

Badania wpływu warunków obróbki na przebieg procesu szlifowania wgłębnego stopów tytanu na szlifierce kłowej do wałków

Effects of grinding conditions on the course of plunge grinding process of titanium alloys on cylindrical grinding machine

PAWEŁ LAJMERT
WOJCIECH STACHURSKI
BOGDAN KRUSZYŃSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.595

W artykule zaprezentowano badania szlifowania stopów tytanu dla różnych warunków obróbki. Próby wykonano na szlifierce kłowej do wałków z zastosowaniem różnych ściernic. Przeprowadzono analizę wpływu warunków obróbki na zmiany składowych siły szlifowania, drgania oraz emisję akustyczną. W końcowej części pracy przedstawiono wpływ warunków obróbki na chropowatość szlifowanych przedmiotów.

SŁOWA KLUCZOWE: stop tytan Gr 5, szlifowanie cylindryczne, monitorowanie

In the article research on titanium alloys grinding for different grinding conditions are presented. Grinding test were carried out on cylindrical grinding machine with the use of different grinding wheels. An analysis of influence of grinding conditions on changes of grinding force components, vibrations and acoustic emission signal is presented. In the end of the paper the influence of grinding conditions on part surface roughness is presented.

KEYWORDS: titanium alloy Gr 5, cylindrical grinding, monitoring

Tytan i jego stopy odgrywają znaczącą rolę w produkcji odpowiedzialnych elementów w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym [1, 9, 11]. Jednak z powodu ich specyficznych właściwości (omówionych w dalszej części) materiały są nadal uznawane za bardzo kłopotliwe w procesach obróbki ubytkowej. Dotyczy to zarówno obróbki wiórowej, jak i ścierniej. Z tego względu, mimo ich zastosowania do produkcji wąskiej grupy elementów, obrabialność stopów tytanu jest aktualnie wiodącym tematem badawczym w wielu ośrodkach naukowych.

Jak już wspomniano, jednym ze sposobów kształtowania powierzchni przedmiotów wykonanych ze stopów tytanu, jest obróbka ścierna poprzez szlifowanie. Szlifowanie jest obróbką wykończeniową i jako taka decyduje o wynikowym stanie warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów. W procesie tym występują m.in. duże siły szlifowania, co może mieć niekorzystny wpływ na stan warstwy wierzchniej obrabianych elementów i pogarszać ich właściwości eksploatacyjne [10].

Charakterystycznymi właściwościami stopów tytanu są: niska masa właściwa przy wysokiej wytrzymałości, wysoka wytrzymałość zmęczeniowa oraz niski współczynnik przewodności cieplnej. Właściwości te, z jednej strony czynią stopy tytanu tak przydatne w produkcji odpowiedzialnych części maszyn, z drugiej czynią je dość kłopotliwymi w ob-

