

Robert KOWALCZYK<sup>1</sup>  
Wojciech ZĘBALA<sup>1</sup>

## **ANALIZA SIŁ SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA WĘGLIKÓW SPIEKANYCH WC-Co NARZĘDZIAMI Z PCD**

W pracy przedstawiono wyniki badań składowych całkowitej siły skrawania podczas procesu toczenia węglików spiekanych WC-Co (25%Co i 15%Co) narzędziami z polikrystalicznego diamentu PCD. W czasie obróbki wykorzystano płytki o trzech promieniach zaokrąglenia  $r_e$ . W badaniach skupiono się nad wpływem  $r_e$ ,  $v_c$ ,  $f$  oraz zawartości kobaltu Co dla stałej głębokości skrawania  $a_p$  równej 0.2 mm na wartość składowych całkowitej siły skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ). Plan badań opracowany został według metody Taguchi'ego. Stwierdzono, że największy wpływ na siły skrawania ma promień zaokrąglenia  $r_e$ . Największe wartości zarejestrowano dla składowej posuwowej siły  $F_f$ , mniejsze dla siły skrawania  $F_c$ , najmniejsze dla siły obwodowej  $F_p$ . Dla poszczególnych składowych sił skrawania przedstawiona została analiza wariancji ANOVA. Dzięki analizie ANOVA zauważono istotny wpływ dodatkowego czynnika na wartości powstających sił ze względu na dużą wartość wariancji błędu  $MS_e$ .

### **1. WPROWADZENIE**

W ostatnich latach dostrzegalne jest coraz szersze zastosowanie narzędzi z polikrystalicznego diamentu PCD lub azotku boru CBN do obróbki super twardych materiałów, których twardość przekracza wartość 60HRC, w procesie toczenia lub frezowania, tzw. obróbka materiałów w stanie utwardzonym [1],[3].

Kształtowanie super twardych materiałów jest najczęściej wykonywane przez szlifowanie lub obróbkę elektroerozyjną EDM. Rozpowszechnienie wykorzystania narzędzi z ostrzami wykonanymi z PCD lub CBN jest wynikiem wprowadzania nowych norm środowiskowych, poszukiwania sposobów obniżenia kosztów produkcji części z twardych materiałów, np. z WC-Co, jak również malejące koszty zakupu tego typu narzędzi w porównaniu do narzędzi klasycznych, np. narzędzi z węglików spiekanych WC lub specjalistycznych ściernic. Zastosowanie narzędzi z PCD lub CBN do obróbki twardych materiałów jest możliwe dzięki ich właściwościom, np. wysokiej przewodności cieplnej, małemu współczynnikowi tarcia pomiędzy narzędziem a materiałem obrabianym, wysokiej odporności na ścieranie, możliwości obróbki na sucho. Metody klasyczne są energochłonne,

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Zakład Technologii i Modelowania Procesów Obróbki, Kraków,  
E-mail: rbtkwlczk@gmail.com

szkodliwe dla środowiska ze względu na wykorzystywane płyny chłodząco-smarujące oraz czasochłonne [2-12].

Do produkcji narzędzi skrawających wykorzystywany jest naturalny lub syntetyczny diament w formie proszków, dużych monokryształów, spieków diamentowych lub cienkich powłok. W przemyśle wykorzystuje się dwa rodzaje płytek z ostrzami wykonanymi z PCD. Pierwszy typ to płytka, w której podstawa wykonana jest np. z węgla wolframu, w którą wlutowane jest ostrze z PCD, drugi typ to płytka wykonana na bazie np.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , na którą powlekana jest cienka warstwa PCD w procesie CVD (*chemical vapour deposition*) lub HPHT (*high pressure and high temperature*) [9],[12].

Poniższe badania przedstawiają wyniki wpływu prędkości skrawania  $v_c$ , posuwu  $f$  i promienia zaokrąglenia  $r_\epsilon$  płytek z PCD oraz wpływu zawartości kobaltu Co na wartości składowych całkowitej siły skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ).

## 2. ANALIZA LITERATURY Z ZAKRESU TOCZENIA WĘGLIKÓW SPIEKANYCH NARZĘDZIAMI Z PCD LUB CVD

W badaniach [13] opisano proces toczenia WC-Co (27% Co). Przedstawiono wyniki jakości powierzchni oraz sił skrawania dla trzech typów narzędzi: i) PCD, ii) CBN, iii) z powłoką diamentową uzyskaną metodą CVD. Porównując wyniki dla poszczególnych narzędzi, największe zarejestrowane siły skrawania i najmniejszą trwałość uzyskano dla narzędzi z PCD. W badaniach wpływu parametrów skrawania na wartość sił skrawania podczas obróbki WC-Co (25% Co) narzędziami z CVD stwierdzono największy ich wpływ dla głębokości skrawania  $a_p$  [14]. W badaniach [15] toczenia WC-Co (25%Co) przedstawiono wpływ kształtu profilu pomiędzy powierzchnią natarcia a powierzchnią podstawową (profile o kształcie: kąta prostego, zaokrąglonym, skośnym) płytki skrawającej uzyskanej metodą CVD na wartość sił skrawania. Najmniejsze siły zarejestrowano dla profilu o kształcie kąta prostego. W badaniach [16] analizowano wpływ wielkości ziaren WC w strukturze WC-Co na trwałość ostrza oraz kształt uzyskiwanych wiórów. Na podstawie wyników stwierdzono następujący trend: wzrost wielkości ziaren WC w strukturze materiału obrabianego przyczynia się do zwiększenia trwałości narzędzi skrawających. W pracy [17] opisano badania wpływu zawartości materiału wiążącego (18-27%Co) podczas procesu toczenia na zużycie narzędzi. Uzyskano największe zużycie narzędzi dla materiału o najmniejszej zawartości kobaltu, jednocześnie zauważono zależność: wzrost zawartości Co powoduje zwiększenie tendencji do powstawania narostu oraz zwiększenie adhezji pomiędzy narzędziem a materiałem obrabianym. Badania toczenia WC-Co na sucho oraz na mokro przedstawiają podobne charakterystyki chropowatości powierzchni oraz przebiegów powstających sił skrawania [18]. Dla toczenia węglików WC o zawartości 18% Co wyznaczono współczynnik tarcia pomiędzy narzędziem a materiałem obrabianym dla narzędzi z PCD i CVD jako stosunek siły stycznej do siły normalnej. W przypadku narzędzi z CVD uzyskano współczynnik równy 0,7 po 180 m obróbki, dla narzędzia z PCD podobny współczynnik wyznaczono już po 70 m obróbki [19]. W badaniach, w których wykorzystano metodę obróbki eliptyczną wibracją ultradźwiękową UEVC (ang. *The ultrasonic elliptical vibration cutting*) do toczenia WC-Co (15%Co),

największe zużycie narzędzi występowało w początkowej fazie obróbki [20]. W badaniach porównujących metodę szlifowania z procesem toczenia uzyskano porównywalne wartości chropowatości oraz przewagę toczenia ze względu na ilość usuwanego nadmiaru w jednostce czasu [21]. Badania opisujące wpływ poszczególnych parametrów skrawania ( $v_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) oraz zawartości Co podczas toczenia WC-Co (4-25% Co) narzędziami z PCD przedstawiają główny wpływ głębokości skrawania  $a_p$  na wartości powstających sił skrawania. W przypadku chropowatości największy wpływ ma prędkość skrawania  $v_c$ . Wpływ zawartości Co w materiale obrabianym potwierdza powstawanie zjawiska adhezji pomiędzy materiałem obrabianym a narzędziem, dla materiałów o dużej zawartości Co, ponieważ dla tego typu WC zarejestrowano większe siły skrawania niż dla WC o małej zawartości Co, przy jednoczesnej zależności wzrostu chropowatości powierzchni wraz z obniżającą się zawartością Co przy tych samych wartościach parametrów skrawania [22],[24].

Analizując dostępną literaturę można zauważyć brak badań opisujących wpływ promienia zaokrąglenia  $r_\epsilon$  na proces toczenia WC-Co narzędziami z ostrzami wykonanymi z polikrystalicznego diamentu PCD.

### 3. BADANIA

Plan badań wpływu trzech niezależnych czynników ( $v_c$  – prędkość skrawania,  $f$  – posuw,  $r_\epsilon$  – promień zaokrąglenia płytki skrawającej) na składowe całkowitej siły skrawania ( $F_f$  – siła posuwowa,  $F_p$  – siła odporowa,  $F_c$  – siła skrawania) podczas toczenia węglików spiekanych WC-Co narzędziami z polikrystalicznego diamentu PCD został opracowany zgodnie z wytycznymi planowania eksperymentu (DOE) według metody Taguchi'ego [27]. Badania według tej metody pozwalają na wskazanie parametrów, dla których uzyskuje się najlepsze/najgorsze wartości badanego zjawiska (najmniejsze/największe wartości sił skrawania), na podstawie tzw. współczynnika S/N (sygnału do szumu), według odpowiedniego kryterium jakościowego [23],[24],[26]. Plan badań zapisany został w formie tzw. tablicy ortogonalnej L9, która opisuje poszczególne próby badawcze dla trzech czynników przy ich trzech różnych wartościach, tzw. poziomy (tabela 1). Zakresy parametrów obróbki ( $v_c$ ,  $f$ ) wybrane zostały na podstawie rekomendowanych wartości przez producenta płytek skrawających. Wszystkie próby wykonane były przy stałej głębokości skrawania  $a_p$  równej 0,2mm. Podana wartość głębokości skrawania jest wynikiem analizy wcześniejszych badań toczenia WC-Co narzędziami z PCD ( $r_\epsilon=0,8$  mm), w których wyznaczono wpływ poszczególnych parametrów skrawania na siły skrawania i chropowatość powierzchni. Najmniejszą wartość sił skrawania zarejestrowano dla głębokości równej 0,2mm [22],[24].

Stanowisko do badań składowych całkowitej siły skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ) zbudowane było na bazie tokarki precyzyjnej, wałków WC-Co o różnej zawartości kobaltu, płytek skrawających o różnej wartości promienia  $r_\epsilon$ , siłomierza firmy Kistler (rys. 1).

Obróbce poddano wałki węglkowe o zawartości 25 i 15% kobaltu w strukturze materiału obrabianego. Właściwości materiałów obrabianych opisano w tabeli 2.

Rejestrację składowych całkowitej siły skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ) podczas procesu toczenia wykonano przy pomocy piezoelektrycznego siłomierza firmy Kistler [25], obróbkę danych wykonano z wykorzystaniem dostępnego oprogramowania DynoWare.

