

Joanna KOSSAKOWSKA¹
Krzysztof JEMIELNIAK¹

BADANIA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ PŁYTKI W NARZĘDZIACH SPRT PODCZAS TOCZENIA STALI WYSOKOSTOPOWEJ

W niniejszym artykule omówiono badania prędkości obrotowej płytki w narzędziach SPRT. W ramach badań opracowano metodę pomiaru prędkości obrotowej płytki. Pomiar prędkości porównano z teoretyczną prędkością, wykazywaną w literaturze. W wyniku badań stwierdzono, że otrzymana prędkość różni się zasadniczo od teoretycznej i zależy nie tylko od prędkości skrawania, ale również od posuwu i głębokości skrawania. Zauważono również, że płytka potrzebuje określonego czasu na uzyskanie stabilnej prędkości, a czas ten zależy od parametrów skrawania.

1. WSTĘP

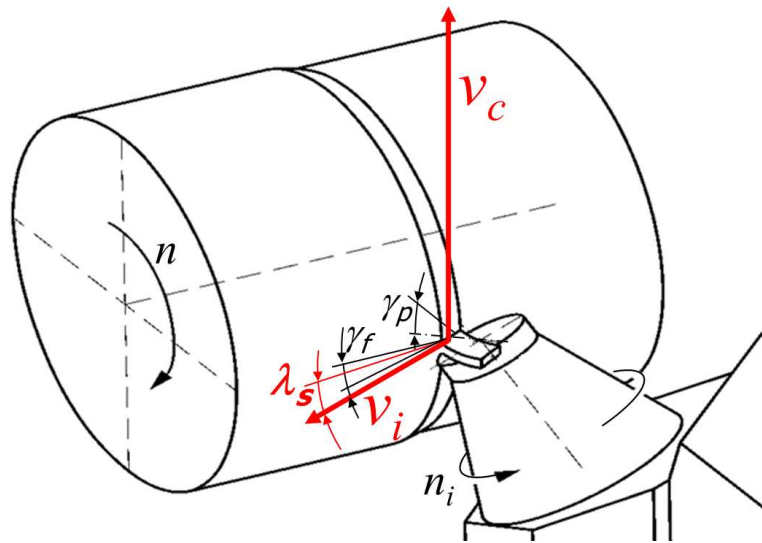
Pierwsze prace na temat narzędzi z płytkami obrotowymi (nazywane dalej RT) powstały ok. 60 lat temu. Wtedy to rozpoczęto prace nad zastosowaniem tego typu narzędzi do toczenia [5],[6]. Idea działania narzędzi RT polega na skrawaniu specjalnie łożyskowaną płytką obrotową podlegającą ciągłemu obrotowi.

Narzędzia RT dzielimy na narzędzia z samoobrotowymi ostrzami skrawającymi (SPRT – *Self-Propelled Rotary Tools*) lub ostrzami napędzanymi (DRT – *Driven Rotary Tools*). Szczególnie obiecujące wydają się być narzędzia DRT, będące celem badań zarówno na świecie [1],[3],[4] jak i w Polsce [7],[8]. Ponieważ narzędzia DRT są wciąż w fazie badań laboratoryjnych, w niniejszych rozważaniach postanowiono skupić się na komercyjnie dostępnych narzędziach SPRT.

Na rys. 1 przedstawiono schematycznie model narzędzi SPRT. W narzędziach SPRT ruch obrotowy płytki wynika z oddziaływania warstwy skrawanej na pochyloną powierzchnię natarcia płytki. Krawędź skrawająca musi być w miejscu styku z przedmiotem (w płaszczyźnie głównej krawędzi skrawającej P_s) odchylona od prostopadłej do prędkości skrawania (płaszczyzny podstawowej P_r) o odpowiednio duży kąt pochylenia krawędzi skrawającej λ_s . Z rozważań zawartych w [1],[3], wynika, że prędkość obwodowa v_i płytki zależy od prędkości skrawania v_c oraz kąta λ_s :

$$v_{it} = v_c \sin \lambda_s \quad (1)$$

¹Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej



Rys. 1. Schematyczny model obróbki narzędziem SPRT
Fig. 1. Schematic model of rotary cutting for SPRT

Jednak Kishawy i Wilcox [2] wykazali, że prędkość obwodowa płytki v_i jest liniowo zależna od prędkości v_c wg następującej zależności:

$$v_i = C v_c \quad (2)$$

Zależność ta jest bardziej złożona niż zależność (1), jako że stała C jest funkcją materiału narzędzia, warunków kontaktu wiór-narzędzie (skrawanie na sucho lub z chłodziwem), kąta pochylenia krawędzi skrawającej oraz kąta natarcia. W [9] wykazano, że również głębokość skrawania ma wpływ na prędkość obrotową płytki.

