciedlały przebiegi zużycia, przyjęto ogólną postać modelu. Jest on zgodny z danymi doświadczalnymi w takim stopniu, że można go wykorzystać do prognozowania wartości zużycia ostrzy płytek obrotowych w funkcji czasu. Model nadaje się do obliczania trwałości ostrzy płytek obrotowych dla różnych wartości kryteriów stępienia. Wyniki badań mogą być ważnym źródłem informacji dla technologów zainteresowanych niekonwencjonalnymi narzędziami RT (rotary tools).

Słowa kluczowe: *narzędzia SPRT, trwałość, zużycie, model*

THE WEAR MODEL OF ROTARY INSERTS OF KNIVES WITH SELF-PROPELLED ROTARY BLADE (SPRT) IN MACHINING OF HARDENED MATERIALS

Abstract

The study presents the results of wear and endurance tests of a SPRT (self-propelled rotary tool) used for machining of thermally improved X20Cr13 steel with a hardness of 40÷42 HRC and 100 Cr6 (formerly ŁH15) steel with a hardness of 50÷52 HRC. On the basis of wear tests of rotary cutting insert blades, made according to the quasi D-optimal design, regression correlations describing the wear of inserts as a function of cutting time were developed. To describe the correlation of blade wear on the contact surface as a function of time, a mathematical exponential model was assumed; the coefficients thereof were determined experimentally or through non-linear regression methods – using the STATISTICA software. On the basis of analysis of the determined individual wear models, which had reflected well the courses of wear, a general form of the model was assumed. It conforms with the experimental data to an extent that it can be used to predict wear values of rotary insert blades as a function of time. The model is suitable for calculations of endurance of rotary insert blades for various dulling criteria values. The test results may be an important source of information for technologists interested in unconventional RT (rotary tools).

Keywords*: self-propelled rotary tools, endurance, wear, model*

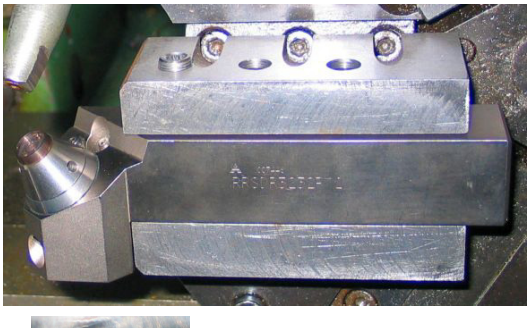
MODEL ZUŻYCIA NOŻY Z OSTRZEM SAMOOBROTOWYM W OBRÓBCE MATERIAŁU UTWARDZONEGO

Janusz CIELOSZYK[1], Krzysztof CHMIELEWSKI[2]

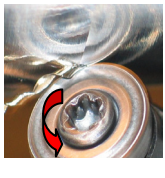
1. WSTĘP

Zużycie i trwałość są jednym z najważniejszych czynników decydujących o wyborze i efektywnym zastosowaniu narzędzi w dowolnym procesie obróbki. Optymalny dobór parametrów obróbki może być zrealizowany tylko dzięki znajomość zużycia i trwałości narzędzia określonego najlepiej adekwatnymi modelami matematycznymi. Zagadnienia te stają się tym bardziej istotne i trudne w realizacji (podobnie jak dla klasycznych sposobów skrawania), gdy dotyczą jeszcze „mniej poznanej, niekonwencjonalnej metody" toczenia narzędziami z ostrzami obrotowymi (RT – Rotary Tools) [1,2]. Ostrze takiego narzędzia (rys.1) „wchodzi" do pracy kolejnymi fragmentami całego obwodu płytki zdeterminowanymi przez przyjętą głębokość skrawania i posuw, w sposób ciągły i bardziej stabilny niż na przykład kolejne ostrza frezu w procesie frezowania czy frezotoczenia (rys.1b).

a)



b)



