

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Opracowanie zaawansowanych procesów obróbki HSM trudnoobrabialnych stopów lotniczych

Development of advanced processes of HSM of almost unworkable aeronautical alloys

Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Łódzka, Politechnika Warszawska

Wyniki badań Results

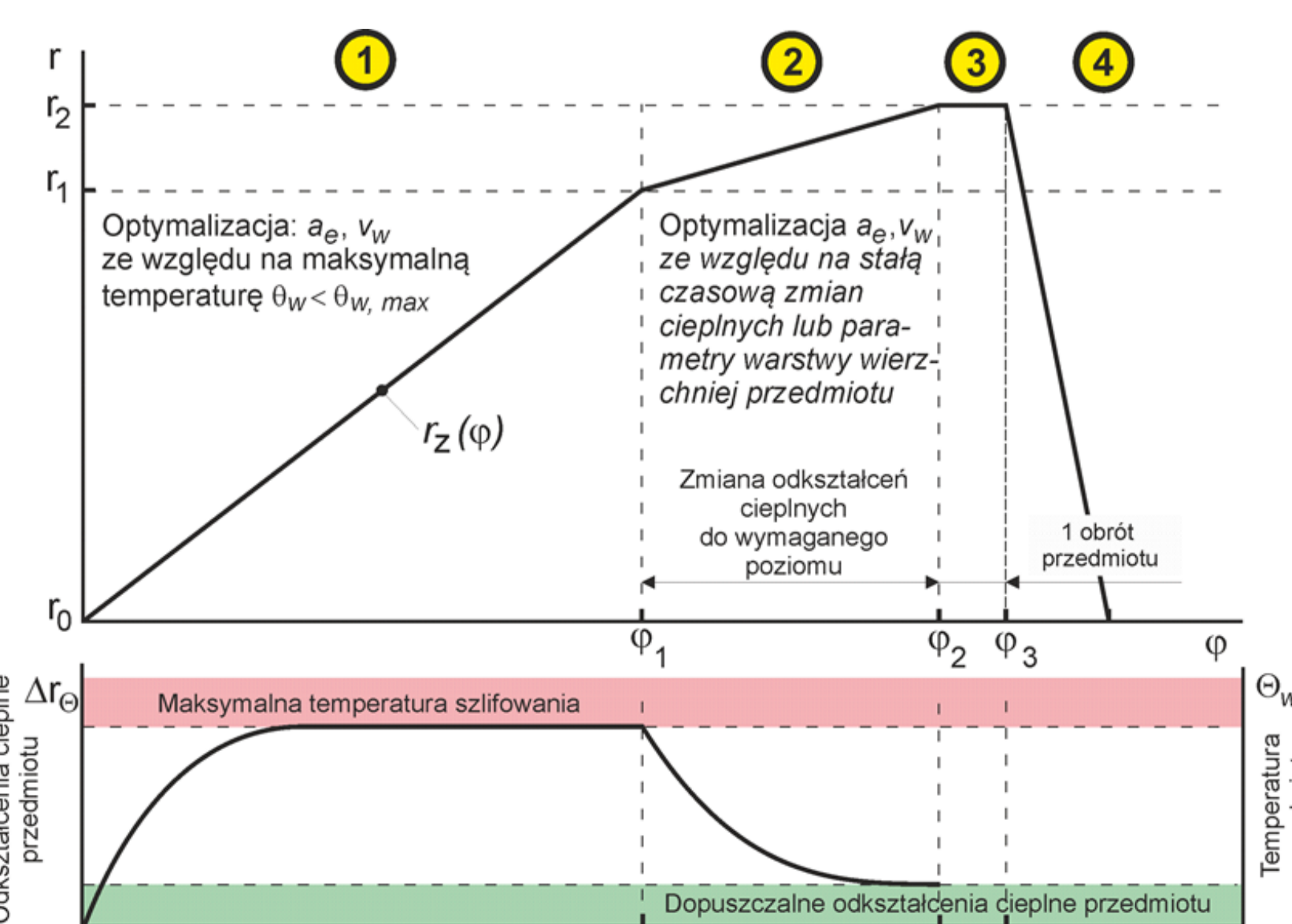
- Przebudowa wrzeciennika ściernicy szlifierki TOS BUA-25 w celu zamontowania piezoelektrycznych czujników siły firmy Kistler. Przeprowadzono wzorcowanie torów pomiaru składowych odporowej, stycznej i osiowej siły szlifowania. *Conversion of grinding wheel headstock of TOS BUA-25 grinding machine in order to mount piezoelectric three axis Kistler force sensors. Calibration of measurement channels of tangential, normal and axial force components.*
- Opracowano modele procesu szlifowania (siły, odkształceń sprężystych, dynamiki szlifowania, temperatury, geometrii powierzchni obrabianej i ściernicy). *Development of grinding process models (force, workpiece elastic deformation, dynamics, temperature and geometry of the workpiece and grinding wheel).*
- Opracowano oprogramowanie pomiarowe do rejestracji składowych siły szlifowania, drgań, emisji akustycznej, falistości przedmiotu i ściernicy oraz mikrogeometrii ściernicy. *Development of measurement software for acquisition of force components, grinding vibrations, acoustic emission signal, shape of the workpiece and grinding wheel and micro-geometry of grinding wheel.*
- Opracowano oprogramowanie do analizy parametrów makro i mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy CPS. *Development of software for analysis of macro and micro-geometry of grinding wheel.*
- Opracowano algorytmy identyfikacji wczesnych symptomów niepożądanych stanów procesu, tj. uszkodzeń cieplnych, drgań samowzbudnych, wykruszania się ściernicy, itp. z wykorzystaniem metod analizy składowych głównych PCA i modeli regresji z użyciem PCA (Principal component regression PCR), składowych niezależnych ICA i drzew decyzyjnych - zadanie w trakcie realizacji. *Development of algorithms for identification of early symptoms of undesired process states, i.e. thermal defects, chatter vibrations, self-sharpening of grinding wheel, etc. with the use of standard and Kernel principal and independent component analysis and decision trees/Petri Nets. Task during realization.*
- Opracowano algorytmy estymacji parametrów warstwy wierzchniej przedmiotów obrabianych - zadanie w trakcie realizacji. *Development of algorithms for estimation of workpiece surface layer parameters. Task during realization.*
- Opracowanie systemu sterowania geometrycznego dla demonstratora inteligentnego systemu szlifowania oraz przeprowadzenie wstępnych badań weryfikujących jego działanie. *Development of the geometrical control system for intelligent grinding system demonstrator and conduction of preliminary experimental tests.*
- Przeprowadzono badania procesu szlifowania dla lotniczych i konwencjonalnych materiałów obrabianych w celu przygotowania danych dla modeli procesu szlifowania oraz weryfikacji tych modeli - zadanie w trakcie realizacji.

