# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym
# Modern material technologies in aerospace industry

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO

KONFERENCJA
RADY PARTNERÓW CZT AERONET
I PANELE EKSPERTÓW
9-10 Grudnia 2013

**ZB 1**

## Opracowanie zaawansowanych procesów obróbki HSM trudnoobrabialnych stopów lotniczych
## Development of advanced processes of HSM of almost unworkable aeronautical alloys

Politechnika Lódzka, Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska

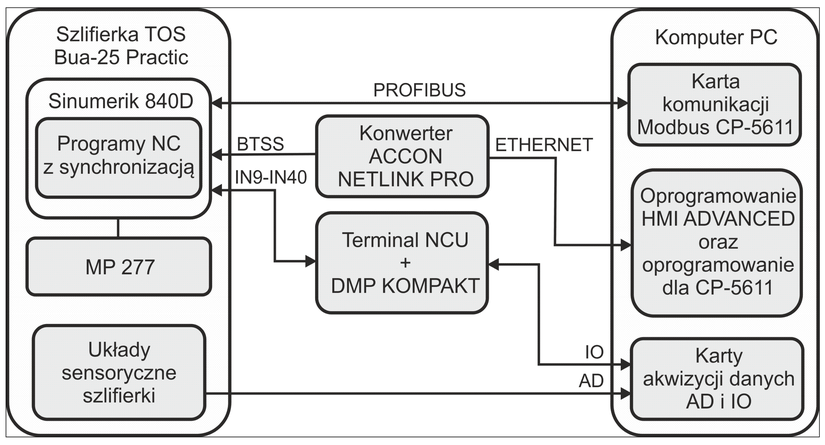
### Wyniki badań
*Results*

- Przebudowa wrzeciennika ściernicy szlifierek TOS BUA-25 oraz Tacchella w celu zamontowania piezoelektrycznych czujników siły firmy Kistler. Przeprowadzono wzorcowanie torów pomiaru składowych odporowej i stycznej siły szlifowania.
  *Conversion of grinding wheel headstock of TOS BUA-25 and Tacchella grinding machines in order to mount piezoelectric three axis Kistler force sensors. Calibration of measurement channels of tangential and normal force components.*
- Opracowano modele procesu szlifowania (siły, odkształceń sprężystych, dynamiki procesu 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.*
- 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.
  *Research of grinding process for conventional and hard to machine materials in order to prepare data for grinding process models. Task during realization.*

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

- Automatyczny dobór najodpowiedniejszej ściernicy dla danego materiału obrabianego z wykorzystaniem systemów baz danych.
  *Automatic selection of the most suitable grinding wheel 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, przypaleń, 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 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 obciąganie ściernicy w celu usuwania powstających falistości na ściernicy.
  *Automatic conditioning of the grinding wheel so as to eliminate grinding wheel waviness errors.*

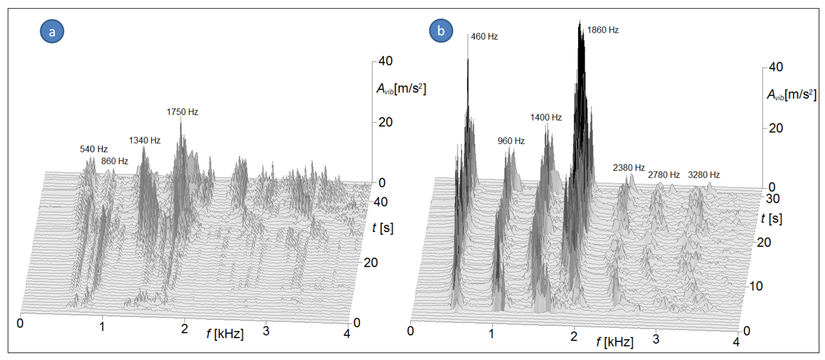
### Stanowisko badawcze dla zmodernizowanej szlifierki TOS Bua-25