Rys. 1. Nóż SPRT w imaku narzędziowy tokarki (a), widok strefy skrawania (b)

Wyniki prac doświadczalnych dotyczących narzędzi RT prowa-

[1] Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

dzonych w kraju i na świecie [2,3,4,5,6] wskazują na potrzebę oparcia takich badań na klasycznych geometrycznych kryteriach zużycia i trwałości narzędzia rejestrowanych na powierzchni natarcia (krater) i przyłożenia ostrza (starcie), przy czym zużycie powierzchni przyłożenia wydaje się częściej stosowanym i przydatniejszym w analizach porównawczych wyników zaczerpniętych z różnych prac [3,4,5,6].

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

W ramach prowadzonych badań wykonano próby zużycia i trwałości ostrzy obrotowych dla narzędzi tokarskich (SPRT – Self-propelled Rotary Tools) firmy Mitsubishi typu RRSDR/3232P12 z płytką okrągłą RDGH120400-M4 TF15 o średnicy ϕ=12,7 mm, kącie pochylenia osi obrotu do płaszczyzny podstawowej P_r λ=57,8°, kątami natarcia $\gamma_f = \gamma_p$ = -24°. Trzonek noża ustawiony był prostopadle do powierzchni obrabianej, a pierwszy punkt styku krawędzi ostrza z materiałem obrabianym na wysokości osi toczonego wałka (rys.1a). Materiał badanych ostrzy to węglik spiekany typu TF15 z grupy zastosowań ISO S20.

Obróbce poddano zewnętrzne powierzchnie walcowe wałków o średnicach od 100 do 130 mm wykonanych ze stali nierdzewnej X20Cr13 ulepszonej cieplnie do twardości 40÷42 HRC. Minimalne średnice obrabianych wałków, mocowanie narzędzia i obrabiarkę przyjęto dla zachowania wymaganej dużej sztywności układu OUPN. Obróbkę przeprowadzono na tokarce sterowanej numerycznie TUR50CNC ze sterowaniem Sinumerik–810T, z bezstopniową zmianą prędkości obrotowej wrzeciona. W celu usprawnienia przebiegu doświadczeń przygotowany został program sterujący wykorzystujący technikę programowania parametrycznego.

Zakres zmienności parametrów skrawania określono na podstawie badań wstępnych skrawania powierzchni czołowych i walcowych z parametrami skrawania: v_c=100 ÷ 215 m/min, f = 0,15 ÷ 0,40 mm/obr, a_p= 0,1 ÷ 0,5 mm. Ostatecznie obszar przyjętych do badań parametrów dla toczenia powierzchni walcowej został ograniczony poprzez usunięcie kombinacji parametrów skrawania leżących w pobliżu skojarzeń największych wartości parametrów v_{cmax}, f_{max}, $a_{pmax.}$ W powstałym w ten sposób nieregularnym obszarze parametrów technologicznych wygenerowano plan badań quasi D optymalny zakładając, że trwałość narzędzia w funkcji parametrów skrawania będzie opisana tradycyjną zależnością:

$$T_c = C_T \; v_c^s \; f^u \; a_p^e \tag{1}$$

gdzie: C_T – stała uwzględniająca warunki obróbki, s, u, e – wykładniki uwzględniające odpowiednio wpływ prędkości skrawania v_c, posuwu f, głębokości skrawania a_p.