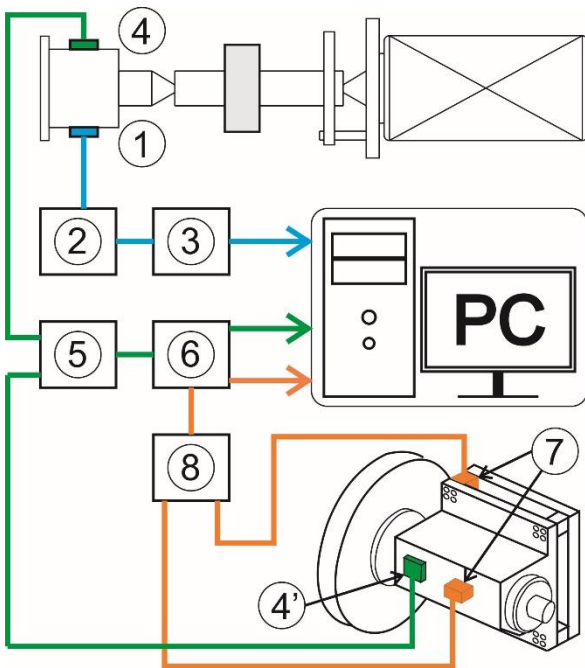
róbce ścierniej. Do typowych elementów, które wymagają szlifowania należy zaliczyć wiotkie wałki, tuleje, czy też łopatki turbin stosowane w silnikach lotniczych. Niska sztywność tych elementów oraz niska obrabialność stopów tytanu powoduje powstawanie znacznych ugięć i drgań w trakcie procesu szlifowania [3]. Relatywnie wysokie współczynniki tarcia powodują ponadto powstawanie dużych ilości ciepła [9]. Jak już wspomniano stopy tytanu są słabymi przewodnikami ciepła, co w połączeniu z niską przewodnością cieplną konwencjonalnych ściernic o spoiwie ceramicznym prowadzi do akumulacji dużych ilości ciepła w strefie styku ściernicy z obrabianym przedmiotem i w konsekwencji do nadmiernego obciążenia cieplnego narzędzia i jego szybszego zużycia. Szybkie zużywanie się narzędzia wynika również z wysokiej reaktywności tytanu w wysokich temperaturach [9, 12]. Ponadto zbyt wysoka temperatura szlifowania wpływa również na wynikowe naprężenia w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu, co może prowadzić do wzrostu błędów geometrycznych oraz chropowatości szlifowanej powierzchni i w konsekwencji do obniżenia jego właściwości użytkowych.

W związku z powyższym konieczne jest poznanie wpływu warunków obróbki na przebieg i parametry wynikowe procesu szlifowania. Ważne jest także ciągłe monitorowanie stanu procesu szlifowania w celu modyfikacji warunków obróbki lub podjęcia decyzji o kondycjonowaniu ściernicy. W procesie szlifowania monitorowaniu mogą podlegać różne wielkości towarzyszące temu procesowi, z których możliwe jest wyznaczenie pojedynczej cechy lub zbioru cech skorelowanych ze stanem narzędzia ściernego lub parametrami warstwy wierzchniej szlifowanych przedmiotów. W systemach monitorowania procesów szlifowania pomiar mocy bądź siły szlifowania może być wykorzystany do estymacji zdolności skrawnej ściernicy [4]. Z kolei emisja akustyczna AE (ang. acoustic emission) jest związana z procesami skrawania i dlatego może być użyta do estymacji chropowatości szlifowanej powierzchni, parametrów czynnej powierzchni ściernicy CPS lub identyfikacji niepożądanych stanów procesu, takich jak uszkodzenia cieplne przedmiotu [2, 5]. W pracy przedstawiono wpływ dwóch rodzajów ściernic o spoiwie ceramicznym oraz parametrów kinematycznych szlifowania na wybrane wielkości towarzyszące procesowi szlifowania oraz parametry wynikowe szlifowanych przedmiotów.

Stanowisko badawcze

Głównym elementem stanowiska badawczego jest zmodernizowana szlifierka kłowa do wałków Tacchella 4M. Wszystkie układy pomiarowe działają z wykorzystaniem komputera PC wyposażonego w odpowiednie karty pomiarowe [6, 8]. Strukturę układów pomiarowych szlifierki przedstawiono na rysunku 1.

* dr inż. Paweł Lajmert (pawel.lajmert@p.lodz.pl), dr inż. Wojciech Stachurski (wojciech.stachurski@p.lodz.pl), prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński (bogdan.kruszynski@p.lodz.pl) – Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn.



