



## Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do wałków

### Grinding of a nickel-based alloys on cylindrical grinding machine

MAŁGORZATA SIKORA  
PAWEŁ LAJMERT  
DARIUSZ OSTROWSKI  
BOGDAN KRUSZYŃSKI\*

W artykule przedstawiono badania szlifowania stopu niklu Inconel 718 dla różnych parametrów kinematycznych szlifowania i siły różnych ściernic. Przeprowadzono analizę wpływu warunków obróbki na zmiany składowych szlifowania oraz emisji akustycznej. W końcowej części pracy przedstawiono wpływ zastosowanych ściernic i warunków obróbki na wybrane parametry wynikowe szlifowanych przedmiotów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** stopy Inconel, szlifowanie cylindryczne, monitorowanie.

*In the paper grinding process has been studied in the machining of Inconel 718 alloy for different grinding kinematic parameters and grinding wheels. An analysis was carried out to investigate the influence of grinding conditions on the course of grinding force components and acoustic emission signal. In the end the influence of grinding wheels and conditions on grinding results is presented.*

**KEYWORDS:** nickel alloys, cylindrical grinding, monitoring.

Potrzeba produkcji coraz lżejszych i energooszczędnych urządzeń wymusza stosowanie w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym specjalnych stopów metali, takich jak stopy niklu, które z racji swoich właściwości są kłopotliwe w obróbce ubytkowej [10]. Stopy na bazie niklu charakteryzują się wysoką wytrzymałością w wysokich temperaturach (np. stop Inconel 718 - 1250 MPa w temperaturze 650°C), dobrą wytrzymałością zmęczeniową, odpornością na korozję i utlenianie, jednakże posiadają niską przewodność cieplną. Inconel 718 jest szeroko stosowany w przemyśle lotniczym, między innymi do wytwarzania elementów turbin silników lotniczych. Z powodu wspomnianych właściwości tego materiału podczas jego obróbki powstają duże siły

szlifowania oraz generowane są duże ilości ciepła [8, 13]. Nadstopy na bazie niklu wykazują ponadto tendencję do utwardzania materiału w strefie styku ze ściernicą, co dodatkowo utrudnia ich obróbkę [10]. Jak już wspomniano są one 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 przedmiotem, wpływając na szybsze zużycie narzędzia ściernego i pogorszenie parametrów warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów [8, 13].

Na parametry wynikowe szlifowania ma wpływ szereg czynników związanych z zastosowaną obrabiarką, narzędziem ściernym, jak również wyborem właściwych parametrów kinematycznych szlifowania [9]. Gdy warunki obróbki są niewłaściwie dobrane z powodu wspomnianych właściwości stopów niklu mogą powstawać drgania samowzbudne oraz duże wartości sił szlifowania [3]. Z tych powodów konieczne jest poznanie wpływu warunków obróbki na przebieg i parametry wynikowe szlifowania oraz ciągłe monitorowanie procesu szlifowania w celu modyfikacji warunków obróbki lub podjęcia decyzji o kondycjonowaniu ściernicy. Podstawą monitorowania procesu jest pomiar różnych wielkości towarzyszących procesowi szlifowania, z których możliwe jest wyznaczenie pojedynczej cechy bądź zbioru cech skorelowanych ze stanem narzędzia ściernego lub parametrami warstwy wierzchniej szlifowanego przedmiotu [1, 4, 5, 6, 12]. W systemach monitorowania procesów szlifowania pomiar mocy bądź siły szlifowania może być wykorzystany do estymacji zdolności skrawnej ściernicy [4, 7]. 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, 11].

