

Ocena zjawisk fizycznych w procesie toczenia żeliwa sferoidalnego ostrzami z kompozytu WCCo/cBN

Evaluation of physical phenomena occurring in turning of nodular cast iron with use of the WCCo/cBN composite cutting edges

SZYMON WOJCIECHOWSKI
ZBIGNIEW NOWAKOWSKI
RAFAŁ TALAR*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.606

Przedstawiono wyniki badań toczenia poprzecznego żeliwa sferoidalnego z użyciem ostrzy skrawających wykonanych z nowoczesnego kompozytu WCCo/cBN. Program badań doświadczalnych obejmował pomiary: składowych siły całkowitej (F_c, F_f), temperatury skrawania (θ) oraz przyspieszeń drgań (A_c, A_f). Uzyskane wyniki dostarczają istotnych informacji jakościowych i ilościowych o przebiegu procesu skrawania żeliwa sferoidalnego ostrzami z kompozytu WCCo/cBN.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka skrawaniem, kompozyt WCCo/cBN, żeliwo sferoidalne, mechanika skrawania

Presented in the paper are the results of grooving a nodular cast iron part by means of a tool made of modern WCCo/cBN composite. The experimental program included the measurements of: cutting force components (F_c, F_f), cutting temperature (θ) and vibration accelerations (A_c, A_f). The research results provide essential qualitative and quantitative information on the process of machining the nodular cast iron part with the WCCo/cBN composite cutting edges.

KEYWORDS: machining, WCCo/cBN composite, nodular cast iron, machining mechanics

Jednym z najtwardszych obecnie stosowanych materiałów narzędziowych (drugim po diamencie) jest regularny azotek boru – cBN (*cubic boron nitride*). Do głównych zalet tego materiału należą odporność termiczna i chemiczna, dzięki którym wykonane z niego narzędzia skrawające – w przeciwieństwie do narzędzi diamentowych – nadają się do skrawania obrobionych cieplnie stali (>50 HRC), utwardzonych żeliw oraz stopów na bazie niklu i kobaltu. Ponadto narzędzia z cBN charakteryzują się dużą wytrzymałością mechaniczną oraz odpornością na utlenianie [1].

W obróbce skrawaniem stosuje się narzędzia skrawające wykonane zarówno z mieszaniny azotku boru (90% cBN) i metalicznej fazy łączącej, jak również kompozytów wytworzonych z proszków cBN, metalicznej fazy łączącej i fazy twardej z materiałów wysokotopliwych (zazwyczaj związków chemicznych tytanu) [2, 3]. Według autorów pracy [4] kompozyty te można podzielić na materiały o niskiej (ok. 40÷65% obj.) oraz wysokiej (>65% obj.) zawartości cBN. Należy podkreślić, że im większa jest zawartość fazy twardej (cBN) w kompozycie, tym staje się on twardszy, bardziej wytrzymały mechanicznie oraz odporny na krucho pękanie, zmniejsza się natomiast jego odporność termiczna i chemiczna. Liczną grupę wśród wymienionych kompozytów stanowią materiały WCCo/cBN – uzyskane metodą izostatycznego prasowania na gorąco (HIP) [5], iskrowego spiekania plazmowego (SPS) [6, 7] oraz impulsowego spiekania plazmowego (PPS) [8].

Badania zaprezentowane w artykule dotyczą nowoczesnego kompozytu WCCo/cBN (BNDCC – *boron nitride disper-*

sed cemented carbide), otrzymanego w wyniku impulsowego spiekania plazmowego. Do produkcji tego materiału używa się mieszaniny proszku węgla wolframu z fazą metaliczną o zawartości 6% lub 12% wag. kobaltu. Mieszaninę tę uzupełnia proszek z cBN, stanowiący 30% objętości uzyskanego kompozytu [8]. Kompozyt WCCo/cBN (BNDCC) pozostaje w fazie badań laboratoryjnych, w związku z tym jego właściwości skrawne nie są jeszcze rozpoznane. Stanowiło to punkt wyjścia do przeprowadzenia badań doświadczalnych obejmujących pomiary i analizę podstawowych wielkości fizycznych podczas toczenia żeliwa sferoidalnego ostrzem z kompozytu WCCo/cBN (BNDCC). Uzyskane wyniki dostarczają istotnych informacji o przebiegu skrawania ostrzami z tego materiału, a także umożliwiają dobór efektywnych parametrów procesu.

