

# Projekt kluczowy Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Opracowanie zaawansowanych procesów obróbki HSM trudnoobrabialnych stopów lotniczych

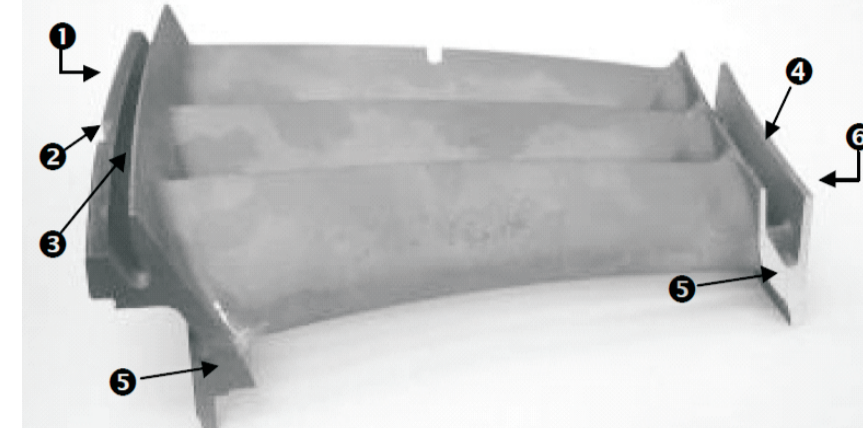
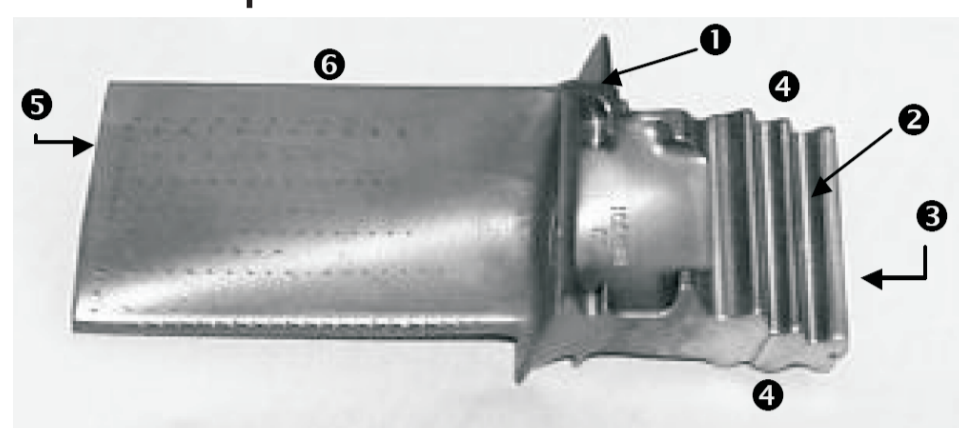
Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Łódzka, Politechnika Warszawska

### Wyniki badań

Szlifowanie kształtowe zamka łopatk  
oraz stopki

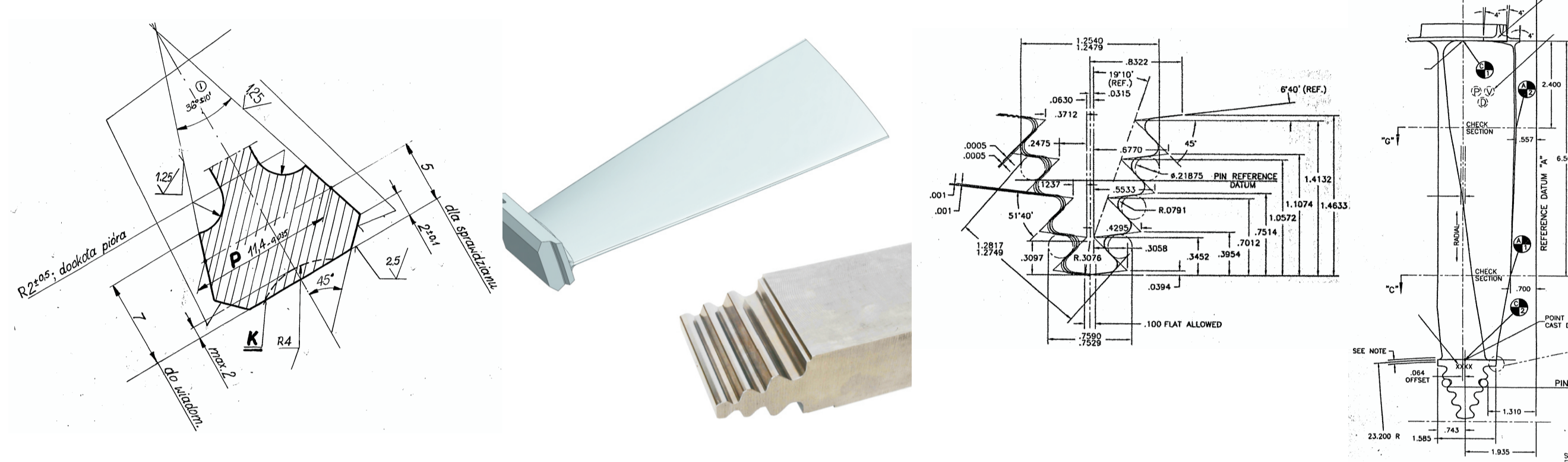
Wieloosiowe szlifowanie numeryczne łukowych  
zamków łopatk

- 1 półka
- 2 zamek
- 3 stopka
- 4 pow. czołowe zamka
- 5 pow. czołowa pióra
- 6 pióro



Przedstawione powierzchnie łopatk 1 - 6 kształtowane są poprzez szlifowanie. Ze względu na krzywoliniowy kształt powierzchni wynikający z mocowania łopatek do wału i dysku muszą być one obrabiane poprzez wieloosiowe szlifowanie numeryczne.

