



mgr inż. Paweł Pieśko

Badania wpływu sztywności statycznej frezów trzępieniowych na dokładność geometryczną przedmiotów wykonywanych ze stopów aluminium

*Promotor:
prof. dr hab. inż. Józef Kucmaszewski*

ROZPRAWA DOKTORSKA

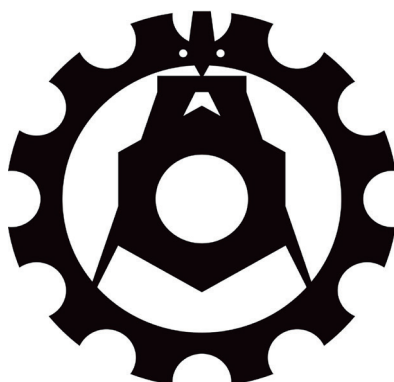
*Panu Promotorowi
prof. dr hab. inż. Józefowi Kuczmazewskiemu
składam serdeczne podziękowania za opiekę
naukową w trakcie realizacji rozprawy*

*Dziękuję również moim bliskim oraz wszystkim
osobom, które mnie wspierały*

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin

mgr inż. Paweł Pieško

Badania wpływu sztywności statycznej frezów trzpieniowych na dokładność geometryczną przedmiotów wykonywanych ze stopów aluminium

Promotor:
prof. dr hab. inż. Józef Kuczmazewski



Politechnika Lubelska
Lublin 2014

Praca realizowana w ramach projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Spis treści

Spis treści	5
Streszczenie	7
Wykaz najważniejszych skrótów i symboli	7
1. Wiadomości wstępne	10
1.1. Charakterystyka procesu frezowania	10
1.2. Obróbka HSC i HPC	13
1.2.1. Charakterystyka obróbki HSC	14
1.2.2. Charakterystyka obróbki HPC	18
1.2.3. Porównanie obróbki HSC, HPC i konwencjonalnej	19
1.3. Specyfika obróbki ubytkowej stopów aluminium	22
1.3.1. Kształtowanie wiórów	24
1.3.2. Jakość powierzchni	25
1.3.3. Zużycie narzędzi	26
1.3.4. Siły skrawania	28
1.4. Stopy aluminium i ich właściwości	28
1.4.1. Aluminium	29
1.4.2. Stopy aluminium do obróbki plastycznej	30
1.4.3. Odlewnicze stopy aluminium	33
1.5. Stabilność procesu frezowania	34
1.6. Sztywność narzędzia oraz układu narzędzie–oprawka–wrzeciono	37
1.7. Wybrane elementy strategii obróbki elementów cienkościennych	39
1.8. Dokładność geometryczna przedmiotu	42
1.9. Wnioski z analizy piśmiennictwa	44
2. Zakres pracy i hipoteza badawcza	46
2.1. Cel i zakres pracy	46
2.2. Hipoteza badawcza	47

3. Elementy teorii i planowania eksperymentu.....	48
3.1. Dobór gatunków aluminium do badań.....	48
3.2. Model przedmiotu obrabianego, uzasadnienie wyboru geometrii	51
3.3. Dobór parametrów obróbki oraz narzędzi.....	52
3.4. Charakterystyka stanowiska badawczego	56
3.5. Metodyka pomiarów dokładności	60
3.6. Statystyczne opracowanie wyników	62
4. Wyznaczenie sztywności oraz obszarów stabilności – analiza modalna	66
4.1. Wyznaczenie sztywności narzędzi	66
4.2. Wyznaczenie obszarów stabilności pracy narzędzi	68
5. Analiza dokładności geometrycznej obrobionych elementów w świetle badań modelowych	74
5.1. Wyniki pomiarów sił skrawania	74
5.2. Wyznaczenie charakterystyk materiałowych	77
5.3. Definicja siatki oraz warunków brzegowych dla obliczeń MES	79
5.4. Analiza przemieszczenia na podstawie obliczeń MES	81
6. Analiza dokładności geometrycznej obrobionych elementów w świetle badań eksperymentalnych.....	93
6.1. Analiza błędów kształtu obrobionych elementów	93
6.2. Analiza chropowatości powierzchni obrobionych elementów.....	124
7. Dyskusja wyników i wnioski.....	136
Spis rysunków	139
Spis tabel.....	145
Literatura.....	146
Załączniki.....	151

Streszczenie

We współczesnych konstrukcjach, zwłaszcza lotniczych, dąży się do obniżenia masy wykorzystywanych podzespołów. Wymusza to stosowanie nowych materiałów konstrukcyjnych lub wykonywanie tych elementów z coraz mniejszymi grubościami ścianek. W celu uproszczenia montażu i polepszenia właściwości wytrzymałościowych stosuje się tzw. konstrukcje strukturalne w postaci elementów monolitycznych, zastępujących zespoły części łączone np. techniką nitowania. Konstrukcje takie często posiadają skomplikowaną, cienkościenną geometrię z głębokimi wybraniami, co wymusza stosowanie narzędzi o znacznych długościach i niewielkich średnicach, a więc o małej sztywności. Pomimo rozwijania nowych materiałów konstrukcyjnych, takich jak np. kompozyty polimerowe, głównym materiałem konstrukcyjnym na tego typu elementy są nadal stopy aluminium.

W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych oraz obliczeniach numerycznych podjęto próbę określenia wpływu sztywności statycznej frezów trzpieniowych na dokładność geometryczną oraz chropowatość powierzchni elementów cienkościennych, w postaci ścian o zróżnicowanej geometrii, wykonywanych z różnych stopów aluminium. Próby obróbkowe przeprowadzono z różnymi prędkościami skrawania, co pozwoliło na porównanie dokładności geometrycznej elementów wykonanych w warunkach obróbki konwencjonalnej i obróbki ze zwiększonymi prędkościami skrawania. W trakcie przeprowadzonych badań starano się uzyskać elementy cienkościenne o jak najmniejszej grubości – największym stosunku wysokości ścianek do ich grubości h_s/g_s , przy zachowaniu wymagań co do jakości ich wykonania.

Abstract

In modern designs, especially in the aircraft construction, it is aimed to reduce the weight of utilised components. This forces the use of new construction materials or execution of these elements with progressively less thick walls. In order to simplify assembly and improve the strength properties, there are used so-called structural constructions in the form of monolithic elements, replacing piece sets combined, for example, by riveting. Such constructions often have a complicated geometry with thin-walled deep recesses, which requires the use of tools of considerable length and small diameter, and thus of low rigidity. Despite the development of new structural materials, such as polymer composites, the major construction material for such elements are still aluminum alloys.

In experimental studies and numerical calculations it was attempted to determine the effect of static rigidity of shank cutters on the geometrical accuracy and the surface roughness of thin-walled components, in the shape of the walls of different geometries, made from various aluminum alloys. Machining tests were carried out with different cutting speeds, which allowed the comparison of the accuracy of the geometric elements made by way of conventional machining and machining with higher cutting speeds. In the course of the study it was attempted to get thin-walled parts with the smallest thickness - the greatest height to thickness ratio of the walls of h_s/g_s , while maintaining the requirements for the quality of their performance.

Wykaz najważniejszych skrótów i symboli

a_e	– szerokość skrawania (dosuw poprzeczny)
a_p	– głębokość skrawania (dosuw wstępny)
c	– współczynnik sztywności
CAD	– <i>ang. Computer Aided Design</i> (Komputerowe Wspomaganie Projektowania)
CAM	– <i>ang. Computer Aided Manufacturing</i> (Komputerowe Wspomaganie Projektowania Procesów Technologicznych)
CNC	– <i>ang. Computer Numerical Control</i> (Komputerowe Sterowanie Numeryczne)
E	– współczynnik sprężystości wzdłużnej
f	– posuw
F_x, F_y, F_z	– składowe siły skrawania w kierunkach X, Y, Z
f_z	– posuw na ostrze
G	– współczynnik sprężystości postaciowej
g_s	– grubość ścianki
HPC	– <i>High Performance Cutting</i> (obróbka wysokowydajna)
h_s	– wysokość ścianki
HSC	– <i>High Speed Cutting</i> (skrawanie z dużymi prędkościami)
j	– sztywność
k	– współczynnik tłumienia
L_s	– długość ścianki
L_w	– długość wysięgu
MES	– Metoda Elementów Skończonych
MQL	– <i>ang. Minimum Quantity Lubrication</i> (minimalne smarowanie)
n	– liczebność próby
n_f	– prędkość obrotowa freza
OUPN	– układ Obrabiarka-Uchwyt-Przedmiot-Narzędzie
PKD	– diament polikrystaliczny

Ra	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu
Rm	– wytrzymałość na rozciąganie
v_c	– prędkość skrawania
v_f	– prędkość ruchu
Δy	– odkształcenie / przemieszczenie ścianki w kierunku osi Y
μ	– wartość średnia
σ²	– wariancja
ω	– częstotliwość drgań

1. Wiadomości wstępne

1.1. Charakterystyka procesu frezowania

W ciągu minionych kilkudziesięciu lat, wraz z rozwojem obrabiarek CNC, systemów sterowania, narzędzi skrawających, systemów narzędziowych oraz oprogramowania wspomagającego projektowanie procesów technologicznych (CAM) nastąpił rozwój frezowania jako metody obróbki o bardzo szerokim zakresie stosowania, umożliwiającej wykonywanie bardzo złożonych elementów (rys. 1.1). Frezowanie, jako bardzo uniwersalna metoda obróbki, oprócz tradycyjnych zastosowań wykorzystywane jest do wykonywania: otworów, wgłębień (kieszeni), gwintów, powierzchni przeznaczonych do toczenia, powierzchni swobodnych o dowolnym zarysie definiowanych za pomocą krzywych typu spline, itd. Zastosowanie nowych, efektywniejszych metod frezowania w połączeniu ze stosowaniem bardziej niezawodnych narzędzi z wymiennymi płytkami oraz monolitycznych narzędzi węglkowych, daje dużo lepsze wyniki obróbki. Zastępuje szlifowanie, obróbkę elektroerozyjną oraz pozwala obrabiać elementy zahartowane [90].

Frezowanie jest jednym z rodzajów obróbki skrawaniem, podczas którego ruch główny obrotowy wykonuje narzędzie. Ruch posuwowy na obrabiarkach konwencjonalnych wykonuje najczęściej przedmiot obrabiany zamocowany na stole obrabiarki, rzadziej narzędzie lub przedmiot obrabiany i narzędzie [71]. W obrabiarkach sterowanych numerycznie, szczególnie o złożonych ruchach kształtowania, ruch posuwowy może wykonywać zarówno przedmiot obrabiany jak i narzędzie, zależy to od zastosowanego przez producenta obrabiarki rozwiązania konstrukcyjnego. W obróbce tej stosowane są narzędzia wieloostrzowe w postaci frezów trzpieniowych, walcowych, tarczowych, głowic frezarskich itp. Używanie narzędzi wieloostrzowych umożliwia jednocześnie usuwanie materiału obrabianego przez wiele ostrzy, co przy możliwości stosowania dużych prędkości skrawania zapewnia bardzo wysoką wydajność procesu frezowania [9, 18, 21, 90]. Zwiększenie wydajności uzyskuje się również przez stosowanie nowych metod frezowania takich jak HPC i HSC, które będą bardziej szczegółowo omówione w dalszej części pracy. Na rys. 1.1 przedstawiono przykłady złożonych konstrukcji wykonanych technikami frezowania HSC i HPC.

Frezowanie charakteryzuje się przerywaną pracą narzędzia przy zmiennej geometrii warstwy skrawanej. Każde ostrze frezu wykonuje pracę skrawania tylko co pewien czas. Odróżnia to frezowanie od innych rodzajów obróbki wiórowej. Zaletą takiej pracy jest spadek temperatury ostrzy, w wyniku odpływu ciepła w głąb narzędzia oraz do otoczenia, gdy znajdują się one poza materiałem obrabianym. Do wad należy zaliczyć występowanie zmiennych naprężeń w ostrzu, wywołanych okresowym pojawianiem się i zanikaniem sił skrawania oraz zmianami sił skrawania w wyniku zmian przekroju warstwy skrawanej, co ujemnie wpływa na trwałość narzędzia. Zmienne obciążenie ostrzy wywołuje również

drgania samowzbudne w układzie OUPN, które mają niekorzystny wpływ na jakość obrabianych elementów, mechanizmy obrabiarki oraz stan narzędzi, powodując ich szybsze zużycie [21, 29, 71].



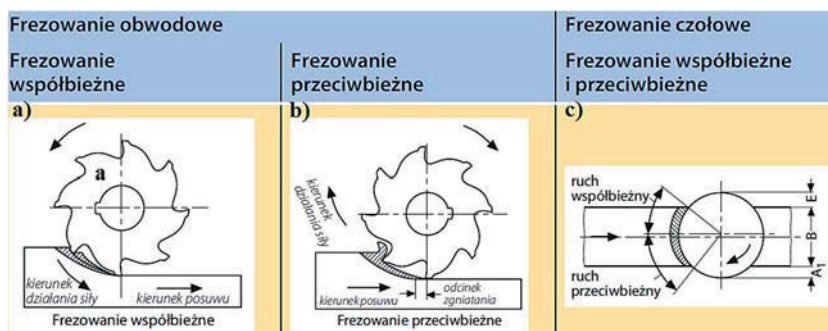
Rys. 1.1. Przykłady złożonych konstrukcji wykonywanych frezowaniem [13, 102]

Podstawowy podział metod frezowania dotyczy pracy narzędzi. Pod tym względem należy wyróżnić frezowanie [28, 29, 98]:

- czołowe (rys.1.2c) – obróbka wykonywana jest ostrzami znajdującymi się od czoła frezu – oś obrotu frezu zajmuje położenie prostopadłe do powierzchni obrabianej,
- obwodowe (walcowe) (rys.1.2a, b) – skrawanie wykonują ostrza umieszczone na obwodzie frezu – oś obrotu frezu zajmuje położenie równoległe do powierzchni obrabianej,
- obwodowo (walcowo) – czołowe (rys.1.3b) – obróbka ostrzami zarówno na czole jak i obwodzie frezu, przy czym główną pracę skrawania wykonują ostrza obwodowe natomiast ostrza czołowe jedynie wygładzają powierzchnię obrobioną.
- frezowanie wgłębne (*ang. plunge milling*) (rys.1.3j) – wysokowydajna metoda frezowania zgrubnego, w której skrawanie wykonują ostrza czołowe – oś obrotu frezu zajmuje położenie równoległe w stosunku do powierzchni obrabianej [71, 90, 92]. Obróbka tego typu charakteryzuje się korzystnym rozkładem sił, gdyż największą wartość osiąga składowa siły skrawania działająca wzdłuż osi narzędzia, natomiast składowe prostopadłe do osi narzędzia są stosunkowo niewielkie. Wpływa to na poprawę stabilności pracy narzędzia, obniżenie poboru mocy i hałasu [4, 44, 88].

Rozwój konstrukcji narzędzi, takich jak głowice frezarskie czy składane frezy walcowo – czołowe oraz samych materiałów narzędziowych, powoduje, że frezowanie obwodowe płaszczyzn zostało praktycznie całkowicie zastąpione frezowaniem czołowym lub walcowo – czołowym. Wynika to również z wielu zalet frezowania czołowego takich jak: bardziej stabilna i równomierna praca narzędzia i obrabiarki, większa wydajność obróbki, lepsza dokładność wymiarowa oraz jakość powierzchni [29]. Przy obróbce na nowoczesnych obrabiarkach CNC,

głównym zastosowaniem frezowania obwodowego jest obecnie wykonywanie różnego rodzaju rowków i kanałów (rys. 1.3e, h) oraz obróbka gwintów (rys. 1.3g). Na obrabiarkach konwencjonalnych, oprócz obróbki rowków czy gwintów (linii śrubowych), szczególnie w produkcji małoseryjnej, stosowane jest często frezowanie obwodowe kształtowe (np. kształtowa obróbka kół zębatych).



Rys. 1.2. Rodzaje frezowania [28]

Ze względu na układ wzajemnych ruchów narzędzia i przedmiotu obrabianego (kinematykę procesu) można wyróżnić dwa rodzaje frezowania [29, 98]:

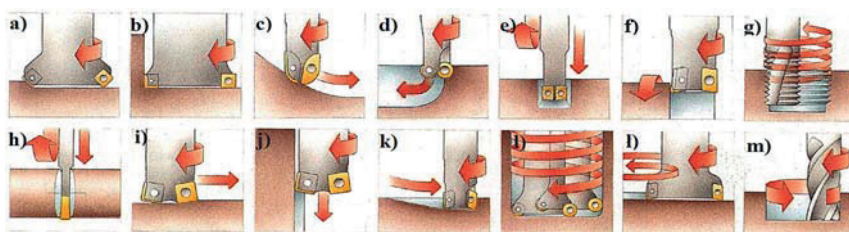
- frezowanie współbieżne (rys. 1.2a), przedmiot obrabiany przesuwają się w kierunku zgodnym z ruchem pracujących ostrzy frezu, które zagłębiają się w materiał w miejscu największej grubości warstwy skrawanej,
- frezowanie przeciwbieżne (rys. 1.2b), przedmiot obrabiany przesuwają się w kierunku przeciwnym do ruchu pracujących ostrzy frezu, które zagłębiają się w materiał w miejscu najmniejszej grubości warstwy skrawanej.

Wybór właściwego rodzaju frezowania ma istotny wpływ na przebieg procesu skrawania. Podczas frezowania współbieżnego na obrabiarkach konwencjonalnych, które nie posiadają mechanizmów kasowania luzów w układzie napędu ruchu posuwowego, w wyniku niekorzystnego rozkładu sił skrawania, następuje „wciąganie” materiału przez frez, co może powodować uszkodzenie przedmiotu obrabianego, narzędzia a niekiedy obrabiarki. Jest to główną przyczyną unikania frezowania współbieżnego na rzecz przeciwbieżnego przy obróbce na obrabiarkach konwencjonalnych. Problem ten nie występuje na obrabiarkach o dużej sztywności posiadających mechanizmy kasowania luzów. Przy frezowaniu przeciwbieżnym, na skutek podatności układu obrabiarka - uchwyt - przedmiot - narzędzie (OUPN), ostrza frezu nie od razu zaczynają skrawać materiał lecz ślizgają się i trą o powierzchnię obrobioną. Powoduje to ich przedwczesne zużycie, znaczne zwiększenie sił skrawania a w konsekwencji pogorszenie dokładności obróbki oraz jakości obrobionych powierzchni. Dodatkowo gromadzące się przed ostrzem wióry utrudniają chłodzenie narzędzia. Wszystkie te czynniki przemawiają na korzyść stosowania frezowania współbieżnego [19, 29, 98].

W praktyce, dla obrabiarek CNC, przy obróbce zgrubnej, bardzo często stosuje się połączenie frezowania współbieżnego i przeciwbieżnego, co eliminuje wykonywanie zbędnych ruchów ustawczych i zwiększa wydajność obróbki. Natomiast jako obróbka wykończeniowa, zapewniająca lepszą jakość obrobionych powierzchni, stosowane jest frezowanie współbieżne [19].

Frezowanie stosowane jest najczęściej do obróbki powierzchni płaskich. Następuje jednak ciągły rozwój frezowania powierzchni swobodnych, ponieważ wzrasta liczba pięcioosiowych centrów obróbczych i maszyn wielozadaniowych. Główne typy operacji frezarskich, w odniesieniu do toru narzędzia przedstawiono na rys.1.3, obejmują one [90]:

- | | |
|--------------------------------|---|
| a) frezowanie czołowe, | h) frezowanie wąskich kanałków i przecinanie, |
| b) frezowanie walcowo-czołowe, | i) frezowanie z wysokimi posuwami, |
| c) frezowanie profilowe, | j) frezowanie wgłębień, |
| d) frezowanie wgłębień, | k) frezowanie ze skośnym zagłębianiem, |
| e) frezowanie rowków, | l) interpolacja śrubowa, |
| f) frezowanie toczne, | ł) interpolacja kołowa, |
| g) frezowanie gwintów, | m) frezowanie trochoidalne. |



Rys. 1.3. Typy operacji frezarskich [90]

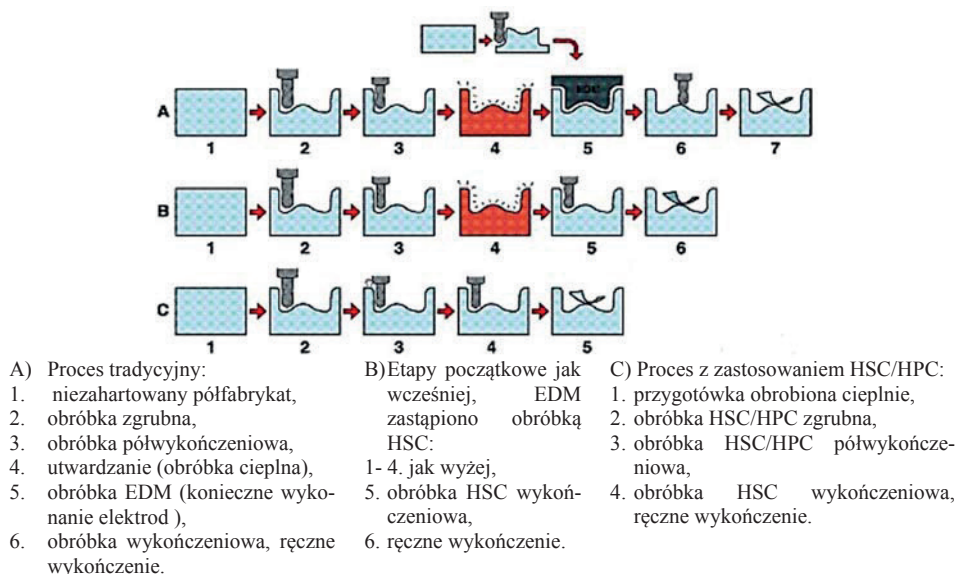
Szeroki zakres możliwych zastosowań, wysoka wydajność oraz jakość obróbki sprawiają, że frezowanie w chwili obecnej jest najczęściej stosowanym i dynamicznie rozwijającym się rodzajem obróbki wiórowej.

1.2. Obróbka HSC i HPC

W ostatnich kilkunastu latach, w zakresie obróbki skrawaniem, widoczny jest rozwój dwóch wysokowydajnych metod obróbki tj.: skrawania z dużymi prędkościami (HSC - *high speed cutting*) i skrawania z dużymi posuwami (HPC - *high performance cutting*). Zaletami tych metod obróbki, oprócz oczywistego wzrostu wydajności, jest możliwość ich stosowania do [16, 65, 67–69]:

- tzw. skrawania twardego (materiały w stanie zahartowanym) – głównie obróbka form, matryc, wykrojników [42, 53, 65]. Eliminuje to konieczność stosowania pracochłonnej i kosztownej obróbki elektroerozyjnej (EDM), co w znaczący sposób wpływ na przebieg oraz skrócenie procesu technologicznego (rys.1.4). Zaletą jest kompleksowa obróbka w jednym zamocowaniu,

oszczędności energii oraz uzyskanie, w stosunku do elektrodrążenia, poprawy dokładności oraz jakości obróbianych powierzchni [28, 74, 87];



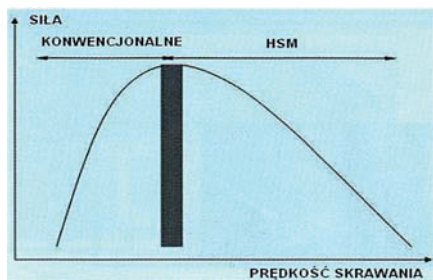
Rys. 1.4. Usprawnienie procesu produkcyjnego - redukcja czasu produkcji w procesie C) w stosunku do procesu A) na poziomie 30 - 50% [74, 87]

- obróbki bez udziału cieczy chłodziwo-smarującej (skrawanie suche) lub z minimalnym smarowaniem (skrawanie quasi-suche), umożliwia znaczące obniżenie kosztów produkcji. Zakup, przechowywanie i późniejsza utylizacja chłodziw stanowi kilkanaście procent (ok. 14%–17%) całkowitego kosztu produkcji [28, 51]. Stosowanie cieczy chłodziwo-smarujących ma niekorzystny wpływ na zdrowie operatorów obrabiarek oraz środowisko naturalne.

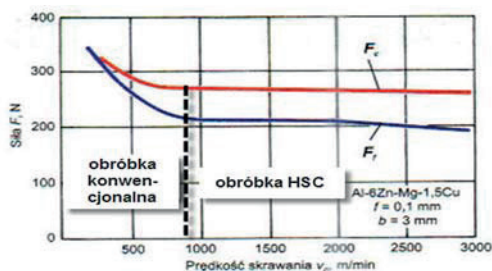
1.2.1. Charakterystyka obróbki HSC

Obróbka HSC jest trudna do jednoznacznego zdefiniowania, co wynika z bardzo dużej zależności warunków obróbki (m.in. sił i temperatury skrawania) od właściwości obrabianego materiału. Ogólnie HSC można scharakteryzować jako obróbkę podczas której, dzięki bardzo dużym prędkościom obrotowym narzędzia, uzyskuje się wielokrotnie większe prędkości skrawania i posuwu - przy znacznie mniejszych przekrojach warstwy skrawanej - niż podczas obróbki konwencjonalnej [69]. Pierwotna definicja HSC zakładała, że jest to obróbka z prędkościami skrawania 5–10-krotnie, w zależności od materiału obrabianego, większymi od wartości stosowanych dla obróbki konwencjonalnej [1, 2, 16, 67–69, 71]. Jedną z propozycji definiowania HSC wprowadza pojęcie tzw. granicznej prędkości skrawania v_{cgr} , od której zaczyna się zakres dużych prędkości. Jej wartość

ustalana jest na podstawie analizy sił skrawania, zmieniających się wraz ze wzrostem prędkości skrawania, przy czym część badaczy [1, 2, 13] przyjmuje, że o obróbce HSM można mówić, gdy wzrost prędkości skrawania powoduje spadek sił skrawania (rys.1.5).



Rys. 1.5. Przebieg sił skrawania w funkcji prędkości [1, 2]



Rys. 1.6. Zależność składowych siły skrawania od prędkości skrawania przy toczeniu stopu Al6ZnMg1,5Cu [69]

W innych pracach [5, 6, 69] przyjęto, że prędkość graniczna jest to prędkość skrawania, do której siła skrawania istotnie zmniejsza się (rys.1.6). Prędkość graniczna przyjmuje różne wartości, w zależności o obrabianego materiału (rys.1.8a). Na rys.1.6 przedstawiono przebieg sił w zależności od prędkości skrawania dla stopu aluminium Al-6Zn-Mg-1,5Cu, dla którego v_{cgr} wynosi ok. 1000 m/min.

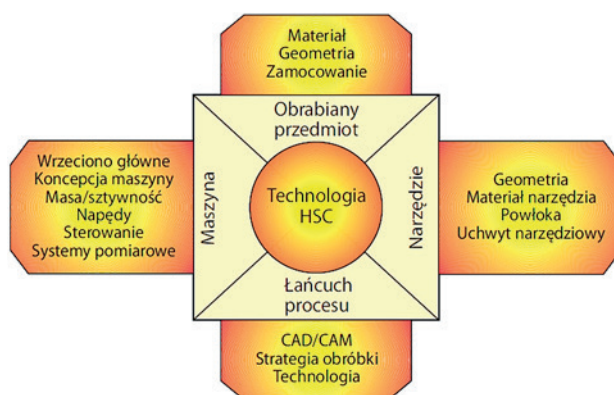
Z punktu widzenia maszyny technologicznej obróbkę HSC determinuje dynamika obrabiarki oraz prędkość obrotowa wrzeciona, co wymaga spełnienia następujących warunków [54]:

- odpowiednia prędkość obrotowa wrzeciona, osiągająca niekiedy 30 000 obr/min,
- duża moc wrzeciona, nawet 60kW,
- wysokie wartości posuwów roboczych oraz ustawczych (w skomplikowanych konstrukcjach kieszeniowych, gdzie narzędzie musi dokonać wielu zmian kierunku, czas ruchów ustawczych może sięgać 20% całkowitego czasu cyklu obróbkowego, w związku tym stosowane prędkości tych ruchów niekiedy przekraczają wartość 100 m/min),
- wysoka dynamika przemieszeń (odpowiednio duże przyspieszenia i opóźnienia sięgające wartości 0,5–1 g)
- wysoka dokładność.

Pierwsze dwa warunki określają właściwości wrzeciona natomiast kolejne dynamikę przemieszczeń zespołów roboczych obrabiarki. Ważnym aspektem obróbki HSC na obrabiarkach CNC jest zastosowanie sterownia z funkcją *look-ahead* (prognozowanie przemieszczeń z wyprzedzeniem). Od nowoczesnego sterowania obrabiarek CNC, przystosowanego do obróbki HSC, wymagane jest aby wczytywało i analizowało kod NC z wyprzedzeniem 150–250 bloków [54, 69].