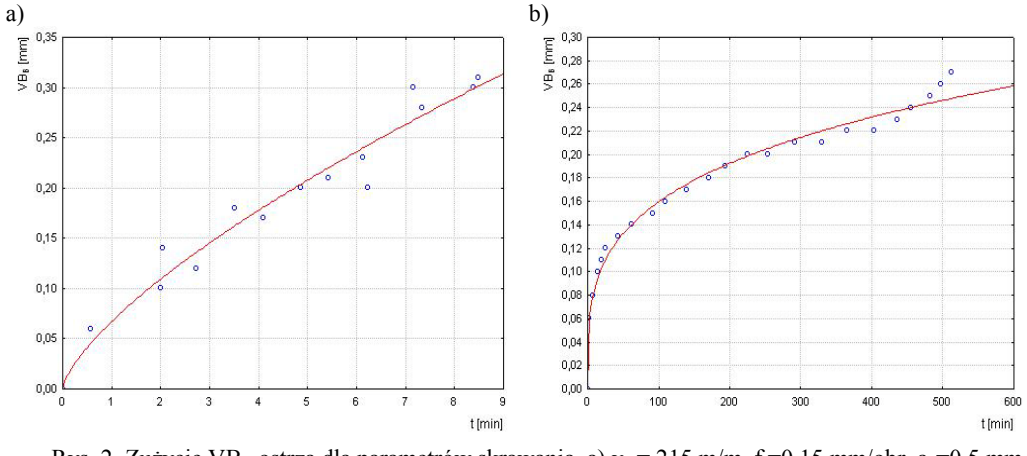
Opracowany, z wykorzystaniem procedury generowania planów doświadczeń optymalnych pakietu oprogramowania STATISTICA, plan badań przedstawiono w tabeli 1.

Do obserwacji stanu ostrza skrawającego oraz pomiarów wskaźników zużycia wykorzystywano mikroskop warsztatowy oraz oprawkę ustalającą położenie płytki skrawającej. Obserwacja dotyczyła krawędzi skrawającej, powierzchni natarcia i powierzchni przyłożenia ostrza. Dla wybranych prób skrawania szczegóły strefy zużycia ostrza oceniano również za pomocą mikroskopu elektronowego. Pomiarów zużycia na powierzchni przyłożenia dokonywano w czterech miejscach równomiernie rozłożonych na obwodzie płytki skrawającej. Jako wynik pomiaru zużycia podawano średnią z zarejestrowanych wartości VB_B.

Tabela 1. Plan quasi D-optymalny w badaniach trwałości

Punktu planu	v_c [m/min]	f [mm/obr]	a_p [mm]
1	215	0,15	0,50
2	100	0,40	0,50
3	100	0,15	0,50
4	215	0,25	0,10
5	100	0,15	0,10
6	100	0,40	0,10

Na wykresach (rys. 2) pokazano w postaci punktów wyniki pomiarów średnich wartości starcia na powierzchni przyłożenia VB_B tworzących obraz przebiegu zużycia ostrza płytki obrotowej w czasie skrawania z parametrami v_c =215 m/min, f_r =0,15 mm/obr, a_p = 0,5 mm (punkt nr 1 planu, wg tab.1) oraz v_c=100 m/min, f_r=0,40 mm/obr, a_p=0,1 mm (punkt nr 6 planu, wg tab. 1).

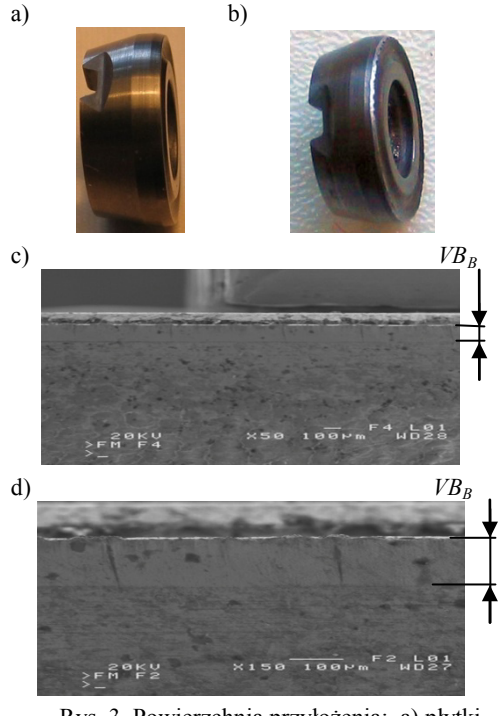


Rys. 2. Zużycie VB_B ostrza dla parametrów skrawania, a) v_c = 215 m/m, f_r=0,15 mm/obr, a_p=0,5 mm b) v_c=100 m/min, f_r=0,40 mm/obr, a_p=0,1 mm