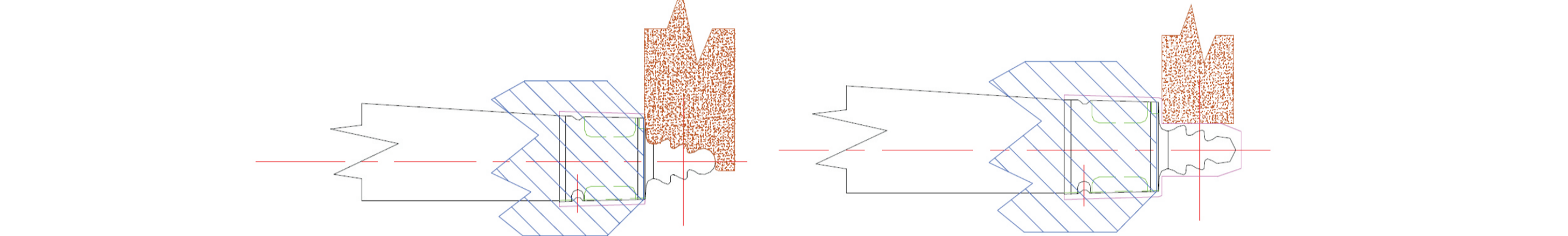
Dokonywanie doboru wyrobów lotniczych do badań i wdrożeń – łopatk.



### Analiza technologii szlifowania zamków łopatek

Szlifowanie wykonawcze

Szlifowanie zgrubne



### Technologie stosowane w wiodących w regionie zakładach produkcyjnych wytwarzających elementy silników lotniczych: Hispano-Suiza Polska Sp. z o.o., Ultratech Sp. z o.o.:

- Szlifowanie ściernicami CBN o spoiwie galwanicznym oraz ściernicami konwencjonalnymi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- Obciążanie za pomocą rolki diamentowej, rolki metalowej, obciążacza stałego diamentowego
- Szlifowanie materiałów lotniczych (stopy Ti, Cr, Ni, Co, Al., np. Inconel 738, Inconel 718)
- Szlifowanie łopatek w kastach zalanych stopem Wooda
- Szlifowanie w technologii: duża prędkość posuwu – mała głębokość oraz mały posuw pełzający - szlifowanie głębokie

### Analiza metod obciążania ściernic w szlifowaniu zamków łopatek



### Koncepcje modyfikacji doprowadzenia cieczy obróbkowej

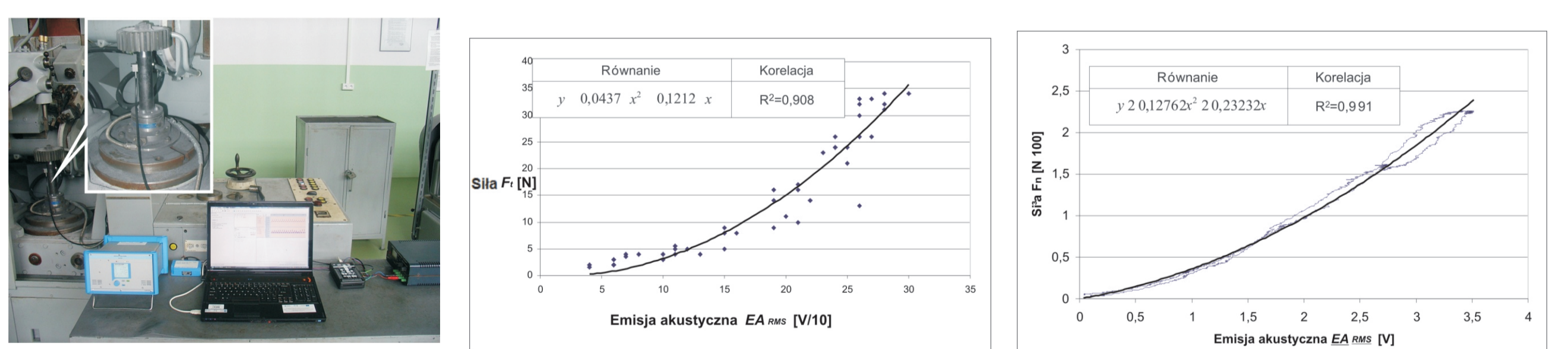
Koncepcja doprowadzenia chłodziwa poprzez dysze o kształcie odpowiadającym zarysowi ściernicy.

Koncepcja doprowadzenia chłodziwa w kierunku prostym do powierzchni ściernicy. Ciecz obróbkowa wbia się w ściernicę i eliminuje strefę powietrza.