Z powyższych informacji wynika, że aby zaistniała obróbka HSC konieczne jest kompleksowe rozpatrzenie wielu czynników, które można zgrupować w czterech kategoriach (rys. 1.7) [28, 47, 54, 65, 67–69, 71]:

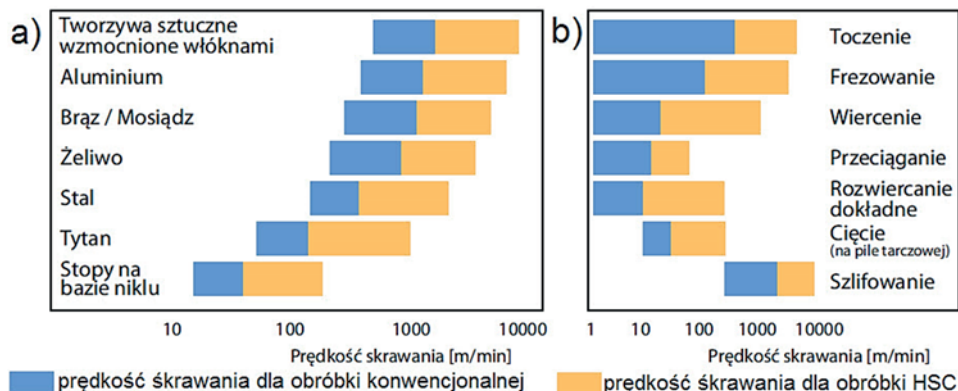
- przedmiot obrabiany – rodzaj i gatunek materiału obrabianego jest najistotniejszym czynnikiem określającym wartość prędkości skrawania odpowiadającej obróbce HSC (rys. 1.8a). Inne czynniki związane z PO, które należy uwzględnić przy obróbce szybkościowej to jego geometria (głębokie kieszenie, występowanie cienkich ścianek itp.) oraz sposób zamocowania (pomimo, że siły skrawania są zmniejszone, mocowanie powinno być stabilne, eliminujące lub istotnie zmniejszające możliwość powstawania drgań);



Rys. 1.7. Czynniki determinujące HSM [28]

- narzędzie – właściwy dobór geometrii oraz powłok narzędziowych do obróbki określonych grup materiałów, co wpływa na bardziej stabilną pracę narzędzia oraz jego trwałość [49, 50]. Geometria narzędzia powinna zapewniać właściwe formowanie wiórów oraz ułatwiać ich usuwanie ze strefy obróbki. Istotna jest również duża dokładność ruchu obrotowego oraz wyrównoważenie zarówno narzędzia jak i uchwytu narzędziowego. Narzędzie powinno posiadać odpowiednio dużą sztywność, a oprawka musi zapewnić stabilne jego zamocowanie (precyzyjne uchwyty hydrauliczne lub termokurczowe). Należy również stosować dokładne i pewne mocowanie oprawki we wrzecionie co zapewniają podwójne stożki narzędziowe typu HSK;
- maszyna – powinny ją cechować: wysoka sztywność, prędkość obrotowa i moc wrzeciona, dokładność przemieszczeń oraz ruchu obrotowego wrzeciona, odpowiednia dynamika pracy, zapewniająca wysokie prędkości posuwu oraz przyspieszenia i opóźnienia, sterowanie zapewniające przeliczanie przemieszczeń z wyprzedzeniem;
- łańcuch procesu technologicznego – zastosowana metoda obróbki (rys. 1.8b), dobór właściwej strategii obróbki, stosowanie nowoczesnego oprogramowania

CAM, wybór między obróbką z zastosowaniem cieczy chłodząco-smarującej (dobór odpowiedniego składu i stężenia czynnika chłodzącego), a obróbką na sucho lub z minimalnym smarowaniem MQL.

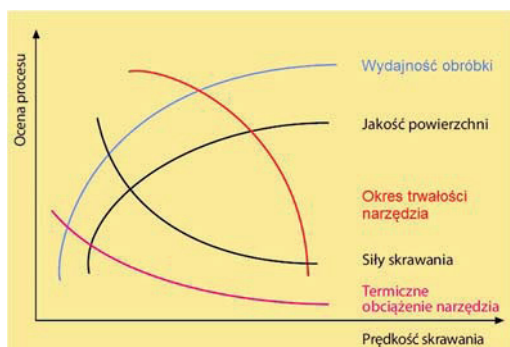


Rys. 1.8. Porównanie zakresów prędkości skrawania v_c dla obróbki konwencjonalnej i HSC, w zależności od: a) rodzaju materiału obrabianego, b) sposobu skrawania [16, 28]

Główne zalety obróbki HSC to [28, 47, 65, 67–69, 71, 77]:

- zwiększenie wydajności (średnio o 30%), co pozwala na skrócenie czasu obróbki;
- wysoka jakość powierzchni obrobionej;
- możliwość obróbki materiałów hartowanych;
- zmniejszone siły skrawania o ponad 30%;
- małe siły skrawania umożliwiające zmniejszenie siły mocowania, co upraszcza oprzyrządowanie;
- zwiększona stabilność procesu, minimalizacja drgań;
- mniejsze obciążenia termiczne narzędzia i przedmiotu obrabianego, większość powstającego ciepła jest przejmowana przez wióry, które w wyniku małych dosuwów (głębokość i szerokość skrawania) oraz małego kąta styku narzędzia z PO (rys.1.12a), mają bardzo małe przekroje;
- mniejsze wymiary wiórów, co ułatwia ich usuwanie ze strefy skrawania;
- ograniczenie tworzenia zadziorów.

Na rys.1.9 przedstawiono wpływ wzrostu prędkości skrawania przy obróbce HSC na niektóre zjawiska towarzyszące procesowi skrawania.



Rys. 1.9. Wpływ wzrostu prędkości skrawania na zmiany zjawisk towarzyszących procesowi obróbki [28, 71]

Główne zastosowania obróbki HSC [28, 47, 65, 67–69, 71, 77]:

- wysokowydajna obróbka złożonych, cienkościennych konstrukcji (rys.1.1), wykonywanych ze stopów aluminium, głównie w przemyśle lotniczym – jest to możliwe dzięki minimalizacji sił skrawania, drgań oraz odkształceń cieplnych;
- kompleksowa obróbka elementów „na gotowo” z półfabrykatów obrobionych cieplnie na ostateczną twardość – obróbka form i matryc z wydajnością i jakością znacznie wyższą niż przy stosowaniu EDM. Uzyskiwanie bardzo dobrej jakości powierzchni oraz dokładności kształtu, ogranicza konieczność stosowania obróbki wykończeniowej takiej jak szlifowanie czy polerowanie;
- obróbka super stopów tytanu, niklu oraz stali żaroodpornych – głównie w przemyśle lotniczym.

1.2.2. Charakterystyka obróbki HPC

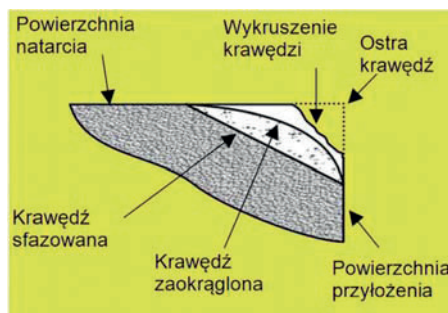
HPC jest metodą obróbki, której głównym celem jest zwiększenie wydajności ubytkowej, tj. objętości materiału usuwanego w jednostce czasu. Uzyskuje się to stosując większe, niż w obróbce konwencjonalnej, prędkości skrawania i przekroje warstwy skrawanej [16, 67, 69]. HPC obejmuje również skrócenie czasów pomocniczych przez zwiększenie prędkości pozycjonowania oraz zmniejszenie czasów wymiany narzędzi. Jednak głównym sposobem poprawy wydajności dla obróbki HPC jest zwiększenie przekroju warstwy skrawanej (głębokość i szerokość skrawania) oraz posuwu. Jest to możliwe również dla małych prędkości skrawania [28].

Stosowanie większych głębokości i szerokości skrawania zwiększa kąt styku narzędzia z przedmiotem obrabianym (rys.1.12b), co powoduje silne nagrzewanie ostrzy oraz utrudnia ich chłodzenie, a w konsekwencji prowadzi do przeciążenia termicznego. Wymusza to obniżenie prędkości skrawania [16, 67, 69].

Obróbka HPC ze względu na zwiększone przekroje warstwy skrawanej, wymaga optymalizacji współdziałania narzędzi oraz obrabiarki (wrzeciona głównego i napędów posuwowych). Dla uzyskania maksymalnej wydajności konieczne jest

pełne wykorzystanie mocy wrzeciona. Stosowane w obrabiarkach do HPC wrzeciona posiadają prędkości obrotowe w zakresie 10 000–20 000 obr/min i moc przynajmniej 60kW, a niekiedy nawet powyżej 100kW [13, 54].

Zwiększenie posuwu oraz wymiarów warstwy skrawanej powoduje zwiększenie sił skrawania, obciążeń cieplnych narzędzia oraz przekrojów wióra. Wymaga to zastosowania narzędzi przystosowanych do przenoszenia większych sił skrawania [28]. Na poprawę trwałości oraz odporności cieplnej narzędzi decydujący wpływ mają zastosowane powłoki narzędziowe. Właściwości poślizgowe powłok, wraz z odpowiednią geometrią narzędzi ułatwiają formowanie wióra oraz jego eksportowanie ze strefy obróbki, co ze względu na bardzo duże objętości usuwanego materiału jest szczególnie istotna dla obróbki HPC [68]. Oprócz makrogeometrii narzędzia istotne znaczenie ma również mikrogeometria. Stosowanie jak najmniejszych promieni zaokrąglenia krawędzi skrawającej ułatwia dekohezję materiału. Jednak zbyt ostre krawędzie skrawające ulegają szybkiemu zużyciu, co powoduje silniejsze spęczanie wiórów oraz wzrost temperatury skrawania i nacisku na ostrze. W konsekwencji następuje wzrost siły skrawania, a w szczególności siły normalnej, co prowadzi do zwiększonego zużycia. W celu ograniczenia tego zjawiska stosuje się niewielkie fazowania lub zaokrąglenia krawędzi skrawającej (rys.1.10) [13].



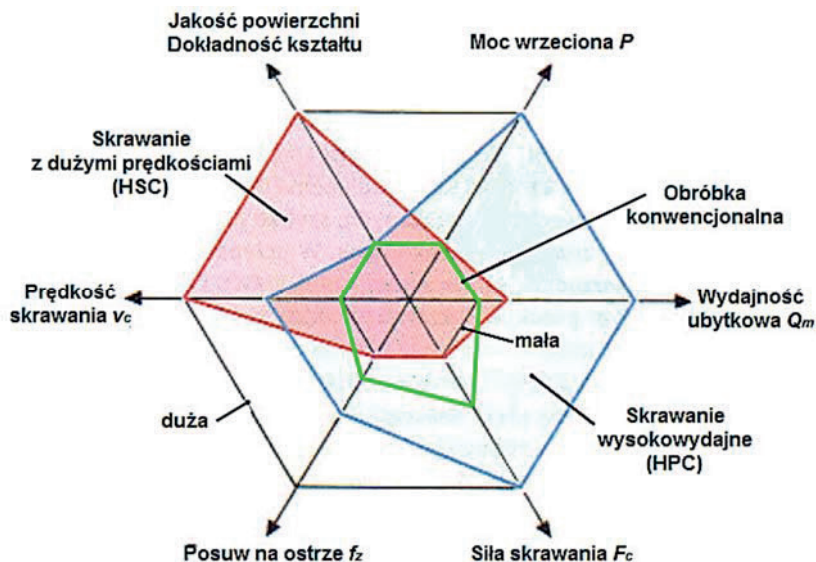
Rys. 1.10. Ukształtowanie krawędzi skrawającej narzędzia [13]

Wadą obróbki HPC jest to, że przy obróbce głębokich kieszeni o cienkich ściankach, narzędziami o krytycznym ilorazie średnicy do długości, dochodzi często do niestabilności procesu [13]. Między innymi z tego powodu HPC stosuje się głównie jako obróbkę zgrubną i kształtującą [71].

1.2.3. Porównanie obróbki HSC, HPC i konwencjonalnej

Uwzględniając właściwości obróbki HSC i HPC, opisane we wcześniejszych rozdziałach, można stwierdzić, że w stosunku do obróbki konwencjonalnej, HSC jest obróbką z dużymi prędkościami skrawania i małymi przekrojami warstwy skrawanej. Natomiast obróbka HPC wykorzystuje średnie prędkości skrawania, przy znacząco większych dosuwach osiowych i promieniowych (głębokości

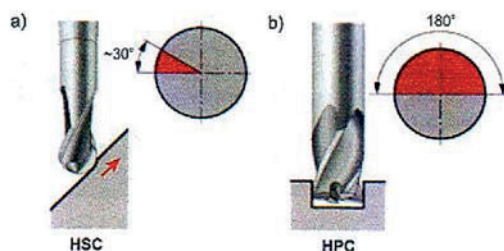
i szerokości skrawania), oraz posuwach na ostrze, przez to uzyskiwana jakość powierzchni w stosunku to HSC jest gorsza (rys.1.11).



Rys. 1.11. Porównanie obróbki konwencjonalnej z obróbkami HSC i HPC [16, 67, 69]

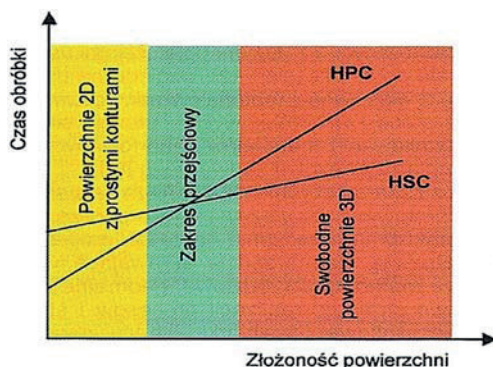
Zatem HPC można traktować jako obróbkę zgrubną lub półwykończeniową, natomiast HSC jako obróbkę wykończeniową, przy czym granica między obydwoema metodami obróbki jest płynna. Na przykład przy obróbce materiałów twardych, w wyniku zwiększonego zużycia narzędzi podczas frezowania HPC, konieczne może okazać się zmniejszenie zarówno posuwu jak i dosuwu. Ogranicza to wydajności ubytkową, co prowadzi do sytuacji, w której HSC, ze względu na czas obróbki, będzie bardziej wydajne od HPC [16, 67, 69].

Głównym powodem różnicowania parametrów skrawania HSC i HPC są odmienne warunki styku ostrzy narzędzi (rys.1.12). Zwiększone kąty styku dla obróbki HPC, dochodzące do 180° (rys.1.12b), przy skrawaniu „całą średnicą” narzędzia, powodują bardzo silne nagrzanie ostrzy narzędzia. Przy krótkiej fazie chłodzenia ostrza narzędzia ulegałyby szybkiemu przeciążeniu termicznemu. Dlatego stosuje się zmniejszone prędkości skrawania w stosunku do HSC, dla którego kąty styku narzędzia z PO są mniejsze (rys.1.12a), a tym samym ostrza mają dłuższy czas na ochłodzenie się. Oczywiście dla obydwu technik obróbki, prędkości skrawania i posuwu zależą przede wszystkim od rodzaju materiału obrabianego [67, 69].



Rys. 1.12. Warunki styku ostrzy narzędzi z przedmiotem obrabianym [67, 69]

HSM ze względu na uzyskiwaną wysoką dokładność kształtu oraz jakość powierzchni, przy małych siłach skrawania i wysokiej stabilności procesu skrawania, preferowane jest do obróbki złożonych geometrii 3D, konstrukcji kieszeniowych o cienkich ściankach i małych grubościach den (rys.1.13). Natomiast HPC z dużą wydajnością, przy niekoniecznie wysokiej dokładności obróbki, stosowane jest głównie do obróbki 2D elementów o prostej geometrii lub do obróbki zgrubnej, w której występują proste ruchy kształtowania [68].



Rys. 1.13. Wybór obróbki HSC lub HPC w zależności od stopnia złożoności [68]

Ważnym aspektem obróbki HPC i HSC jest właściwy dobór narzędzi. Muszą one wytrzymywać zwiększone siły skrawania występujące zwłaszcza przy obróbce HPC, jak również większe siły bezwładności, przy obróbce HSC [28]. Duże prędkości obrotowe, stosowane w HSC, wymagają stosowania precyzyjnie wyważonych uchwytów i narzędzi. Dla tej technologii obróbki stosowane są najczęściej narzędzia monolityczne lub narzędzia z wkładkami na stałe łączonymi z korpusem, rzadziej są to narzędzia składane. Jednymi z najczęściej stosowanych narzędzi w obróbce HSC są frezy trzpieniowe monolityczne (węglikowe, spiekane z proszków stali szybko tnących, itp.) lub z wlutowanymi wkładkami np. z PKD. Stosuje się frezy o średnicach nie większych niż 50 mm [54, 69]. Narzędzia monolityczne stosowane są również w obróbce HPC, jednak z uwagi na dążenie do maksymalizacji wydajności ubytkowej, dla tej techniki dominujące znaczenia ma stosowanie narzędzi składanych np. frezów czy głowic frezarskich.

Techniki obróbki HSC i HPC, dzięki stosowaniu coraz nowszych materiałów narzędziowych oraz konstrukcji narzędzi jak również rozwojowi konstrukcji obrabiarek, systemów sterowania oraz oprogramowania CAM, są w chwili obecnej jednymi z najszybciej rozwijających się metod obróbki ubytkowej [71].

1.3. Specyfika obróbki ubytkowej stopów aluminium

Stopy aluminium (poza niektórymi gatunkami) charakteryzują się dobrą skrawalnością, różni się ona jednak od skrawalności innych metali. Wymaga to stosowania odmiennych warunków obróbki niż dla stali, żeliwa czy mosiądzu. Wynika to z właściwości stopów aluminium, takich jak [25, 78]:

- duży współczynnik rozszerzalności liniowej (dla stali współczynnik ten jest dwukrotnie mniejszy) – należy to uwzględnić tam gdzie wymagana jest duża dokładność wymiarowa, niezbędne jest stosowanie obfitego chłodzenia;
- mały współczynnik sprężystości wzdłużnej (ok. trzykrotnie mniejszy niż dla stali) – jest przyczyną odkształcenia przedmiotu w trakcie intensywnie przeprowadzanej obróbki, jak również odkształceń wynikającego z zamocowania przedmiotu;
- duża przewodność cieplna – przyczynia się do szybszego odprowadzenia ciepła z ostrza narzędzia i obniżenia jego temperatury, co zwiększa jego trwałość.

Istnieje bardzo wiele gatunków stopów aluminium (patrz rozdział 1.4), dlatego dla ułatwienia doboru warunków obróbki, podzielono je na grupy o zbliżonej skrawalności. Jednym z kryteriów podziału jest zawartość krzemu w stopie [25, 78, 90]:

- grupa I – stopy o zawartości $Si \leq 2\%$,
- grupa II – stopy o zawartości $2\% < Si \leq 12\%$,
- grupa III – stopy o zawartości $Si > 12\%$.

Podział ten nie jest zbyt doskonały, gdyż nie uwzględnia przeprowadzonej obróbki cieplnej oraz przeznaczenia stopów (do obróbki plastycznej i odlewniczej), co ma decydujący wpływ na strukturę oraz skrawalność stopów aluminium. Po uwzględnieniu powyższego podziału oraz rodzaju obróbki cieplnej i przeznaczenia stopów aluminium można dokonać następującej ich klasyfikacji [66, 69]:

- grupa I – czyste aluminium i niskostopowe materiały do obróbki plastycznej,
- grupa II – umacniane zgniotem (o tzw. naturalnej twardości) lub uwodzone wydzieleniowo materiały do obróbki plastycznej oraz stopy odlewnicze ze stężeniem $Si < 12\%$,
- grupa III – stopy odlewnicze ze stężeniem $Si > 12\%$.

Można zatem stwierdzić, że skrawalność stopów aluminium zależy przede wszystkim od składu chemicznego i struktury stopu (stanu materiału), która wiąże się ściśle z przeprowadzoną obróbką cieplną.

Zawartość krzemu w stopach aluminium w ilości 10-12% stanowi istotną granicę wskazującą na ich skrawalność. Powyżej tej zawartości Si, czyli dla stopów grupy III, podczas skrawania w wyniku silnego oddziaływania ściernego pierwotnych wydzielen krzemu, występuje zwiększone zużycie ostrzy narzędzi. Dlatego stopy te są głównie obrabiane ostrzami z węglików spiekanych lub z polikrystalicznego diamentu (PKD). Przy obróbce materiałów tej grupy bardzo istotne znaczenie ma dobór i zastosowanie właściwych cieczy obróbkowych, które mają na celu spłukanie bardzo dużej ilości drobnego „ścieru” krzemowego, powstającego podczas skrawania [66, 69].

Stopy aluminium z grupy I przy niewielkiej twardości, dużej ciągliwości i adhezji do materiału narzędziowego oraz podatności do umacniania zgniotem, wykazują szczególną skłonność, przy małych prędkościach skrawania, do „mazania się” oraz tworzenia narostu na powierzchni natarcia ostrza, co pogarsza jakość powierzchni obrobionej. Podczas ich obróbki należy stosować ostre narzędzia oraz duże prędkości skrawania. Stosowane ciecze obróbkowe, w celu zmniejszenia adhezji oraz ułatwienia formowania i odprowadzania wiórów, powinny zapewniać intensywne smarowanie [40, 66, 69].

Najlepszą skrawalnością charakteryzują się obrabiane cieplnie stopy aluminium grupy II. Mają one lepszą skrawalność (mniejszą tendencję do „mazania się”) od stopów w stanie naturalnej twardości, przy nieco mniejszej trwałości ostrza. Stopy odlewnicze o zawartości Si<12%, zaliczane do tej grupy, przy jednakowym składzie chemicznym i stanie materiału są lepiej skrawalne niż odpowiednie stopy do obróbki plastycznej. Ma na to wpływ struktura odlewu ułatwiająca łamanie wiórów [40, 66, 69].

Przy doborze parametrów skrawania dla obrabianych cieplnie przez utwardzanie wydzieleniowe stopów aluminium do obróbki plastycznej należy pamiętać, że ich wytrzymałość spada ze wzrostem temperatury. Warunki obróbki powinny być tak dobrane aby temperatura skrawania nie zbliżyła się do temperatury rekrytalizacji [69].

Do podstawowych problemów technologicznych występujących w procesie skrawania stopów aluminium należy zaliczyć [25, 66, 69, 78]:

- usuwanie wiórów ze strefy skrawania,
- powstawanie narostu na ostrzu narzędzia skrawającego,
- kształtowanie nierówności powierzchni obrabianej,
- zużycie ostrza,
- temperaturę skrawania,
- siły skrawania.

Istotne jest również zwiększanie wydajności obróbki przedmiotów wykonanych ze stopów aluminium. Ma to szczególne znaczenie dla konstrukcji lotniczych, w których elementy wykonane ze stopów aluminium stanowią nawet 80%, a ubytek masy podczas obróbki sięga 97%. W związku z tym pojawiła się konieczność stosowania wysokowydajnych technik obróbki takich jak HSM

czy HPC, szerzej omówionych w rozdziale 1.2. Techniki te ze względu na znaczne zwiększenie wydajności, a więc skrócenie cyklu obróbkowego, są szczególnie przydatne w obróbce stopów aluminium, dla których stają się standardem [16, 69].

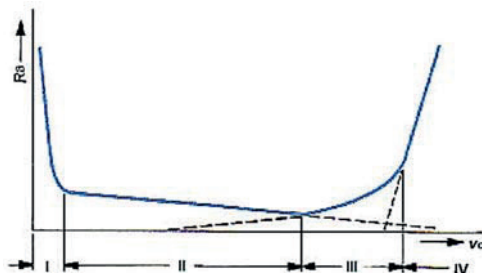
Do oceny skrawalności stosowane są tzw. wskaźniki skrawalności, do których należy zaliczyć: kształt i wielkość wiórów, jakość powierzchni, zużycie narzędzi oraz siły skrawania.

1.3.1. Kształtowanie wiórów

Właściwe kształtowanie i odprowadzanie wióra jest szczególnie istotne w aspekcie stosowania wysokowydajnych metod obróbki takich jak HSC i HPC. Aby ułatwić formowanie wióra oraz jego łamanie należy stosować odpowiednią geometrię narzędzi, tzn. duże kąty natarcia oraz zwijacze, łamacze czy rozdrabniacze wiórów. Przy frezowaniu należy ponadto stosować narzędzia z dużą podziałką tzn. niewielką ilością ostrzy. Dla frezów trzpieniowych walcowo-czołowych są to 2 lub 3 ostrza [13, 47]. Zapewnia to również zwiększenie przestrzeni rowków wiórowych, co z kolei ułatwia usuwanie wiórów. Aby poprawić stabilność obróbki stosuje się frezy o nierównomiernej podziałce ostrzy oraz ze zmienną geometrią krawędzi skrawającej oraz rowka wiórowego [33, 75]. Przyczynia się to do eliminacji drgań powstających w trakcie obróbki z dużymi parametrami skrawania. W celu ograniczenia przywierania materiału obrabianego do ostrza należy stosować narzędzia o dużych kątach natarcia, powlekane lub z polerowaną powierzchnią natarcia. Jest to szczególnie ważne dla materiałów o małej zawartości składników stopowych, które mają znaczną tendencję do powstawania przywar oraz związanego z tym zjawiska narostu. Optymalny kąt natarcia powinien zawierać się w przedziale $12\text{--}25^\circ$ [13, 47]. Stosowanie powłok ochronnych, ze względu na zwiększone zużycie, ma szczególne znaczenie przy obróbce stopów grupy III. Przy obróbce stopów aluminium nie zawierających krzemu lub o małej jego zawartości, zużycie narzędzi jest nieznaczne. Powłoki ochronne stosowane są w tym przypadku w celu zmniejszenia współczynnika tarcia (zwiększenia gładkości powierzchni narzędzia), co ogranicza przywieranie materiału obrabianego do narzędzia, a więc korzystnie wpływa na stabilność i jakość obróbki [13, 50, 68]. Stosowanie powłok może wiązać się ze zwiększeniem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, co ma wpływ na wzrost sił skrawania. Dlatego do obróbki stopów aluminium zaprojektowano specjalne powłoki, o grubości nie przekraczającej kilku mikrometrów, które praktycznie nie zmieniają promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej [10, 50, 75]. Zastosowanie cieczy obróbkowych poprawia proces kształtowania wióra oraz jego odprowadzanie ze strefy obróbki. Polepsza również odprowadzenie ciepła oraz zmniejsza lub nawet eliminuje zjawisko tworzenia się narostu. Szczególnie dobre efekty, przy obróbce aluminium i jego stopów, uzyskuje się przez stosowanie chłodzenia wewnętrznego, przez narzędzie. Wymaga to oczywiście zastosowania narzędzia i obrabiarki o odpowiedniej konstrukcji i możliwościach technologicznych.

1.3.2. Jakość powierzchni

Dla stopów aluminium do obróbki plastycznej można zaobserwować, że polepszenie jakości powierzchni obrobionej uzyskuje się wraz ze wzrostem wytrzymałości i twardości kształtowanego stopu. W przypadku stopów odlewniczych na chropowatość powierzchni może mieć wpływ mikrostruktura tych stopów. W trakcie obróbki twarde cząstki (np. krzemu) znajdujące się w miękkiej osnowie aluminium mogą być wyrywane, co powoduje pogorszenie jakości powierzchni [69].



