



## Monitorowanie sił skrawania powierzchni płaskich w procesie szlifowania stopu tytanu TIGR5

Monitoring of the cutting forces in flat surface grinding process of Titanium Alloy TIGR5

Anna Grdulska  
Radosław Rosik\*

W artykule przedstawiono fragment badań dotyczących wpływu zmiennych parametrów:  $v_s$  i  $v_w$  na przebieg sił skrawania oraz parametry chropowatości powierzchni  $Ra$  i  $Rz$  przedmiotu wykonanego ze stopu tytanu TIGR5. Wprowadzenie metod kontrolno-pomiarowych umożliwia monitorowanie wybranych wielkości fizycznych, których skala jednoznacznie określiła przebieg procesu produkcyjnego. Na podstawie analizy wartości składowych sił występujących w procesie szlifowania oraz parametrów chropowatości powierzchni można określić stan warstwy wierzchniej (WW), a tym samym dobrać tak parametry obróbki, by powierzchnia elementów szlifowanych spełniała wymagania eksploatacyjne.

**SŁOWA KLUCZOWE:** Szlifowanie, siły szlifowania, chropowatość powierzchni, materiał ścierny, stopy tytanu

*The paper presents the part of studies on the effects of variable parameters:  $v_s$  and  $v_w$ , on the course of forces and surface roughness parameters  $Ra$  and  $Rz$  of workpiece made of titanium alloy TIGR5. Introducing methods of measurement and control, enable to monitor selected physical quantities, which range unequivocally specify the course of the process. On the basis of the measurements of the grinding forces components and surface roughness parameters may be determined the state of surface layer, and thereby select such processing parameters that the surface of grinded elements fulfilled operational requirements.*

**KEYWORDS:** Grinding, grinding forces, surface roughness, abrasive tool, titanium alloys

Obróbka ścierna jest najczęściej stosowaną metodą obróbki wykończeniowej, podczas której kształtowane są pa-

rametry takie jak dokładność wymiarowo-kształtowa oraz stan warstwy wierzchniej przedmiotu. Jakość elementów jest ściśle związana z ich późniejszymi właściwościami eksploatacyjnymi, dlatego też istotnym jest kontrolowanie przebiegu procesu obróbki ścierniej, by produkowane elementy spełniały wymogi konstrukcyjne oraz wytrzymałościowe. Z drugiej strony należy zwrócić uwagę na aspekt ekonomiczny produkcji. Produkowanie braków wiąże się z większymi kosztami, dlatego ważna jest minimalizacja ubytków produkcyjnych, uzyskiwanie odpowiednich parametrów jakościowych wytwarzanych wyrobów, by nie generować niepotrzebnych kosztów. W tym celu należy wprowadzić do procesu szlifowania metody kontrolno-pomiarowe, umożliwiające monitorowanie wybranych wielkości fizycznych, pozwalających jednoznacznie określić przebieg procesu produkcyjnego. Na podstawie pomiaru składowych sił w procesie szlifowania oraz parametrów chropowatości powierzchni można określić stan WW, a tym samym dobrać tak parametry obróbki, by powierzchnia elementów szlifowanych spełniała wymagania eksploatacyjne. W wyniku obserwacji przebiegu składowej stycznej  $F_t$  i normalnej  $F_n$  siły szlifowania można określić rzeczywistą wartość nadkładu oraz jego rozkład na powierzchni obrabianej. Analizując zmiany składowych sił skrawania można także ocenić, czy w wyniku obróbki nastąpiło nadmierne nagrzanie próbki bądź ugięcie obrabianego przedmiotu. Na wielkość składowych sił wpływają właściwości skrawne ściernicy - nadmierne zalepanie się ściernicy włórami materiału obrabianego powoduje wzrost sił skrawania, oraz pogarsza jakość powierzchni obrabianej [1]. Wartości parametrów chropowatości także obrazują, czy poprawnie dobrano warunki obróbki wybranego przedmiotu, czy podczas procesu szlifowania nastąpiło odkształcenie próbki, a także czy chropowatość powierzchni jest jednakowa na całej powierzchni obrabianej. Jeśli tak nie jest, można spróbować odpowiedzieć na pytanie, co jest tego przyczyną? W nowoczesnych metodach obróbki ścierniej [7,8] oraz metodach podawania płynów

\* dr inż. Radosław Rosik (radek.rosik@p.lodz.pl), Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Politechnika Łódzka.  
mgr inż. Anna Grdulska (anna.grdulska@p.lodz.pl), Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Politechnika Łódzka.

chłodziąco-smarujących bardzo ważną jest kontrola przebiegu wartości składowych sił szlifowania [2,4,5,6].