Cechy metody:

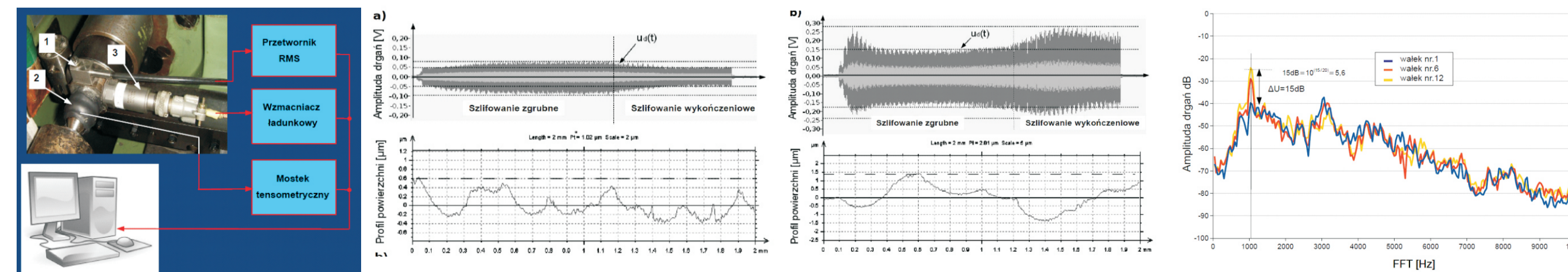
- Redukcja częstotliwości i parametrów obciążania ściernicy,
- Wymywanie ściernicy powodujące wypłukiwanie wiórów oraz wypłukiwanie spoiwa zapewniające utrzymanie odpowiedniej ostrości ściernicy
- Wnikanie chłodziwa w ściernicę powodujące lepsze chłodzenie przedmiotu a przez to uniknięcie uszkodzeń obrabianej powierzchni

### Badania korelacji emisji akustycznej ze składowymi siły szlifowania

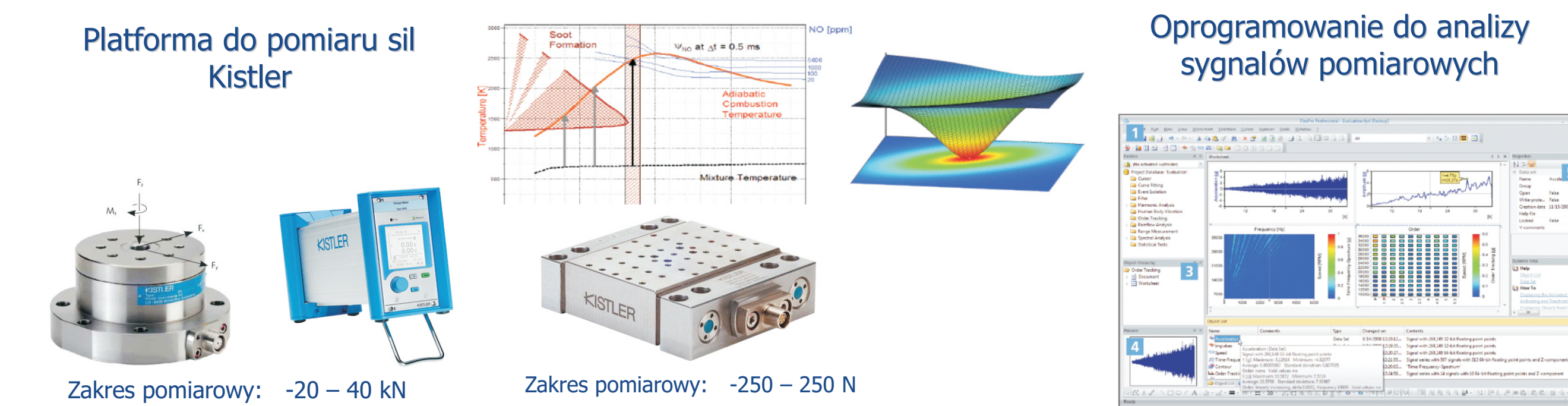


- Zastosowana aparatura badawcza:
- siłomierz piezoelektryczny Kistler 9272
  - czujnik emisji akustycznej Kistler 8152B2
  - wzmacniacz sygnału Kistler 5019B
  - przetwornik RMS Kistler 5125B1
  - karta pomiarowa Keithley KUSB-3108
  - komputer

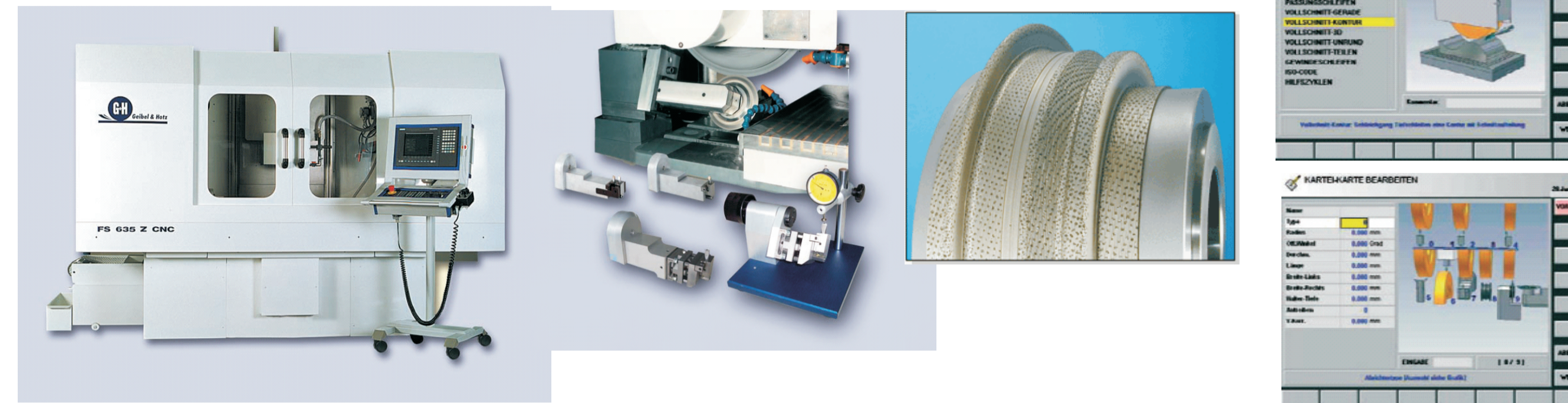
### Badanie charakterystyki zużycia ściernicy z wykorzystaniem drgań



