

Dr hab. inż. Jan BUREK Prof. PRz  
[jburek@prz.edu.pl](mailto:jburek@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Karol ŻURAWSKI  
[zurawski@prz.edu.pl](mailto:zurawski@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Marcin PŁODZIEN  
[plodzien@prz.edu.pl](mailto:plodzien@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Jacek MISIURA  
[jmisiura@prz.edu.pl](mailto:jmisiura@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Piotr ŻUREK  
[p\\_zurek@prz.edu.pl](mailto:p_zurek@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

## **BADANIA TECHNOLOGICZNE WPŁYWU KĄTA PROWADZENIA FREZU NA DOKŁADNOŚĆ WYMIAROWO-KSZTAŁTOWĄ POWIERZCHNI PROSTOKREŚLNYCH**

**Streszczenie:** Artykuł porusza zagadnienie zastosowania symultanicznego pięcioosiowego frezowania obwodowego na powierzchniach prostokreślnych. W pracy przedstawiono problem pozycjonowania narzędzia oraz zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych oraz technologicznych wpływu kąta prowadzenia na dokładność kształtowo-wymiarową wykonywanej powierzchni w prezentowanej strategii obróbki.

**Słowa kluczowe:** obróbka pięcioosiowa, frezowanie obwodowe

## **TECHNOLOGY RESEARCH ABOUT THE INFLUENCE OF LEAD ANGLE ON THE DIMENSIONAL AND FORM ACCURACY OF RULED SURFACES**

**Summary:** The article describes the issue of the usage of the simultaneous five-axis flank milling of the ruled surfaces. In this thesis the problem of tool positioning was presented. Moreover, the results of the simulation and technology research about the influence of the lead angle on the dimensional and form accuracy on the created surface in the presented milling strategy was depicted.

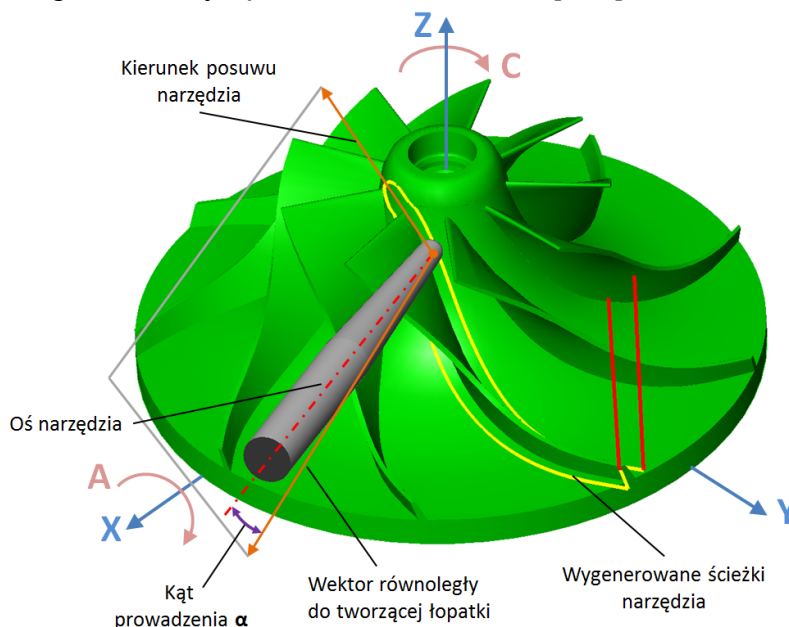
**Keywords:** five-axis machining, flank milling

### **1. Wprowadzenie**

Dynamiczny rozwój technik komputerowego wspomagania wytwarzania stwarza coraz szersze możliwości opracowywania procesów obróbkowych części o złożonych kształtach. Postęp ten w szczególności dotyczy technologii wytwarzania elementów lotniczych takich jak łopatki czy też wirniki, od których wymaga się zachowania wysokich norm jakościowych przy jak najkrótszym czasie ich wytwarzania. [1, 2]

W dotychczasowej praktyce przemysłowej podstawową strategią obróbki wirników jest frezowanie punktowe. Polega ono na wykonaniu wielu płytkich przejść frezem kulistym wokół obrabianej powierzchni. Metoda ta pozwala na wykonanie dowolnego kształtu powierzchni, lecz by zachować dostateczną jej jakość należy minimalizować głębokość skrawania, co w konsekwencji skutkuje wydłużeniem czasu obróbki. [1, 2]

Mniej powszechną metodą obróbki tego typu elementów jest pięcioosiowe frezowanie obwodowe (Rys 1.1). W tym procesie wykonywane jest wyłącznie jedno przejście, w którym powierzchnia boczna narzędzia prowadzona jest jak najbliżej obrabianej powierzchni. Główną zaletą tej strategii jest znacznie krótszy czas obróbki, w stosunku do frezowania punktowego, przy zachowaniu wymaganej jakości powierzchni. Natomiast podstawowym problemem w tej metodzie jest określenie optymalnej pozycji osi narzędzia, w szczególności kąta prowadzenia frezu  $\alpha$ . [1, 2]



Rys. 1.1 Schemat pozycjonowania narzędzia przy frezowaniu obwodowym [2]

Nierozwijalne powierzchnie prostokreślne charakteryzują się kątem skręcenia pomiędzy wektorami normalnymi powierzchni na odcinku tworzącym. Kąt ten uniemożliwia dokładne wykonanie takiej powierzchni za pomocą rzeczywistego frezu (o średnicy większej niż 0). To skręcenie, w przypadku obróbki za pomocą frezów walcowych czy stożkowych, skutkuje uszkodzeniem powierzchni w postaci podcięcia hiperbolicznego. [1, 2, 3, 4]

Celem niniejszej pracy było ustalenie wpływu kąta prowadzenia  $\alpha$  na dokładność wymiarowo-kształtową w warunkach rzeczywistej obróbki oraz porównanie uzyskanych wyników z badaniami symulacyjnymi.

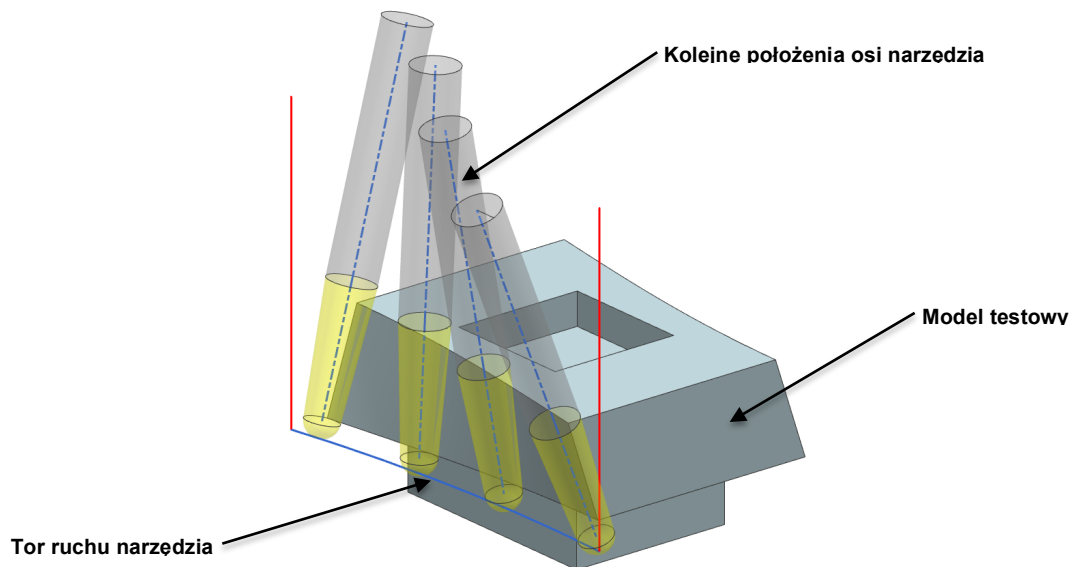
## 2. Przebieg badań

W przeprowadzonych badaniach przyjęto model testowy przedstawiony na rys. 2.1. Model składał się z dwóch identycznych nierozwijalnych powierzchni prostokreślnych. Kieszeń na górnej powierzchni modelu została wykonana w celu poprawnego bazowania elementu podczas pomiarów współrzędnościowych. Podczas badań zastosowano kąty prowadzenia narzędzia  $\alpha = -2^\circ, -1^\circ, 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ .

## 2.1. Przygotowanie programu obróbkowego oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych

Pierwszym krokiem badań było opracowanie programu obróbkowego dla frezowania obwodowego oraz przeprowadzenie symulacji obróbki. Etap ten został zrealizowany z wykorzystaniem programu HyperMILL firmy OPEN MIND.

Do wygenerowania operacji zarówno zgrubnej jak i wykończeniowej wykorzystano polecenie **SWARF 1 KRZYWA**. Poprawne zdefiniowanie operacji wymagało wskazania wykonywanej powierzchni oraz jednego profilu określającego dolny zakres obróbki. Przykładowa ścieżka obróbkowa operacji wykończeniowej została przedstawiona na rysunku 2.1. [5]



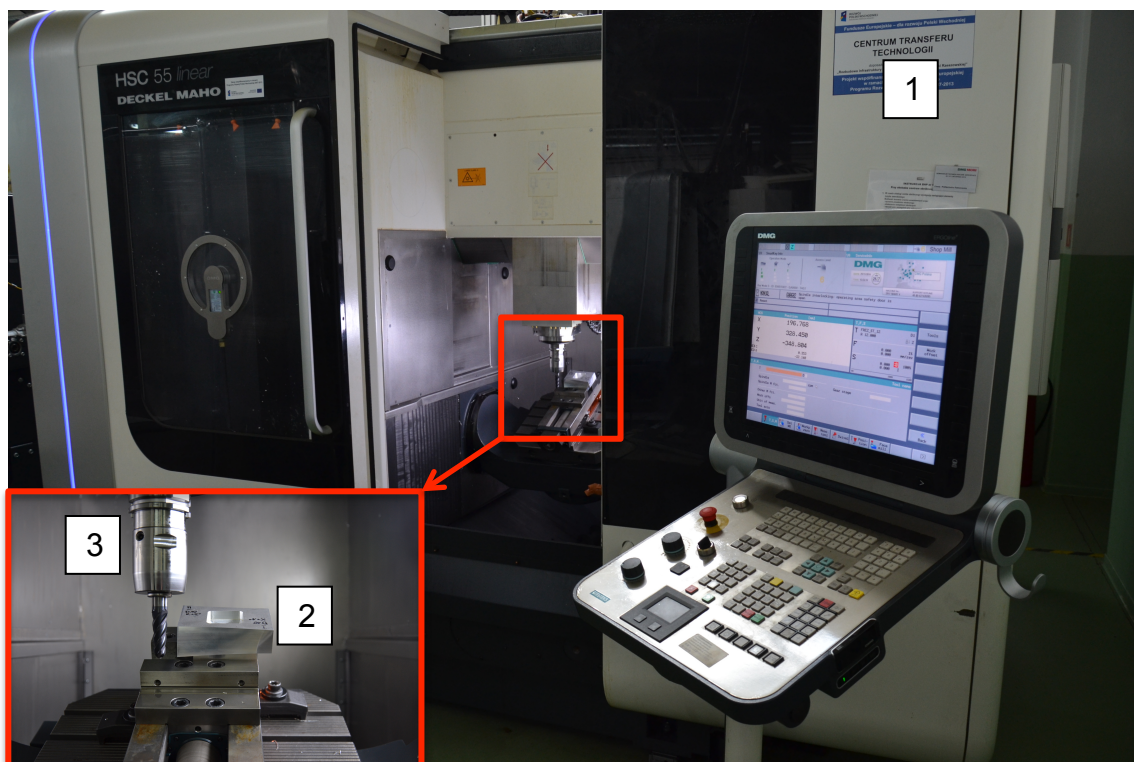
Rys. 2.1 Model testowy wraz z torem ruchu frezu stożkowego przy frezowaniu obwodowym [2]

Kolejnym etapem było przeprowadzenie symulacji obróbki oraz wygenerowanie wynikowych modeli STL, które następnie zostały zaimportowane do programów NX 9.0 firmy Siemens oraz Focus Inspection firmy Nikon. Powyższe aplikacje umożliwiły określenie mapy odchyłek, utworzenie histogramów rozkładu punktów pomiarowych w polu tolerancji oraz obliczenie wartości statystycznej w postaci średniej kwadratowej oraz odchylenia standardowego.

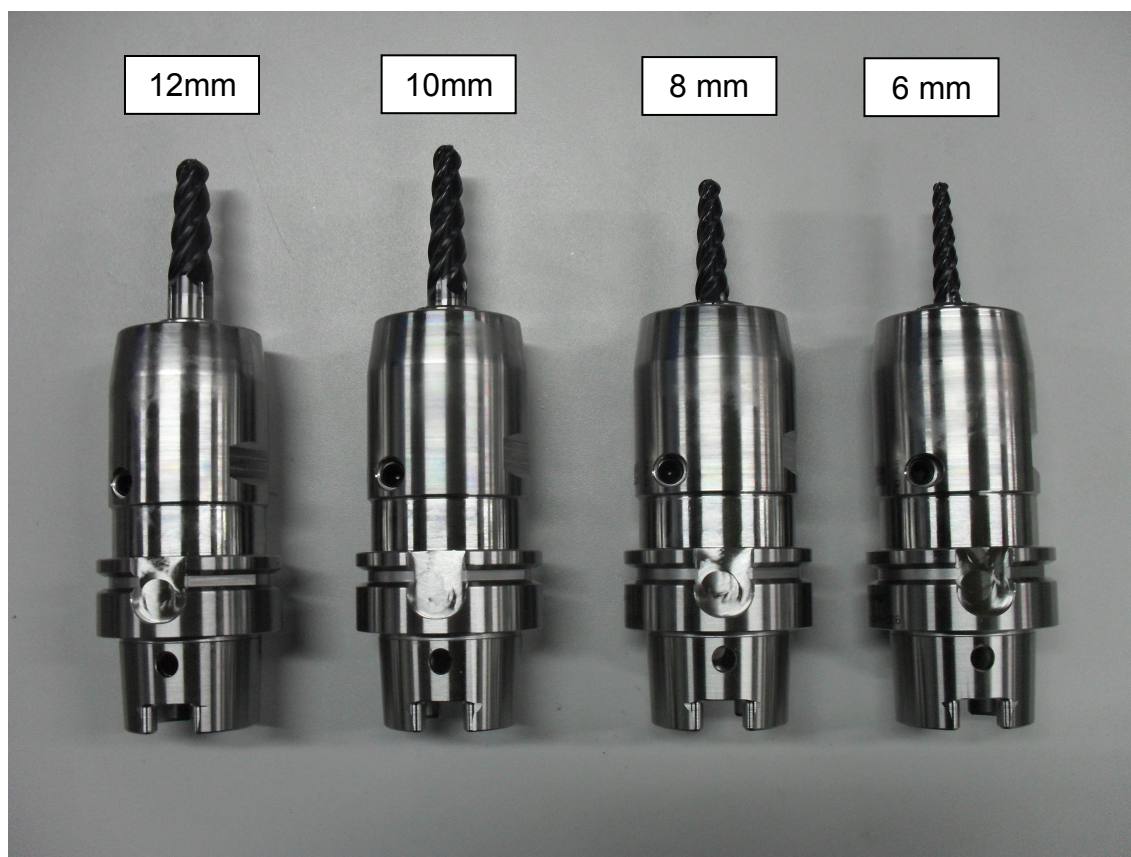
## 2.2. Badania technologiczne

Badania technologiczne wpływu kąta prowadzenia frezu na dokładność wymiarowo-kształtową powierzchni prostokreślnych przeprowadzono na wieloosiowym centrum frezarskim HSC 55 Linear firmy DMG, będącym na wyposażeniu Katedry Technik Wytwarzania i Automatyzacji Politechniki Rzeszowskiej. Obrabiarka pracuje w oparciu o sterownik Siemens Sinumerik 840D (Rys. 2.2)

Podczas obróbki wykorzystano monolityczne frezy stożkowe firmy Sandvik typu o średnicach  $d = 6, 8, 10, 12$  mm, kącie pochylenia  $3^\circ$  oraz maksymalnej głębokości skrawania  $a_p = 40$  mm. Wszystkie frezy zostały zamocowane w oprawkach hydraulicznych firmy Sandvik CoroChuck 930 (Rys 2.3).