W niniejszym artykule przedstawiono fragment badań doświadczalnych dotyczących wpływu zmiennych parametrów: prędkości obwodowej ściernicy  $v_s$  oraz prędkości posuwu przedmiotu  $v_w$  na wielkość składowej siły stycznej  $F_t$  oraz normalnej  $F_n$  i parametry chropowatości powierzchni  $R_a$  i  $R_z$  przedmiotu wykonanego z materiału trudnoobrabialnego, stosowanego w przemyśle lotniczym, mianowicie stopu tytanu TIGR5. Dokonano analizy przebiegu składowych sił w procesie szlifowania oraz rozkładu parametrów chropowatości na powierzchni obrabianego przedmiotu.

## Warunki badań

### Warunki szlifowania

Przeprowadzone prace badawcze miały na celu określenie wpływu prędkości i posuwu na wybrane parametry opisujące stan warstwy wierzchniej (parametry chropowatości powierzchni  $R_a$ ,  $R_z$  oraz wartości sił  $F_n$  i  $F_t$ ) podczas szlifowania płaskich próbek wykonanych ze stopu tytanu TIGR5. Badania realizowano na stanowisku badawczym (Rys.1) wyposażonym w szlifierkę do płaszczyzn Jotes typu SPD-30, w której we wrzecionie zamontowano dwa rodzaje narzędzi ściernych 5TGP oraz 3XGP.



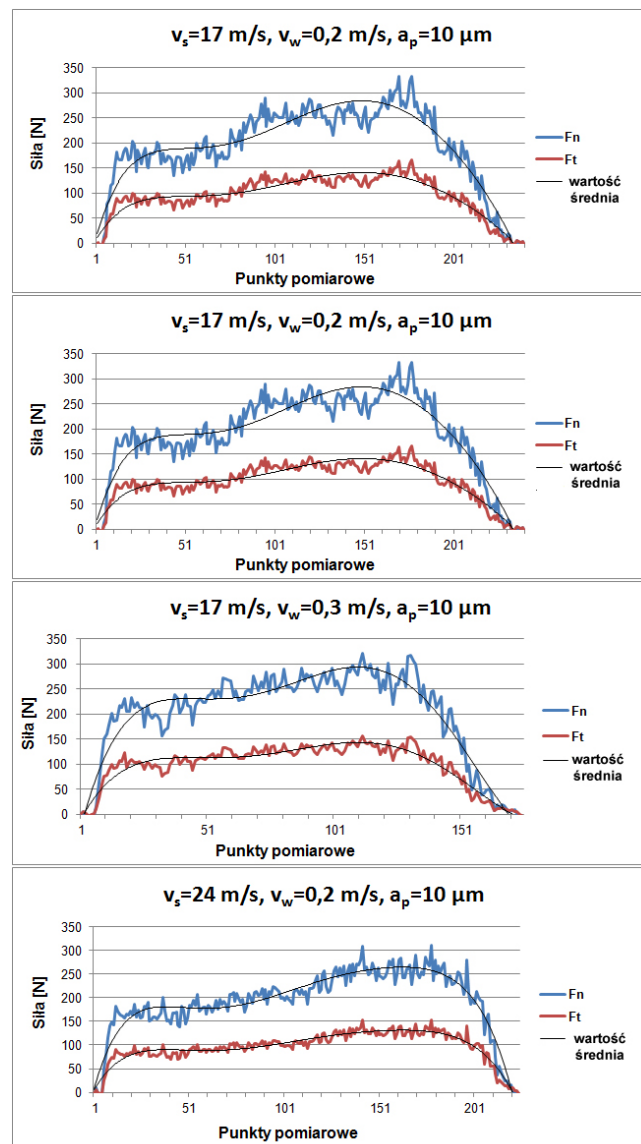
Rys. 1. Stanowisko badawcze.