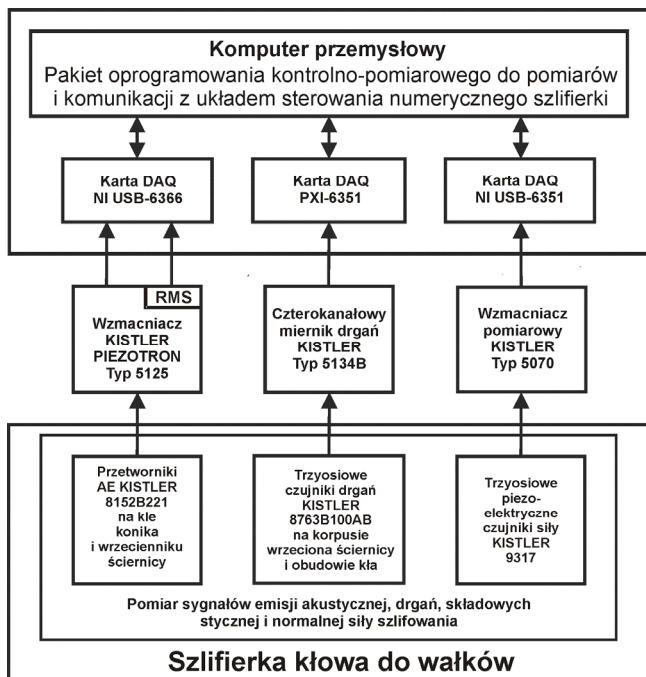
W pracy przedstawiono wpływ dwóch rodzajów ściernic o spoiwie ceramicznym oraz parametrów kinematycznych szlifowania na wybrane wielkości towarzyszące procesowi

\* dr inż. Małgorzata Sikora (malgorzata.sikora@p.lodz.pl), dr inż. Paweł Lajmert (pawel.lajmert@p.lodz.pl), dr inż. Dariusz Ostrowski (dariusz.ostrowski@p.lodz.pl), prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński (Bogdan.kruszynski@p.lodz.pl)

szlifowania oraz parametry wynikowe szlifowanych przedmiotów.

### Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze powstało w oparciu o zmodernizowaną szlifierkę kłową do wałków Tacchella 4M. Działanie wszystkich układów pomiarowych oparto o komputer PC wyposażony w odpowiednie karty pomiarowe. Schemat blokowy zastosowanych układów pomiarowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura układów pomiarowych stanowiska badawczego

Na układ monitorowania procesu szlifowania składały się układy pomiaru siły szlifowania, drgań i emisji akustycznej. Ponadto do oceny stanu przedmiotu po obróbce wykorzystano chropowatościomierz HOMMEL Tester T500.

Do pomiaru składowych siły szlifowania zastosowano piezoelektryczne trzyosiowe czujniki siły firmy Kistler 9317B. Czujniki te umieszczono pomiędzy korpusem obudowy wrzeciona ściernicy a korpusem obrotnicy szlifierki. Składowe siły szlifowania w kierunku normalnym i stycznym rejestrowano w sposób ciągły w pamięci komputera z częstotliwością 40 kHz. Zbudowany 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 równolegle z pomiarami siły szlifowania dokonywane były pomiary emisji akustycznej. Do pomiaru sygnału emisji akustycznej zastosowano przewodowy czujnik Kistler 8152B121, który przymocowano do kła konika szlifierki. Ustalono, że tarcie w kłach konika, jak również pozycja strefy szlifowania 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 prowadzonych prób szlifowania

Badania doświadczalne przeprowadzono w celu ustalenia przydatności wybranych ściernic do szlifowania stopu Inconel 718 oraz w celu ustalenia wpływu warunków obróbki na przebieg procesu i parametry wynikowe szlifowanych przedmiotów. W przeprowadzonych próbach szlifowano próbki w postaci pierścieni o średnicy 60 mm i szerokości 10 mm mocowane na trzpieniu. Badania przeprowadzono z użyciem konwencjonalnej ściernicy ceramicznej z ziarnem z elektrokorundu szlachetnego 38A60K5VBE oraz ściernicą z ziarnem mikrokrystalicznym 3HA060J8V114 Molelab. Badania realizowano dla różnych wydajności objętościowych szlifowania  $Q'_w$  poprzez zmiany prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  wynoszącej 50, 100 i 200 mm/s dla stałej grubości warstwy skrawanej  $a_e$  wynoszącej 6  $\mu\text{m}$ . W wyniku dało to wartości  $Q'_w$  równe 0,3, 0,6 i 1,2  $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ . We wszystkich próbach szlifowania zmieniano ponadto prędkość skrawania  $v_s$  na trzech poziomach wynoszących 15, 25 i 35 m/s. Zakres zmian prędkości skrawania ustalono na podstawie przeglądu literatury [8, 10, 13] i wstępnych prób szlifowania sugerując się wyników parametrami geometrii szlifowanej powierzchni oraz wartościami sił szlifowania i emisji akustycznej.