Rys. 1.14. Zależność parametru Ra od prędkości skrawania v_c [41, 69]

Parametrami technologicznymi najbardziej wpływającymi na jakość powierzchni obrobionej są posuw na ostrze f_z oraz prędkość skrawania v_c . Chropowatość powierzchni na ogół rośnie ze wzrostem posuwu f_z i zmniejsza się wraz ze wzrostem v_c [23, 26, 77]. Przy małych prędkościach skrawania typowe dla aluminium jest zwiększenie skłonności do tworzenia się narostu. Okresowe przywieranie i odrywanie się cząstek aluminium, które osadzają się na powierzchni przyłożenia ostrza (rys.1.15), wpływa na pogorszenie jakości powierzchni. Ze względu na zmiany jakości powierzchni, wraz ze wzrostem prędkości skrawania, operacje obróbkowe można podzielić na cztery odrębne obszary (rys.1.14) [41, 69]:

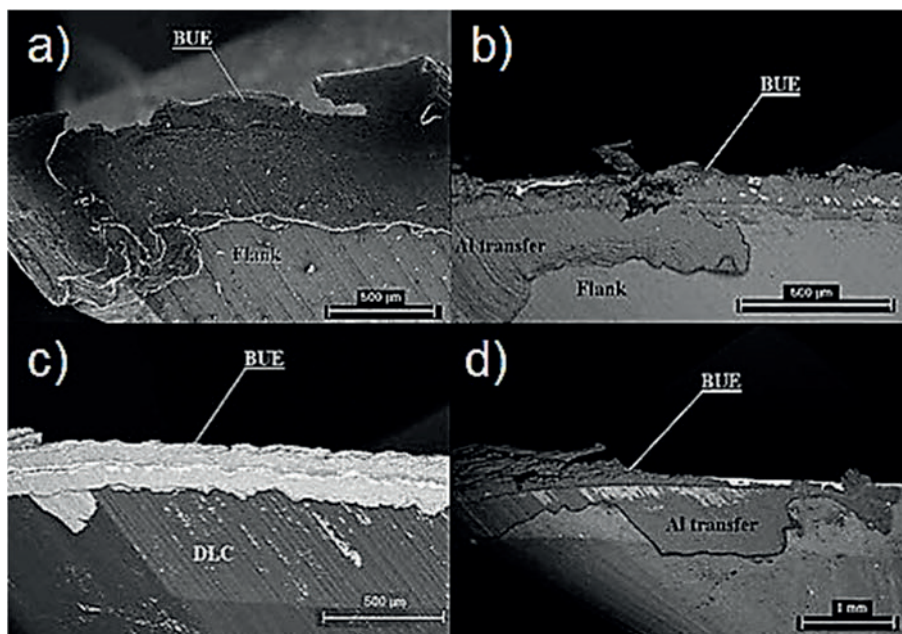
- zakres I – małe prędkości skrawania v_c , sprzyjają tworzeniu się narostów, co powoduje pogorszenie jakości powierzchni, a skrawanie polega w znacznej mierze na rozrywaniu materiału;
- zakres II – obszar najkorzystniejszej prędkości skrawania v_c , w którym wraz z jej wzrostem jakość powierzchni ulega poprawie;
- zakres III – jakość powierzchni pogarsza się w wyniku intensyfikacji drgań i „karbowania” powierzchni obrobionej ostrzem narzędzia. W celu ograniczania tego zjawiska konieczne jest usztywnienie konstrukcji układu obróbkowego;
- zakres IV – niska jakość powierzchni wywołana jest powstawaniem tzw. wiórów pozornych (*virtual chips*). Tworzą się one, w wyniku miejscowego zwiększenia temperatury i efektów tarcia, w postaci ciastowatego materiału wyciskanego na boki ze strefy styku ostrze–przedmiot. Materiał ten przywierając do narzędzia rysuje świeżo obrobioną powierzchnię. Jest to zjawisko charakterystyczne dla skrawania odlewniczych stopów aluminium, przy stosowaniu zużytych narzędzi i dużych prędkości v_c [69].

Na gładkość powierzchni podobnie jak i na proces kształtowania wiórów oraz siły skrawania znaczący wpływ mają właściwości zastosowanych narzędzi skrawających. Duży kąt natarcia i gładka powierzchnia natarcia, sprzyjają łatwemu spływaniu wiórów oraz ograniczają adhezyjne przywieranie aluminium do powierzchni ostrza, co ma decydujący wpływ na jakość obrobionych powierzchni [7, 26].

Istotne znaczenie na poprawę jakości powierzchni, szczególnie przy skrawaniu stopów grupy I, ma sposób chłodzenia. Najlepszą jakość powierzchni uzyskuje się stosując obróbkę z udziałem cieczy chłodząco-smarujących, nieco gorszą dla metody minimalnego smarowania MQL. Najgorszą jakość powierzchni można zaobserwować przy obróbce bez chłodzenia, co jest wynikiem zwiększonej adhezji oraz powstawania narostu [26, 97].

1.3.3. Zużycie narzędzi

Zużycie narzędzi dla stopów aluminium o małej zawartości Si (stopy grupy I) jest spowodowane głównie zjawiskiem dyfuzji, która polega na wnikaniu składników materiału obrabianego do materiału ostrza lub na rozpuszczeniu składników materiału ostrza z warstwy wierzchniej, na skutek czego narzędzie traci swoje pierwotne właściwości skrawne [14, 36, 84]. Na intensywność zjawisk adhezyjnych na ostrzu narzędzia, duży wpływ ma zastosowana powłoka narzędziowa (lub jej brak) [36, 51]. Na rys.1.15 przedstawiono wpływ rodzaju powłoki narzędziowej na intensywność zjawiska powstawania narostu.

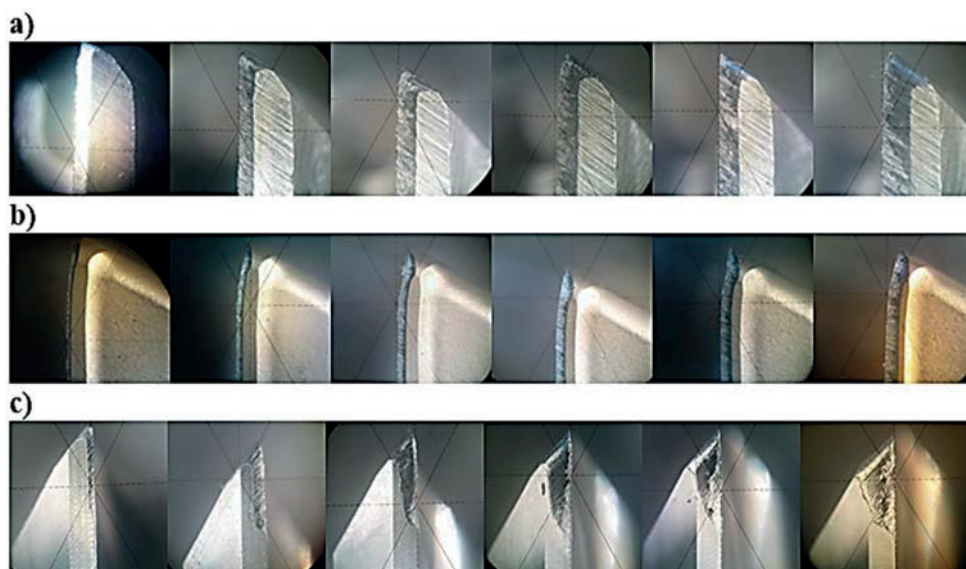


Rys. 1.15. Powstawanie narostu na krawędzi skrawającej: a) ostrze bez powłoki, b) powłoka TiAlCrYN, c) powłoka diamentowa DLC, d) powłoka TiAlN/VN [36]

Oprócz zużycia adhezyjnego zawsze występuje zużycie ściernie, w przypadku obróbki stopów aluminium jest to głównie zużycie powierzchni przyłożenia. Zwiększa się ono wraz ze wzrostem stężenia składników stopowych i zanieczyszczeń [25, 69]. Trwałość ostrza ma szczególnie znaczenie przy obróbce nadeutektycznych odlewniczych stopów aluminium o zawartości $\text{Si} > 12\%$ oraz materiałów kompozytowych [22, 49]. Wynika to z silnych właściwości ściernych:

- w przypadku stopów nadeutektycznych – wydzieleń krzemu,
- w przypadku kompozytów na osnowie aluminium – fazy zbrojącej, którą są najczęściej twarde węgliki krzemu SiC lub tlenki aluminium Al_2O_3 .

Na rys. 1.16 przedstawiono kolejne fazy zużycia ostrzy trzech frezów wykonanych z różnych materiałów podczas obróbki nadeutektycznego stopu AlSi21CuNi (AK20). Silne oddziaływanie ściernie w trakcie obróbki tego stopu wyklucza możliwość stosowania narzędzi z HSS. Również narzędzia węglkowe bez powłok ulegają szybkiemu zużyciu. Zastosowanie powłoki narzędziowej TiN wydłuża możliwy czas obróbki [48, 49]. Wynika stąd, że w celu zwiększenia trwałości ostrza przy obróbce tych materiałów należy stosować odpowiednie powłoki lub narzędzia z ostrzami z PKD.



Rys. 1.16. Kolejne fazy zużycia ostrzy narzędzi: a) frez HSS, b) frez składany z płytką powlekaną TiN , c) frez węglkowy H10F [48]

Szczególnie dobre efekty daje stosowanie powłok diamentowych na podłożu węglkowym, które charakteryzują się gładką, monokrystaliczną strukturą, zapobiegającą tworzeniu narostów i ułatwiającą spływanie wiórów. Podobne efekty (rys. 1.15c) można zaobserwować dla powłoki DLC (*diamond-like carbon*) [7, 36, 55, 69, 70, 82].

1.3.4. Siły skrawania

Głównymi czynnikami wpływającymi na wartość siły skrawania są właściwości materiału obrabianego, parametry warstwy skrawanej, warunki chłodzenia i smarowania oraz konstrukcja i stan zużycia narzędzia [69, 96].

Ciecze chłodziąco-smarujące wpływają w dwojaki sposób na wartość siły skrawania. Z jednej strony obniżają temperaturę w miejscu powstawania wióra (obszarze ścinania), co powoduje wzrost siły skrawania, z drugiej smarowanie obniża skłonność aluminium do przywierania do ostrza narzędzia oraz ułatwia odprowadzanie wiórów i tym samym zmniejsza siłę skrawania. Wpływ tego drugiego zjawiska jest przeważający, dlatego zaleca się stosowanie intensywnego chłodzenia i smarowania strefy obróbki [26, 97].

Istotny wpływ na wielkość i amplitudę sił skrawania, szczególnie przy obróbce stopów grupy I o małej zawartości dodatków stopowych, mają zjawiska adhezyjne. Aby zmniejszyć adhezję, a tym samym zmniejszyć i ustabilizować wartości sił skrawania, konieczne jest stosowanie narzędzi o właściwie dobranej konstrukcji. Z czynników geometrycznych narzędzia na zmniejszenie wartości sił skrawania najbardziej oddziałuje zwiększenie kąta natarcia powodujące mniejsze ściskanie wióra. Należy jednak pamiętać, że zwiększenie tego kąta powoduje zmniejszenie kąta ostrza, a w konsekwencji osłabienie narzędzia [69]. Duże znaczenie ma również stosowanie i rodzaj powłok oraz zużycie krawędzi skrawającej. Stosowanie narzędzi powlekanych oraz z polerowanymi powierzchniami natarcia ułatwia spływanie wiórów, co wpływa na zmniejszenie sił skrawania, z drugiej jednak strony zastosowanie powłok narzędziowych zwiększa promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, co może prowadzić do wzrostu tych sił [26, 50, 97].

Oprócz siły skrawania, która jest miarą stawianego przez dany materiał oporu jaki należy pokonać podczas obróbki, stosowane jest również pojęcie właściwej siły skrawania. Parametr ten wskazuje na konieczny nakład siły w celu usunięcia 1 mm² przekroju poprzecznego warstwy skrawanej danego materiału. Ogólnie w odniesieniu do właściwych sił skrawania, występujących podczas obróbki stopów aluminium można stwierdzić, że [41, 69]:

- poszczególne stopy różnią się wprawdzie właściwymi siłami skrawania, jednakże same różnice są niewielkie,
- można przyjąć, że właściwe siły skrawania występujące przy stopach aluminium stanowią na ogół ok. 10% wartości tych sił w przypadku stali (w odniesieniu do niektórych stopów, np. Al-Si, są większe),
- właściwej siły skrawania nie można określić tylko na podstawie składu chemicznego danego stopu oraz jego właściwości fizycznych, lecz zależy ona także od innych czynników i musi być ustalona doświadczalnie.

1.4. Stopy aluminium i ich właściwości

Aluminium jest metalem o bardzo dużym znaczeniu technicznym. Jest trzecim (po tlenie i krzemie) pierwiastkiem pod względem udziału procentowego

w skorupie ziemskiej oraz drugim z najczęściej stosowanych, po stopach żelaza, metalem. Jego produkcja oraz produkcja jego stopów stale rośnie. Znajdują one coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, szczególnie dotyczy to przemysłu lotniczego i samochodowego.

Aluminium jest pierwiastkiem o liczbie atomowej równej 13 i masie atomowej 26,9815. Krystalizuje w sieci regularnej ściennie centrowanej typu A1 o parametrze 0,40408nm i nie wykazuje odmian alotropowych. Jego temperatura topnienia wynosi 660,37°C, a gęstość jest ok. 3 razy mniejsza niż stali i równa $\rho=2,6989 \text{ g/cm}^3$ w temp. 20°C. Stopy aluminium, w porównaniu ze stalami, cechują się wyższą udurowalnością w niskich temperaturach [25, 69]. Aluminium jest stosunkowo łatwe zarówno do obróbki ubytkowej jak i plastycznej. Dzięki cienkiej warstwie Al_2O_3 , która chroni go przed dalszym utlenianiem, jest odporne na korozję. Cechuje je wysoka przewodność elektryczna oraz dobra przewodność cieplna. Domieszki powodują obniżenie przewodności elektrycznej oraz plastyczności, lecz zwiększają właściwości wytrzymałościowe [17, 20, 69].

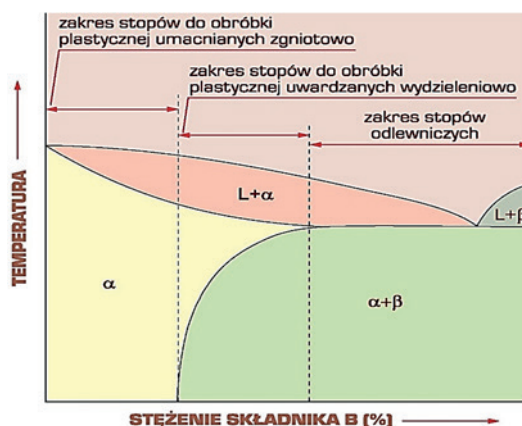
Aluminium i jego stopy są stosowane jako:

- czyste, o zawartości aluminium od 99,0 do 99,99%,
- stopy do obróbki plastycznej,
- stopy odlewnicze.

Niektóre ze stopów mogą być stosowane jako odlewnicze jak i przeznaczone do obróbki plastycznej. Stopy do obróbki plastycznej dzielą się na stopy nie obrabiane cieplnie tzn. w stanie umocnienia zgniotem oraz stopy obrabiane cieplnie poprzez utwardzanie wydzieleniowe. Zawartość pierwiastków stopowych w stopach nie obrabianych cieplnie jest niższa od granicznej rozpuszczalności w aluminium w temperaturze otoczenia (rys.1.17) [17, 20, 69].

1.4.1. Aluminium

Aluminium hutnicze wytwarza się głównie z rud boksytu. W celu uzyskania większej czystości jest ono poddawane rafinacji. Znaczna część wytwarzanego aluminium pochodzi z recyklingu. Według PN-EN 573-3:2005 aluminium może być wytwarzane w 17 gatunkach o stopniu czystości od 99,99 do 99,0% [60]. Sposób oznaczenia gatunków aluminium podano w normach PN-EN 515-1:1996 i PN-EN 573-1:2006 [58, 59]. Czyste technicznie aluminium stosowane jest na przewody elektryczne, urządzenia przemysłu spożywczego, wymienniki ciepła, opakowania artykułów spożywczych czy aparaturę chemiczną [17, 20, 69].



Rys. 1.17. Fragment wykresu równowagi stopów Al do obróbki plastycznej, umacnianych przez zgniot i utwardzanych wydzieleniowo oraz stopów odlewniczych [20]

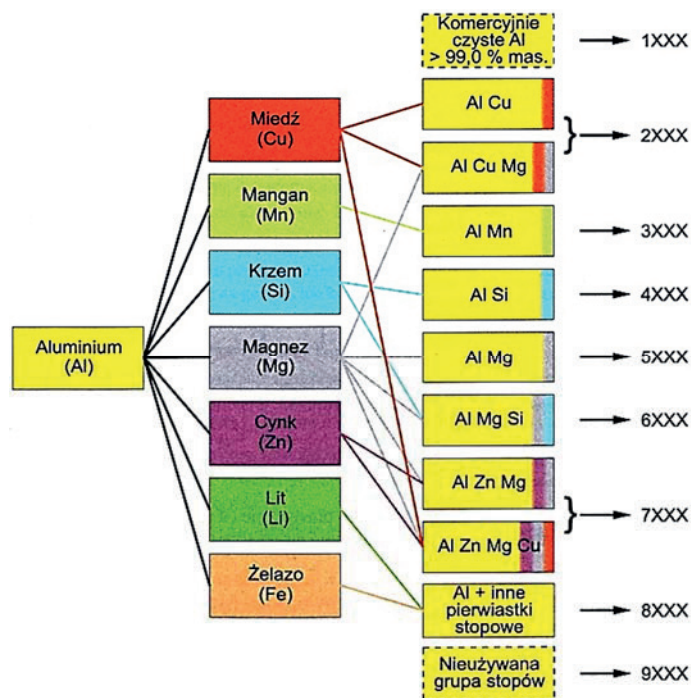
1.4.2. Stopy aluminium do obróbki plastycznej

Stopy do obróbki plastycznej zawierają z reguły do ok. 5–6% pierwiastków stopowych, którymi są najczęściej Cu, Mg, Mn, a także Si, Zn, Ni, Cr, Ti i Li. Klasyfikację stopów aluminium do obróbki plastycznej, ze względu na skład chemiczny przedstawiono na rys.1.18. Stopy te mogą być stosowane bez obróbki cieplnej, w stanie utwardzonym zgniotem lub po obróbce cieplnej polegającej na utwardzaniu wydzieleniowym. Sposób oznaczania stanu aluminium oraz jego stopów w zależności od przeprowadzonej obróbki przedstawiono w tabeli 1.1 [58, 69]. Obrabiane cieplnie są głównie stopy z grup 2, 6 i 7 natomiast stopów z grup 1, 3, 5 i 8 nie obrabia się cieplnie (rys.1.18).

Stopy nie obrabiane cieplnie charakteryzują się dużą plastycznością, a ich właściwości mechaniczne zmieniają się w szerokim zakresie w zależności od składu chemicznego. Pierwotna wytrzymałość tych stopów jest osiągana poprzez utwardzenie wywołane dodatkami stopowymi. Dodatkową wytrzymałość uzyskują dzięki umocnieniu zgniotem w trakcie obróbki plastycznej na zimno. Mogą być dostarczane w stanie wyżarzonym lub umocnionym zgniotem (tabela 1.1) [20, 58, 69].

Stopy obrabiane cieplnie uzyskują wytrzymałość dzięki utwardzaniu wydzieleniowemu, które jest połączeniem przesycania i starzenia. Przesycanie polega na nagraniu stopu do temperatury wyższej o ok. $30\div 50^{\circ}\text{C}$ od temperatury granicznej rozpuszczalności, w celu rozpuszczenia faz międzymetalicznych, wygrzaniu w tej temperaturze i po szybkim chłodzeniu zatrzymaniu rozpuszczonych składników w roztworze stałym przesyconym. W trakcie starzenia uprzednio przesycony stop przetrzymywany jest w temperaturze otoczenia (starzenie naturalne) lub w temperaturze podwyższonej (starzenie sztuczne), lecz niższej od temperatury granicznej rozpuszczalności, co prowadzi do wydzielania w przesyconym roztworze twardych i kruchych faz międzymetalicznych związk-

szających twardość i wytrzymałość stopu przy jednoczesnym obniżeniu plastyczności [20, 69]. Sposób oznaczania stopów aluminium do obróbki plastycznej opisany jest w normach PN-EN 515-1:1996 i PN-EN 573-1:2006 [58, 59].



Rys. 1.18. Podział stopów aluminium do obróbki plastycznej [60, 69]

Poniżej omówiono podstawowe właściwości i zastosowania grup stopów aluminium do obróbki plastycznej spośród, których wybrano materiały do badań [20, 45, 69, 79]:

- **Stopy aluminium z magnezem i krzemem (grupa 6xxx)**

W stopach Al-Mg-Si w celu utworzenia Mg_2Si , ułatwiającego utwardzenie wydzieleniowe, stosuje się dodatek Mg i Si w proporcji 1,73:1 lub o większym stężeniu Si. Stopy ze zwiększoną zawartością Si są lepiej utwardzane wydzieleniowo, przy zmniejszonej plastyczności. Stopy te, przy umiarkowanej wytrzymałości, charakteryzują się dobrą odpornością na korozję, spawalnością oraz odpornością na pękanie wywołane korozją naprężeniową. Stosuje się je głównie do wykonywania wyprasek oraz odkuwek dla sprzętu transportowego, rowerów, elementów architektonicznych, rzadziej blach czy płyt.

- **Wieloskładnikowe stopy aluminium z cynkiem (grupa 7xxx)**

Stopy Al-Zn, zawierające Mg i Cu nazywane *duralami cynkowymi*, wykazują najwyższe właściwości wytrzymałościowe ze wszystkich stopów aluminium. Ograniczenie ich stosowania jest związane z małą odpornością na działanie ciepła

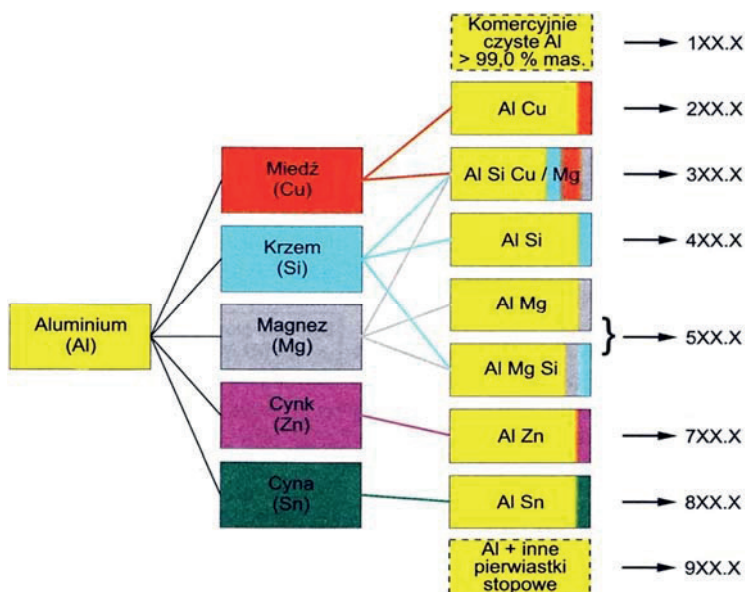
oraz korozję, w szczególności naprężeniową. Są wytwarzane w postaci blach, prętów, odkuwek i kształtowników. Stosowane są do wytwarzania różnych elementów maszyn, pojazdów mechanicznych, taboru kolejowego, a także elementów konstrukcji lotniczych.

Tabela 1.1. System oznaczania stanu stopów aluminium [20, 58, 69]

Ozna- czenie	Stan podstawowy wyrobu
F	Surowy , wytworzony bez specjalnej kontroli warunków cieplnych lub umocnienia
O	Wyżarzony w celu osiągnięcia najniższej wytrzymałości: O1 - wyżarzony w wysokiej temperaturze i wolno schładzany, O2 - obrobiony cieplno-plastycznie, O3 - ujednorodniony.
H	Umocniony zgniotem przez poddanie obróbce plastycznej na zimno po wyżarzeniu lub po obróbce plastycznej na gorąco, lub kombinacji obróbki plastycznej na zimno i częściowego wyżarzania lub stabilizacji. Pierwsza cyfra po literze H określa kombinację operacji: H1x - umocniony wyłącznie zgniotem bez dodatkowej obróbki cieplnej, H2x - umocniony zgniotem powyżej założonej wytrzymałości i wyżarzony do założonej wytrzymałości, H3x - umocniony zgniotem i stabilizowany przez obróbkę cieplną w niskiej temperaturze. Druga cyfra po literze H wskazuje końcowy stopień umocnienia identyfikowany minimalną wytrzymałością na rozciąganie: Hx2 - wytrzymałość na rozciąganie w przybliżeniu w połowie między stanem O i stanem Hx4 (1/4 twardości), Hx4 - wytrzymałość na rozciąganie w przybliżeniu między stanem O i Hx8 (1/2 twardości), Hx6 - wytrzymałość na rozciąganie w przybliżeniu w połowie między stanem Hx4 i Hx8 (3/4 twardości), Hx8 - stan pełnej twardości, określany na podstawie minimalnej wytrzymałości na rozciąganie stopu w stanie wyżarzonym. Cyfry 1, 3, 5, 7 oznaczają stany pośrednie.
W	Przesycony - stosowany do stopów, które po przesyceniu są samoczynnie (naturalnie) starzone w temperaturze pokojowej
T	Obrobiony cieplnie do uzyskania stabilnych stanów innych niż F, O lub H. T1 - schłodzony z podwyższonej temperatury procesu kształtowania i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu; zwykle kojarzony z wyrobami wyciskany i ograniczony do stopów grupy 6xxx, T2 - schłodzony z podwyższonej temperatury procesu kształtowania, odkształcony na zimno i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu; zwykle kojarzony z odlewami, T3 - przesyceny, odkształcony na zimno i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu, T4 - przesyceny i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu, T5 - schłodzony z podwyższonej temperatury procesu kształtowania, a następnie sztucznie starzony; zwykle kojarzony z wyrobami wciskany z grupy 6xxx, T6 - przesyceny a następnie sztucznie starzony, T7 - przesyceny i przestarzony/stabilizowany, T8 - przesyceny, odkształcony na zimno i sztucznie starzony, T9 - przesyceny, sztucznie starzony i odkształcony na zimno, T10 - schłodzony z podwyższonej temperatury procesu kształtowania, odkształcony na zimno i sztucznie starzony.

1.4.3. Odlewnicze stopy aluminium

Odlewnicze stopy aluminium zawierają duże stężenie (od 5 do 25%) pierwiastków stopowych, głównie Cu, Si, Mg, Zn i Sn (rys.1.19). Są to przeważnie stopy wieloskładnikowe, charakteryzujące się dobrą lejnością, wypełnieniem formy oraz często małym skurczem odlewniczym. Niekiedy stosuje się do odlewania stopy zawierające mniej niż 5% pierwiastków stopowych. Klasyfikację odlewniczych stopów aluminium przedstawiono na rys.1.19.



Rys. 1.19. Podział odlewniczych stopów aluminium [69]

Sposób oznaczania stopów odlewniczych opisany jest w normach PN-EN 1780-1:2004 i PN-EN 1780-2:2004 [62, 63].

Poniżej omówiono podstawowe właściwości i zastosowania grupy odlewniczych stopów aluminium spośród, których wybrano materiał do badań [20, 45, 69, 79]:

- **Stopy aluminium z krzemem (grupa 4xx.x)**

Odlewnicze stopy Al-Si, zwane *siluminami*, zawierające 2÷30% krzemu charakteryzują się dobrą lejnością, małym skurczem odlewniczym, wysoką odpornością na korozję, podwyższoną temperaturę oraz ścieranie. Siluminy o składzie eutektycznym (ok. 12,6% Si) posiadają bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe i odlewnicze oraz nie wykazują skłonności do pękania na gorąco. Stosowanie dodatków takich jak Cu, Mg i Mn zwiększa ich wytrzymałość. Są stosowane m.in. na tłoki i głowice silników spalinowych oraz silnie obciążone elementy dla przemysłu okrętowego i elektrycznego, eksploatowane w podwyższonej temperaturze i w wodzie morskiej.

1.5. Stabilność procesu frezowania

Z punktu widzenia oddziaływania na układ masowo-sprężysto-tłumiący (MST), w obróbce skrawaniem można wyróżnić trzy rodzaje drgań: swobodne, wymuszone i samowzbudne. Drgania te można w sposób ogólny opisać równaniem ruchu układu drgającego o jednym stopniu swobody przez porównanie częstotliwości i amplitudy drgań tego układu [31, 40]:

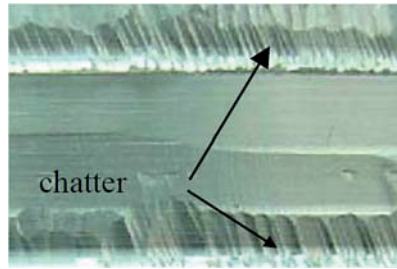
$$m\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) + cx(t) = \begin{cases} 0 & \text{swobodne } \omega = \omega_0, x_0 \rightarrow 0 \\ F(t) & \text{wymuszone } \omega = \omega_F, x_0 = \text{const} \\ F[x(t)] & \text{samowzbudne } \omega \approx \omega_0, x_0 \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1.1)$$

gdzie: m - masa układu drgającego [kg],
 k - współczynnik tłumienia [Ns/m],
 c - współczynnik sztywności [N/m],
 ω - częstotliwość drgań [rd/s],
 ω_0 - częstotliwość drgań własnych [rd/s],
 ω_F - częstotliwość siły wymuszającej [rad/s],
 x_0 - amplituda drgań.

Drgania swobodne występują, gdy na układ nie działa żadna siła, a jego równowaga została zakłócona przejściowo. Drgania swobodne rzadko występują w obróbce skrawaniem [31, 40].