Rys. 2.2 Stanowisko badawcze: 1 - centrum obróbkowe HSC 55 Linear, 2 - model testowy, 3 - frez stożkowy



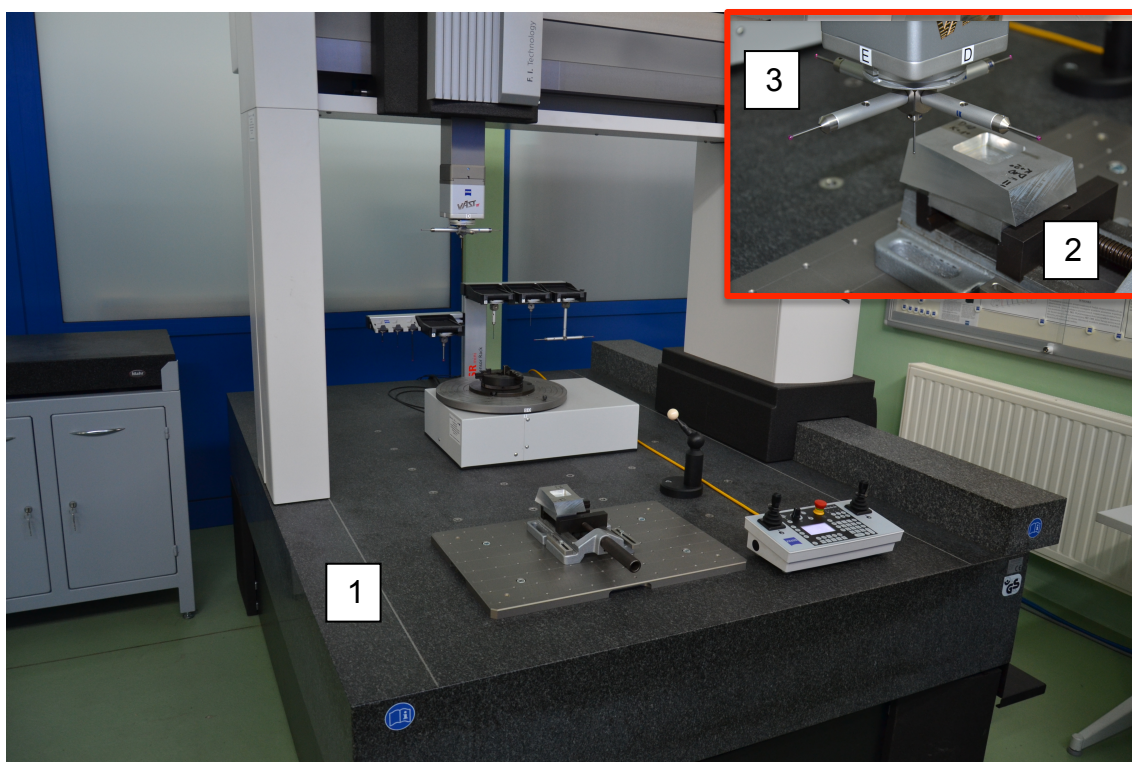
Rys. 2.3 Frezy stożkowe wykorzystane podczas badań

W czasie obróbki zastosowano następujące parametry technologiczne:

- Prędkość skrawania  $V_c = 500$  m/min,
- Prędkość posuwu roboczego:
  - Obróbka zgrubna  $f = 300$  mm/min,
  - Obróbka wykończeniowa  $f = 100$  mm/min,
- Głębokość skrawania  $a_p = 30$  mm,
- Szerokość skrawania:
  - Obróbka zgrubna  $a_e = 1$  mm,
  - Obróbka wykończeniowa  $a_e = 0,5$  mm.

### 2.3. Pomiar modeli testowych

Ostatni etap został zrealizowany na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Acura II firmy Carl Zeiss będącej na wyposażeniu Katedry Technik Wytwarzania i Automatyzacji (Rys. 2.4), natomiast program pomiarowy został opracowany w programie Calypso firmy Carl Zeiss.

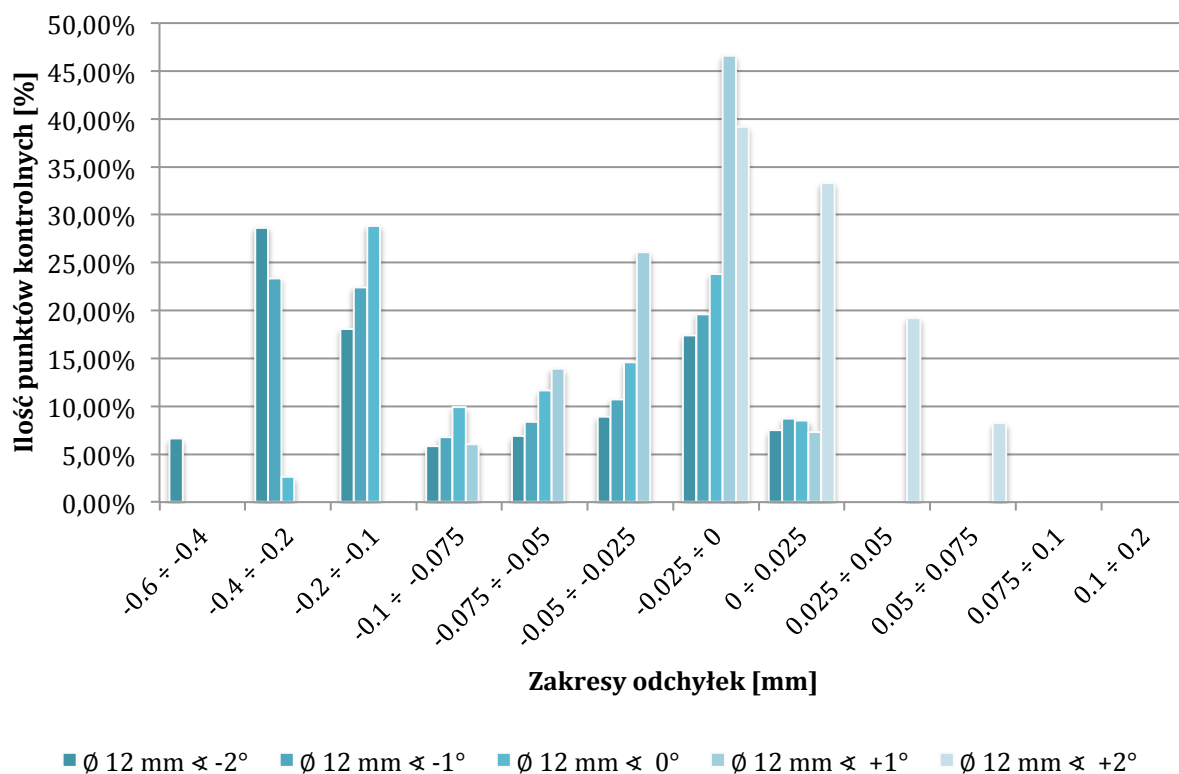


Rys. 2.4 Stanowisko pomiarowe: 1 - maszyna współrzędnościowa Acura II, 2 - model testowy, 3 - głowica pomiarowa VAST XT gold