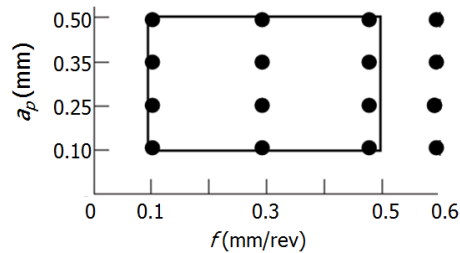
Ponieważ prędkość obrotowa płytki jest warunkiem skrawania wpływającym w istotny sposób na przebieg procesu skrawania narzędziami SPRT, postanowiono szczegółowo przebadać wpływ pozostałych parametrów skrawania (posuwu i głębokości skrawania) na prędkość obrotową płytki. Postanowiono również sprawdzić czas stabilizacji prędkości obrotowej płytki.

2. METODYKA BADAŃ

Do badań użyto komercyjnie dostępnych narzędzi SPRT typu RRSDL 2525M12 o kącie pochylenia krawędzi $\lambda_s = -24^\circ$ i kącie natarcia $\gamma_p = -24^\circ$. Narzędzia wyposażone były w płytkę RRSDL 2525M12 o średnicy 12.7mm, wykonaną z węgla spiekane TF15. Badania przeprowadzono na wałku o średnicy 131-133mm wykonanego ze stali wysokostopowej 15H11MF.

Badania przeprowadzono wykonując toczenie wzdłużne na konwencjonalnej tokarce TUD-50 bez użycia chłodziwa, dla wszystkich kombinacji następujących parametrów skrawania: prędkość skrawania: 40, 100, i 150m/min, posuw 0.13, 0.3, 0.47, 0.6mm/obr

i głębokość skrawania 0.1, 0.25, 0.35 i 0.5mm. Zatem łącznie wykonano 36 testów bez powtórzeń. Przy doborze parametrów sugerowano się zakresem rekomendowanym przez producenta do obróbki stali nierdzewnej, wykonując dodatkowo testy dla większych posuwów i prędkości. Na rys. 2 zaznaczono za pomocą ciągłej linii rekomendowany zakres posuwów i głębokości skrawania zaś za pomocą czarnych punktów – wartości wybrane do testów.



Rys. 2. Zakres posuwów i głębokości skrawania sugerowany przez producenta (ciągła linia) i wyselekcjonowany do badań (czarne punkty)

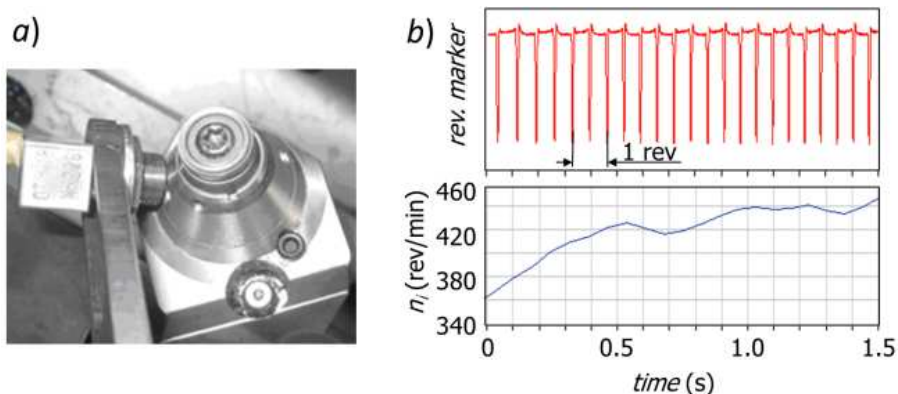
Fig. 2. The range of feeds and depth of cut recommended by producer (solid line) and selected to rests (black dots)