Rys. 1. Struktura układów pomiarowych stanowiska badawczego; (1, 2 – czujnik emisji akustycznej i wzmacniacz; 3 – karta akwizycji danych USB 6366; 4, 4' – czujniki drgań i wzmacniacz; 6 – karta akwizycji danych USB 6351; 7, 8 – czujniki siły oraz wzmacniacz; PC – komputer)

Na układ monitorowania procesu szlifowania składają się układy pomiaru siły szlifowania, drgań i emisji akustycznej. Ponadto do oceny stanu obrabianej powierzchni wykorzystano przyrząd do pomiaru chropowatości SurfTest SJ-200 firmy Mitutoyo. Do pomiaru składowych siły szlifowania zastosowano piezoelektryczne trzyosiowe czujniki siły firmy Kistler 9317B. Czujniki te umieszczono pomiędzy korpusem obudowy wrzeczona ściernicy a korpusem obrotnicy szlifierki (rys. 1). Składowe siły szlifowania w kierunku normalnym i stycznym rejestrowano w sposób ciągły w pamięci komputera z częstotliwością 40 kHz. Tak zaprojektowany układ pomiarowy pozwala na pomiar składowej statycznej siły szlifowania jak i składowej dynamicznej w zakresie częstotliwości do około 3 kHz. W celu poznania szerszego obrazu zjawisk zachodzących w procesie szlifowania równoległe z pomiarami siły szlifowania dokonywano pomiarów emisji akustycznej. Do pomiaru sygnału emisji akustycznej zastosowano przewodowy czujnik Kistler 8152B121 zamocowany do kła konika szlifierki. Ustalono, że tarcie w kłach konika, jak również pozycja strefy skrawania wzdłuż obrabianego przedmiotu nie wpływa na wartość sygnału i nie zakłóca w znaczący sposób sygnału emisji akustycznej. Zakres pomiarowy zastosowanego czujnika emisji zawiera się w przedziale częstotliwości od około 100 kHz do 900 kHz. Sygnał z czujnika był wzmacniany i filtrowany przy użyciu wzmacniacza Kistler typ 5125A wyposażonego w filtr pasmowo-przepustowy o częstotliwościach odcinania wynoszących odpowiednio 50 kHz i 1MHz. Charakterystyka zastosowanego czujnika pozwala na pomiar sygnału na poziomie 48 dBref 1Vs/m dla fal powierzchniowych i podłużnych. Sygnał ten jest następnie we wzmacniaczu podawany do przetwornika wartości skutecznej o okresie całkowania sygnału wynoszącym $\tau_s=0,12$ ms. Surowy sygnał emisji akustycznej oraz jego wartość skuteczną rejestrowano w pamięci komputera przy użyciu karty NI USB 6366. Oba sygnały rejestrowane były w sposób ciągły z częstotliwością 2 MHz.

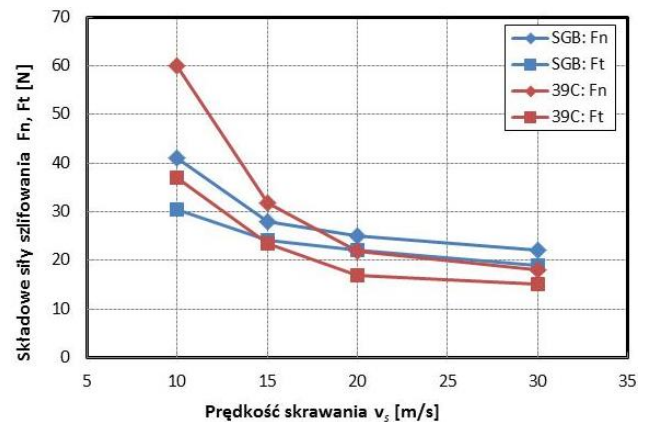
Warunki badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono w celu ustalenia przydatności wybranych ściernic do szlifowania stopu