Zakres badań obejmował próby współbieżnego szlifowania płaskich próbek o wymiarach 100x10x10 mm z wykorzystaniem ww. ściernic. Proces szlifowania realizowano dla trzech różnych prędkości ściernicy:  $v_s = 17$  m/s,  $v_s = 24$  m/s i  $v_s = 29$  m/s oraz trzech różnych prędkości posuwu przedmiotu  $v_w = 0,1$  m/s,  $v_w = 0,2$  m/s oraz  $v_w = 0,3$  m/s. Podczas procesu szlifowania zmieniały się także warunki chłodziąco-smarujące: szlifowanie na sucho oraz z wykorzystaniem chłodziwa ESTRAMET firmy Eni Grip, podawanego w strefę skrawania metodą zalewową. Do pomiaru składowych sił posłużyło się siłomierzem piezoelektrycznym firmy Kistler, w którym pomiar sił następuje w oparciu o zjawisko piezoelektryczne. Rejestracja wyników odbywała się z częstotliwością próbkowania 1000 Hz. Na siłomierzu zainstalowano uchwyt do mocowania płaskich próbek. Całość umieszczono na stole obrabiarki. Do pomiaru parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  wykorzystano przenośny profilografometr firmy Hommel model T500 (2D). Dane pomiarowe z urządzenia przesyłano za pomocą przewodu i złącza RS232 do komputera, gdzie przeprowadzono dalszą analizę uzyskanych wyników pomiarów.

## Wyniki badań

### Wyniki wartości sił

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych sprawdzano, jak prędkość szlifowania  $v_s$  oraz prędkość posuwu przedmiotu  $v_w$  wpływają na wartości składowych sił skrawania: stycznej  $F_t$  i normalnej  $F_n$ . Na rys.2 przedstawiono zarejestrowane przebiegi składowych siły uzyskane podczas szlifowania przedmiotów za pomocą ściernicy 3XGP z udziałem płynu chłodziąco-smarującego Estramet, podawanego metodą zalewową.



Rys. 2. Przebiegi wartości siły normalnej  $F_n$  oraz stycznej  $F_t$  w zależności od prędkości szlifowania i prędkości posuwu przedmiotu dla ściernicy 3XGP.

Analizując przebiegi sił na rys. 2 można zaobserwować, że zarówno prędkość skrawania  $v_s$ , jak i prędkość posuwu przedmiotu  $v_w$  nieznacznie wpływają na przebiegi składowych sił w procesie szlifowania. Podczas szlifowania stopu tytanu TIGR5 z prędkością  $v_s = 17$  m/s, czy  $v_s = 24$  m/s zarejestrowano podobne przebiegi składowych sił. W każdym przypadku następuje nierównomierne usuwanie nadkładu na długości szlifowanej próbki, wartości składowych sił są mało powtarzalne, a linia trendu odbiega od linii prostej. Podobnie wpływa prędkość posuwu przedmiotu na przebieg składowej siły stycznej  $F_t$  i normalnej  $F_n$ . Powyższe obserwacje wskazują, że ściernica 3XGP jest narzędziem, którego nie należy używać do obróbki materiałów trudno-

skrawalnych, jakimi są stopy tytanu. W trakcie procesu szlifowania generowane są wysokie temperatury w strefie styku: przedmiot obrabiany-ściernica, duży strumień energii wnika w głąb warstwy wierzchniej przez co następują zmiany strukturalne i odkształcenia materiału niezależnie od przyjętych parametrów obróbki [9]. Nawet podawanie płynu chłodząco-smarującego metodą zalewową nie powstrzymało tych niepożądanych zjawisk.