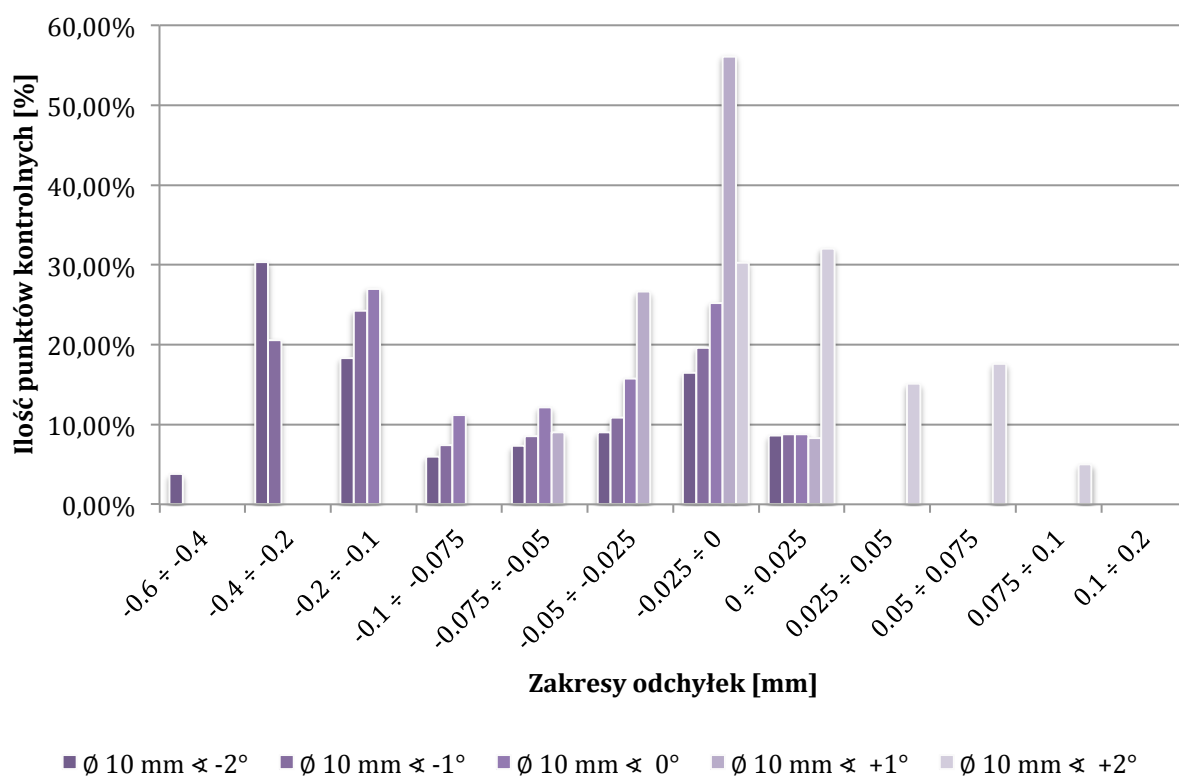
Pomiar polegał na zmierzeniu 150 równomiernie rozmieszczonych punktów na obrobionych powierzchniach modelu testowego. Następnie uzyskane współrzędne zostały zaimportowane do programu NX 9.0 oraz Focus Inspection, gdzie zostały poddane podobnej analizie, jak to miało miejsce przy badaniach symulacyjnych.

### 3. Analiza wyników badań symulacyjnych

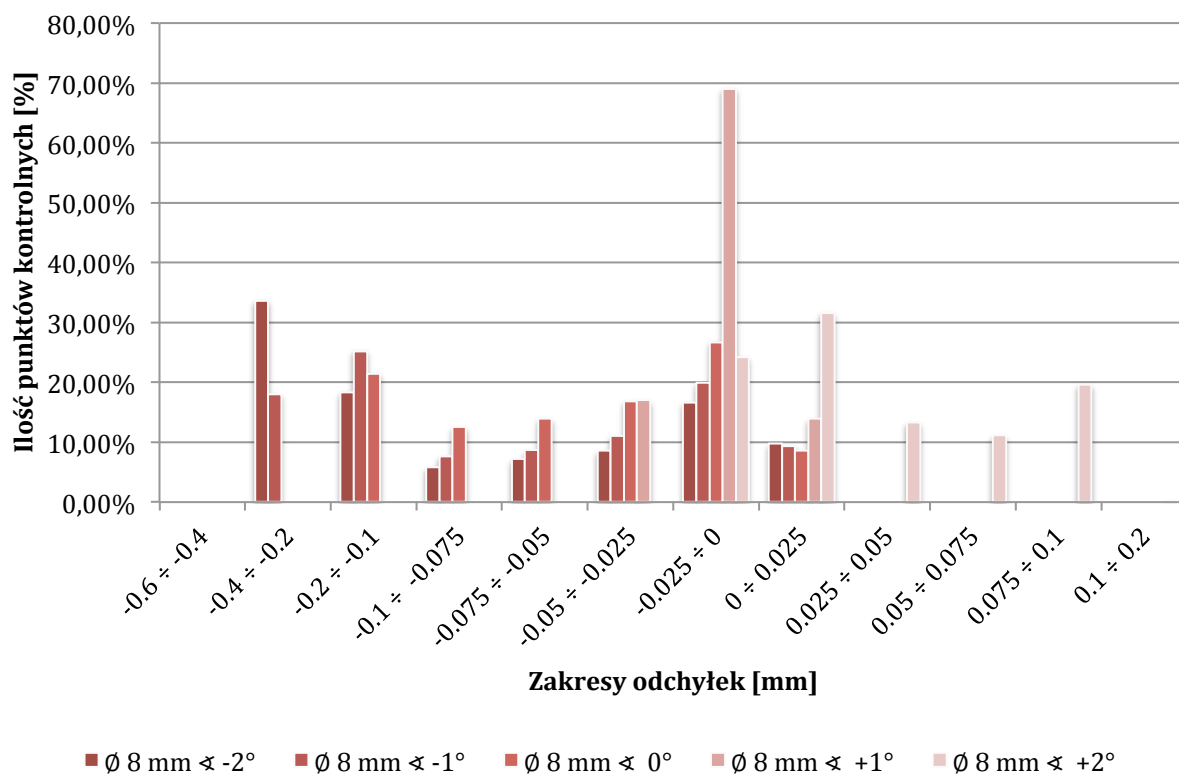
Na rysunkach 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 zostały przedstawione histogramy odchyłek modeli uzyskanych podczas badań symulacyjnych od modelu nominalnego, przy zastosowaniu różnych kątów prowadzenia oraz różnych średnic narzędzia.



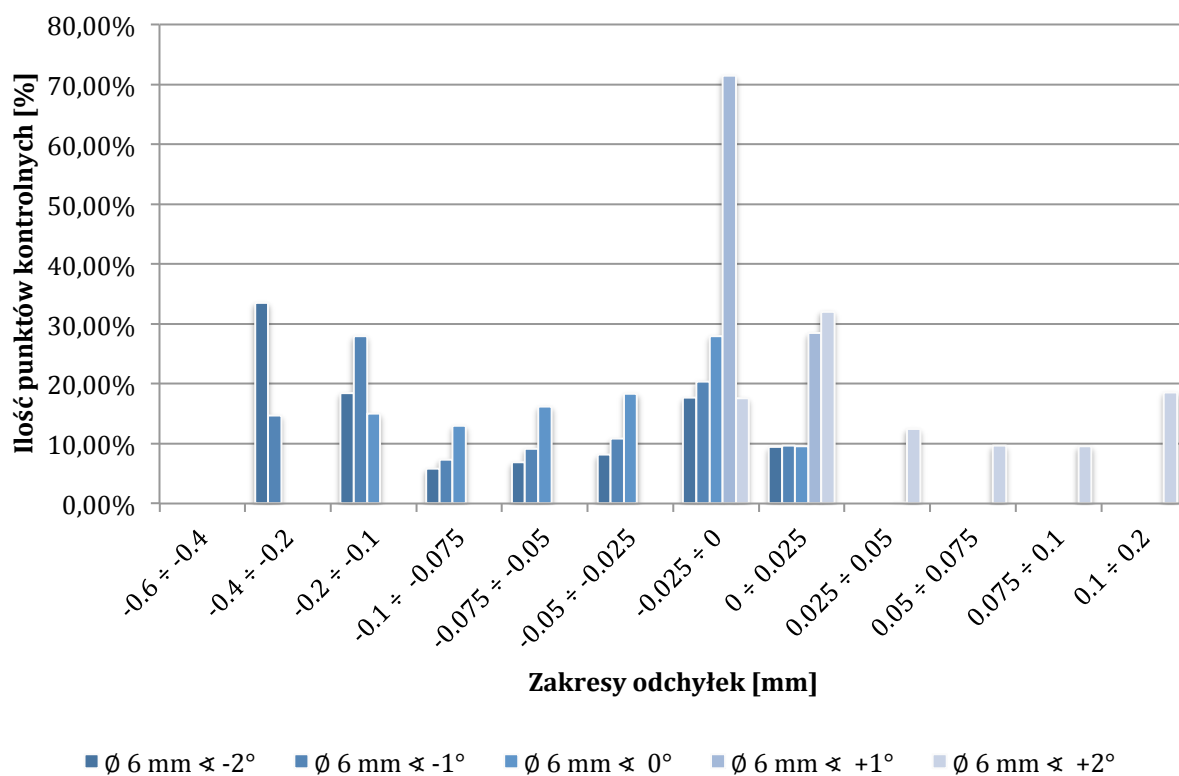
Rys. 3.1 Histogram wartości odchyłek modelu symulacyjnego po obróbce frezem o średnicy  $d = 12 \text{ mm}$