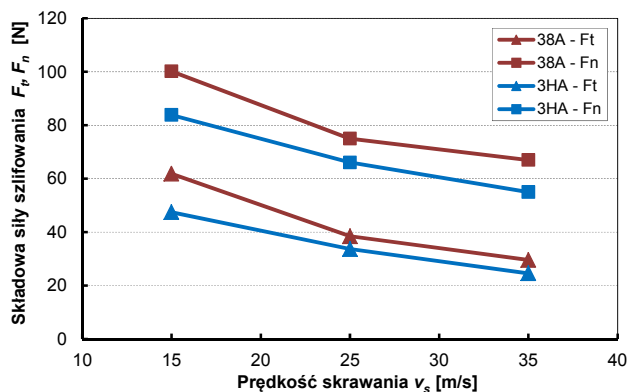
Szlifowano w cyklach składających się z dosuwu roboczego bez wyiskrzania i szybkiego odskoku z prędkością 200  $\mu\text{m}/\text{s}$ , każdorazowo zbierając naddatek o wielkości dla pierwszego przejścia 50  $\mu\text{m}$  i każdego kolejnego 100  $\mu\text{m}$ , aż do stopnia ściernicy. Jako kryterium stopnia ściernicy przyjęto chropowatość obrabianej powierzchni oraz poziom drgań rejestrowanych na kle konika szlifierki. W zależności od zastosowanych warunków obróbki okres trwałości ściernicy obejmował od 2 do 5 cykli szlifowania, co odpowiadało właściwemu ubytkowi materiału  $V'_w$  wynoszącemu od 30 do około 90  $\text{mm}^3/\text{mm}$ .

W procesie kondycjonowania ściernicy przyjęto prędkość obwodową ściernicy równą 33 m/s, dosuw kondycjonowania ściernicy  $a_d$  wynoszący 20  $\mu\text{m}$  i posuw wzdłużny kondycjonowania  $V_{fd}$  równy 100 mm/min. Wynikowy wskaźnik pokrycia  $k_d$  wynosił około 8. Jako chłodziwo zastosowano 3% wodny roztwór emulsji syntetycznej Mobilcut 321.

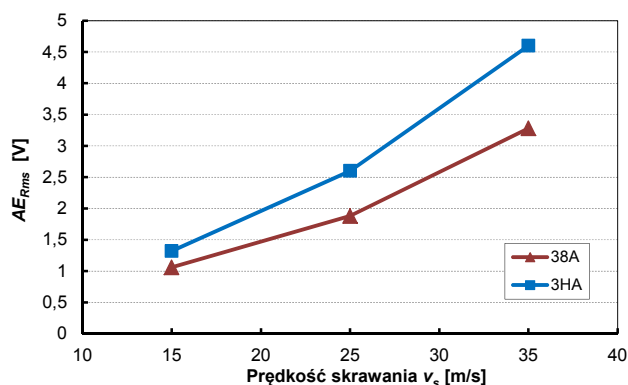
### Wyniki badań

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono odpowiednio zmiany składowych siły szlifowania i wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej  $AE_{\text{rms}}$  w funkcji prędkości skrawania dla obu zastosowanych ściernic. Widać, że wartości składowych siły szlifowania maleją wraz ze wzrostem prędkości skrawania, natomiast wartość  $AE_{\text{rms}}$  rośnie. Wzrost sygnału  $AE_{\text{rms}}$  może świadczyć o przewadze zjawisk związanych z mikrodeformacją i tarcieniem zachodzącym w obrabianym materiale i przewadze procesów skrawania, dzięki czemu maleje siła szlifowania. Ponadto wzrost poziomu  $AE_{\text{rms}}$  może świadczyć o zachodzących procesach mikrowykruszania się ziaren ściernicy, co dodatkowo sprzyja oczyszczaniu CPS i utrzymaniu przez nią właściwości skrawnych. Świadczy o tym fakt, iż dla niskich prędkości skrawania wynoszących 15 m/s ściernica ulegała zalepieniu już w drugim cyklu szlifowania. Natomiast dla wysokich prędkości skrawania

powodem zużycia ściernicy był rozwój falistości na jej powierzchni prowadzący do powstawania drgań szlifowanego przedmiotu, przy czym całkowite zużycie ściernicy występowało dopiero w 4 lub 5 cyklu szlifowania.