Drgania wymuszone występują wtedy, gdy na układ działa zewnętrzna, zmienna siła wymuszająca. Jeśli to wymuszenie trwa odpowiednio długo częstotliwość drgań jest równa częstotliwości siły wymuszającej. W obróbce skrawaniem drgania wymuszone występują dość często, np. przy frezowaniu. Mogą być także spowodowane przez drgania innych maszyn przenoszone przez podłoże [31, 40].

Drgania samowzbudne występują przy braku siły wymuszającej i są spowodowane utratą stabilności przez układ OUPN. Ich podstawową cechą jest to, że zmienna siła dostarczająca energię do układu jest generowana przez same drgania, co oznacza, że jeśli drgania ustaną, zniknie również siła je podtrzymująca. Tak więc, aby drgania samowzbudne mogły powstać, musi wystąpić sprzężenie zwrotne między drganiami układu MST, a działającą na ten układ siłą. Układ, w którym występują drgania samowzbudne nazywamy niestabilnym. Stabilnością układu nazywamy jego odporność na powstawanie w nim drgań samowzbudnych. Niestabilność procesu frezowania objawia się powstawaniem karbowania (z ang. *chatter*), czyli charakterystycznych nierówności obrobionych powierzchni (rys. 1.20), przy czym efekt karbowania może być wywołany zarówno niestabilnością przedmiotu obrabianego (szczególnie przy obróbce elementów cienkościennych) [12, 15], jak i narzędzia [3, 31, 35, 40, 101].

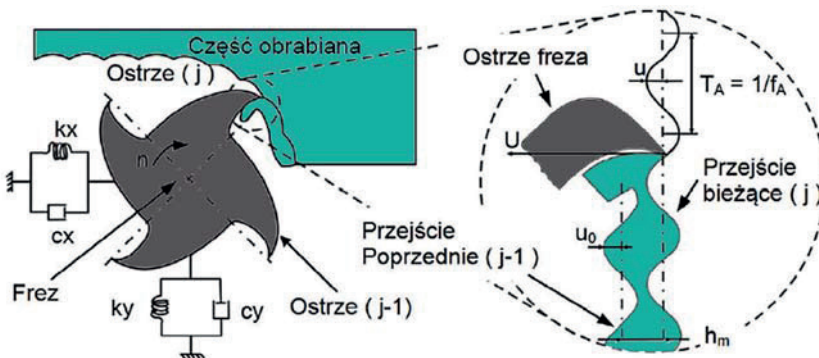


Rys. 1.20. Efekt niestabilnej pracy narzędzia - karbowanie (chatter) [12]

Z wielu przyczyn utraty stabilności w obróbce skrawaniem najistotniejszym wydaje się być tzw. efekt regeneracyjny. W przypadku frezowania, z powodu odchylen ostrza frezu, na obrabianej powierzchni pozostaje falista struktura, w którą wchodzi kolejne ostrze. Jeśli częstotliwość wchodzenia ostrza w materiał f_E nie odpowiada częstotliwości drgań pomiędzy narzędziem i przedmiotem obrabianym (częstotliwości karbowania), to wynikiem jest przesunięcie fazowe pomiędzy kolejnymi ostrzami narzędzia (rys.1.21). Powoduje to duże zmiany grubości warstwy skrawanej, a przez to zmienne siły skrawania, które prowadzą do wzmożonego karbowania. Dla stabilnego procesu frezowania częstotliwość wchodzenia ostrza w materiał f_E , powinna być równa częstotliwości karbowania f_A lub częstotliwość f_E powinna odpowiadać całkowito-liczbowemu stosunkowi częstotliwości drgań karbujących f_A [13]:

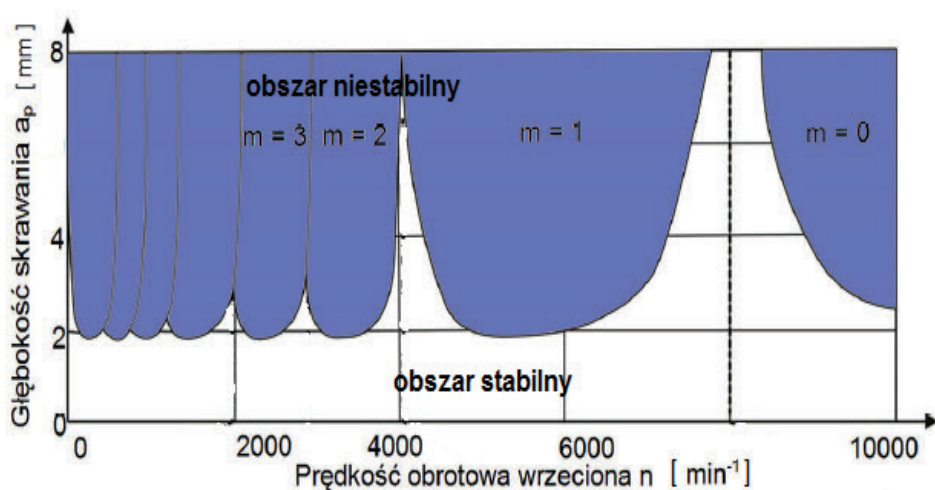
$$f_E = \frac{f_A}{k}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.2)$$

Należy również uwzględnić, że częstotliwość drgań narzędzia może nakładać się na częstotliwość drgań własnych obrabiarki i w ten sposób wzbudzać układ OUPN, można tego uniknąć przez właściwy dobór prędkości obrotowej wrzeciona [13, 31, 39].



Rys. 1.21. Schemat powstawania drgań karbujących [13]

Najistotniejszymi parametrami technologicznymi wpływającymi na stabilność układu są głębokość skrawania a_p oraz prędkość obrotowa n , co jest uwzględnione na wykresach stabilności, które ze względu na swój kształt nazywane są krzywymi workowymi (rys. 1.22). Z wykresów tych wynika, że stabilność można uzyskać zmniejszając głębokość skrawania. Podobny efekt uzyskuje się zmniejszając szerokość skrawania a_e oraz grubość warstwy skrawanej h , przez obniżenie posuwu. Jednak, jedynie pewnym sposobem poprawy stabilności, jest zmniejszenie głębokości skrawania [13, 31, 39].



Rys. 1.22. Przykładowy wykres stabilności – krzywa workowa [13, 85]

Z punktu widzenia narzędzia na stabilność frezowania największy wpływ mają parametry, które decydują o jego sztywności w płaszczyźnie posuwu. Są to m.in.: długość wysięgu narzędzia, jego średnica, kąt pochylenia linii śrubowej oraz kształt i wielkość rowków wiórowych. Szczególnie niekorzystna jest obróbka długimi frezami o małych średnicach, co ma często miejsce przy frezowaniu głębokich cienkościennych konstrukcji kieszeniowych [13, 32, 76].

Do identyfikowania i oceny stabilnych zakresów parametrów frezowania mogą być stosowane różne metody analizy i obliczeń [13, 32]:

- pomiar charakterystyki częstotliwościowej podczas obróbki przy wykorzystaniu czujnika przyspieszenia, który może być umieszczony np. na wrzecionie,
- pomiar charakterystyki częstotliwościowej sił skrawania za pomocą siłomierza,
- analiza akustyczna częstotliwości szumów frezu przy obróbce,
- analiza modalna.

Metody te służą do oceny procesu skrawania, zwłaszcza odpowiedzi na pytanie, czy zmierzone widmo zdominowane jest przez częstotliwość wchodzenia ostrza w materiał (proces stabilny), czy przez częstotliwość drgań układu OUPN (proces niestabilny), w tym przypadku konieczne jest dopasowanie prędkości

obrotowej wrzeciona lub zmniejszenie głębokości skrawania. Metody te pozwalają na wyznaczenie warunków stabilnej pracy przed rozpoczęciem obróbki, jednak aby przeprowadzić obliczenia z ich zastosowaniem konieczne jest uwzględnienie wpływu wielu czynników, takich jak: parametry procesu oraz warstwy skrawanej, geometria narzędzia, właściwości materiałowe przedmiotu obrabianego i narzędzia [13].

Ze względu na dużą prostotę testu oraz krótki czas potrzebny do jego przeprowadzania, co ma decydujące znaczenie w warunkach przemysłowych, szczególnie obiecująca wydaje się ostatnia z metod. Test w analizie modalnej polega na badaniu odpowiedzi układu na impulsowe wymuszenie zadane za pomocą tzw. młotka modalnego. Metodą tą można prognozować zarówno stabilność pracy narzędzia zamocowanego we wrzecionie [1, 2, 11] jak i badać charakterystykę dynamiczną obrabianych elementów [15]. Dodatkową zaletą tej metody jest możliwość, przy zastosowaniu odpowiedniego oprogramowania, wyznaczenia sztywności narzędzia (patrz rozdział 1.6).

Obliczenia stabilności przeprowadzone przy użyciu powyższych metod dostarczają jedynie prognozy rzeczywistego procesu skrawania. W celu jej weryfikacji konieczne jest przeprowadzenie testów praktycznych [13, 32].

1.6. Sztywność narzędzia oraz układu narzędzie–oprawka–wrzeciono

Sztywnością statyczną określamy zdolność elementu konstrukcyjnego do przeciwstawiania się odkształceniom wywołanym obciążeniami mechanicznymi. Dla frezu składowe sztywności można wyrazić wzorami:

$$j_x = \frac{F_x}{\Delta x} \quad j_y = \frac{F_y}{\Delta y} \quad j_z = \frac{F_z}{\Delta z} \quad (1.3)$$

gdzie: j_x, j_y, j_z – sztywność w kierunkach x, y, z,
 F_x, F_y, F_z – składowe siły skrawania w kierunkach x, y, z,
 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – przemieszczenia w kierunkach x, y, z.

Jeżeli na narzędzie działa moment skrawania, sztywność na skręcanie jest określona wzorem:

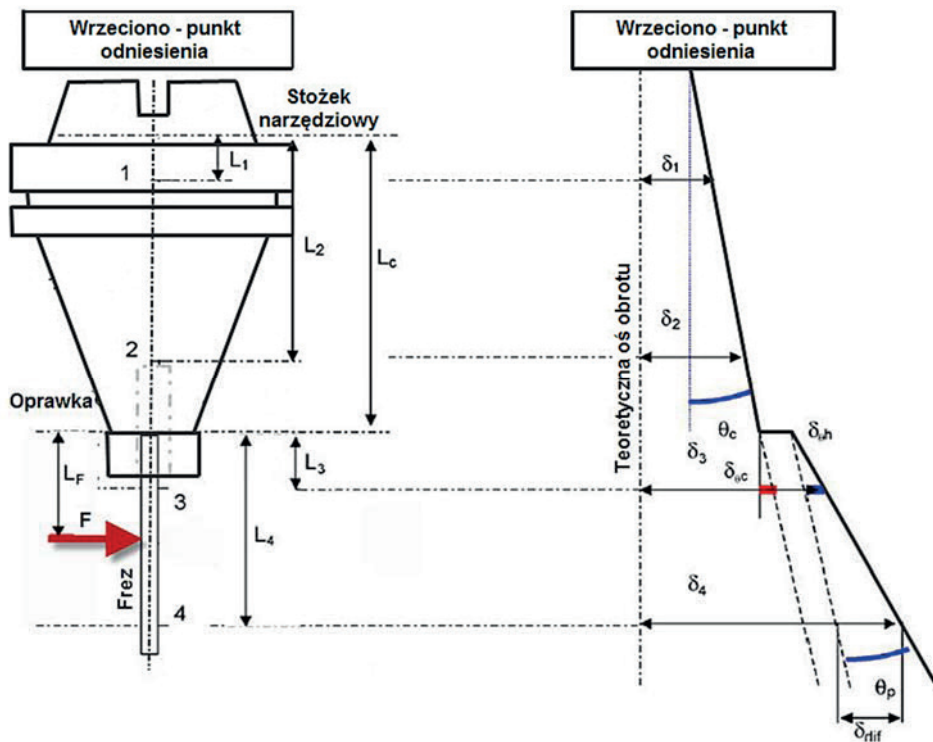
$$j_M = \frac{M_c}{\Delta \varphi} \quad (1.4)$$

gdzie: j_M – sztywność na skręcanie,
 M_c – moment skrawania,
 $\Delta \varphi$ – kąt skręcenia.

Sztywność dynamiczna jest to stosunek amplitudy siły wymuszającej F_0 do amplitudy drgań wymuszonych $|X(j\omega)|$ możemy ją opisać następującą zależnością:

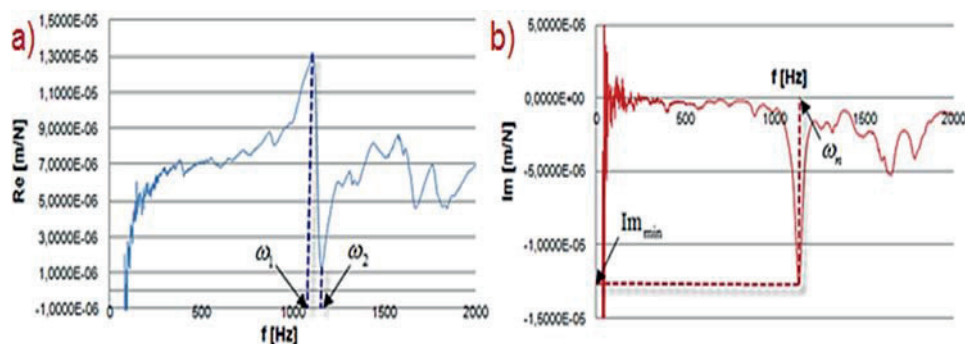
$$C_d = \frac{F_0}{|X(j\omega)|} \quad (1.5)$$

gdzie: C_d – sztywność dynamiczna,
 F_0 – siła wymuszająca,
 $X(j\omega)$ – amplituda drgań wymuszonych.



Rys. 1.23. Odształcenia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono [86]

Wzrost długości wysięgu narzędzia powoduje obniżenie jego sztywności, a tym samym zwiększenie odształceń w trakcie obróbki pod wpływem sił skrawania. Odształceniu ulega jednak nie tylko samo narzędzie lecz cały układ narzędzie-oprawka-wrzeciono (rys.1.23). Trudne byłoby więc wyznaczenie zarówno odształceń jak i sztywności tak skomplikowanego układu. Wyznaczenie sztywności jest możliwe z zastosowaniem analizy modalnej, po odczytaniu odpowiednich danych z wykresów charakterystyk dynamicznych (rys. 1.24), oraz niezbędnych obliczeniach.



Rys. 1.24. Przykładowa odpowiedź układu narzędzie-oprawka-wrzeciono na wymuszenie
a) część rzeczywista, b) część urojona [76]

Współczynnik tłumienia można wyznaczyć z zależności [24]:

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (1.6)$$

gdzie: ζ – współczynnik tłumienia

ω_1 , ω_2 , ω_n – częstotliwości wyznaczone z przebiegów rys.1.24

a następnie sztywność wyznacza się z zależności [24]:

$$j = \frac{-1}{2\zeta \text{Im}_{\min}} [N/m] \quad (1.7)$$

gdzie: j – sztywność

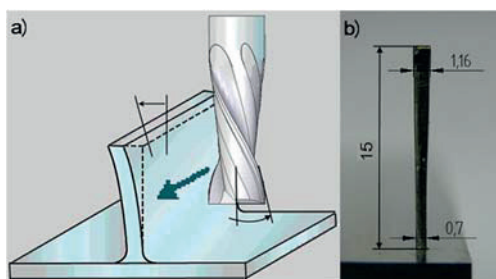
$\text{Im}_{\min}$ – wartość części urojonej odpowiadająca częstotliwości ω_n (rys.1.24b)

W wyniku działania sił skrawania następuje odpychanie narzędzia od przedmiotu obrabianego. W przypadku frezowania będzie to powodowało ugięcie frezu, a w konsekwencji doprowadzi do zmniejszenia dokładności wykonania. W miarę zwiększania wysięgu, w wyniku zmniejszonej sztywności, strzałka ugięcia narzędzia będzie większa co spowoduje powiększenie powstających błędów. Duża sztywność układu OUPN jest szczególnie istotna w aspekcie obróbki wysokowydajnej HSM czy HPC.

1.7. Wybrane elementy strategii obróbki elementów cienkościennych

Cienkościennie konstrukcje kieszeniowe, ze względu na małą masę oraz wysoką sztywność, stosowane są głównie w przemyśle lotniczym. Jako konstrukcje tego typu wykonuje się m.in. elementy kadłubów, podwozi, korpusów

przekładni i elementy nośne pojazdów lotniczych. Głównym problemem w trakcie obróbki skrawaniem tego typu elementów są ich odkształcenia sprężyste i plastyczne. W trakcie frezowania cienkich ścianek, w wyniku odkształceń sprężystych, górna ich część pod naciskiem krawędzi skrawającej ugina się (rys.1.25a). Po zdjęciu obciążenia ścianka sprężystość powraca do pierwotnego położenia i przyjmuje w przekroju poprzecznym charakterystyczny trapezowy zarys (rys.1.25b). Jej grubość jest mniejsza u podstawy i rośnie w kierunku górnej krawędzi ścianki [11, 27, 80–83].

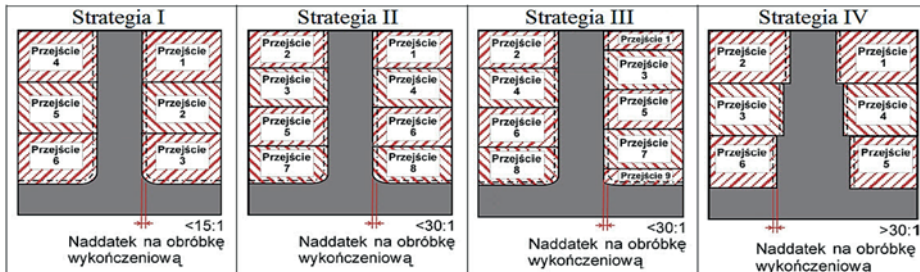


Rys. 1.25. Zjawiska towarzyszące obróbce elementów cienkościennych a) odkształcenie ścianki i narzędzia [10], b) przykładowy zarys ścianki po obróbce

Obróbka wysokich cienkich ścianek narzuca konieczność stosowania narzędzi o znacznych wysięgach i długościach krawędzi skrawającej, co zwiększa odkształcenia w układzie narzędzie–oprawka–wrzeciono. Na dokładność obróbki przedmiotu wpływ mają więc dwa zjawiska tzn. ugięcie ścianki oraz narzędzia (rys.1.25a). W praktyce obydwa te zjawiska nakładają się i w zależności od grubości obrabianej ścianki, wysięgu narzędzia oraz wartości siły skrawania, która dla danego materiału zależy głównie od parametrów obróbki i przekroju warstwy skrawanej, jedno z nich może być dominujące. Odkształcenia sprężyste narzędzia i obrabianej ścianki, oprócz błędów kształtu, mogą wywoływać niestabilność procesu skrawania oraz wpływać na pogorszenie jakości obrabianych powierzchni, o czym wspomniano w rozdziale 1.5. Problemy w trakcie obróbki elementów cienkościennych wymusiły konieczność stosowania specjalnych strategii obróbki oraz narzędzi skrawających. W zależności od stosunku wysokości ścianki do jej grubości, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1.26, można zastosować jedną z czterech strategii obróbki cienkich ścianek [90, 103]:

- Strategia I – oddzielna obróbka każdej ze stron ścianki – mały stosunek wysokości do grubości $<15:1$,
- Strategia II – naprzemienna obróbka obydwu stron ścianki ze stałym poziomem - umiarkowany stosunek wysokości do grubości $<30:1$,
- Strategia III – naprzemienna obróbka obydwu stron ścianki z różnicą poziomów równą $a_p/2$ - umiarkowany stosunek wysokości do grubości $<30:1$,

- Strategia IV – naprzemienna obróbka obydwu stron ścianki ze stałym poziomem i zwiększającą się grubością ścianki w kierunku jej podstawy tzw. strategia „choinki” – wysoki współczynnik wysokości do grubości $>30:1$.



Rys. 1.26. Strategie obróbki cienkich ścianek [90, 103]

Zastosowanie powyższych strategii obróbki, mających na celu zapobieganie deformacjom ścianek przez obniżenie sił skrawania oraz ich usztywnienie, posiada pewne wady:

- wielokrotne przejścia narzędzia wprowadzają dodatkowe naprężenia własne, które mogą mieć znaczący wpływ na powstawanie deformacji obrabianych ścianek,
- wykonywanie kolejnych przejść po wcześniejszych śladach obróbkowych może być przyczyną powstawania efektu regeneracyjnego, a więc utraty stabilności obrabianej ścianki lub narzędzia (patrz rozdział 1.5),
- w trakcie obróbki kolejnych warstw krawędź narzędzia „trze” o wcześniej obróbianą powierzchnię co wpływa na przyspieszenie zużycia narzędzia oraz pogorszenie jakości obrabianej powierzchni.

Powyższe czynniki powodują, że coraz częściej zalecane jest wykonywanie obróbki cienkich ścianek na pełnej wysokości [52, 99]. Wymaga to jednak stosowania narzędzi o odpowiedniej geometrii charakteryzującej się m.in. różną podziałką ostrzy oraz zmiennym lub różnym kątem pochylenia linii śrubowej. Przykłady takich narzędzi przedstawiono na rys. 1.27.



Rys. 1.27. Frezy o różnym kącie pochylenia linii śrubowej [52]

Dzięki różnym kątom wzniosu linii śrubowej następujących po sobie krawędzi skrawających w trakcie obróbki powstają wióry o zmiennym przekroju. Zapewnia to zredukowanie do minimum drgań harmonicznym oraz zmniejszenie sił skrawania, co umożliwia wzrost wydajności procesu obróbki [52]. Oprócz korzyści wynikających z poprawy dokładności geometrycznej obrabianych elementów, zastosowanie tej metody zwiększa wydajność obróbki.

1.8. Dokładność geometryczna przedmiotu

Dokładność jest jednym ze składników oceny jakości przedmiotu i określa stopień jego zgodności z częścią idealną zaprojektowaną przez konstruktora. Pełne osiągnięcie tej zgodności jest niemożliwe i wytworzone elementy różnią się od idealnych. Różnice te są określone wartościami odchyłek. Odchyłka to dodatnia lub ujemna wartość błędu wytwarzania. Różnice wartości górnej i dolnej dopuszczalnej odchyłki stanowią tolerancję wymiaru, kształtu lub położenia. W praktyce dąży się do utrzymania odchyłek w granicach tolerancji wynikających z analizy pracy danej części w podzespole, zespole, mechanizmie czy wyrobie [30, 37].

W produkcji jednostkowej wysoka dokładność wyrobu zależy przede wszystkim od kwalifikacji pracowników produkcyjnych i jest wynikiem uwzględnienia indywidualnych właściwości półfabrykatów, części obrobionych w poprzednich operacjach, odpowiedniego ich ustawienia na obrabiarkach podczas obróbki oraz stopniowego uzyskiwania żądanych wymiarów i dopasowywania przy montażu. W produkcji wielkoseryjnej i masowej, z wykorzystaniem obrabiarek CNC, dokładność wyrobu jest wynikiem właściwego opracowania procesu, doboru obrabiarek i narzędzi, co z kolei wiąże się z kwalifikacjami technologów oraz prawidłowym nastawieniem maszyn [30].

Dokładność części maszyn, określa się cechami takimi jak dokładność wymiaru czy kształtu. Cechy te, uwarunkowane są wpływem różnych czynników przypadkowych i opisuje się je zwykle trzema elementami: rozrzutem R , współrzędną środka AR , rozkładem. Wynika to ze statystycznej oceny dokładności przedmiotów obrabianych [30, 37, 38].

Dokładność geometryczną obrobionych części charakteryzują błędy wymiarów, kształtu i położenia, które w istotny sposób wpływają na prawidłowe funkcjonowanie maszyn oraz jakość montażu. Błędy te powodują powstanie w połączeniach nierównomiernych luzów i wcisków oraz nierównomiernego rozkładu naprężenia, co prowadzi do szybszego zużywania się części i zmniejszenia dokładności współpracy poszczególnych elementów maszyn [30].

W procesie obróbki, występują różnice między założonymi a uzyskanymi wymiarami, kształtem, położeniem oraz jakością obrobionej powierzchni. W przypadku pojedynczego przedmiotu ostateczna odchyłka jest sumą algebraiczną wielu odchyłek składowych związanych z obrabiarką, narzędziem, stosowanymi parametrami obróbki i innymi. W przypadku partii przedmiotów niektóre

składowe odchyłki pozostają stałe, inne zaś ulegają zmianom w sposób systematyczny w ciągu całego czasu trwania procesu. Jeszcze inne odchyłki składowe ulegają trudnym do przewidzenia zmianom przypadkowym.

Występujące podczas obróbki błędy można podzielić na:

- błędy systematyczne stałe,
- błędy systematyczne zmienne,
- błędy przypadkowe.

Zasadniczymi źródłami błędów systematycznych są:

- niedokładność maszyn – wynikająca z błędów związanych z wykonaniem danej obrabiarki, jej ustawieniem na fundamencie oraz eksploatacją; niedokładność ta w miarę upływu czasu zwiększa się;
- niedokładność narzędzi – na powstanie błędu wpływa niedokładność wykonania danego narzędzia (błąd systematyczny stały) oraz jego zużycie podczas eksploatacji (błąd systematyczny zmienny); należy określić czas pracy, po którym narzędzie powinno być zregenerowane lub wymienione ze względu m.in. na zbyt dużą wartość błędu systematycznego przedmiotu obrabianego;
- niedostateczna sztywność układu OUPN – siły pochodzące od oporów skrawania, zamocowania, przyspieszeń i rozłożenia mas będących w ruchu powodują odkształcenia elementów tego układu, co wpływa na dokładność obróbki.
- nagrzewanie się układu OUPN powodujące jego odkształcenia cieplne – istnieją dwa źródła podwyższenia temperatury układu w czasie obróbki: jedno to nagrzewanie się zespołów obrabiarki a drugie zjawiska zachodzące w strefie skrawania takie jak dekohezja materiału, proces kształtowania wióra i towarzyszący mu zgniot, tarcie wióra o powierzchnię natarcia i inne;
- występowanie drgań powodujących zmniejszanie się gładkości powierzchni obrabianej;
- niedokładność ustawienia obrabiarki.

Istnieją jeszcze inne źródła wpływające na powstawanie błędów systematycznych. Należą do nich niedokładności wynikające z zastosowanych środków pomiarowych, skutki eliminacji naprężeń własnych w półfabrykacie itp.

Znaczna liczba odchyłek składowych ulega jednak zmianom w sposób przypadkowy, a więc błędy, które wtedy powstają są błędami przypadkowymi. Do powstawania tych błędów może przyczynić się niejednorodność materiału obrabianego, zmiany wartości naddatku na obróbkę, zmiany właściwości materiału i narzędzia w trakcie obróbki, itp.

Błędy przypadkowe są zwykle wynikiem oddziaływania bardzo wielu nieznanych czynników. Uwidaczniają się, gdy w trakcie obróbki przeprowadzonej w pozornie identycznych warunkach otrzymuje się różne wyniki. Błędy przypadkowe można stopniowo eliminować w miarę poznawania czynników wpływających na ich powstawanie.

W większości przypadków do błędów przypadkowych stosuje się prawa Gaussa. Krzywa rozkładu błędów przypadkowych (krzywa Gaussa lub krzywa normalnego rozkładu) jest określona równaniem:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1.8)$$

gdzie: x – błąd wykonania,
 y – częstość względna występowania wymiaru
z błędem wykonania x (gęstość prawdopodobieństwa),
 σ – odchylenie standardowe,
 e – podstawa logarytmu naturalnego.

Charakter krzywej rozkładu normalnego zależy w dużym stopniu od wartości odchylenia standardowego σ . Małe wartości σ powodują iż rozproszenie błędów obróbki przedmiotów w stosunku do przedmiotu „idealnego” jest niewielkie (krzywa Gaussa jest smukła i bardziej stroma). Dokładność obróbki przedmiotów jest więc duża. Duże wartości σ powodują natomiast, że stopień rozproszenia błędów obróbki przedmiotów w stosunku do przedmiotu „idealnego” jest duży (krzywa Gaussa ma kształt bardziej spłaszczony i jest bardziej rozciągnięta). Dokładność obróbki przedmiotów jest więc niewielka [30, 38].