### Potencjał techniczny – aparatura badawcza



### Potencjał techniczny – zakup w 2011r.



### Wnioski

- Wyznaczona korelacja pomiędzy emisją akustyczną a składowymi siły szlifowania styczną i normalną umożliwia wykorzystanie emisji akustycznej do diagnostyki procesu szlifowania w przypadkach gdy nie będzie możliwe zamontowanie siłomierza.
- Należy przeprowadzić dobór materiałów ściernych oraz charakterystyki ściernic dla procesu szlifowania materiałów trudnoobrabialnych typu Inconel.
- przeprowadzenie badań doświadczalnych w celu sprawdzenia jakością uzyskiwanej powierzchni, opracowania specjalnej konstrukcji dyszy doprowadzającej chłodziwo o kształcie odpowiadającym zarysowi ściernicy oraz badania zastosowania dyszy doprowadzającej chłodziwo bezpośrednio na ściernicę w kierunku prostym do jej powierzchni.
- Ze względu na różne metody i techniki obciążania ściernicy przedmiotem badań będzie proces obciążania wraz z doбором optymalnej metody oraz konstrukcji obciążacza. Przeprowadzone zostaną badania zastosowania następujących obciążaczy: obciążacz stały z profilem wyciętym z płytki diamentowej, obciążacz stały profilem z nasypem diamentowym, obciążacz rolkowy profilem metalowy, obciążacz rolkowy profilem z nasypem diamentowym oraz obciążacz rolkowy, którego tor przemieszczania sterowany jest numerycznie)
- Należy przeprowadzić badania w zakresie zużycia ściernicy oraz doboru parametrów technologicznych w celu poprawnego przebiegu procesu obróbki. Zakres badań będzie obejmował m.in. rejestrację emisji akustycznej, drgań oraz sił w procesie szlifowania. Szlifowane przedmioty będą poddawane kontroli w zakresie jakości powierzchni oraz dokładności kształtu.

### Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

W związku z realizacją zadania ZB1, podzadania 1.2 - wieloosiowego szlifowania numerycznego złożonych powierzchni elementów silników lotniczych nawiązano współpracę z następującymi przedsiębiorstwami związanymi z przemysłem lotniczym:

- **Ultratech Sp. z o.o.** Współpraca dotyczy doskonalenia technologii szlifowania zamków łopatek silników lotniczych. Przeprowadzona została analiza technologii stosowanych w firmie Ultratech i opracowano wnioski będące wytycznymi do prowadzenia badań doświadczalnych. Planuje się wdrożenie otrzymanych wyników w produkcji przemysłowej łopatek w firmie Ultratech. Głównymi celami badań będą: optymalizacja parametrów technologicznych, modyfikacja doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej do strefy obróbki w celu zwiększenia wydajności chłodzenia, dobór charakterystyki ściernicy, modyfikacja technologii obciążania ściernicy.
- **Hispano Suiza Polska Sp. z o.o.** Przeprowadzona została analiza technologii szlifowania zamków łopatek w firmie Hispano Suiza. Otrzymane informacje przyczyniły się do sprecyzowania problemów jakie towarzyszą obróbce łopatek oraz opracowania planu badań.
- **MTU Aero Engines Polska Sp. z o.o.** Planowane jest nawiązanie współpracy w 2011r.

### Opracowane zagadnienia badawcze do realizacji:

- opracowanie specjalnej konstrukcji dyszy doprowadzającej chłodziwo
- badania zastosowania dyszy doprowadzającej chłodziwo bezpośrednio na ściernicę w kierunku prostym do jej powierzchni
- dobór parametrów technologicznych, materiałów ściernych oraz charakterystyki ściernicy dla procesu szlifowania materiałów trudnoobrabialnych typu Inconel
- badania zużycia ściernicy w trakcie szlifowania stopów trudnoobrabialnych
- dobór optymalnej technologii obciążania oraz konstrukcji obciążaczy

### Wyniki badań

W przemyśle lotniczym często stosowane są trudnoobrabialne materiały jak stal nierdzewna, tytan, czy Inconel. Obróbka tych materiałów jest zagadnieniem stosunkowo nowym i stąd brakuje zgromadzonych doświadczeń dotyczących najbardziej wydajnych, ekonomicznych warunków skrawania tych materiałów. Podejmowane są różne próby poprawienia wydajności skrawania tych materiałów, przy jednoczesnym zachowaniu trwałości ostrza w rozsądnych granicach. Jednym ze sposobów na wydłużenie czasu skrawania pojedynczym ostrzem jest zastosowanie narzędzi z obrotowymi płytkami. Jednak brakuje wciąż kompleksowych badań w zakresie efektywności obróbki za pomocą tego typu narzędzi. Do realizacji badań wykorzystano handlowo dostępne narzędzia typu SPRT (Self-Propelled Rotary Tool, czyli narzędzie z płytką obracającą się na skutek oddziaływania wióra na powierzchnię natarcia) firmy Mitsubishi Carbide z płytkami z węgla spiekanego (rys. 1). W ramach projektu przeprowadzono badania bicia i sztywności narzędzi, badania wpływu parametrów skrawania na równomierność prędkości obrotowej ostrza, badania wpływu parametrów skrawania na siły skrawania, wpływu obrotu płytki na fluktuacje sił skrawania, badania wpływu parametrów skrawania na jakość powierzchni obrabianej, przeprowadzono badania doboru parametrów skrawania do stali, tytanu i Inconelu, porównano wydajność skrawania oraz trwałość ostrza w porównaniu z tradycyjnymi narzędziami podczas obróbki Inconelu. W niniejszej prezentacji przedstawiono wybrane jedynie wybrane zagadnienia, nie omawiane wcześniej w ogólnie dostępnych źródłach literaturowych.