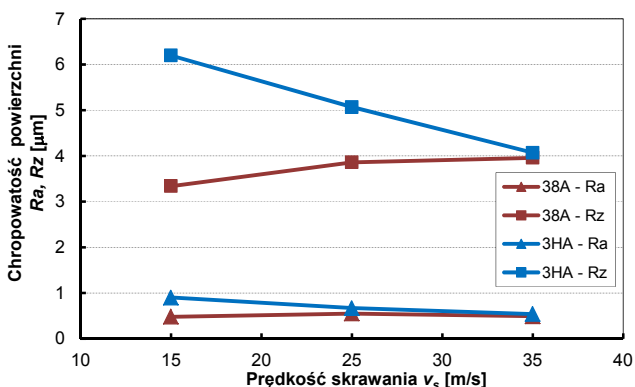


Rys. 2. Zmiany składowych siły szlifowania w funkcji prędkości skrawania  $v_s$



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

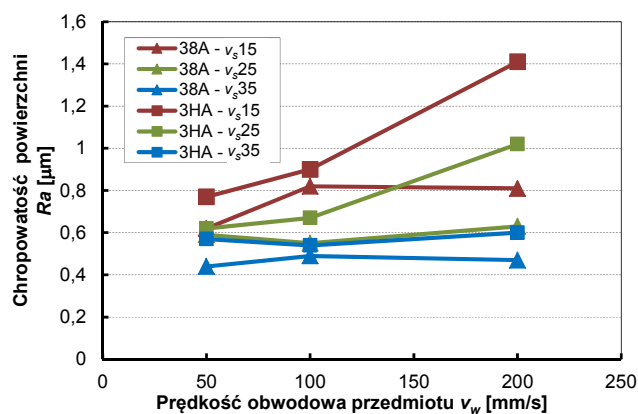
Na rysunku 4 przedstawiono zmiany parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  szlifowanej powierzchni w funkcji prędkości skrawania  $v_s$ . Widać, iż w przypadku ściernicy z mikrokryсталicznym ziarnem chropowatość powierzchni maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania. W przypadku konwencjonalnej ściernicy z ziarnem 38A prędkość skrawania praktycznie nie wpływa na chropowatość powierzchni.



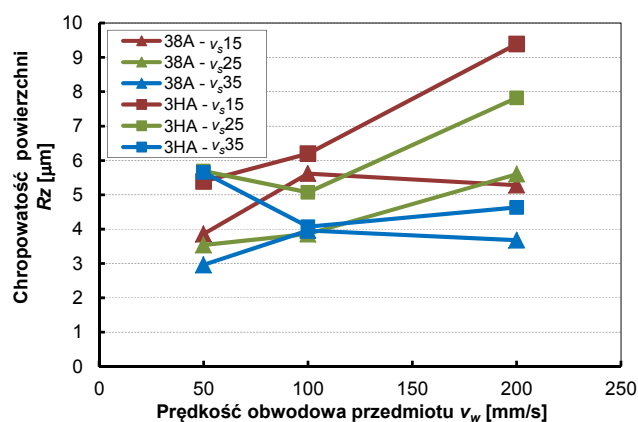
Rys. 4. Wpływ prędkości skrawania  $v_s$  na chropowatość powierzchni  $R_a$  i  $R_z$

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono z kolei zmiany parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  w funkcji prędkości obwodowej przedmiotu. Z przedstawionych rysunków widać,

że chropowatość powierzchni ulega zmniejszeniu wraz ze zmniejszeniem prędkości obwodowej przedmiotu.