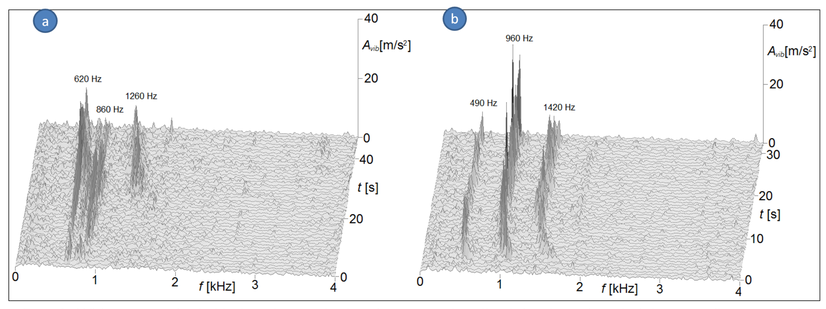

*Rys. 1. Struktura komunikacji ze szlifierką kłową do wałków TOS Bua-25 w ramach inteligentnego systemu szlifowania.*
*Fig. 1. Structure of communication with cylindrical grinding machine TOS Bua-25 within the confines of intelligent grinding system.*

### Przykładowe wyniki badań doświadczalnych procesu szlifowania

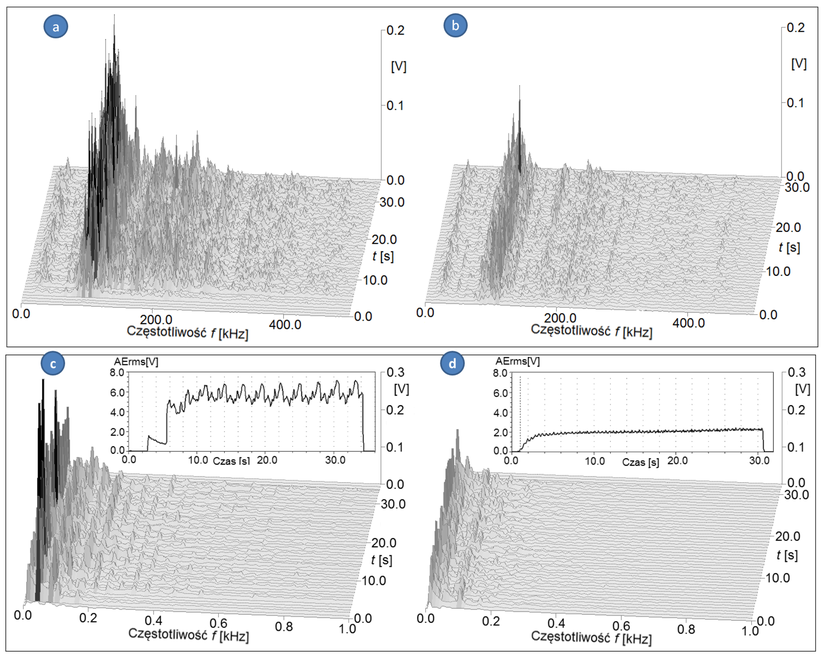
Badania przeprowadzono dla stali 30HMJ, stopu tytanu TB-2 i stopów niklu metodą wcinającą przy prędkości skrawania $v_s$ = 33 - 50 m/s ściernicą 99A60k9V firmy Tyrolit. Podczas badań prędkość dosuwu ściernicy $v_f$ wynosiła 2, 6 lub 10 µm/s, natomiast prędkości obwodowe przedmiotu $v_w$ wynosiły 100, 600 i 2000 mm/s ($d_w$ = 100 mm). Podczas prób rejestrowano sygnały składowych siły szlifowania, sygnały drgań na koniku przedmiotu i wrzecienniku ściernicy, surowy sygnał emisji akustycznej oraz jego wartość skuteczną.