Prędkość obrotowa płytki mierzona była za pomocą bezkontaktowego czujnika przemieszczeń, umieszczonego naprzeciw kołnierza oprawki zawierającego dwa otwory (rys. 3). Na potrzeby badań opracowano specjalny program do mierzenia czasu kolejnych przejść otworów pod czujnikiem i obliczania prędkości obrotowej płytki n_i . W toku dalszych rozważań prędkość obrotowa płytki przeliczana była na prędkość obwodową v_i , zgodnie z zależnością:

$$v_i = \frac{\pi D_i n_i}{1000} \quad (3)$$

gdzie:

D_i – średnica płytki [mm], $D_i = 12.7$ mm

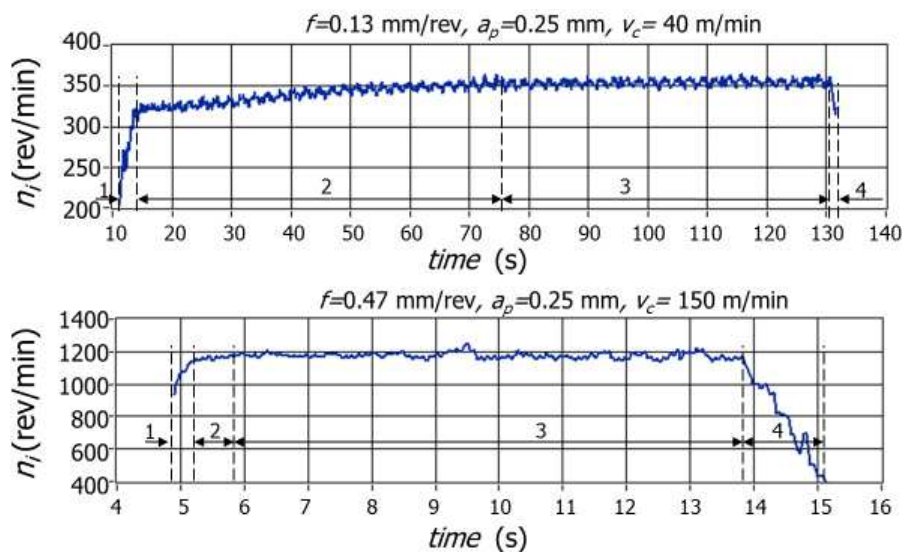


Rys. 3. Pomiar prędkości obrotowej płytki: a) widok, b) sygnał zarejestrowany przez czujnik zbliżeniowy (na górze) i odpowiedni przebieg prędkości obrotowej n_i (poniżej)

Fig. 3. Measurement of the insert rotational speed: a) view, (b) signal registered from proximity sensor (above) and the insert rotational speed (bellow)

3. WYNIKI BADAŃ

Dla wszystkich testów przeprowadzono rejestrację oraz analizę prędkości obrotowej. Przykłady przebiegu prędkości obrotowej dla dwóch testów przedstawiono na rys. 4. W przebiegach tych można wyróżnić 4 charakterystyczne stany prędkości obrotowej. Pierwszy – zazwyczaj krótki – jest to czas zagłębiania narzędzia w materiał. Drugi stan, to stan stabilizacji prędkości obrotowej, aż do osiągnięcia trzeciego stanu, podczas którego wartość średnia prędkości obrotowej utrzymywała się na stałym poziomie. Na końcu skrawania następował czwarty stan, odpowiadający wyjściu narzędzia z materiału.