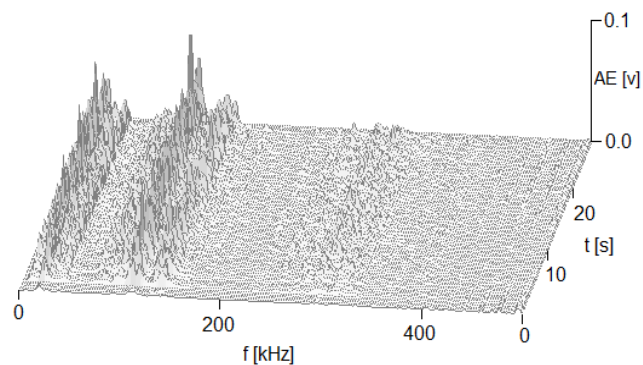


Rys. 5. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  na chropowatość powierzchni  $R_a$



Rys. 6. Wpływ prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  na chropowatość powierzchni  $R_z$

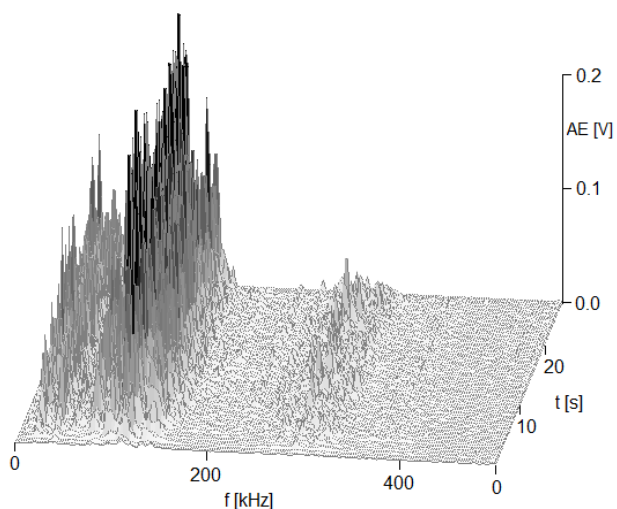
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono widmo surowego sygnału AE dla ściernicy 3HA i prędkości skrawania wynoszących odpowiednio 15 i 35 m/s. Podobnie jak na rysunku 3 widać, że w przypadku wyższej prędkości skrawania (rysunek 8) przeważają procesy samoostrzenia się ściernicy, co sprzyja oczyszczaniu jej czynnej powierzchni i utrzymaniu właściwości skrawnych. W przypadku niskiej prędkości skrawania amplituda surowego sygnału AE jest znacznie mniejsza w całym zakresie częstotliwości.



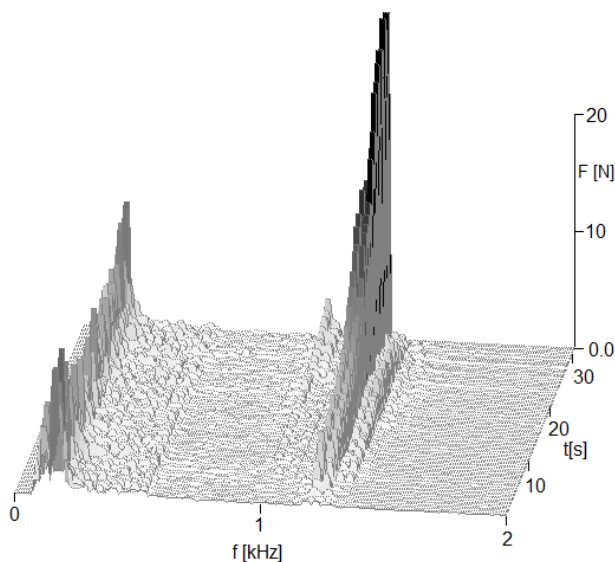
Rys. 7. Widmo amplitudy surowego sygnału AE dla ściernicy 3HA i prędkości skrawania  $v_s = 15$  m/s

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono zmiany widma amplitudy składowej odporowej siły szlifowania dla ściernicy konwencjonalnej 38A i ściernicy 3HA dla prędkości skrawania