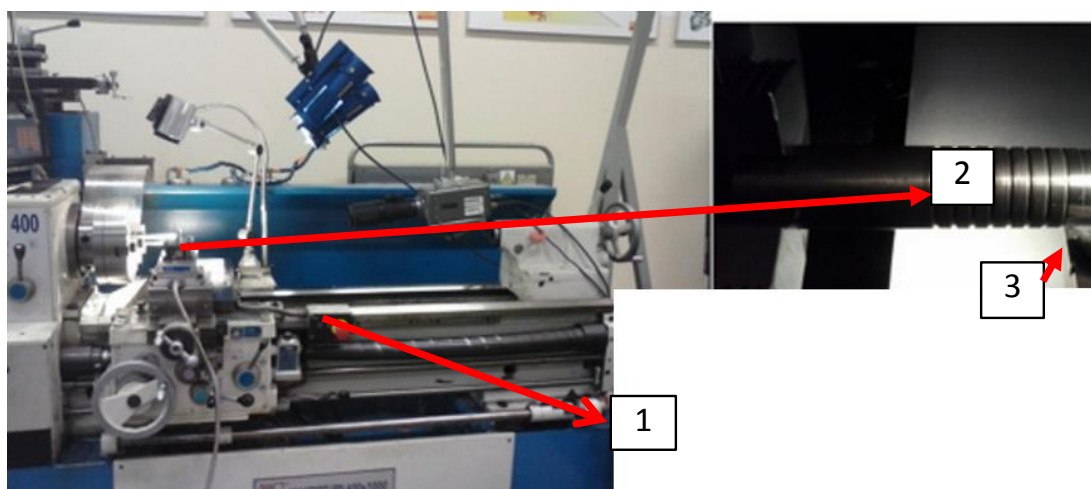
Wykorzystano płytki firmy Mitsubishi o trzech różnych promieniach zaokrąglenia  $r_\epsilon$  z ostrzami wykonanymi z polikrystalicznego diamentu typu MD220.

Rodzaje użytych płytek do badań:

- TNGA 160402, promień  $r_\epsilon=0,2\text{mm}$
- TNGA 160404, promień  $r_\epsilon=0,4\text{mm}$
- TNGA 160408, promień  $r_\epsilon=0,8\text{mm}$ .

Tabela 1. Parametry badanych czynników  
Table 1. The values of research parameters

Parametr	Jednostka	Poziom		
		1	2	3
Prędkość skrawania $v_c$	m/min	10	15	20
Posuw $f$	mm/obr	0,105	0,153	0,211
Promień zaokrąglenia $r_\epsilon$	mm	0,8	0,4	0,2



Rys. 1. Stanowisko do rejestracji składowych sił skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ): 1) siłomierz firmy Kistler, 2) wałek węglkowy WC-Co, 3) płytka z ostrzem z PCD firmy Mitsubishi  
Fig. 1. The test stand for research of cutting force components ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ): 1) Kistler dynamometer, 2) WC-Co shaft, 3) insert with PCD edge produced by Mitsubishi

Tabela 2. Właściwości materiałów obrabianych  
Table 2. The properties of workpiece materials

Nr	Skład chemiczny	Zawartość %Co	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Twardość HV10	Twardość HRA
1	25%Co 0.15%VC 74.8%WC	25	13,1	950	85,4
2	15%Co 0.15%VC 84.8%WC	15	14	1200	88,2

## 4. ANALIZA WYNIKÓW

W tabelach 3 i 4 przedstawiono wyniki zarejestrowanych wartości składowych całkowitej siły skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ) dla wałka WC-Co nr 1 oraz wałka nr 2. Przedstawiono również obliczone wartości współczynników S/N dla poszczególnych wartości sił skrawania według kryterium „im większy-tym lepszy”, w oparciu o następujący wzór [26],[28]:

$$S/N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

gdzie: S/N – współczynnik sygnału do szumu

$i = 1$  do  $n$ ,

$y_i$  – wartości składowej siły skrawania dla badanej próby badawczej.

Analizując wartości współczynników S/N dla poszczególnych składowych sił stwierdzono możliwość wskazania parametrów ( $v_c$ ,  $f$ ,  $r_\epsilon$ ), dla których zarejestrowano najmniejsze wartości składowych całkowitej siły skrawania podczas toczenia węglików spiekanych WC-Co o różnej zawartości Co. Na rysunku 2 przedstawiono przykład zarejestrowanej charakterystyki składowych całkowitej siły skrawania w czasie toczenia wałka nr 1 (25% Co), przy następujących parametrach:  $v_c=10\text{m/min}$ ,  $f=0.153\text{mm/obr}$ ,  $a_p=0,2\text{mm}$ ,  $r_\epsilon=0,2\text{mm}$ .