1.9. Wnioski z analizy piśmiennictwa

Przy obecnym poziomie wiedzy, na temat technologii wytwarzania, frezowanie wydaje się być obróbką najbardziej perspektywiczną, o najszerszym zakresie zastosowania przy jednocześnie bardzo dużej wydajności, co jest istotne ze względów ekonomicznych. O możliwościach rozwoju frezowania świadczą ciągle zwiększająca się liczby zastosowań tej metody obróbki czy też liczba nowych rozwiązań konstrukcyjnych narzędzi wykorzystywanych do frezowania. Stosowane są również nowe, rozwijające się techniki frezowania, które zwiększają jakość i wydajność obróbki, takie jak HSC czy HPC. Zastosowanie tych technik umożliwia, wykorzystanie frezowania w nowych obszarach takich jak obróbka elementów cienkościennych czy materiałów wcześniej utwardzonych. Obróbka z zastosowaniem tych technik jest przedmiotem wielu prac badawczych oraz wdrożeniowych. Wykonanie niektórych elementów części maszyn, ze względów konstrukcyjnych, technologicznych czy ekonomicznych, wyklucza zastosowanie innych metod obróbki poza frezowaniem. Są to na przykład elementy struktur nośnych pojazdów lotniczych wykonane ze stopów aluminium. Złożoność tych konstrukcji wymaga często zastosowania narzędzi o małej sztywności. Dodatkowo są to z reguły elementy posiadające wysokie cienkie ścianki, co przy wymaganej dużej wydajności, następcza wielu problemów z jakością wykonania tego typu konstrukcji. Możliwość poprawy efektów obróbki elementów cienkościennych wykonywanych narzędziami o małej sztywności, przez zastosowanie techniki frezowania ze zwiększonymi prędkościami skrawania, była jednym z powodów podjęcia prac badawczych. Stopy aluminium, zwłaszcza w elementach lotniczych, są jednym

z głównych materiałów konstrukcyjnych, dlatego w pracy skoncentrowano się na ich obróbce. Wszystkie powyższe zagadnienia omówione w części wstępnej były podstawą do sformułowania celów pracy oraz hipotezy badawczej.

W trakcie przeprowadzonej analizy literatury odnaleziono wiele prac charakteryzujących wysokowydajne technik frezowania HSC i HPC. Opisane zalety obróbki HSC pozwoliły przewidywać, że zwiększenie prędkości skrawania pozwoli na zwiększenie dokładności obróbki narzędziami o małej sztywności. Istnieje również znaczna ilość publikacji podejmujących tematykę obróbki narzędziami o dużych wysięgach. Prace te są jednak oparte głównie na badaniach modelowych oraz symulacyjnych i koncentrują się na analizie dynamiki procesu skrawania w celu wyznaczenia stabilnych warunków obróbki. Tylko niektóre z nich zawierają próbę weryfikacji doświadczalnej otrzymanych wyników obliczeń. Nie odnaleziono żadnej prac opisującej wpływ warunków pracy narzędzi o obniżonej sztywności na dokładności geometryczną wykonanych elementów. Również nieliczne publikacje podejmują tematykę obróbki elementów cienkościennych. Uzasadnione wydaje się więc podjęcie próby uzupełnienia „luki” w wiedzy teoretycznej i praktycznej w zakresie dokładności obróbki elementów cienkościennych wykonywanych narzędziami o różnej sztywności.

2. Zakres pracy i hipoteza badawcza

2.1. Cel i zakres pracy

Stopy aluminium, ze względu na ich właściwości mechaniczne oraz fizykochemiczne, należą do materiałów konstrukcyjnych o bardzo dużym znaczeniu technicznym. W porównaniu ze stalami stopy aluminium charakteryzują się znacznie mniejszą masą właściwą, przy porównywalnych wartościach wytrzymałości względnej. W niskiej temperaturze przewyższają właściwości stali pod względem zwiększonej udurowalności. Charakteryzują się również bardzo dobrą odpornością na korozję. Stosunkowo łatwo poddają się obróbce zarówno plastycznej jak i ubytkowej [13, 25]. Wszystkie te cechy powodują, że zastosowanie stopów aluminium w różnych gałęziach przemysłu nieprzerwanie rośnie. Szczególnie dotyczy to przemysłu lotniczego i samochodowego, gdzie procentowy udział tych stopów w produkowanych wyrobach, pomimo stosowania nowych materiałów konstrukcyjnych takich jak kompozyty, stale się zwiększa. Zwiększa się również ilość nowych gatunków stopów aluminium, które posiadają coraz lepsze właściwości mechaniczne, jak stopy z dodatkiem pierwiastków ziem rzadkich. Stopy tego typu posiadają podwyższone właściwości wytrzymałościowe przy jednocześnie obniżonej gęstości, co predysponuje je do wytwarzania elementów nowoczesnych samolotów.

W konstrukcjach lotniczych półfabrykaty ze stopów aluminium mają postać wstępnie obrobionych plastycznie wyprasek lub różnego rodzaju płyt oraz bloków. Ten drugi rodzaj przygotówek jest bardzo często stosowany, ponieważ produkcja ma charakter jednostkowy lub małoseryjny, a wykonywane elementy posiadają z reguły skomplikowaną geometrię. Wyklucza to możliwość stosowania zabiegów obróbki plastycznej ze względu na konieczność stosowania kosztownego oprzyrządowania. Zastosowanie przygotówek w postaci płyt i bloków powoduje konieczność usunięcia znacznej ilości materiału. Ubytek materiału często przekracza 90%. Wymaga to zastosowania wydajnych metod obróbki. Jedną z najbardziej wydajnych i najczęściej stosowanych metod obróbki jest frezowanie. Stosowane jest do obróbki otworów, wgłębień, gwintów przy zachowaniu dużej dokładności geometrycznej oraz bardzo dobrej jakości powierzchni. Umożliwia to zastąpienie frezowaniem czasochłonnych metod obróbki takich jak szlifowanie czy obróbka elektroerozyjna. Przyczynia się więc do poprawy produktywności, a co za tym idzie do obniżenia kosztów produkcji. Wszystkie te cechy frezowania w połączeniu z zastosowaniem nowoczesnych obrabiarek CNC o złożonych ruchach kształtowania oraz systemów CAD/CAM, umożliwiają wykonywanie bardzo skomplikowanych elementów. Wymaga to jednak zastosowania narzędzi i opravek narzędziowych o długim wysięgu i niewielkich średnicach, a więc posiadających małą sztywność. Najczęściej ma to miejsce przy obróbce matryc, wykrojników, form wtryskowych, cienkościennych elementów

konstrukcji lotniczych czy też przy obróbce różnego typu korpusów maszyn i obrabiarek. Niedostateczna sztywność narzędzia, może być przyczyną powstawania drgań samowzbudnych, które niekorzystnie wpływają zarówno na ostrza narzędzi jak i jakość powierzchni oraz dokładność geometryczną obrabianych elementów.

Głównym celem przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz obliczeń numerycznych było określenie wpływu sztywności statycznej frezów trzpieniowych na dokładność geometryczną oraz chropowatość powierzchni elementów cienkościennych w postaci ścian o zróżnicowanej geometrii wykonanych z różnych gatunków stopów aluminium. Konstrukcje z zastosowaniem geometrii cienkościennych są bardzo często spotykane w elementach strukturalnych pojazdów lotniczych. Przemysł lotniczy wymusza wykonywanie tych elementów o coraz mniejszych grubościach ścianek, często przy „wygórowanych” wymogach co do ich jakości. Celem pobocznym pracy było więc wytworzenie ścianek o jak najmniejszych grubościach, narzędziami o obniżonej sztywności, przy zachowaniu wymogów jakościowych. Praca ma również na celu zbudowanie kapitału wiedzy w zakresie doboru parametrów skrawania (zwłaszcza prędkości skrawania), dla elementów wykonywanych z różnych stopów aluminium, pozwalających na uzyskanie zadawalających efektów obróbki narzędziami o zmniejszonej sztywności.

2.2. Hipoteza badawcza

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy w obszarze objętym problematyką rozprawy oraz określenie celów prowadzonych badań pozwoliły na sformułowanie następującej hipotezy badawczej:

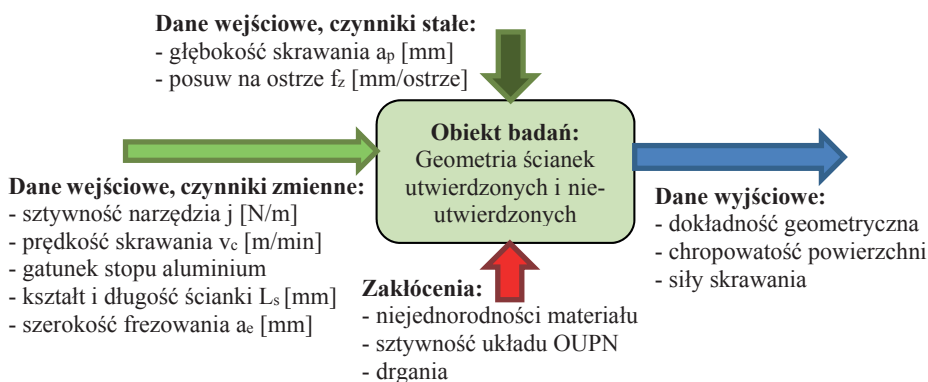
Sztywność statyczna frezów trzpieniowych ma różny wpływ na dokładność geometryczną przedmiotów wykonywanych ze stopów aluminium w warunkach obróbki konwencjonalnej i obróbki ze zwiększonymi prędkościami skrawania, wpływ ten zależy również od właściwości mechanicznych obrabianych materiałów.

Weryfikacja tej hipotezy będzie stanowić podstawę do budowy bazy wiedzy na temat frezowania elementów cienkościennych, narzędziami o obniżonej sztywności, w warunkach obróbki konwencjonalnej jak i „szybkościowej”.

3. Elementy teorii i planowania eksperymentu

W rozdziale omówiono motywy jakimi kierowano się przy doborze gatunków stopów aluminium zastosowanych w badaniach, geometrii próbek testowych oraz parametrów obróbki. Scharakteryzowano stanowisko badawcze oraz omówiono metodykę przeprowadzonych badań. Opisano schemat postępowania jakim posłużono się przy statystycznym opracowaniu wyników badań.

Obiektem badań była geometria ścianek, swobodnych oraz utwardzonych na końcach, o różnych długościach. Model obiektu badań wraz z czynnikami na niego oddziałującymi i analizowanymi danymi wyjściowymi przedstawiono na rys. 3.1. Jako czynniki stałe oddziałujące na obiekt badań przyjęto posuw f_z [mm/ostrze] oraz głębokość skrawania a_p [mm].



Rys. 3.1. Model obiektu badań

Czynniki zmienne to:

- sztywność narzędzia j [N/m],
- prędkość skrawania v_c [m/min],
- gatunek obrabianego stopu aluminium,
- szerokość frezowania a_e [mm],
- kształt i długość L_s [mm] obrabianej ścianki.

Analizowanymi danymi wyjściowymi była dokładność obrobionych konstrukcji, chropowatość powierzchni oraz wartość sił skrawania.

3.1. Dobór gatunków aluminium do badań

W celu weryfikacji części hipotezy badawczej, dotyczącej wpływu właściwości mechanicznych obrabianych materiałów na dokładność geometryczną wykonywanych elementów, w badaniach zastosowano trzy gatunki stopów aluminium.

Zestawienie oznaczeń oraz składu chemicznego wybranych stopów, na podstawie Polskich Norm, przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Oznaczenie i skład chemiczny wybranych stopów aluminium [59-63, 72]

Znak	Znak					Znak			Cecha	
wg. PN-EN 1780-2	wg. ASTM					wg. PN-76/88027				
EN AC- AlSi10Mg	-					-			-	
Znak	Znak					Znak			Cecha	
wg. PN-EN 573-3	wg. ASTM					wg. PN-76/88026				
EN AW- AlSiMgMn	6082					AlSiMgMn			PA4	
EN AW- AlZn5,5MgCu	7075					AlZn6Mg2Cu			PA9	
Stop	Stężenie pierwiastków, %									
	Si	Cu	Mg	Mn	Cr	Fe	Ti	Zn	Ni	Pb
EN AC- AlSi10Mg	10	$\leq 0,05$	0,33	$\leq 0,45$	$\leq 0,1$	$\leq 0,55$	$\leq 0,15$	$\leq 0,1$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$
Stop	Stężenie pierwiastków, %									
	Si	Fe	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Cr	inne	
EN AW- AlSiMgMn	1	$\leq 0,5$	0,9	$\leq 0,1$	0,7	$\leq 0,2$	$\leq 0,25$	-	-	
EN AW- AlZn5,5MgCu	$\leq 0,4$	$\leq 0,5$	2,5	1,6	$\leq 0,3$	5,6	$\leq 0,2$	0,23	$\text{Zr} + \text{Ti} \leq 0,25$	

Jako przedstawiciela, dla każdej grupy stopów opisanych w rozdziale 1.3, dobrano jeden stop:

- grupa I – czyste aluminium i niskostopowe materiały do obróbki plastycznej – **stop EN AW 6082 T651**,
- grupa II – umacniane zgniotem (o tzw. naturalnej twardości) lub utwardzone wydzieleniowo materiały do obróbki plastycznej – **stop EN AW 7075 T651**,
- grupa III – stopy odlewnicze z dużą zawartością Si – **stop EN AC AlSi10Mg**.

Ogólną charakterystykę poszczególnych grup stopów aluminium przedstawiono w rozdziale 1.4. Właściwości mechaniczne, technologiczne oraz przykłady zastosowania wybranych stopów, na podstawie danych literaturowych, przedstawiono w tabeli 3.2. W celu weryfikacji właściwości mechanicznych tych stopów, wykonano statyczne próby rozciągania, których wyniki omówiono w rozdziale 5. Wyznaczone w ten sposób charakterystyki materiałowe wykorzystano w analizie dokładności geometrycznej z zastosowaniem MES.

Wybrane stopy posiadają bardzo różne właściwości mechaniczne oraz stosowane są w przemyśle do wytwarzania odmiennych konstrukcji. Wybór tak odmiennych materiałów miał na celu ułatwienie sprawdzenia wpływu ich właściwości na dokładność wykonywanych elementów.

Tabela 3.2. Właściwości i zastosowanie wybranych stopów aluminium [25, 72, 91]

Znak wg. PN-EN 1780-2	Min. wł. mechaniczne				Wł. technologiczne	Zastosowanie
	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅₀ %	HB		
EN AC-AISi0Mg	180	220	1	75	Stop charakteryzuje się bardzo dobrą leżnością, odpornością na pękanie na gorąco oraz dobrą skrawalnością, odpornością na korozję i spawalnością.	Odlewy o skomplikowanych kształtach i wysokiej wytrzymałości, silnie i średnio obciążone części maszyn.
Znak wg. PN-EN 573-3	Wł. mechaniczne				Wł. technologiczne	Zastosowanie
	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [MPa]	A %	HB		
EN AW-AlZn5,5MgCu	180-595	80-525	2-15	55-150	Stop mający, przy bardzo dużym oporze plastycznym, bardzo dużą wytrzymałość i granicę plastyczności; ma dobre właściwości przeciwkorozyjne przy nieco obniżonej odporności na korozję naprężeniową; utwardzalny na drodze obróbki cieplnej przez sztuczne utwardzanie wydzieleniowe.	Bardzo silnie obciążone elementy konstrukcji lotniczych, środków transportu i maszyn.
EN AW-AlSiMgMn	80-230	35-180	1-35	27-62	Bardzo podatny na obróbkę plastyczną na gorąco i na zimno; dobrze spawalny; odporny na korozję.	Elementy ciężarówek, autobusów, przyczep, statków, wagonów kolejowych, mostów, barier zabezpieczających, zbiorniki, elementy układów hydraulicznych.

W badaniach wstępnych zastosowano dodatkowo stop do obróbki plastycznej AW 2024 T351, który można zakwalifikować do grupy II. Stop ten posiada właściwości mechaniczne zbliżone do stopu AW 7075, w związku z tym uzyskane wyniki pomiarów dokładności geometrycznej, dla tych dwu stopów, nie odbiegały zbytnio od siebie. W dalszych badaniach uznano za niecelowe kontynuowanie prób dla dwu stopów o podobnych właściwościach, gdyż nie wniosło by to żadnych istotnych informacji pozwalających na weryfikację hipotezy badawczej. Odrzucono zatem stop AW-2024 na rzecz stopu AW 7075, który jest częściej stosowany w przemyśle, zwłaszcza lotniczym.

3.2. Model przedmiotu obrabianego, uzasadnienie wyboru geometrii

Dobrana geometria próbek jest uproszczeniem rzeczywistych konstrukcji stosowanych w przemyśle. Ścianki utwierdzone na końcach można traktować jako fragmenty konstrukcji kieszeniowych stosowanych w elementach strukturalnych. Również ścianki nieutwierdzone są często spotykanymi konstrukcjami stosowanymi w tego typu elementach. Stosowane w przemyśle grubości ścianek są z reguły większe niż 2mm, lecz ciągle dążenie do zmniejszania masy wytwarzanych elementów wymusza obniżenie tej wartości. Było to powodem zastosowania w próbach ścianek o grubościach znacznie niższych niż stosowana obecnie. Dla najmniejszych grubości ścianek tzn. 1mm i 0,7mm stosunek ich wysokości do grubości jest wyższy od 15. Wartość tą wg. danych literaturowych [90, 103] można traktować jako wartość graniczną, powyżej której występują trudności z obróbką.

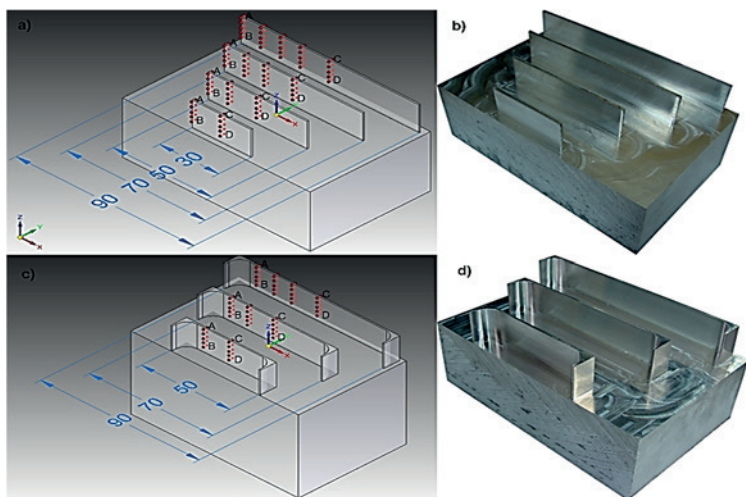
Próby skrawania przeprowadzono ze stałym względnym naddatkiem równym ok. 15% wyjściowej grubości ścianki. Wymiary ścianek, wartości stosunku ich wysokości do grubości dla kolejnych prób oraz wartości naddatków zestawiono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Zestawienie wymiarów ścianek oraz wartości naddatków obróbkowych

Nr przejścia	Naddatki na obróbkę dla kolejnych przejść				Stosunek h/g _s
	Wyjściowa grubość ścianki [mm]	Grubość ścianki po obróbce [mm]	Naddatek jednostronny [mm]	Naddatek względny	
0	5,70	4,00	0,85	15%	3,8
1	4,00	2,80	0,60	15%	5,4
2	2,80	2,00	0,40	15%	7,5
3	2,00	1,40	0,30	15%	10,7
4	1,40	1,00	0,20	15%	15,0
5	1,00	0,70	0,15	15%	21,4

Próby wykonano dla ścianek o różnej grubości oraz długości. Miało to na celu określenie wpływu długości ścianki na dokładność obróbki narzędziami o różnej sztywności. Długości ścianek nieutwierdzonych zmieniano o 20 mm w zakresie od 30 mm do 90 mm a ścianek utwierdzonych od 50 mm do 90 mm.

Widoki modeli ścianek wraz z naniesionymi punktami pomiarowymi przedstawiono na rys. 3.2 a i c. Natomiast rys. 3.2. b i d przedstawiają przykładowe widoki rzeczywistych próbek.



Rys. 3.2. Modele i widoki obróbianych próbek: a), b) próbki ze ściankami nieutwardzonymi; c), d) próbki ze ściankami utwardzonymi

Jako materiał wyjściowy do wykonania próbek w przypadku stopów do obróbki plastycznej tzn. EN AW 6082 i EN AW 7075 zastosowano walcowany pręt kwadratowy o przekroju 60x60 mm, który pocięto na odcinki o dł. 100 mm. Próbkę ze stopu odlewniczego AlSi10Mg wykonano z wlewków, które wstępnie obróbito frezując je na wymiary odpowiadające próbkom ze stopów do obróbki plastycznej tzn. 60x60x100 mm.

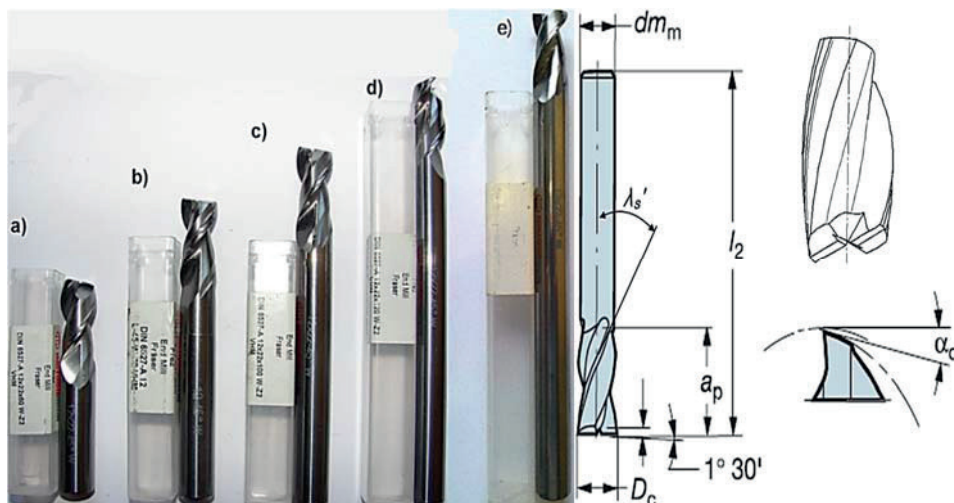
3.3. Dobór parametrów obróbki oraz narzędzi

W trakcie przeprowadzonych prób stosowano prędkości skrawania z zakresu HSC, dlatego konieczne było zastosowanie narzędzi pozwalających na tego typu obróbkę. W badaniach zastosowano dwuostrzowe frezy trzpieniowe, węglikowe bez powłoki narzędziowej (rys.3.3), o średnicy części roboczej $D_c=12\text{mm}$ i geometrii przystosowanej do obróbki stopów grupy ISO N (stopy Al, Mg, Cu). Kartę katalogową narzędzi, których producentem była firma Fenes, dołączono do pracy w formie załącznika 1 [93]. Narzędzia tego typu są stosowane w przemyśle do wysokowydajnej obróbki stopów aluminium z grupy I i II, dla których pomimo braku powłoki narzędziowej, charakteryzują się dużą trwałością. Dedykowane są do obróbki stopów aluminium z zastosowaniem technik HSC, dla których zalecane jest stosowanie narzędzi monolitycznych o stosunkowo niewielkich średnicach. Wszystkie frezy miały identyczną geometrię ostrzy i różniły się jedynie długością, która zmieniała się od 60 mm do 140 mm, co pozwoliło na uzyskanie wysięgów w zakresie $L_w=25\div105\text{ mm}$. Zestawienie wysięgów oraz podstawowych parametrów geometrycznych narzędzi przedstawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Zestawienie wyśięgów oraz parametrów geometrycznych narzędzi zastosowanych do badań

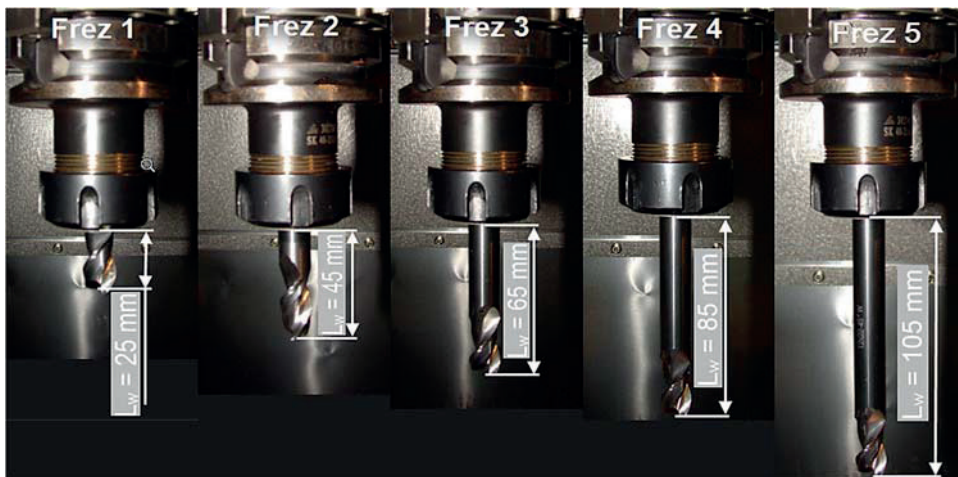
Parametry geometryczne stałe dla wszystkich narzędzi					
Ilość ostrzy	Średnica	Dł. części roboczej	Kąt pochylenia linii śrubowej	Kąt przyłożenia	Kąt natarcia
Zn	D_c [mm]	a_p [mm]	$\lambda_{s'}$	α_o	γ_o
2	12	22	45°	12°	15°
Parametry geometryczne różne dla poszczególnych narzędzi					
Lp.	Oznaczenie	Dł. całkowita	Dł. wyśięgów narzędzi	Stosunki dł. wyśięgów do średnicy narzędzi	
		l_2 [mm]	L_w [mm]	L_w / D_c	
1	12x22x60-45° W-Z2	60	25	2,08	
2	12x22x80-45° W-Z2	80	45	3,75	
3	12x22x100-45° W-Z2	100	65	5,42	
4	12x22x120-45° W-Z2	120	85	7,08	
5	12x22x140-45° W-Z2	140	105	8,75	

Widoki poszczególnych narzędzi o różnych długościach oraz geometrię frezów przedstawiono na rys.3.3. Kąt pochylenia linii śrubowej frezów wynosił $\lambda_{s'} = 45^\circ$, dlatego w symulacjach MES obciążenie na ścianie modelu przyłożono wzdłuż krzywej nachylonej pod tym kątem (rys. 5.4). Frezy posiadały „ostrą” geometrię (duże kąty natarcia $\gamma_o = 15^\circ$ i przyłożenia $\alpha_o = 12^\circ$), która ułatwia dekohezję materiału ale jednocześnie osłabia ostrze. W celu zwiększenia jego trwałości, przy zerowych promieniach naroży, zastosowano niewielką fazkę o długości 0,5mm. Fazka ta polepsza właściwości wytrzymałościowe ostrzy przy jednocześnie niewielkim wzroście sił skrawania.



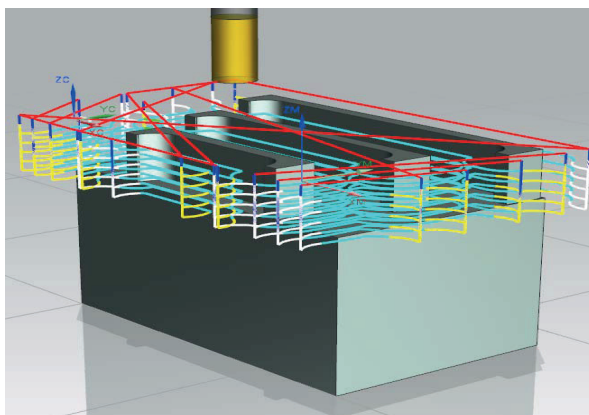
Rys. 3.3. Widoki i geometria frezów zastosowanych do badań; frezy o długościach:
a) 60 mm, b) 80mm, c) 100 mm, d) 120 mm, e) 140mm

Do mocowania frezów zastosowano uchwyty narzędziowe z tulejkami sprężystymi w standardzie ER i podwójnym stożkiem narzędziowym HSK63A (wg. ISO 12164/DIN 69893), który zapewnia stabilne mocowanie we wrzecionie obrabiarki. Oprawki w celu zapewnienia maksymalnej stabilności były wyważone w klasie G2,5 dla 25 000 obr/min wg. ISO 1940:2003 [56]. Widoki poszczególnych narzędzi zamocowanych we wrzecionie obrabiarki, z podaniem wartości wysięgów, przedstawiono na rys.3.4.



Rys. 3.4. Widoki narzędzi o różnej długości wysięgów zamocowanych we wrzecionie obrabiarki

Do wykonania prób skrawania konieczne było wygenerowanie programów obróbkowych, w tym celu posłużono się oprogramowaniem wspomagającym projektowanie technologii Siemens NX 8.0. Przykład wygenerowanych, ścieżek obróbkowych przedstawiono na rys.3.5.