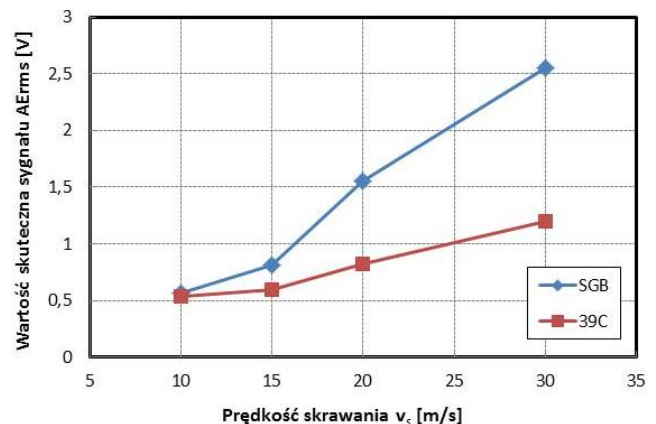
tytanu Grade 5 (Ti-6Al-4V) oraz w celu ustalenia wpływu warunków obróbki na przebieg procesu i parametry wynikowe szlifowanych powierzchni. W przeprowadzonych próbach szlifowano w postaci pierścieni o średnicy 55 mm i szerokości 10 mm mocowane na trzpieniu. Badania przeprowadzono z użyciem ściernicy SGB60KVX (spoiwo ceramiczne, mieszanka ziaren konwencjonalnych z ziarnami SG o średniej koncentracji) oraz ściernicą 39C54MVS (spoiwo ceramiczne, ziarno z zielonego węgla krzemowego). Badania przeprowadzono dla różnych właściwych wydajności objętościowych szlifowania $Q'_w = 0,1, 0,2$ i $0,5$ mm³/mm·s oraz prędkości obwodowej przedmiotu v_w wynoszącej 50, 100, 200 i 400 mm/s. We wszystkich próbach szlifowania zmieniano ponadto prędkość skrawania v_s na czterech poziomach wynoszących 10, 15, 20 i 30 m/s. Zakres zmian prędkości skrawania ustalono na podstawie przeglądu literatury [1, 9, 11, 12] i prób szlifowania [7] sugerując się wynikowymi parametrami geometrii szlifowanej powierzchni oraz wartościami sił skrawania i emisji akustycznej. Szlifowano w cyklach składających się z dosuwu roboczego bez wyiskrzania i szybkiego odsoku z prędkością 200 μ m/s, każdorazowo zbierając właściwy ubytek materiału V'_w wynoszący 20 mm³/mm. W procesie kondycjonowania ściernicy przyjęto prędkość obwodową ściernicy równą 25 m/s, dosuw kondycjonowania ściernicy a_d wynoszący 20 μ m i posuw wzdłużny kondycjonowania v_{fd} równy 100 mm/min. Jako chłodziwo zastosowano 3% wodny roztwór emulsji syntetycznej Mobilcut 321.

Wyniki badań

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono odpowiednio zmiany składowych siły szlifowania i wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej AE_{rms} w funkcji prędkości skrawania dla obu zastosowanych ściernic.



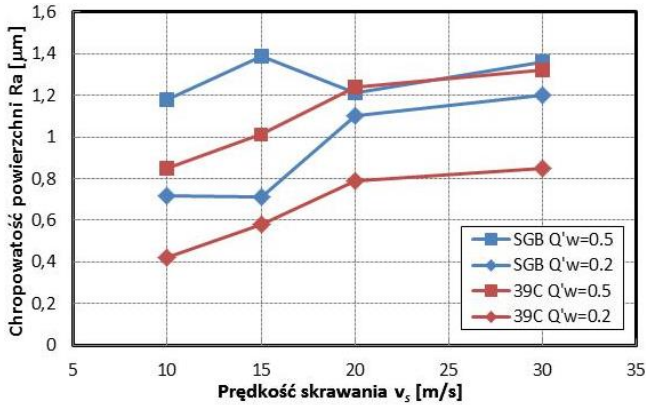
Rys. 2. Zmiany składowych siły szlifowania w funkcji prędkości skrawania v_s