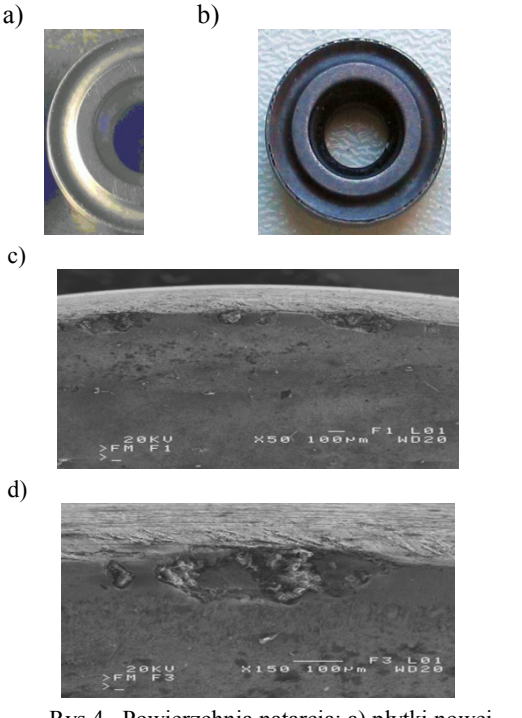
2.1. MODEL ZUŻYCIA OSTRZY PŁYTEK OBROTOWYCH NOŻA SPRT

Na podstawie badań zużycia ostrza płytek skrawających obrotowych wykonanych wg planu quasi D-optymalnego przedstawionego w tabeli 1 opracowano zależności

regresyjne opisujące zużycie ostrza w funkcji czasu skrawania. Ostrza płytek skrawających obrotowych zużywają się głównie na powierzchni przyłożenia. Zużycie w postaci starcia VB jest dość równomierne na obwodzie płytki (rys.3). Dlatego przyjęto, że jest to wartość VB_B a nie VB_{Bmax} Na powierzchni natarcia tworzy się płytki żłobek a na krawędzi skrawającej szereg drobnych wyszczerbień (rys.4).



Rys. 3. Powierzchnia przyłożenia: a) płytki nowej, b) charakterystyczne zużycie w pobliżu krawędzi skrawającej, c) obraz stereometryczny strefy zużycia powierzchni przyłożenia (pow. x50), d) (pow. x150), (v_c=100 m/min, f=0,15 mm/obr, a_p=0,1 mm):



Rys.4. Powierzchnia natarcia: a) płytki nowej, b) obraz z charakterystycznym zużyciem w pobliżu krawędzi skrawającej, c) obraz stereometryczny strefy zużycia powierzchni natarcia (pow. x50), d) (pow. x150) (v_c =100 m/min, f = 0,15 mm/obr, a_p=0,1 mm):

Do opisu zależności zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia VB_B w funkcji czasu przyjęto model matematyczny wykładniczy o postaci:

$$VB_B = c\, t^m \tag{2}$$

gdzie: VB_B – zużycie ścierne powierzchni przyłożenia, t – czas skrawania, c, m – współczynniki modelu.

Współczynniki modelu oraz pozostałe statystyki obliczono metodami analizy regresji nieliniowej wykorzystując pakiet oprogramowania STATISTICA. Szczegółowe wyniki obliczonych modeli dla przykładowego punktu planu badań zamieszczono w tabeli 2. Na rysunku 2 przedstawiono wykresy (w postaci linii) wyznaczonych modeli zużycia na tle danych doświadczalnych w poszczególnych punktach planu badań.