Warunki i metodyka badań

Próbki z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-18 miały postać wałków o średnicy $d \approx 135\div 150$ mm. Skład chemiczny i właściwości żeliwa przedstawiono w tabelicy I.

TABELICA I. Skład chemiczny i właściwości żeliwa sferoidalnego wg [9]

Skład chemiczny, %								Właściwości		
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	R_m MPa	A_5 %	HB
3,54	2,91	0,32	0,03	0,016	0,06	0,047	0,04	510	17,5	180
<i>R_m – wytrzymałość na rozciąganie, A₅ – wydłużenie względne, HB – twardość</i>										

W próbkach wykonywano rowki podczas toczenia nieswobodnego ortogonalnego poprzecznego z różnymi parametrami skrawania (tabl. II), z zastosowaniem tokarki TUR 560E.

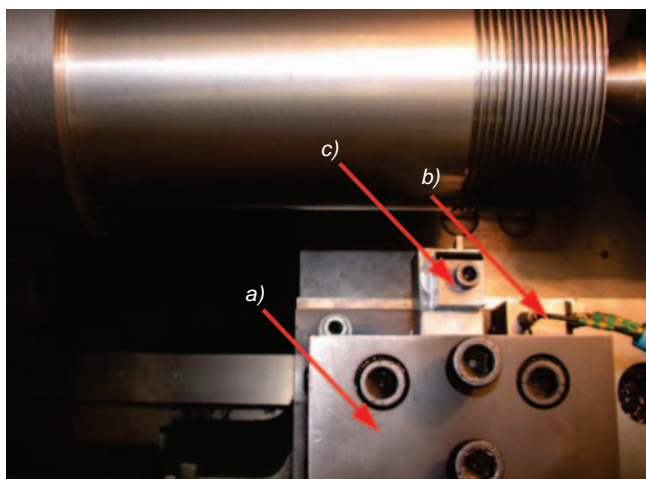
TABELICA II. Parametry skrawania przyjęte w badaniach

Posuw f , mm/obr	Prędkość skrawania v_c , m/min	Głębokość skrawania a_p , mm
0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1	176	2,5
0,06	20; 37; 55; 110; 140; 220; 317	

W każdym z przejść droga skrawania w kierunku ruchu posuwowego wynosiła $l_f \approx 3$ mm, natomiast odległość pomiędzy wykonywanymi rowkami $b_f = 3$ mm. W celu zminimalizowania wpływu bicia promieniowego przedmiotu obrabianego na badane czynniki, próbki zostały przetoczone wzdłużnie przed wykonaniem operacji toczenia rowków.

Narzędziem zastosowanym w badaniach był składany nóż tokarski do toczenia rowków (rys. 1c) z płytą skrawającą wykonaną z kompozytu WCCo/cBN (BNDCC) bez powłoki przeciwdrobnoczącej. Ostrza miały twardość ok. 2300 HV [8] oraz następującą geometrię: główny kąt przystawienia $\kappa_r = 90^\circ$, promień naroża $r_\epsilon = 0,8$ mm, ortogonalny kąt natarcia $\gamma_0 = 1^\circ$, ortogonalny kąt przyłożenia $\alpha_0 = 9^\circ$, kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej $\lambda_s = 0^\circ$.

* Dr inż. Szymon Wojciechowski (szymon.wojciechowski@put.poznan.pl), dr inż. Zbigniew Nowakowski (zbigniew.nowakowski@put.poznan.pl), dr inż. Rafał Talar (rafal.talar@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Mechanicznej na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej



Rys. 1. Widok stanowiska do pomiaru sił i przyspieszeń drgań: a) trójskładowy siłomierz piezoelektryczny, b) trójskładowy czujnik drgań, c) nóż tokarski

