

Prof. PRz dr hab. inż. Jan BUREK [jburek@prz.edu.pl](mailto:jburek@prz.edu.pl)  
Dr inż. Łukasz ŻYŁKA, [zylka@prz.edu.pl](mailto:zylka@prz.edu.pl)  
Mgr inż. Marcin PŁODZIEN [plodzien@prz.edu.pl](mailto:plodzien@prz.edu.pl)  
Mgr inż. Michał GDULA [gdulam@prz.edu.pl](mailto:gdulam@prz.edu.pl)  
Mgr inż. Jarosław BUK [jbuk@prz.edu.pl](mailto:jbuk@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

## ANALIZA ODKSZTAŁCENIA CIENKIEJ ŚCIANKI W SYSTEMIE NX W OBRÓBCE HPC

**Streszczenie:** Celem artykułu było przeprowadzenie badań symulacyjnych odkształcenia struktury cienkościennej w systemie NX wykorzystując rozwiązanie nieliniowe. Przeprowadzono również badania doświadczalne obróbki HPC stopów aluminium w celu weryfikacji poprawności założonego rozwiązania MES.

**Słowa kluczowe:** MES, HPC, cienka ścianka,

## ANALYSIS OF DEFORMATION OF THIN-WALL IN NX IN HPC MACHINING

**Summary:** The aim the article was to carry out simulation studies deformation of thin-walled structures NX system using non-linear solution. Experimental studies were also performed during the HPC aluminum alloys in order to verify the correctness of the assumed MES solutions.

**Keywords:** Finite element method, High performance cutting, Thin-walled

### 1. WPROWADZENIE.

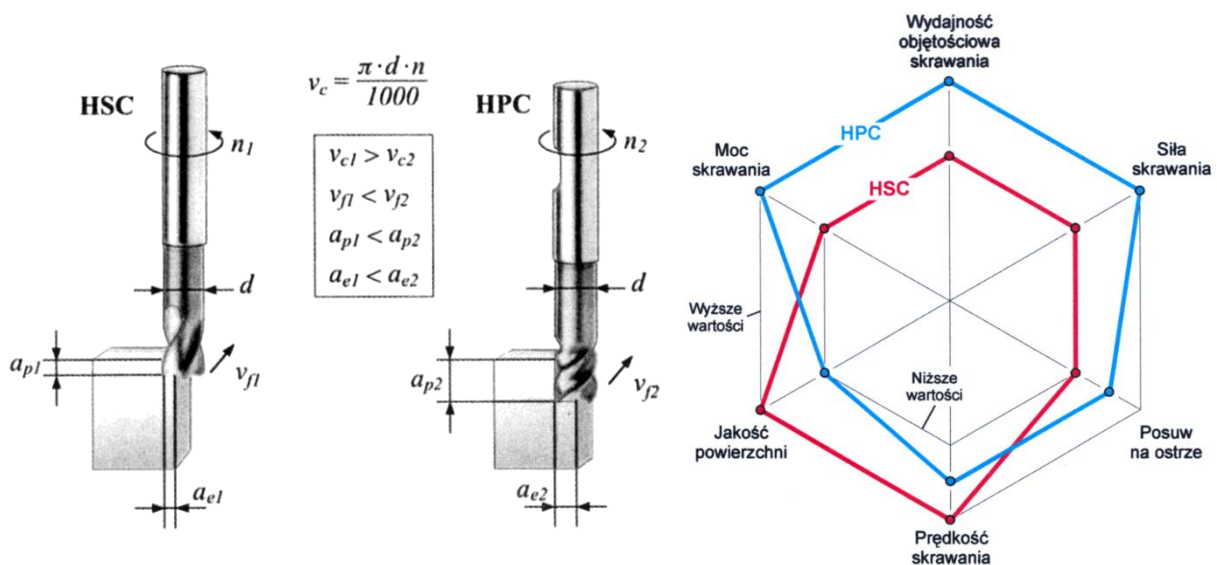
Zastosowanie stopów aluminium w przemyśle systematycznie wzrasta, wynika to głównie z przyczyn zmniejszania kosztów eksploatacji podzespołów poprzez zredukowanie całkowitej masy wyprodukowanego wyrobu. W głównej mierze stopy aluminium stosowane są w przemyśle lotniczym na elementy konstrukcyjne kadłubów i skrzydeł samolotów w postaci cienkościennych struktur aluminiowych o złożonym kształcie (rys.1.1) oraz w przemyśle samochodowym np. w postaci odlewów na bloki silników [1, 2, 3, 4].

Wytwarzanie części integralnych w głównej mierze realizowane jest obecnie metodą obróbki ubytkowej, dlatego poszukuje się wysoko produktywnych technologii wytwarzania. W przypadku obróbki części cienkościennych w przemyśle lotniczym często spotykanymi metodami obróbki są: obróbka wysokowydajna HPC (ang. High Performace Cutting) oraz obróbka z wysokimi prędkościami skrawania HSC (ang. High Speed Cutting). Obróbka wysokowydajna stosowana jest jako obróbka zgrubna. Charakteryzuje się zwiększonym dosuwem osiowym  $a_p$  oraz promieniowym  $a_e$ , przeważnie równym lub większym od wartości średnicy narzędzia oraz znacznie większym posuwem na ostrze  $f_z$ , większym niż przy frezowaniu konwencjonalnym. W efekcie uzyskuje się zwiększenie wydajności obróbki  $Q_v$  (rys. 1.2) [1, 2].



Rys. 1.1. Przykład struktury cienkościennej ze stopu aluminium [2]

Obróbka z wysokimi prędkościami w głównej mierze znalazła zastosowanie jako obróbka wykończeniowa. Charakteryzuje się znacznie mniejszymi dosuwami oraz znacznie większymi prędkościami skrawania, nawet do 10 razy większymi niż w frezowaniu konwencjonalnym (rys. 1.2) [1, 2, 3, 5].