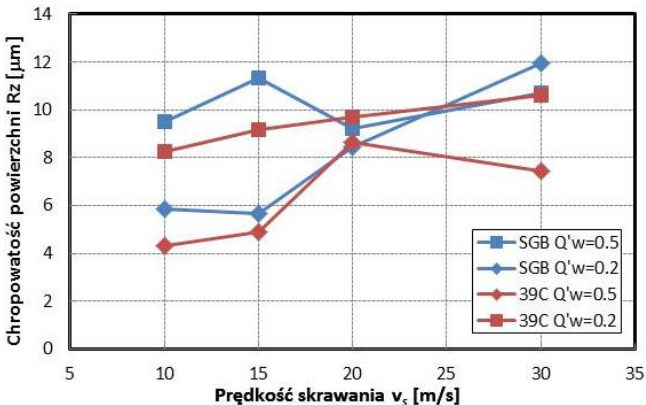
Rys. 3. Zmiany wartości skutecznej AE_{rms} w funkcji prędkości skrawania v_s

Widać, że wartości składowych siły szlifowania maleją wraz ze wzrostem prędkości skrawania, natomiast wartość AE_{rms} rośnie. Wzrost sygnału AE_{rms} może świadczyć o przewadze zjawisk związanych z mikrodeformacją i tarciami zachodzącym w obrabianym materiale. Ponadto wzrost poziomu AE_{rms} może świadczyć o zachodzących procesach mikrowykruszania się ziaren spowodowanych większą temperaturą w strefie skrawania i w efekcie większym obciążeniem cieplnym narzędzia ściernego. W przypadku ściernicy SGB efektem tego było szybsze zużycie narzędzia.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono zmiany parametrów chropowatości Ra (rys. 4) i Rz (rys. 5) szlifowanej powierzchni w funkcji prędkości skrawania v_s .



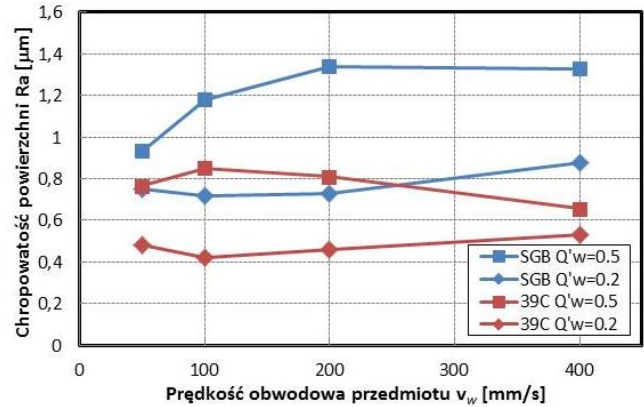
Rys. 4. Wpływ prędkości skrawania v_s na chropowatość powierzchni Ra



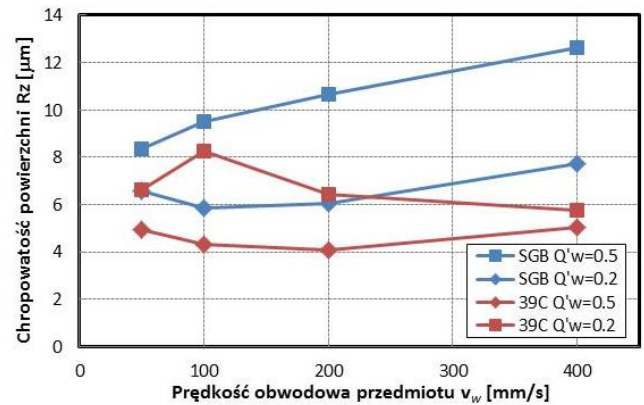
Rys. 5. Wpływ prędkości skrawania v_s na chropowatość powierzchni Rz

Na podstawie powyższych wykresów widać, że dla obu zastosowanych ściernic chropowatość powierzchni maleje wraz z zmniejszaniem się prędkości skrawania. Wskazuje to na zasadność stosowania w przypadku szlifowania tytanu niższych prędkości skrawania v_s . Warto także zauważyć, że dla poszczególnych wartości $Q'w$ przy szlifowaniu ściernicą 39C uzyskuje się mniejsze (do 50%) wartości parametru Ra i Rz niż przy zastosowaniu ściernicy SGB.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono z kolei zmiany parametrów chropowatości Ra i Rz w funkcji prędkości obwodowej przedmiotu.