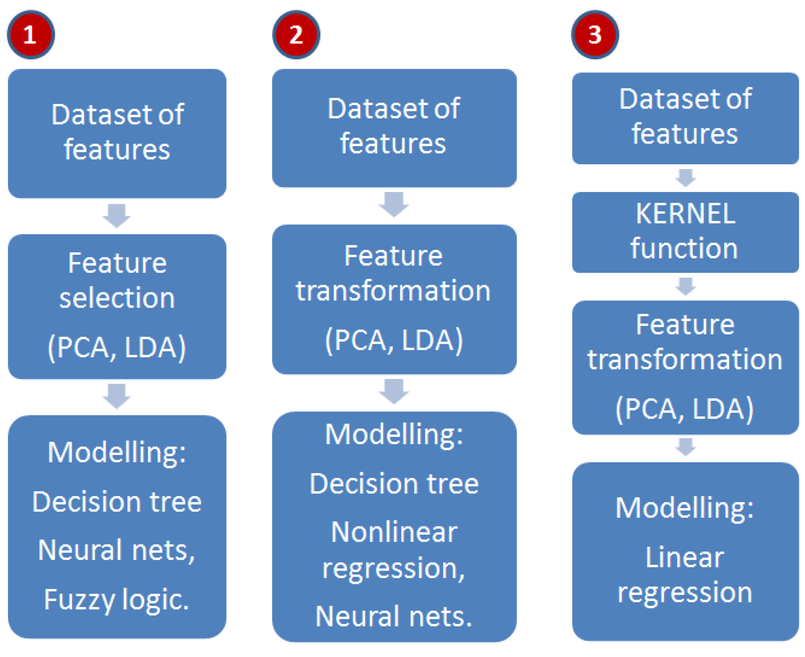

*Rys. 2. Widmo sygnału drgań z kła konika dla: a) szlifowania w strefie drgań regeneracyjnych ściernicy ($v_f$ = 6 µm/s, $v_w$ = 0.6 m/s, 4 próba po zeszlifowaniu $V'_w$ = 330 mm³/mm); b) drgań regeneracyjnych na przedmiocie ($v_f$ = 6 µm/s, $v_w$ = 2 m/s, 1 próba szlifowania).*
*Fig. 2. Amplitude spectrum of vibration signal for: a) grinding wheel chatter vibrations ($v_f$ = 6 µm/s, $v_w$ = 0.6 m/s, 4-th grinding test after removal of $V'_w$ = 330 mm³/mm); b) workpiece chatter vibrations ($v_f$ = 6 µm/s, $v_w$ = 2 m/s, 1 grinding test).*




*Rys. 3. Widmo normalnej składowej sygnału drgań na wrzecienniku ściernicy odpowiadające wynikom z rys. 2.*
*Fig. 3. Amplitude spectrum of vibration signal on grinding wheel headstock corresponding to the results from fig. 2.*




*Rys. 4. Widmo surowego sygnału emisji akustycznej AE (a i b) oraz sygnału wartości skutecznej $AE_{RMS}$ (c i d) dla: a, c) pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu ($Q'_w$ =1.9 mm³/mm s, $v_w$ = 0.1 m/s); b, d: optymalnych warunków szlifowania ($Q'_w$ =1.9 mm³/mm s, $v_w$ = 0.6 m/s).*
*Fig. 4. Spectrum of raw acoustic emission signal AE (a, b) and root mean square value of AE (c, d) for: a, c) grinding at region of workpiece thermal damages ($Q'_w$ =1.9 mm³/mm s, $v_w$ = 0.1 m/s); b, d: optimal grinding conditions ($Q'_w$ =1.9 mm³/mm s, $v_w$ = 0.6 m/s).*



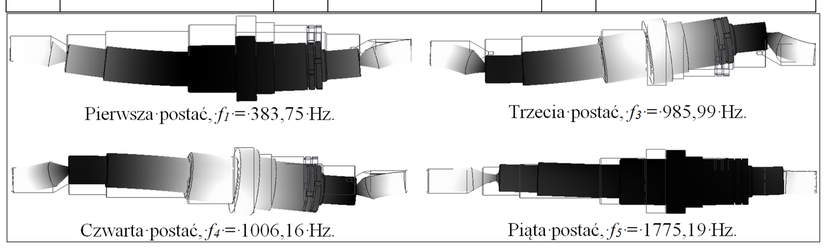

*Rys. 5. Opracowane metody modelowania i diagnostyki procesu szlifowania.*
*Fig. 5. Developed methods for grinding process modelling and diagnostics.*

### Eksperymentalna i teoretyczna analiza modalna

Teoretyczną analizę modalną przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie do modelowania CAD Autodesk Inventor Professional. Analizie poddano układ wałek-kły. Przy realizacji analizy teoretycznej, obszar rozważanych częstotliwości ograniczono do zakresu 2000 Hz. W tabeli 1 zestawiono wyznaczone wartości częstotliwości drgań własnych przedmiotu w kłach, natomiast na rysunku 6 przedstawiono otrzymane postacie drgań własnych dla poszczególnych częstotliwości. W wyniku przeprowadzonej analizy teoretycznej ustalono, że tylko pierwsze cztery postacie drgań własnych przedmiotu są zgodne z postaciami uzyskanymi podczas eksperymentalnej analizy modalnej.