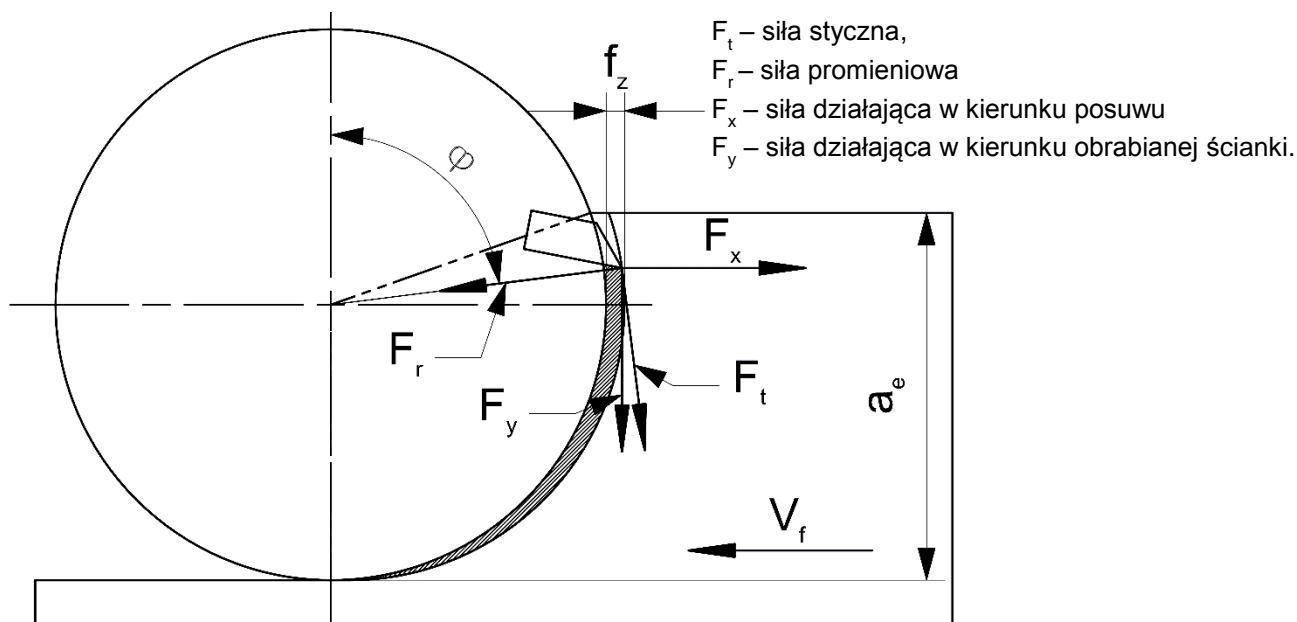


Rys. 1.2. Istota obróbki HPC oraz HSC [1].

Ponieważ w procesie obróbki wysokowydajnej cienkościennych struktur ze stopów aluminium mamy do czynienia z działaniem bardzo dużych sił skrawania, zasadne jest określenie minimalnej wartości naddatku obróbkowego na etapie planowania obróbki zgrubnej. Nadatek ten w obróbce wykończeniowej pozwala na zwiększenie wydajności i dokładności wymiarowo kształtowej gotowej ścianki. W niniejszym artykule przedstawiono badania symulacyjne odkształcenia cienkiej ścianki o różnej grubości. Jako obciążenie przyjęto siłę działającą na ściankę podczas frezowania zgrubnego, a następnie przeprowadzono badania weryfikacyjne w celu sprawdzenia poprawności przyjętych złożeń [2,5].

## 2. ROZKŁAD SIŁ SKRAWANIA PODCZAS FREZOWANIA HPC

Frezowanie charakteryzuje się zmiennym przekrojem warstwy skrawanej od wartości minimalnej do wartości maksymalnej (frezowanie przeciwbieżne) lub od wartości maksymalnej do minimalnej (frezowanie współbieżne). Zmiana przekroju warstwy skrawanej wpływa współmiernie na charakter sił skrawania. Obróbka wysokowydajna HPC łączy obie te odmiany kinematyczne frezowania. Na rys. 2.1 przedstawiono rozkład sił skrawania podczas frezowania HPC, gdzie dosuw promieniowy  $a_e$  jest wielkością większą niż 70% średnicy narzędzia.



Rys. 2.1. Rozkład sił skrawania podczas frezowania HPC

Ogólne zależności opisujące siłę promieniową  $F_r$  oraz styczną  $F_t$  w zależności od kątowej pozycji ostrza frezu  $\varphi$  przedstawiają równania 2.1 oraz 2.2.

$$F_r = -F_y \cos \varphi - F_x \sin \varphi \quad [N] \quad (2.1)$$

$$F_t = F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi \quad [N] \quad (2.2)$$

Na potrzebę badań symulacyjnych określono siłę w chwili kątowego położenia ostrza  $\varphi=90^\circ$ . Wówczas siła styczna jest równa sile działającej w kierunku obrabianej ścianki  $F_t=F_y$ , analogicznie siła promieniowa będzie równa sile działającej w kierunku

posuwu  $F_r=F_x$ . Taki układ pozwala na wyznaczenie siły oddziałującej na ściankę określoną wzorem KIENTZLEGO [6] (zależność 2.3)

$$F_y = F_t = f_z a_p k_c [N] \quad (2.3)$$

gdzie:

$f_z$  – posuw na ostrze [mm/z],

$a_p$  – dosuw osiowy [mm],

$k_c$  – właściwy opór skrawania [MPa].

Do dalszej analizy przyjęto następujące parametry technologiczne frezowania:

$a_p=12$ [mm],

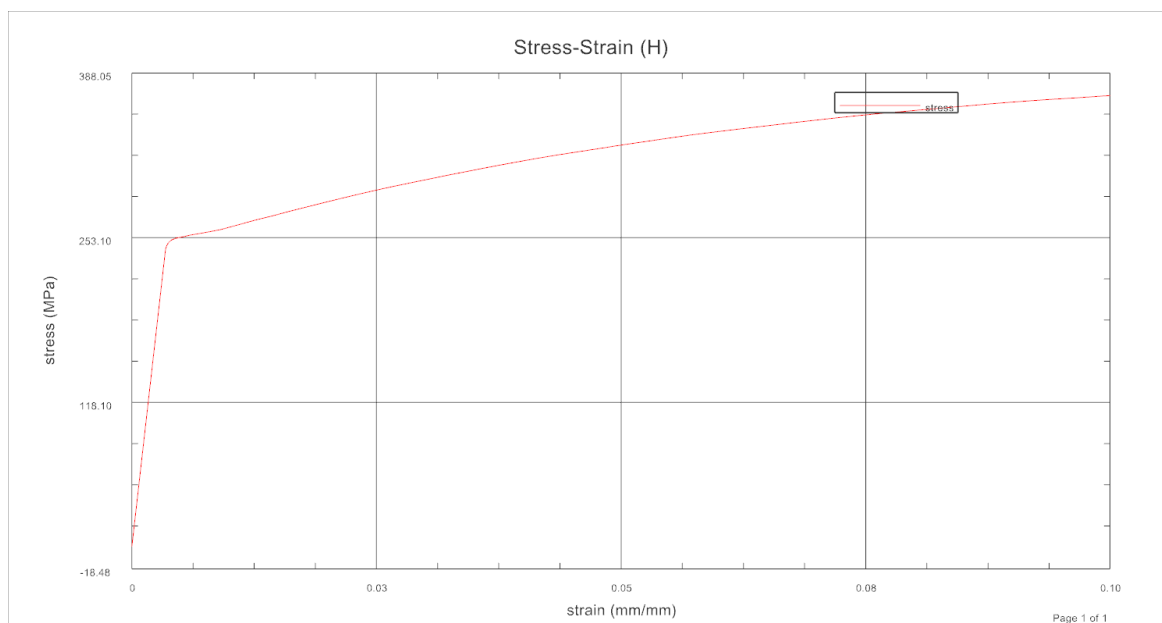
$f_z=0.1$  [mm/z],

$k_c=750$  [MPa].

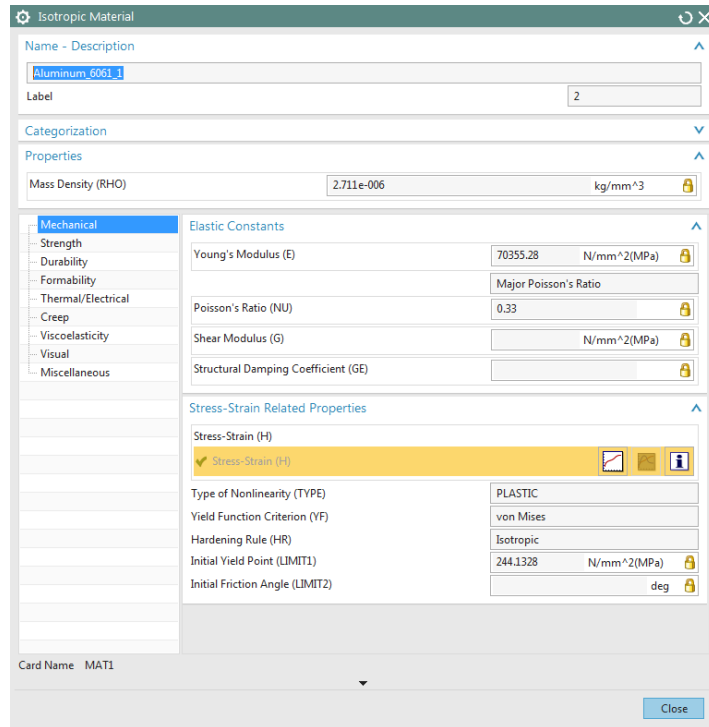
Na bazie wzoru 2.3 oraz przyjętych parametrów technologicznych wyznaczono siłę o wartości  $F_y=900$  N oddziałującą na ściankę, którą przyjęto jako główne obciążenie podczas symulacji MES odkształcenia ścianki.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE MES W SYSTEMIE NX NASTRAN

Do badań symulacyjnych użyto systemu NX w wersji 9.0 wykorzystując moduł obliczeń inżynierskich MES Advanced Simulation oparty na solverze NASTRAN. Przeprowadzono analizę wytrzymałościową przyjmując jako typ rozwiązania SOL 601,106 Advanced nonlinear Static, z uwzględnieniem możliwości odkształceń nieliniowych. Do symulacji odkształcenia, jako materiał, przyjęto stop aluminium 6061. W celu przeprowadzenia symulacji nieliniowego zachowania materiału w pierwszym etapie przeprowadzono badania wytrzymałościowe. W badaniach tych wyznaczono krzywą rozciągania (Rys. 3.1). Uzyskana krzywa została następnie zaimplementowana do bazy materiałowej stosowanego materiału (Rys. 3.2).

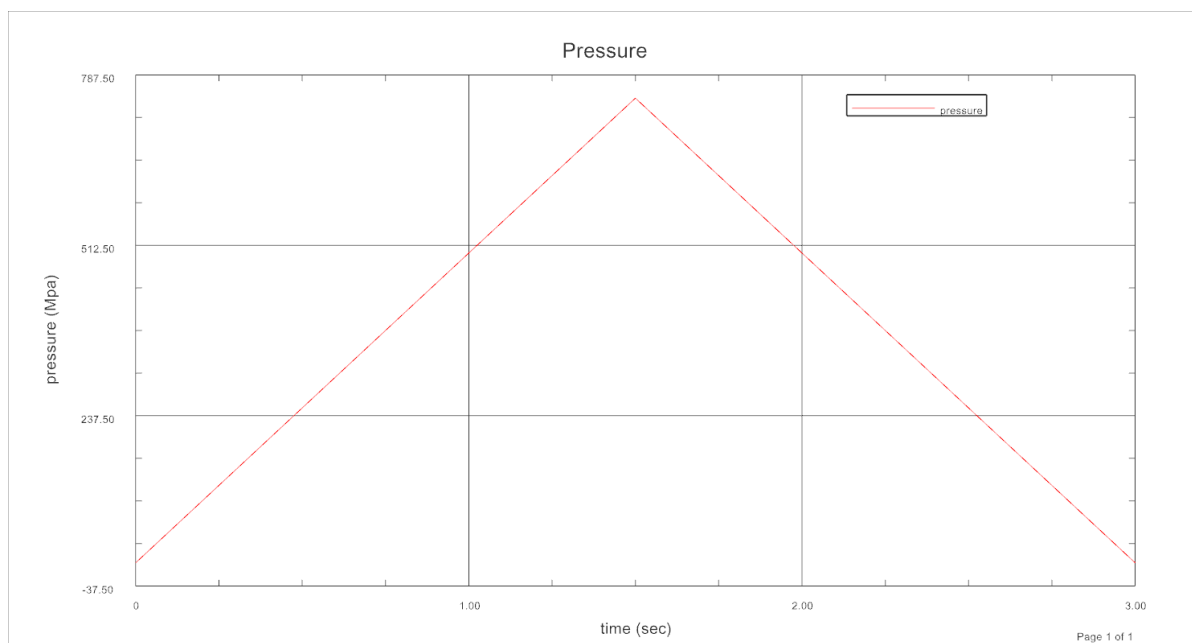


Rys. 3.1. Krzywa rozciągania zdefiniowana w właściwościach materiałowych w systemie NX