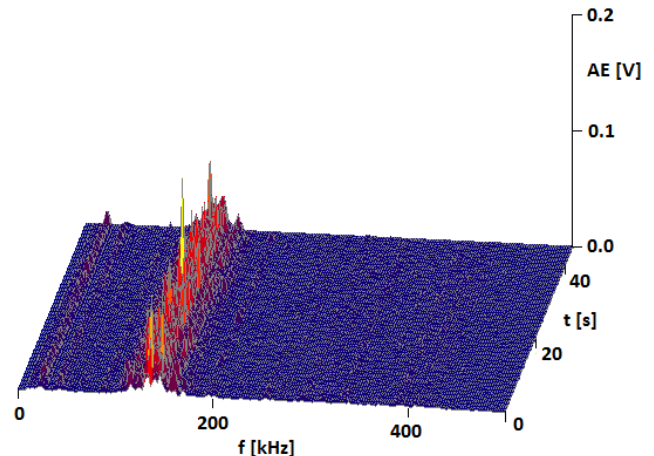
Rys. 6. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu v_w na chropowatość powierzchni Ra



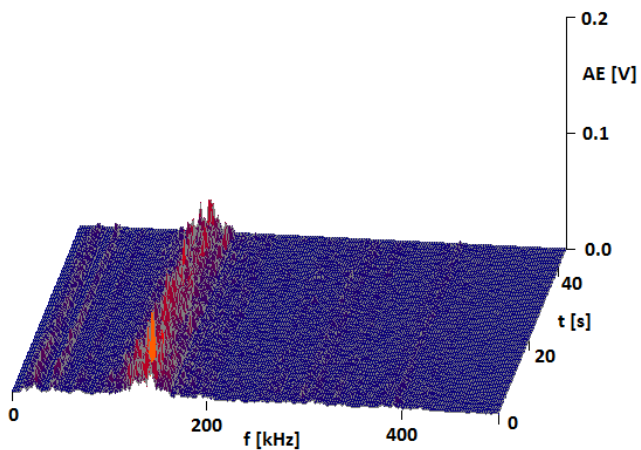
Rys. 7. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu v_w na chropowatość powierzchni Rz

Z przedstawionych wykresów wynika, że istnieje optymalna prędkość obwodowa przedmiotu mieszcząca się w zakresie od 100 do 200 mm/s. Wynika to prawdopodobnie z tego, że przy zbyt niskich prędkościach obwodowych przedmiotu zachodzi szlifowanie w strefie uszkodzenia cieplnych przedmiotu obrabianego, natomiast wzrost chropowatości przy wysokich prędkościach obwodowych przedmiotu może to wynikać z pracy w strefie drgań samowzbudnych.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono widmo surowego sygnału AE dla odpowiednio ściernicy SGB i 39C i prędkości skrawania wynoszącej 15 m/s. Wykresy zaprezentowano dla właściwej wydajności objętościowej $Q'w=0,5$ mm³/mm*s oraz dla prędkości obwodowej przedmiotu $v_w=100$ mm/s.



Rys. 8. Widmo amplitudy surowego sygnału AE dla ściernicy SGB i prędkości skrawania $v_s = 15$ m/s



Rys. 9. Widmo amplitudy surowego sygnału AE dla ściernicy 39C i prędkości skrawania $v_s = 15\text{m/s}$

Widać, że w przypadku ściernicy SGB amplituda surowego sygnału AE jest większa od amplitudy sygnału dla ściernicy 39C. Może to wynikać z tego, że w przypadku ściernicy SGB przeważa tarcie i generowane są większe temperatury w strefie skrawania, co intensyfikuje procesy zużywania się ściernicy (mikrowykruszanie się ziaren i rozwój falistości na CPS).