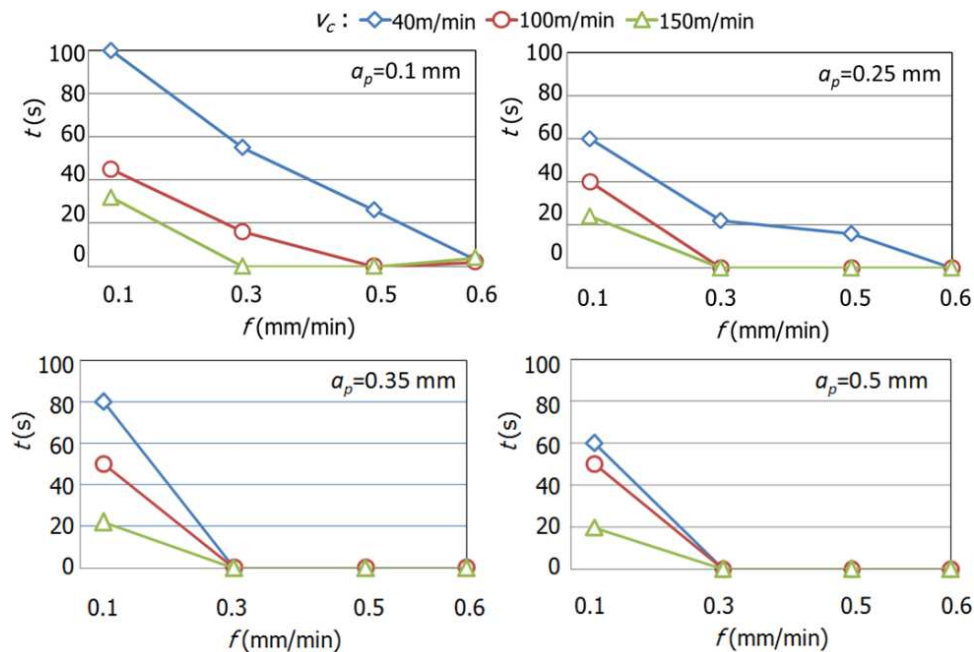
Rys. 4. Przykłady zmian w czasie prędkości obrotowej płytki; 1 – zagłębianie narzędzia, 2 – stabilizacja płytki, 3 – stabilna prędkość, 4 – wyjście narzędzia

Fig. 4. Examples of the insert rotational speed changes in time; 1- tool engagement, 2 – speed stabilization, 3 – stable speed, 4 – tool disengagement

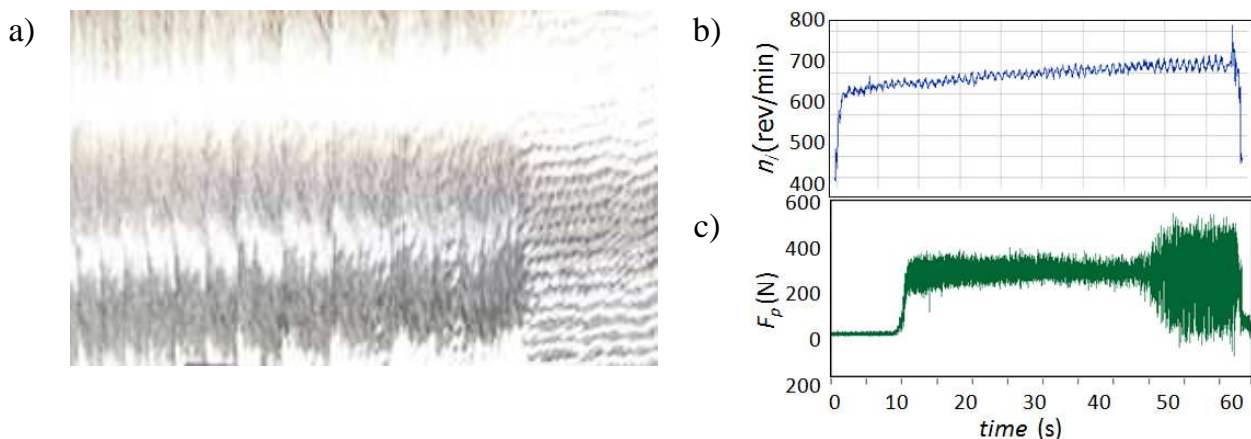
Ponieważ obrót płytki jest podstawową cechą narzędzi SPRT, opóźnienie w osiągnięciu stabilnej prędkości obrotowej jest niepożądane ze względu na zmienne warunki skrawania. Na rys. 5 przedstawiono czas stabilizacji prędkości obrotowej płytki w funkcji posuwu, dla różnych głębokości skrawania. Przedstawione wykresy jednoznacznie wykazują, że czas stabilizacji prędkości obrotowej zależy od każdego z parametrów: posuwu, głębokości skrawania, prędkości skrawania i poza nielicznymi odstępstwami od reguły zmniejsza się wraz ze wzrostem każdego z nich.