Rys. Nóż SPRT firmy Mitsubishi, oprawka RRSRD 2525M12, materiał ostrza: TF15 oraz US 735

Badania bicia wykonano podczas swobodnego obrotu płytki oraz podczas obrotu wymuszonego obróbką. Punkty pomiarowe oraz wyniki pomiaru bicia przedstawiono na rys. 2.

Tabela 1. Wyniki pomiaru bicia

punkt pomiarowy	bicie [mm]		
	1	2	3
swobodny obrót	0,018	0,017	0,005
obrót podczas obróbki	0,03	-	-

Przeprowadzone badania wykazały, że narzędzia wykazują się dużą wartością bicia zarówno podczas obrotu swobodnego jak i podczas skrawania. Jak wykazały dalsze badania bicie to przekłada się na jakość powierzchni obrabianej.

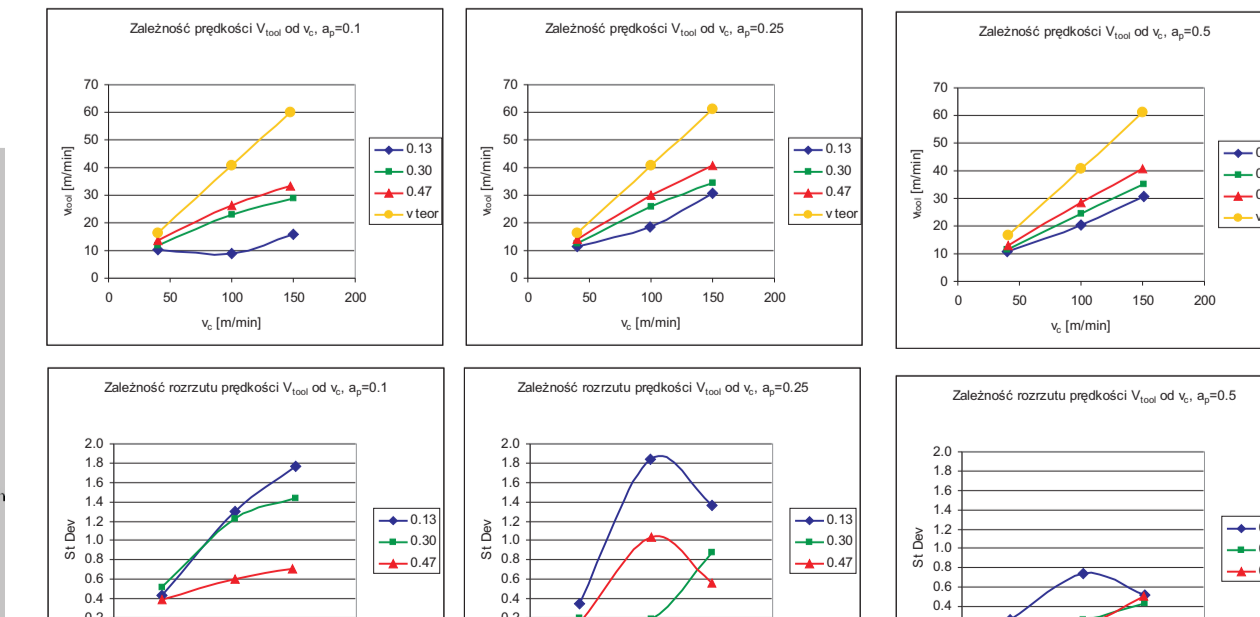
### Pomiary równomierności prędkości obrotowej

Pomiary przeprowadzono podczas próby pracą z różnymi parametrami skrawania wykorzystując sygnały z czujnika bezkontaktowego (rys. 3). Za pomocą specjalnego programu (rys. 4) wykonano analizę wpływu parametrów skrawania wartość oraz równomierność (wyrażoną za pomocą odchylenia standardowego) prędkości obrotowej, a wyniki analizy przedstawiono na rys. 5.