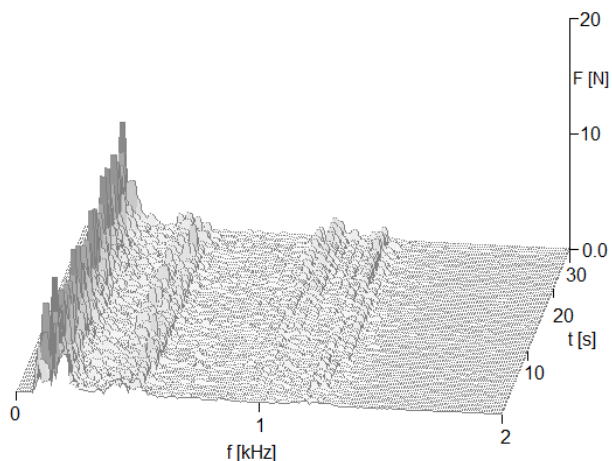
wynoszącej 35 m/s dla drugiej próby szlifowania po zeszlifowaniu 30 mm<sup>3</sup>/mm materiału. Widać, że ściernica z ziarnem konwencjonalnym ulega znacznie szybciej zużyciu (rozwój falistości na ściernicy) niż ściernica z ziarnem mikrokrystalicznym.



Rys. 8. Widmo amplitudy surowego sygnału AE dla ściernicy 3HA i prędkości skrawania  $v_s = 35$  m/s



Rys. 9. Widmo amplitudy składowej odporowej siły szlifowania dla ściernicy konwencjonalnej 38A i prędkości skrawania  $v_s = 35$  m/s



Rys. 10. Widmo amplitudy składowej odporowej siły szlifowania dla ściernicy konwencjonalnej 3HA i prędkości skrawania  $v_s = 35$  m/s

## Wnioski

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- W celu zmniejszenia wynikowej chropowatości szlifowanej powierzchni należy stosować odpowiednio niskie prędkości obwodowe przedmiotu.
- Większe wartości prędkości skrawania pozwalają na uzyskanie niższych chropowatości szlifowanej powierzchni przedmiotu dla ściernicy z ziarnem mikrokrystalicznym. W przypadku ściernicy konwencjonalnej wpływ prędkości skrawania jest praktycznie nieistotny.
- Zwiększenie prędkości skrawania powoduje znaczące zmniejszenie siły szlifowania, co sprzyja uzyskaniu wyższej dokładności geometrycznej szlifowanych przedmiotów i skróceniu cyklu szlifowania.
- Zastosowanie ściernicy z ziarnem mikrokrystalicznym wydłuża znacząco okres trwałości ściernicy pomiędzy procesami kondycjonowania ściernicy.

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 (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## LITERATURA

1. Burek J., Babiarz R., Żyłka Ł., Nadzorowanie procesu szlifowania wglębnego z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej. *Mechanik*, 8-9, 66-74, 2013.
2. Hundt W., Leuenberger D., Rehsteiner F., Gyax P., An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique. *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, 295-298, 1994.
3. Inasaki I., Karpuszewski B., Lee H., Grinding chatter – origin and suppression. *Annals of the CIRP*, Vol. 50/2, 515-535, 2001.
4. Karpuszewski B., Wehmeier M., Inasaki I., Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors. *Annals of the CIRP* Vol. 49/1, 235-240, 2000.
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* 8-9, 273-282, 2013.
7. Liu Q., Chen X., Wang Y., Gindy N., Empirical modelling of grinding force based on multivariate analysis. *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 203, 420-430, 2008.
8. Ming C., Xiaotian L., Fanghong S., Yucheng X., Bingyuan X., Studies on the grinding characteristics of directionally solidified nickel-based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 116, 165-169, 2001.
9. Oczó K., Porzycki J., Szlifowanie. WNT Warszawa, 1986.
10. Tso P., Study on the grinding of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, 421-426, 1995.
11. Webster J., Marinescu I., Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding. *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, 299-304, 1994.
12. Wegener K., Hoffmeister H.-W., Karpuszewski B., Kuster F., Hahmann W.-C., Rabiey M., Conditioning and monitoring of grinding wheels. *Annals of the CIRP*, Vol. 60/2, 757-777, 2011.
13. Xu X., Yu Y., Xu H., Effect of grinding temperatures on the surface integrity of a nickel-based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, 359-363, 2002.