Zadania inteligentnego systemu szlifowania trudnoobrabialnych stopów lotniczych (Tasks of the intelligent grinding system)

- Automatyczny dobór najodpowiedniejszej ściernicy i chłodziwa dla danego materiału obrabianego z wykorzystaniem systemów baz danych. *Automatic selection of the most suitable grinding wheel and coolant for different materials being ground based on data bases.*
- Dobór parametrów technologicznych obróbki z wykorzystaniem systemów baz danych i opracowanych modeli procesu szlifowania. *Selection of grinding kinematic parameters with the use of data bases and grinding process models.*
- Identyfikacja różnych stanów procesu szlifowania, tj. drgań samowzbudnych, przypałów, itp. *Identification of different states of grinding process, i.e. chatter vibrations, thermal damages, etc.*
- Automatyczny wybór strategii algorytmów sterowania i optymalizacji procesu w zależności od konkretnego przypadku technologicznego. *Automatic selection of strategy of control algorithms and optimization of grinding process.*
- Automatyczna detekcja i kompensacja zużycia narzędzia ściernego. *Automatic compensation of the wear of grinding wheel. Selection of grinding kinematic parameters with the use of data bases and grinding process models.*
- Detekcja i kompensacja odkształceń geometrycznych przedmiotów obrabianych. *Compensation of elastic deformations of workpiece being ground.*
- Bieżąca modyfikacja trajektorii ruchu ściernicy w funkcji kształtu i wymiaru przedmiotu. *On-line modification of grinding wheel motion trajectory as a function of shape and the size of the workpiece being ground.*
- Automatyczna identyfikacja nieprawidłowo wykonanych lub uszkodzonych przedmiotów. *Automatic identification of incorrectly ground parts.*
- Automatyczne, minimalne obciążenia ściernicy w celu usuwania powstających falistości na ściernicy.

System sterowania geometrycznego

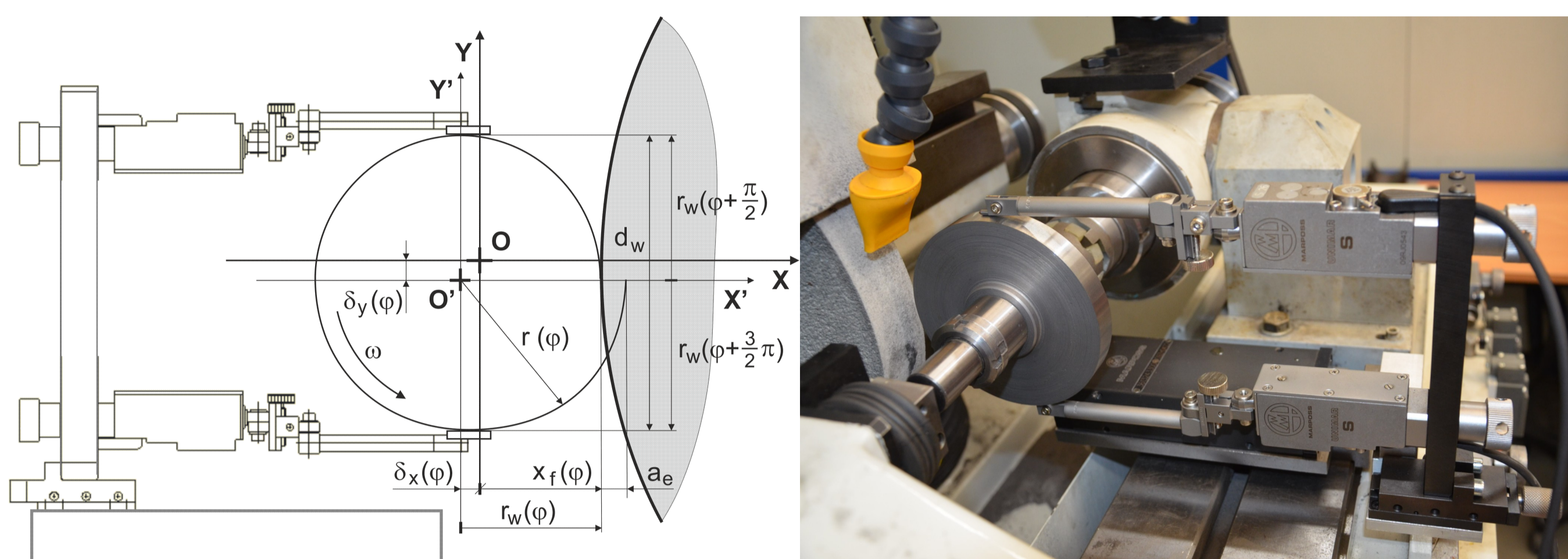
System sterowania geometrycznego będący składnikiem inteligentnego systemu szlifowania ma za zadanie optymalizację przebiegu procesu szlifowania poprzez kompensację odkształceń geometrycznych i cieplnych obrabianego przedmiotu oraz eliminację fazy wyiskrzania. Na rysunku 1 przedstawiono strukturę optymalnego cyklu szlifowania.