Rys. 3 Sposób pomiaru prędkości obrotowej

Rys. 4 Program do analizy prędkości obrotowej płytki

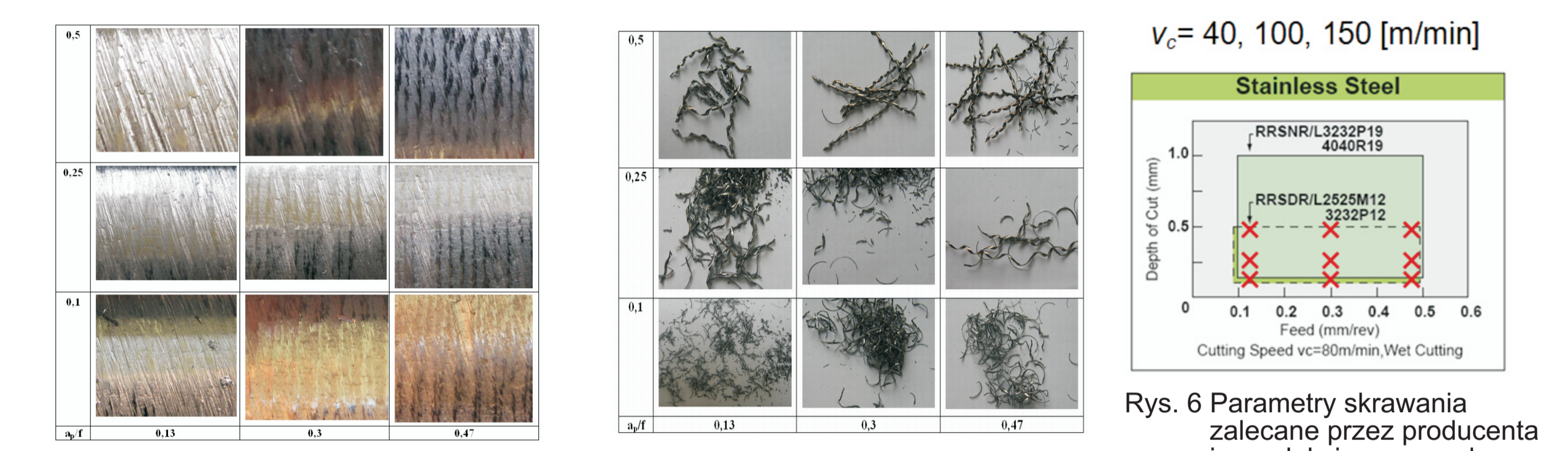


Rys. 5 Wyniki pomiarów wartości i rozrzutu prędkości obrotowej płytki w zależności od prędkości skrawania

Badania wykazały, że narzędzia SPRT charakteryzują się dużą nierównomiernością obrotu, zwłaszcza dla małych przekrojów warstwy skrawanej. Ponadto wyznaczone prędkości obrotowe są niższe od teoretycznej prędkości płytki, wynikającej z zależności geometrycznych. Najlepsze rezultaty otrzymano dla największej głębokości skrawania (ap=0.5) i największego posuwu (0.47). Nierównomierność prędkości obrotowej wynika z zatrzymywania płytki przez wióry oplatające płytkę i przekłada się na zdolność odprowadzania ciepła przez płytkę.

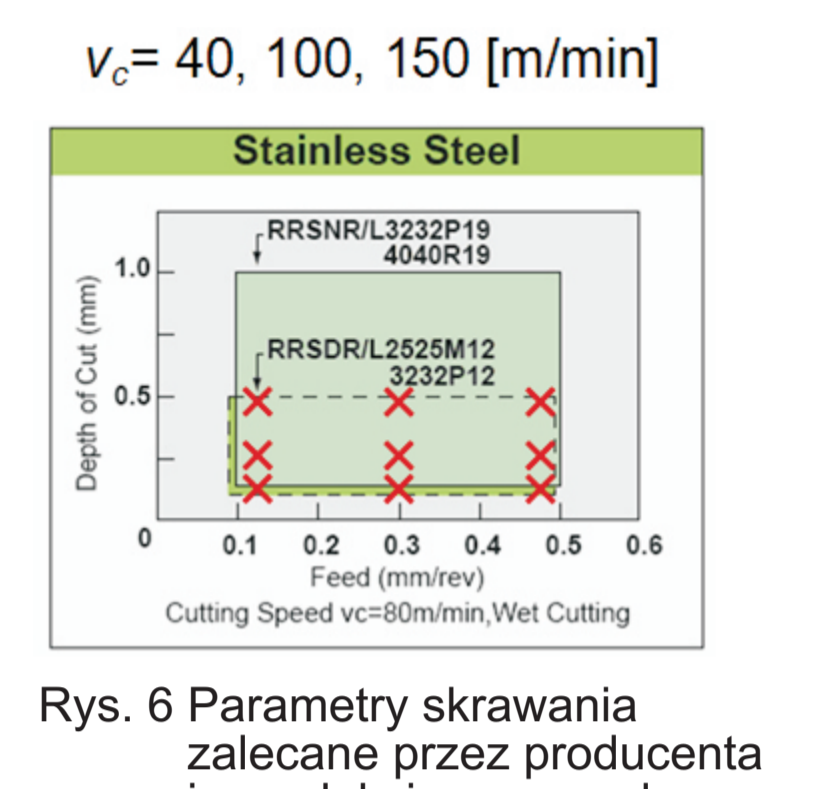
### Dobór parametrów do toczenia stali

Badania przeprowadzono wykonując skrawanie na sucho stali konstrukcyjnej z różnymi parametrami (rys. 6) na tradycyjnej tokarce, TUD 50. Badania miały na celu sprawdzenie wpływu parametrów skrawania na jakość powierzchni obrabianej, siły skrawania i postać wiórów. Na rys. 7 przedstawiono fotografie powierzchni obrabianej, a na rys. 8 postaci wiórów w zależności od głębokości skrawania i posuwu, dla prędkości skrawania vc=40 [m/min]. Na rys. 9 przedstawiono wpływ parametrów skrawania na chropowatość powierzchni.

