

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



KONFERENCJA  
RADY PARTNERÓW CZT AERONET  
I PANELE EKSPERTÓW  
24-25 Czerwca 2013

# ZB2

### Modelowanie, konstruowanie i kontrolowanie procesu HSM z uwzględnieniem skonfigurowanego układu maszyna-maszyna-przyrząd-detal

#### Modeling, construction and control of the HSM process taking into consideration the configured machine-instrument-detail system

Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska

#### Wyniki badań Results

- Optymalizacja procesu obróbki skrawaniem lotniczych elementów kształtowych ze stopu tytanu Ti6Al4V z zastosowaniem oprogramowania „AE Production Module” oraz „iMachining”.
- Optimization of the machining process titanium alloy Ti6Al4V using the software “AE Production Module” and “iMachining”.

#### Metodologia badań/Research methodology

- Badania skrawalności prowadzono na odkuwce w kształcie sześcianu z superstopu na osnowie niklu Inconel 718 o twardości 45HRC. Stop ten należy do grupy stopów niklu powszechnie stosowanych w technice lotniczej. Jest materiałem trudnoobrabialnym ze względu na charakterystyczne właściwości fizyczne:
- duża twardość materiału w podwyższonej temperaturze, w której zmniejsza się twardość narzędzi z węglików spiekanych,
  - wysoka wytrzymałość na ścinanie,
  - silne umocnienie w czasie obróbki mechanicznej,
  - intensywny proces dyfuzyjny prowadzący do zgrzewania materiału obrabianego i narzędzia oraz okresowego wyrwania ziaren materiału narzędzia,
  - tworzenie się twardych wiórów o wysokich właściwościach mechanicznych i wysokiej temperaturze, niszczących narzędzie w wyniku zgrzewania i tworzenia się krateru,
  - mała przewodność cieplna nadstopów powodująca znaczne podwyższenie temperatury w strefie skrawania i duży gradient temperatury w warstwie wierzchniej obrabianego materiału,
  - obecność twardych i odpornych na ścieranie wydzieleni węglików w osnowie austenitu, np.: M6C, M7C3, M23C6, MC,

Machinability tests were performed on the forging in the shape of a cube of the superalloy Inconel 718 nickel matrix with a hardness of 45HRC. This alloy belongs to the group of nickel alloys are commonly used in aerospace engineering. It's heavy to process material because the characteristic physical properties:

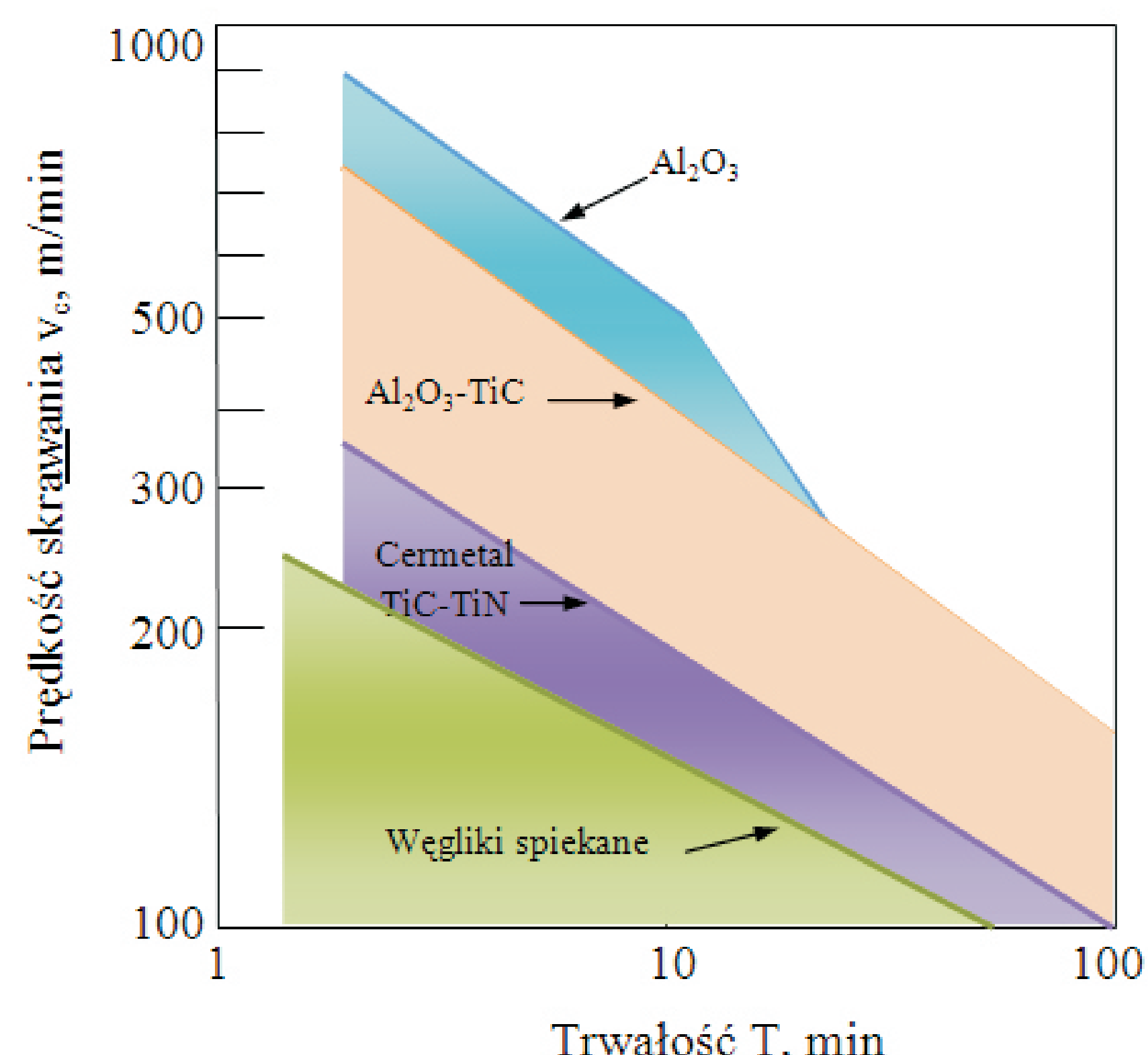
- High hardness at elevated temperatures, which decreases the hardness of cemented carbide tools,
- High shear strength,
- Strong appreciation during machining,
- Intensive diffusion process leading to the welding of the workpiece and the tool and periodic seed pulling tool material,
- Formation of a solid chip with high mechanical properties and high temperature, damaging the tool as a result of welding and formation of the crater,
- Low thermal conductivity alloys resulting in a significant increase in temperature in the cutting zone and a large temperature gradient machined in the surface layer of the material,
- The presence of hard and wear resistant carbides in the austenite matrix, eg M6C, M7C3,