Wydłużony czas stabilizacji dla małych posuwów i głębokości skrawania świadczy o tym, że przy zbyt małym przekroju warstwy skrawanej siła wióra nacierającego na płytkę jest zbyt mała, aby nacierający na powierzchnię natarcia wiór wystarczająco szybko pokonał opory płytki i wprowadził ją w odpowiednią rotację. Mała prędkość skrawania również wydłuża czas stabilizacji płytki. Warto również zauważyć, że w skrajnych przypadkach czas stabilizacji wynosi nawet 100 sekund. Przez cały czas rozpędzania się płytki panują

zmiennie warunki skrawania. Przekłada się to między innymi na jakość warstwy wierzchniej, jak to pokazano na rys. 6a. W miarę wzrostu prędkości obrotowej zmieniała się długość fali pozostawianej przez narzędzie na powierzchni obrobionej. Po osiągnięciu stabilnej prędkości (po ok. 35 sekundach skrawania) rozpoczął się rozwój drgań samowzбудnych narzędzia, co poskutkowało utworzeniem na powierzchni charakterystycznych śladów.



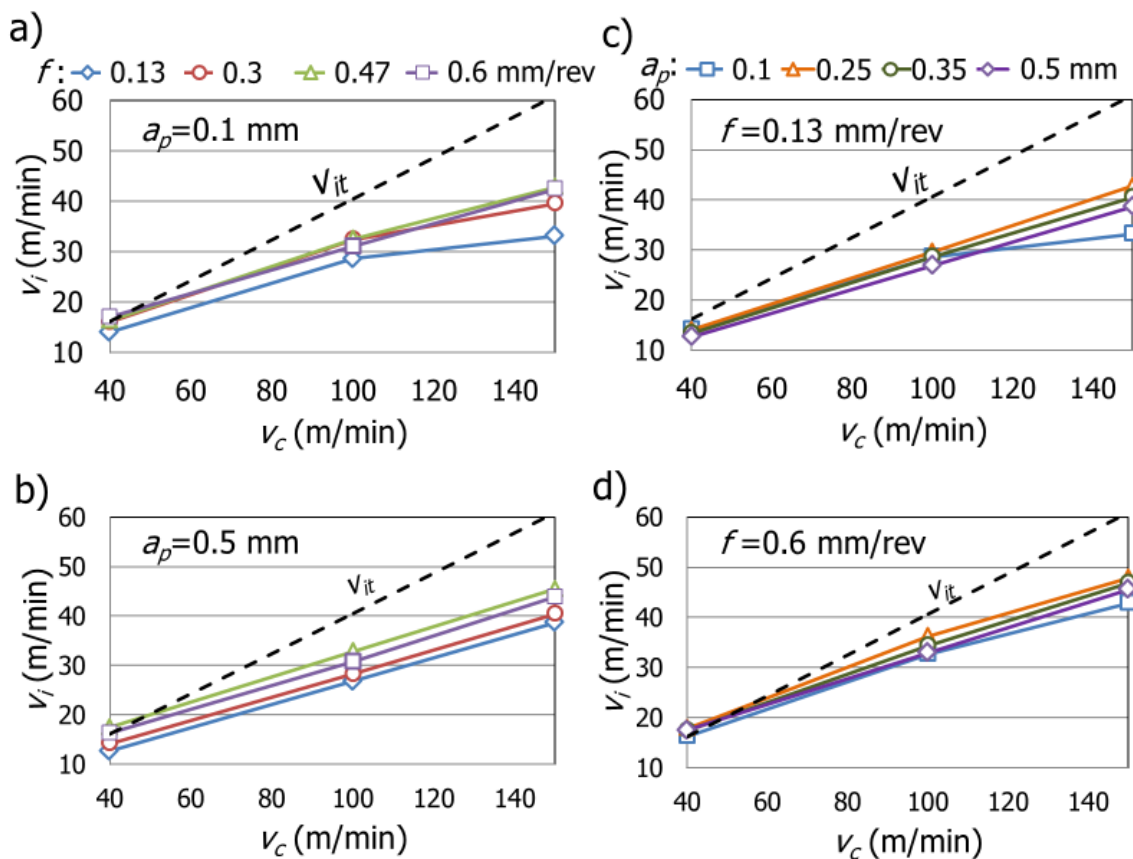
Rys. 5. Zależność czasu stabilizacji prędkości obrotowej płytki od parametrów skrawania
Fig. 5. Dependence of the insert rotational speed stabilization time on cutting parameters



Rys. 6. Zmiana powierzchni obrobionej oraz rozwój drgań samowzбудnych wraz ze wzrostem prędkości płytki:
a) powierzchnia obrobiona, b) przebieg prędkości obrotowej, c) siła F_p .