Fazy cyklu szlifowania:

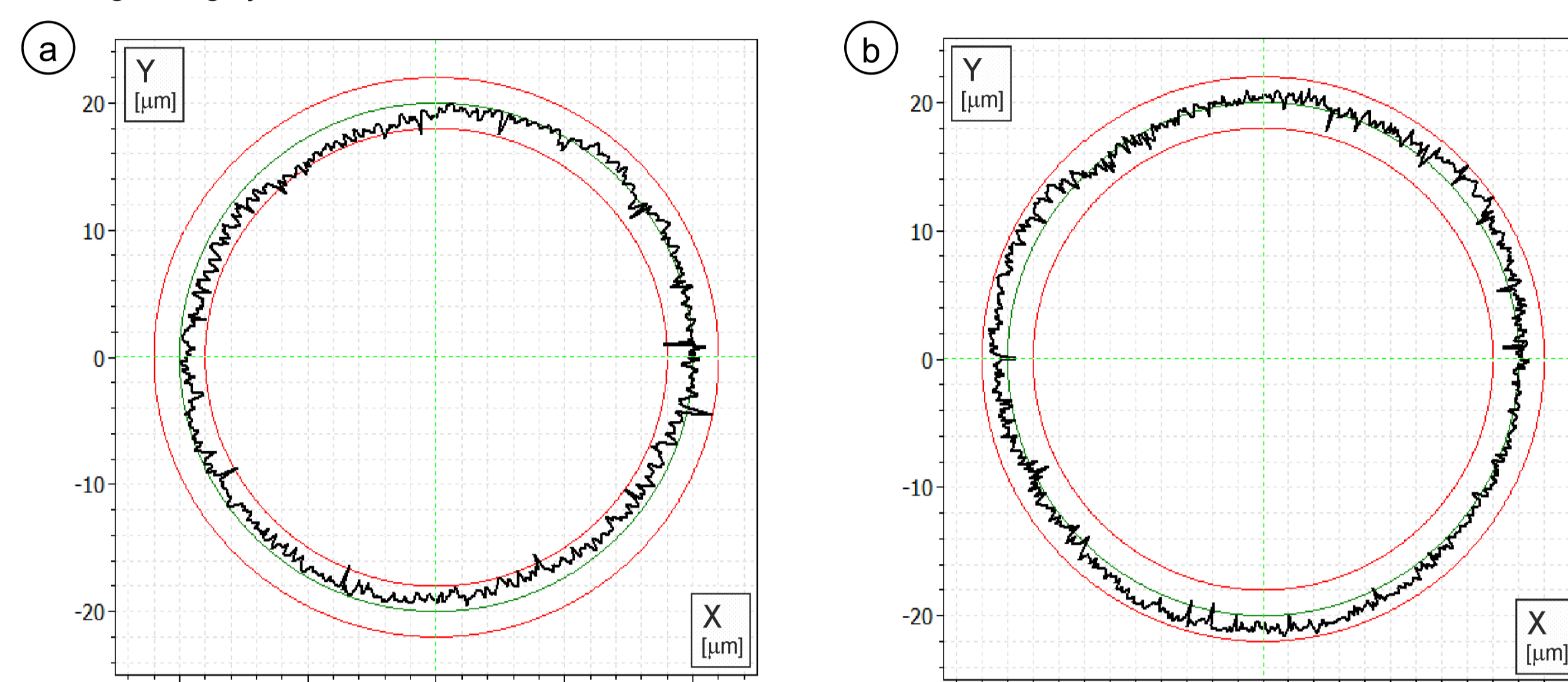
- Minimalizacja czasu trwania fazy niestacjonarnej obróbki w fazie szlifowania zgrubnego. Maksymalizacja wydajności przy ograniczeniu temperatury szlifowania.
- Faza szlifowania wykończeniowego minimalizująca odkształcenia cieplne przedmiotu do poziomu wynikającego z tolerancji docelowego wymiaru przedmiotu lub kompensacja odkształceń cieplnych.
- Usunięcie błędu kształtu wynikającego ze spiralnego toru ruchu narzędzia w czasie jednego obrotu wałka.
- Szybki odskok.