Rys. 3.5. Przykład ścieżek obróbkowych wygenerowanych w NX 8.0

Obróbkę przeprowadzono w dwu etapach:

- Obróbka zgrubna – dla wszystkich prób zastosowano ten sam frez R216.32-12030-AC22A H10F firm Sandvik [89] oraz stałe parametry obróbki podane w tabeli 3.5. Zastosowanie tego samego narzędzia oraz stałych parametrów obróbki zgrubnej miało zapewnić uzyskanie jednakowych warunków wyjściowych dla obróbki wykończeniowej.
- Obróbka wykończeniowa – zastosowano wcześniej opisane frezy o różnej długości firmy Fenes. Parametry obróbki wykończeniowej podano w tabeli 3.5. Zastosowano stały posuw na ostrze $f_z=0,07\text{mm/ostre}$ (trzykrotnie mniejszy niż dla obróbki zgrubnej) oraz głębokość skrawania $a_p=15\text{mm}$. Zmianie ulegała prędkość skrawania v_c oraz w zależności od grubości obrabianej ścianki, szerokość frezowania a_p (tabela 3.3).

Tabela 3.5. Zestawienie parametrów obróbki zgrubnej i wykończeniowej

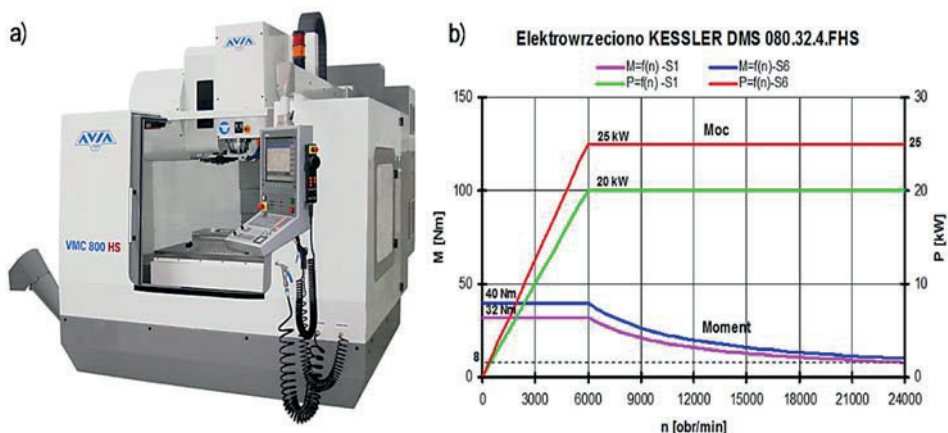
Parametry obróbki zgrubnej					
Prędkość skrawania	Prędkość obrotowa	Posuw na ostrze	Prędkość posuwu	Głębokość skrawania	Szerokość frezowania
v_c [m/min]	n_f [obr/min]	f_z [mm/ostre]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
300	7962	0,2	3185	3	5
Parametry obróbki wykończeniowej					
Prędkość skrawania	Prędkość obrotowa	Posuw na ostrze	Prędkość posuwu	Głębokość skrawania	
v_c [m/min]	n_f [obr/min]	f_z [mm/ostre]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	
150	3981	0,07	1592	15	
300	7962		3185		
450	11943		4777		
600	15924		6369		
750	19904		7962		
900	23885		9554		

Obróbkę wykończeniową przeprowadzono w jednym przejściu na całej wysokości ścianek, rezygnując ze strategii obróbki elementów cienkościennych, opisanych w rozdziale 1.7. Strategie te, często stosowane w przemyśle, pozwalają na zmniejszenie deformacji obrabianych ścianek, jednak komplikują i wydłużają czas trwania operacji technologicznych. Zastosowanie obróbki wykończeniowej ścianek w jednym przejściu, zwłaszcza z użyciem narzędzi dedykowanych do obróbki elementów cienkościennych, pozwala na uzyskanie zbliżonej dokładności przy jednoczesnym skróceniu czasów obróbkowych. Znajduje to potwierdzenie zarówno w literaturze jak i doświadczeniach własnych, dlatego taki sposób obróbki cienkich ścianek został przyjęty w trakcie realizowanych badań.

3.4. Charakterystyka stanowiska badawczego

Badania przeprowadzono na pionowym centrum frezarskim VMC 800 HS (rys. 3.6 a) o następujących podstawowych parametrach technicznych:

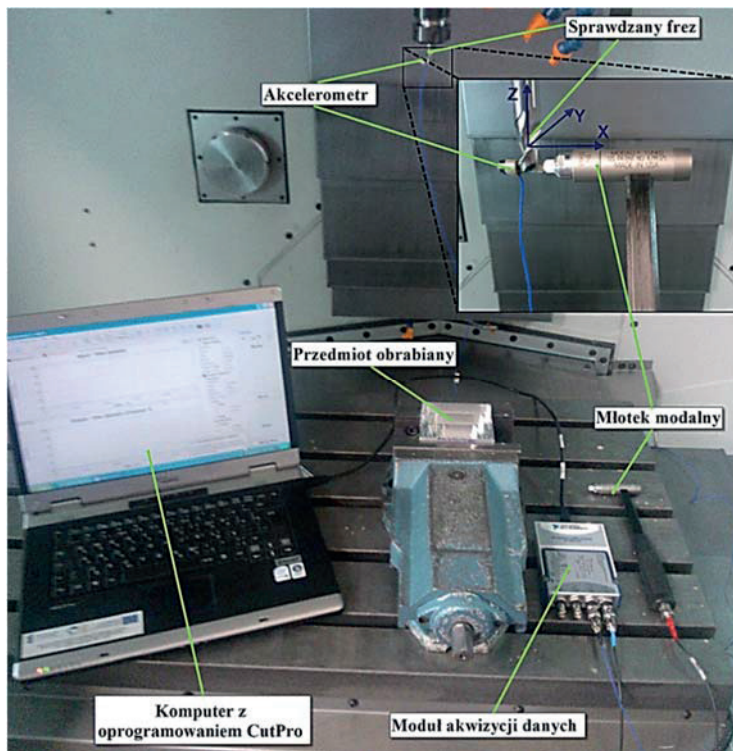
- powierzchnia robocza 1000 x 540 mm,
- przesuw X/Y/Z: 800/540/620 mm,
- max. obroty wrzeciona 24 000 obr/min,
- max. prędkość posuwu 40 m/min,
- dokładność pozycjonowania osi liniowych $\pm 0,005$ mm,
- powtarzalność pozycjonowania osi liniowych 0,005 mm.



Rys. 3.6. Centrum frezarskie VMC 800HS: a) widok ogólny, b) charakterystyka elektrowrzeciona [8]

Obrabiarkę, przez zastosowanie szybkich posuwów oraz wysokoobrotowego elektrowrzeciona, przystosowano do obróbki szybkościowej HSC. Charakterystykę wrzeciona przedstawiono na rys. 3.6 b.

Przed przystąpieniem do właściwych prób skrawania przeprowadzono badania charakterystyk dynamicznych układu narzędzie–oprawka–wrzeciono dla wszystkich zastosowanych długości narzędzi. Pozwoliło to na wyznaczenie sztywności powyższego układu oraz obszarów stabilności jego pracy w zależności od długości narzędzia.

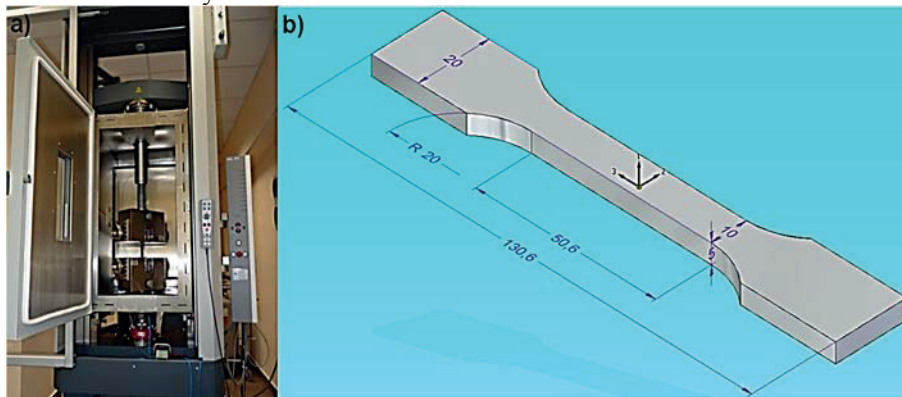


Rys. 3.7. Zestaw do analizy modalnej

Charakterystyka dynamiczna obrabiarstwa była wyznaczona w dwóch kierunkach X i Y, metodą eksperymentalnej analizy modalnej z zastosowaniem zestawu przedstawionego na rys. 3.7. W metodzie tej mierzona jest wartość siły wymuszającej oraz odpowiedź układu na to wymuszenie, co pozwala na wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych. Najważniejszymi elementami zestawu są młotek modalny z czujnikiem pomiaru siły wymuszenia oraz akcelerometr. Sygnały z tych urządzeń trafiają do modułu akwizycji danych skąd po przetworzeniu na sygnał cyfrowy przesyłane są do komputera z oprogramowaniem CutPro służącym do zbierania i analizy danych. W trakcie obróbki danych w programie CutPro definiowane są właściwości materiału obrabianego, parametry obróbki oraz narzędzia. Na podstawie zebranych sygnałów oraz zdefiniowanych parametrów, program tworzy krzywe stabilności (tzw. krzywe workowe – przykłady wygenerowanych krzywych przedstawiono w załączniku 2), które służą do wyznaczenia obszarów stabilności. W praktyce można na ich podstawie określić teoretyczne wartości głębokości skrawania a_p i prędkości obrotowej n , dla których proces obróbki nie spowoduje utraty stabilności układu narzędzie–oprawka–wrzeciono.

Pomiary z zastosowaniem eksperymentalnej analizy modalnej powtórzone dla każdego narzędzia trzykrotnie, a ich wyniki omówiono w rozdziale 4.

Do przeprowadzenia symulacji numerycznych MES konieczna była znajomość warunków obciążenia oraz właściwości mechanicznych badanych stopów. W celu wyznaczenia charakterystyk materiałowych wykonano statyczne próby rozciągania zgodnie z normą PN-EN 10002-1:2004 [64], na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150. Wygląd maszyny oraz kształt i wymiary próbek przedstawiono na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Statyczna próba rozciągania: a) maszyna wytrzymałościowa Zwick/Roell Z150, b) kształt i wymiary próbek wg. PN-EN 10002-1:2004 [64]

Podstawowe cechy maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150 [104]:

- maksymalna siła badawcza: 150 kN,
- zakres prędkości trawersy: 0,0005÷900 mm/min,
- rozdzielczość napędu: 0,0123 μm ,
- ekstensometr o dokładności odpowiadającej normie PN-EN ISO 9513:2005 [57],
- rozdzielczość pomiarowa ekstensometru: 0,06 μm /impuls,
- głowica pomiarowa siły w klasie 1.

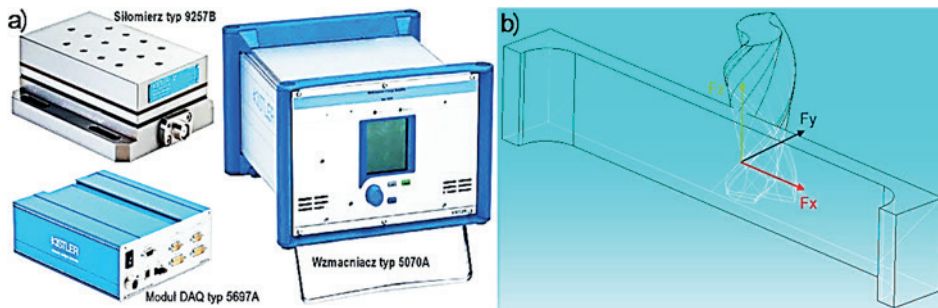
Badania wytrzymałościowe przeprowadzono dla 10 próbek. Przykładowy raport z prób rozciągania zawiera załącznik 3.

Wartości sił skrawania zmierzono z zastosowaniem siłomierza 9257B firmy Kistler. Widok siłomierza oraz rozkład siły skrawania na mierzone składowe przedstawiono na rys. 3.9. W obliczeniach MES modele obciążano siłą prostopadłą do powierzchni obrabianej (rys. 5.4), co odpowiadało składowej F_y siły skrawania (rys. 3.9b). Siłomierz posiada następujące parametry:

- Zakres mierzonych sił skrawania:

- składowe F_x i F_y	-5÷5 kN
- składowa F_z	-5÷10 kN
- Czułość pomiaru:

- składowe F_x i F_y	7,5 pC/N
- składowa F_z	3,7 pC/N
- Błąd pomiaru: $< \pm 0,3\%$.



Rys. 3.9. Pomiar sił skrawania: a) zestaw do pomiaru sił z siłomierzem 9257B, b) rozkład siły skrawania na mierzone składowe F_x , F_y , F_z [43]

Pomiar sił skrawania wykonano trzykrotnie dla każdego z dobranych materiałów i parametrów obróbki. Z otrzymanych przebiegów czasowych wyznaczono po pięć maksymalnych wartości sił otrzymując w sumie 15 pomiarów, z których wyliczono wartość średnią. Wyniki pomiarów sił oraz wyznaczania charakterystyk materiałowych omówiono w rozdziale 5.

Pomiary dokładności wykonanych ścianek wykonano bezpośrednio po ich obróbce z zastosowaniem przedmiotowej sondy inspekcyjnej TS640 (rys.3.10), której specyfikację techniczną przedstawiono w tabeli 3.6.



Rys. 3.11. Sonda przedmiotowa TS640 [34]



Rys. 3.10. Profilometr T1000

Dokładność pomiarów wykonywanych bezpośrednio na obrabiarce, choć mniejsza niż dla pomiarów z zastosowaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej, na potrzeby przeprowadzonych badań uznano za wystarczającą (tabela 3.6). Zaletą takiej metody pomiaru jest duża szybkość oraz unikanie błędów związanych ze zmianą zamocowania mierzonych elementów. Technika

pomiaru jest zbliżona do stosowanej we współrzędnościowych maszynach pomiarowych. Przy generowaniu siatki punktów pomiarowych oraz trajektorii ruchów sondy wspomagano się oprogramowaniem Productivity+™ firmy Renishaw. Metodykę pomiarów dokładności omówiono szerzej w kolejnym podrozdziale.

Tabela 3.6. Specyfikacja techniczna sondy TS640 [34]

Obszar zastosowania	Sonda przedmiotowa
Typ transmisji	Podczerwień
Kąt przesyłania sygnału podczerwieni	$0^\circ \div 30^\circ$
Dokładność sondy	$\leq \pm 5$ mikrometrów przy użyciu standardowego trzpienia
Powtarzalność sondy (powtarzalność jednokierunkowa)	Typowe wartości: $2\sigma \leq 1$ mikrometr przy prędkości pomiaru 1 m / min $2\sigma \leq 2$ mikrometry przy prędkości pomiaru do 3 m / min $2\sigma \leq 4$ mikrometry przy prędkości pomiaru do 5 m / min
Max. ugięcie sondy przy kontakcie	5 mm we wszystkich kierunkach
Siły ugięcia	Osiowa ok. 8 N; promieniowa ok. 1 N
Prędkość sondy	Max. 5 m / min

Drugim parametrem oceny jakości wykonanych ścianek była uzyskana chropowatość powierzchni, którą mierzono profilometrem T1000 firmy Hommel (rys. 3.11) o następujących parametrach:

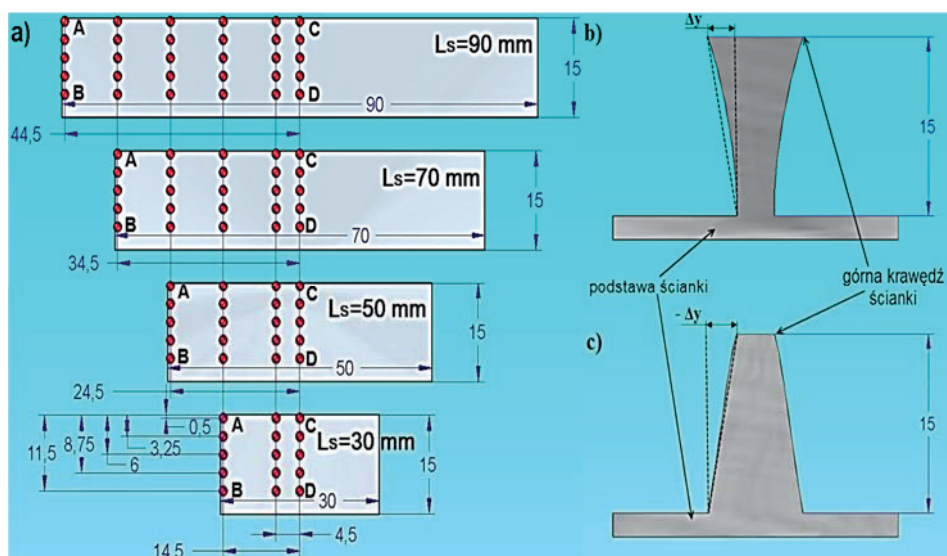
- odcinki pomiarowe lm: 1,25 / 4,0 / 12,5 mm;
- długości przesuwu lt: 0,48/1,5 / 4,8/15 mm;
- zakresy pomiarowe/rozdzielczość: $\pm 80 \mu\text{m}$ /0,01 μm ; $\pm 320 \mu\text{m}$ /0,04 μm ;
- prędkość przesuwu: 0,15 / 0,5 / 1,0 0,1 / 0,15 / 0,5 / 1,0 mm/s.

3.5. Metodyka pomiarów dokładności

Przeprowadzone pomiary obejmowały sprawdzenie odchyłki płaskości wykonanych ścianek. W większości przypadków odchyłkę płaskości określa się na podstawie pomiarów wykonanych w pojedynczych punktach powierzchni (pomiary dyskretne). Im więcej jest punktów pomiarowych, tym realizacja pomiaru jest bliższa definicji odchyłki. W przypadku powierzchni prostokątnych punkty pomiarowe rozmieszcza się na przekrojach wzdłużnych, poprzecznych i wzdłuż przekątnych. Obróbka wyników pomiarów może być zrealizowana kilkoma sposobami [38]:

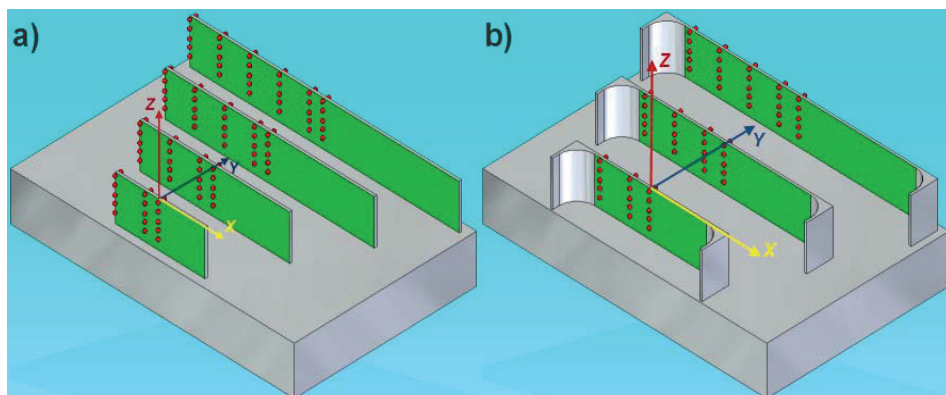
- *sposobem graficznym*; znajduje się płaszczyznę przylegającą,
- *sposobami obliczeniowymi*, zwykle przy użyciu technik komputerowych,
- *bezpośrednio* na podstawie wskazań przyrządu jako różnica między skrajnymi wskazaniami.

Do wyliczenia odchyłki płaskości posłużono się ostatnim z wymienionych sposobów. W tym celu na powierzchni mierzonych ścianek wyznaczono siatkę punktów pomiarowych (rys. 3.12a). Na podstawie wartości zmierzonych odchyłek kształtu, dla wybranych ścianek, wykreślono ich zarys w postaci trójwymiarowych płaszczyzn. Ze względu na bardzo dużą ilość danych pomiarowych, szczegółową analizę dokładności geometrycznej przeprowadzono dla wybranych ścianek. Dla pozostałych ścianek wyznaczono odchyłki prostoliniowości w ich charakterystycznych płaszczyznach, tzn. skrajnych (przekrój A-B rys.3.12a) oraz środkowych (przekrój C-D rys.3.12a). Pomiary miały charakter dyskretny, krokowy (odległości sąsiednich punktów pomiarowych są stałe), a odchyłki wyznaczono na podstawie kątów pochylenia zarysów ścianek [38].



Rys. 3.12. Pomiary dokładności ścianek: a) rozmieszczenie punktów pomiarowych, b) kształt ścianki – odchyłka dodatnia, c) kształt ścianki – odchyłka ujemna

Ze względu na symetryczność konstrukcji pomiary wykonano w punktach rozmieszczonych na połowie każdej ze ścianek. Punktem odniesienia dla pomiarów poszczególnych ścianek był początek układu współrzędnych umieszczony w płaszczyźnie symetrycznej ścianki tak, że oś X tego układu pokrywała się z jej górną krawędzią. Przykładowe położenie tego układu dla najkrótszej nieutwierdzonej i utwierdzonej ścianki oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 3.13.



Rys. 3.13. Położenie układu współrzędnych względem, którego wykonano pomiary ścianek: a) nieutwierdzonych, b) utwierdzonych

Przyjęto, że zmierzone odchyłki prostoliniowości mają wartości:

- dodatnią, gdy powierzchnie ścianki odchylone są na zewnątrz przy górnej krawędzi – mają większą grubość przy górnej krawędzi (rys.3.12 b),
- ujemną, gdy ścianki mają większą grubość przy podstawie (rys.3.12 c).

Wyniki pomiarów dokładności geometrycznej wykonanych ścianek przedstawiono w rozdziale 6.

3.6. Statystyczne opracowanie wyników

W przypadku, gdy wyniki badań, na podstawie oceny wartości średnich (jako estymatora wartości oczekiwanej) oraz odchyłeń standardowych, były trudne to rozróżnienia, poddano je weryfikacji statystycznej. W celu oceny istotności różnic uzyskanych wyników, na przyjętym poziomie ufności $1-\alpha=0,95$, przyjęto procedurę postępowania, dla 2 prób o ilościowych zmiennych niezależnych, zgodną ze schematem zamieszczonym na rys. 3.14 [100]. Opracowanie statystyczne wyników przeprowadzono wykorzystując algorytmy przedstawione m.in. w pracach: [46, 94, 95]. Do weryfikacji różnic wykorzystano statystyczne testy istotności służące do porównywania wartości średnich: test t-Studenta, C-Cochrana i Coxa oraz wartości wariancji F – Snedecora-Fishera. Statystyki te wyliczono z zastosowaniem modułu analizy danych pakietu Excel [73]. Przed weryfikacją hipotez o równości wariancji i średnich, należało określić czy badana cecha posiada rozkład normalny. W tym celu posłużono się testem Shapiro-Wilka, dla którego wartość statystyki testowej podaje zależność:

$$W = \frac{[\sum_i a_i(n)(X_{n-i+1}-X_i)]^2}{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2} \quad (4.1)$$

gdzie: a_i – są stałymi podawanymi w specjalnych tablicach.

Analizę rozkładu normalności przeprowadzono za pomocą pakietu Statistica 10, który wykonuje zadany test na zaznaczonym zbiorze danych zwracając wyniki w postaci wykresu normalności oraz wartości obliczonej statystyki SW-W dla porównywanych grup. Następnie prowadzono weryfikację hipotezy o równości wariancji. Weryfikowano hipotezę zerową, która ma postać:

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ wobec hipotezy alternatywnej, która może mieć różną postać:
 $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$; $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$ lub $H_1: \sigma_1^2 < \sigma_2^2$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$

gdzie: σ_1^2 - wariancja w populacji,
 σ_2^2 - wariancja hipotetyczna

Sytuację, w której wariancja zmiennej w populacji jest wysoka uznaje się za niekorzystną [95], dlatego najczęściej przyjmuje się hipotezę alternatywną postaci:

$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$ z prawostronnym obszarem krytycznym $\langle F(1 - \alpha/2, n_1 - 1, n_2 - 1), +\infty \rangle$,

gdzie: n_1 – liczebność pierwszej próby,
 n_2 – liczebność drugiej próby

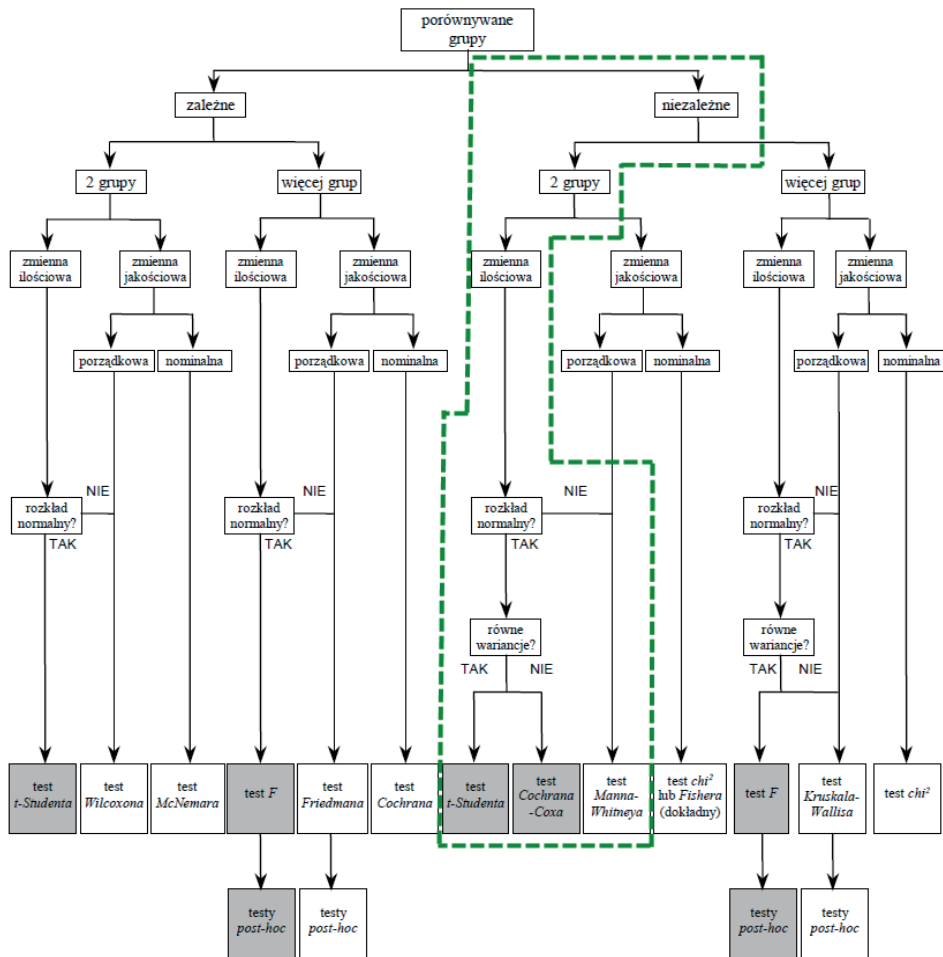
Do weryfikacji wykorzystano statystykę F – Snedecora-Fishera, której wartość wylicza się z zależności:

$$F = \frac{\frac{n_1}{n_1 - 1} \sigma_1^2}{\frac{n_2}{n_2 - 1} \sigma_2^2} \quad (4.2)$$

gdzie: σ^2 – wariancja,
 n – liczebność próby.

Jeżeli obliczona wartość statystyki F należy do przedziału krytycznego, to należy odrzucić hipotezę H_0 na rzecz hipotezy H_1 . W przeciwnym przypadku nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 o identyczności wariancji w obu populacjach i do testowania hipotezy o równości wartości średniej korzysta się z testu t-Studenta. Weryfikowano hipotezę zerową:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ wobec hipotezy alternatywnej
 $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, otrzymując obszar krytyczny
 $(-\infty, -t(1 - \frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2)) \cup \langle t(1 - \frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2), +\infty \rangle$.



Rys. 3.14. Schemat wyboru odpowiednich testów do oceny istotności różnic [100]

Do weryfikacji wykorzystano statystykę t – Studenta, której wartość wylicza się z zależności:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (4.3)$$

gdzie: $\overline{X}$ - średnia arytmetyczna,
 σ^2 - wariancja,
 n - liczebność próby.

Jeżeli obliczona wartość statystyki F należy do przedziału krytycznego, to należy odrzucić hipotezę H_0 na rzecz hipotezy H_1 i do testowania hipotezy o równości wartości średniej korzysta się z testu Cochran-Coxa. Weryfikowano hipotezę zerową:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ przeciwko hipotezie alternatywnej,

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ otrzymując obszar krytyczny $(-\infty, -c(1 - \frac{\alpha}{2}, n_1, n_2)) \cup (c(1 - \frac{\alpha}{2}, n_1, n_2), +\infty)$.

Do weryfikacji wykorzystano statystykę Cochran-Coxa, której wartość wylicza się z zależności:

$$C = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1 - 1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2 - 1}}} \quad (4.4)$$

gdzie: $\bar{X}$ - średnia arytmetyczna,
 σ^2 - wariancja,
 n - liczebność próby.