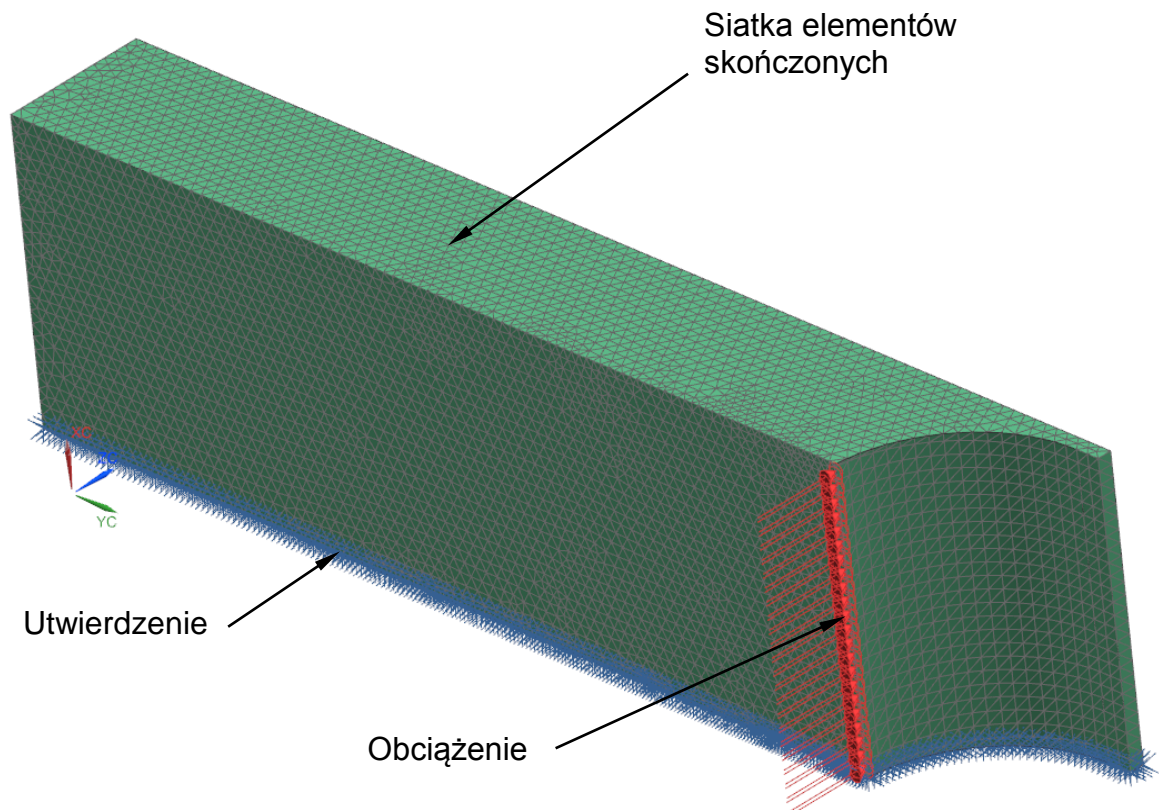


Rys. 3.2. Definicja materiału w systemie NX

W kolejnym etapie wygenerowano siatkę czworościennych elementów skończonych o wielkości 1 mm. Do symulacji przyjęto następujące warunki brzegowe: dolna część analizowanego modelu została utwierdzona wiązaniem FIX odbierającym wszystkie stopnie swobody. Jako obciążenie wywierane przez frez na ściankę przyjęto zmienne ciśnienie przyłożone na powierzchnię czynną działania ostrza o wielkości  $f_z \times a_p$  dla kąta  $\varphi=90^\circ$ . Zmianę przyłożonego ciśnienia realizowano w czasie  $t=3$  s. Charakter zmian obciążenia pokazano na rys. 3.3 natomiast na rys. 3.4 przedstawiono warunki brzegowe wraz z narzuconą siatką elementów skończonych.