Rys. 3.2 Histogram wartości odchyłek modelu symulacyjnego po obróbce frezem o średnicy  $d = 10 \text{ mm}$



Rys. 3.3 Histogram wartości odchyłek modelu symulacyjnego po obróbce frezem o średnicy  $d = 8 \text{ mm}$

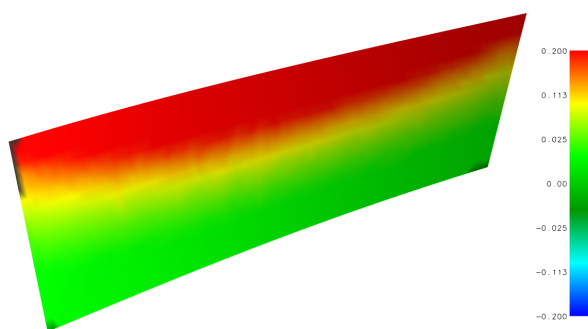


Rys. 3.4 Histogram wartości odchyłek modelu symulacyjnego po obróbce frezem o średnicy  $d = 6 \text{ mm}$

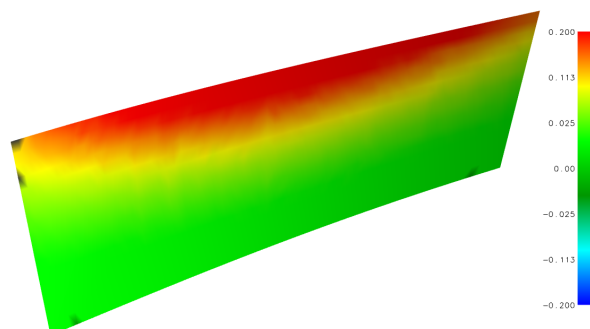
Tab. 3.1 Wartości odchyłeń standardowych  $\sigma$  oraz średnich kwadratowych RMS odchyłek modelu symulacyjnego

	$\sigma$ [mm]	RMS [mm]		$\sigma$ [mm]	RMS [mm]
$\varnothing 12 \text{ mm } \alpha -2^\circ$	0,139	0,208	$\varnothing 8 \text{ mm } \alpha -2^\circ$	0,127	0,191
$\varnothing 12 \text{ mm } \alpha -1^\circ$	0,100	0,150	$\varnothing 8 \text{ mm } \alpha -1^\circ$	0,087	0,132
$\varnothing 12 \text{ mm } \alpha 0^\circ$	0,062	0,094	$\varnothing 8 \text{ mm } \alpha 0^\circ$	0,048	0,074
$\varnothing 12 \text{ mm } \alpha +1^\circ$	0,024	0,037	$\varnothing 8 \text{ mm } \alpha +1^\circ$	0,012	0,017
$\varnothing 12 \text{ mm } \alpha +2^\circ$	0,021	0,025	$\varnothing 8 \text{ mm } \alpha +2^\circ$	0,034	0,046
$\varnothing 10 \text{ mm } \alpha -2^\circ$	0,133	0,199	$\varnothing 6 \text{ mm } \alpha -2^\circ$	0,123	0,185
$\varnothing 10 \text{ mm } \alpha -1^\circ$	0,094	0,141	$\varnothing 6 \text{ mm } \alpha -1^\circ$	0,081	0,123
$\varnothing 10 \text{ mm } \alpha 0^\circ$	0,055	0,083	$\varnothing 6 \text{ mm } \alpha 0^\circ$	0,041	0,063
$\varnothing 10 \text{ mm } \alpha +1^\circ$	0,018	0,027	$\varnothing 6 \text{ mm } \alpha +1^\circ$	0,009	0,009
$\varnothing 10 \text{ mm } \alpha +2^\circ$	0,027	0,035	$\varnothing 6 \text{ mm } \alpha +2^\circ$	0,042	0,059

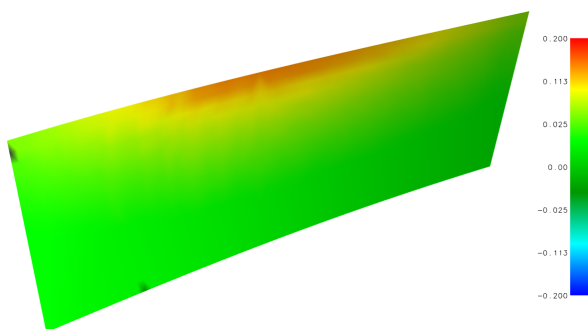
a)



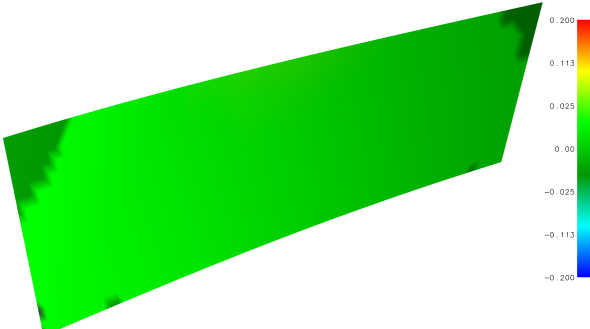
b)



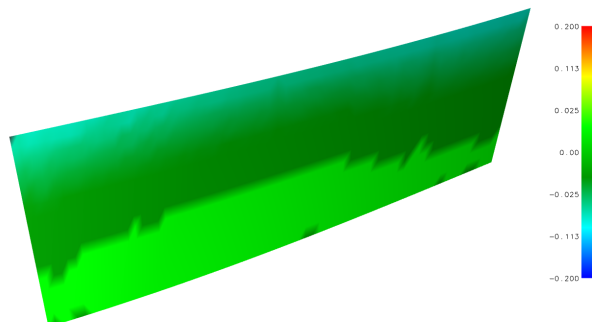
c)



d)



e)



Rys. 3.5 Mapy odchyłek modelu symulacyjnego po obróbce frezem  $d = 8 \text{ mm}$  z zastosowaniem kąta prowadzenia  $\alpha$  : a)  $-2^\circ$ , b)  $-1^\circ$ , c)  $0^\circ$ , d)  $+1^\circ$ , e)  $+2^\circ$