Tabela 2. Przykładowe wyniki estymacji współczynników modelu zużycia ostrza płytki dla parametrów skrawania: v_c=215 m/min, f=0,15 mm/obr, a_p=0,5 mm

Udział zmienności objaśnionej R2 =0,97190873, R=0,98585431, Poziom ufności: 0,95						
Współczynnik	Ocena	Błąd	Wart. t	poziom p	Doln. uf	Górn. Uf
c	0,067245	0,007457	9,01812	0,000000	0,051352	0,083139
m	0,701065	0,060224	11,64094	0,000000	0,572701	0,829430

Wyestymowane współczynniki c i m są istotne statystycznie, poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla obu współczynników jest znacznie mniejszy od przyjętego poziomu istotności α=0,05. Zależność jest dobrze dopasowana do danych doświadczalnych, udział zmienności objaśnionej jest wysoki i wynosi R2 =0,97190873. Wyestymowana zależność ma postać:

$$\hat{VB}_B = 0{,}067245\ t^{0{,}701065} \tag{3}$$

Wyznaczone modele zużycia opisują przebieg zużycia ostrza obrotowego na powierzchni przyłożenia VB_B dla poszczególnych zestawów parametrów skrawania. Mogą one zatem służyć do prognozowania zużycia i trwałości ostrza jedynie dla tych wartości parametrów skrawania dla których zostały określone (są to tzw. zależności warunkowe). Aby prognozować zużycie ostrza dla innych parametrów skrawania należy wyznaczyć model ogólny opisujący zużycie ostrza obrotowego w funkcji czasu i parametrów skrawania:

$$VB_B = f(v_c, f, a_p, t) \tag{4}$$

Na podstawie analizy wyznaczonych pojedynczych modeli zużycia, biorąc pod uwagę, że dobrze odzwierciedlają one przebieg zużycia, przyjęto ogólną postać modelu zużycia ostrza:

$$VB_B = C\, t^M \tag{5}$$

Gdzie współczynniki C i M są funkcjami parametrów skrawania:

$$C = f(v_c, f, a_p) \tag{6}$$

$$M = f(v_c, f, a_p) \tag{7}$$

Na podstawie analizy zmienności współczynników w modelach pojedynczych (przykładowy model wzór 5) określono postacie jakościowe wzorów 6 i 7 jako:

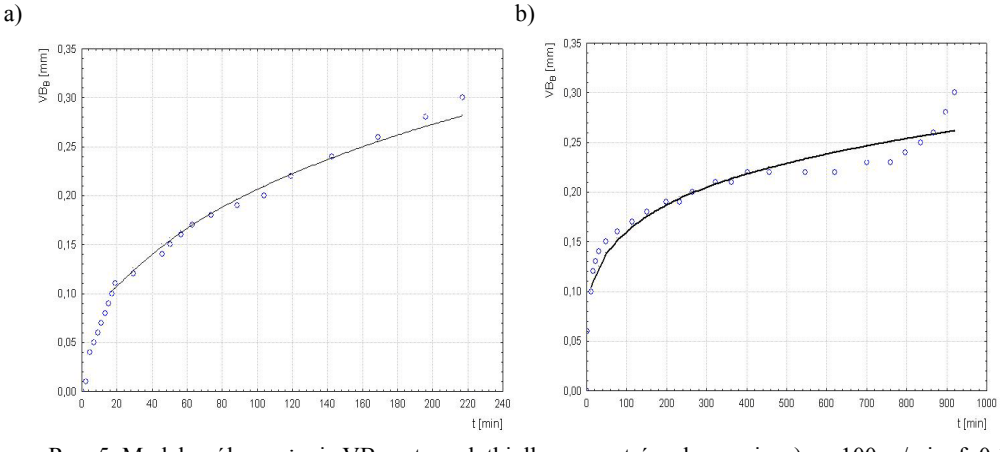
$$C = \mathrm{a}_1 \, (v_c \; f \; a_p)^3 + \mathrm{b}_1 \, (v_c \; f \; a_p)^2 + \mathrm{c}_1 \, (v_c \; f \; a_p) + \mathrm{d}_1 \tag{8}$$

$$M = \mathrm{c}_2 \; v_\mathrm{c}^\mathrm{s} \; f^k \; a_\mathrm{p}^\mathrm{l} \tag{9}$$