Rys. 3.3. Definicja obciążenia: zmiana ciśnienia w czasie  $t=3$  s

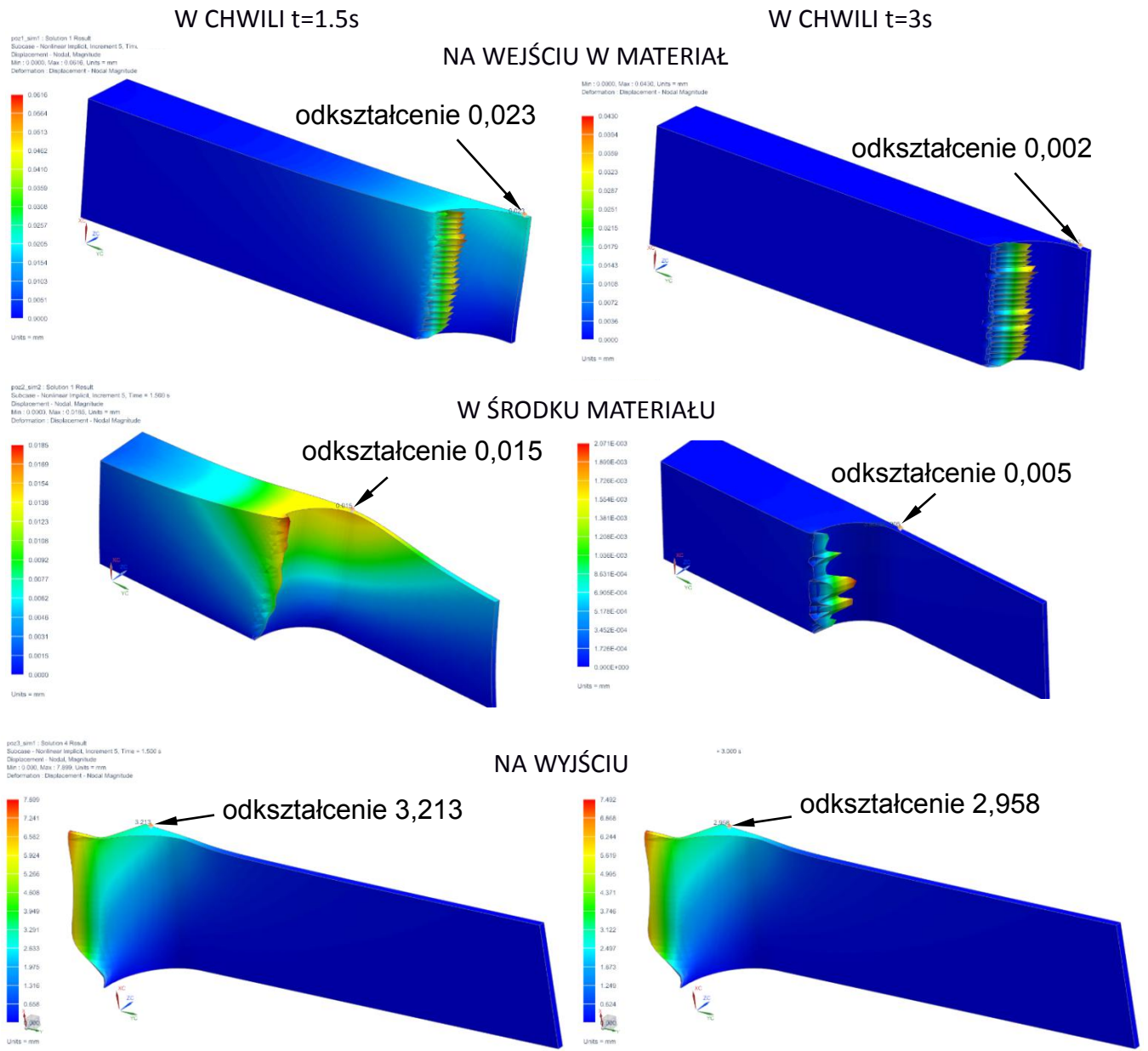


Rys. 3.4. Widok siatki elementów skończonych oraz założonych warunków brzegowych

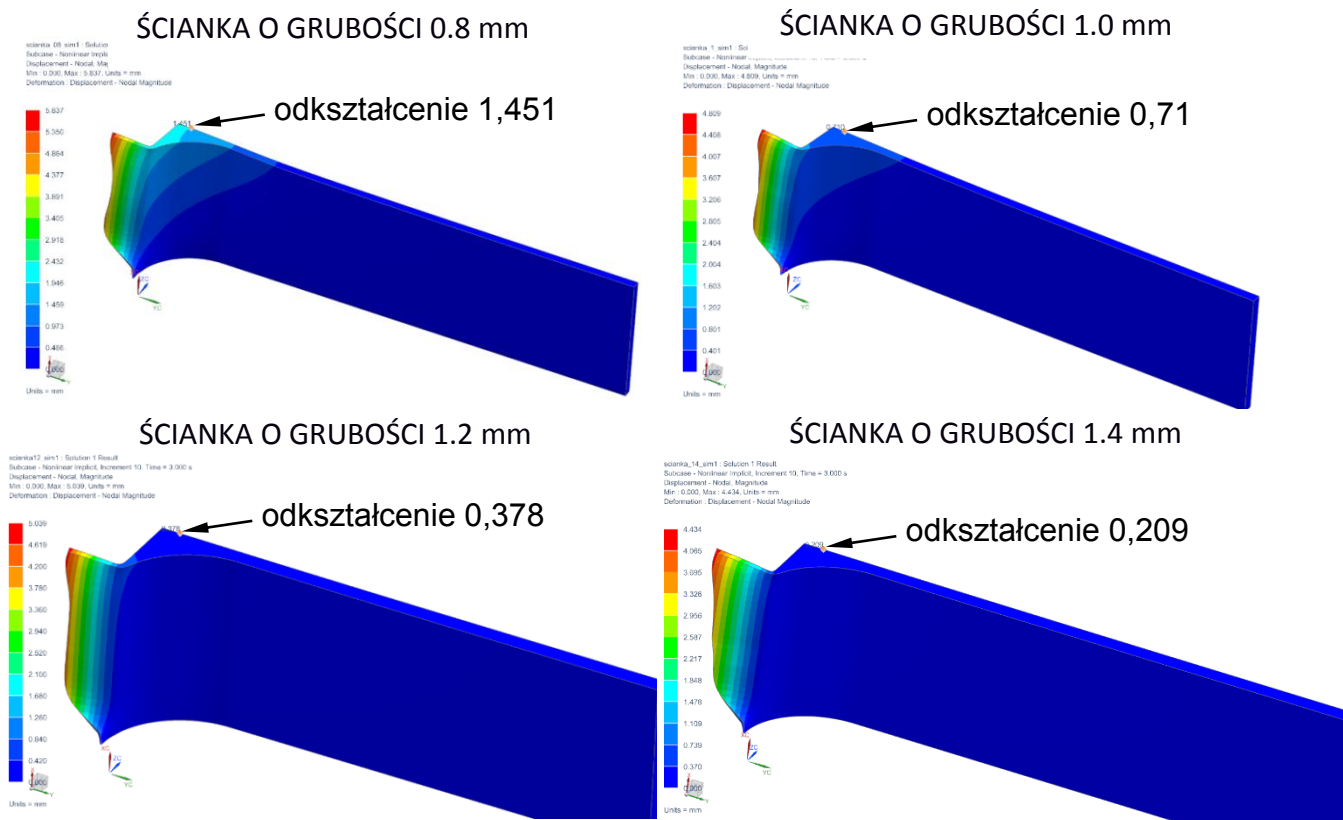
Do symulacji przyjęto następujące grubości ścianek: 0.6 mm; 0.8 mm; 1 mm; 1.2 mm; 1.4 mm. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania symulacyjne dla ścianki 0.6 mm uwzględniające odkształcenia sprężysto – plastyczne dla trzech wariantów: na wejściu, w środku oraz na wyjściu frezu z materiału obrabianego. Na rys. 3.5 przedstawiono wyniki symulacji odkształcenia ścianki pod wpływem działania obciążenia w chwili  $t=1.5$  s (maksymalne ciśnienie) oraz w chwili  $t=3$  s (bez obciążenia) dla trzech wariantów sytuacyjnych.