Fig. 6. Changes of the machined surface and development of the tool chatter due to rise of insert rotation:
a) machined surface, b) insert rotational speed, c) passive force

Dalsze badania zależność prędkości obwodowej płytki (v_i) od parametrów skrawania wyznaczano dla stabilnego obszaru prędkości obrotowej płytki. Zależność prędkości v_i od prędkości skrawania dla różnych posuwów i głębokości skrawania przedstawiono na rys. 7. Wyniki zestawiono z zaznaczoną na wykresie (linią przerywaną) prędkością v_{it} wynikającą z zależności (1). Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że zależność $v_i(v_c)$ jest w przybliżeniu liniowa, co jest zgodne zarówno z zależnością (1) jak i (2), ale współczynnik nachylenia jest znacznie niższy, niż wynikający z zależności (1) i wynosi $C \sim 0.25$, zamiast $C = \sin 24^\circ = 0.41$. Jednocześnie porównując przebiegi w poszczególnych seriach można zauważyć, że posuw również ma wpływ na prędkość płytki. Analogicznie porównując poszczególne serie na rys. 7a) i 7b) można zauważyć wpływ głębokości skrawania na prędkość płytki. Przykłady zależności prędkości obwodowej płytki od posuwu i głębokości skrawania przedstawiono szczegółowo na rys. 8. Przedstawione wykresy wykazują liniowy wzrost prędkości płytki wraz ze wzrostem posuwu oraz liniowo malejącą (w niewielkim stopniu) prędkość płytki wraz ze wzrostem głębokości skrawania.



Rys. 7. Zależność prędkości obwodowej płytki od v_c dla różnych posuwów przy: a) $a_p=0.25$ mm, b) $a_p=0.5$ mm oraz różnych głębokości skrawania przy: c) $f=0.13$ mm/obr, d) $f=0.6$ mm/obr

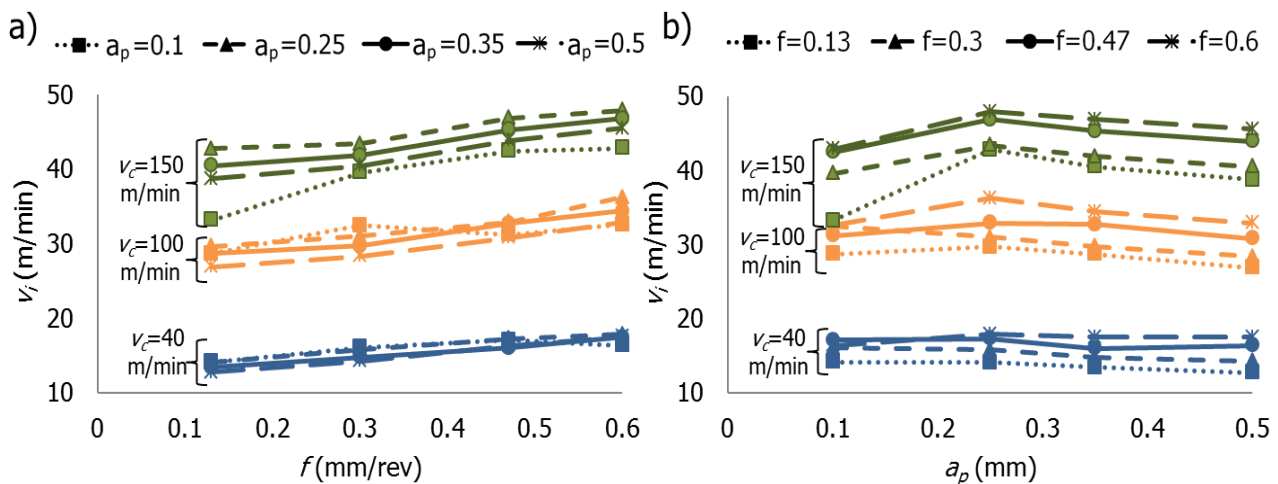
Fig. 7. Insert peripheral speed vs. cutting speed for various feeds for: a) $a_p=0.1$ mm, b) $a_p=0.5$ mm and for various depths of cut for: c) $f=0.13$ mm/rev, d) $f=0.6$ mm/rev

Reasumując, każdy z parametrów wpływa liniowo na prędkość płytki. Stąd zastosowano analizę statystyczną do wszystkich prób celem wyznaczenia wpływu

poszczególnych parametrów skrawania na prędkość płytki. W efekcie dla stali 15H11MF uzyskano zależność:

$$v_i = 11.6f + 0.25v_c - 0.33a_p + 1.9 \quad (4)$$

Pomimo wysokiego współczynnika korelacji $r^2 = 0.978$, zależność (4) nie ma zastosowania dla małych głębokości skrawania. Można to zaobserwować odbiegającymi od trendu wynikami dla $a_p=0.1\text{mm}$ na rys. 8b, kiedy to przekrój wióra jest zbyt mały do wprowadzenia płytki na odpowiednią prędkość obrotową.