W zakresie prowadzonych badań zmierzono składowe siły całkowitej, przyspieszenia drgań i temperaturę skrawania. Siły oceniono za pomocą trójskładowego siłomierza piezoelektrycznego (rys. 1a) podłączonego do wzmacniacza ładunków firmy Kistler. Pomiarów przyspieszeń drgań dokonano z użyciem trójskładowego piezoelektrycznego akcelerometru zamocowanego na korpusie siłomierza (rys. 1b). Czujnik podłączono do wzmacniacza Nexus 2692/OS4 firmy Brüel&Kjaer. Sygnał z obu wzmacniaczy trafiał poprzez interfejs analogowy do komputera z kartą A/C, gdzie był rejestrowany za pomocą systemu TabaWin. Sygnały składowych siły całkowitej i przyspieszeń drgań mierzone w kierunkach:

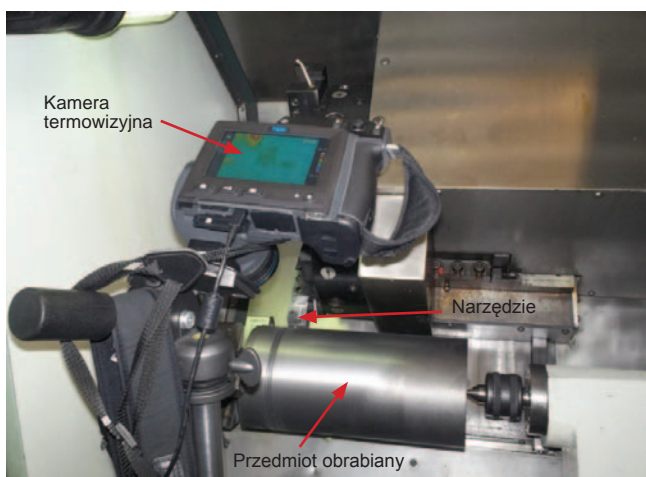
- obwodowym – siła skrawania F_c w N, przyspieszenie drgań obwodowe A_c w m/s^2 ,
- posuwowym – siła posuwowa F_f w N, przyspieszenie drgań w kierunku posuwowym A_f w m/s^2 .

Pomiary powtarzano trzykrotnie dla każdej badanej kombinacji parametrów skrawania (v_c , f). Analizie poddano następujące miary sygnałów:

- średnią arytmetyczną składowych siły całkowitej ($F_{c,śr}$, $F_{f,śr}$),
- średniokwadratową składowych przyspieszeń drgań ($A_{c,RMS}$, $A_{f,RMS}$).

W celu wyznaczenia tych miar brano pod uwagę przedział czasowy wykluczający czas dobiegu i wybiegu ostrza skrawającego.

Badania obejmowały również pomiar temperatury skrawania θ na powierzchni natarcia ostrza w pobliżu strefy skrawania podczas toczenia rowków. Wykonano go kamerą termowizyjną Flir T620 (rys. 2). Obiektyw kamery skupiono na powierzchni natarcia ostrza, w obszarze styku narzędzia



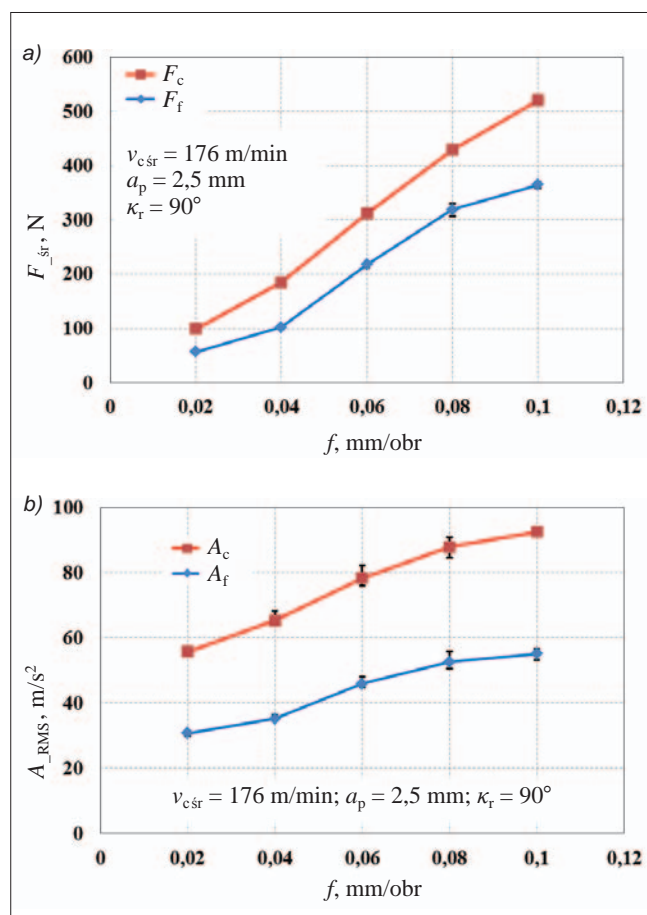
Rys. 2. Widok stanowiska badawczego do pomiaru temperatury podczas toczenia rowków

skrawającego z przedmiotem obrabianym. W związku z tym rejestrowano temperaturę zarówno spływającego wióra, jak i powierzchni natarcia ostrza. Badania przeprowadzono w zakresie zmiennej prędkości skrawania (tabl. II), z posuwem $f = 0,06$ mm/obr.

Wyniki badań i ich analiza

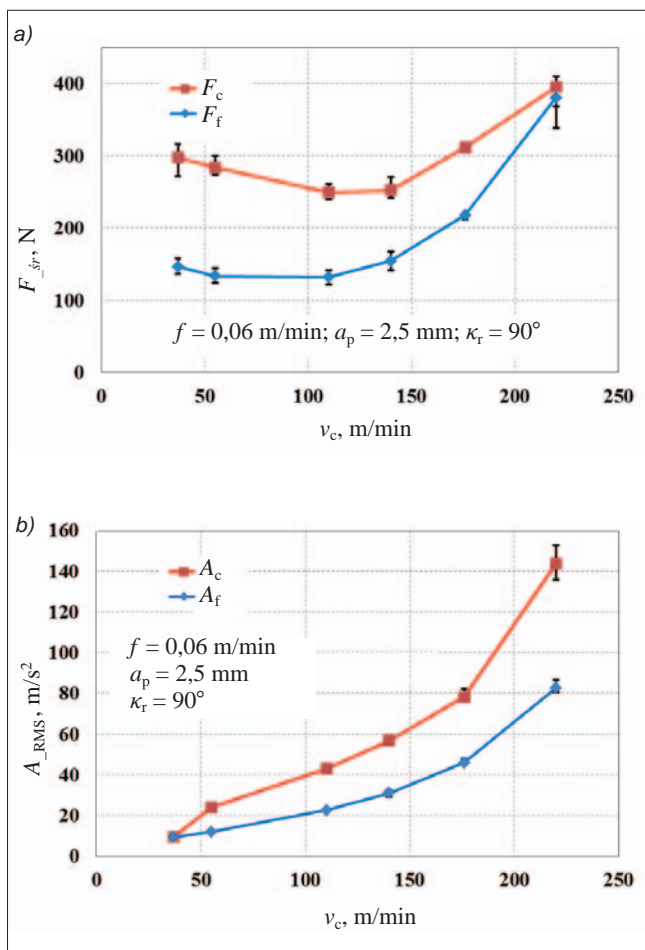
Na rys. 3a i b przedstawiono wpływ posuwu na obrót f na wartości średnie arytmetyczne składowych siły całkowitej ($F_{c,śr}$, $F_{f,śr}$) oraz średniokwadratowe przyspieszeń drgań ($A_{c,RMS}$, $A_{f,RMS}$). Zaobserwowano monotoniczny wzrost wartości składowych $F_{c,śr}$, $F_{f,śr}$ wraz ze zwiększaniem wartości posuwu f (rys. 3a). Stanowi to typową zależność występującą podczas skrawania metali, wynikającą z proporcjonalności pola przekroju warstwy skrawanej do wygenerowanej wartości siły. Z rys. 3a wynika również, że niezależnie od wartości posuwu f siły skrawania $F_{c,śr}$ przyjmują większe wartości od tych wygenerowanych dla składowej $F_{f,śr}$. Obserwacja ta pozostaje w zgodzie z wynikami badań autorów pracy [10] dotyczącej skrawania żeliwa sferoidalnego narzędziami z ceramiki azotkowej i cBN.

Podobną zależność zauważono dla przyspieszeń drgań (rys. 3b). W tym przypadku wzrost posuwu wywołał również monotoniczny wzrost wartości średniokwadratowych przyspieszeń drgań ($A_{c,RMS}$, $A_{f,RMS}$). Należy podkreślić, że nadmierne drgania mogą niekorzystnie wpłynąć na formowaną strukturę geometryczną powierzchni obrobionej oraz trwałość ostrza skrawających.

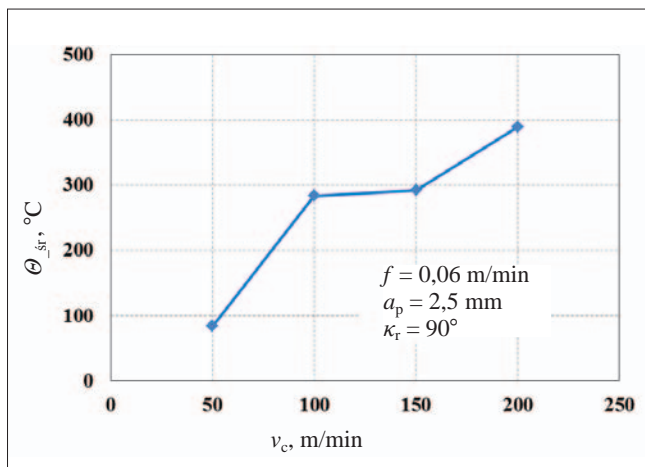


Rys. 3. Wpływ posuwu f na: a) składowe siły całkowitej, b) składowe przyspieszenia drgań

Przeanalizowano wpływ prędkości skrawania v_c na składowe siły całkowitej i przyspieszenia drgań (rys. 4). Z rys. 4a wynika, że prędkość skrawania wywiera niemonotoniczny wpływ na siły $F_{c,śr}$ i $F_{f,śr}$. W przedziale: 37 m/min $\leq v_c \leq 110$ m/min zaobserwowano spadek wartości

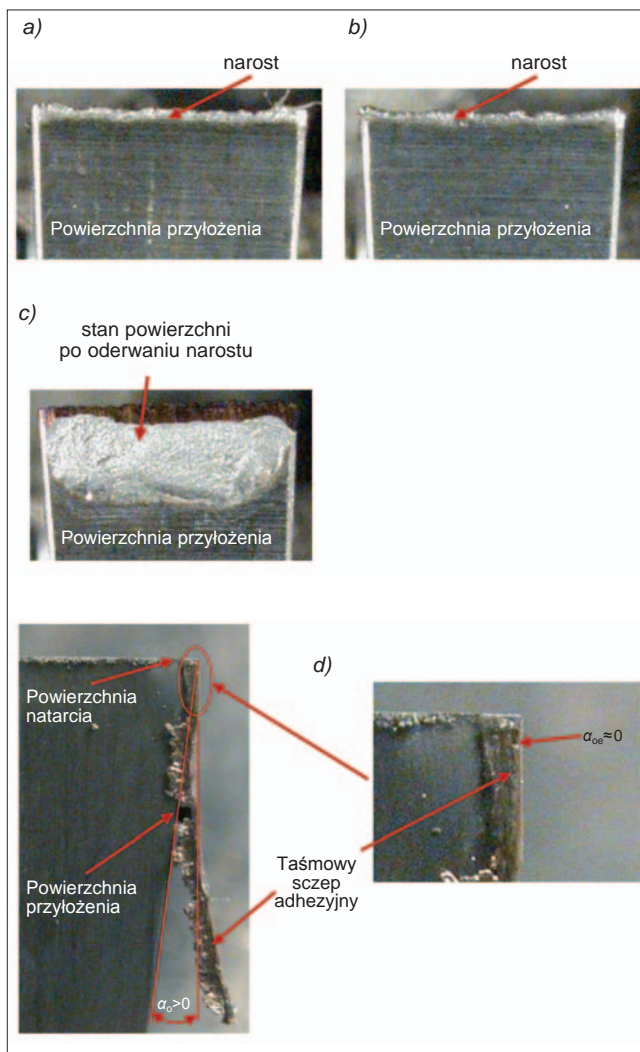


Rys. 4. Wpływ prędkości skrawania v_c na: a) składowe siły całkowitej; b) składowe przyspieszenia drgań



