

Face rotary turning tools (FRTT) in high productivity process

Zastosowanie obrotowych noży tokarskich czołowych w wysokowydajnej obróbce

JANUSZ CIELOSZYK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.100>

The article presents an unconventional method of machining rolling surfaces. This method is called face rotary turning tools (FRTT) or spinning tools technology. Advantages and limitations of the method were discussed and its effectiveness in modern machining processes was shown, based on the proposed simple models.

KEYWORDS: spinning tools technology, spinning tools, face rotary turning tool

W artykule przedstawiono niekonwencjonalną metodę obróbki skrawaniem powierzchni tocznych. Ta metoda jest nazywana toczeniem obrotowym nożem czołowym (*face rotary turning tool* – FRTT) lub toczeniem spinowym (*spinning tools technology*). Omówiono zalety i ograniczenia metody oraz pokazano jej efektywność w nowoczesnych procesach obróbki, bazując na zaproponowanych prostych modelach.

SŁOWA KLUCZOWE: toczenie spinowe, narzędzia spinowe, obrotowy nóż czołowy

Wprowadzenie

W czasie prac badawczych nad możliwością stosowania narzędzi samoobrotowych [2–4], oznaczanych akronimem SPRET (*self-propelled rotary edge tool*), do obróbki powierzchni walcowych na frezarkach wyposażonych w specjalny przyrząd do mocowania i obrotu przedmiotu obrabianego (rys. 1) sprawdzono koncepcję narzędzi wykorzystujących łożyskowanie wrzeciona obrabiarki do realizacji ich obrotu.

Zaprojektowane i wykonane narzędzie z ostrzem jednolitą z częścią chwytową (rys. 1a – narzędzie ze stali szybko tnącej) lub narzędzie z ostrzem wymiennym w postaci wkładki (płytki) z węgla spiekane (rys. 1b), umieszczonej w prostym korpusie w kształcie trzpienia, mocowano we wrzecionie frezarki za pośrednictwem oprawki zaciskowej. Przygotowaną konstrukcję narzędzia

z uchwytem stożkowym (rys. 1c) mocowano bezpośrednio we wrzecionie.

Ze względu na duże opory łożyskowania wrzeciona i połączonych w sposób nierozłączny części układu napędowego obrót ostrza narzędzia pod wpływem sił skrawania był niemożliwy, a przy większych głębokościach skrawania ($a_p = 2,3$ mm), niedopuszczalnych przy małej sztywności układu (rys. 1a) – bardzo nieregularny i losowy (mimo odłączenia najbardziej znaczących elementów tego układu napędowego, tj. silnika i odbocznki). To niepowodzenie można jednak bardzo prosto zmienić w nową metodę obróbki.

Charakterystyka procesu obróbki obrotowymi nożami tokarskimi czołowymi (FRTT)

Narzędzia SPRET o konstrukcji pokazanej na rys. 1 mogą bardzo efektywnie pracować jako napędzane. Warunkiem jest jedynie uruchomienie napędu wrzeciona z zamocowanym w oprawce narzędziem. Dodatkowym bodźcem takiego użycia badanych narzędzi stał się szybki rozwój centrów obróbkowych i obrabiarek wieloosiowych ze sterowaniem numerycznym, które zagwarantowały: koncentrację technologiczną procesów obróbki (frezowania, toczenia, wytaczania, wiercenia), konieczne względne kątowne ustawienie narzędzia i przedmiotu obrabianego (często w kilku płaszczyznach), kinematykę złożoną z jednoczesnego obrotu narzędzia i przedmiotu oraz realizację względnych ruchów posuwowych (rys. 2).

W przypadku klasycznych frezarek sterowanych numerycznie w trzech osiach realizacja obróbki z wykorzystaniem obrotowego noża czołowego wymagała zastosowania przystawki do mocowania i obrotu przedmiotu obrabianego na stole obrabiarki (rys. 1a), a w przypadku tokarek – specjalnych przystawek do mocowania, kątownego ustawienia i napędu obrotowego noża czołowego.