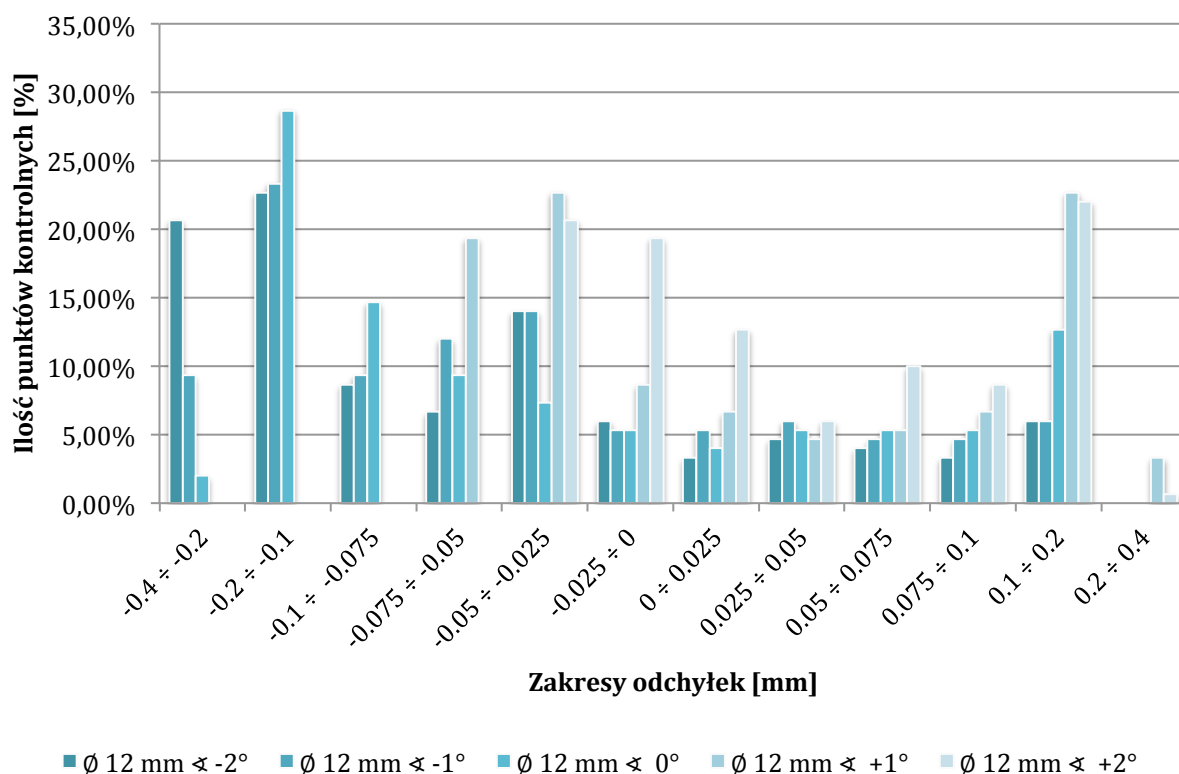
W tabeli 3.1 przedstawiono wartości odchyłeń standardowych  $\sigma$  oraz wartości średnich kwadratowych odchyłek modelu symulacyjnego **RMS** z uwzględnieniem różnych kątów prowadzenia oraz różnych średnic narzędzia.

Na rysunku 3.5 przedstawiono rozkład odchyłek dla modelu symulacyjnego z zastosowaniem frezu o średnicy  $d = 8$  mm, z uwzględnieniem różnych kątów prowadzenia narzędzia. Poniższy rozkład został przedstawiony w postaci mapy kolorów. Barwy zielone stanowią, iż model uzyskany wyniki symulacji jest w danym obszarze najbardziej zbliżony do nominalu. Barwy ciepłe oznaczają, że w danym miejscu nastąpiło podcięcie, natomiast barwy zimne określają miejsca z pozostawionym naddatkiem.

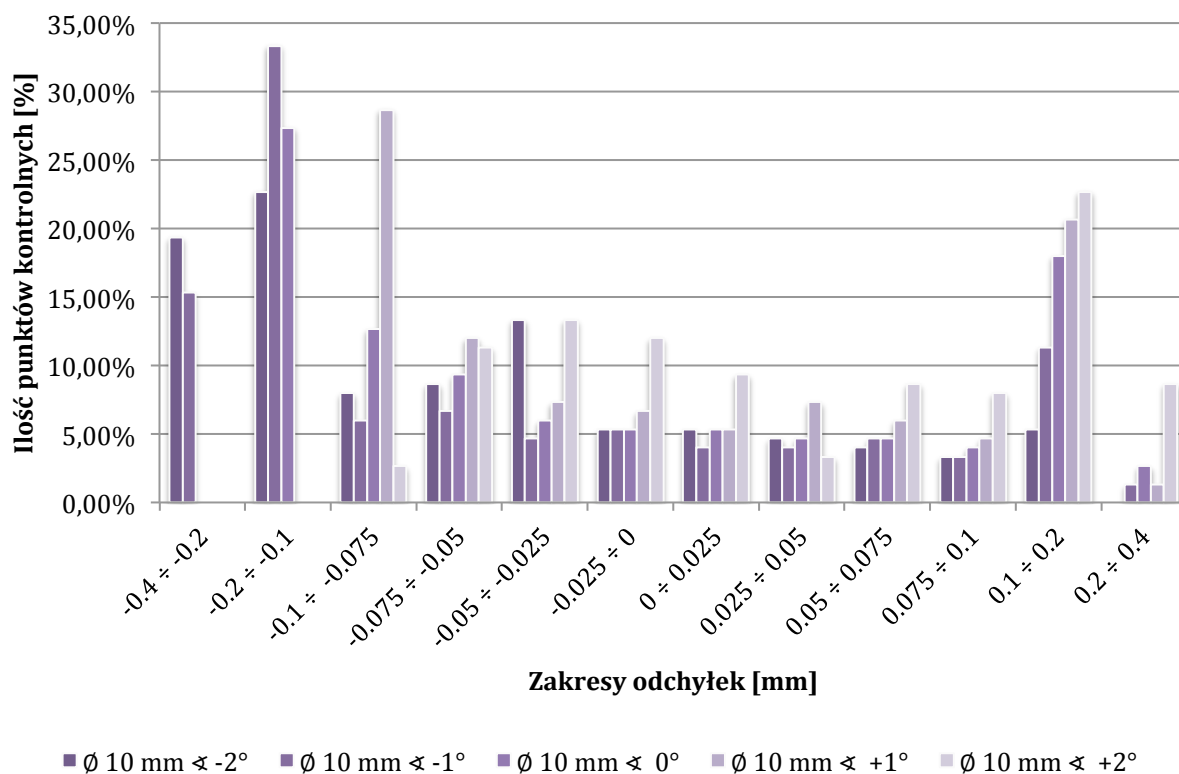
Na podstawie otrzymanych wyników symulacyjnych można stwierdzić, że zachodzi relacja pomiędzy kątem prowadzenia  $\alpha$ , a dokładności wykonania badanej powierzchni prostokątnej. Najwyższą dokładność obróbki uzyskano przy zastosowaniu kąta prowadzenia  $\alpha = +1^\circ$ , co daje odzwierciedlenie zarówno w ilości punktów kontrolnych znajdujących się w zakresie tolerancji  $-0,025 \div +0,025$ , jak również w wartości odchylenia standardowego oraz średniej kwadratowej wartości odchyłek. Można również zauważyć wzrost dokładności obróbki wraz z zastosowaniem coraz mniejszych średnic frezu.