Rys. 5. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią temperaturę podczas toczenia ostrzem WCCo/cBN (BNDCC)

składowych siły całkowitej wraz ze wzrostem prędkości skrawania, natomiast w zakresie: 140 m/min $< v_c \leq 220$ m/min nastąpił wzrost wartości składowych $F_{c, \dot{s}r}$ i $F_{f, \dot{s}r}$ wraz ze zwiększaniem się prędkości skrawania. Przyczyną tej zależności jest obecność zjawiska narostowego na ostrzu, występująca w całym badanym zakresie prędkości skrawania, wpływająca na zmienność efektywnej geometrii ostrza. Jest to widoczne na fotografiach powierzchni przyłożenia ostrza przedstawiających intensywne szczipienia adhezyjne (rys. 6). Badania wykazały, że w zakresie prędkości skrawania $v_c \geq 170$ m/min nastąpiło zwiększenie intensywności narostu



Rys. 6. Stan ostrzy WCCo/cBN (BNDCC) po toczeniu z prędkością v_c : a) 20 m/min, b) 55 m/min, c) 317 m/min, d) 171 m/min

polegające na formowaniu się na ostrzu taśmowych szczipień adhezyjnych (rys. 6d). Obecność tych szczipień może wpłynąć na obniżenie efektywnego kąta przyłożenia do wartości bliskich zera lub nawet ujemnych: $\alpha_{oe} \leq 0^\circ$. W wyniku tego następuje „wtłaczanie” materiału obrabianego pod powierzchnię przyłożenia ostrza, co wpływa na wzrost odkształceń sprężystych i plastycznych obrabianego materiału oraz wartości sił powstałych podczas skrawania [11].

Jak widać na rys. 4b, zwiększenie wartości prędkości skrawania wywołuje wykładniczy wzrost wartości średniokwadratowych składowych przyspieszenia drgań $A_{c, RMS}$, $A_{f, RMS}$. Nadmierne drgania wygenerowane podczas skrawania są zjawiskiem niekorzystnym, w związku z tym wartości prędkości skrawania v_c podczas toczenia ostrzem z kompozytu WCCo/cBN (BNDCC) nie powinny przekroczyć 200 m/min.

Kolejny etap badań obejmował pomiar temperatury podczas toczenia ostrzem z kompozytu WCCo/cBN (BNDCC) (rys. 5). Zaobserwowano, że wzrost prędkości skrawania wywołuje zwiększenie średniej temperatury, co jest efektem przekształcenia prawie całej energii powstałej podczas skrawania w ciepło. Największą wartość średniej temperatury, nieprzekraczającą 400°C , otrzymano podczas toczenia z prędkością $v_c = 200$ m/min. Jest to wartość znacznie niższa od maksymalnej temperatury pracy ostrzy z węglików spiekanych i jednofazowych spieków azotku boru cBN. Dodatkowo przegląd literatury ukazuje, że otrzymane w ramach niniejszych badań wartości temperatury są porównywalne z wartościami otrzymanymi podczas toczenia żeliwa PF-NCI [12] i stali AISI 1045 [13] ostrzami z cBN.

Podsumowanie i wnioski

Przeanalizowano zjawiska fizyczne podczas toczenia poprzecznego żeliwa sferoidalnego ostrzami z kompozytu WCCo/cBN (BNDCC). Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski.

- Wzrost posuwu f wpływa na zwiększenie wartości składowych siły całkowitej ($F_{c_śr}$, $F_{t_śr}$) oraz przyspieszeń drgań (A_{c_RMS} , A_{t_RMS}).
- Skrawanie z prędkością w zakresie $v_c = 110 \div 140$ m/min wpływa na minimalizację wartości składowych siły całkowitej ($F_{c_śr}$, $F_{t_śr}$). Niemniej jednak podczas toczenia w zakresie: $140 \text{ m/min} < v_c \leq 220 \text{ m/min}$ obserwuje się wzrost wartości składowych $F_{c_śr}$, $F_{t_śr}$ wywołany prawdopodobnie zmiennością efektywnej geometrii ostrza (głównie kąta α_{0e}), wynikającą z obecności narostu.
- Temperatury zarejestrowane podczas skrawania żeliwa sferoidalnego ostrzem z kompozytu WCCo/cBN (BNDCC) są porównywalne z wartościami otrzymanymi podczas obróbki ostrzami z konwencjonalnego azotku boru cBN.
- W całym badanym zakresie prędkości skrawania zaobserwowano obecność szczepień adhezyjnych na ostrzu (narostu). W związku z tym wymagane są dalsze badania eksploatacyjne ostrzy z kompozytu WCCo/cBN (BNDCC), mające na celu minimalizację zjawiska narostowego, np. poprzez zastosowanie odpowiednich powłok przeciwzuzyciowych.

LITERATURA

1. Klimczyk P. „Kompozyty narzędziowe o osnowie regularnego azotku boru cBN”. Red. Stobierski L. *Spiekane materiały narzędziowe przeznaczone na ostrza narzędzi do obróbki z wysokimi prędkościami skrawania*. Kraków: Wydawnictwa Naukowe „Akapit”, 2014, s. 30÷37.
2. Angseryd J., Elfving M., Olsson E., Andren H.-O. “Detailed microstructure of a cBN based cutting tool material”. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Vol. 27, Iss. 2, 03 (2009): pp. 249÷255.
3. Chou Y., Evans C., Barash M. “Experimental investigation on cubic boron nitride turning of hardened ANSI 52100 steel”. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 134 (2003): pp. 1÷9.
4. Carius A., Rigby P. “PCBN Turns the Hard Stuff”. *Cutting Tool Engineering*. Vol 47, No. 4 (1995).
5. Martinez V., Echeberria J. “Hot Isostatic Pressing of Cubic Boron Nitride–Tungsten Carbide/Cobalt (cBN–WC/Co) Composites: Effect of cBN 1. Particle Size and Some Processing Parameters on their Microstructure and Properties”. *Journal of the American Ceramic Society*. Vol 90, Iss. 2 (2007): pp. 415÷424.
6. Yaman B., Mandal H. “Spark plasma sintering of Co–WC cubic boron nitride composites”. *Materials Letters*. Vol. 63, Iss. 12 (2009): pp. 1041÷1043.
7. Shi X. L., Shao G. Q., Duan X. L., Yuan R.Z. „Spark Plasma Sintering of CBN-WC-10Co Composites”. *Key Engineering Materials*. Vol. 336÷338 (2007), pp. 1053÷1055.
8. Rosinski M., Michalski A. “WCCo/cBN composites produced by pulse plasma sintering method”. *Journal of Materials Science*. Vol. 47 (2012): pp. 7064÷7071.
9. Łybacki W., Piasecka K. „Statystyczna analiza wpływu składu chemicznego i struktury na właściwości żeliwa sferoidalnego”. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*. Vol. 28, nr 3 (2008): s. 73÷80.
10. Żak K., Grzesik W., Kiszka P., Kowalczyk D. „Skrawanie żeliwa sferoidalnego ostrzami z ceramiki azotkowej i CBN”. *Mechanik*. Nr 8–9 (2013): s. 634÷642.
11. Wu D. „A new approach of formulating the transfer function for dynamic cutting processes”. *ASME Journal of Engineering for Industry*. Vol. 111 (1989): pp. 37÷47.
12. Grzesik W., Kiszka P., Kowalczyk D., Rech J., Claudin C. „Machining of nodular cast iron (PF-NCI) using CBN tools”. *Procedia CIRP*. Vol. 1 (2012): pp. 483÷487.
13. Ueda T., Al Huda M., Yamada K., Nakayama K. “Temperature Measurement of CBN Tool in Turning of High Hardness Steel”. *Annals of the CIRP*. Vol. 48, Iss. 1 (1999): pp. 63÷66. ■