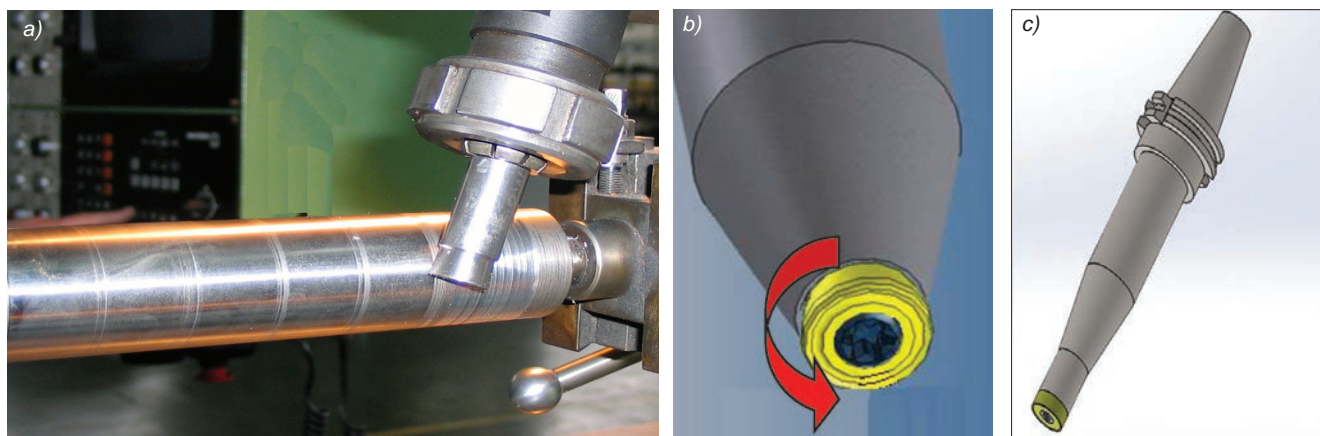


Fig. 1. Machining carried out on a milling machine using a face rotary turning tool and a special attachment: a) a uniform face rotary turning tool, b) a face rotary turning tool with replaceable insert, c) tool holder with a conical mandrel

Rys. 1. Obróbka prowadzona na frezarce z użyciem obrotowego noża tokarskiego czołowego oraz specjalnej przystawki: a) jednolity obrotowy nóż tokarski, b) obrotowy nóż tokarski czołowy z wkładką (ostrzem) wymienną, c) oprawka noża z trzpieniem stożkowym

* Dr hab. inż. Janusz Cieloszyk, janusz.cieloszyk@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-9685-1210> – Instytut Technologii Mechanicznej (ITM), Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny (ZUT) w Szczecinie, Szczecin, Polska

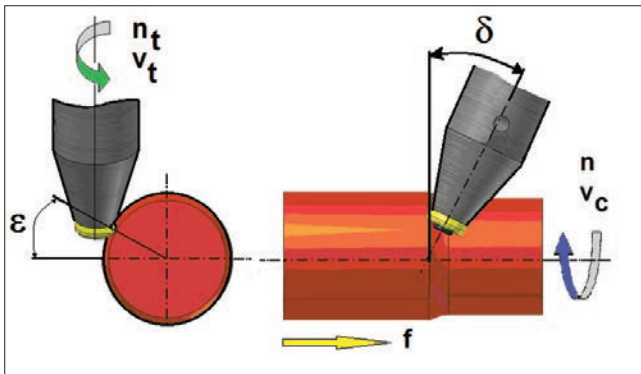


Fig. 2. Angles determining the setting of the rotary face turning tool in the machine-tool holder-workpiece-tool system

Rys. 2. Kąty określające ustawienie obrotowego noża tokarskiego czółowego w układzie obrabiarka-uchwyt-obrabiany przedmiot-narzędzie