Rys. 8. Zależność prędkości obwodowej płytki: a) od posuwu dla różnych głębokości skrawania, b) od głębokości skrawania dla różnych posuwów

Fig. 8. Dependence of the insert peripheral speed: a) on feed for various depths, b) on depth of cut for various feeds

4. PODSUMOWANIE

Badania przedstawione w niniejszym artykule wykazały, że wbrew zależności (1) podanych w pracach [1],[3], prędkość obrotowa płytki w narzędziach SPRT zależy nie tylko od kąta pochylenia płytki i prędkości skrawania, ale również od posuwu i głębokości skrawania. Wpływ posuwu na prędkość płytki jest liniowo rosnący, a wpływ głębokości skrawania liniowo malejący. W wyniku analizy statystycznej wyznaczono zależność prędkości obrotowej płytki od parametrów skrawania.

Przeprowadzone badania wykazały również, że płytka potrzebuje określonego czasu na osiągnięcie stabilnej prędkości obrotowej. Czas stabilizacji rośnie wraz ze zmniejszaniem każdego z parametrów skrawania, osiągając w szczególnych przypadkach czas nawet bliski 2 minutom.

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

- [1] SASAHARA H., KATO A., NAKAJIMA H., YAMAMOTO H., MURAKI T., TSUTSUMI M., 2008, *High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48, 841–850.
- [2] KISHAWY H. A., WILCOX J., 2003, *Tool wear and chip formation during hard turning with self-propelled rotary tools*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, 433–439.
- [3] HOSOKAWA A., UEDAA T., ONISHIB R., TANAKAA R., FURUMOTO T., 2010, *Turning of Difficult-to-Machine Materials with Actively Driven Rotary Tool*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59/1, 89–92.
- [4] YAMAMOTO H., SATAKE K., SASAHARA H., NARITA T., TSUTSUMI M., MURAKI T., 2010, *Thermal Behaviour and Tool Failures on High Speed and High Feed Rotary Cutting of Difficult-to-cut Materials utilizing Multi-Tasking Lathe*, Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting; paper A17.
- [5] SHAW M. C., SMITH P. A., COOK N. A., 1952, *The rotary cutting tool*, Trans. ASME, 74, 1065–1076.
- [6] RAMASWAMY N., KOENIGSBERGER F., 1968, *Experiments with self-propelled rotary cutting tools*, Proceedings of the Ninth IMTDR Conference, Part 2, 945–959.
- [7] ZASADA M., CIELOSZYK J., CHMIELEWSKI K., 2009, *Nóż tokarski czotowy – narzędzie z obrotowym ostrzem skrawającym*, Obróbka Skrawaniem 3 – Zaawansowana Technika, Wydawnictwa UUTP, Bydgoszcz, 281-290.
- [8] CHMIELEWSKI K., CIELOSZYK J., ZASADA M., 2007, *Narzędzia skrawające z obrotowymi płytkami skrawającymi i elementami nagniatającymi*, Obróbka Skrawaniem – wysoka produktywność, Wydawnictwa UWPW, Wrocław, 361-369.
- [9] CHMIELEWSKI K., CIELOSZYK J., ZASADA M., 2010, *Weryfikacja doświadczalna kinematycznych parametrów pracy narzędzia z ostrzem obrotowym*, Obróbka Skrawaniem – Współczesne Problemy, Wydawnictwa PPW, Łódź, IV_08.

INSERT ROTATIONAL SPEED OF SELF-PROPELLED ROTARY TOOLS DURING TURNING PROCESS

The paper presents an investigation of the insert rotational speed dependence on cutting parameters. Original method of measurement of this speed was developed. Obtained results showed that the speed is lower than theoretical, reported in literature and depends not only from the velocity of cutting, but also from a feed and depth of cutting. Finally, the formula on insert speed depended on cutting parameters was investigated. The investigations show also, that the insert needs time for stabilization rotational speed. This time is depend on cutting parameters.