Wnioski

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zwiększenie prędkości skrawania powoduje zmniejszenie siły szlifowania, jednakże z powodu wzrostu temperatury skrawania prowadzi do intensywniejszego zużywania się obu rodzajów ściernic, co wpływa na wzrost błędów geometrii szlifowanych przedmiotów.
- Zwiększenie prędkości skrawania powoduje wzrost wartości AE_{rms} . Wzrost ten może być spowodowany zjawiskami mikrodeformacji, tarcieniem występującym w obrabianym przedmiocie oraz procesami mikrowykruszania na skutek większego obciążenia cieplnego narzędzia. W przypadku ściernicy SGB efektem tego było szybsze zużycie narzędzia.
- Chropowatość powierzchni maleje wraz z zmniejszaniem się prędkości skrawania. Zatem, w przypadku szlifowania tytanu, zasadne jest stosowanie niższych prędkości skrawania v_s . Warto zauważyć, że przy szlifowaniu ściernicą 39C uzyskuje się, dla tych samych Q_w , mniejsze wartości parametru Ra i Rz niż przy zastosowaniu ściernicy SGB. Różnica ta dochodzi nawet do 50% wartości.
- W celu zmniejszenia wynikowej chropowatości szlifowanej powierzchni należy stosować odpowiednio niskie prędkości obrotowe przedmiotu. Optymalna prędkość obrotowa przedmiotu mieści się w zakresie 100÷200 mm/s.

Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. Beranoagirre A., Lopez de Lacalle L. "Grinding of gamma TiAl intermetallic alloys". *Procedia Engineering*. Vol. 63 (2013): 489÷498.
2. Hundt W., Leuenberger D., Rehsteiner F., Gygax P. "An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique". *Annals of the CIRP*. Vol. 43/1 (1994): s. 295÷298.
3. Inasaki I., Karpuszcwski B., Lee H. "Grinding chatter – origin and suppression". *Annals of the CIRP*. Vol. 50/2 (2001): s. 515÷535.
4. Karpuszcwski B., Wehmeier M., Inasaki I. "Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors". *Annals of the CIRP*. Vol. 49/1 (2000): s. 235÷240.
5. Lajmert P., Kruszyński B., Wrąbel D. „Identyfikacja wczesnych symptomów niepożądanych stanów procesu w szlifowaniu kłowym wałków”. XXXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, 2011.
6. Lajmert P., Kruszyński B., Wrąbel D., Sikora M. „Stanowisko do wieloaspektowego badania procesu szlifowania kłowego wałków”. *Mechanik*. Nr 8-9 (2013): s. 273÷282/703.
7. Lajmert P., Ostrowski D., Sikora M., Kruszyński B. „Szlifowanie tytanu na szlifierce kłowej do wałków”. *Mechanik*. Nr 8-9 (2014): s. 245÷248/726.
8. Lajmert P., Ostrowski D., Sikora M., Kruszyński B. „Stanowisko do badania procesu szlifowania wgłębnego wałków”. *Mechanik*. Nr 8-9 (2014): s. 195÷202/596.
9. Oczół K. E. „Kształtowanie ubytkowe tytanu i jego stopów w przemyśle lotniczym i technice medycznej – część 2”. *Mechanik*. Nr 10 (2008): s. 753÷767.
10. Oczół K.E., Porzycki J. „Szlifowanie. Podstawy i technika”. Warszawa: WNT, 1986.
11. Razavi H., Kurfess T., Danyluk S. "Force control grinding of gamma titanium aluminide". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 43 (2003): s. 185÷191.
12. Xu X., Yu Y, Huang H. "Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys". *Wear*. Vol. 255 (2003): s. 1421÷1426.