#### Ceramiczne materiały narzędziowe /Ceramic tools material

Ceramiczne materiały narzędziowe charakteryzują się dużą twardością ok. 1,5-2x większą niż materiały wykonane z węglików spiekanych, odpornością chemiczną oraz odpornością na działanie wysokiej temperatury do 1100°C. Umożliwia to skrawanie z prędkością 3-4 krotnie większą niż przy zastosowaniu narzędzi z węglików spiekanych oraz skrawanie bardzo twardych metali w tym stali w stanie zahartowanym. Ceramiczne materiały narzędziowe są odporne chemicznie, stabilne w atmosferze obojętnej i utleniającej, a także w wysokiej temperaturze, mają dużą odporność na ścieranie. Nie wymagają stosowania cieczy chłodząco-smarujących. Ich podstawową wadą jest wrażliwość na obciążenia udarowe i zmęczenie cieplne. Zastąpienie w obróbce zgrubnej materiałów narzędziowych na bazie węglików spiekanych materiałami ceramicznymi umożliwiła znaczne zwiększenie wydajności obróbki oraz okresu trwałości ostrza.

Ceramic tool materials are characterized by high hardness of about 1.5-2x larger than those made of tungsten carbide, chemical resistance and resistance to high temperatures up to 1100 ° C. This enables the cutting speed of 3-4 times greater than when using cemented carbide tools and cutting very hard metal in the state of hardened steel.

Ceramic cutting materials are chemically resistant and stable in an inert atmosphere and oxidation, and also at high temperatures, have a high resistance to abrasion. They do not require the use of liquid - cooling lubricants. Their main disadvantage is the sensitivity to impact and thermal fatigue. Replacement for roughing tool materials based on tungsten carbide ceramic materials can significantly increase efficiency and productivity and blade life.

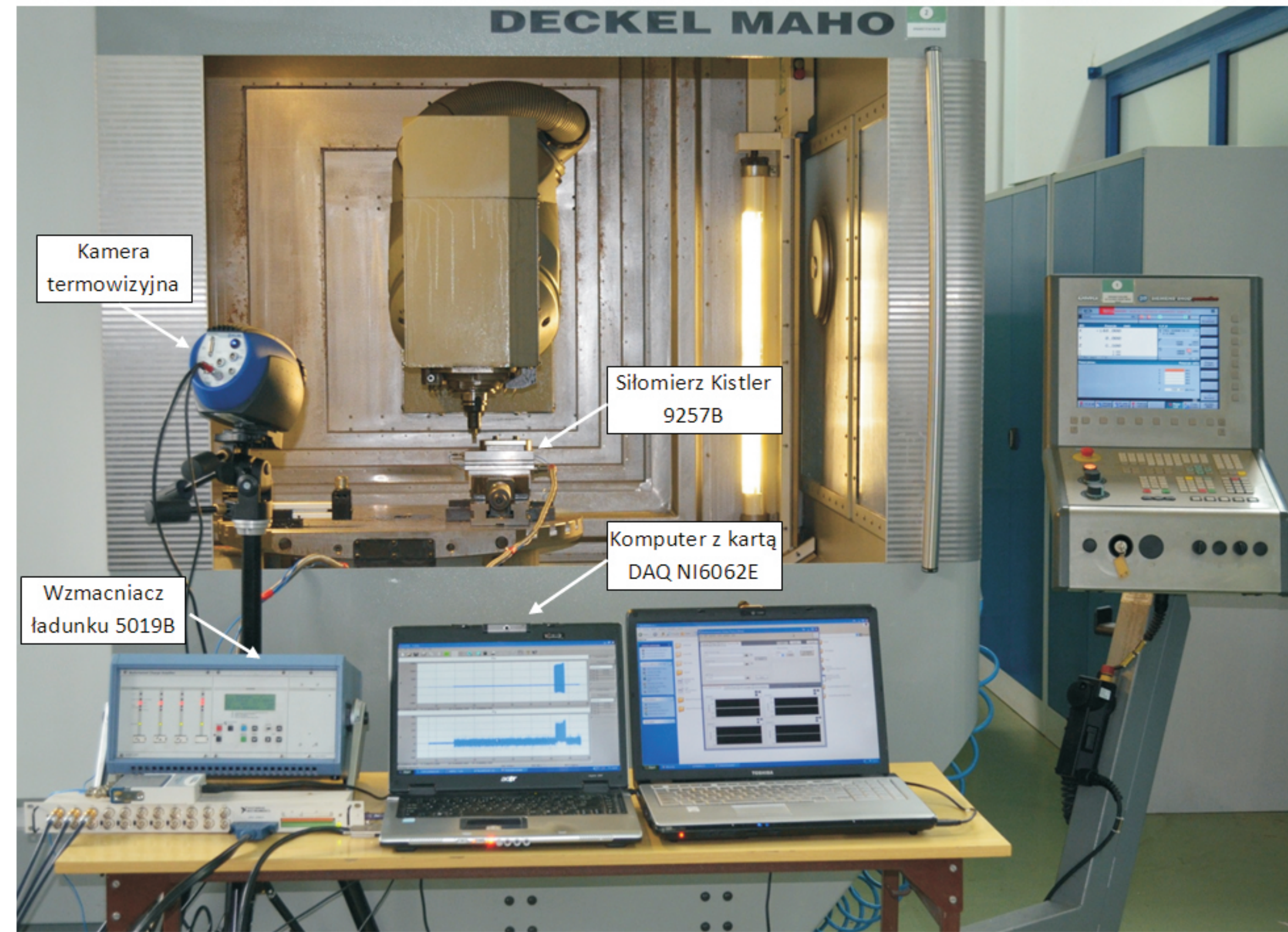


Rys. 1. Porównanie trwałości ostrzy narzędzi skrawających dla różnych materiałów narzędziowych  
Fig. 1. Comparison of durability of blades of cutting tools for different tool materials

Narzędzia ceramiczne są coraz częściej stosowane do obróbki stopów niklu. Cechują się one wysoką twardością, która utrzymuje się w wysokiej temperaturze, lepszą chemiczną stabilnością i odpornością na utlenianie w porównaniu do węglików spiekanych. Mają jednak mniejszą odporność na obciążenia dynamiczne i dlatego wymagają obrabiarek o dużej sztywności i stabilności oraz o większej mocy umożliwiającej obróbkę z wysokimi prędkościami. Narzędzia ceramiczne zachowują wysoką twardość w wysokich temperaturach i dominującym mechanizmem zużycia jest

Ceramic tools are increasingly being used for machining of nickel alloys. They are characterized by high hardness, which is maintained at a high temperature, improved chemical stability and resistance to oxidation as compared to the cemented carbide. However, they have lower toughness and therefore require a machine with high rigidity and stability and greater power when working at high speeds. Ceramic Tools retain their high hardness at high temperatures and the dominant wear mechanism is abrasive wear.

#### Stanowisko badawcze/The test stand

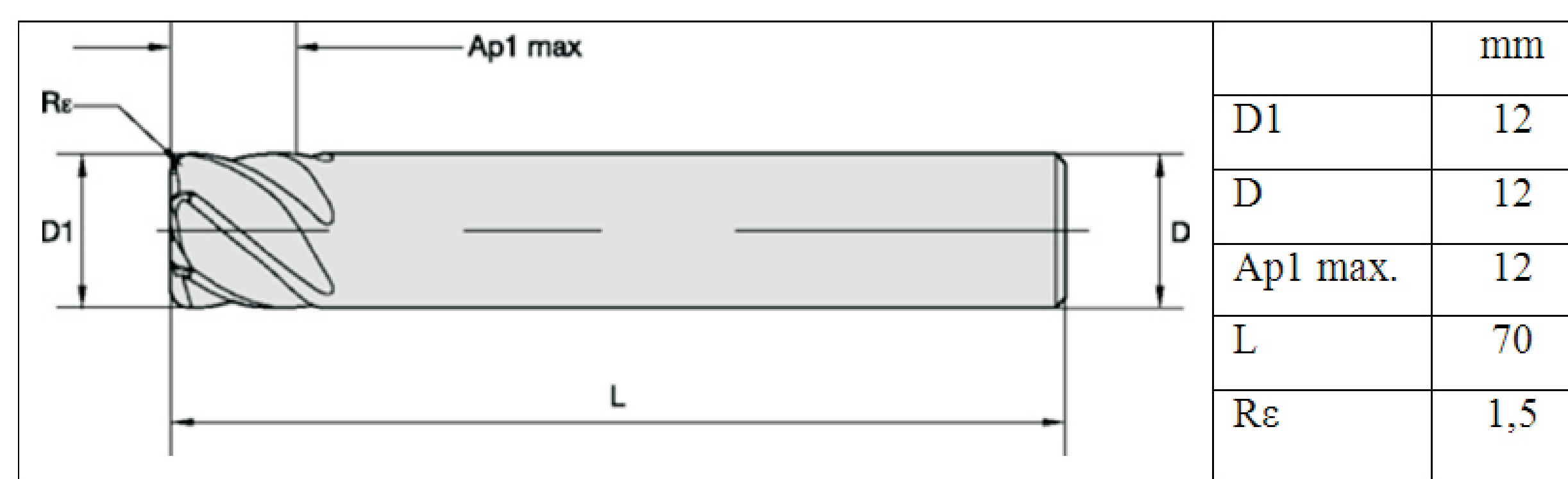


Rys. 2. Stanowisko badawcze do pomiaru wartości składowych siły skrawania i temperatury podczas frezowania stopu Inconel 718.  
Fig. 2. The test for measuring the components of the cutting forces and temperature during the milling of Inconel 718

Sygnal siłomierza przekazywany jest do wzmacniacza ładunku typu 5019B i transmitowany do komputera przez złącze PCMCIA za pomocą 12-bitowego przetwornika analogowo cyfrowego NI 6062E firmy National Instruments. Wizualizację, przetwarzanie i zapisywanie sygnału prowadzono za pomocą systemu CutPro. Częstotliwość próbkowania sygnału ustalono na 10kHz. Pomiar wartości temperatury w strefie skrawania prowadzono za pomocą kamery termowizyjnej.

Sygnal siłomierza przekazywany jest do wzmacniacza ładunku typu 5019B i transmitowany do komputera przez złącze PCMCIA za pomocą 12-bitowego przetwornika analogowo cyfrowego NI 6062E firmy National Instruments. Wizualizację, przetwarzanie i zapisywanie sygnału prowadzono za pomocą systemu CutPro. Częstotliwość próbkowania sygnału ustalono na 10kHz. Pomiar wartości temperatury w strefie skrawania prowadzono za pomocą kamery termowizyjnej.

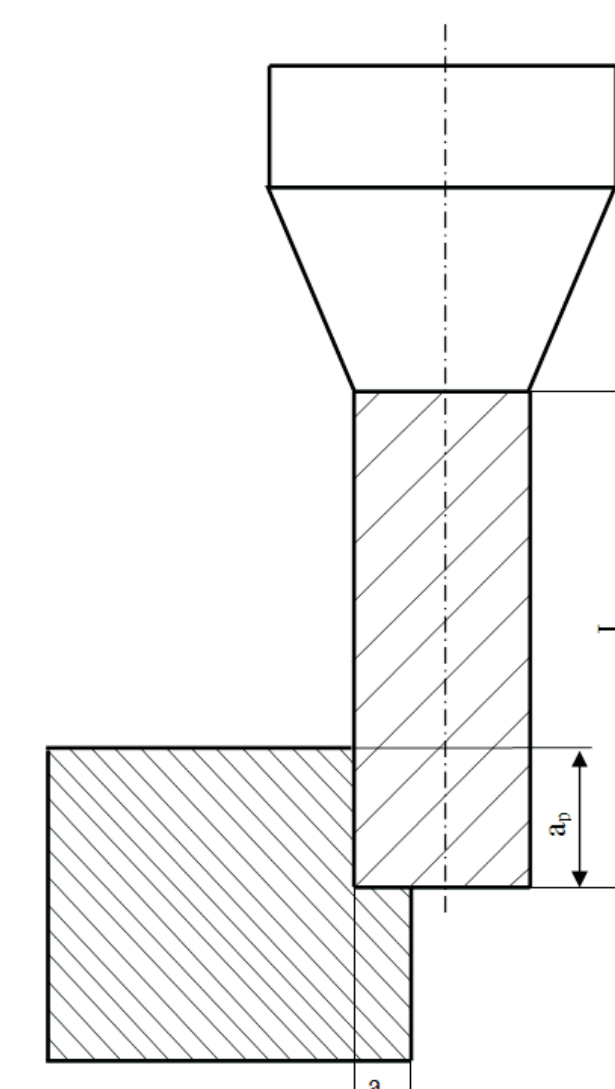
#### Monolityczne narzędzia ceramiczne /Ceramic Tools



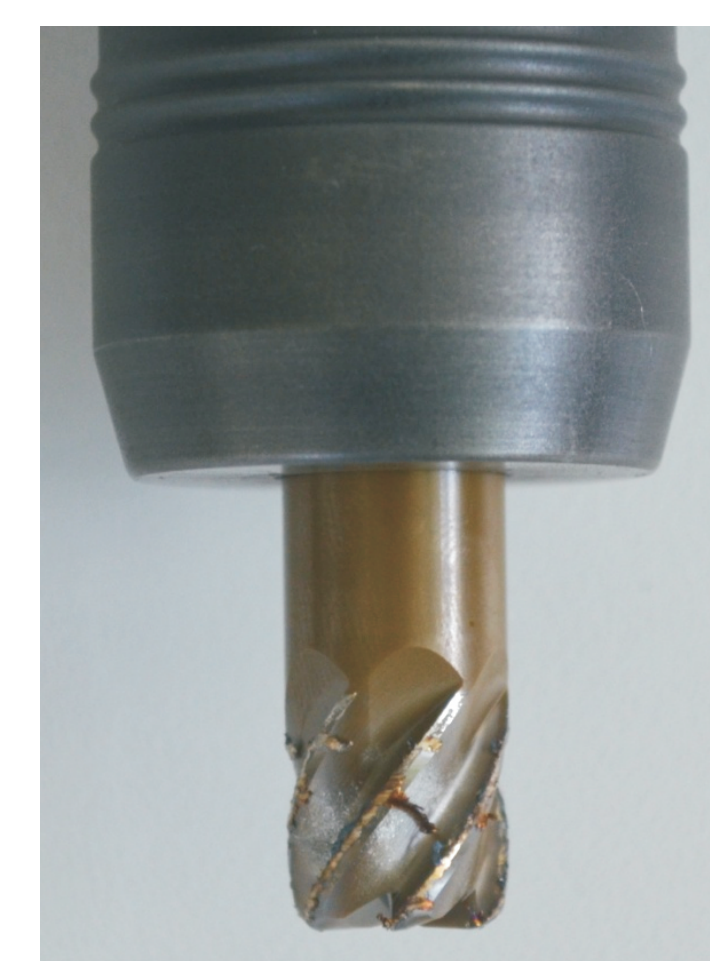
Rys. 3. Geometria narzędzia skrawającego  
Fig. 3. Tools Geometry

#### Tabela 1. Parametry skrawania Table 1. Cutting parameter

|               |              |
|---------------|--------------|
| $v_c$ , m/min | 350-550      |
| n, obr/min    | 9000 – 13500 |
| f, mm/obr     | 0,03 – 0,05  |
| $a_p$ , mm    | 4 – 12       |
| L, mm         | 30 = const   |
| $a_c$ , mm    | 0,2 = const  |



Rys. 4. Strategia frezowania  
Fig. 4. Milling strategy



Rys. 5. Monolityczny frez ceramiczny  
Fig. 5. Monolithic ceramic cutter

#### Wyniki badań

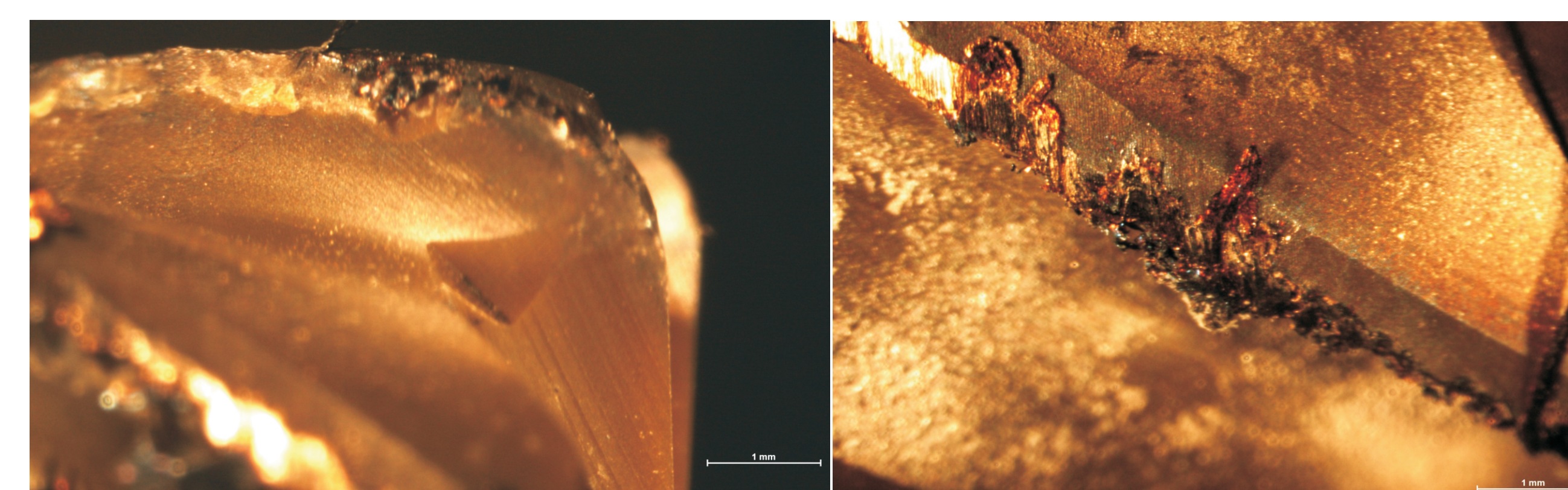
##### Zużycie ostrzy narzędzi skrawających

Wzrost temperatury krawędzi skrawającej przy wyższych prędkościach powoduje, że materiał obrabiany zaczyna przywierać do krawędzi skrawającej. Losowe odrywanie przywarłego materiału wyrwa mikrocząsteczki materiału narzędzia przyspieszając jego zużycie. Zużycie narzędzi ceramicznych objawia się kruchymi pęknięciami, które spowodowane są uderzeniami powierzchni narzędzia o materiał obrabiany.

##### The test results

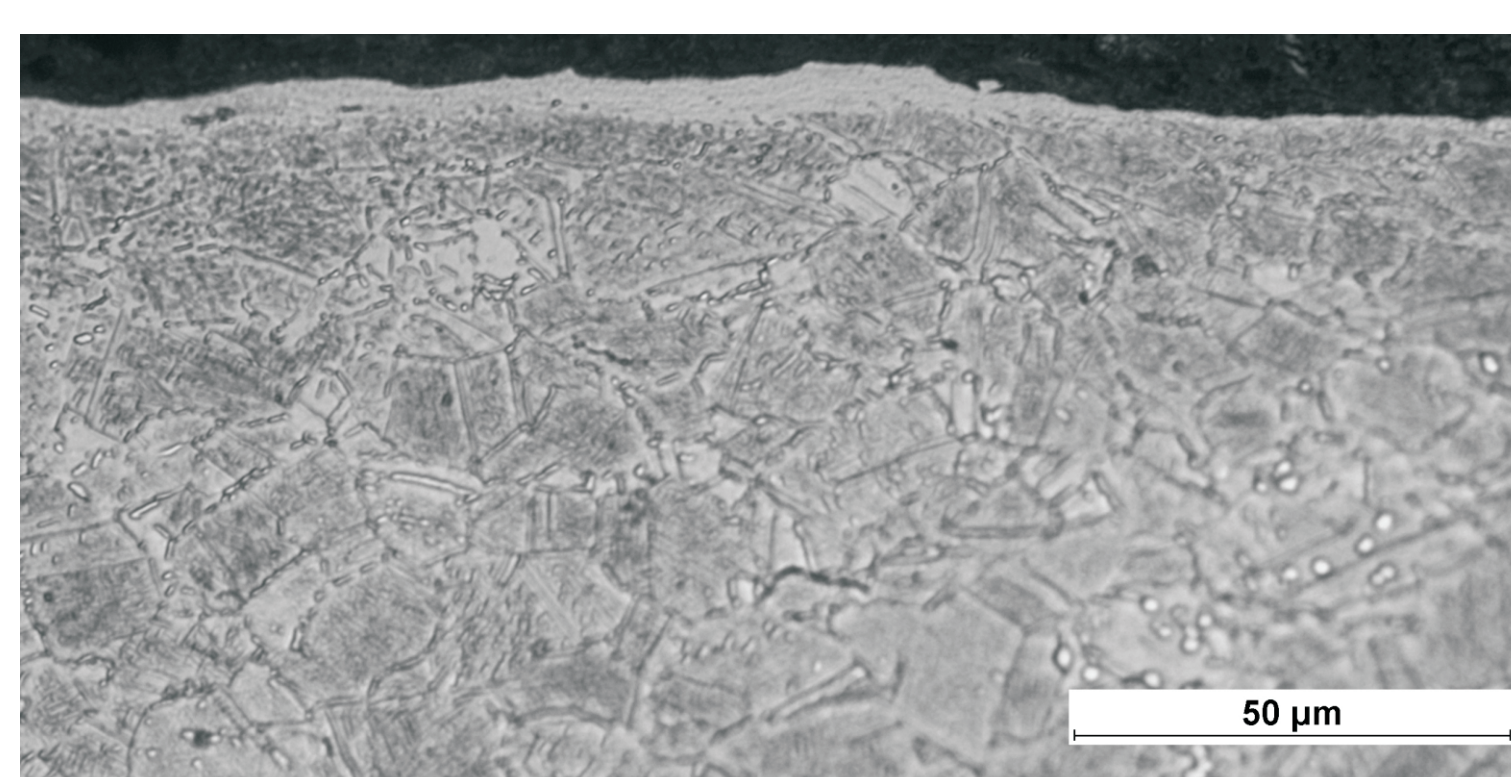
##### Wear blades of cutting tools

The temperature rise of the cutting edge at high speeds causes the workpiece material begins to adhere to the cutting edge. A random tearing pulls material adhered microparticles accelerating tool material consumption. Tool wear is revealed brittle ceramic cracks, which are caused by impacts on the surface of the tool workpiece.



Rys. 6. Zużycie ostrza narzędzia skrawającego na powierzchni natarcia.  
Fig. 6. Blade cutting tool wear on the rake face.

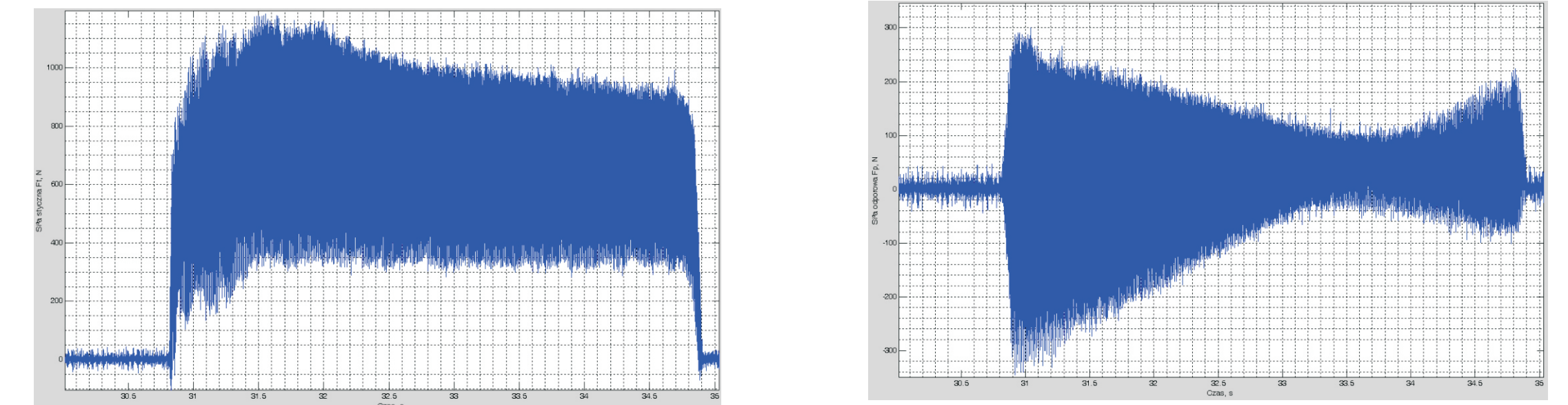
Rys. 7. Zużycie ostrza narzędzia skrawającego na powierzchni natarcia.  
Fig. 7. Blade cutting tool wear on the rake face.



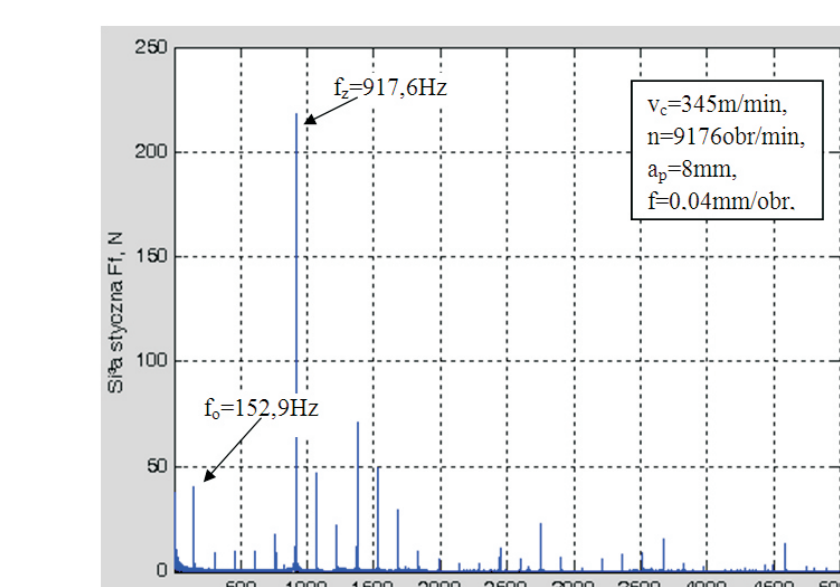
Rys. 8. Rys. Mikrostruktura stopu Inconel 718 po procesie frezowania monolitycznym narzędziem. Parametry procesu: prędkość skrawania  $v_c=430$ m/min, głębokość skrawania  $a_p=4,6$ mm, posuw  $f=0,04$ mm/obr

#### Składowe siły skrawania

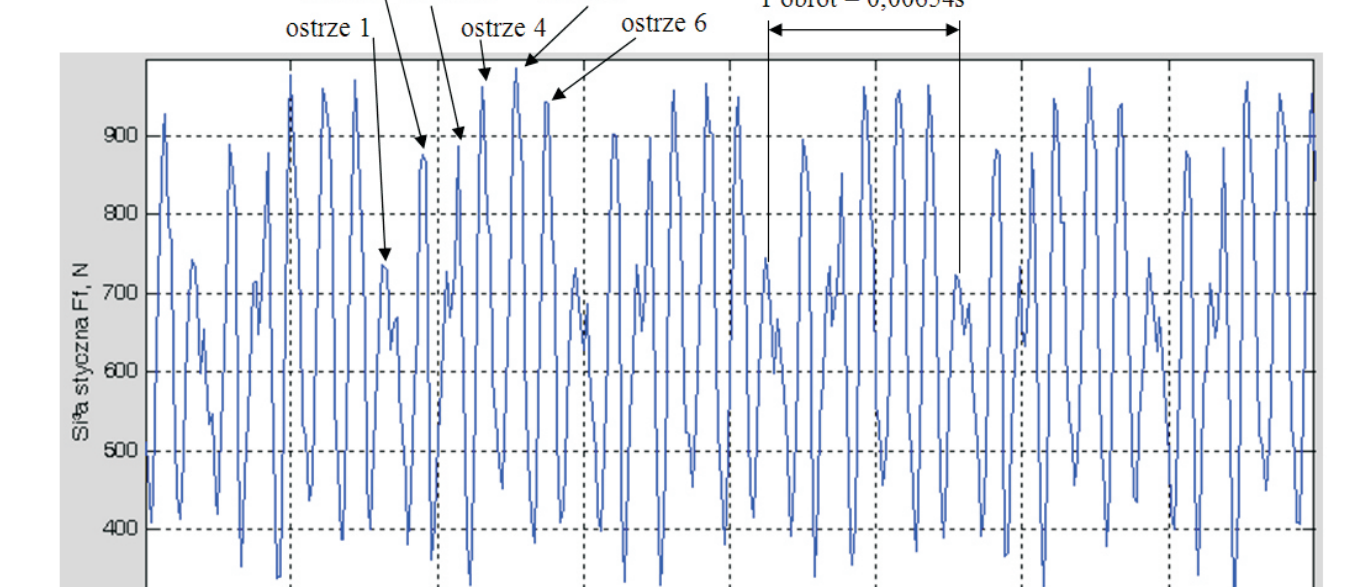
Na składowe siły skrawania w procesie frezowania mają wpływ czynniki związane z ostrzem narzędzia skrawającego, materiałem skrawanym oraz przyjętymi parametrami nastawnymi procesu. Siły decydują o zapotrzebowaniu na moc ale również wpływają na dokładność obróbki.



Rys. 9. Siła styczna Ft dla parametrów skrawania (prędkość skrawania  $v_c=345$  m/min, głębokość skrawania  $a_p=8$ mm, posuw  $f=0,04$ mm/obr, szerokość skrawania  $a_e=0,2$ mm)  
Rys. 10. Siła odporowa Fp dla parametrów skrawania (prędkość skrawania  $v_c=345$  m/min, głębokość skrawania  $a_p=8$ mm, posuw  $f=0,04$ mm/obr, szerokość skrawania  $a_e=0,2$ mm)  
Fig. 9. Tangential force Ft for cutting (cutting speed  $v_c = 345$  m / min, depth of cut  $a_p = 8$  mm, feed  $f = 0.04$  mm / rev, the width of cut  $a_e = 0.2$  mm)  
Fig. 10. Force Fp for the cutting parameters (cutting speed  $v_c = 345$  m / min, depth of cut  $a_p = 8$  mm, feed  $f = 0.04$  mm / rev, the width of cut  $a_e = 0.2$  mm)



Rys. 11. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa.  
Fig. 11. Amplitude-frequency characteristics.



Rys. 12. Wartość chwilowa składowej stycznej Ft w czasie dla parametrów skrawania (prędkość skrawania  $v_c=345$  m/min, głębokość skrawania  $a_p=8$ mm, posuw  $f=0,04$ mm/obr, szerokość skrawania  $a_e=0,2$ mm)  
Fig. 12. Instantaneous tangential component Ft in time for cutting

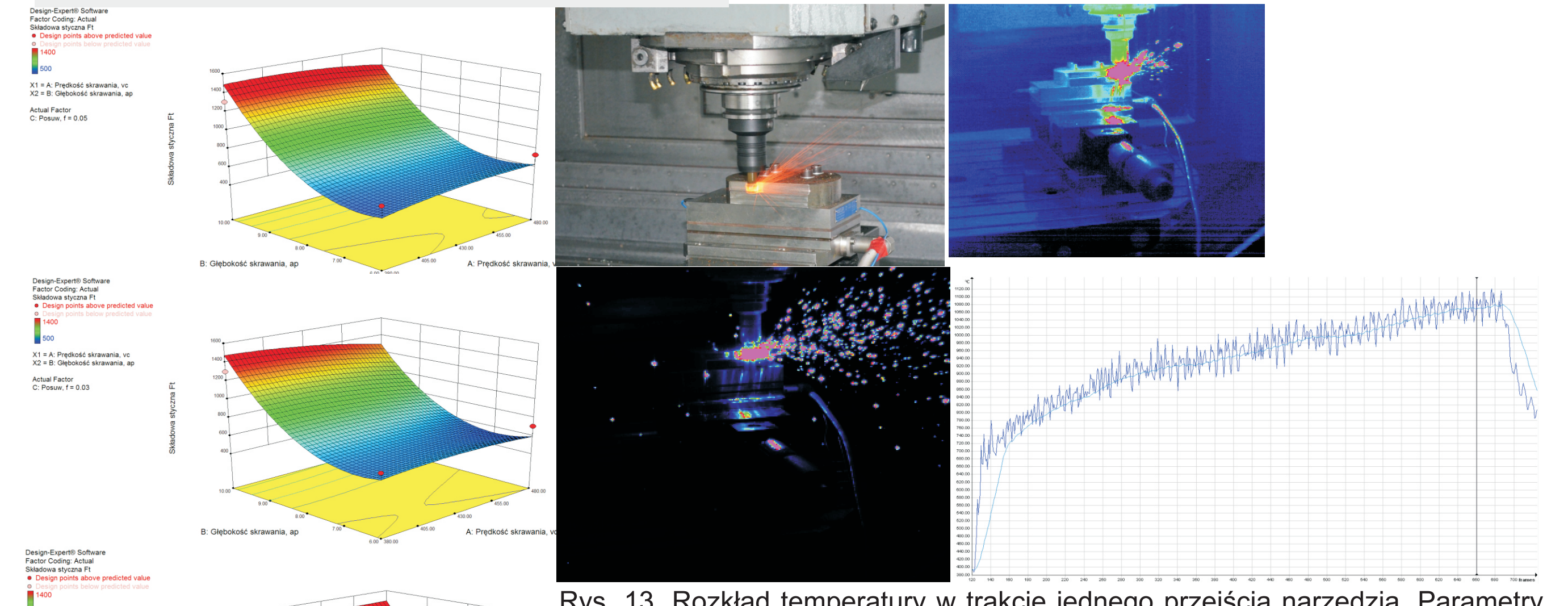
W ramach prowadzonych badań doświadczalnych przyjęto plan badawczy CCD (central composite design) - pełny (20 punktów pomiarowych) z grupy technik statystycznych RSM-powierzchni odpowiedzi (Tab).

Plany badawcze oparte o RSM odnoszą się do wyznaczania powierzchni odpowiedzi zbudowanej na ogólnym równaniu typu:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_k \cdot x_k + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + b_{k-1,k} \cdot x_{k-1} \cdot x_k + b_{12} \cdot x_1^2 + \dots + b_{kk} \cdot x_k^2$$

W rezultacie do doświadczalnych wielkości wyjściowych dopasowany zostaje model, który ujmuje wpływ głównych wielkości wejściowych ( $x_1, x_2 \dots x_k$ ), interakcji pomiędzy wielkościami wejściowymi ( $x_1 \cdot x_2, x_1 \cdot x_3 \dots x_k - 1 \cdot x_k$ ) oraz wyrazów kwadratowych ( $x_1^2, x_2^2 \dots x_k^2$ ). Również współczesne systemy do projektowania badań doświadczalnych bazują na metodzie RSM jako jednym z głównych narzędzi statystycznych.

| Response                     | Factor         | Składowa styczna Ft | Factor 1    | Factor 2 | Factor 3 | Response 1  |
|------------------------------|----------------|---------------------|-------------|----------|----------|-------------|
| Sum of Squares               | df             | Mean                | F           | p-value  |          |             |
| Source                       | Sum of Squares | df                  | Mean Square | Value    | Prob > F |             |
| Model                        | 237028-006     | 9                   | 27144-005   | 10.83    | 0.0004   |             |
| A-Prędkość skrawania, $v_c$  | 6801.36        | 1                   | 6801.36     | 0.19     | 0.6605   |             |
| B-Głębokość skrawania, $a_p$ | 231445-006     | 1                   | 231445-006  | 99.47    | <0.0001  |             |
| C-Posuw, f                   | 2222.87        | 1                   | 2222.87     | 0.007    | 0.9199   |             |
| AB                           | 14168.19       | 1                   | 14168.19    | 0.38     | 0.5362   |             |
| AC                           | 8253.13        | 1                   | 8253.13     | 0.14     | 0.7209   |             |
| BC                           | 3160.13        | 1                   | 3160.13     | 0.009    | 0.7814   |             |
| ABC                          | 21162.79       | 1                   | 21162.79    | 0.54     | 0.4777   |             |
| AB <sup>2</sup>              | 12088-006      | 1                   | 12088-006   | 34.89    | 0.0001   |             |
| BC <sup>2</sup>              | 2451.17        | 1                   | 2451.17     | 0.063    | 0.8089   |             |
| Residual                     | 33980-005      | 10                  | 3398.005    |          |          |             |
| Lack of Fit                  | 18358-005      | 5                   | 3671.60     | 102.10   | <0.0001  | significant |
| Pure Error                   | 15622.00       | 5                   | 3124.40     |          |          |             |
| Cor Total                    | 411818-006     | 19                  | 7954.67     |          |          |             |



Rys. 13. Rozkład temperatury w trakcie jednego przejścia narzędzia. Parametry procesu: prędkość skrawania  $v_c=380$ m/min, głębokość skrawania  $a_p=6$ mm, posuw  $f=0,05$ mm/obr (temp maks. 1080 deg. C)

Rys. 14. Rozkład temperatury w trakcie jednego przejścia narzędzia. Parametry procesu: prędkość skrawania  $v_c=360$  m/min, głębokość skrawania  $a_p=10$  mm, posuw  $f=0,03$ mm/obr (temp maks. 818 deg. C)

Rys. 15. Przykładowy rozkład temperatur w strefie skrawania  
Fig. 15. An example of the temperature distribution in the cutting zone

#### Wnioski Conclusions

Zastosowanie monolitycznych narzędzi ceramicznych w procesie frezowania superstopu Inconel 718 umożliwia znaczne zwiększenie wydajności obróbki w porównaniu do zastosowania narzędzi z węglików spiekanych.

- w celu zapewnienia stabilnych warunków procesu skrawania narzędziami ceramicznymi konieczne jest zastosowanie obrabiarek o dużej sztywności oraz mocnych wrzecion o dużej prędkości obrotowej,
- zużycie narzędzi ceramicznych objawia się kruchymi pęknięciami, które spowodowane są uderzeniami powierzchni narzędzia o materiał obrabiany. Narzędzia ceramiczna cechują się również wrażliwością na udary cieplne, z tego względu zaleca się stosowania obróbki ciągłej,
- wysoka temperatura w strefie skrawania podczas obróbki narzędziami ceramicznymi oraz duża wartość siły skrawania powoduje silną deformację warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego oraz przyczynia się do powstawania tzw. „białej warstwy”,
- konieczne jest prowadzenie dalszych badań umożliwiających określenie wpływu parametrów nastawnych procesu skrawania z zastosowaniem narzędzi ceramicznych na stan warstwy wierzchniej oraz określenie minimalnej ilości nadkładu materiału jaka należy usunąć podczas obróbki wykończeniowej w celu zapewnienia wymaganej jakości powierzchni obrabianej.

#### Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym Collaboration with aviation industry

Tematyka prowadzonych badań związanych z optymalizacją procesu skrawania trudnoobrabialnych stopów stosowanych w technice lotniczej umożliwiła znaczne zwiększenie wydajności oraz poprawę stabilności procesu obróbki skrawaniem. Wyniki badań umożliwiły ich praktyczne zastosowanie w warunkach przemysłowych m.in. w WSK „PZL- Rzeszów” S.A, PZL Mielec, Ultratech,

Research topics related to the optimization process difficult-to-cut alloys used in aerospace will substantially increase the efficiency and improve the stability of the machining process. The results allow its practical use in industrial environments such as in WSK "PZL-Rzeszów" SA, PZL Mielec, Ultratech,

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

Praca magisterska - promotor dr inż Robert Babiarczyk -Filarski Tomasz-Diagnostyka stanu narzędzi obrotowych w procesie frezowania lotniczych stopów Al z wykorzystaniem wibrometru laserowego.