

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

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

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

Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska

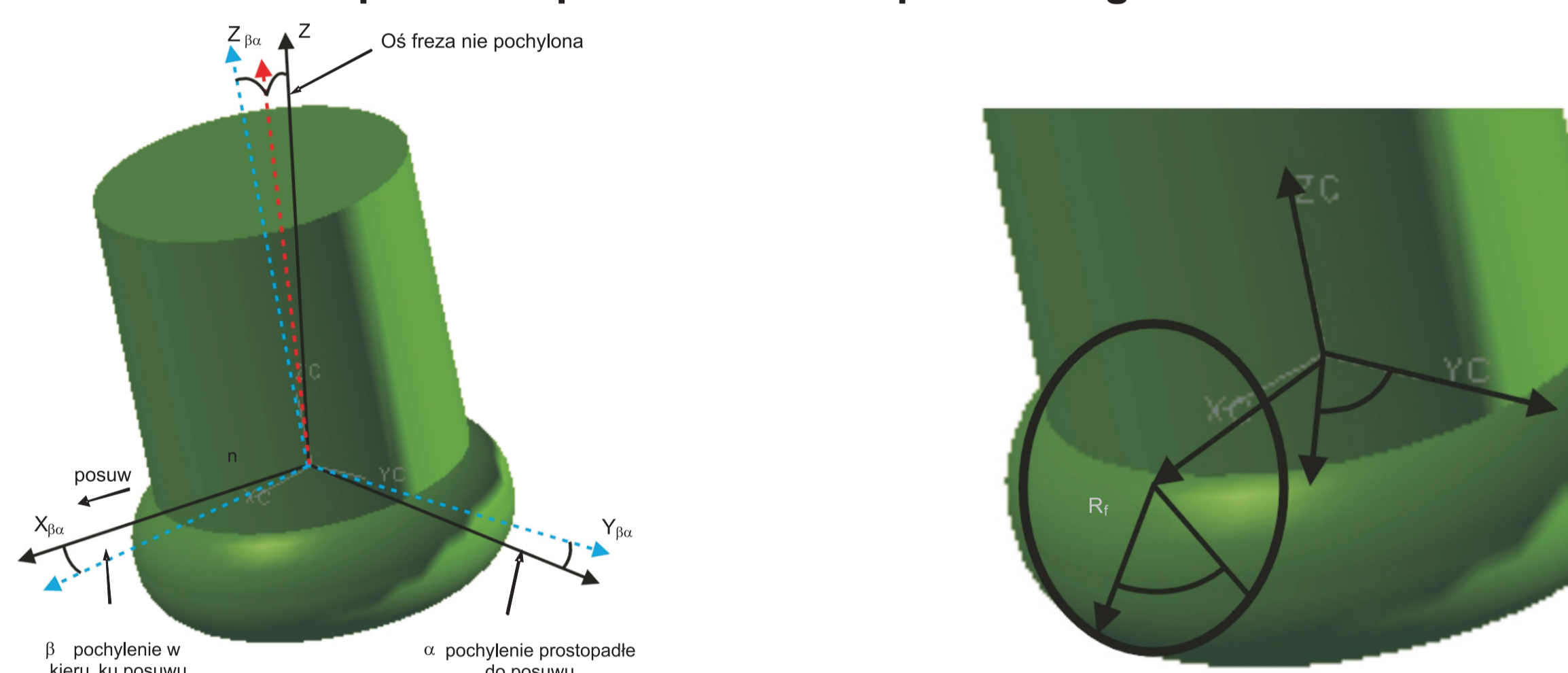
Tytuł rozwiązania Innowacyjnego
Title of the innovative solution

Kompleksowy system analizy 5-osiowego frezowania pow. krzywoliniowych
Enhance system to analyze 5-axis milling of freeform surfaces

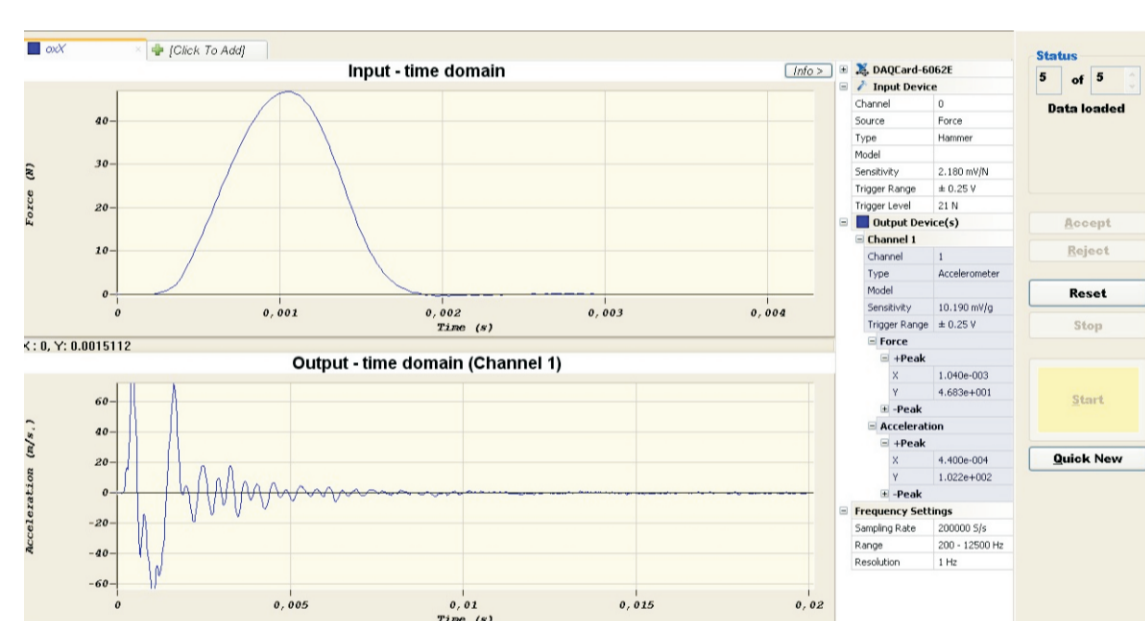
Krótki opis rozwiązania
Brief description of the solution

Jednoczesne 5-osiowe frezowanie dzięki dwóm dodatkowym osiom obrotowym pozwala na takie projektowanie toru ruchu narzędzia które zapewnia zwiększenie wydajności obróbki przy zachowaniu zakładanych tolerancji. Efektowny kształt freza może być określany przez wybór jego geometrii jak również przez odpowiednie pozycjonowanie osi freza względem powierzchni obrabianej. W pracy przedstawiono warunki styku narzędzia z przedmiotem obrabianym podczas obróbki powierzchni krzywoliniowych. Analizy przeprowadzone zostały dla narzędzia torusowego którego kształt pozwala na uzyskanie dużych dosuwów promieniowych ae. Na podstawie przeprowadzonych analiz określono zależności pomiędzy kształtem powierzchni obrabianej i ustawieniem osi narzędzi względem powierzchni obrabianej.

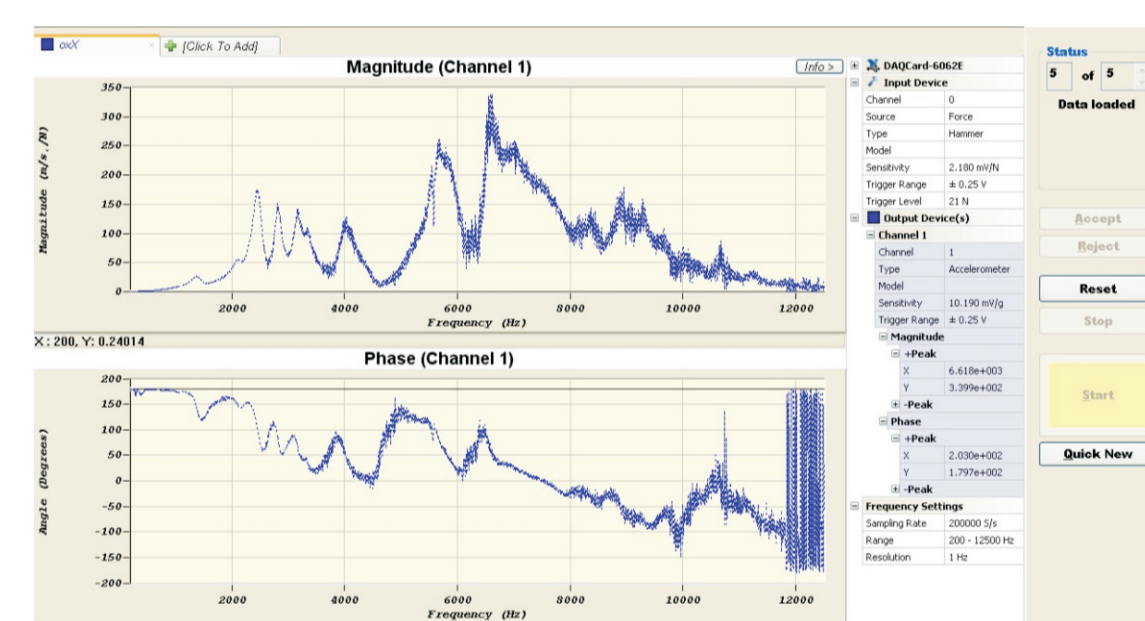
Simultaneous 5-axis milling due to 2 additional rotational axis allows to generate toolpath which keep assumed dimensional tolerance and increase productivity as well. Effective tool shape is defined by either itself geometry or tool positioning in reference to cutting surface. At this poster presented condition of tool contact point with workpiece surface depicted as a free form. All analyses were carried out on torus tool shape which is suitable for increasing radial tool engage. Based on research work conditions between workpiece shape and tool axis positioning were defined.



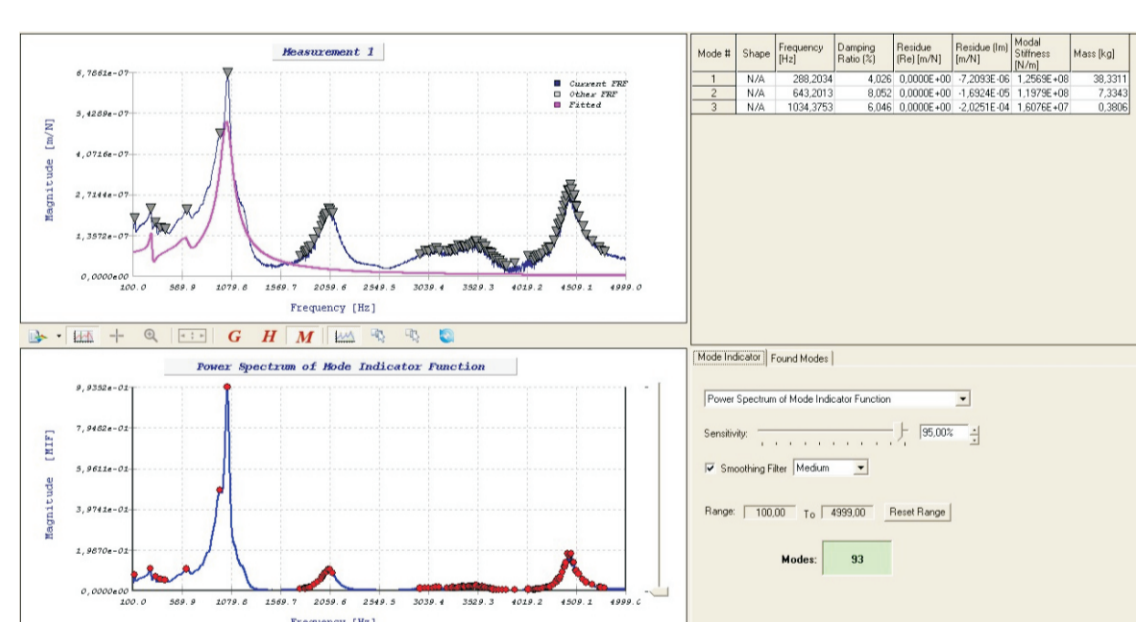
Rys.1. Opis geometrii i pochylenia osi narzędzia torusowego
Fig.1. Geometry definition and tool axis inclinations



Rys.2. Wejścia i wyjścia sygnału w dziedzinie czasu
Fig.2. Input and output in time domain



Rys.3. Wejścia i wyjścia sygnału w amplitudzie i fazy
Fig.3. Input and output in magnitude and phase domain



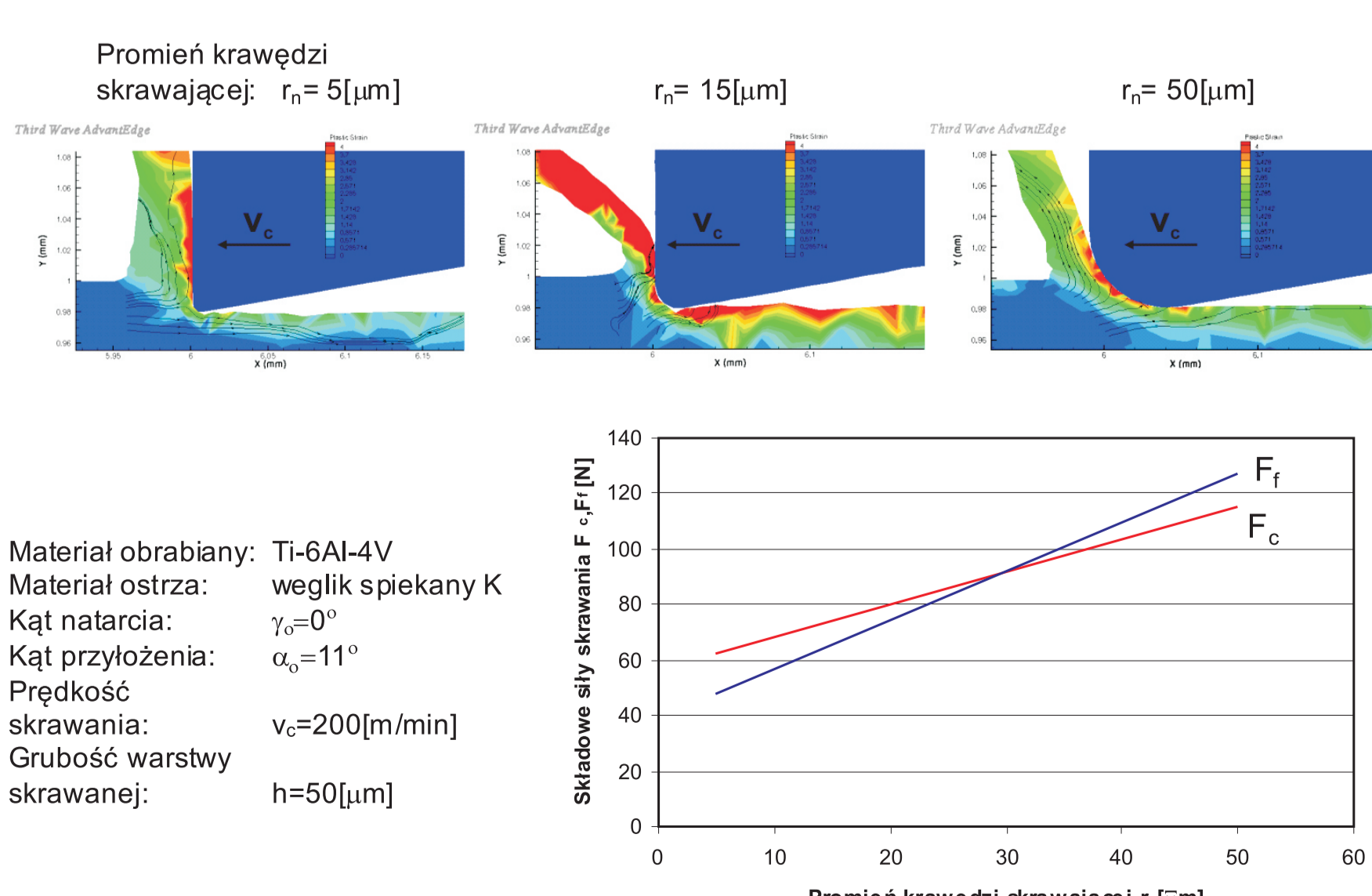
Rys.4. Postacie modalne sygnału
Fig.4. Modal analysis

Stabilność procesu 5-osiowego frezowania można zbadać za pomocą metodyki opartej na wykreśleniu tzw. krzywej workowej. Metoda uwzględnia ch-kę procesu, obrabiarki oraz uchwytu obróbkowego.

Stability of 5-axis milling might be easily conduct by plotting stability lobe curve. The method considers process characteristics, machine tool and fixture as a inputs for stability area definition.

Numeryczna analiza procesu skrawania z wykorzystaniem oprogramowania AdvantEdge może odbywać się w przestrzeni dwu- (2D) lub trójwymiarowej (3D), zaś podział ciała oparty jest na opisie Lagrange'a. Model materiału obrabianego uwzględnia odkształcenia sprężysto-plastyczne a jego właściwości są funkcją temperatury. Analiza naprężenia mechanicznego i termicznego odbywa się w dwustopniowo: po izotermicznym kroku w którym odbywały się obliczenia naprężeń mechanicznych następuje wymiana ciepła w ciele sztywnym. Do analizy powstawania powierzchni szczególnie znaczenie ma mechanizm rozdzielenia materiału obrabianego na wiór i pow. obrobioną.

Na rys.5 przedstawiono wpływ promienia krawędzi skrawającej (r_v=5-50mm) na przemieszczenie materiału obrabianego w strefie skrawania przedstawione w postaci linii prądu. Wraz z rosnącym promieniem krawędzi skrawającej rozdzielanie materiału na wiór i część obrobioną, ze względu na duży ujemny rzeczywisty kąt natarcia, odbywa się przyprawie liniowo rosnącej sile skrawania (po prawej u dołu). Zwiększenie promienia krawędzi skrawającej mocniej wpływa na składową posuwową F_f niż na składową styczną F_c siły skrawania. Ponadto zaobserwowano że wraz z rosnącym promieniem zaokrąglenia krawędzi skrawającej odkształcenie staje się bardziej jednorodne, co pozwala wnioskować poprawę jakości powierzchni obrobionej i jest zgodne z przedstawionym w rozdziale 2 stanem wiedzy. Stopień odkształcenie powierzchni obrobionej dla różnych wartości promienia krawędzi skrawającej (na przedstawiono kolorami) pozostaje na zbliżonym poziomie.



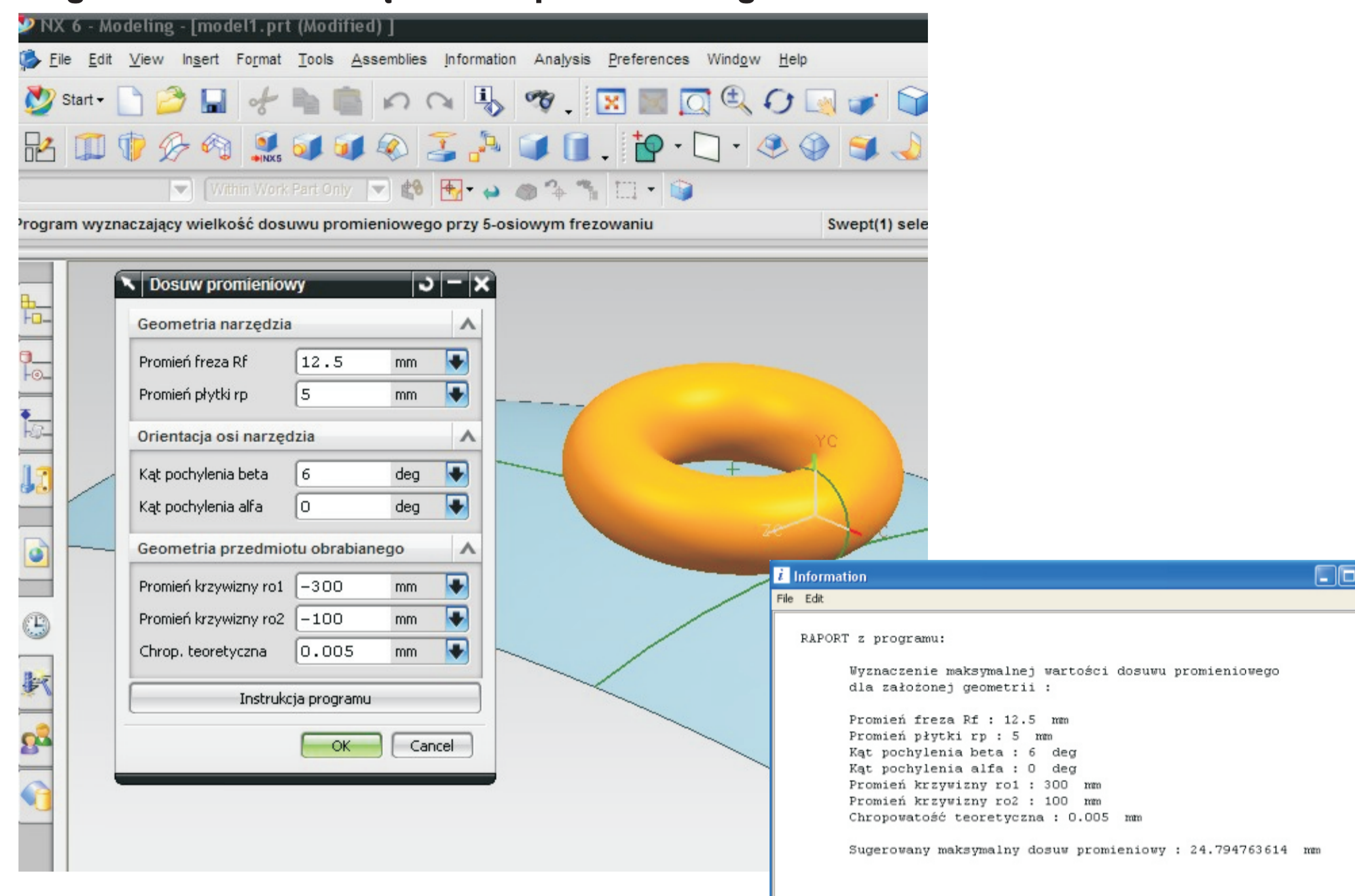
Rys.5. Wpływ promienia krawędzi skrawającej na składowe siły skrawania
Fig.5. Radius cutting edge influence on cutting force components

Program do analizy maksymalnego dosuwu promieniowego narzędzia torusowego przy frezowaniu powierzchni krzywoliniowych

W ramach pracy opracowano program komputerowy zaimplementowany w środowisku Unigraphics NX który pozwala na dobór możliwie największego dosuwu promieniowego ae narzędzia torusowego dla dowolnie zdefiniowanej powierzchni krzywoliniowej w punkcie styku z narzędziem. Użytkownik określa parametry wejściowe:

- geometrię narzędzia torusowego
- kąty pochylenia osi narzędzia
- krzywizny powierzchni
- żadaną teoretyczną chropowatość powierzchni.

Program działając z opracowanym algorytmem oblicza maksymalny możliwy do uzyskania dla zadanych parametrów dosuw promieniowy ae. Program kończy swoje działanie wygenerowaniem raportu z zadanymi parametrami wejściowymi oraz sugerowaną wielkością dosuwu promieniowego.



Rys.5. Program w systemie NX do wyznaczania maksymalnego dosuwu promieniowego i wydajności obróbki
Fig.5. NX program to calculate maximum allowable radial depth of cut & productivity

Procedura optymalizacji warunków obróbki elementów o powierzchniach krzywoliniowych wykonanych ze stopu Ti-6Al-4V

Fizyczne właściwości stopu Ti-6Al-4V, skłonność do tworzenia wiórów segmentowych oraz niska przewodność cieplna powodują, iż występuje brak dedykowanych procedur optymalizacji z uwzględnieniem kryterium produktywności. Dlatego uzasadniona jest próba ustalenia procedury określenia optymalnych parametrów skrawania dla obróbki wykończeniowej stopu Ti-6Al-4V z maksymalizacją objętościowej wydajności obróbki (produktywności), jako kryterium optymalizacyjnym, przy równoczesnym nie przekraczaniu wymaganych wskaźników chropowatości powierzchni, siły skrawania i zużycia ostrza.

Procedura optymalizacji

Zagadnienie optymalizacji frezowania wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V z maksymalizacją wydajności objętościowej, jako kryterium optymalizacyjnym można przedstawić w następujący sposób:

$$Q_v = f(V_c, f, a_p) \rightarrow Q_{v \max}$$

$$F_c \leq F_{c \lim}$$

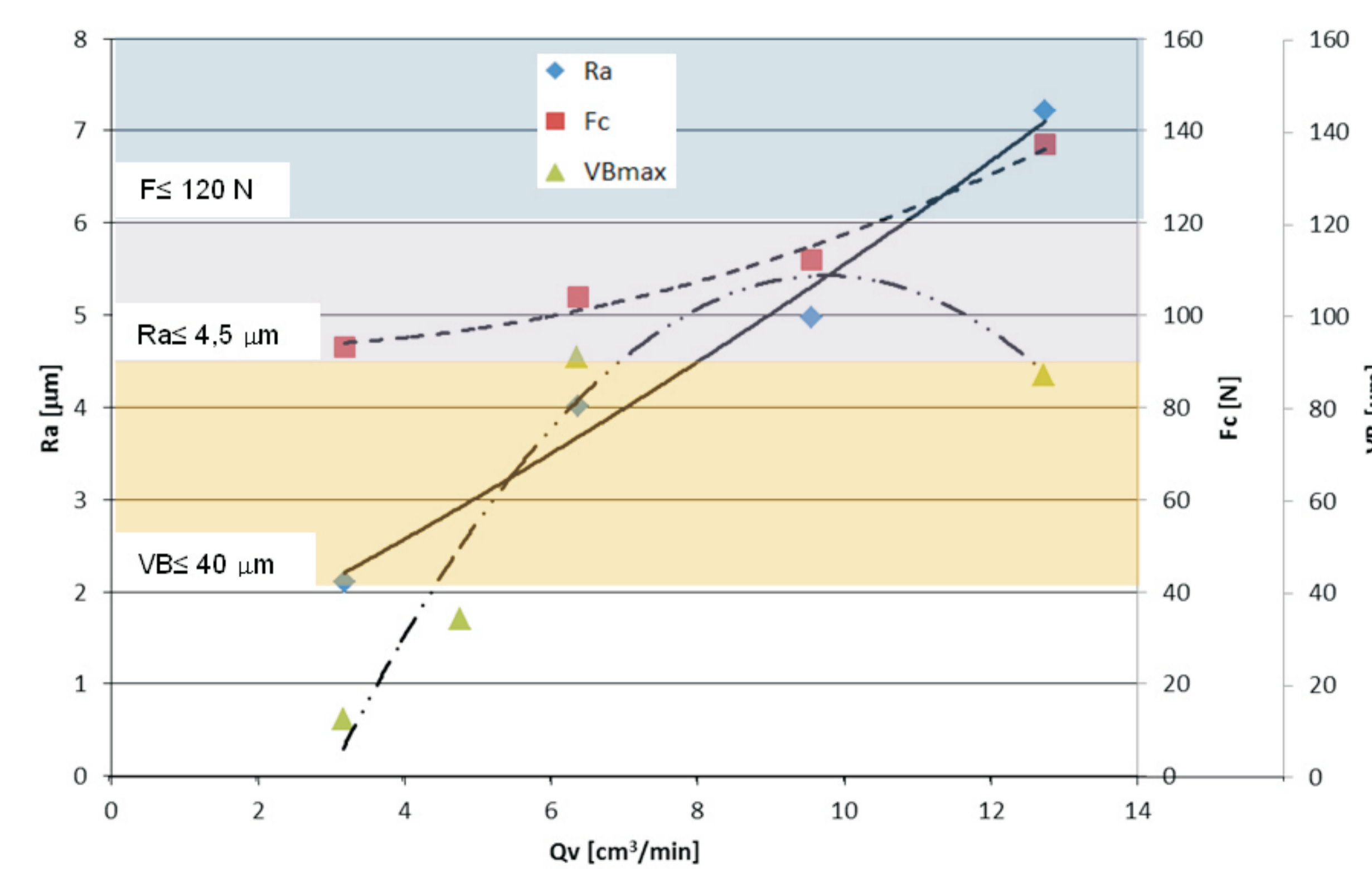
$$R_a \leq R_{a \lim}$$

$$VB \leq VB_{\lim}$$

gdzie: $Q_{v \max}$ – maksymalna wydajność objętościowa,
 $R_{a \lim}$ – graniczna wartość chropowatości powierzchni,
 $F_{c \lim}$ – graniczna wartość składowych siły skrawania,
 VB_{\lim} – graniczna wartość zużycia ostrza skrawającego.

Procedura optymalizacyjna powinna definiować zakres parametrów skrawania i optymalizacyjne kryterium procesu. Bazując na wynikach uzyskanych z kolejnych kroków optymalizacji wybiera się poprawne parametry skrawania. Schemat przedstawiony na rys 1 składa się z:

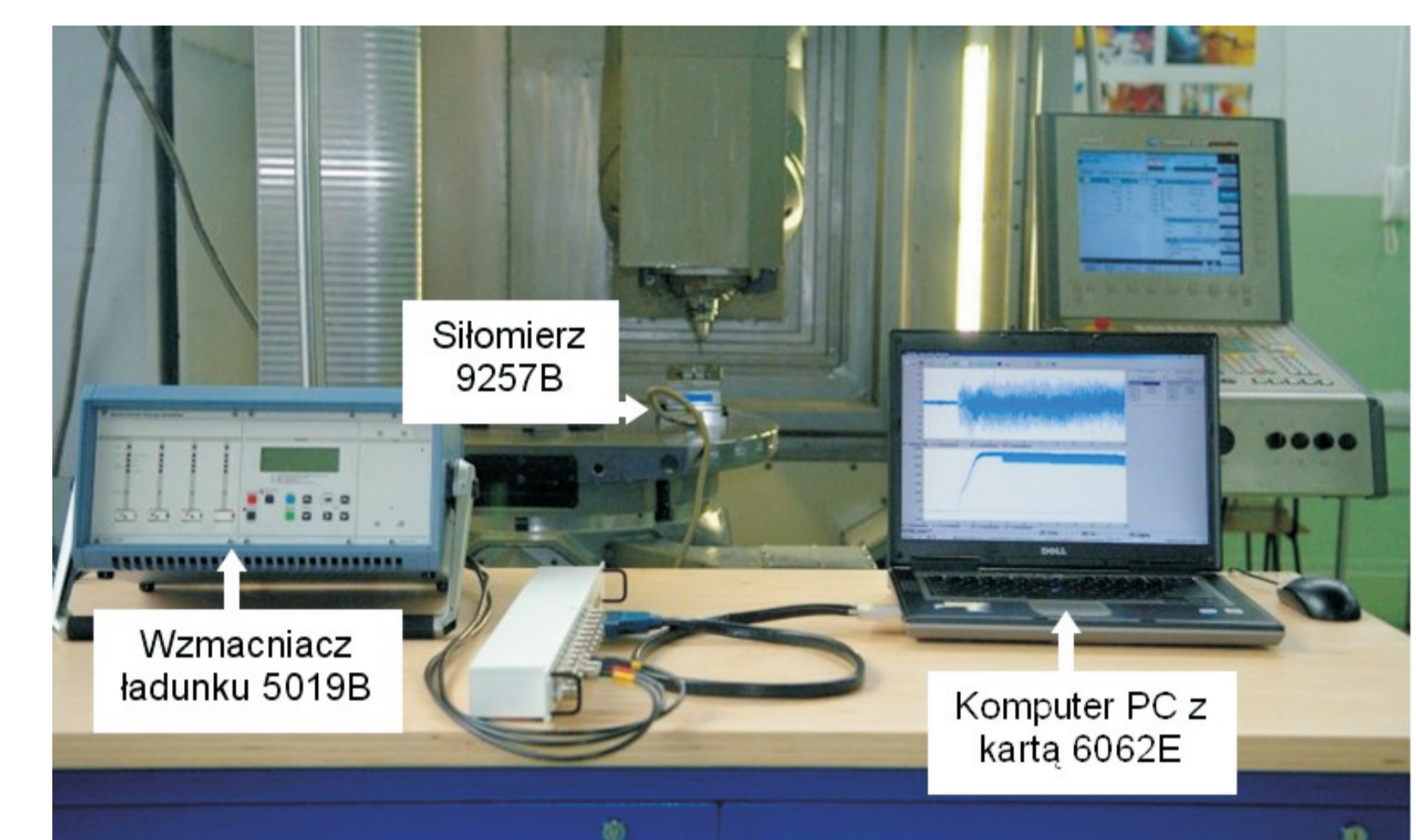
1. Zdefiniowanie kryterium optymalizacyjnego (w tym przypadku Q_v) i ograniczeń optymalizacyjnych (F_c , R_a , VB).
2. Wstępne testy skrawania w celu ustalenia zakresu paramentów obróbki.
3. Ustalenie metodyki badawczej i zestawienie aparatury pomiarowej.
4. Pomiar (F_c , R_a , VB) dla wybranych parametrów skrawania.
5. Określenie i analiza funkcji $F_c=f(Q_v)$, $R_a=f(Q_v)$, $VB=f(Q_v)$.
6. Ustalenie optymalnych parametrów skrawania dla przyjętego kryterium optymalizacyjnego i ograniczeń na podstawie analizy powyższych funkcji.



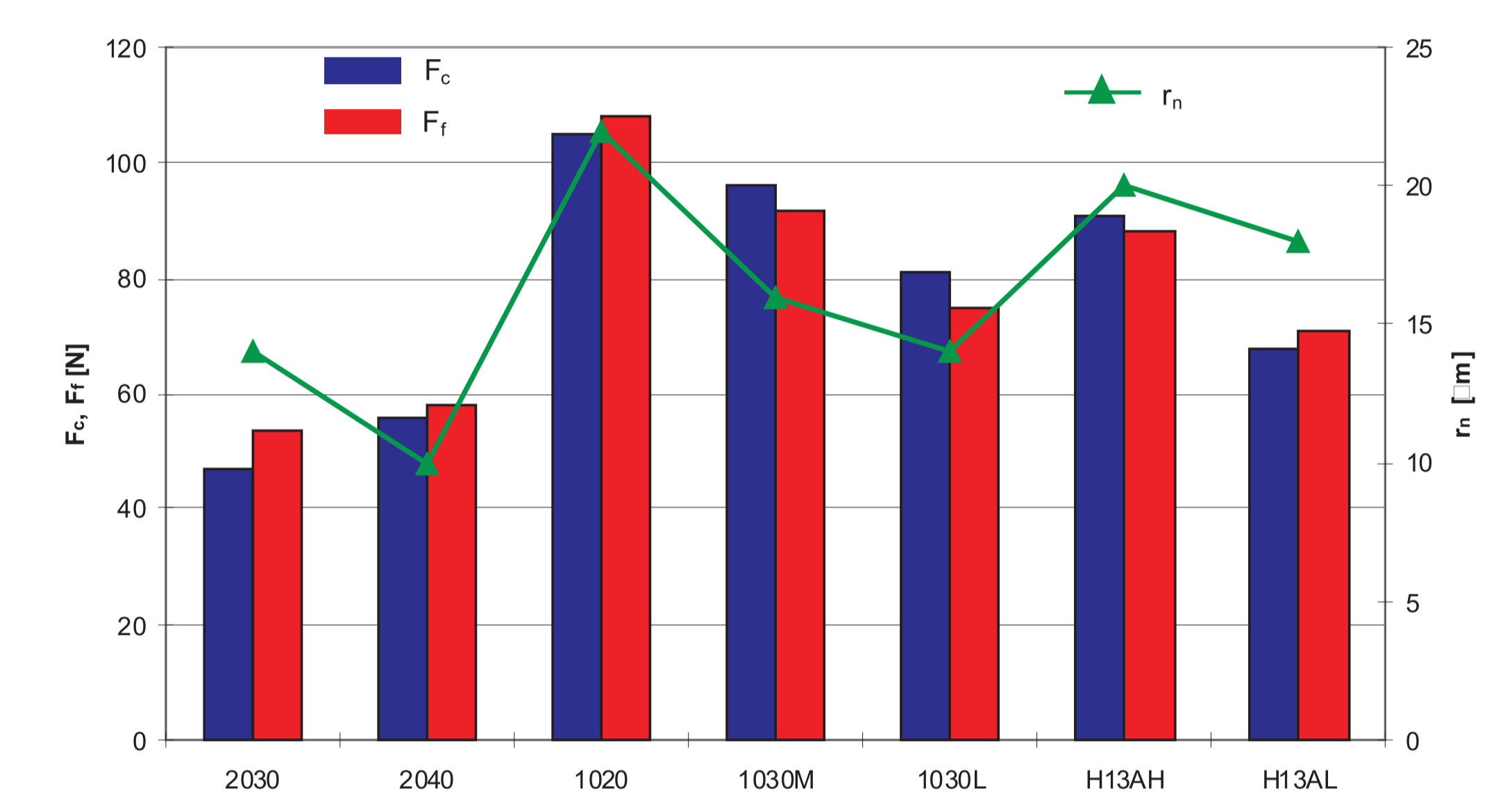
Rys.5. Zależności F_c , R_a oraz VB_{\max} od objętościowej wydajności skrawania Q_v
Fig.5. Influence of F_c , R_a and VB_{\max} on the metal removal rate Q_v

Pomiar siły skrawania

Do pomiaru siły skrawania wykorzystano piezoelektryczny dynamometr 9257B firmy Kistler o zakresie pomiarowym ± 5 [kN] dla każdej z 3 osi pomiarowych. Zarejestrowane sygnały są przetwarzane w 4 kanałowym wzmacniaczu ładunku 5019B na analogowe sygnały napięciowe i przesyłane do komputera PC wyposażonego w 12 bitową kartę pomiarową 6062E firmy National Instruments. Dane pomiarowe były rejestrowane i zapisywane z wykorzystaniem oprogramowania MALDAQ firmy Malinc. Przed przystąpieniem do pomiarów siły zmierzono częstotliwości drgań własnych przedstawionego układu badawczego dla każdej z osi pomiarowych czujnika. Zmierzone częstotliwości drgań własnych wynoszą: $f_n(x,y)=1750$ [Hz] (dla osi X i Y) oraz $f_{nz}=3600$ [Hz] (dla osi Z).



Rys.3. Stanoisko badawcze do pomiaru siły skrawania
Fig. 3. Cutting force measurement stand



Rys.6. Składowe siły skrawania obliczone na podstawie zaproponowanego modelu siły
Fig.6. Cutting force components calculated based on proposed force model

Wyniki testów skrawania pozwoliły na ustalenie najlepszych wartości parametrów skrawania przy obróbce powierzchni zewnętrznej materiału wykonanego ze stopu Ti-6Al-4V przy maksymalizacji objętościowej wydajności obróbki i ustalonych wartościach ograniczeń F_c , R_a oraz VB_{\max} .

The results of cutting tests made it possible to determine the best values of the cutting parameters for machining the outer surface material made of an alloy Ti-6Al-4V while maximizing the volumetric efficiency of the treatment and the limitations set values of F_c , R_a and VB_{\max} .

W wyniku realizacji procedury optymalizacyjnej osiągnięto zwiększenie produktywności o ponad 50% przy jednoczesnym niewielkim wzroście chropowatości powierzchni do wartości parametru $R_a=2,92 \mu m$ (dozwolona wartość $R_{a \lim}=4,5 \mu m$) i wzroście wartości siły skrawania o około 14%, ale wciąż poniżej założonej wartości progowej $F_{c \lim}=120$ N. Badania udowodniły słuszność przeprowadzania wstępnych testów skrawania w lokalnych warunkach obróbki które służą jako pierwotne źródło informacji dla procedury optymalizacyjnej.

As a result of the optimization procedure has been increased productivity by over 50%, while a slight increase in surface roughness values $R_a = 2.92 \mu m$ (allowable limit $R_{a \lim} = 4.5 \mu m$) and an increase in the cutting force by about 14% but still below the predefined threshold value $F_{c \lim} = 120$ N. Research has proven the validity of performing preliminary tests cut in local processing conditions that serve as the primary source of information for the optimization procedure.

Możliwe zastosowania w lotnictwie i innych gałęziach gospodarki
Examples of application in aviation and other branches

Wieloośiowe frezowanie z wykorzystaniem narzędzi torusowych jest wykorzystywane w przemyśle lotniczym do obróbki powierzchni krzywoliniowych kompresorów silników turbinowych oraz łopatek turbiny wysokiego ciśnienia. Optymalizacja warunków skrawania stopu Ti-6Al-4V pozwala na zmniejszenie kosztów produkcji, skrócenie czasu obróbki ale też zwiększenie niezawodności procesu obróbki.

Multi-axis milling using torus tools is used in the aviation industry for machining curved surfaces of turbine engine compressors and high-pressure turbine blades. Optimization of cutting conditions alloy Ti-6Al-4V allows you to reduce production costs, shorten processing time but also increase the reliability of the machining process.

Oferta dla przemysłu
The offer for industry

Obróbka frezowaniem z wykorzystaniem narzędzi torusowych jest wykorzystywane w wielu formach lotniczych najczęściej do obróbki materiałów żarostojkich kompresorów silnika APU oraz łopatek turbiny wysokiego ciśnienia wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych (Ti64, In718). Ze względu na złożoność proces 5-osiowego frezowania istnieje potrzeba stworzenia kompleksowego systemu który będzie podpowiadał użytkownikom w jaki sposób należy prowadzić narzędzie aby uzyskać maksymalną możliwą wydajność obróbki. Zaproponowana metoda adresuje tą potrzebę a opracowany program komputerowy gotowy jest do szybkiej aplikacji przemysłowej.

Due to complexity of multi-axis milling there is a need for system allowable to support user in selecting highest productivity process parameters (tool axis orientation alongside freeform surfaces). The method described in the paper address this need and additionally carried out software is ready to quick production application.