#### 4. Analiza wyników badań technologicznych

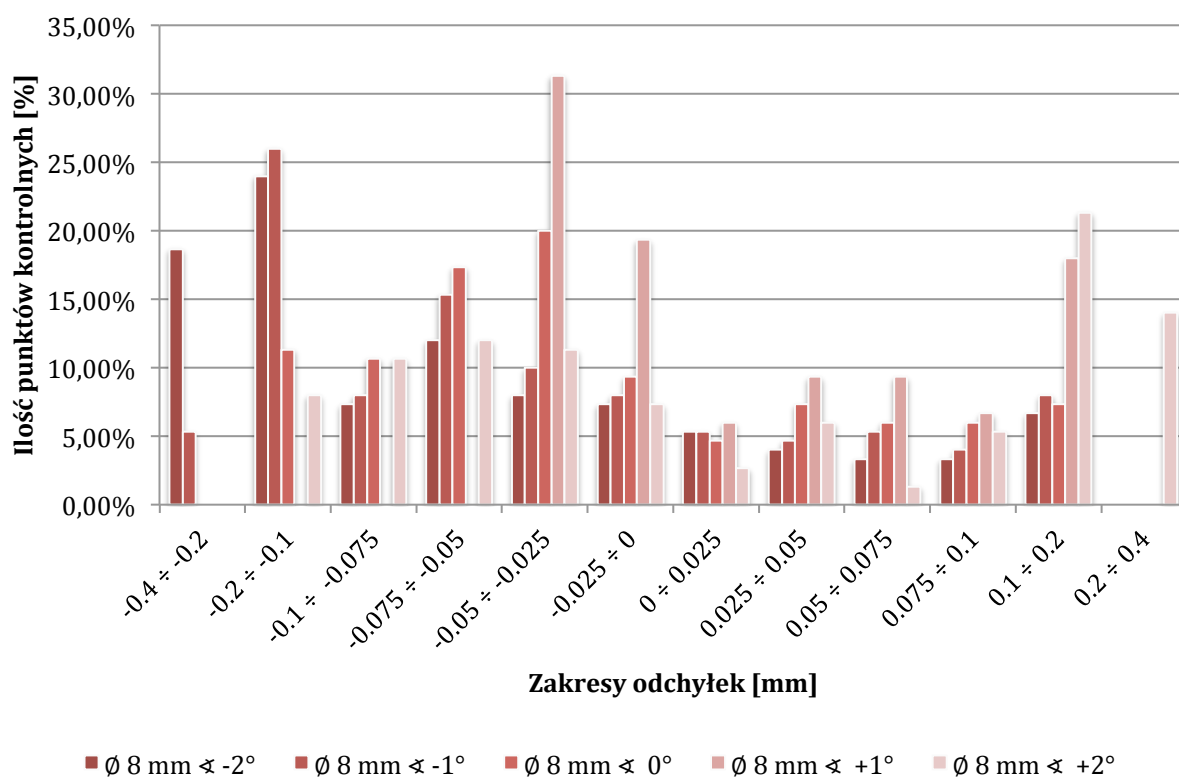
Na rysunkach 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 zostały przedstawione histogramy odchyłek punktów uzyskanych podczas pomiarów współrzędnościowych od modelu nominalnego, przy zastosowaniu różnych kątów prowadzenia oraz różnych średnic narzędzia.



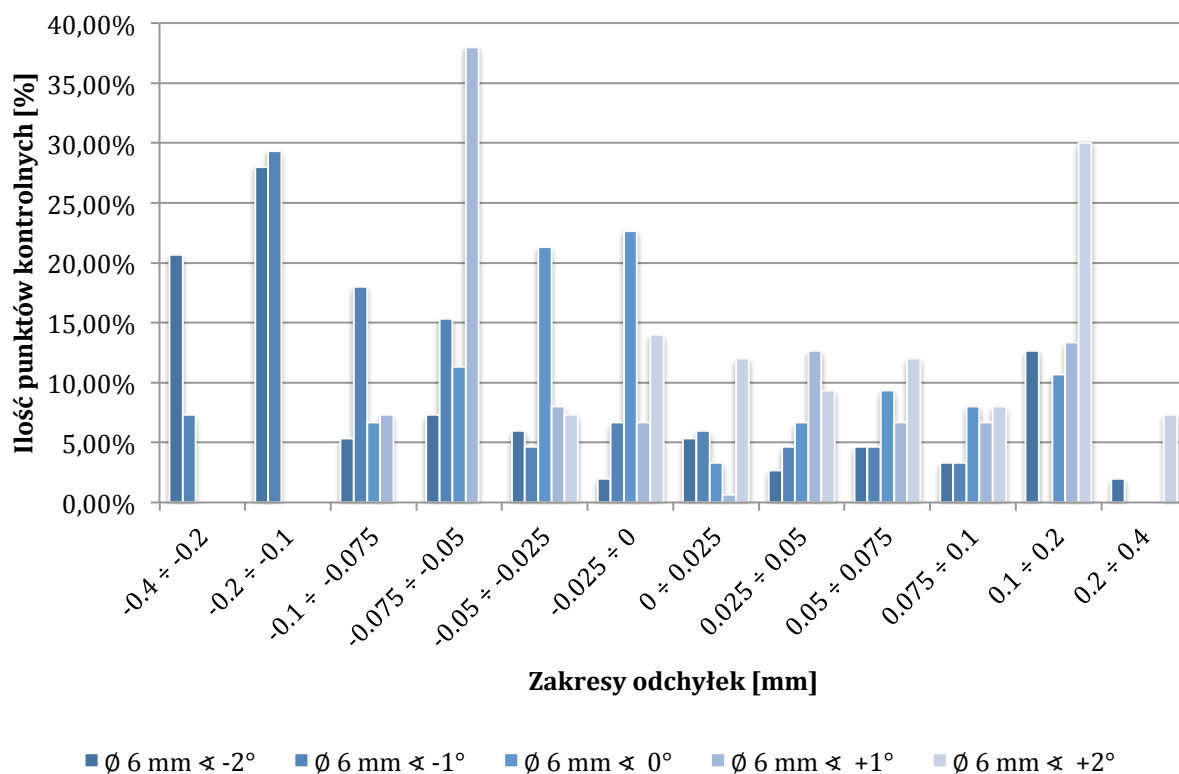
Rys. 4.1 Histogram wartości odchyłek punktów pomiarowych po obróbce frezem o średnicy  $d = 12$  mm



Rys. 4.2 Histogram wartości odchyłek punktów pomiarowych po obróbce frezem o średnicy  $d = 10 \text{ mm}$



Rys. 4.3 Histogram wartości odchyłek punktów pomiarowych po obróbce frezem o średnicy  $d = 8 \text{ mm}$



Rys. 4.4 Histogram wartości odchyłek punktów pomiarowych po obróbce frezem o średnicy  $d = 8 \text{ mm}$

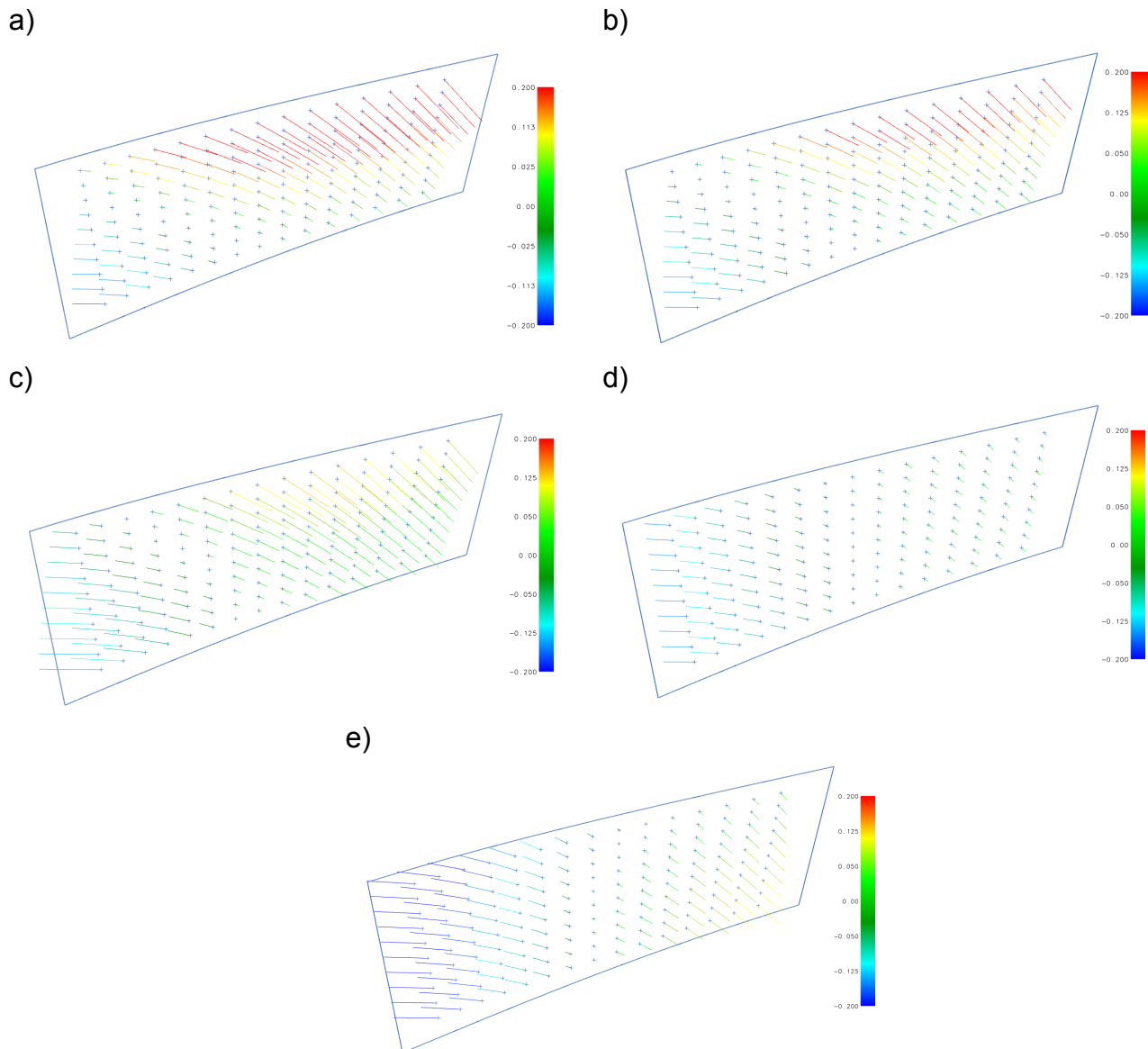
W tabeli 3.2 przedstawiono wartości odchyłeń standardowych  $\sigma$  oraz wartości średnich kwadratowych odchyłek punktów pomiarowych **RMS** z uwzględnieniem różnych kątów prowadzenia oraz różnych średnic narzędzia.