W oparciu o wyniki wszystkich badań doświadczalnych zużycia wykonanych według planu z tabeli 1 wyestymowano model ogólny zużycia w postaci równania regresji:

$$\hat{V}B_B = (-0{,}00080 \, (v_c \; f \; a_p)^3 + 0{,}002525 \, (v_c \; f \; a_p)^2 - 0{,}021766 \, (v_c \; f \; a_p) + 0{,}019117 \; \mathrm{v}_\mathrm{c}^{0{,}880703} \; \mathrm{f}^{0{,}386298} \; \mathrm{a}_\mathrm{p}^{0{,}389307} + 0{,}087004) \, t \tag{10}$$

Udział zmienności objaśnionej przez wyestymowaną zależność wynosi R2 =0,90812, co świadczy o dobrym jej dopasowaniu do danych doświadczalnych. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe przebiegi wyestymowanej funkcji modelu



Rys. 5. Model ogólny zużycia VB_B ostrza płytki dla parametrów skrawania, a) v_c=100 m/min, f=0,15 mm/obr, a_p=0,5 mm b) v_c=100 m/min, f=0,15 mm/obr, a_p=0,1 mm

ogólnego zużycia na tle danych doświadczalnych zużycia powierzchni przyłożenia VB_B w poszczególnych punktach planu badań. Z przedstawionych na rys. 5 wykresów i zgromadzonych danych wynika, że w zakresie wartości zużycia VB_B od 0,1 do 0,25 mm dopasowanie modelu ogólnego zużycia powierzchni przyłożenia ostrzy płytek obrotowych do danych doświadczalnych jest dobre.

Tabela 3. Rzeczywista trwałość ostrza płytek obrotowych dla różnych wartości kryterium stępienia

Nr punktu planu	Trwałość rzeczywista [min]			
	VB_B=0,15	VB_B=0,20	VB_B=0,25	VB_B=0,30
1	2,50	4,50	6,70	7,88
2	28,0	48,0	76,14	92,33
3	50,4	104,0	155,9	217,1
4	26,5	39,0	55,49	65,56
5	48,4	264,7	835,0	920,58
6	91,7	225,4	481,9	512,3

Tabela 4. Prognozowana trwałość ostrza płytek obrotowych dla różnych wartości kryterium stępienia na podstawie modelu ogólnego

Nr punktu planu	Trwałość prognozowana [min]			
	VB_B=0,15	VB_B=0,20	VB_B=0,25	VB_B=0,30
1	3,37	4,84	6,41	8,06
2	27,31	43,80	63,42	85,95
3	45,25	92,09	159,79	250,68
4	21,69	37,83	58,24	82,85
5	70,27	265,56	744,74	1729,5
6	97,94	243,36	493,0	877,70

Największa różnica między wartościami zaobserwowanymi i prognozowanymi VB_B (obliczonymi z wyznaczonej zależności (tab.3)) w poszczególnych przypadkach nie przekracza 10%.

Stąd można wnioskować, że proponowany model jest zgodny z danymi doświadczalnymi w stopniu wystarczającym, aby można go wykorzystywać do prognozowania wartości zużycia ostrza płytek obrotowych w funkcji czasu.

Może być również wykorzystany do obliczenia trwałości ostrza płytek obrotowych dla różnych wartości zużycia powierzchni przyłożenia VB_B (różne kryteria stępienia, tabela 4).