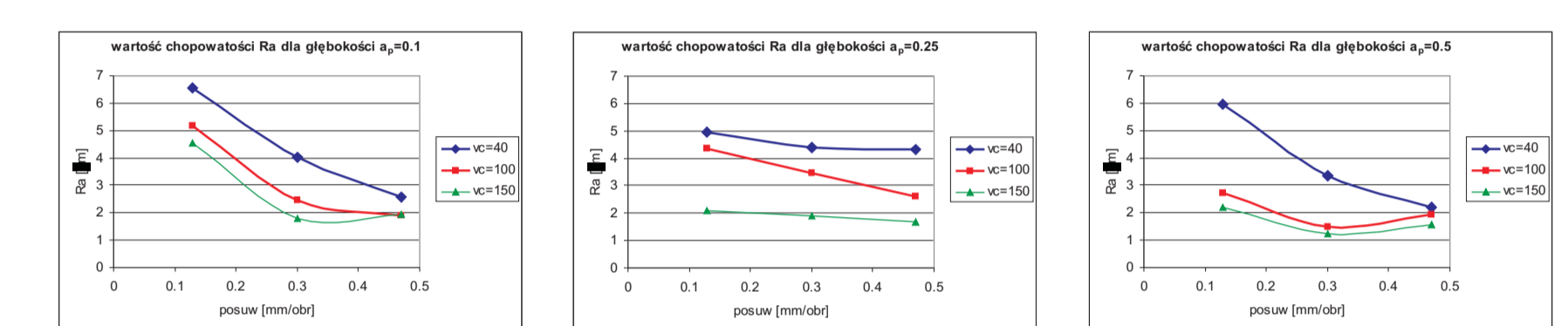


Rys. 7. Jakość powierzchni obrabianej w zależności od posuwu i głębokości skrawania, vc=40 [m/min]

Rys. 8. Postać wiórów w zależności od posuwu i głębokości skrawania, vc=40 [m/min]



Rys. 6 Parametry skrawania zalecane przez producenta i wyselekcjonowane do badań



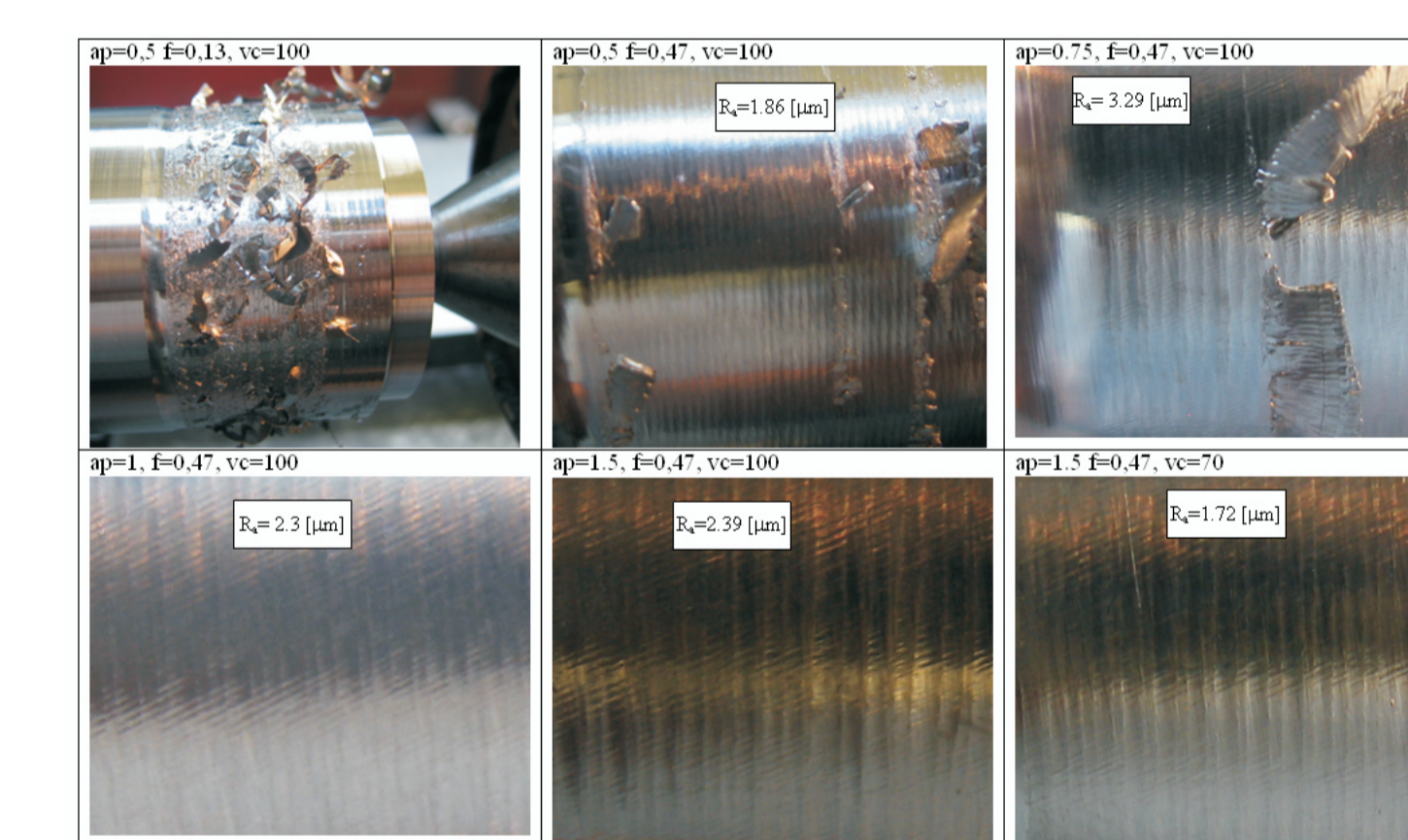
Rys. 9 Wpływ parametrów skrawania na chropowatość powierzchni