Możliwość wdrożenia nowej metody skrawania potwierdzili reprezentujący firmę Kennametal autorzy amerykańskiego patentu [8], który dotyczył sposobu obróbki i konstrukcji zespołu do obracania wkładki (płytki) skrawającej podczas operacji toczenia. Opatentowaną metodę obróbki i konstrukcję narzędzi okrzyknęli oni jako największą rewolucję w rozwoju procesów obróbki skrawaniem [11]. Narzędzia nazwano obrotowymi nożami tokarskimi czółowymi (*face rotary turning tools* – FRTT). W ostatnich latach w literaturze anglojęzycznej, głównie w Japonii [1, 7, 12, 14], przypisano tej metodzie nazwę *spinning tools technology*, czyli obróbka narzędziami spinowymi. Obecnie w języku polskim używane są obie nazwy – toczenie obrotowym nożem czółowym i toczenie spinowe. W artykule przedstawiono charakterystykę tej metody obróbki oraz narzędzia zaprojektowane do jej realizacji (rys. 1).

Proces obróbki obrotowymi nożami tokarskimi czółowymi przypomina proces frezotoczenia. W obu przypadkach przedmiot i narzędzie wykonują ruch obrotowy, a dodatkowo narzędzie albo przedmiot wykonuje ruch posuwowy (rys. 2). Kształtowanie powierzchni w procesie obróbki obrotowym nożem czółowym charakteryzuje ciągła, nieprzerwana obecność ostrza w obrabianym materiale, przy czym zmieniają się kolejne fragmenty ostrza. To wyraźnie odróżnia ten proces od frezowania lub frezotoczenia. Obrót ostrza skrawającego pozwala na ciągłą zmianę jej czynnej krawędzi – tak, że każda jej część w trakcie skrawania pozostaje w bardzo krótkim kontakcie z obrabianym materiałem, w strefie wysokiej temperatury i dużych obciążeń [5]. W narzędziach typu FRTT obrót ostrza jest stabilny i nie zależy od innych warunków obróbki, np. od skrawalności materiału, parametrów technologicznych, geometrii ostrza czy sposobu chłodzenia. Te warunki (dotyczące zwłaszcza optymalnej geometrii ostrza wynikającej z jego kąтового ustawienia w oprawce narzędzia) były istotne w przypadku wcześniejszych konstrukcji z obrotowym ostrzem – RET (*rotary edges tool*) typu SPRET [2]. Konstrukcja innego typu narzędzi RET, tj. DRET (*driven rotary edges tool*) z własnym napędem obrotu ostrza w korpusie, była skomplikowana i kosztowna. Z tego względu narzędzia te nie znalazły szerokiego zastosowania w przemyśle [2–4].

W procesie toczenia obrotowym nożem czółowym na nowoczesnych centrach obróbkowych i wieloosiowych obrabiarkach można zapewnić optymalną geometrię narzędzia – dzięki możliwości zmiany (nawet ciągłej!) jego ustawienia – w układzie ustawienia i roboczym (rys. 2) (przez ponad 150 lat położenie kątowe narzędzia względem przedmiotu w procesie toczenia pozostawało niezmiennie [2]). Główna różnica w odniesieniu np. do narzędzi SPRET polega na możliwości kąтового nachylenia

(rys. 1 i 3) ostrza prostego narzędzia w układzie narzędzia o kąt δ , który zwykle wynosi 20° – 40° . Kąt nachylenia wpływa na kierunek spływu wiórow, ale najistotniejszym efektem jest duża wartość roboczego kąta natarcia, bez pogarszania wytrzymałości ostrza skrawającego. Zapewnia to korzystny stan naprężenia w strefie pracy ostrza. Odształcenie wiórow w procesie obróbki jest niewielkie ze względu na małe odształcenia plastyczne usuwanego materiału. Pozwala to zwiększyć prędkość skrawania v_c , która często jest ograniczona przez wysoką temperaturę, co można zaobserwować w przypadku pracy konwencjonalnych noży tokarskich, zwłaszcza w obróbce materiałów trudnoskrawalnych [1, 3, 7, 9, 11–14].

Przykładowo, w zrealizowanych badaniach obróbki materiałów utwardzonych (stali 100 Cr6 zahartowanej do twardości ok. 52 HRC) skrawanie bez ruchu obrotowego ostrza z parametrami $v_c = 180$ m/min, $f_r = 0,10$ mm/obr oraz $a_p = 0,25$ mm nie było możliwe, a w przypadku wystąpienia ruchu obrotowego trwałość ostrza osiągała aż $T = 50$ min.

W badaniach prowadzonych w współpracy trzech firm – DMG Mori Seiki, DP Technology Corp. i Kennametal (do której należy patent [8]) – uzyskano wzrost trwałości narzędzia o 2000% oraz wzrost efektywności obróbki o 500% [8].

Ograniczenia i możliwości obróbki obrotowymi nożami tokarskimi czółowymi (FRTT)

Analizując dostępne na rynku podstawowe typy narzędzi tokarskich, można zauważyć, że narzędzia z ostrzami okrągłymi mają spore możliwości technologiczne i szerokie zastosowanie. Jedynym ograniczeniem jest w tym przypadku stosunek promienia ostrza do przewidywanej geometrii obrabianego wałka. Jednocześnie ostrza okrągłe, nawet w klasycznym zastosowaniu, są podatne na drgania, co potwierdzają wieloletnie badania dotyczące narzędzi RT [2–4]. Narzędzia te charakteryzują się wprawdzie bardzo dużą wytrzymałością i odpornością na zużycie, lecz ich skłonność do drgań często jest trudna do opanowania, ponieważ cechy dynamiczne układu obrabiarka-uchwyt-obrabiany przedmiot-narzędzie (OUPN) są specyficzne i trudne do zidentyfikowania.

Dodatkową barierą w efektywnym wdrażaniu i stosowaniu narzędzi FRTT jest potrzeba określenia oprócz typowych parametrów technologicznych (posuwu f , głębokości a_p i prędkości skrawania v_c , wynikającej z obrotu przedmiotu n) nowych wielkości, takich jak:

- obroty narzędzia n_t i wynikająca stąd jego prędkość v_t ,
- ustawienie narzędzia względem przedmiotu obrabianego, opisane kątami ε i δ ,
- optymalna średnica wkładki.

Wyniki doświadczeń i zalecenia zgromadzone w dostępnych publikacjach nie są wystarczające. Poświęcenie większego nakładu pracy na staranne dobranie wszystkich warunków i parametrów technologicznych (łącznie z weryfikacją doświadczalną przyjętego układu OUPN, w którym mają być zastosowane narzędzia FRTT) może się przyczynić do wyraźnego zwiększenia efektywności obróbki. Dotyczy to nie tylko produkcji masowej i seryjnej, lecz także małoseryjnej.

Przykładową ilustracją możliwych do osiągnięcia efektów jest ocena kosztów ostrzy przedstawiona na rys. 3, przeprowadzona na podstawie wyników badań trwałości w procesie obróbki stali 100 Cr6. Do takiej oceny, odnoszonej do klasycznych narzędzi tokarskich z ostrzami o dowolnym kształcie ostrza, niezbędne jest wykorzystaniem dwóch prostych modeli, określających:

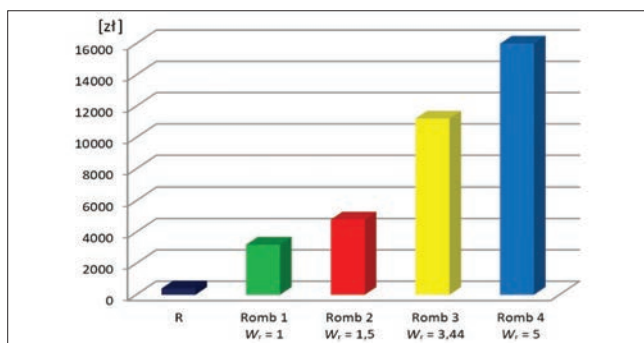


Fig. 3. Comparison of the values of interchangeably used rhombic inserts (Romb) with different values of the W_f factor (R – round insert in the FRTT)

Rys. 3. Porównanie wartości zamiennie stosowanych wkładek (płytek) rombów (Romb) o różnych wartościach współczynnika W_f (R – płytki okrągłe w nożu FRTT)

- zastępczą liczbę krawędzi elementarnych na płytkach okrągłych, również w narzędziach z ostrzami obrotowymi RET;
- współczynnik wzrostu trwałości ostrza wynikającego z obrotu płytki, uwzględniający wpływ zjawisk fizycznych, charakterystycznych dla narzędzi RET, na ich trwałość.

Na potrzeby wyznaczenia zastępczej liczby krawędzi elementarnych (i_k) na płytkach okrągłych i okrągłych w narzędziach z ostrzami obrotowymi RET (i_{kr}) przyjmuje się założenie, że cała krawędź okrągłej wkładki (płytki) składa się z k krawędzi, nazywanych krawędziami elementarnymi.

Wartości i_k oraz i_{kr} można obliczyć jako iloraz obwodu płytki przez długość czynnej krawędzi skrawającej, zależną od głębokości skrawania:

$$i_k = \frac{\pi D_c i_s}{l_c} = \frac{2 i_s \pi}{\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - 2 \frac{a_p}{D_c}\right) + \arcsin\left(\frac{f}{D_c}\right)} \quad (1)$$

gdzie: l_c – długość czynnej krawędzi skrawającej, a_p – głębokość skrawania, f – posuw [mm/obr], D_c – średnica płytki, i_s – liczba dostępnych krawędzi na płytce okrągłej (najczęściej $i_s = 1$ lub 2).

Obliczając trwałość płytki obrotowej narzędzia RET tylko jako sumę i_k okresów trwałości (wyznaczonych dla krawędzi płytki konwencjonalnej) elementarnego ostrza płytki aproksymującej, uzyskuje się wynik wyraźnie zaniżony, niezgodny z obserwacjami [1, 3–7]. Powodem jest inna kinematyka skrawania narzędzi RET, zapewniająca niższą temperaturę procesu skrawania i tym samym mniej intensywny wpływ niekorzystnych zjawisk fizykochemicznych w strefie skrawania na proces zużycia ostrza [4]. Proponuje się, aby wpływ wymienionych zjawisk na trwałość narzędzi RET uwzględnić za pomocą współczynnika W_f , wyrażającego wzrost trwałości ostrza narzędzia z płytką obrotową w stosunku do trwałości narzędzia z tą samą płytką, ale unieruchomioną.

Umowny współczynnik W_f można wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$W_f = \frac{i_{sr} T_{cr}}{i_{kr} T_c} \quad (2)$$

gdzie: W_f – współczynnik wzrostu trwałości ostrza wynikającego z obrotu płytek, uwzględniający wpływ zjawisk charakterystycznych dla narzędzi RET na trwałość; T_c – okres trwałości dla narzędzia z płytką nieruchomą; dotyczy pojedynczej krawędzi płytki wielostrzowej lub pojedynczego fragmentu ostrza płytki okrągłej (lub umownej krawędzi elementarnej); T_{cr} – okres trwałości ostrza narzędzia RET, np. typu FRTT.

Współczynnik W_f należy interpretować jako iloraz trwałości płytki obrotowej do żywotności płytki stacjonarnej lub jako iloraz trwałości umownego ostrza elementarnej płytki obrotowej do trwałości umownego ostrza elementarnej okrągłej płytki stacjonarnej. Przy porównaniach z płytkami wielostrzowymi rolę ostrza elementarnej pełni pojedyncza krawędź skrawająca płytki wielostrzowej.

Wartość współczynnika W_f określono doświadczalnie na podstawie wyników badań zużycia ostrzy w narzędziu RET i stacjonarnym [3, 4].

Na podstawie wyników badań zużycia i trwałości narzędzia można wykazać, że w przypadku procesu toczenia serii wałków, do którego realizacji niezbędne było zużycie 20 wkładek (płytek) z węglików spiekanych, okrągłych – o średnicy $D = 12$ mm, o wartości 400 zł, szacowany koszt zamiennie użytych kwadratowych czterostrzowych wkładek wyniósłby 8000 zł, a dwustrzowych wkładek rombów – 16000 zł.

W przeprowadzonej analizie przyjęto, że cena płytek okrągłych i rombów jest w przybliżeniu równa i wynosi ok. 20 zł. Należy zauważyć, że koszty oprawek narzędzi tokarskich klasycznych będą co najmniej porównywalne (jeśli nie większe) z kosztem prostych oprawek noży FRTT. Wynika to wprost z konstrukcji oprawek tych noży. Nawet zastosowanie jednolitej konstrukcji oprawki narzędzia FRTT z trzpieniem stożkowym (rys. 1) nie zmieni korzystnych relacji w odniesieniu do klasycznego toczenia realizowanego na tym samym centrum obróbkowym czy na tej samej wieloosiowej obrabiarce.

LITERATURA

- [1] Astakhov V.P. "Geometry of Single-point Turning Tools and Drills". London: Springer-Verlag, 2010.
- [2] Cieloszyk J., Fabisiak B. „Narzędzia z obrotowymi krawędziami skrawającymi – klasyfikacja i terminologia”. *Mechanik*. 8–9 (2017): 674–676, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.100>.
- [3] Cieloszyk J., Zasada M. "The Self-Propelled Rotary Tools-Future Conception In Metal Cutting?". *The 15th DAAAM International Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Globalisation – Technology – Men – Nature"*. Vienna, Austria, 3–6th November 2004, 075–077.
- [4] Cieloszyk J., Zasada M., Wieloch G. „Właściwości i perspektywy zastosowań aktywnie napędzanych noży obrotowych ADRT na wieloosiowych centrach obróbkowych”. *Innovative Manufacturing Technology*. Ed. P. Rusek. IZTW Kraków, 2012, 29–39, ISBN 978-80-228-2385-2.
- [5] Dessoly V., Melkote S.N., Lescallier C. "Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 44 (2004): 1463–1470.
- [6] Ezugwu E.O. "Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 45 (2005): 1353–1367.
- [7] Hosokawa A., Haruki Yoshimatsu H., Koyano T., Furumoto T., Yashimoto Y. "Turning of difficult-to-machine materials with an actively driven rotary tool (ADRT)". *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 12, 5 (2018): 1–9.
- [8] Hyatt G.A., Andras L.R., Massa T.R. "Method and assembly for rotating a cutting insert during a turning operation and inserts used therein". Patent US 7156006B2, Jan. 2, 2007.
- [9] Kishawy H.A., Becze C.E., McIntosh G.G. "Tool performance and attainable surface quality during the machining of aerospace alloys using self-propelled rotary tools". *Journal of Materials Processing Technology*. 152 (2004): 266–271.
- [10] Kishawy H.A., Wilcox J. "Tool wear and chip formation during hard turning with self propelled rotary tools". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 43 (2003): 433–439.
- [11] Mazakas A. "The evolution of revolution". *Cutting Tool Engineering*. 60 (2008): 74–76.
- [12] Nakajima K. et al. "Effect of rotary cutting tool posture on machining performance utilizing multi-tasking lathe". *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2, 2 (2008): 532–539.
- [13] Sasahara H. et al. "High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multi tasking lathe". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 48, 7–8 (2008): 841–850.
- [14] Yamamoto K., Satake K., Narita T., Sasahara H., Tsutsumi T., Muraki T. "Thermal Behavior and Chip Formation on Rotary Cutting of Difficult-to-cut Materials Utilizing Multi Tasking Lathe and MQL". Tokyo University of Agriculture and Technology, report 2010. ■