Na podstawie uzyskanych rezultatów symulacji odkształcenia można wnioskować, że dla wariantu, kiedy frez znajduje się na początku oraz w środku materiału, mamy do czynienia z odkształceniami sprężystymi. W wariantcie trzecim, kiedy frez wychodzi z materiału, widoczne jest występowanie odkształceń sprężysto – plastycznych. Dla kolejnych grubości ścianek przyjęto do symulacji wariant trzeci – narażony na odkształcenia sprężysto plastyczne. Wyniki tych symulacji obrazuje rys. 3.6 w chwili  $t=3$  s.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że dla ścianki o grubości 1.4 mm uzyskano najmniejsze odkształcenia plastyczne z uwagi na największą sztywność i wyniosły na wyjściu frezu z materiału 0.209 mm. Dla pozostałych grubości ścianek odkształcenia przedstawiono w tab. 3.1



Rys. 3.5. Wyniki symulacji odkształcenia dla ścianki grubości 0.6 mm dla trzech wariantów



Rys. 3.6. Wyniki symulacji odkształcenia dla różnej grubości ścianek

Tab. 3.1. Wyniki pomiaru odkształcenia z symulacji MES

Grubość ścianki [mm]	Odkształcenie na wyjściu z materiału [mm]
1,4	0.209
1.2	0.378
1	0.710
0.8	1.451
0.6	2.958

Największe przewidywane odkształcenie będzie występowało dla ścianki o grubości 0.6 mm. Z przedstawionych rezultatów można wnioskować, że dla struktur cienkościennych o grubości mniejszej niż 1.2 mm powinno się planować naddatek na



obróbkę wykończeniową w ten sposób, aby łączna grubość ścianki i naddatku wynosiła 1.4 mm. Zastosowanie takiej strategii (metody) obróbki pozwoli na uzyskanie poprawnej dokładności wymiarowo – kształtowej ścianki po frezowaniu wykończeniowym.

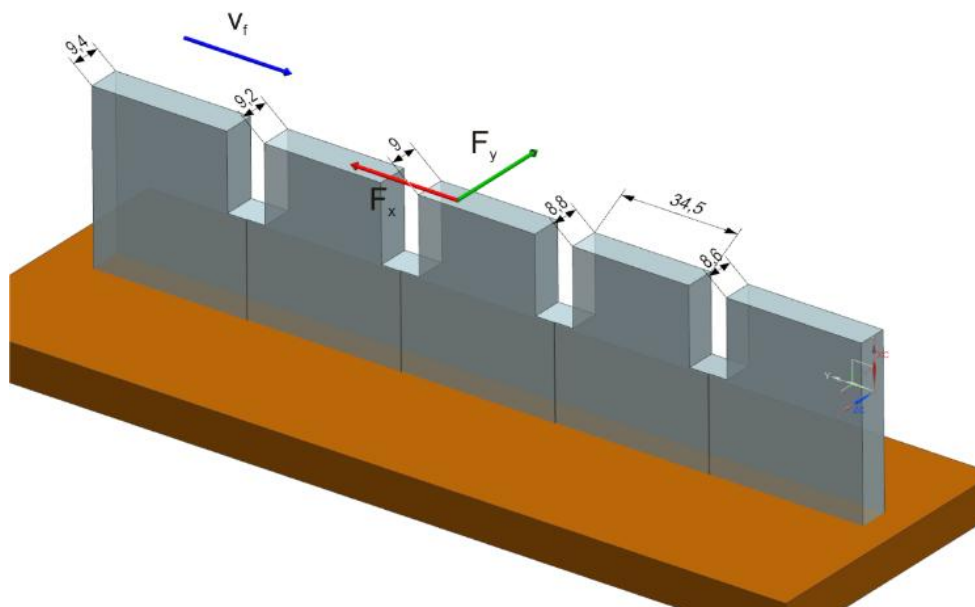
#### 4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Próby frezowania wysokowydajnego zrealizowano na 5-osiowym centrum obróbkowym HSC 55 Linear firmy DMG (rys. 4.1). Obrabiarkę wyposażono w układ pomiarowy, który składał się z platformy pomiarowej sił skrawania wykonanej przy użyciu czterech pojedynczych, 3-składowych, piezoelektrycznych siłomierzy firmy Kistler typu 5073 oraz czujnika drgań PCB typu M353.

Badania doświadczalne przeprowadzono frezując model testowy, o stopniowanej grubości ścianki, przy stałej szerokości frezowania podczas jednego przejścia frezu (rys. 4.2). Jako materiał obrabiany zastosowano stop aluminium 6061. Proces frezowania zrealizowano z wykorzystaniem frezu palcowego o średnicy 12 mm. Makrogeometria frezu przedstawia się następująco: kąt natarcia  $\gamma=10^\circ$ , kąt przyłożenia  $\alpha=13^\circ$  oraz kąt nachylenia linii ostrza  $\lambda=40^\circ$ . Przyjęto następujące parametry technologiczne: prędkość skrawania  $v_c=680$  m/min, prędkość posuwu  $v_f=5000$  mm/min, dosuw osiowy  $a_p=12$  mm oraz dosuw promieniowy  $a_e=8$  mm.