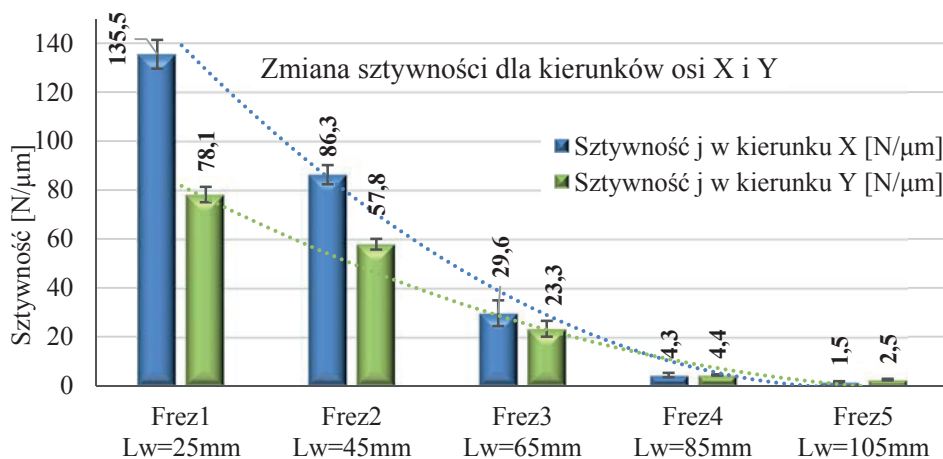
Zastosowanie analizy statystycznej umożliwia w prosty sposób zweryfikowanie i porównanie wyników badań zwłaszcza w przypadku, gdy otrzymane wartości są do siebie zbliżone.

4. Wyznaczenie sztywności oraz obszarów stabilności – analiza modalna

Przed wykonaniem właściwych prób skrawania, a następnie pomiarów chropowatości i dokładności wykonanych próbek, przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie obszarów stabilności pracy narzędzia oraz jego sztywności z zastosowaniem eksperymentalnej analizy modalnej. Z punktu widzenia celów rozprawy istotnym było prowadzenie prac eksperymentalnych w warunkach możliwie najbardziej stabilnych w celu zminimalizowania wpływu drgań samowzbudnych na efekty obróbki.

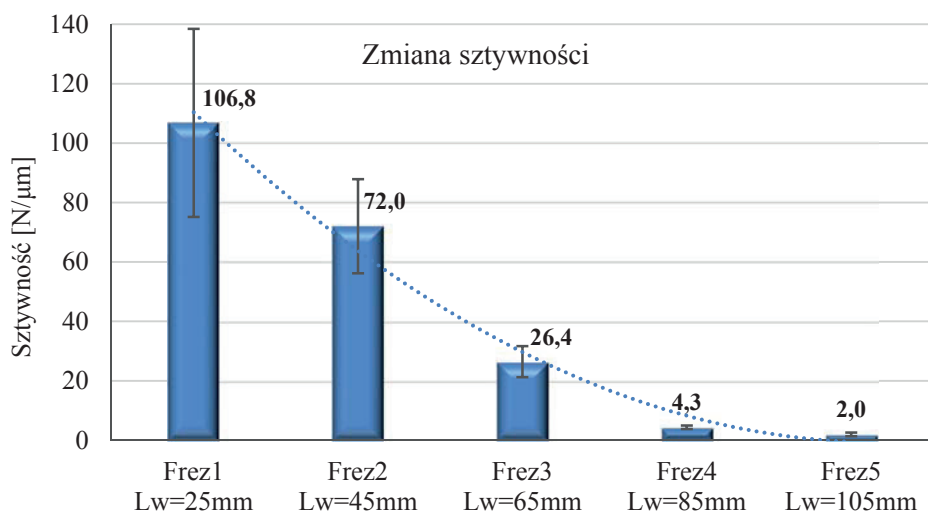
4.1. Wyznaczenie sztywności narzędzi

Zgodnie z wiadomościami zawartymi w podrozdziale 1.6. w celu wyznaczenia sztywności narzędzia posłużono się metodą eksperymentalnej analizy modalnej. Wyznaczona w ten sposób sztywność dotyczy całego układu narzędzie–oprawka–wrzeciono. Jej wartość obliczana jest z zależności 1.7, z wykorzystaniem danych otrzymanych na podstawie odpowiedzi układu na wymuszenie dynamiczne (rys.1.24). Sztywność wyznaczana jest w dwu kierunkach X i Y (rys. 3.7) odpowiadających osiom X i Y układu współrzędnych obrabiarki CNC. Wyniki pomiarów sztywności przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Zmiana sztywności „modalnej” układu narzędzie–oprawka–wrzeciono w zależności od długości wysięgu narzędzia dla dwu kierunków pomiaru: X i Y

Do dalszych analiz przyjęto uśrednioną wartość sztywności z pomiaru w dwu kierunkach X i Y. Wartości uśrednionej sztywności w zależności od wysięgu narzędzi przedstawiono na wykresie z rys. 4.2.



Rys. 4.2. Zmiana uśrednionej sztywności układu narzędzie–oprawka–wrzeciono w zależności od długości wysięgu narzędzia

Porównując wartości średnich i odchyłeń standardowych można mieć wątpliwości co do różnicy wartości sztywności pomiędzy frezami 1 i 2 oraz pomiędzy frezami 4 i 5. Dla tych dwu przypadków przeprowadzono statystyczną weryfikację istotności różnic, której wyniki zawarto w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań sztywności frezów, z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$

Oznaczenie frezów	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
Frez 1 – Frez 2	4,0029	$\langle 5,050; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	2,4048	$(-2,228; 2,228)$	$\mu_1 \neq \mu_2$
Frez 4 – Frez 6	1,0825	$\langle 5,050; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	-6,8094	$(-2,228; 2,228)$	$\mu_1 \neq \mu_2$

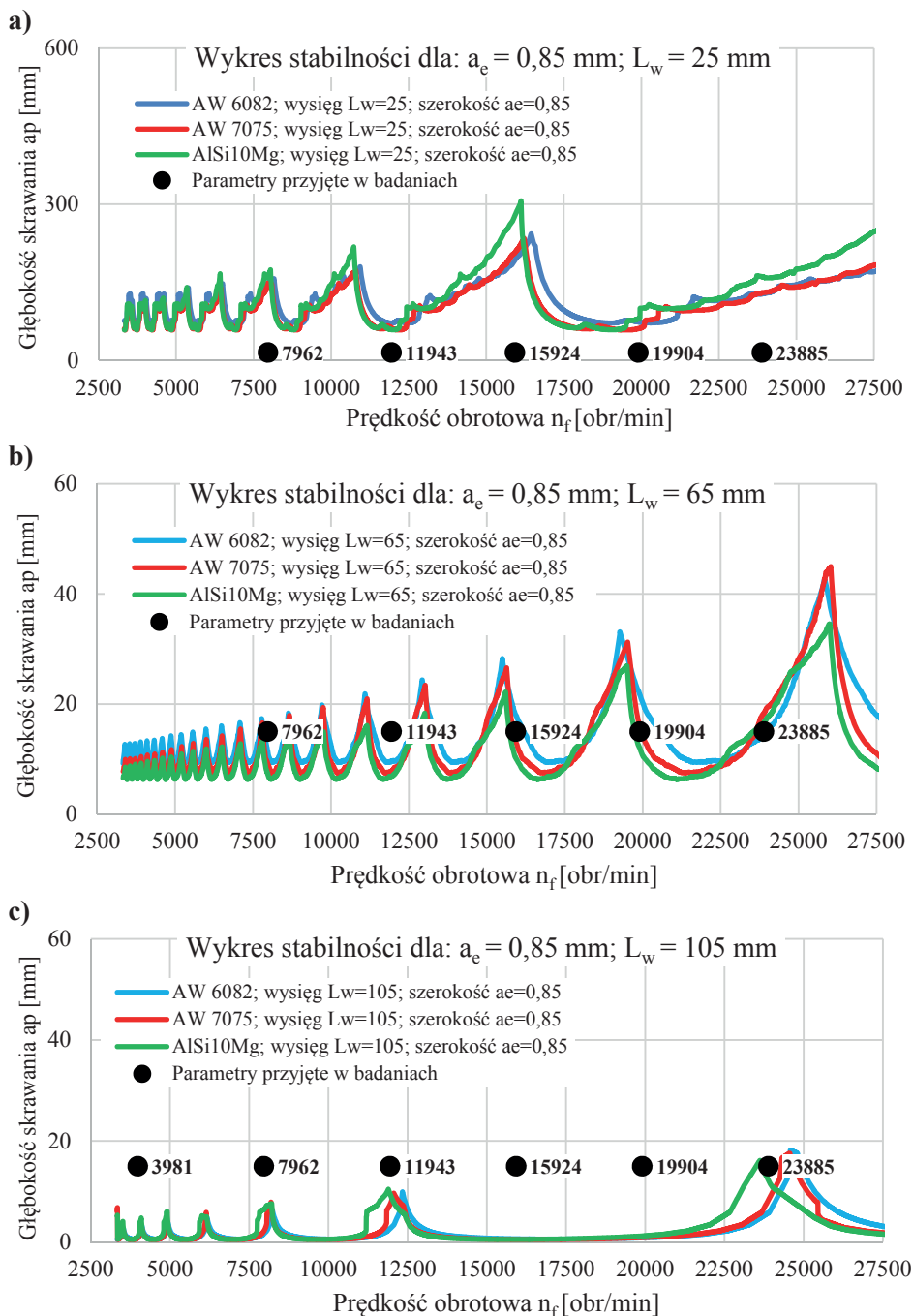
Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej można odrzucić hipotezę o równości średnich H_0 jako zbyt mało prawdopodobną na korzyść hipotezy alternatywnej. Oznacza to, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wyniki pomiarów sztywności dla frezów 1 i 2 oraz frezów 4 i 5 są różne. Jednak w przypadku frezów 1 i 2 wartość statystyki t zbliża się bardzo do przedziału krytycznego, co sugeruje, że wartości ich sztywności są podobne.

Spadek sztywności układu narzędzie–oprawka–wrzeciono, wraz ze zmianą długości narzędzia, ma charakter wykładniczy. Dla frezów 1, 2 i 3 widoczna jest różnica pomiędzy sztywnością w kierunku osi X i Y (rys. 4.1.). Wynika to prawdopodobnie z konstrukcji wrzeciennika obrabiarki CNC, która zapewnia większą sztywność w kierunku osi X. Różnica wartości sztywności między

kierunkami X i Y rośnie wraz ze wzrostem sztywności narzędzia, co wpływa na zwiększenie odchylenia standardowego dla wyliczonej sztywności uśrednionej. Dla frezów 4 i 5 sztywności w obydwu kierunkach są zbliżone. Można stąd wnioskować, że dla narzędzi o małym wysięgu na całkowitą sztywność układu narzędzie–oprawka–wrzeciono decydujący wpływ ma sztywność układu wrzecionowego obrabiarki oraz oprawki narzędziowej. Przy większych wysięgach wpływ ten jest mniejszy i decydujące znaczenie ma sztywność narzędzia, która zależy od stosunku jego długości do średnicy.

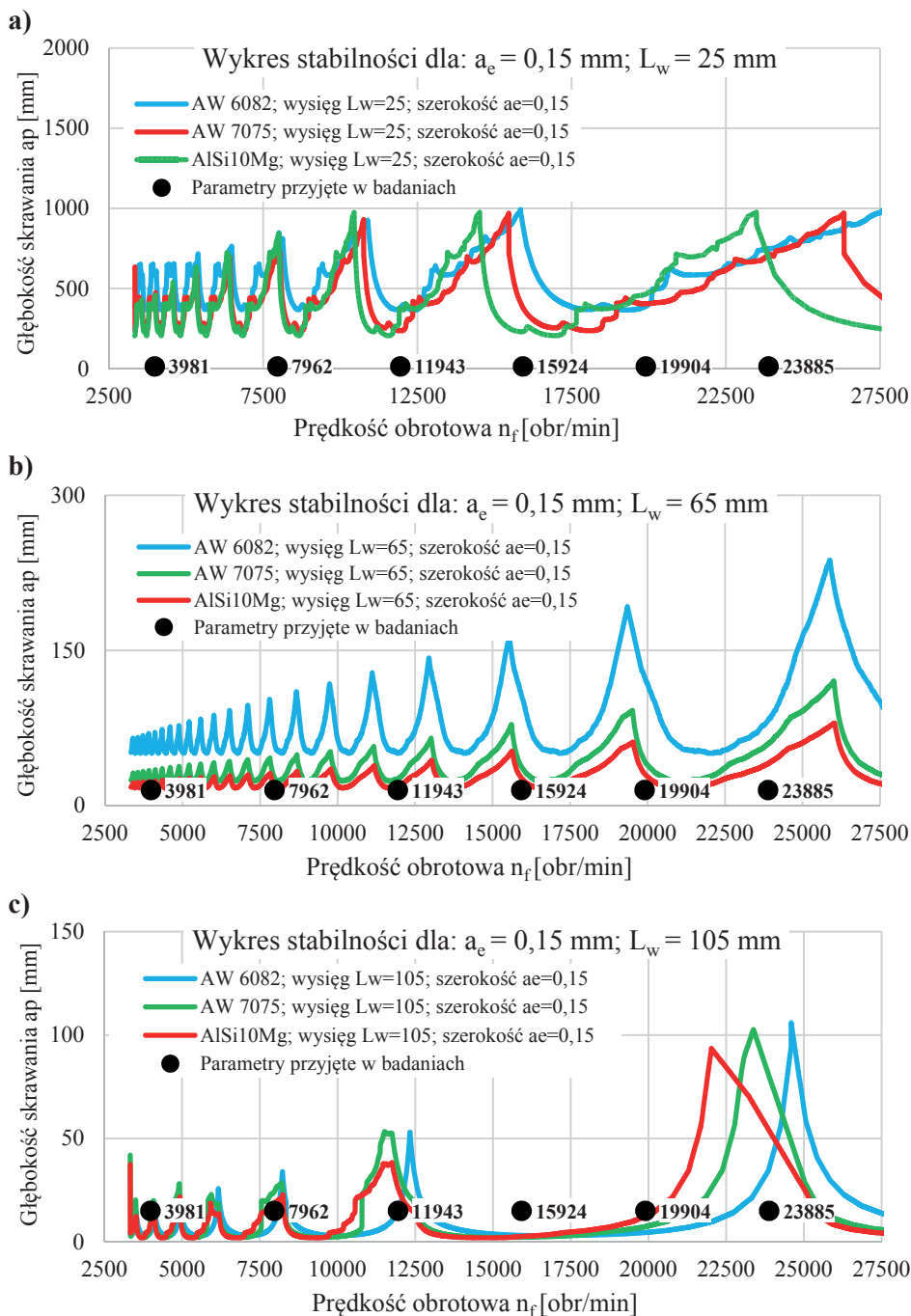
4.2. Wyznaczenie obszarów stabilności pracy narzędzi

Jak wspomniano wcześniej zastosowanie eksperymentalnej analizy modalnej umożliwia wyznaczenie krzywych stabilności. Krzywe te, przy zdefiniowanych pozostałych parametrach, pozwalają na wyznaczenie wartości głębokości a_p i prędkości obrotowej n , mających zapewnić stabilną pracę narzędzia. Badania obejmujące próby skrawania przeprowadzono ze stałą głębokością skrawania $a_p = 15$ mm. Stabilność procesu, według wyliczeń analizy modalnej, w rozpatrywanym przypadku zależała będzie jedynie od prędkości obrotowej. Przykładowe wykresy stabilności przedstawiono na rys. 4.3 i 4.4. Na rys. 4.3 przedstawiono wykresy stabilności dla wybranych stopów aluminium i trzech długości narzędzi, dla szerokości frezowania $a_p = 0,85$ mm, odpowiadającej obróbce ścianek o największej grubości. Analizując te wykresy można stwierdzić, że dla narzędzia o najmniejszym wysięgu $L_w = 25$ mm (rys. 4.3a), wszystkie zastosowane prędkości obrotowe zapewniają stabilną obróbkę. Podobne rezultaty uzyskano dla narzędzia o $L_w = 45$ mm. Frezy te posiadają podobną sztywność (tabela 4.1), dlatego obszary stabilności ich pracy są zbliżone. W przypadku narzędzia o $L_w = 65$ mm, na podstawie wyznaczonych krzywych stabilności (rys. 4.3b), trudno jest określić, czy zastosowane parametry skrawania zapewnią stabilną obróbkę. Przyjęte prędkości obrotowe, oznaczone na wykresie punktami, leżą w większości przypadków na granicy między obszarem stabilnym a niestabilnym. Wniosek o stabilności pracy tego narzędzia jest więc utrudniony. W przypadku narzędzia o największym wysięgu $L_w = 105$ mm, zgodnie z wyznaczonym wykresem stabilności rys. 4.3c, wszystkie zastosowane prędkości obrotowe nie zapewnią stabilnej obróbki. Jedynie najwyższa możliwa do uzyskania, na używanej w eksperymencie obrabiarkie VMC 800HS, prędkość obrotowa $n_f = 24\ 000$ obr/min, zbliżona jest do zakresu stabilnej pracy. W celu zapewnienia stabilnej pracy tego narzędzia należałoby znacznie obniżyć głębokość skrawania, nawet do poziomu $a_p < 0,5$ mm. Na zwiększenie wyliczonych obszarów stabilności możemy również wpłynąć zmniejszając szerokość frezowania. Można to zaobserwować porównując wykresy z rys. 4.3 i 4.4. Na wykresach z rys. 4.4 przyjęta szerokość frezowania jest znacznie niższa i wynosi $a_e = 0,15$ mm.



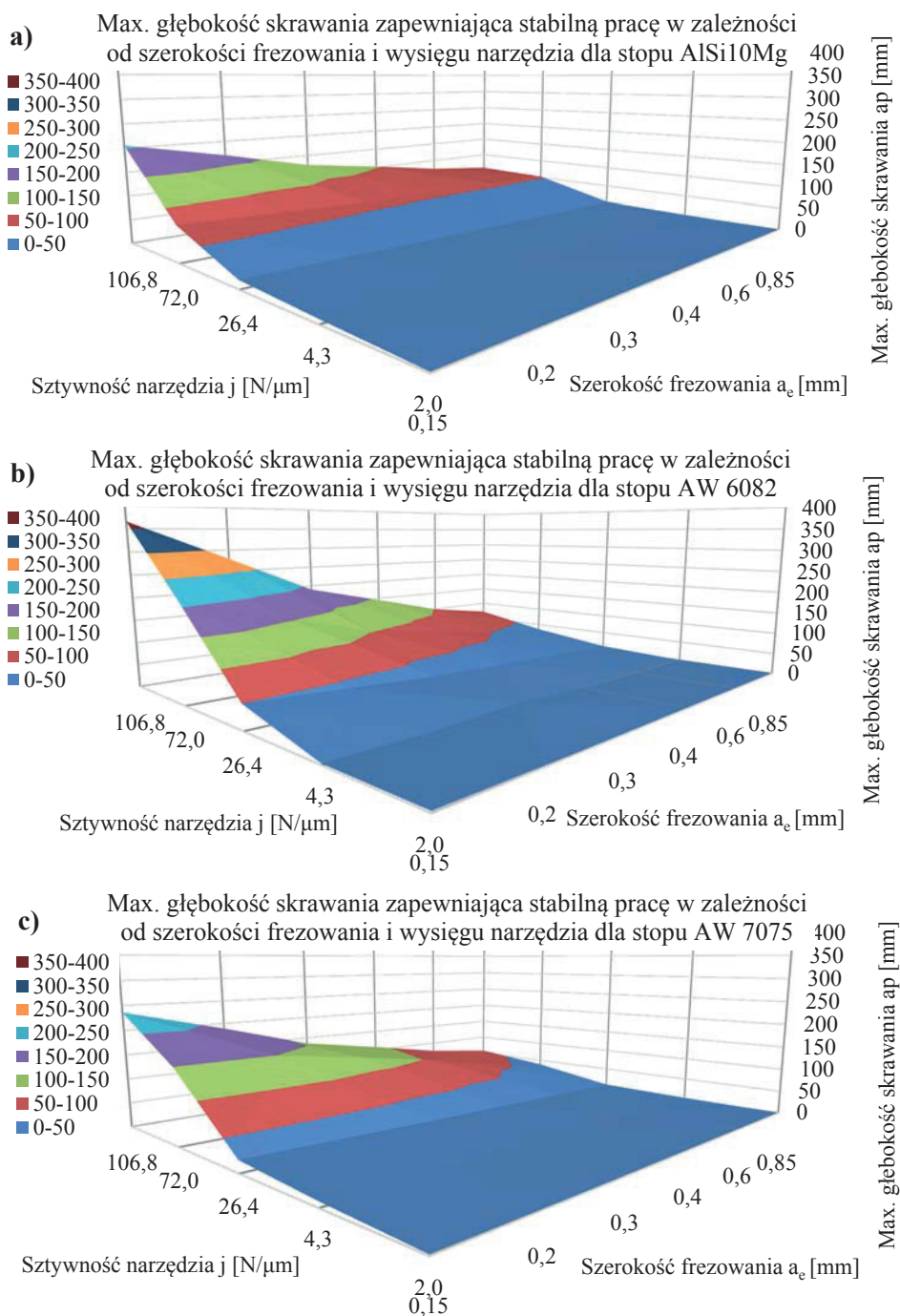
Rys. 4.3. Przykładowe wykresy stabilności dla głębokości skrawania $a_p = 15 \text{ mm}$ i szerokości frezowania $a_e = 0,85 \text{ mm}$ oraz różnych wysięgów narzędzia:

a) $L_w = 25 \text{ mm}$, b) $L_w = 65 \text{ mm}$, c) $L_w = 105 \text{ mm}$



Rys. 4.4. Przykładowe wykresy stabilności dla głębokości skrawania $a_p = 15 \text{ mm}$ i szerokości frezowania $a_e = 0,15 \text{ mm}$ oraz różnych wysięgów narzędzia:

a) $L_w = 25 \text{ mm}$, b) $L_w = 65 \text{ mm}$, c) $L_w = 105 \text{ mm}$



Rys. 4.5 Max. głębokość skrawania zapewniająca stabilną pracę w zależności od szerokości frezowania i wysięgu narzędzia dla stopu: a) AlSi10Mg, b) AW 6082, c) AW 7075

Dzięki temu dla przyjętej głębokości skrawania $a_p = 15$ mm, nawet dla narzędzia o najmniejszej sztywności można wyznaczyć zakresy prędkości obrotowej zapewniające stabilną obróbkę. Wynika z tego, że przebiegi wyliczonych krzywych stabilności zależą od wymiarów warstwy skrawanej – im przekrój warstwy skrawanej jest większy tym trudniej osiągnąć stabilną pracę narzędzia.

Parametry takie jak posuw na ostrze f_z czy szerokość frezowania a_e , są w analizie modalnej definiowane, natomiast głębokość skrawania a_p jest parametrem wynikowym. Analizując krzywe stabilności można zaobserwować istnienie granicznej wartości głębokości skrawania a_p poniżej, której teoretycznie zawsze będzie zapewniona stabilna obróbka, niezależnie od zastosowanej prędkości obrotowej. Wartość tą przyjęto jako wyznacznik porównawczy, w celu zobrazowania wszystkich analizowanych przypadków. Wykresy z rys. 4.5 przedstawiają wartości tego parametru, dla poszczególnych badanych stopów, w funkcji sztywności narzędzi oraz szerokości frezowania. Na wykresach tych oraz na wykresach stabilności rys. 4.3 i 4.4 można zaobserwować, że graniczna głębokość skrawania przyjmuje największe wartości dla stopu EN AW 6082 (rys. 4.5b). Krzywe stabilności na wykresach (rys. 4.3 i 4.4) dla tego stopu przesunięte są do góry w stosunku do dwóch pozostałych stopów. Zwiększa to obszary stabilności dla tego materiału. Porównując wartości głębokości skrawania w zależności od sztywności narzędzia możemy stwierdzić, że dla stopu EN AW 6082 stabilność można osiągnąć dla narzędzia o sztywności większej niż $j = 4,34$ N/ μ m (frez 4), gdy dla dwu pozostałych stopów jest to możliwe powyżej $j = 26,44$ N/ μ m (frez 3). Dla stopów EN AW 7075 i AlSi10Mg wyznaczone obszary stabilności (rys. 4.3, 4.4 i 4.5) przyjmują podobne wartości. Analizując wyniki badań przedstawione w dalszych rozdziałach można stwierdzić, że stabilność obróbki stopu AlSi10Mg jest zbliżona do stopu EN AW 6082 i znacznie lepsza niż stopu EN AW 7075.

Pomimo szeregu zalet, do których należy m.in. łatwość i szybkość analizy, możliwość szczegółowego definiowania parametrów obróbki, narzędzia oraz materiału obrabianego, eksperymentalna analiza modalna nie zawsze się sprawdza. Wpływa na to przyjęty sposób przeprowadzanego badania, który nie uwzględnia złożoności procesu skrawania i złożoności badanego modelu jakim jest obrabiarka. Do najważniejszych wad tej metody możemy zaliczyć:

- nie uwzględnia dynamiki procesu – próba przeprowadzana jest przy postoju maszyny, a nie w trakcie obróbki, sztywność układu wrzecionowego zmienia się w zależności od jego obrotów,
- nie uwzględnia zmian sztywności układu wrzecionowego w trakcie jego pracy – obrabiarka w trakcie pracy rozgrzewa się,
- nie uwzględnia możliwości wystąpienia niejednorodności i wad materiałowych, które wpływają na chwilowe zmiany warunków obróbki i mogą powodować utratę stabilności,

- nie uwzględnia wpływu zmian przekroju warstwy skrawanej wynikających ze śladów obróbkowych po wcześniejszych przejściach, tzw. efekt regeneracyjny,
- nie uwzględnia zmiany masy obrabianego materiału, a tym samym zmian tłumienia w układzie O-U-P-N.

Pomimo tych wad analiza modalna może być użytecznym narzędziem w badaniach dynamiki skrawania.

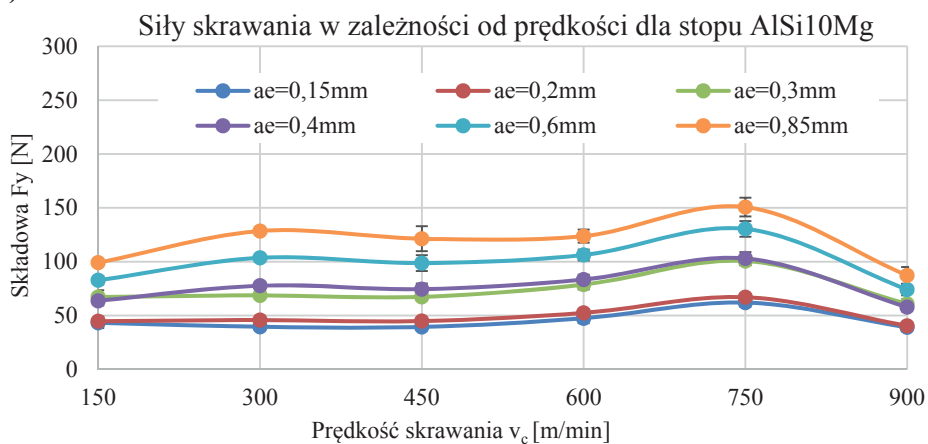
5. Analiza dokładności geometrycznej obrabianych elementów w świetle badań modelowych

W pracy przeprowadzono analizę odkształceń obrabianych konstrukcji cienkościennych z zastosowaniem symulacji numerycznych MES. Przed wykonaniem odliczeń z zastosowaniem MES przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie charakterystyk materiałowych oraz warunków obciążenia badanych konstrukcji. W tym celu dla wybranych stopów aluminium wykonano statyczne próby rozciągania z wyznaczeniem modułu Younga oraz wyznaczono siły skrawania. Metodę tych pomiarów opisano w rozdziale 3 natomiast ich wyniki przedstawiono poniżej.