Przyjęte zależności geometryczne w strefie szlifowania dla sterowania geometrycznego oraz stanowisko badawcze z przyrządem do aktywnej kontroli wymiaru (rys. 2). Natomiast na rysunku 3 przedstawiono uzyskane zarysy przedmiotu dla tradycyjnego szlifowania z długim cyklem wyiskrzania (rys. 3a) oraz z kompensacją zakłóceń (rys. 3b).



Rys. 2. Zależności geometryczne w strefie szlifowania podczas sterowania adaptacyjnego geometrycznego opracowanego dla demonstratora inteligentnego systemu szlifowania oraz widok zainstalowanego przyrządu do aktywnej kontroli na stanowisku

Fig. 2. Geometrical relationships at the grinding zone during adaptive geometrical control developed for intelligent grinding system demonstrator and the view of active measurement device installed on the test stand

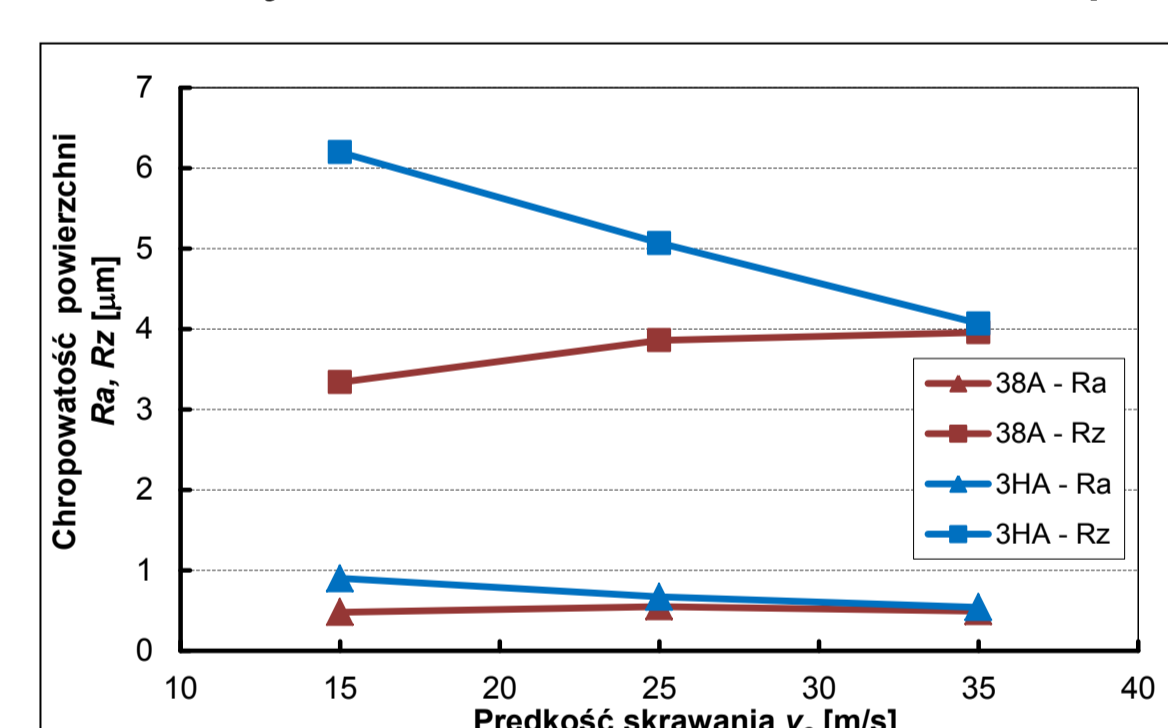


Rys. 3. Zarysy przedmiotu dla: a) klasycznego cyklu szlifowania z długim czasem wyiskrzania (czas trwania około 2 min); b) cyklu szlifowania z kompensacją zakłóceń (czas trwania około 25 sek.)

Fig. 3. Workpiece shapes for: a) classical grinding cycle with a long spark-out time (duration about 2 min); b) grinding cycle with disturbance compensation (duration time about 25 sec.)