Rys. 4.1. Stanowisko badawcze: 1 - narzędzie, 2 - badana próbka, 3 - platforma sił skrawania, 4 - komputer, 5 - przetworniki A/C, 6 - sterowanie wzmacniaczy, 7 - wzmacniacze ładunku, 8 - czujnik drgań

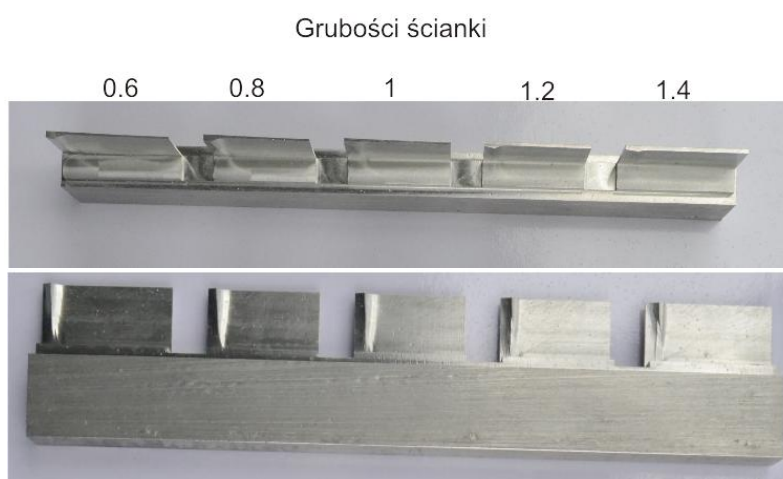


Rys. 4.2 Próbką do badań

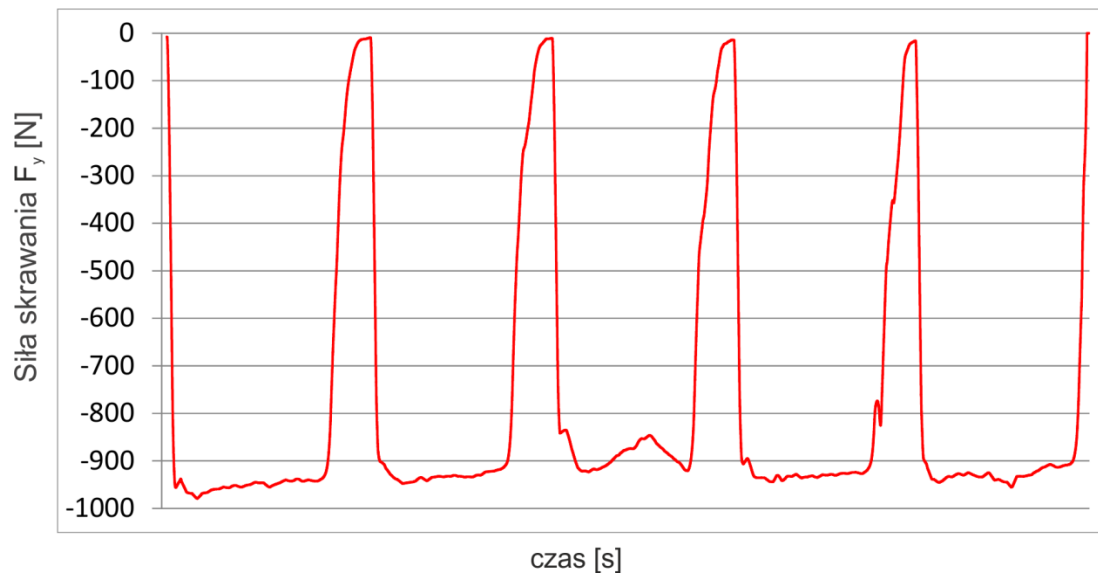
Wykonano próby frezowania współbieżnego ścianek o różnej grubości, w celu określenia dla jakiej grubości możliwe jest zastosowanie minimalnego naddatku obróbkowego w obróbce HPC, z zachowaniem minimalnego odkształcenia elementu cienkościennego.

Widok ścianek po frezowaniu przedstawiono na rys. 4.3 natomiast na rysunku 4.4 przedstawiono przebieg czasowy maksymalnej siły  $F_y$  oddziałującej na ściankę obrabianą. Wartość siły  $F_y$  zmierzono na poziomie około 900 N dla wszystkich frezowanych ścianek.

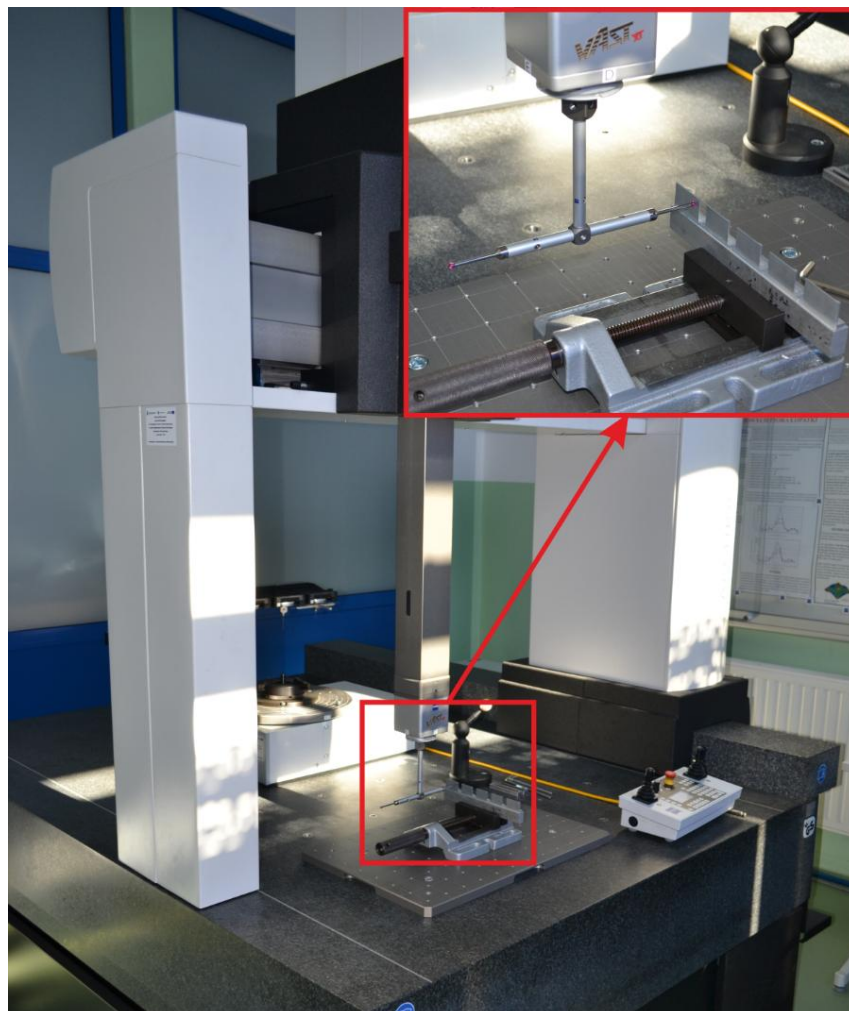
Po próbie frezowania przeprowadzono pomiar ugięcia ścianki odkształconej siłą  $F_y$ . Pomiar wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej ACURA II z głowicą pomiarową VAST XT. Pomiar realizowano w punkcie, w którym narzędzie wychodziło z materiału. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 4.5.