Współczynniki zależności na trwałość narzędzia (1) obliczono wykorzystując procedurę estymacji regresji liniowej programu STATISTICA. W tym celu przekształcono zależność (1) do postaci liniowej:

$$\ln T_c = \ln C_T + s \ln v_c + u \ln f + e \ln a_p \tag{11}$$

Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie oraz wszystkie współczynniki są istotne. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest bardzo dobry, współczynnik determinacji R^2 = 0,98396680. Po podstawieniu obliczonych współczynników do zależności (1) uzyskano następującą postać zależności opisującej trwałość ostrza płytek obrotowych noża SPRT w funkcji technologicznych parametrów skrawania:

$$\hat{T} = 314527513{,}417\, v_c^{-3{,}60083}\ f^{-0{,}46667}\ a_p^{-1{,}29138} \tag{12}$$

Z zależności (12) wynika, że największy wpływ na trwałość ostrza obrotowego wywiera prędkość skrawania, mniejszy wpływ ma głębokość skrawania, a bardzo mały (na granicy nieistotności) posuw.

3. WNIOSKI

Prace prowadzone w tematyce zużycia i trwałości narzędzi RT wydają się niezwykle ważnym uzupełnieniem brakujących informacji w obszarze poznawczym i utylitarnym. W dostępnych zaleceniach warunków obróbki płytkami okrągłymi nie ma żadnych danych na temat trwałości ich krawędzi skrawających w warunkach pracy narzędziami RT. W przypadku obróbki z zaproponowanymi w planie badań parametrami jest możliwość uzyskania okresów trwałości ostrza gwarantującego ciągłą obróbkę nawet długich wałków na całej długości. Oceniając efektywność stosowania ostrzy okrągłych w narzędziach RT i konwencjonalnych, należy uwzględnić fakt, że ostrze okrągłe narzędzia konwencjonalnego daje możliwość kilkukrotnego przestawiania kątowego wkładki, co zapewnia uzyskanie żywotności ostrza równej sumie trwałości w kolejnych położeniach. W przypadku badanych narzędzi trwałość ostrza T jest równoważna z jego żywotnością. W dalszych pracach obok modeli zużycia i trwałości o podobnym charakterze jak dla narzędzi klasycznych, ważnym wydaje się opracowanie relacji pozwalających na praktyczne „przeliczanie" trwałości klasycznego ostrza (fragmentu obwodu płytki) na trwałości całego obwodu płytki wykorzystywanej w czasie pracy narzędzia RT.

LITERATURA

[1] Chmielewski K., Cieloszyk J., Zasada M., *Narzędzia z obrotowymi płytkami skrawającymi– możliwości technologiczne i efekty stosowania, K*onferencja naukowo-techniczna TPP 2006, Komisji Budowy Maszyn PAN, Politechnika Poznańska, Poznań 2006, s. 85-92.

[2] Chmielewski K., Cieloszyk J., *Wpływ średnicy płytki na trwałość narzędzi z obrotowymi ostrzami skrawającymi,* Obróbka skrawaniem -interakcja proces-obrabiarka pod redakcją Pawła Twardowskiego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013 s. 340-347.

[3] Lei S. W., Liu: *High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool,* International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.42, 2002, pp. 653-661.

[4] Ezugwu E.O., Olajire K.A. and Wang Z.M.: *Wear evaluation of a self-propelled rotary tool when machining titanium IMI 318 alloy,* Proc. of the Institution of Mech. Eng. Vol. 216, 2002, pp.891-897.

[5] Kishawy H. A., Gerber A. G.: *Characteristics of Heat Transfer During Machining With Rotary Tools,* Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, 2004, pp. 404-407.

[6] Kishawy H. A., Becze C.E., McIntosh G.G.: *Tool performance and attainable surface quality durning the machining of aerospace alloys using self-propelled rotary tools.* Journal of Materials processing technology, Vol.152, 2004, pp. 266-271.