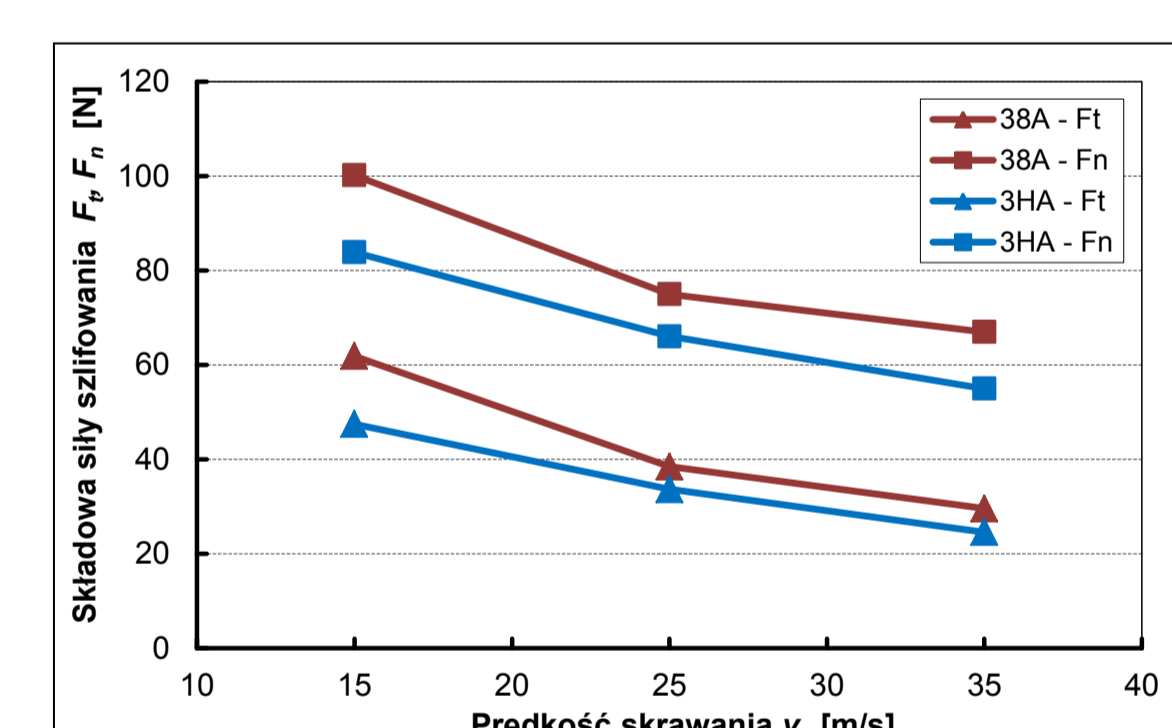
Przykładowe wyniki badań doświadczalnych procesu szlifowania

Badania przeprowadzono dla stopu tytanu Gr 19 (Ti3Al8V6Cr4Mo4Zr) i stopu Inconel 718 metodą wcinającą. Badania doświadczalne przeprowadzono w celu ustalenia przydatności wybranych ściernic ceramicznych, tj. z ziarnem z elektrokorundu szlachetnego 38A60K5VBE oraz 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_p wynoszącej 6 μ m. W efekcie dało to wartości Q_w równe 0,3, 0,6 i 1,2 mm³/mm·s. We wszystkich próbach szlifowania zmieniano ponadto prędkość skrawania v_s na czterech poziomach wynoszących dla stopu tytanu 10, 12,5, 15 i 20 m/s, natomiast dla stopu niklu: 15, 25 i 35 m/s. Na rysunkach od 4 do 6 przedstawiono charakterystyki dla stopu Inconel 718, natomiast na rysunkach od 7 do 9 dla stopu tytanu Gr 19.



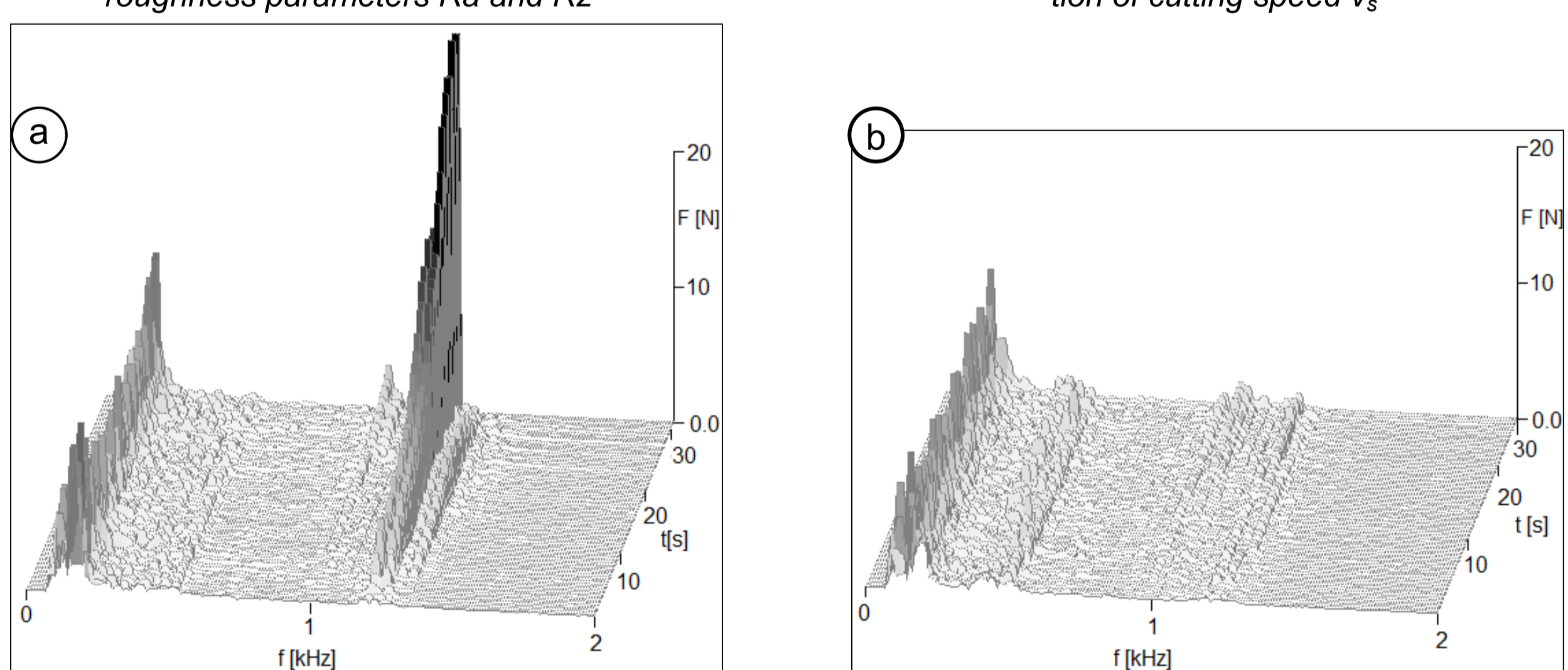
Rys. 4. Wpływ prędkości skrawania v_s na chropowatość powierzchni Ra i Rz