Tab. 3.2 Wartości odchyłeń standardowych  $\sigma$  oraz średnich kwadratowych RMS odchyłek punktów pomiarowych

	$\sigma$ [mm]	RMS [mm]		$\sigma$ [mm]	RMS [mm]
$\varnothing 12 \text{ mm} \propto -2^\circ$	0,124	0,155	$\varnothing 8 \text{ mm} \propto -2^\circ$	0,118	0,146
$\varnothing 12 \text{ mm} \propto -1^\circ$	0,098	0,115	$\varnothing 8 \text{ mm} \propto -1^\circ$	0,095	0,108
$\varnothing 12 \text{ mm} \propto 0^\circ$	0,101	0,107	$\varnothing 8 \text{ mm} \propto 0^\circ$	0,070	0,073
$\varnothing 12 \text{ mm} \propto +1^\circ$	0,088	0,093	$\varnothing 8 \text{ mm} \propto +1^\circ$	0,062	0,067
$\varnothing 12 \text{ mm} \propto +2^\circ$	0,071	0,082	$\varnothing 8 \text{ mm} \propto +2^\circ$	0,118	0,124
$\varnothing 10 \text{ mm} \propto -2^\circ$	0,117	0,145	$\varnothing 6 \text{ mm} \propto -2^\circ$	0,143	0,161
$\varnothing 10 \text{ mm} \propto -1^\circ$	0,127	0,146	$\varnothing 6 \text{ mm} \propto -1^\circ$	0,080	0,111
$\varnothing 10 \text{ mm} \propto 0^\circ$	0,111	0,112	$\varnothing 6 \text{ mm} \propto 0^\circ$	0,062	0,062
$\varnothing 10 \text{ mm} \propto +1^\circ$	0,094	0,094	$\varnothing 6 \text{ mm} \propto +1^\circ$	0,074	0,074
$\varnothing 10 \text{ mm} \propto +2^\circ$	0,093	0,106	$\varnothing 6 \text{ mm} \propto +2^\circ$	0,078	0,110

Na rysunku 4.5 przedstawiono rozkład odchyłek dla punktów pomiarowych modelu rzeczywistego wykonanego frezem o średnicy  $d = 8 \text{ mm}$ , z uwzględnieniem różnych kątów prowadzenia narzędzia. Ze względu na liczbę punktów pomiarowych poniższy rozkład został przedstawiony w postaci wykresów linowych. Długość odcinka w danym punkcie pomiarowych odwzorowuje wartość odchyłki od modelu nominalnego. Podobnie jak w przypadku mapy kolorów, barwy zielone stanowią, iż model uzyskany wyniki symulacji jest

w danym obszarze najbardziej zbliżony do nominalu. Barwy ciepłe oznaczają, że w danym miejscu nastąpiło podcięcie, natomiast barwy zimne określają miejsca z pozostawionym naddatkiem.



Rys. 4.5 Mapy odchyłek punktów pomiarowych po obróbce frezem  $d = 8 \text{ mm}$  z zastosowaniem kąta prowadzenia  $\alpha$  : a)  $-2^\circ$ , b)  $-1^\circ$ , c)  $0^\circ$ , d)  $+1^\circ$ , e)  $+2^\circ$

Z analizy otrzymanych wyników badań technologicznych można również stwierdzić, że zachodzi korelacja pomiędzy kątem prowadzenia  $\alpha$ , a dokładnością wykonania powierzchni prostokątnej. Również najlepsze rezultaty uzyskano przy zastosowaniu kąta prowadzenia  $\alpha = 1^\circ$ . Jednak w porównaniu do wyników badań symulacyjnych można zaobserwować ogólny spadek dokładności wykonania powierzchni, co objawia się „spłaszczeniem” histogramów, jak również wzrostem wartości odchylenia standardowego oraz średniej kwadratowej wartości odchyłek. Różnice pojawiły się również w rozkładzie odchyłek na badanej powierzchni. Oprócz obszarów w których nastąpiło podcięcie wykonywanej powierzchni można zauważyć strefy z pozostawionym naddatkiem. Nie widać również wyraźnego wzrostu dokładności obróbki wraz z zastosowaniem mniejszych średnic frezu.

## 5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych, badań zarówno symulacyjnych jak i technologicznych, można stwierdzić wyraźny wpływ kąta prowadzenia  $\alpha$  na dokładność wymiarowo-kształtową wykonywanej nierozwijalnej powierzchni prostokreślnej. Zarówno wartości odchyłek jak i rozkład obszarów prawidłowo wykonanych był zróżnicowany w zależności od zastosowanej wartości kąta  $\alpha$ .

Można również zauważyć różnice pomiędzy wynikami komputerowej analizy poruszanego zagadnienia, a wynikami pomiarów na rzeczywistym elemencie. Różnice te są skutkiem zastosowania w systemach CAM-owskich symulacji wolumetrycznej obróbki, która nie uwzględnia m. in. sił działających na narzędzie czy też sztywności układu OUPN.

Powyższe stwierdzenia świadczą o możliwości opracowania metody umożliwiającej dopasowanie kąta prowadzenia narzędzia, dzięki której będzie możliwe wykonanie geometrii z zadowalającą dokładnością.

## Literatura

- [1] BUREK J., ŻURAWSKI K., PŁODZIENI M., ŻUREK P., Analiza strategii symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchnią boczną frezu stożkowego, Mechanik, 2013,
- [2] BUREK J., ŻURAWSKI K., ŻUREK P., Wpływ kąta prowadzenia frezu na dokładność wymiarowo-kształtową powierzchni prostokreślnych, Mechanik, 2014,
- [3] TASY D. M., HER M. J., Accurate 5-Axis Machining of Twisted Ruled Surfaces, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001,
- [4] WALDT N., NC-Programmierung für das funfachsige Flankenfrasen von Feriformflächen, Universität Hannover, 2005.
- [5] Dokumentacja programu HyperMILL

*Badania realizowane w ramach Projektu "Badania procesów wysokowydajnej obróbki powierzchni złożonych części z materiałów trudnoobrabialnych", Nr WND-EPPK.01.03.00-18-017/13 współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007 – 2013.*