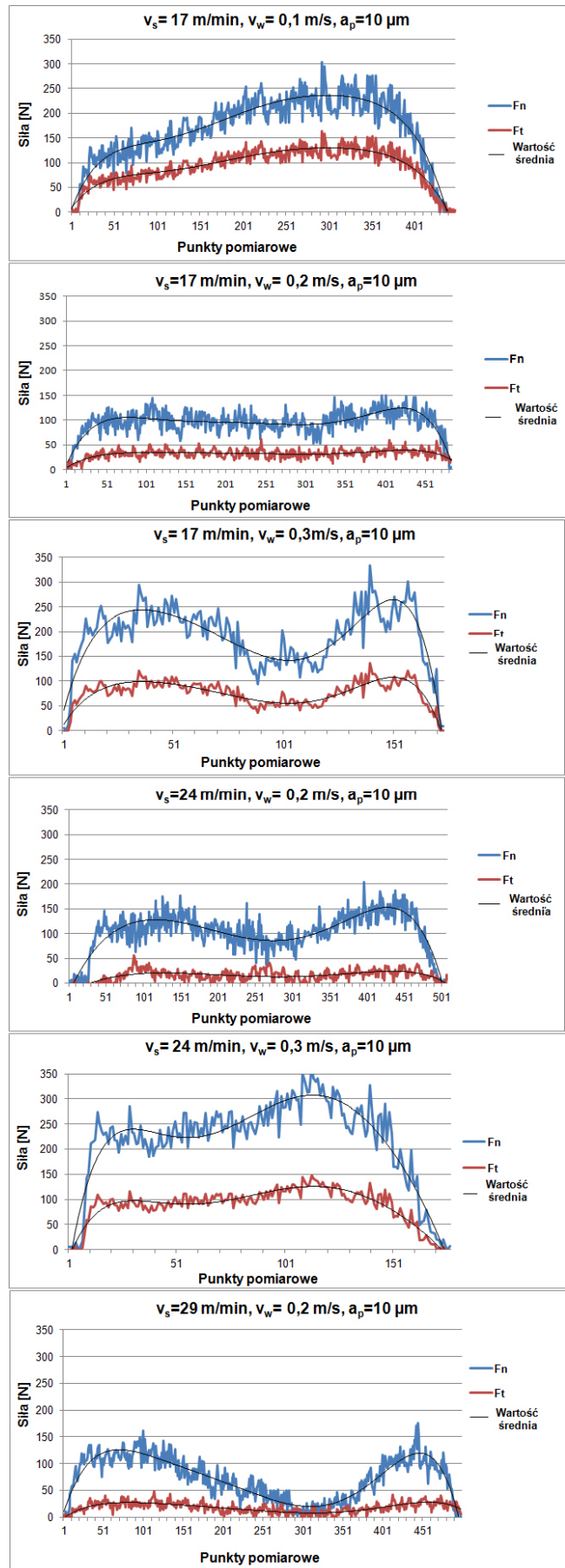
Analizując przebiegi sił na rys. 4 można zaobserwować, że zarówno prędkość skrawania  $v_s$ , jak i prędkość posuwu przedmiotu  $v_w$  znacząco wpływa na przebiegi składowych sił szlifowania  $F_n$  i  $F_t$ .

Podczas szlifowania stopu tytanu TIGR5 z prędkością  $v_s = 17$  m/s i prędkością posuwu  $v_w = 0,1$  m/s zarejestrowano wzrost wartości składowych sił w czasie. Obserwując stan warstwy wierzchniej próbki poddanej procesowi szlifowania z ww. parametrami (rys. 3) można jednoznacznie stwierdzić, że bardzo duża ilość ciepła wnikała w głąb obrabianego przedmiotu. W miejscu gdzie wartości składowych sił rosły nastąpiły zmiany strukturalne materiału, powstały przypalenia warstwy wierzchniej na większej części próbki, co świadczy o niepoprawnym doborze parametrów wejściowych procesu.



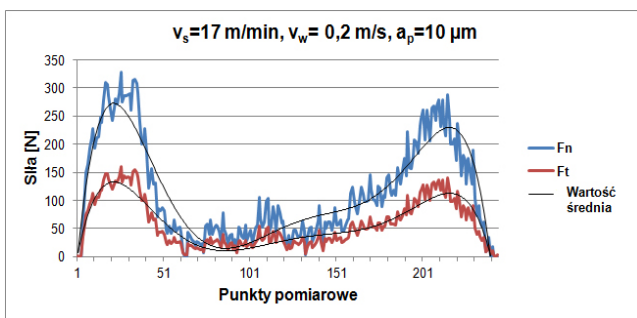
Rys. 3. Obraz przypaleń powstałych w wyniku procesu szlifowania dla parametrów:  $v_s = 17$  m/s,  $v_w = 0,1$  m/s.