Rys. 4.3 Badana próbka



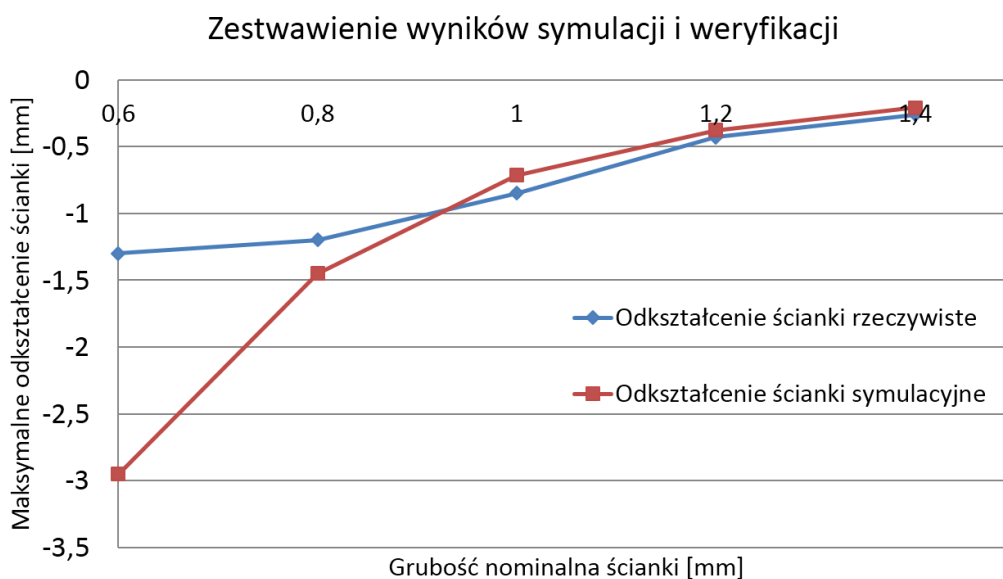
Rys. 4.4 Zmiana siły oddziałującej na ścinę  $F_y$  w czasie



Rys. 4.5 Stanowisko pomiarowe - ACURA II

Na rys. 4.6 przedstawiono zestawienie wyników badań doświadczalnych oraz badań symulacyjnych. Przedstawiona wartość ujemna ugięcia ścianki oznacza jej odpychanie od

frezu, natomiast wartość dodatnia oznacza odkształcenie ścianki w kierunku narzędzia. Jest to zgodne z kierunkiem działania siły  $F_y$ .



Rys. 4.6 Porównanie wyników badań symulacyjnych oraz doświadczalnych

Dla przyjętych warunków badań tylko ścianka o grubości 1,4 mm została wykonana poprawnie. Odształcenie ścianki nie przekroczyło 0,5 mm. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wyniki otrzymane z obliczeń MES sprawdzają się prawie w każdym przypadku w rzeczywistych badaniach weryfikacyjnych dla określonej grubości ścianki. Wartością graniczną dla przyjętej metody obliczeniowej MES badań symulacyjnych jest ścianka o grubości 1 mm, poniżej tej grubości występują coraz większe rozbieżności między wynikami symulacyjnymi i rzeczywistymi. Dla analizowanych grubości ścianek większych niż 1 mm zachodzi bardzo dobra korelacja wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych. Wynika to z przyjętego prawa zachowania materiału dla odkształceń nieliniowych, które zaimplementowano do właściwości materiału obrabianego (krzywa rozciągania stopu aluminium). Dla ścianek o grubości poniżej 1 mm typ rozwiązania SOL 601,106 Advanced nonlinear Static interpoluje możliwe rozwiązanie, czego efektem jest dalsze odkształcenie.

## 5. WNIOSKI

- Przyjęty uproszczony model symulacyjny nie odzwierciedla wszystkich zjawisk wynikających podczas procesu skrawania.
- Dla grubości ścianek 1,4 mm, 1,2 mm, oraz 1 mm w postawionym zadaniu MES wartości maksymalnego odkształcenia są zbliżone z wartościami rzeczywistymi.
- Wyniki dla ścianek 0,8 mm i 0,6 mm znacznie odbiegają od wyników doświadczalnych. Jest to efektem uwzględniania w rozwiązaniu odkształcenia materiału na bazie krzywej rozciągania STRESS-STRAIN. Ten fakt powoduje błędne rezultaty dla ścianek o grubości poniżej 1 mm (możliwość wystąpienia naprężeń większych niż dla deklarowanej krzywej),
- Powinno się przeprowadzić badania dodatkowe z uwzględnieniem modeli rzeczywistych biorąc pod uwagę warunki styku pomiędzy frezem a przedmiotem obrabianym w oprogramowaniu typu: ABAQUS, ANSYS lub ADVANTEDGE, co będzie przedmiotem dalszych prac badawczych.

## 6. LITERATURA

- [1] Oczóś K. E., Kawalec A. „Kształtowanie metali lekkich” PWN 2012.
- [2] Adamski W. „Wybrane problemy projektowania i wytwarzania CAD/CAM w przemyśle maszynowym”, OWPRz 2012
- [3] Songmene V., Khettabi R., Zaghbani I., Kouam J., Djebara A.: Machining and Machinability of Aluminum Alloys, Aluminium Alloys, Theory and Applications, InTech 2011, s. 377-400
- [4] Burek J., Płodzień M.: Wysoko wydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach. Mechanik nr 7/2012, s.
- [5] Kenedy B., Earsl A.R. “Wall Smart”, Cutting Tool Engineering February Volume 59 2007
- [6] Poradnik Obróbki Skrawaniem Garanta