Badania wykazały, iż wbrew zaleceniu producenta, podczas obróbki narzędziami z płytkami obrotowymi niekorzystne są małe posuwu oraz małe głębokości skrawania. Podczas obróbki z małym przekrojem warstwy skrawania wióry odrywają się od strefy skrawania i zostają wgniecione w powierzchnię obrabianą przez obracającą się płytkę. Dla dużych przekrojów skrawania wióry są długie i nie dostają się pod płytkę.

Spśród wszystkich parametrów skrawania najlepszą chropowatość uzyskano dla największej głębokości i prędkości skrawania oraz dla dużych posuwów.

### Dobór parametrów do toczenia tytanu

Badania przeprowadzono wykonując skrawanie na sucho tytanu Ti6Al4V z różnymi parametrami (rys. 10) na tradycyjnej tokarce, TUD 50. Na rys. 11 przedstawiono fotografie powierzchni obrabianej oraz wartości chropowatości powierzchni. Badania te potwierdziły, że obróbka narzędziami SPRT z małymi przekrojami wióra powoduje przywieranie wiórów do powierzchni obrabianej. Dla głębokości skrawania powyżej 1 mm oraz posuwu 0.47 mm/obr uzyskano bardzo dużą gładkość powierzchni, nie pozbawionej jednak falistości, wynikającej z obrotu płytki.



Rys. 10 Parametry skrawania zalecane przez producenta i wyselekcjonowane do badań

Rys. 11 Jakość powierzchni obrabianej dla różnych parametrów skrawania

### Wnioski

- Narzędzia z płytkami obrotowymi charakteryzują się dużym biciem promieniowym (do 0.03 mm), co nie jest bez wpływu na jakość powierzchni obrabianej.
- Przy małym przekroju warstwy skrawanej istnieje niebezpieczeństwo zawijania się wióra pod płytkę i w konsekwencji przywierania wióra do powierzchni obrabianej
  - należy stosować środkowe i górne zakresy parametrów zalecanych przez producenta
  - należy unikać krótkich wiórów
- Teoretycznie prędkość obrotowa płytki zależy jedynie od prędkości skrawania oraz tarcia między wiórem a płytką. W wyniku niniejszych badań stwierdzono również wpływ posuwu oraz głębokości skrawania na prędkość obrotową płytki oraz duże nierównomierności obrotów dla małych przekrojów warstwy skrawanej
- Przy doborze odpowiednich parametrów skrawania osiągnięto wysoką gładkość powierzchni podczas obróbki tytanu przy jednocześnie dużej wydajności skrawania i trwałości ostrza.
- Obróbka Inconelu 625 nie przyniosła spodziewanych rezultatów – nie uzyskano ani zadowalającej jakości powierzchni skrawania ani trwałości ostrza, a narzędzie pracowało bardzo niestabilnie.

### Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

Niniejsze badania były zrealizowane ze względu na problemy zgłaszane przez przedsiębiorstwa, zajmujące się obróbką materiałów trudnoobrabialnych (WSK Rzeszów). Celem badań miało być poszukiwanie nowych sposobów obróbki, gwarantujących dłuższą trwałość ostrza, wykonanie zaplanowanej operacji bez konieczności wymiany narzędzia w trakcie jej trwania, lepszą wydajność skrawania przy zachowaniu zadowalającej jakości powierzchni. W wyniku badań stwierdzono, że narzędzia z płytkami obrotowymi mogą rozwiązać problem obróbki tytanu – gwarantują (przy starannie dobranych parametrach skrawania) dużą trwałość ostrza i wydajność skrawania przy zachowaniu gładkiej powierzchni. Podczas obróbki Inconelu 625 zachowywały się niestabilnie, a trwałość ostrza i wydajność skrawania była niezadowalająca.

### Wskaźniki realizacji celów projektu

#### Referaty

- Burek J., Żyłka Ł., Babiarski R.: **Zastosowanie sygnału emisji akustycznej w diagnostyce szlifowania uzębień**. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Łódź 8-10 września 2010r.
- Burek J., Babiarski R., Żyłka Ł.: **Analiza emisji akustycznej w procesie nadzorowania parametrów warstwy wierzchniej**. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Łódź 8-10 września 2010r.
- Kossakowska J.: **Obróbka stali i tytanu za pomocą narzędzi z płytkami obrotowymi**. II Warsztaty Zadań Badawczych ZB1, ZB2, ZB5 Projektu Kluczowego, Lublin, 13.10.2010.
- Żyłka Ł., Babiarski R.: **Emisja akustyczna i drgania w nadzorowaniu procesu szlifowania**. II Warsztaty Zadań Badawczych ZB1, ZB2, ZB5 Projektu Kluczowego, Lublin, 13.10.2010.

#### Prace mgr, dr, hab.

#### Prace inżynierskie obronione:

- Maciej Burmajster – **Obróbka stali i tytanu za pomocą narzędzi z płytkami obrotowymi**. Promotor: dr inż. J.Kossakowska