Tabela 3. Wartości zarejestrowanych składowych całkowitej siły skrawania podczas toczenia WC-Co narzędziami z PCD dla wała nr 1

Table 3. The recorded values of cutting force components during sintered carbides turning by PCD inserts for 1st WC-Co shaft

Nr	$v_c$	$f$	$r_\epsilon$	$F_f$	S/N	$F_p$	S/N	$F_c$	S/N
1	20	0,211	0,2	66,1	-36,404	1,28	-2,14	21,34	-26,58
2	10	0,153	0,2	94,79	-39,5353	6,63	-16,43	44,25	-32,91
3	15	0,105	0,2	113,53	-41,1022	7,61	-17,62	63,47	-36,05
4	15	0,153	0,4	83,2	-38,4025	3,82	-11,64	30,95	-29,81
5	20	0,105	0,4	117,1	-41,3711	9,77	-19,79	52,08	-34,33
6	10	0,211	0,4	153,54	-43,7244	15,97	-24,06	56,17	-34,99
7	10	0,105	0,8	77,7	-37,8084	7,34	-17,31	20,76	-26,34
8	15	0,211	0,8	139,6	-42,8977	13,55	-22,63	37,63	-31,51
9	20	0,153	0,8	166,9	-44,4491	19,6	-25,84	47,83	-33,59

Na podstawie wartości współczynnika S/N dla wałka nr 1, najmniejsze siły  $F_f$  i  $F_p$  zarejestrowano dla następujących parametrów (tabela 3):

- $v_c=20\text{m/min}$
- $f=0,211\text{mm/obr}$
- $r_\epsilon=0,2\text{mm}$

W przypadku składowej siły  $F_c$  najmniejsze wartości zarejestrowano dla (tabela 3):

- $v_c=10\text{m/min}$
- $f=0,105\text{mm/obr}$
- $r_\epsilon=0,8\text{mm}$

Tabela 4. Wartości zarejestrowanych składowych całkowitej siły skrawania podczas toczenia WC-Co narzędziami z PCD dla wałka nr 2

Table 4. The recorded values of cutting force components during sintered carbides turning by PCD inserts for 2nd WC-Co shaft

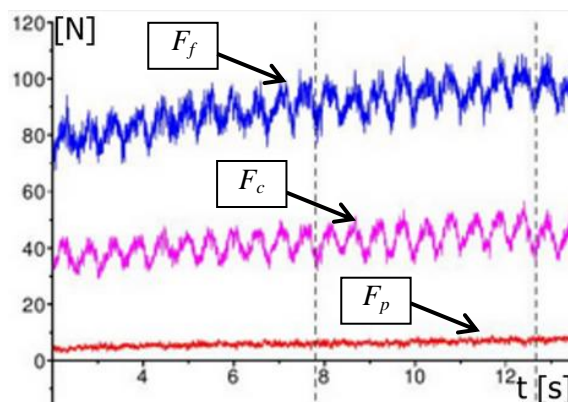
Nr	$v_c$	$f$	$r_\epsilon$	$F_f$	S/N	$F_p$	S/N	$F_c$	S/N
1	20	0,211	0,2	85,51	-38,64	1,61	-4,136	37,22	-31,41
2	10	0,153	0,2	168,17	-44,51	18,54	-25,36	85,49	-38,63
3	15	0,105	0,2	225,67	-47,06	29,45	-29,38	114,13	-41,14
4	15	0,153	0,4	83,46	-38,42	3,69	-11,34	31,61	-29,99
5	20	0,105	0,4	115,63	-41,26	10,09	-20,07	48,85	-33,77
6	10	0,211	0,4	148	-43,40	17,35	-24,78	48,04	-33,63
7	10	0,105	0,8	74,74	-37,47	7,9	-17,95	17,55	-24,88
8	15	0,211	0,8	113,19	-41,07	13,84	-22,82	21,78	-26,76
9	20	0,153	0,8	140,21	-42,93	19,24	-25,68	31,47	-29,95

Najmniejszą siłę  $F_p$  według kryterium „im większy-tym lepszy” dla wałka nr 2 uzyskano dla (tabela 4):

- $v_c=10\text{m/min}$
- $f=0,105\text{mm/obr}$
- $r_\epsilon=0,8\text{mm}$

Najmniejsze siły  $F_f$  i  $F_c$  dla wałka nr 2 zarejestrowano dla (tabela 4):

- $v_c=20\text{m/min}$
- $f=0,211\text{mm/obr}$
- $r_\epsilon=0,2\text{mm}$



Rys. 2. Charakterystyka składowych całkowitej siły skrawania,  $v_c=10\text{m/min}$ ,  $f=0,153\text{mm/obr}$ ,  $a_p=0,2\text{mm}$ ,  $r_\epsilon=0,2\text{mm}$ , wałek nr 1 (25% Co),  $F_f$  – siła promieniowa,  $F_p$  – siła odporowa,  $F_c$  – siła skrawania  
 Fig. 2. The characteristic of cutting force components,  $v_c=10\text{m/min}$ ,  $f=0,153\text{mm/rev}$ ,  $a_p=0,2\text{mm}$ ,  $r_\epsilon=0,2\text{mm}$ , 1st shaft (25%Co),  $F_f$  – the feed force,  $F_p$  – the passive force,  $F_c$  – the main cutting force

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że jest możliwość wyznaczenia odpowiedniej kolejności wpływu poszczególnych czynników na badane zjawisko. Dla poszczególnych wałków analizę wpływu czynników przeprowadzono dla składowej posuwowej siły  $F_f$ , ponieważ dla tej składowej zarejestrowano największe wartości w porównaniu do pozostałych składowych całkowitej siły skrawania ( $F_p$ ,  $F_c$ ). W tabeli 5

przedstawiono wyniki analizy kolejności wpływu parametrów dla wałka nr 1. W tabeli 6 przedstawiono analizę dla wałka nr 2.

Tabela 5. Analiza kolejności wpływu czynników na siłę skrawania  $F_f$  dla wałka WC-Co nr 1

Table 5. The analysis of factors order influence on the cutting force  $F_f$  for 1st WC-Co shaft

Poziom	$F=f(v_c)$	Poziom	$F=f(f)$	Poziom	$F=f(r_\epsilon)$
1	108,6767	1	102,7767	1	128,0667
2	112,11	2	114,9633	2	117,9467
3	116,7	3	119,7467	3	91,47333
Różnica	8,023333		16,97		36,59333
Kolejność	III		II		I

Tabela 6. Analiza kolejności wpływu czynników na siłę skrawania  $F_f$  dla wałka WC-Co nr 2

Table 6. The analysis of factors order influence on the cutting force  $F_f$  for 2nd WC-Co shaft

Poziom	$F=f(v_c)$	Poziom	$F=f(f)$	Poziom	$F=f(r_\epsilon)$
1	130,3033	1	138,68	1	109,38
2	140,7733	2	130,6133	2	115,6967
3	113,7833	3	115,5667	3	159,7833
Różnica	26,99		23,11333		50,40333
Kolejność	II		III		I

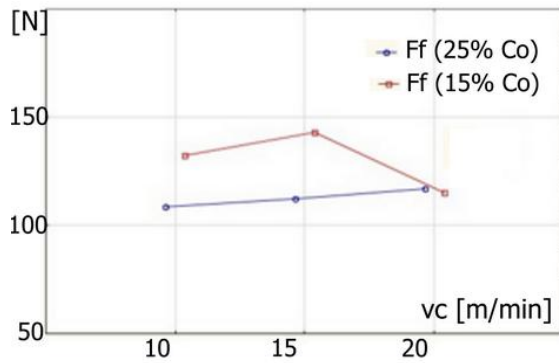
Analizując wyniki z tabel 5 i 6 widać największy wpływ promienia zaokrąglenia  $r_\epsilon$  na wartość składowej  $F_f$  dla obydwu wałków WC-Co, odwrotne kolejności wpływu uzyskano dla prędkości skrawania  $v_c$  i posuw  $f$ .

Rysunki 3-5 przedstawiają średni wpływ poszczególnych parametrów na składową siłę  $F_f$  dla wałków nr 1 i 2.

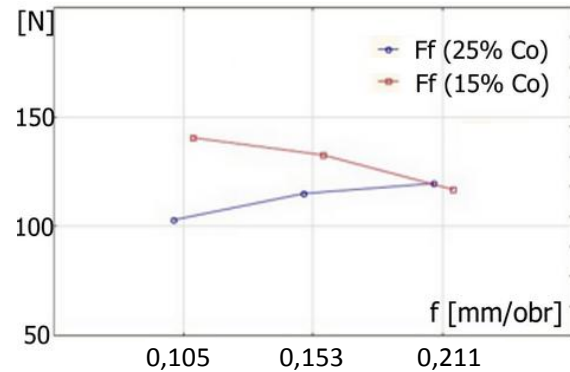
Analizując średni efekt  $v_c$  na siłę  $F_f$  w przypadku wałka nr 1 widoczna jest zależność, wzrostu siły posuwowej od wartości prędkości skrawania. W przypadku wałka nr 2 brak jednoznacznego trendu, ponieważ przy wzroście prędkości skrawania początkowo następuje wzrost wartości sił skrawania a następnie zmniejszanie ich wartości. W przypadku posuwu  $f$  widać dwie różne charakterystyki siły  $F_f$ . Dla wałka nr 1 wzrost posuwu powoduje wzrost siły  $F_f$ , dla wałka nr 2 występuje przeciwny przebieg charakterystyki. W przypadku analizy promienia zaokrąglenia  $r_\epsilon$  uzyskano również dwie odmienne charakterystyki średniego efektu dla poszczególnych materiałów obrabianych. Tocząc z mniejszymi promieniami  $r_\epsilon$  wałek nr 1 zarejestrowano zmniejszające się wartości sił skrawania  $F_f$  a w przypadku wałka nr 2 występował wzrost wartości sił skrawania. Różne przebiegi charakterystyk średnich efektów  $v_c$ ,  $f$ ,  $r_\epsilon$  dla siły posuwowej  $F_f$  są wynikiem różnej zawartości kobaltu w poszczególnych wałkach (25 i 15%).

Na podstawie rysunku 5 można przedstawić metodykę doboru odpowiedniej płytki skrawającej podczas toczenia WC-Co narzędziami z ostrzami z PCD. Przypadek pierwszej optymalizacji, polega na wyborze uniwersalnego narzędzia dla różnych typów węglików WC-Co. Najlepszym narzędziem jest płytka z promieniem  $r_\epsilon$  równym 0,4 mm, ponieważ dla obydwu wałków uzyskano przybliżone wartości sił skrawania. Gdy chcielibyśmy wybrać odpowiednie narzędzie dla danego typu węglika, w takiej sytuacji dla poszczególnych

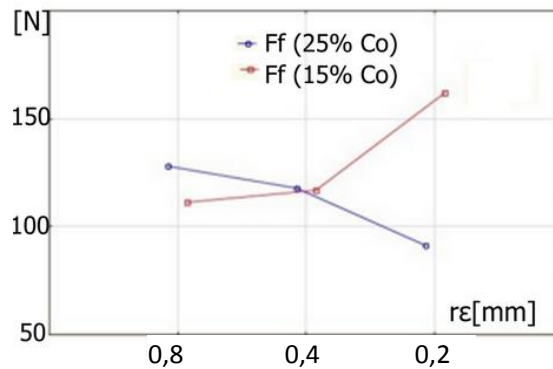
materiałów wskazano by inne typy narzędzi. W przypadku węgla o zawartości 25% Co najlepszym narzędziem jest płytka o promieniu  $r_e$  równym 0,2mm. Dla węgla o zawartości 15% najlepszym narzędziem jest płytka o promieniu  $r_e$  równym 0,8 mm. Na podstawie tych wyników widać trudność doboru odpowiedniej płytki skrawającej do obróbki różnych typów węglików spiekanych WC-Co. Konsekwencją doboru nieodpowiedniego narzędzia może być szybkie zużycie ostrza ze względu na powstawanie sił skrawania o znacznych wartościach.



Rys. 3. Średni efekt  $v_c$  na siłę  $F_f$   
Fig. 3. The mean  $v_c$  effect on the  $F_f$  force



Rys. 4. Średni efekt  $f$  na siłę  $F_f$   
Fig. 4. The mean  $f$  effect on the  $F_f$  force



Rys. 5. Średni efekt  $r_e$  na siłę  $F_f$   
Fig. 5. The mean  $r_e$  effect on the  $F_f$  force

Analizę wariancji ANOVA zastosowano do wskazania istotności poszczególnych czynników ( $v_c$ ,  $f$ ,  $r_e$ ) na składowe całkowitej siły skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ) podczas toczenia WC-Co narzędziami z PCD przy stałej głębokości skrawania  $a_p$  równej 0,2mm. W tabelach 7-8 przedstawiono analizy wariancji ANOVA siły  $F_f$  dla wałka nr 1 i 2, w tabelach 9-10 dla siły  $F_p$  a w tabelach 11-12 dla siły  $F_c$ .

Dzięki wykorzystaniu analizy wariancji ANOVA zauważalny jest wpływ innego czynnika, który nie był brany pod uwagę w czasie planowania badań. Poszczególne próby badawcze wykonywane były dla stałej głębokości skrawania  $a_p$  równej 0,2mm, dla której zarejestrowano najmniejsze siły skrawania i wyznaczono największy wpływ na powstające siły skrawania w przeprowadzonych wcześniej badaniach procesu toczenia WC-Co

narzędziami z PCD [22],[24]. Duża wartość wariancji błędu  $MS_e$  wskazuje, że czynnik niebrany pod uwagę ma istotny wpływ na wartość sił skrawania podczas obróbki WC-Co. Na podstawie wyliczonych wartości wariancji błędów  $MS_e$  dla poszczególnych wałków oraz wyników wcześniejszych badań, można wnioskować, że największy wpływ na wartość powstających sił skrawania podczas toczenia WC-Co ma głębokość skrawania  $a_p$ , w mniejszym stopniu promień zaokrąglenia płytki  $r_\epsilon$ . Ze względu na duże wartości  $MS_e$  w kolejnych badaniach procesu toczenia WC-Co o różnej zawartości Co narzędziami z PCD sprawdzony zostanie jednoczesny wpływ dla wszystkich czterech parametrów ( $v_c, f, a_p, r_\epsilon$ ).

Tabela 7. Analiza wariancji ANOVA siły  $F_f$  dla wałka nr 1

Table 7. ANOVA analysis of  $F_f$  force for 1st shaft

Efekt	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
$v_c$	97,2	2	48,61	0,001204	0,998797
$f$	459,4	2	229,69	0,005688	0,994338
$r_\epsilon$	2142,3	2	1071,16	0,026528	0,974046
Błąd	121134,7	3	40378,24		

Tabela 8. Analiza wariancji ANOVA siły  $F_f$  dla wałka nr 2

Table 8. ANOVA analysis of  $F_f$  force for 2nd shaft

Efekt	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
$v_c$	1182,6	2	591,32	0,010730	0,989365
$f$	868,8	2	434,38	0,007882	0,992169
$r_\epsilon$	4642,2	2	2321,11	0,042119	0,959312
Błąd	165323,9	3	55107,98		

Tabela 9. Analiza wariancji ANOVA siły  $F_p$  dla wałka nr 1

Table 9. ANOVA analysis of  $F_p$  force for 1st shaft

Efekt	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
$v_c$	6,3616	2	3,1808	0,009816	0,990263
$f$	7,3264	2	3,6632	0,011305	0,988800
$r_\epsilon$	104,4542	2	52,2271	0,161180	0,858049
Błąd	972,0895	3	324,0298		

Tabela 10. Analiza wariancji ANOVA siły  $F_p$  dla wałka nr 2

Table 10. ANOVA analysis of  $F_p$  force for 2nd shaft

Efekt	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
$v_c$	48,064	2	24,0322	0,034119	0,966826
$f$	36,127	2	18,0633	0,025645	0,974892
$r_\epsilon$	56,941	2	28,4704	0,040420	0,960900
Błąd	2113,074	3	704,3581		