Podczas szlifowania stopu tytanu TIGR5 z prędkością  $v_s = 17$  m/s i prędkością posuwu  $v_w = 0,2$  m/s zarejestrowano najmniejsze wartości składowej siły normalnej. Wartości zarejestrowanego sygnału dla każdej próby są powtarzalne, a średnia linia trendu nie posiadała znacznych odchyśleń od linii prostej. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania wzrastały wartości składowych sił szlifowania, co świadczy o wydzielaniu się dużej ilości ciepła podczas obróbki, co niekorzystnie wpływa na stan warstwy wierzchniej, powodując zmiany strukturalne, naprężenia, a także przypalenia materiału obrabianego. Podczas prób szlifowania przedstawionych na rys.3 dla prędkości skrawania 24 m/s i 29 m/s zaobserwowano nierównomierne zbieranie nadatku w obszarze szlifowanej długości. O ilości i niedokładności zebranego materiału świadczą przebiegi składowych sił szlifowania. Zarejestrowane wartości sił są mało powtarzalne, linia trendu odbiega od linii prostej.

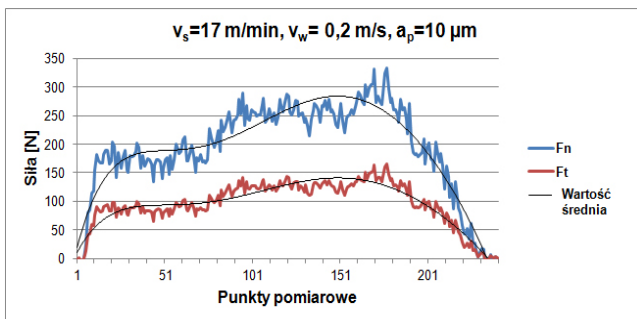


Rys. 4. Przebiegi wartości siły normalnej  $F_n$  oraz stycznej  $F_t$  w zależności od prędkości szlifowania i prędkości posuwu przedmiotu dla ściernicy 5TGP.

Podczas badań eksperymentalnych dokonano ponadto porównania przebiegu składowych sił  $F_n$  i  $F_t$  w zależności od metody chłodzenia przedmiotu. Do porównania przyjęto warunki obróbki, które w przypadku procesu szlifowania z chłodziwem podawanym metodą zalewową okazały się najkorzystniejsze. Na rys. 5 i 6 przedstawiono wykresy składowych sił szlifowania bez użycia płynu chłodząco-smarującego oraz chłodziwem podawanym metodą zalewową, stosując ciecz chłodząco-smarującą Estramet. Na podstawie zaprezentowanych wyników można jednoznacznie stwierdzić, że podczas szlifowania na sucho zarejestrowano najwyższe wartości składowych sił skrawania. Podczas obróbki bardzo duża ilość ciepła wniknęła w materiał obrabiany powodując jego odkształcenia, a także zmiany strukturalne w materiale obrabianym. Zaobserwowano ponadto nierównomierne zbieranie nadmiaru na długości szlifowanej próbki. O ilości i niedokładności zebranego materiału świadczą przebiegi składowych sił procesu szlifowania. Za każdym razem rejestrowane przebiegi składowych sił są mało powtarzalne, linia trendu odbiega od linii prostej.



Rys. 5. Przebiegi wartości składowej siły normalnej  $F_n$  oraz stycznej  $F_t$  podczas szlifowania na sucho ściernicą 3XGP.



Rys. 6. Przebiegi wartości siły normalnej  $F_n$  oraz stycznej  $F_t$  podczas szlifowania ściernicą 3XGP z wykorzystaniem płynu chłodząco-smarującego Estramet.

### ■ Chropowatość $Ra$ i $Rz$

W dalszej części badań doświadczalnych analizowano, jak zmieniają się parametry chropowatości powierzchni  $Ra$  i  $Rz$  w zależności od prędkości szlifowania oraz posuwu przedmiotu obrabianego dla dwóch różnych materiałów ściernych 5TGP oraz 3XGP. Wyniki badań przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wyniki pomiarów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$  w zależności od prędkości skrawania i posuwu przedmiotu dla dwóch materiałów ściernych 5TGP i 3XGP

5TGP	PUNKTY POMIAROWE				$v_s$	$v_w$
	1	2	3	4		
Ra	0,56	0,53	0,54	0,5	17 m/s	0,2 m/s

3XGP	PUNKTY POMIAROWE				$v_s$	$v_w$
	1	2	3	4		
Rz	4,15	3,42	3,52	3,43	17 m/s	0,3 m/s
Ra	0,55	0,51	0,67	0,6		
Rz	3,63	3,54	3,77	4,12	24 m/s	0,2 m/s
Ra	0,5	0,56	0,68	0,73		
Rz	3,15	3,73	3,94	4,4	24 m/s	0,3 m/s
Ra	0,86	0,74	0,96	1,31		
Rz	5,66	4,86	5,7	6,56		
Ra	0,53	0,53	0,84	0,85	17 m/s	0,2 m/s
Rz	3,8	3,88	4,84	5,37		
Ra	0,89	0,93	0,86	0,81	17 m/s	0,3 m/s
Rz	4,91	5,17	5,5	5,09		
Ra	0,83	1,07	1,28	1,43	24 m/s	0,2 m/s
Rz	5,13	6,52	7,74	8,32		
Ra	0,66	0,61	0,99	0,92	24 m/s	0,3 m/s
Rz	4,08	4,1	5,77	6,03		

Na podstawie przeprowadzonych badań dla ściernicy 5TGP wraz ze wzrostem prędkości skrawania  $v_s$ , jak również wraz ze wzrostem prędkości posuwu przedmiotu  $v_w$ , zaobserwowano zwiększenie wartości parametrów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$ . Najkorzystniejsze wartości parametrów chropowatości zarejestrowano podczas prób szlifowania z prędkością  $v_s = 17$  m/s oraz prędkością posuwu przedmiotu  $v_w = 0,2$  m/s. Wartości parametrów chropowatości  $Ra$  oraz  $Rz$  otrzymano na jednym poziomie. Jest to potwierdzenie, że proces szlifowania na całej długości próbki był równomierny. Analizując dane dotyczące wartości parametrów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$  podczas szlifowania z wykorzystaniem ściernicy 3XGP zanotowano wyższe wartości ww. parametrów w porównaniu do danych dotyczących ściernicy 5TGP. Najgorszą chropowatość powierzchni uzyskano w wyniku szlifowania z prędkością  $v_s = 24$  m/s i prędkością posuwu przedmiotu  $v_w = 0,3$  m/s. Mierzone parametry chropowatości są potwierdzeniem korzystnych warunków podczas szlifowania stopu tytanu TIGR5, co przedstawiają zarejestrowane przebiegi składowych sił.

W kolejnym etapie badań doświadczalnych dokonano porównania wartości parametrów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$  w zależności od zastosowanego płynu chłodząco-smarującego. Dla najkorzystniejszych nastawczych parametrów szlifowania ( $v_s = 17$  m/s,  $v_w = 0,2$  m/s,  $a_p = 10$   $\mu$ m) sprawdzono jak zmienia się chropowatość powierzchni przy szlifowaniu bez udziału płynu chłodząco-smarującego, czyli obróbka na sucho oraz z zastosowaniem cieczy syntetycznej Estramet, podawanej w strefę obróbki metodą zalewo-

wą. Wyniki wartości chropowatości parametru  $Ra$  i  $Rz$  przedstawiono w tab.2.

Tab. 2. Wyniki pomiarów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$  w zależności od zastosowanej cieczy chłodząco-smarującej

PRĘDKOŚĆ ŚCIERNICY	PRĘDKOŚĆ POSUWU PRZEDMIOTU		GŁĘBOKOŚĆ SZLI-FOWANIA		
17 m/s	0,2 m/s		10 $\mu$ m		
3XGP	PUNKTY POMIAROWE				CHŁO-DZIWO
	1	2	3	4	
$Ra$	0,53	0,53	0,53	0,5	ESTRA-MET
$Rz$	3,8	3,88	3,5	3,37	
$Ra$	0,51	0,76	0,84	1,29	SUCHO
$Rz$	4,36	5,55	5,26	7,66	

Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, że podczas szlifowania z chłodziwem podawanym metodą zalewową parametry chropowatości powierzchni  $Ra$  i  $Rz$  były powtarzalne. Jest to potwierdzenie, że proces szlifowania na całej długości próbki był równomierny. Natomiast podczas szlifowania na sucho wraz z nagrzewaniem się próbki w wyniku procesu nastąpił wzrost wartości składowych sił, a tym samym zwiększyły się parametry chropowatości  $Ra$  i  $Rz$ . Mają tam miejsce znaczne odkształcenia cieplne próbki, co przełożyło się na duże rozbieżności w wynikach pomiaru chropowatości.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono przebiegi składowych sił w procesie szlifowania  $F_n$  i  $F_t$  oraz wartości parametrów chropowatości w zależności od prędkości skrawania  $v_s$  oraz prędkości posuwu przedmiotu  $v_w$ , jak również metody chłodzenia strefy szlifowania (sucho, metoda zalewowa).

Przy nastawnej prędkości skrawania  $v_s = 17$  m/s zanotowano najniższe wartości składowej normalnej siły oraz jednorodność przebiegu, co świadczy o równej rzeczywistej głębokości szlifowania. Przy wyższych prędkościach skrawania przebiegi składowych sił  $F_n$  oraz  $F_t$  nie utrzymały się na jednych poziomach. Jest to potwierdzenie, że proces szlifowania na całej długości próbki był nierównomierny. Podczas szlifowania z większymi wartościami parametru  $v_s$  w warstwie wierzchniej powstawały przypalenia, większe naprężenia własne materiału, które dyskwalifikują dany element w eksploatacji, generując tym samym niepotrzebne koszty produkcji. Zdecydowanie lepsza okazała się ściernica nowej generacji 5TGP (wykonana w połowie z submikro-stalicznego korundu spiekane TG, oraz w połowie z elektrokorundu chromowego CrA), przy użyciu której rejestrowano zarówno niższe wartości składowych sił  $F_n$  i  $F_t$ , jak również wartości parametrów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$ .

Monitorowanie przebiegu sił skrawania jest zabiegiem bardzo istotnym z punktu widzenia kontroli stanu warstwy wierzchniej przedmiotów obrabianych. Na jego podstawie można określić, czy na całej długości próbki nastąpiło równomierne zdejmowanie nadmiaru szlifierskiego, czy duża ilość ciepła wniknęła w WW przedmiotu, jak również, czy w wyniku procesu szlifowania nastąpiło odkształcenie próbki. Dzięki rejestracji składowych sił można kontrolować, czy

prawidłowo wykonano proces kształtowania CPS [3]. Za pomocą monitorowania przebiegu sił podczas obróbki można pośrednio przewidywać jak zmienia się temperatura w czasie procesu szlifowania. Taki sposób kontroli bardzo dobrze sprawdza się w przemyśle, ponieważ nie wymaga budowania kosztownych stanowisk pomiarowych.

### LITERATURA

1. Grdulska A., Rosik R., "Wpływ materiału ściernego na stan warstwy wierzchniej podczas szlifowania stopów tytanu". Mechanik 8-9, 2013.
2. Rosik R., Korzeniewski H., "Wybór medium obróbkowego dla MQL, a efekty szlifowania stopu tytanu Ti6Al4V". Stal nr 5-6 2014, s. 24-26.
3. Rosik R., Świerczyński K., "Wpływ metody MQL na parametry kształtowania czynnej powierzchni ściernicy i chropowatość warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego". Inżynieria Maszyn, Rok 16, zeszyt 1-2, 2011, 175-185.
4. Sadeghi M. M., Hadad M.J., Tawakoli T., Vesali A., Emami M., "An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication – MQL technique". International Journal of Material Forming, 3 2010, s. 241-251.
5. Świerczyński J., "Budowa systemu do jednoczesnego podawania kilku mediów chłodząco-smarujących w strefę szlifowania". Mechanik 8-9, 2013.
6. Świerczyński J., "Hybrydowa metoda wykorzystywana do chłodzenia strefy skrawania w procesie szlifowania". Mechanik 8-9 2012, str.135-140.
7. Świątek R., "Experimental investigation of abrasive electrodischarge grinding of Ti6Al4V titanium alloy". Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2009, 37/2, s.706-711.
8. Wójcik R., "The grinding of Titanium Alloys". Archives of Mechanical Technology and Automation, Vol.33 no.4, 2013.
9. Wójcik R., "Wpływ strumienia energii szlifowania na wybrane właściwości warstwy wierzchniej". Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej 2006.