Fig. 4. Influence of cutting speed v_s on workpiece surface roughness parameters Ra and Rz



Rys. 5. Zmiany składowych siły szlifowania w funkcji prędkości skrawania v_s

Fig. 5. Changes of grinding force components as a function of cutting speed v_s

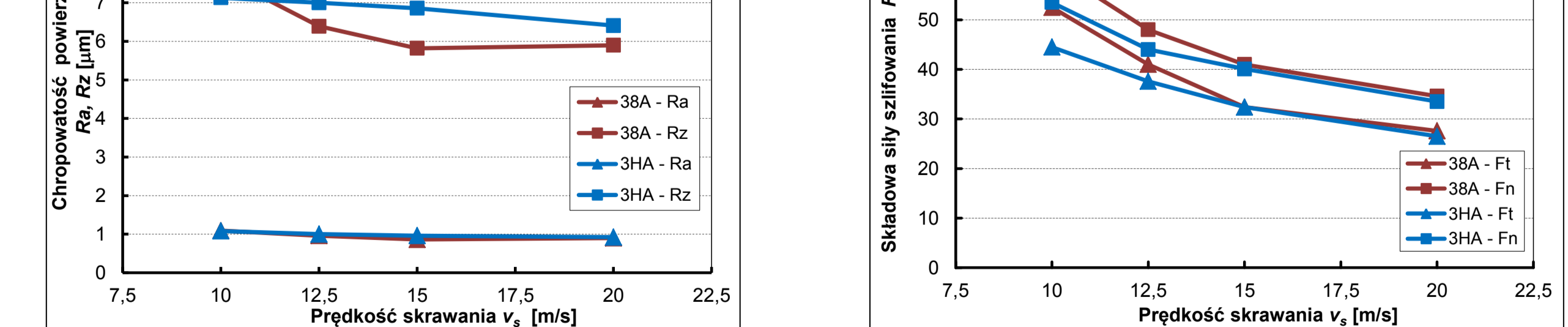


Rys. 6. Widmo amplitudy składowej odporowej siły szlifowania dla prędkości skrawania $v_s = 35$ m/s dla ściernicy:

a) 38A; b) 3HA

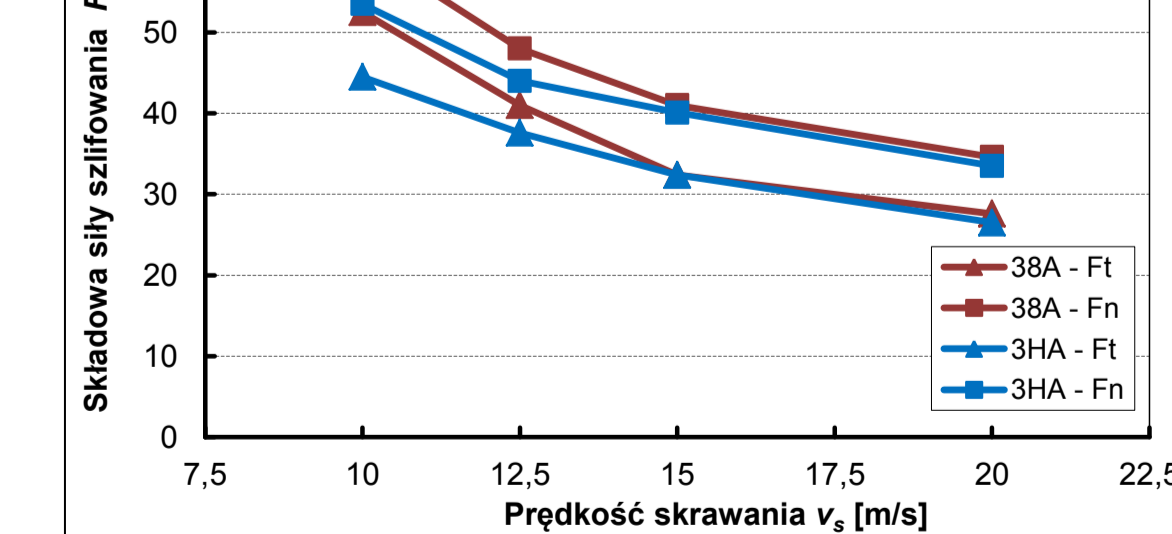
Fig. 6. Spectrum of normal grinding force component for grinding speed $v_s = 35$ m/s and grinding wheels:

a) 38A; b) 3HA



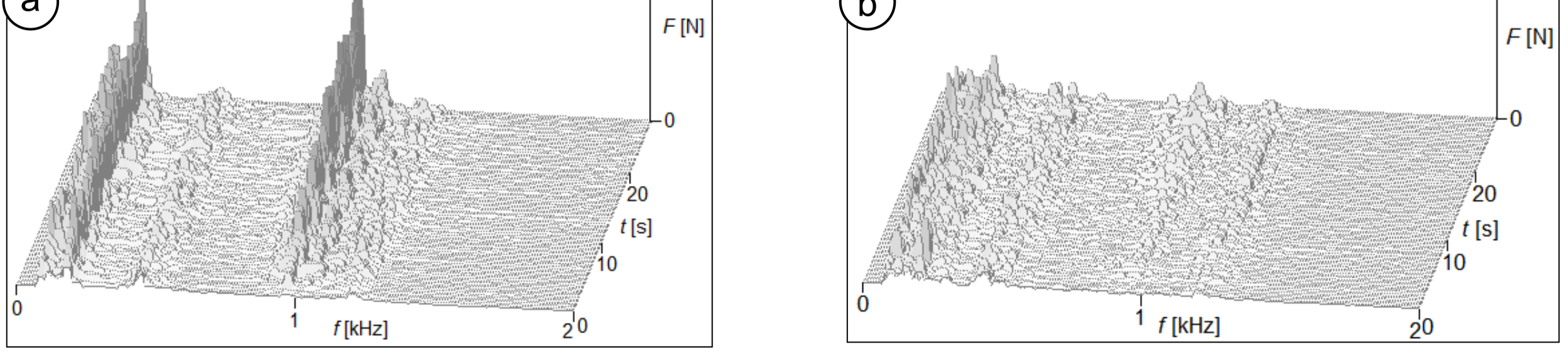
Rys. 7. Wpływ prędkości skrawania v_s na chropowatość powierzchni Ra i Rz

Fig. 7. Influence of grinding speed v_s on workpiece surface roughness parameters Ra and Rz



Rys. 8. Zmiany składowych siły szlifowania w funkcji prędkości skrawania v_s

Fig. 8. Changes of grinding force components as a function of cutting speed v_s



Rys. 9. Widmo amplitudy składowej normalnej siły szlifowania dla prędkości skrawania $v_s = 15$ m/s (3 cykl szlifowania) dla ściernicy: a) 38A; b) 3HA

Fig. 9. Spectrum of normal force component for grinding speed $v_s = 15$ m/s (third grinding cycle) and grinding wheels: a) 38A; b) 3HA

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych dla stopu Inconel 718 można stwierdzić, iż większe wartości prędkości skrawania pozwalają na uzyskanie niższych chropowatości szlifowanej powierzchni przedmiotu dla ściernicy z ziarnem mikrokrystalicznym, podczas gdy w przypadku ściernicy 38A wpływ ten jest praktycznie nieistotny. Zwiększenie prędkości skrawania powoduje znaczące zmniejszenie siły szlifowania, co sprzyja uzyskaniu wyższej dokładności geometrycznej szlifowanych przedmiotów i skróceniu cyklu szlifowania.

W przypadku stopu tytanu Gr19 zwiększenie prędkości skrawania powoduje zmniejszenie siły szlifowania, jednakże z powodu wzrostu temperatury skrawania prowadzi do intensywniejszego zużycia się obu rodzajów ściernicy, co wpływa na skrócenie okresu trwałości ściernicy.

Wnioski Conclusions

- Opracowany system sterowania geometrycznego dla inteligentnego systemu szlifowania pozwala na znaczące skrócenie czasu szlifowania przy uzyskaniu wymaganej dokładności geometrycznej przedmiotu.
- Developed geometrical control system allow for a significant reduction of grinding time while meeting required workpiece geometrical accuracy.
- Zastosowanie ściernicy z ziarnem mikrokrystalicznym 3HA060J8V114 Molelab w przypadku stopu Inconel 718 wydłuża znacząco okres trwałości ściernicy pomiędzy procesami kondycjonowania ściernicy.
- The use of grinding wheel with microcrystalline grain 3HA060J8V114 Molelab for grinding of Inconel 718 alloy significantly extends the wheel life.
- Maksymalna prędkość skrawania stopu Gr 19 w przypadku ściernicy elektrokorundowej wynosi około 12 m/s, natomiast dla ściernicy mikrokrystalicznej około 20 m/s.
- Maximum cutting speed for titanium Gr 19 alloy in the case of aluminium oxide grinding wheel is about 12 m/s, while for microcrystalline grinding wheel is about 20 m/s.

Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

- WSK "PZL-Rzeszów" SA - szlifowanie elementów cienkościennych wykonanych z trudnoobrabialnych stopów lotniczych.
- WSK "PZL-Kalisz" SA - szlifowanie pokrycia Metco 45VFNs o składzie 25,5 Cr, 10,5%Ni, 7,5%W, 0,5%C, reszta Co, na średnicy zewnętrznej.



Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym Collaboration with aviation industry

Przeprowadzono rozmowy z przedstawicielami firm: P.P.U.H. BRYK WITOLD BRYK oraz ULTRATECH Sp. z o.o. celem określenia możliwych do implementacji rozwiązań wypracowanych w ramach niniejszego projektu. Nawiązano współpracę z WSK i dokonano wyboru przedmiotów, które zostaną użyte jako próbki w badaniach doświadczalnych. Celem współpracy jest wybór ściernicy i optymalizacja warunków obróbki w celu zapewnienia powtarzalnych parametrów jakościowych produkowanych elementów lotniczych.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Zgłoszenia patentowe:

- System nadzoru procesu szlifowania na szlifierce kłowej do wałków, zwłaszcza przedmiotów wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych - P.408575
- Urządzenie do pomiaru topografii czynnej powierzchni ściernicy bezpośrednio na szlifierce (przekazane do Rzecznika Patentowego).

Referaty

- Lajmert P., Ostrowski D., Sikora M., Kruszyński B.: *Szlifowanie stopów tytanu na szlifierce kłowej do wałków*; Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej XXXVII.
- Sikora M., Lajmert P., Ostrowski D., Kruszyński B.: *Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do wałków*; Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej XXXVII.
- Lajmert P., Kruszyński B., Sikora M., Ostrowski D.: *Diagnostyka procesu szlifowania kłowego wałków*; XV Krajowa VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna METROLOGIA W TECHNIKACH WYTWARZANIA.
- Lajmert P., Ostrowski D., Sikora M., Kruszyński B.: *Stanowisko do badania procesu szlifowania wgłębnego wałków*; XV Krajowa VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna METROLOGIA W TECHNIKACH WYTWARZANIA.
- Lajmert P., Kruszyński B., Sikora M., Ostrowski D.: *Application of exploratory data analysis methods for supervision of cylindrical plunge grinding process*, XXV Real and Virtual Manufacturing Karpacz 2014.
- Lajmert P., Kruszyński B., Sikora M., Wrąbel D., Ostrowski D.: *Application of experimental and numerical modal analysis to characterize dynamical properties of grinding machine*; XXV Real and Virtual Manufacturing Karpacz 2014.

Publikacje

- Lajmert P., Ostrowski D., Sikora M., Kruszyński B.: *Szlifowanie stopów tytanu na szlifierce kłowej do wałków*; Mechanik, nr 8/9 2014, s. 245-248, ISSN: 0025-6552.
- Sikora M., Lajmert P., Ostrowski D., Kruszyński B.: *Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do wałków*; Mechanik, nr 8/9 2014, s. 289-292, ISSN: 0025-6552.
- Lajmert P., Kruszyński B., Sikora M., Ostrowski D.: *Diagnostyka procesu szlifowania kłowego wałków*; Mechanik, nr 8/9 2014, s. 187-194, ISSN: 0025-6552.
- Lajmert P., Ostrowski D., Sikora M., Kruszyński B.: *Stanowisko do badania procesu szlifowania wgłębnego wałków*; Mechanik, nr 8/9 2014, s. 195-202, ISSN: 0025-6552.

Prace magisterskie

- Sosnowski Daniel: *Badanie sił skrawania i chropowatości powierzchni podczas szlifowania wgłębnego stopu niklu*. Promotor: Prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński.
- Wieteska Krzysztof: *Badanie sił skrawania i chropowatości powierzchni podczas szlifowania wgłębnego stopu tytanu*. Promotor: Prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński.
- Szadkowski Radosław: *Szlifowanie materiałów i stopów trudnoobrabialnych*. Promotor: Prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński.
- Świerczyński Jakub: *Nowe sposoby chłodzenia w procesie szlifowania i ich wpływ na koszty*. Promotor: dr hab. inż. Ryszard Wójcik
- Kaszewski Rafał: *Wpływ procesu szlifowania na odkształcenia przedmiotów*. Promotor: dr hab. inż. Ryszard Wójcik
- Goio Zamora: *Machinability of Superalloys*, Praca zrealizowana w International Faculty of Engineering, 2010 rok, Promotor: Prof. Bogdan Kruszyński
- Tomasz Niedźwiecki: *Automatyzacja procesu obciążania ściernicy na szlifierce kłowej do wałków ze sterowaniem wykorzystującym sterownik PLC*. Promotor: dr inż. Paweł Lajmert

Prace habilitacyjne

- Dr inż. Paweł Lajmert: *Inteligentny system kompensacji zakłóceń w procesie szlifowania kłowego wałków*, praca w trakcie realizacji.