Tabela 11. Analiza wariancji ANOVA siły  $F_c$  dla wałka nr 1

Table 11. ANOVA analysis of  $F_c$  force for 1st shaft

Efekt	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
$v_c$	26,09	2	13,045	0,002287	0,997717
$f$	76,31	2	38,154	0,006690	0,993347
$r_\epsilon$	190,24	2	95,120	0,016679	0,983550
Błąd	17109,26	3	5703,087		

Tabela 12. Analiza wariancji ANOVA siły  $F_c$  dla wałka nr 2  
 Table 12. ANOVA analysis of  $F_c$  force for 2nd shaft

Efekt	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
$v_c$	432,58	2	216,289	0,028077	0,972566
$f$	905,22	2	452,609	0,058754	0,943997
$r_\varepsilon$	4737,35	2	2368,674	0,307481	0,756008
Błąd	23110,47	3	7703,490		

## 5. WNIOSKI

W pracy przedstawione zostały wyniki badań toczenia węglików spiekanych WC-Co płytkami z ostrzami wykonanymi z polikrystalicznego diamentu PCD typu MD220 o trzech różnych promieniach zaokrąglenia  $r_\varepsilon$  (0,2; 0,4; 0,8)mm. W badaniach główną uwagę skupiono na składowych całkowitej siły skrawania podczas procesu obróbki dla dwóch wałków węglkowych o różnej zawartości Co (25; 15)%. Analizowane wartości składowych całkowitej siły skrawania ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ) zarejestrowane zostały przy pomocy piezoelektrycznego siłomierza. Plan badań wykonany został według metody Taguchi w oparciu o tablicę ortogonalną L9, która opisuje badania dla trzech niezależnych czynników przy ich trzech różnych wartościach. W przedstawionych badaniach, czynnikami niezależnymi wpływającymi na siły skrawania były:  $v_c$  – prędkość skrawania,  $f$  – posuw i  $r_\varepsilon$  – promień zaokrąglenia płytki skrawającej. Dzięki wykorzystaniu tablicy ortogonalnej L9, była możliwość wyznaczenia kolejności wpływu poszczególnych parametrów na proces obróbki. Największy wpływ na wartość powstających sił skrawania ma  $r_\varepsilon$  dla obydwu typów obrabianych wałków. Kolejność wpływu  $v_c$  i  $f$  dla poszczególnych wałków jest odwrotna. Dla wałka o zawartości 25% Co kolejnym czynnikiem po  $r_\varepsilon$  jest  $f$  a następnie  $v_c$ . W przypadku wałka o zawartości 15% Co odpowiednia kolejność wpływu jest następująca  $r_\varepsilon$ ,  $v_c$  i  $f$ . Analizując wpływ zawartości Co w materiale obrabianym na podstawie średniej wartości sił skrawania dla poszczególnych płytek o różnych promieniach zaokrąglenia  $r_\varepsilon$ , można przeprowadzić odpowiedni dobór płytki dla typowych węglików spiekanych WC-Co. Najbardziej uniwersalną płytką do toczenia WC-Co o różnych zawartościach Co jest płytka o promieniu  $r_\varepsilon$  równym 0,4mm. W sytuacji, gdy wybieramy narzędzie do konkretnego typu węglików spiekanych wtedy najlepszą płytką skrawającą WC-Co (25%Co) jest płytka o promieniu  $r_\varepsilon = 0,2$ mm, a dla WC-Co (15%Co) jest płytka o promieniu  $r_\varepsilon = 0,8$ mm.

Na podstawie analizy wariancji ANOVA (duża wartość błędu wariancji  $MS_\varepsilon$ ), widoczny jest wpływ innych czynników, które nie były brane pod uwagę w procesie planowania badań, np. głębokość skrawania  $a_p$ .

## LITERATURA

- [1] COPPINI N.L., DINIZ A.E., BONANDI M., DE SOUZA E.M., BAPTISTA E.A., 2013, *Hard Turning of Sintered Cemented Carbide Parts: A Shop Floor Experience*, Procedia CIRP, 8, 368-373.