*Tabela. 1. Częstotliwości drgań własnych analizowanego przedmiotu.*
*Table. 1. Vibration modes frequencies of the analysed workpiece.*

| Lp. | Częstotliwość drgań własnych *f* [Hz] | Lp. | Częstotliwość drgań własnych *f* [Hz] | Lp. | Częstotliwość drgań własnych *f* [Hz] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. | 383,75 | 3. | 985,99 | 5. | 1775,19 |
| 2. | 393,20 | 4. | 1006,16 | | |




*Rys. 6. Postacie drgań własnych analizowanego przedmiotu obliczone w programie Autodesk Inventor.*
*Fig. 6. Vibration modes of the analysed workpiece calculated in Autodesk Inventor program.*

### Wnioski
*Conclusions*

- Opracowane oprogramowanie pomiarowe pozwala na rejestrację i analizę mierzonych sygnałów w czasie rzeczywistym.
  *Development of grinding process models. A high correlation of the developed models with grinding results was obtained.*
- Opracowane algorytmy diagnostyki i optymalizacji pozwalają na wczesne wykrywanie niepożądanych stanów procesu, np. przypaleń czy drgań samowzbudnych i korektę parametrów kinematycznych procesu szlifowania.
  *Developed diagnostic and optimization algorithms allow for detection of early symptoms of undesired process states, i.e. grinding burn or chatter vibrations and corrections of grinding process basic kinematic parameters.*

### Wskaźniki realizacji celów projektu
*Indicators of the project*

**Zgłoszenia patentowe (przekazane do Rzecznika Patentowego)**

- System nadzorowania procesu szlifowania na szlifierce kłowej do wałków, zwłaszcza przedmiotów wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych.
- Urządzenie do pomiaru topografii czynnej powierzchni ściernicy bezpośrednio na szlifierce.

**Referaty**

- Lajmert P., Kruszyński B.: ***A comparison of data mining methods for modelling and diagnostics of cylindrical plunge grinding process of hard-to-machine materials,*** AIRTEC 2013 International Congress.
- Lajmert P., Kruszyński B.: ***Zastosowanie metod eksploracji danych do nadzorowania procesu szlifowania kłowego wałków***, XXXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 2013.
- Lajmert P., Kruszyński B., Wrąbel D., Sikora M.: ***Stanowisko do wieloaspektowego badania procesu szlifowania kłowego wałków***, XXXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 2013.
- Lajmert P., Sikora M., Kruszyński B., Wrąbel D.: ***Zastosowanie eksperymentalnej i numerycznej analizy modalnej do określenia właściwości dynamicznych szlifierki kłowej do wałków***, XXXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 2013.
- Grdulska A., Rosik R.: ***Wpływ materiału ściernego na stan warstwy wierzchniej podczas szlifowania stopów tytanu***, XXXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 2013.
- Rosik R., Grdulska A.: ***Określenie granicy stężenia glikolu propylenowego na stereometrię warstwy wierzchniej w procesie szlifowania***, XXXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów 201-3.

**Publikacje**

- Lajmert P., Kruszyński B.: ***Zastosowanie metod eksploracji danych do nadzorowania procesu szlifowania kłowego wałków***, Mechanik, nr 8/9 2013, ISSN: 0025-6552, str. 291-298.
- Lajmert P., Kruszyński B., Wrąbel D., Sikora M.: ***Stanowisko do wieloaspektowego badania procesu szlifowania kłowego wałków***, Mechanik, nr 8/9 2013, ISSN: 0025-6552, str. 273-282.
- Lajmert P., Sikora M., Kruszyński B., Wrąbel D.: ***Zastosowanie eksperymentalnej i numerycznej analizy modalnej do określenia właściwości dynamicznych szlifierki kłowej do wałków***, Mechanik, nr 8/9 2013, ISSN: 0025-6552 str. 283-293.
- Grdulska A., Rosik R.: ***Wpływ materiału ściernego na stan warstwy wierzchniej podczas szlifowania stopów tytanu***, Mechanik, nr 8/9 2013, ISSN: 0025-6552, str. 152-159.
- Rosik R., Grdulska A.: ***Określenie granicy stężenia glikolu propylenowego na stereometrię warstwy wierzchniej w procesie szlifowania***, Mechanik, nr 8/9 2013, ISSN: 0025-6552, str. 341-348.

**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 obciągania 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.

**PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO**