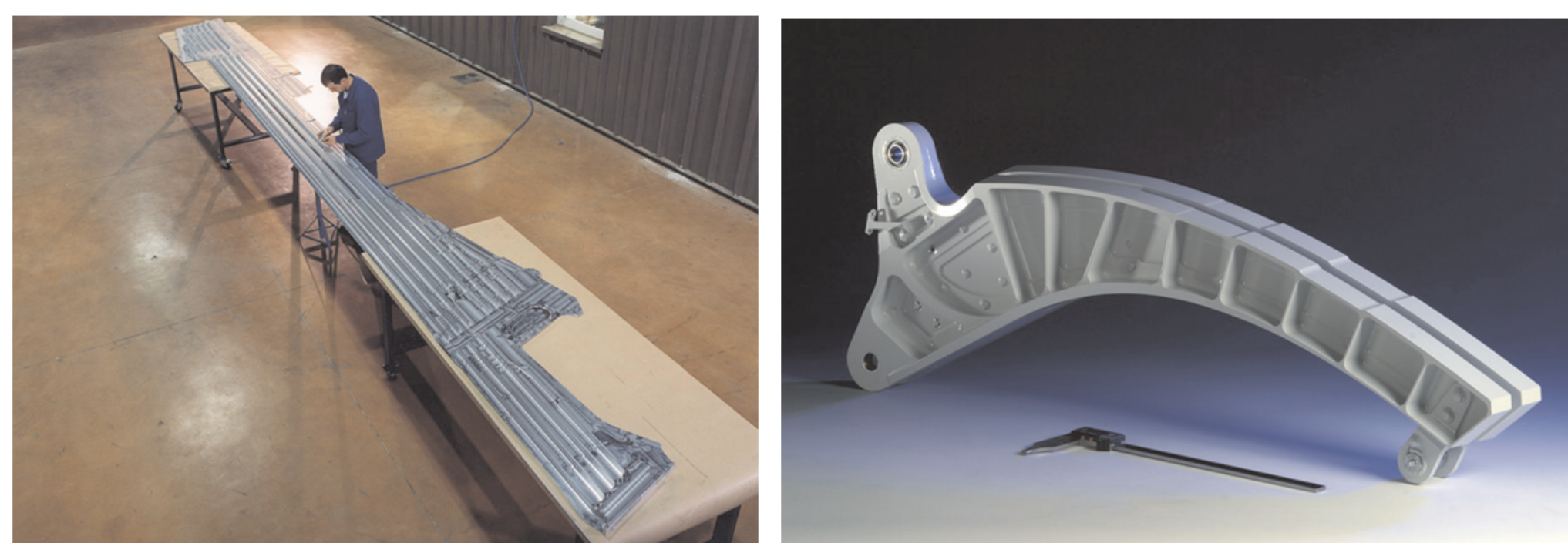


Modelowanie, konstruowanie i kontrolowanie procesu HSM z uwzględnieniem skonfigurowanego układu maszyna-przyrząd-detale

Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska

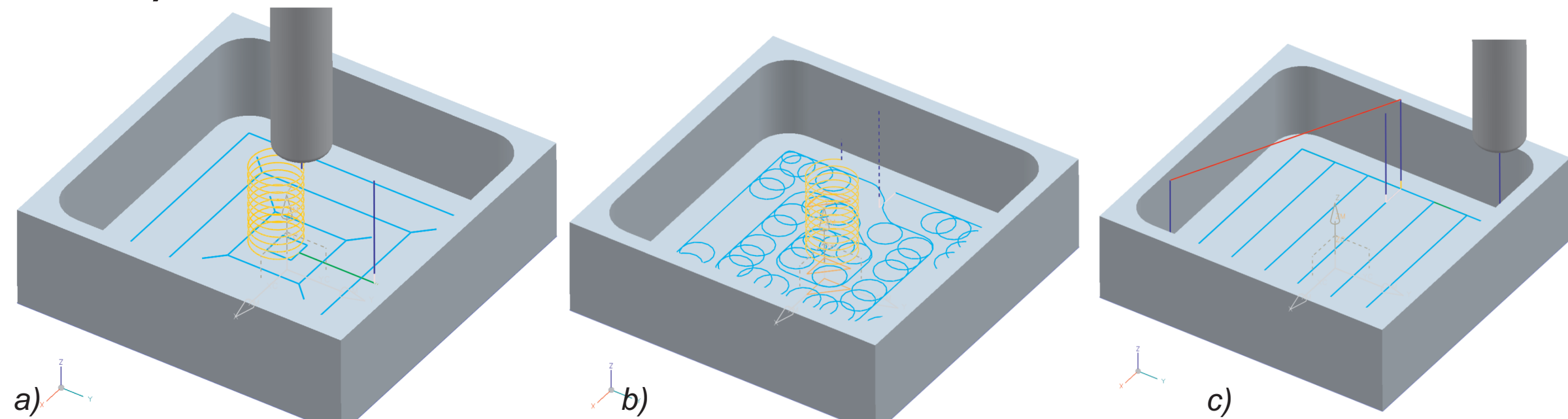
Wyniki badań

Optymalizacja programu NC pod względem maksymalnego wykorzystania mocy wrzeciona.



Rys 1.-Przykładowe lotnicze elementy strukturalne ze stopów Al. Źródło figeac-aero.com

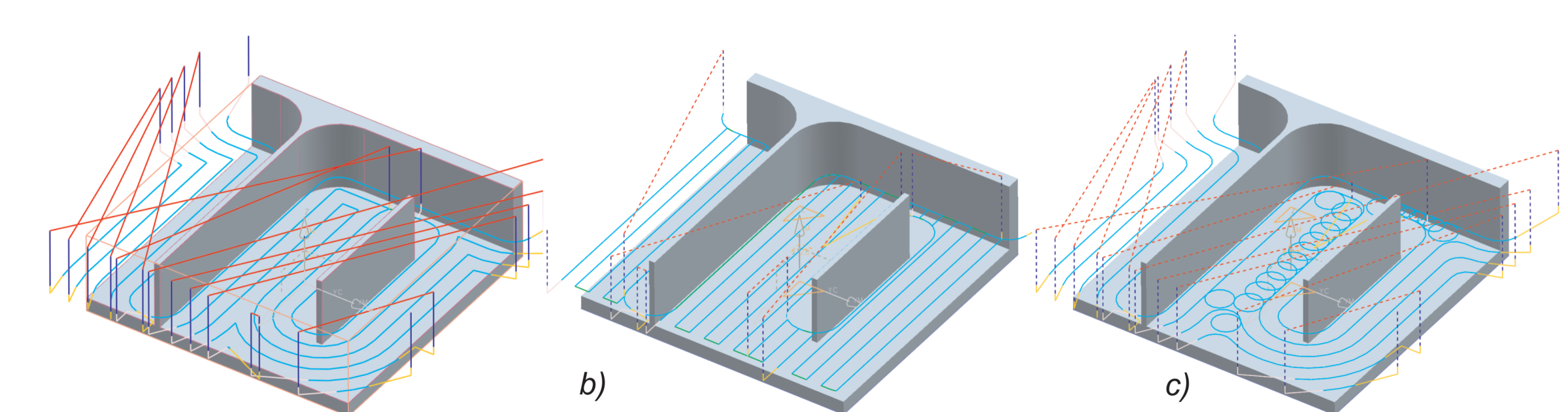
Uproszczony model 3D do badań symulacyjnych obiektów typu kieszeń (POCKET).



Rys 2.-Model 3D uproszczonego typu kieszeń (pocket) wraz z dostępnymi strategiami obróbki w systemach CAM - typu: a) obróbka od środka wejście narzędzia w materiał interpolacją heliakalną - D=20 (mm), ap=2.5xD, ae= od 0.5xD do D b) obróbka od środka wejście narzędzia w materiał interpolacją heliakalną obróbka trochoidalna - D=20 (mm), ap=2.5xD, c) obróbka od środka wejście narzędzia w materiał pionowo (plunge) - D=20 (mm), ap=2.5xD - pierwsze wejście D.

Symulacje toru ruchu narzędzia. Tor ruchu narzędzia bez zwalniania posuwu w narożach. Stosunek czasu (s) a)15, b)30 c)11.

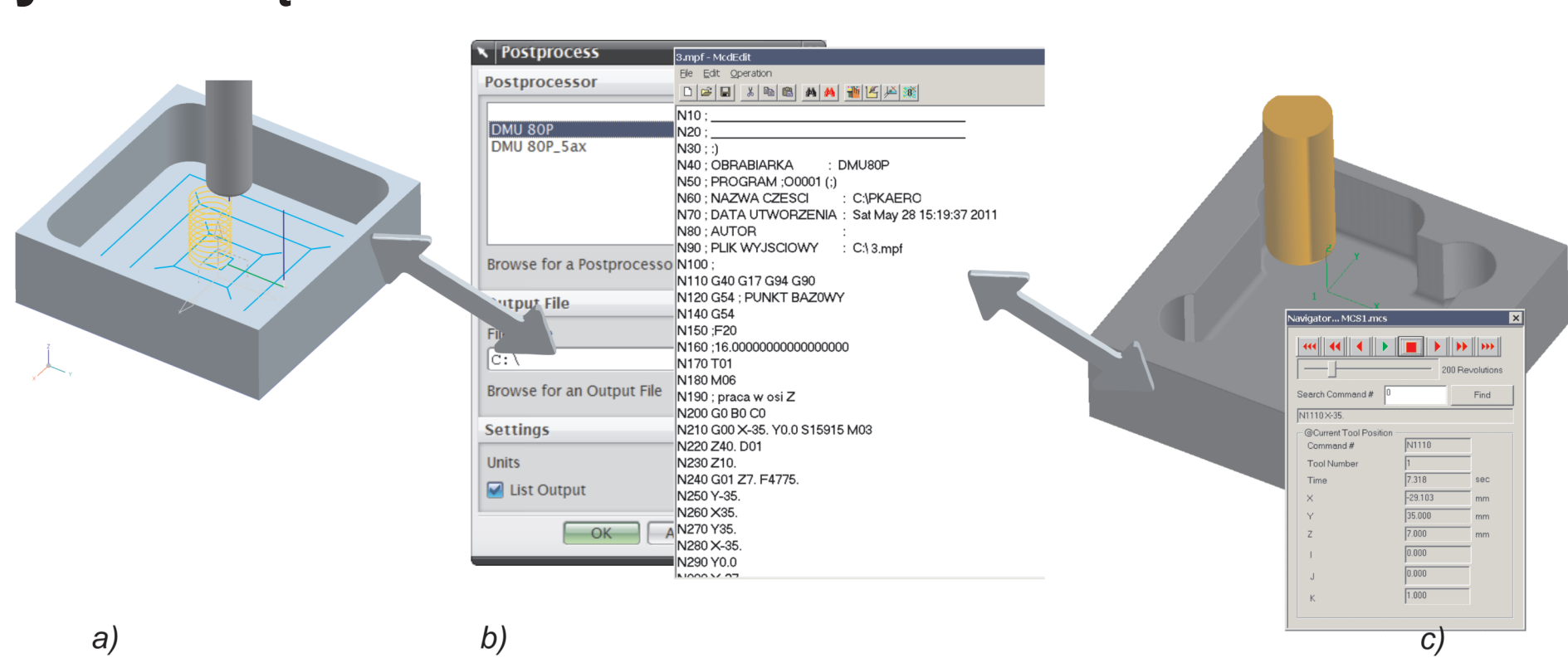
Uproszczony model 3D do badań symulacyjnych obiektów typu wyspa (ISLAND).



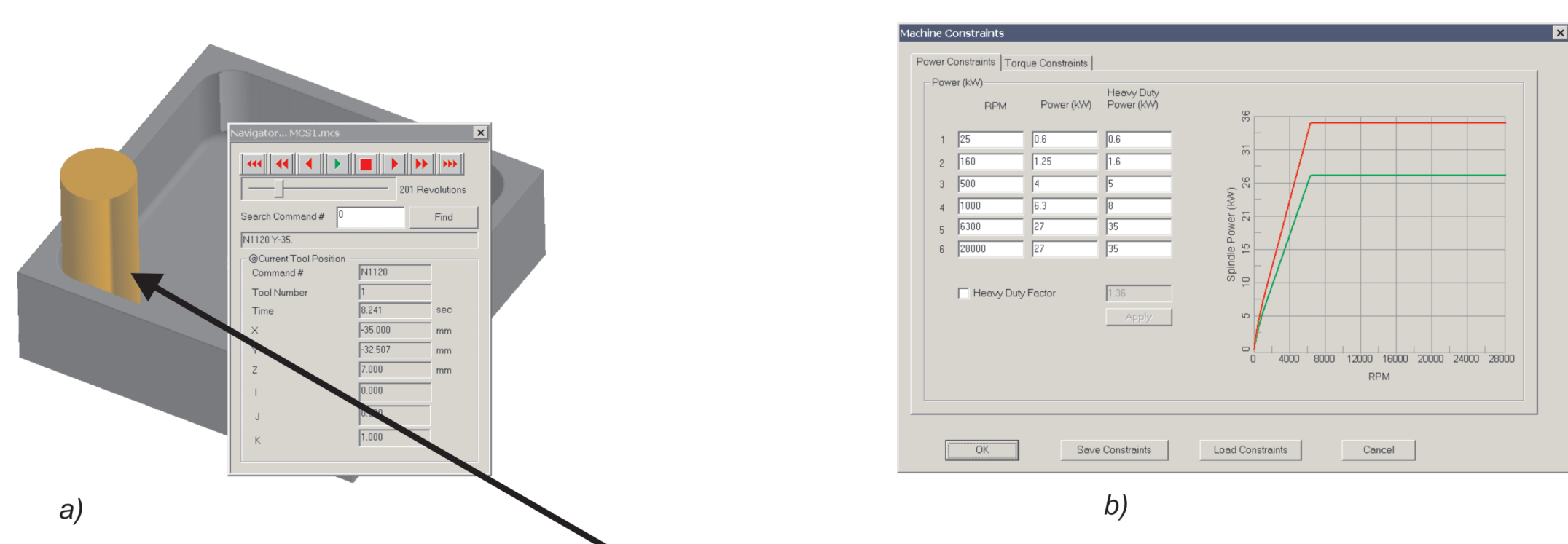
Rys 3.-Model 3D uproszczonego typu wyspa (island) wraz z dostępnymi strategiami obróbki w systemach CAM - typu: a) obróbka z zewnątrz wejście narzędzia w materiał interpolacją kołową - D=20 (mm), ap=2.5xD, ae= od 0.5xD do D b) obróbka z zewnątrz wejście narzędzia w materiał interpolacją liniową obróbka współbieżna i przeciwbieżna - D=20 (mm), ap=2.5xD, c) obróbka z zewnątrz wejście narzędzia w materiał interpolacją kołową - obróbka trochoidalna - D=20 (mm), ap=2.5xD

Symulacje toru ruchu narzędzia. Tor ruchu narzędzia bez zwalniania posuwu w narożach. Stosunek czasu (s) a)34, b)30 c)39.

Uproszczony schemat optymalizacji kodu CNC z wykorzystaniem komercyjnych narzędzi.



Rys 4.-Uproszczony schemat optymalizacji kodu CNC z wykorzystaniem komercyjnych narzędzi. a) programowanie toru ruchu narzędzia i symulacja danych w systemie CAM, b) opracowanie postprocesora i generowanie kodu CNC c) symulacja i optymalizacja kodu CNC uwzględniająca układ OUPN.



Rys 5.-Symulacja poboru mocy wrzeciona podczas frezowania z zadanymi parametrami. a) symulacja kodu CNC - dojazd narzędzia do naroża, b) charakterystyka wrzeciona obrabiarki HSC 55, c) dane obrazujące pobór mocy wrzeciona - kółkiem zaznaczono aktualną pozycję narzędzia na symulacji.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

- Ultratech - obróbka wielkogabarytowych elementów lotniczych ze stopów Al obróbki.
- PZL Mielec - obróbka elementów lotniczych z stopów Al.

Wnioski

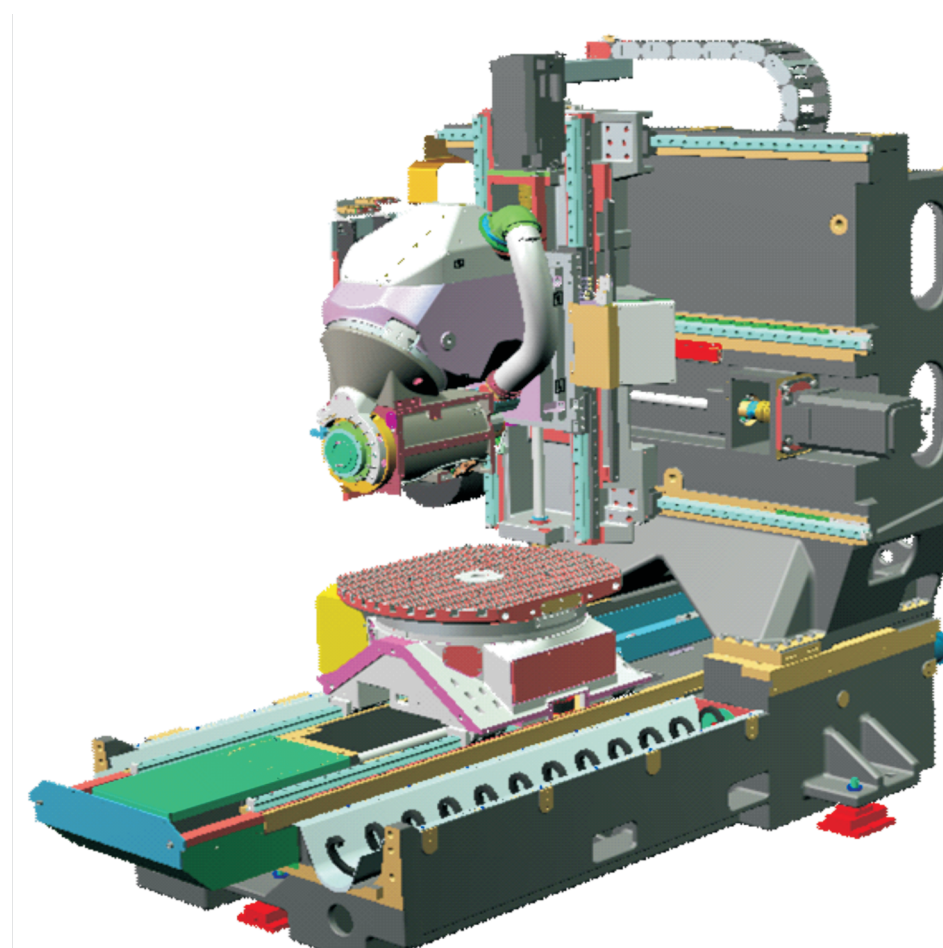
Większość firm doбира parametry obróbki wysokowydajnej lotniczych elementów konstrukcyjnych z stopów Al. w sposób katalogowy. Problemy pojawiają się podczas programowania toru ruchu narzędzia w systemach CAM. Optymalizacja polega w większości przypadków na ograniczaniu prędkości posuwowych w narożach oraz przyspieszaniu na zewnętrznych konturach, oraz zmniejszaniu ilości wyjazdów ruchów jałowych. Niejednokrotnie narzędzie nie pracuje w sposób równomierny - zmienność nadładku - szerokość oraz głębokość skrawania. W większości przypadków wydajność maszyny nie jest w pełni wykorzystywana. Przedstawiona optymalizacja w kraju nie jest spotykana, większości z powodu krótkich czasów na wdrożenia i jednostkowych części. W dalszej części badań zostaną przedstawione wyniki z przeprowadzonych kolejnych symulacji oraz wyniki wdrożeń zoptymalizowanych programów CNC na maszynie.

Wyniki badań

Stanowisko badawcze.

Punktem wyjścia do budowy planu badań było zastosowanie możliwie szerokiej gamy materiałów narzędziowych oraz geometrii płytek skrawających do przeprowadzenia analizy różnych wariantów procesu obróbki. Ruch główny realizowany jest przez obrót narzędzia, ruch posuwowy wykonuje stół obrabiarki na którym zamocowano dynamometr wraz z próbką badanego materiału.

Obrabiarka DMU 80P duoBlock dysponuje wrzecionem o maksymalnej prędkości obrotowej $n=18000$ [min⁻¹] i wyposażone jest w uchwyt HSK-A63. Dwie osie obrotowe (główny - oś B i stołu - oś C) oraz układ sterowania Sinumerik 840D umożliwiają prowadzenie ciągłej obróbki 5-osiowej. Wyposażenie obrabiarki umożliwia ponadto podawanie chłodziwa do strefy obróbki przez środek wrzeciona z programowalną regulacją ciśnienia.



Rys 5.1. Kinematyka 5-osiowej obrabiarki DMU 80P duoBlock

Materiał próbek.

Do badań wybrano próbki ciągniętego na zimno stopu Ti-6Al-4V charakteryzującego się drobną strukturą globulityczną i równomierną strukturą. Właściwości fizyczne i skład chemiczny badanego materiału przedstawiono odpowiednio w Tabeli 5.1 i Tabeli 5.2

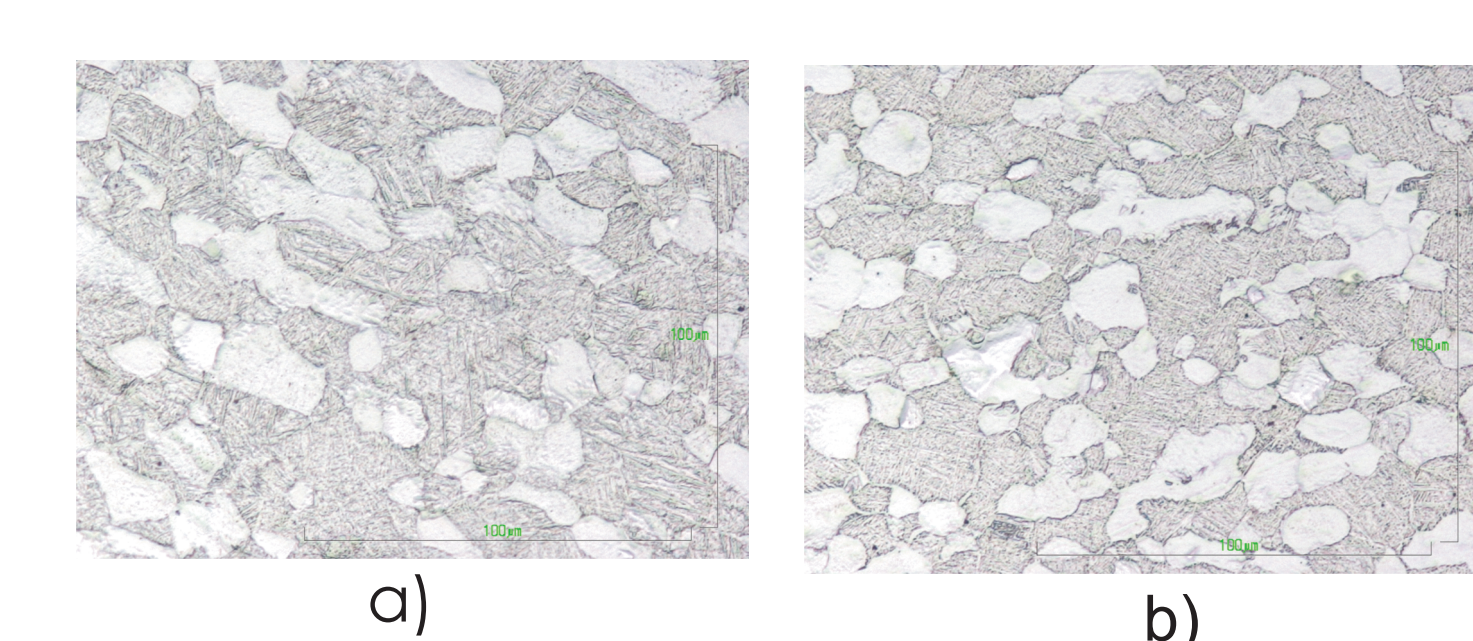
Tabela 5.1. Właściwości fizyczne stopu Ti-6Al-4V w temp. pokojowej

Wyrzynalność na granicy rozciągania Rm [MPa]	Umowna granica plastyczności R0.2 [MPa]	Wydłużenie względne [%]	Przewężenie [%]	Twardość [HRC]	Gęstość [g/cm ³]
1036	918	17	44	35	4,24

Tabela 5.2. Skład chemiczny stopu Ti-6Al-4V

Al [%]	V [%]	Fe [%]	O [%]	N [%]	Ti [%]
6,14	3,96	0,18	0,19	0,007	reszta

Materiał wyjściowy poddany był przescianiu w temp. 960[°C] przez godzinę i szybko chłodzony w wodzie. W celu zredukowania naprężeń szczałkowych materiał poddano wygrzaniu w temperaturze T=704 [°C] z powolnym chłodzeniem. Na przedstawiono mikrostrukturę przekroju poprzecznego i wzdłużnego badanej próbki. Mikrostruktura ma charakter bi-modalny; ziarna fazy alfa w osnowie płytkowej mieszaniny faz alfa i beta.



Rys 5.2. Mikrostruktura badanego stopu Ti-6Al-4V w przekroju: a) poprzecznym b) wzdłużnym

Tabela 5.3. Materiały ostrza i wyniki obliczeń promieni krawędzi skrawających

Symbol płytki	Opis i przeznaczenie	Promień krawędzi skrawającej r _s [μm]
R300-1032M-KH H13A	niewielki węgiel spiekany zawierający głównie węgiel wolframu WC, geometria do obróbki ciężkiej	20
R300-1032E-KL H13A	niewielki węgiel spiekany zawierający głównie węgiel wolframu WC, geometria do obróbki lekkiej	18
R300-1032E-MM 2040	węgiel spiekany zawierający głównie węgiel tytanu TiC lub azotki tytanu TiN, pokrywany wielowarstwowo TiCN, Al ₂ O ₃ , metodą MT-CVD, geometria do obróbki ciężkiej	10
R300-1032E-PL 1030	węgiel spiekany zawierający głównie węgiel tytanu TiC, pokrywany wielowarstwowo TiAN, metodą PVD, geometria do obróbki lekkiej	14
R300-1032E-PM 1030	węgiel spiekany zawierający głównie węgiel tytanu TiC, pokrywany wielowarstwowo TiAN, metodą PVD, geometria do obróbki średniej	16
R300-1032M-KH 1020	cermet zawierający głównie węgiel tytanu TiC lub azotki tytanu TiN, pokrywany warstwą TiN.	22

Narzędzie.

Do badań wykorzystano głowicę narzędziową firmy Sandvik do której montowano okrągłe płytki skrawające wykonane z różnych materiałów narzędziowych (węgiel spiekany, cermet) powlekane powłokami ochronnymi z różnych materiałów i otrzymane różnymi technikami (PVD, CVD). Opierając się na wnioskach z analizy literatury dot. skrawania stopów tytanu zmierzono promień krawędzi skrawającej r_s każdego badanego ostrza. Do pomiaru wykorzystano urządzenie pomiarowe TalyScan 150 firmy Taylor-Hobson wyposażone w końcówkę pomiarową o promieniu r_p=2 [μm]. Pomiar przeprowadzono na trzech płytkach tego samego rodzaju, uśredniona wartość pomiaru została posłużyła do obliczenia wartości promienia krawędzi skrawającej zgodnie z równaniem:

$$r_s = r_p \cdot F_s$$

równanie 5.1

gdzie, r_p - zmierzona promień krawędzi skrawającej r_s - promień końcówki pomiarowej

Wyniki obliczeń promieni krawędzi skrawającej oraz użyte w badaniach materiały ostrza scharakteryzowano w 5.3

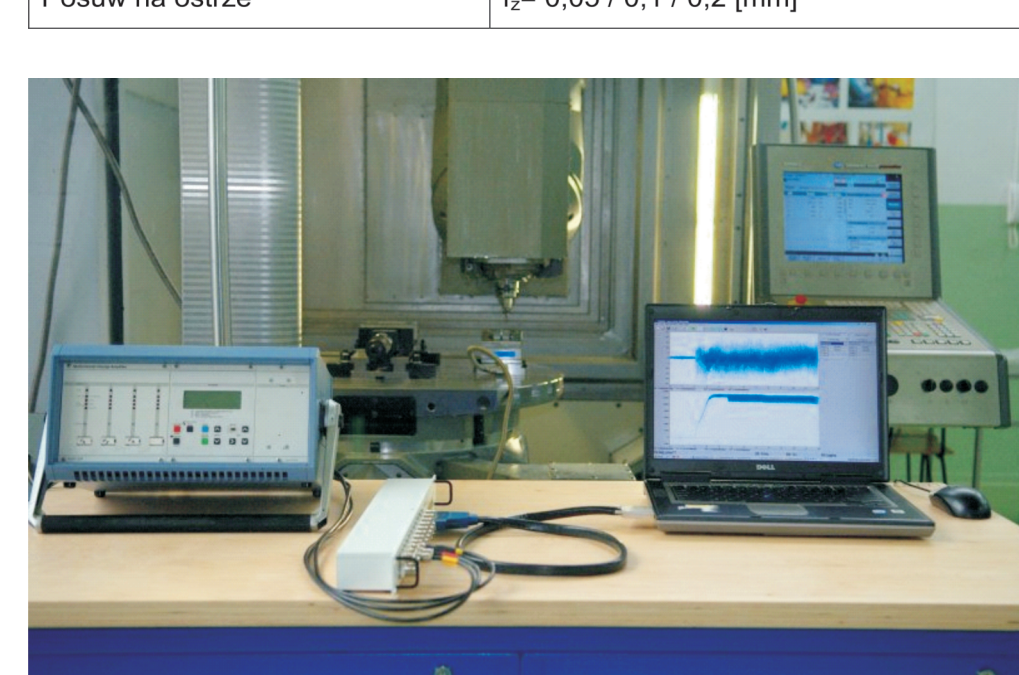
Parametry technologiczne pomiarów.

Wielkościami zmiennymi (obok materiału i geometrii ostrza) w przeprowadzanych badaniach były parametry technologiczne: prędkość skrawania v_c [m/min] i posuw na ostrze f_s [mm]. Zgodnie z zaleceniami producenta narzędzi oraz wniosków z przeprowadzonej analizy literatury badania przeprowadzono z użyciem chłodziwa. Czynnikiem chłodziwy (9% roztwór koncentratu Cimperial 821 z wodą) podawany był pod ciśnieniem 40 [bar] przez wrzeciono obrabiarki do strefy obróbki. W Tabeli 5.4 przedstawiono parametry technologiczne zastosowane podczas badań.

Tabela 5.4. Parametry prowadzonych prób

Dozow osnowy	q _s = 0,100 [mm]
Prędkość skrawania	v _c = 100 / 200 / 400 [m/min]
Posuw na ostrze	f _s = 0,05 / 0,1 / 0,2 [mm]

Aparatura pomiarowa
Pomiar siły skrawania.



Rys 5.3. Stanowisko badawcze do pomiaru 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 (Rys. 5.3). Dane pomiarowe były rejestrowane i zapisywane z wykorzystaniem oprogramowania MALDAQ firmy Malinc.

Przed przystąpieniem do pomiarów siły zmierzono częstotliwości drgań własnych przedstawionej układu badawczego dla każdej z osi pomiarowych czujnika. Zmierzone częstotliwości drgań własnych wynoszą: f_(X,Y)=1750 [Hz] (dla osi X i Y) oraz f_(z)=3600 [Hz] (dla osi Z).

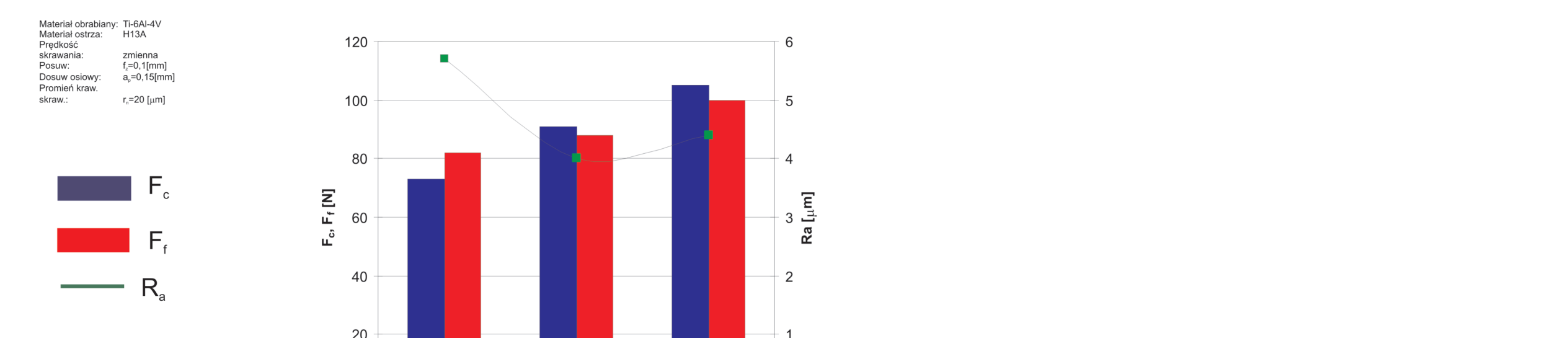
Producent siłomierza podaje że zakres użyteczny pomiarów nie powinien przekraczać 1/3 wartości częstotliwości drgań własnych f₀ układu badawczego[89]. Dla maksymalnej prędkości obrotowej narzędzia częstota wymuszenia wynosi 78 [Hz] i jest wielokrotnie mniejsza niż zalecana 1/3 wartości częstotliwości drgań własnych układu badawczego. Dlatego można wykluczyć wpływ częstotliwości wymuszenia na wyniki pomiaru. Zarejestrowane sygnały pomiarowe sił z trzech prób skrawania o zadanych parametrach są uśredniane i taka procedura wykonywana jest dla każdej mierzonej składowej.

Pomiar zużycia ostrza.

Do pomiaru zużycia ostrza skrawającego wykorzystano urządzenie pomiarowe TalyScan150 firmy Taylor-Hobson. Pomiar polegał na zeskanowaniu ostrza skrawającego i wyborze profilu w którym zużycie było największe. Do porównania profilu ostrza zużytego z profilem referencyjnym wykorzystano system CAD/CAM NX4 firmy UGS.

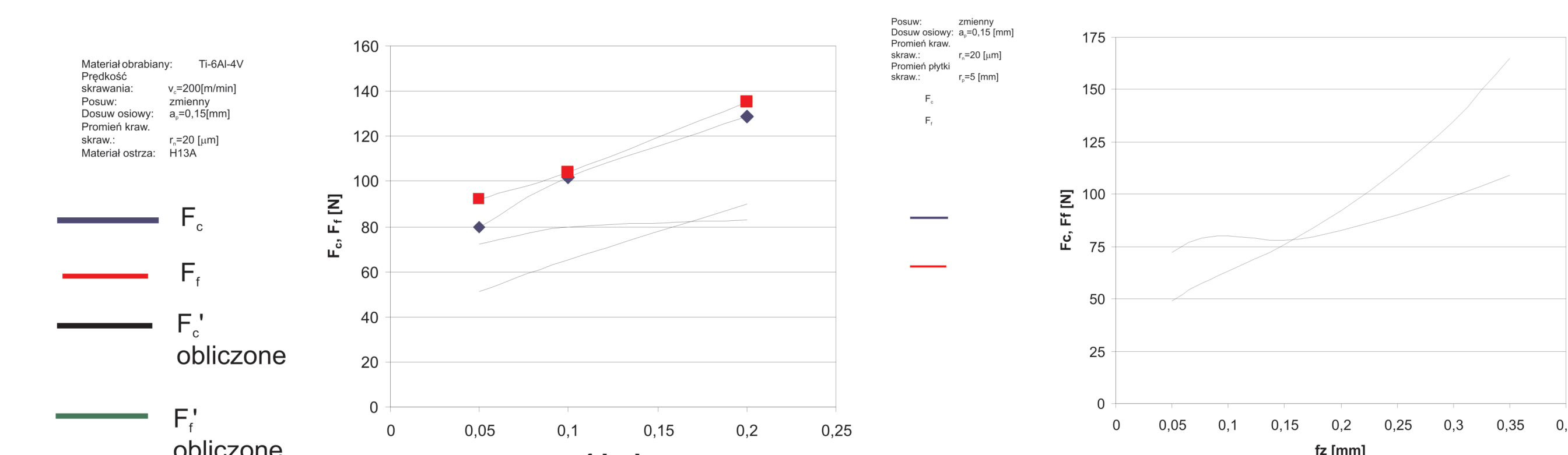
Siły skrawania.

Podczas analizy procesu skrawania za pomocą metody elementów skończonych założono istnienie idealnej makro- i mikrogeometrii ostrza. Dlatego model symulacyjny nie uwzględnia rzeczywistej chropowatości ostrza skrawającego, zużycia ostrza oraz możliwego osadzenia cząstek materiału obrabianego na krawędzi ostrza. Zjawiska te mogą tłumaczyć wzrost składowych sił skrawania wraz ze wzrostem prędkości skrawania (Rys. 5.4). Badania symulacyjne prognozowały nieznaczny spadek siły skrawania wraz ze wzrostem prędkości skrawania czego nie potwierdzają badania doświadczalne podczas których zaobserwowano wzrost składowych sił skrawania (Rys 5.4). Wraz ze wzrostem prędkości skrawania przed krawędzią skrawającą powiększa się strefa mocno uplastycznionego materiału, który powoduje wzrost oporu skrawania.



Rys 5.4. Wpływ prędkości skrawania na składowe siły skrawania i chropowatość powierzchni

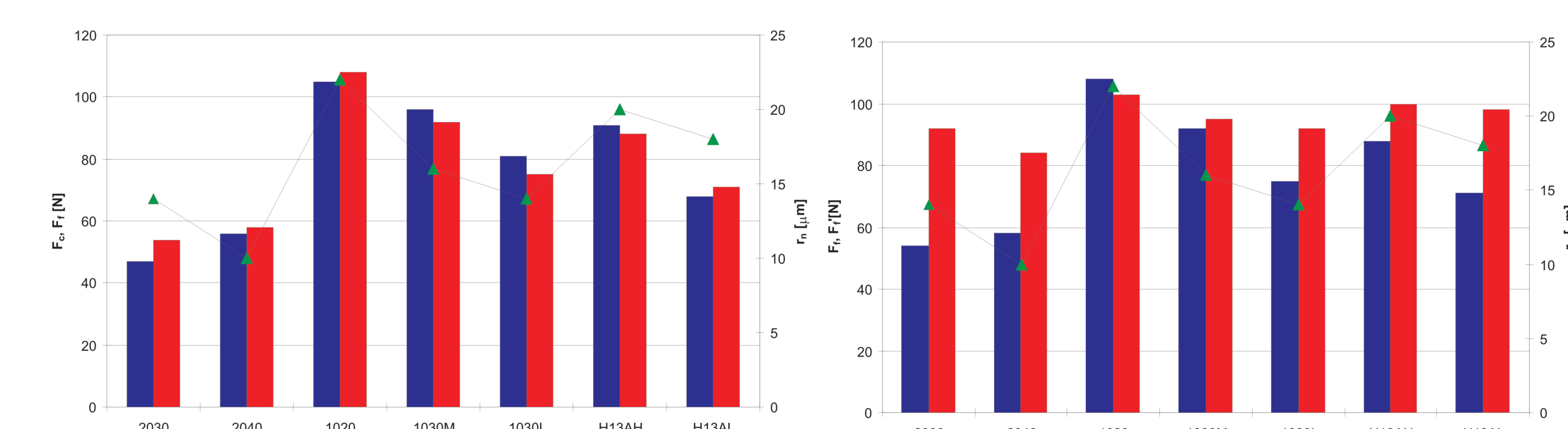
Wzrost prędkości skrawania powoduje niewielkie zmniejszenie parametru chropowatości Ra. Pozytywny wpływ prędkości skrawania obserwowany jest głównie podczas obróbki materiałów łatwo obrabialnych (np. stopy aluminium) co wyjaśniane jest zwiększonymi temperaturami strefy skrawania. Podczas obróbki stopu Ti-6Al-4V pozytywny wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni obrabianej nie jest tak znaczący. W niektórych przypadkach wzrost prędkości skrawania powoduje zwiększenie chropowatości powierzchni. Efekt ten można tłumaczyć oblepianiem krawędzi skrawającej włórami. Zwiększenie posuwu f_s powoduje wzrost zmierzonych składowych siły skrawania F_x i F_y. Również zaproponowany model siły skrawania ze wzrostem posuwu prognozuje zwiększenie składowych siły skrawania jednak są to wartości wyraźnie mniejsze od sił zmierzonych (5.5).



Rys 5.5. Wpływ posuwu na składowe siły skrawania

Rys 5.6. Składowe siły skrawania obliczone na podstawie zaproponowanego modelu siły

Na Rys. 5.6. przedstawiono obliczone na podstawie zaproponowanego w rozdziale 4 modelu, składowe siły skrawania. Ich analiza potwierdza przyjęte założenie zmiany składowych siły skrawania wraz ze zwiększaniem grubości warstwy skrawanej. Dla posuwu f_s=0,05 [mm] grubość warstwy skrawanej h jest mniejsza (w całym zakresie kąta φ od promienia krawędzi skrawającej r_s). W tym obszarze duży wpływ na siłę skrawania ma krawędź skrawająca, dlatego wartość składowej posuwowej F_x jest większa od składowej stycznej F_y. Wraz ze wzrostem posuwu, zwiększa się grubość warstwy skrawanej h. Dla posuwu f_s=0,17 [mm] wartości obu składowych siły skrawania są równe. Dalsze zwiększanie posuwu powoduje że dominującą rolę w procesie skrawania zaczyna odgrywać powierzchnia natarcia (h>2r_s) co powoduje zwiększenie udziału składowej stycznej F_y przy niewielkim już wzroście składowej posuwowej F_x. Wpływ promienia krawędzi skrawającej r_s na składowe siły skrawania przedstawia Rys. 5.7. Przeprowadzono pomiary siły skrawania wszystkich gatunków płytek przedstawionych w Tabeli 5.3. Na osi rzędnych rys. przedstawiono rodzaj materiału ostrza, na osi odciętych umieszczono wyniki pomiarów składowych siły oraz odpowiadający danej płytce promień krawędzi skrawającej r_s. Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają istotny wpływ promienia krawędzi skrawającej na siły występujące w procesie skrawania stopu Ti-6Al-4V. Wzrost promienia krawędzi skrawającej istotnie wpływa na zwiększenie siły skrawania. Jest to dobrze widoczne na przykładzie węgla spiekane 2040 którego promień r_s=10 [mm] oraz cermetu 1020 którego r_s=22 [mm]. W tym przypadku wzrost składowych sił skrawania jest prawie dwukrotny. Pomiar sił prowadzony był z użyciem ostrzy skrawających pokrywanych różnego rodzaju powłokami przeciwdrożdżycowymi (Tabela 5.3.). Zazwyczaj obserwowany korzystny wpływ tych powłok na zmniejszenie skłonności adhezyjnych ostrza w stosunku do materiału obrabianego uwidoczniony jest łatwiejszym ślizganiem wióra. To z kolei powoduje zmniejszenie siły skrawania. Z przeprowadzonych badań wynika że wpływ powłoki przeciwdrożdżycowych ostrzy ograniczony jest jedynie do ich grubości. Grubość powłoki wpływa na promień krawędzi skrawającej, co podkreśla znaczenie tego parametru podczas obróbki stopów tytanu.



Rys 5.7. Wpływ promienia krawędzi skrawającej na siły skrawania (v_c=200 m/min, a_s=0,15mm, f_s=0,1mm)

Rys 5.8. Porównanie zmierzonej F_x i obliczonej F_x' składowej posuwowej siły skrawania (v_c=200 m/min, a_s=0,15mm, f_s=0,1mm)

Na Rys. 5.8. przedstawiono porównanie wyników pomiaru siły posuwowej F_x i obliczonej na podstawie zaproponowanego w pracy modelu siły F_x' w zależności od promienia krawędzi skrawającej r_s. Ze wzrostem promienia krawędzi skrawającej zwiększa się prognozowana i zmierzona składowa siły posuwowej. Istotne różnice pomiędzy siłą zmierzoną i obliczoną zaobserwowano dla ostrza z węgla spiekane 2030. Powodem tego może być fakt iż model siły nie uwzględnia rzeczywistej geometrii ostrza (łamacz wióra) oraz wszystkich parametrów procesu (chłodziwo, drgania itd.).

Wnioski

- promień krawędzi skrawającej r_s odgrywa istotną rolę podczas skrawania stopu Ti-6Al-4V. Stosowanie ostrzy charakteryzujących się małym promieniem wpływa na obniżenie siły skrawania i jest dobrze odzwiercudniane przez zaproponowany model siły.
- zalecane jest stosowanie małych posuwów f_s, przez co uzyskuje się mniejsze siły skrawania.
- nie jest obserwowany pozytywny wpływ prędkości skrawania na zmniejszenie siły skrawania.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- 1. mgr inż. Ostrowski Robert : *Pomiar oporów skrawania przy wierceniu stopów Mg i Al.* Seminarium naukowe zespołów badawczych Zb1, ZB2, ZB5 - 01.06.2011

Prace mgr, dr, hab.

Prace magisterskie:

- Piotr Hajduk : *Nowoczesne rozwiązania technologiczne w wysokowydajnej obróbce stopów aluminium na przykładzie obróbki skrzynki przekładniowej.* Dr hab. inż. Romana E. Śliwa prof. ndzw. PRZ.