- [2] VENTURA C.E.H., KOHLER J., DENKENA B., 2013, *Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 6, 246-253.
- [3] GRZESIK W., 2001, *Kierunki rozwoju obróbki skrawaniem*, Inżynieria Maszyn, 6/2, 24-40.
- [4] FRATILA D., 2013, *Sustainable Manufacturing Through Environmentally-Friendly Machining, Green Manufacturing Process and Systems Materials Forming Machining and Tribology*, Springer Berlin Heidelberg, 1-21.
- [5] LOPEZ DE LACALLE L.N., LAMIKIZ A., FERNANDEZ DE LARRINOVA J., 2011, *Machining of Hard Materials*, Springer London, New York, 33-85.
- [6] NEWMAN S.T., NASSEHI A., IMANI-ASRAI R., DHOKIA V., 2012, *Energy efficient process planning for CNC machining*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5/2, 127-136.
- [7] KRAJNIK P., KOPAC J., 2004, *Modern machining of die and mold tools*, Journal of Materials Processing Technology, 157/157, 543-552.
- [8] JACKSON M.J., AHMED W., 2009, *Machining with Nanomaterials*, Springer, New York, 164-198.
- [9] NIŻANKOWSKI CZ., MATRAS A., 2010, *Wpływ gatunku ścierniwa na dokładność wałków stalowych po szlifowaniu ściernicowym*, Inżynieria Maszyn, 15/3, 55-68.
- [10] DOBRZAŃSKI L.A., 2002, *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [11] DĄBROWSKI L., ŚWIERCH R., 2011, *Struktura metalograficzna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej*, Inżynieria Maszyn, 16/3, 16-23.
- [12] JAWORSKA L., 2007, *Diament, otrzymywanie i zastosowanie w obróbce skrawaniem*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [13] BELMONTE M., FERRO P., FERNANDES A.J.S., COSTA F.M., SACRAMENTO J., SILVA R.F., 2003, *Wear resistant CVD diamond tools for turning for sintered hardmetals*, Diamond and Related Materials, 12, 738-743.
- [14] BELMONTE M., OLIVERIA F.J., SACRAMENTO J., FERNANDES A.J.S., SILVA R.F., 2004, *Cutting forces evaluation with tool wear in sintered hardmetal turning with CVD diamond*, Diamond and Related Materials, 13, 843-847.
- [15] ALMEIDA F.A., OLIVEIRA F.J., SOUSA M., FERNANDES A.J.S., SACRAMENTO J., SILVA R.F., 2005, *Machining hardmetal with CVD diamond direct coated ceramic tools: effect of tool edge geometry*, Diamond and Related Materials, 14, 651-656.
- [16] SUNG-JUNG H., 2004, *Micro Cutting of Tungsten Carbides with SEM Direct Observation Method*, KSME International Journal, 18/5, 770-779.
- [17] ALMEIDA F.A., FERNANDES A.J.S., SILVA R.F., OLIVEIRA F.J., 2008, *Re-sharpenable thick CVD diamond-coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tools for hardmetal turning*, Surface and Coatings Technology, 201, 1383-1390.
- [18] SUNG-JUNG H., 2009, *Environmentally conscious hard turning of cemented carbide materials on the basis of micro-cutting in SEM (2<sup>nd</sup> report): stress turning with three kinds of cutting tools*, Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 1959-1966.
- [19] ALMEIDA F.A., FERNANDES A.J.S., OLIVEIRA F.J., SILVA R.F., 2009, *Semi-orthogonal turning of hardmetal with CVD diamond and PCD inserts at different cutting angles*, Vacuum, 83, 1218-1223.
- [20] NATH CH., RAHMAN M., NEO K.S., 2009, *Machinability study of tungsten carbide using PCD tools under ultrasonic elliptical vibration cutting*, International Journal Machine Tools and Manufacture, 49, 1089-1095.
- [21] ZHONG Z.W., PENG Z.F., LIU N., 2007, *Surface roughness characterization of thermally sprayed and precision machined WC-Co and Alloy-625 coating*, Materials Characterization, 58, 997-1005.
- [22] ZĘBALA W., KOWALCZYK R., 2014, *Cutting Data Influence on Cutting Forces and Surface Finish During Sintered Carbide Turning*, Key Engineering Materials, 581, 148-153.
- [23] ZĘBALA W., KOWALCZYK R., 2013, *Badania procesu toczenia węglików spiekanych narzędziami z PCD*, Innovative Manufacturing Technology 2013 ed. Magdalena Szutkowska, Kraków, 315-326.
- [24] ZĘBALA W., KOWALCZYK R., 2013, *Cutting forces and surface roughness measurements during turning of sintered carbides parts*, Development in Machining Technology ed. Wojciech Zębała and Ildiko Mankova, 3, 105-119.
- [25] ZĘBALA W., SŁODKI B., STRUZIKIEWICZ G., 2013, *Productivity and reliability improvement in turning Inconel 718 alloy – case study. Poprawa produktywności i niezawodności toczenia stopu Inconel 718 – studium przypadku*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 15, (4), 421-426.
- [26] MUNTEANU A.V., FETECANU C., PALADE L., VLAD D., 2010, *Application of Taguchi Method for cutting force in turning high density polyethylene*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, 8/3.
- [27] YADOV U.K., NARANG D., ATTRI P.S., 2012, *Experimental Investigation and Optimization of Machining parameters for surface roughness in CNC turning by Taguchi method*, International Journal of Engineering Research and Applications, 2/4, 2060-2065.
- [28] WĄTROBA J., 2012, *Wprowadzenie do analizy wariancji*, StatSoft.

## ANALYSIS OF CUTTING FORCES DURING SINTERED CARBIDES TURNING BY TOOLS WITH PCD EDGES

The paper presents results of cutting force components research during sintered carbides turning (25 and 15 %Co) by tools with edge made of polycrystalline diamond PCD. The inserts with three different nose radii  $r_e$  were used to machining. The main focus of the investigation are the  $r_e$ ,  $v_c$ ,  $f$  and Co content influence at the constant depth of cut equals 0.2 mm on the cutting force components ( $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ). The plan of research was made according to the Taguchi method. Based on the analysis of the mean factor effects on the cutting force components an indication the greatest influence for the nose radius  $r_e$  from the research factors was possible. During sintered carbides turning, the highest values of the cutting forces were recorded for the feed force  $F_f$ , smaller for the main cutting force  $F_c$  and the lowest for the passive force  $F_p$  due to the high hardness of work piece materials. For particular components of the cutting force also ANOVA variance analyses were performed. The analyses allowed to notice another factor influence on the cutting forces regarding the big value of the error variance  $MS_e$ .