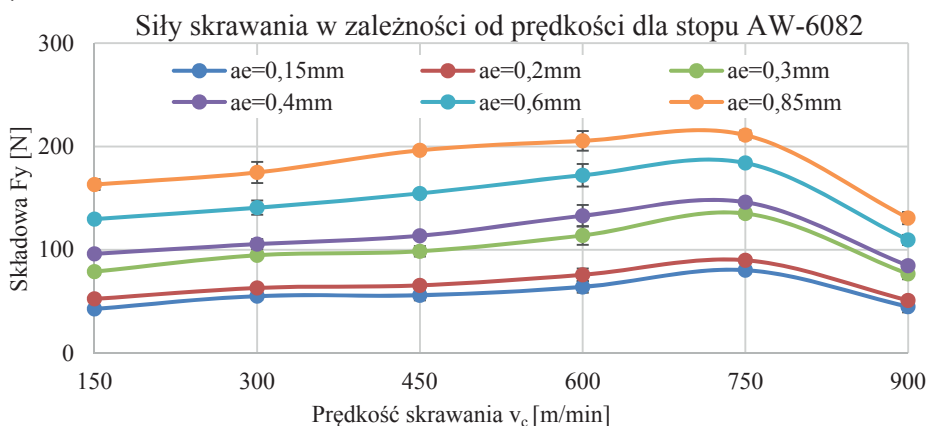
5.1. Wyniki pomiarów sił skrawania

Siły skrawania, dla trzech wybranych gatunków stopów aluminium, wyznaczono w zależności od prędkości skrawania v_c i szerokości frezowania a_e . Przebiegi zmienności składowej F_y siły skrawania (rys. 3.9b) w funkcji prędkości skrawania, dla różnych szerokości frezowania, przedstawiono na rys. 5.1. Szerokości frezowania dobrano tak aby miały one stałą względną wartość w stosunku do grubości obrabianych ścianek. Na wykresach rys. 5.1 obrazujących zmiany siły skrawania widoczne jest charakterystyczne maksimum. Prędkość skrawania odpowiadającą maksymalnej wartości siły skrawania można przyjąć, zgodnie z informacjami zawartymi we wstępie, za granicę pomiędzy obróbką konwencjonalną a obróbką HSC. W rozprawie przyjęto ją określać jako prędkość graniczną. Wartość granicznej prędkości skrawania silnie zależy od właściwości obrabianego materiału co jest dobrze widoczne na rys. 5.1. Stopy EN AW-6082 i AlSi10Mg (rys. 5.1 a i b) o „gorszych” właściwościach mechanicznych w stosunku do stopu EN AW-7075 (rys. 5.1 c) posiadają wyższą wartość granicznej prędkości skrawania. Oznacza to, że dla tych dwóch stopów, aby osiągnąć warunki obróbki odpowiadające HSC, należy zastosować prędkość skrawania wyższą niż $v_c=750$ m/min. Dla stopu EN AW 7075 graniczna prędkość skrawania jest niższa i wynosi ok. $v_c=650$ m/min. Jednocześnie można zaobserwować, że wartość granicznej prędkości skrawania dla danego stopu nie zależy od zastosowanej szerokości frezowania. Można stąd wnioskować, że pozostałe parametry obróbki opisujące przekrój warstwy skrawanej, a więc głębokość skrawania a_p i posuw na ostrze f_z również nie będą wpływać na wartość granicznej prędkości skrawania.

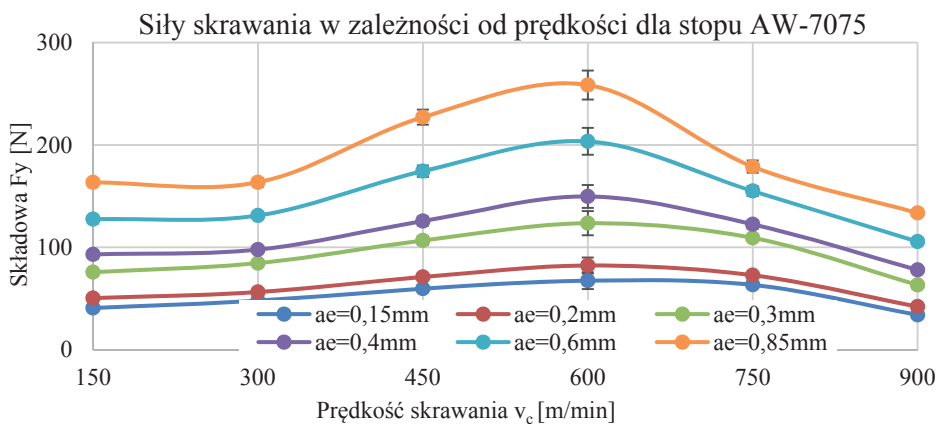
a)



b)



c)



Rys. 5.1. Siły skrawania w zależności od prędkości skrawania v_c dla stopu:
a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075

Wartości sił skrawania dla poszczególnych stopów, przy danych prędkościach skrawania, są wyraźnie różne, więc statystyczna weryfikacja istotności różnic wydaje się być zbędna. Najwyższe wartości sił skrawania uzyskano dla stopu EN AW 7075, a najniższe dla odlewniczego stopu AlSi10Mg. Potwierdza to, że stopy odlewnicze o zawartości Si < 12%, ze względu na strukturę odlewu są lepiej skrawalne niż stopy do obróbki plastycznej. Siły skrawania w oczywisty sposób rosną ze zwiększeniem szerokości skrawania a_e . W przypadku dwóch najmniejszych szerokości frezowania, dla wszystkich badanych materiałów, trudno jest określić czy siły skrawania różnią się. Dlatego dla tych szerokości frezowania, przy największej prędkości skrawania $v_c = 900$ m/min, przeprowadzono statystyczną weryfikację istotności różnic, a jej wyniki przedstawiono w tabelach 5.1 i 5.2.

Tabela 5.1. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów pomiarów sił skrawania, z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$

Material	Szerokość frezowania	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
AlSi10Mg	$a_e = 0,15 - a_e = 0,2$	1,7768	$\langle 2,484; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	-1,1143	$\langle -2,048; 2,048 \rangle$	$\mu_1 = \mu_2$
AW-7075	$a_e = 0,15 - a_e = 0,2$	1,9830	$\langle 2,484; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	-7,4487	$\langle -2,048; 2,048 \rangle$	$\mu_1 \neq \mu_2$

Dla stopu AlSi10Mg, na podstawie weryfikacji statystycznej, jako bardziej prawdopodobną należy przyjąć hipotezę o równości średnich H_0 . Oznacza to, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ siły skrawania dla szerokości frezowania $a_e = 0,15$ mm i $a_e = 0,2$ mm należy przyjąć za równe.

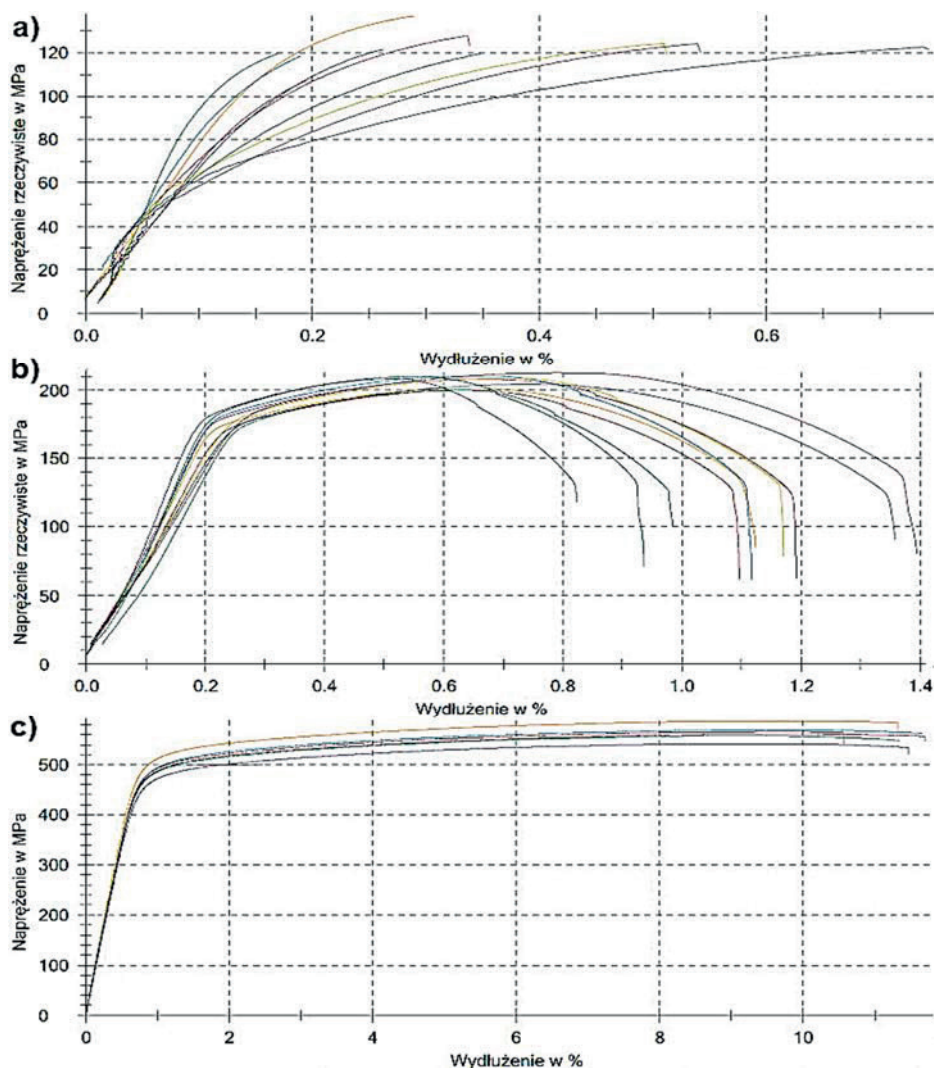
Tabela 5.2. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów pomiarów sił skrawania, z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochra-Coxa; $\alpha = 0,05$

Material	Szerokość frezowania	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
AW-6082	$a_e = 0,15 - a_e = 0,2$	2,6626	$\langle 2,484; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-3,6095	$\langle -2,069; 2,069 \rangle$	$\mu_1 \neq \mu_2$

Dla stopów AW 6082 i AW 7075, siły skrawania dla szerokości frezowania $a_e = 0,15$ mm i $a_e = 0,2$ mm na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ można uznać za różne. Różnice wartości sił skrawania dla szerokości frezowania $a_e = 0,15$ mm i $a_e = 0,2$ mm są najmniejsze, dlatego można stwierdzić, że dla wszystkich pozostałych przypadków wartości sił skrawania różnią się.

5.2. Wyznaczenie charakterystyk materiałowych

W celu zdefiniowania w MES modelu materiałowego niezbędna jest znajomość właściwości mechanicznych badanych stopów, które wyznaczono w trakcie statycznych prób rozciągania przeprowadzonych zgodnie z normą DIN EN 10002-1. Krzywe rozciągania dla poszczególnych stopów uzyskane w trakcie tych prób przedstawiono na rys. 5.2. Natomiast wartości wybranych parametrów materiałowych zestawiono w tabeli 5.3 i na rys. 5.3.



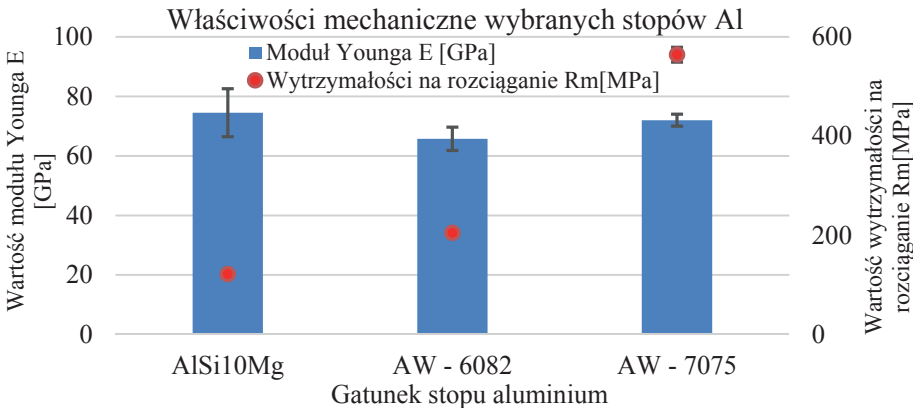
Rys. 5.2. Wyniki badań wytrzymałościowych wg PN EN 10002-1[64] dla stopów:
a) AlSi10Mg, b) AW 6082, c) AW 7075

Na podstawie tych danych można stwierdzić, że z wyjątkiem modułu Younga, właściwości mechaniczne badanych stopów aluminium znacznie się różnią. Szczególnie duże różnice można zaobserwować między stopem odlewniczym AlSi10Mg a stopami do obróbki plastycznej EN AW 6082 i EN AW 7075. Stop ten przy największym współczynniku sprężystości podłużnej posiada najmniejszą wytrzymałość na rozciąganie i najmniejsze wydłużenie względne. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że jest to „kruchy” stop o dużej sztywności, co jest charakterystyczne dla odlewniczych stopów Al-Si. Ponadto warto zauważyć, że z wyjątkiem stopu EN AW – 7075, pozostałe materiały charakteryzowały się znacznym rozrzutem wydłużenia względnego.

Tabela 5.3. Wybrane właściwości mechaniczne badanych stopów aluminium

Gatunek stopu aluminium	Moduł Younga E [GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Wydłużenie względne A_5 [%]
AlSi10Mg	74,5	121,7	0,2
EN AW – 6082	65,7	204,9	1,0
EN AW – 7075	72,0	564,0	10,2

Również między badanymi stopami do obróbki plastycznej występują znaczne różnice właściwości mechanicznych. Stop EN AW-6082 posiada ponad dwukrotnie mniejszą wytrzymałość na rozciąganie i o rząd wielkości mniejsze wydłużenie względne w stosunku do stopu EN AW-7075. Ponadto stop ten z trzech porównywanych materiałów ma najniższy moduł Younga. Otrzymane wartości wybranych właściwości mechanicznych tego stopu potwierdzają jego dużą plastyczność.



Rys. 5.3. Moduł Younga oraz wytrzymałość na rozciąganie wybranych stopów aluminium

Analiza wartości średnich oraz odchylenia standardowego (rys. 5.3) wzbudza wątpliwości, co do różnicy wartości modułów Younga poszczególnych stopów,

dlatego przeprowadzono weryfikację statystyczną wartości tego parametru dla przypadków: AlSi10Mg - AW 6082 oraz AlSi10Mg - AW 7075. Wyniki weryfikacji statystycznej przedstawiono w tabeli 5.4 i 5.5.

Tabela 5.4. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań modułu Younga, z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$

Moduł Younga	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
AlSi10Mg – AW 6082	0,1618	$\langle 0,210; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	2,9233	$(-2,145; 2,145)$	$\mu_1 \neq \mu_2$

Porównując wartości modułu Younga dla stopów AlSi10Mg - AW 6082, na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej można odrzucić hipotezę o równości średnich H_0 jako zbyt mało prawdopodobną na korzyść hipotezy alternatywnej. Oznacza to, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wartości modułów Younga dla tych stopów są różne.

Tabela 5.5. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań modułu Younga, z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$

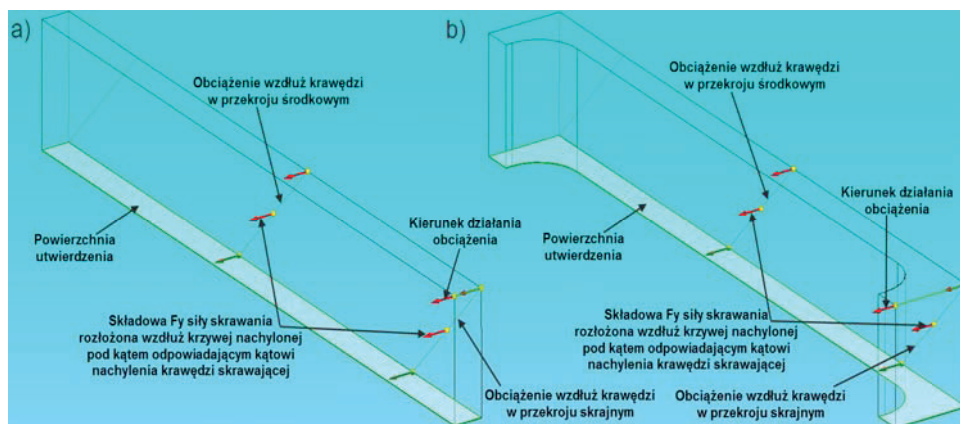
Moduł Younga	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
AlSi10Mg – AW 7075	17,3486	$\langle 4,876; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,8964	$(-2,306; 2,306)$	$\mu_1 = \mu_2$

W przypadku stopów AlSi10Mg - AW 7075, na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej, należy przyjąć hipotezę o równości średnich H_0 . Oznacza to, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wartości modułów Younga dla tych stopów można uznać za równe.

5.3. Definicja siatki oraz warunków brzegowych dla obliczeń MES

W analizie MES zastosowano uproszczony model oddziaływania narzędzia na obrabiany przedmiot. Wzdłuż krzywej nachylonej pod kątem równym kątowi pochylenia krawędzi skrawającej przyłożono statyczną siłę, odpowiadającą zmierzzonej sile skrawania (rys. 5.4). W założeniach model taki odpowiada chwilowemu obciążeniu obrabianego elementu przez krawędź skrawającą narzędzia. W celu porównania wyników obliczeń z rzeczywistymi odkształceniami modele obciążono w dwóch charakterystycznych przekrojach (rys. 5.4):

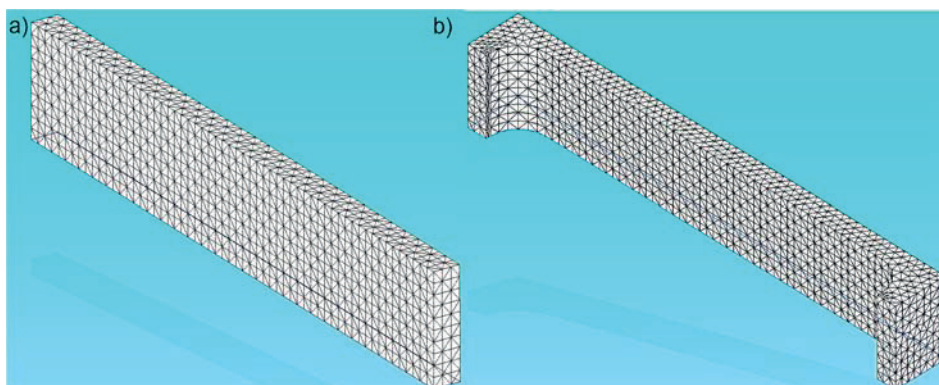
- **przekrój środkowy** – obciążenie środkowej części ścianki,
- **przekrój skrajny** – obciążenie skrajnej części ścianki odpowiadające położeniu narzędzia w momencie rozpoczęcia wychodzenia krawędzi skrawającej z przedmiotu obrabianego.



Rys. 5.4. Modele obciążenia oraz utwierdzenia przyjęte w analizie MES:
a) nieutwardzonych, b) utwardzonych

Obliczenia przeprowadzone dla przypadków obciążeń w przekrojach skrajnych odpowiadają punktom pomiarowym w przekroju A-B (rys. 3.2), natomiast obliczenia dla obciążeń w przekrojach środkowych punktom pomiarowym w przekroju C-D (rys. 3.2).

Na powierzchni podstaw ścianek nałożono więzy odbierające możliwości ich przemieszczenia we wszystkich kierunkach, uzyskując w ten sposób pełne utwierdzenie modelu. Modele geometryczne ścianek poddano procesowi dyskretyzacji w programie NX Nastran dzieląc je na elementy skończone. Do generowania siatki zastosowano tetragonalne elementy bryłowe. Rozmiar elementów dyskretnych był dobrany tak aby wzdłuż krótkich krawędzi ich minimalna liczba nie była mniejsza niż dwa. Przykładowe dyskretne modele ścianek nieutwardzonych i utwardzonych wraz z wygenerowaną siatką elementów skończonych przedstawia rys. 5.5.



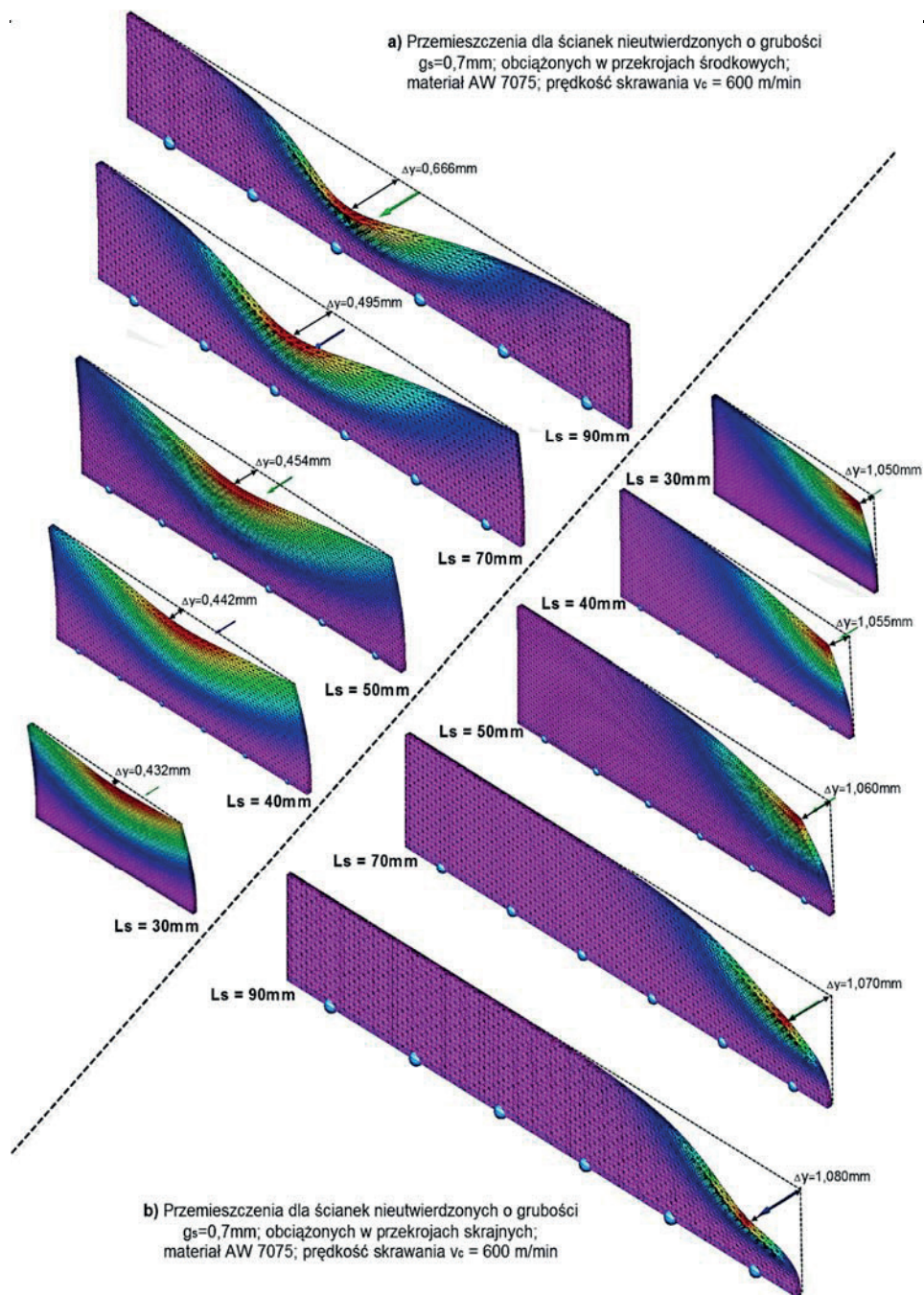
Rys. 5.5. Przykłady wygenerowanych siatek elementów skończonych dla ścianek:
a) nieutwardzonych, b) utwardzonych

Do przeprowadzenia obliczeń MES wykorzystano solver NX Nastran będący częścią modułu symulacyjnego oprogramowania Solid Edge ST6. Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem metody iteracyjnej, a do wyliczenia naprężeń zredukowanych wykorzystano hipotezę Hubera–Misesa–Hencky'ego.

5.4. Analiza przemieszczenia na podstawie obliczeń MES

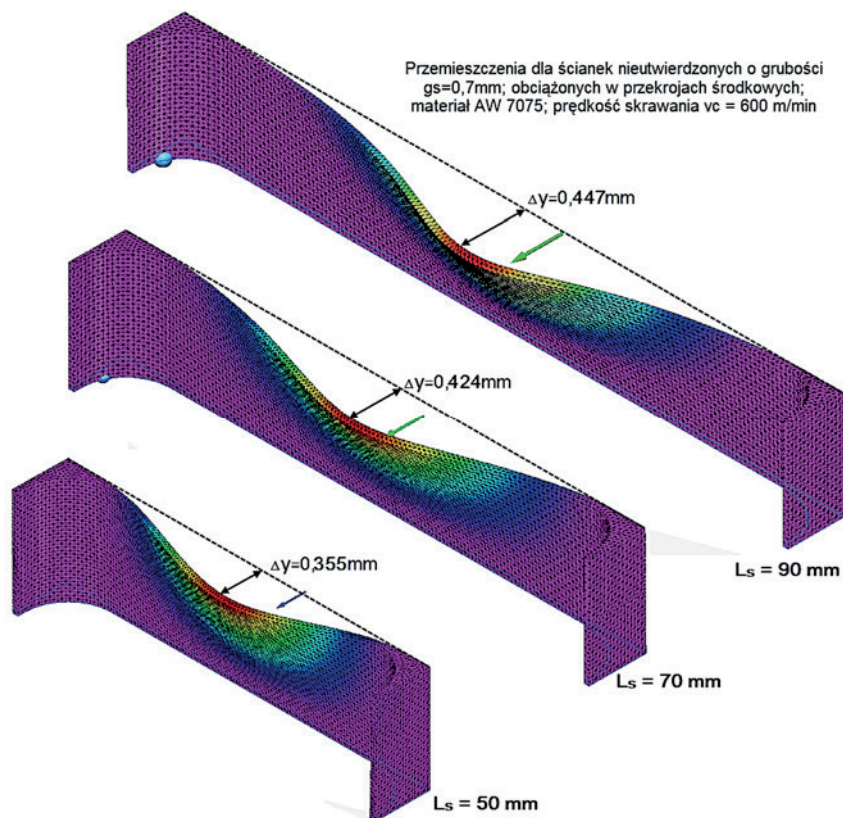
Przeprowadzone badania numeryczne miały określić charakter i wielkość deformacji ścianek pod wpływem sił skrawania. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wynikami badań praktycznych. Miało to na celu określenie przydatności opracowanego modelu matematycznego do wyznaczania odkształcenia obrabianych ścianek oraz stopnia pokrycia otrzymanych wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi. W przypadku otrzymania zbieżnych wyników możliwe będzie wykorzystanie opracowanego modelu do wyznaczania odkształceń elementów obrabianych narzędziami o różnej sztywności.

Wyniki symulacji MES otrzymano w postaci raportów przedstawiających wartości obliczonych naprężeń oraz przemieszczeń. Przykład takiego raportu przedstawia załącznik 4. Otrzymane wyniki umożliwiają obserwację rozkładów naprężenia i odkształcenia badanych elementów w dwóch charakterystycznych obszarach tzn. w skrajnych i środkowych przekrojach ścianek (rys. 5.4). W pracy pominięto analizę naprężenia skupiając się na analizie przemieszczenia, gdyż to ono będzie porównywane z wartościami odkształcenia wyznaczonego eksperymentalnie. Analizie poddano przemieszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni ścianek, co odpowiadało kierunkowi osi Y obrabiarki, dlatego oznaczono je jako Δy . Poniżej przedstawiono przykładowe mapy rozkładu przemieszczenia dla dwóch typów ścianek: ścianki nieutwierdzone (rys. 5.6) oraz ścianki utwierdzone (rys. 5.7). W obydwu przypadkach przedstawiono wyniki symulacji odkształcenia ścianek o różnych długościach L_s i najmniejszej badanej grubości $g_s = 0,7$ mm, wykonanych ze stopu AW-7075. Obciążenie ścianek odpowiadało sile skrawania dla prędkości skrawania $v_c = 600$ m/min, czyli maksymalnej uzyskanej wartości dla tego materiału przy tej grubości ścianki. Dla ścianek nieutwierdzonych wyniki przedstawiono w dwóch przekrojach: środkowych (rys. 5.6a) i skrajnych (rys. 5.6b), natomiast dla ścianek utwierdzonych tylko w przekrojach środkowych. Utwierdzenie ścianek na ich końcach powoduje tak duże usztywnienie konstrukcji, że przemieszczenia w tych przekrojach są pomijalnie małe co będzie przedstawione w dalszej części rozpraw.



Rys. 5.6. Przemieszczenie wyliczone z zastosowaniem MES dla ścianek nieutwardzonych o różnych długościach i grubości $g_s = 0,7\text{ mm}$, dla stopu AW-7075 i obciążenia odpowiadającego sile skrawania przy prędkości $v_c = 600\text{ m/min}$, przyłożonego w przekrojach: a) środkowych, b) skrajnych

Zarówno dla ścianek nieutwardzonych jak i utwardzonych można zaobserwować wzrost przemieszczenia wraz z zwiększeniem długości ścianki. W przypadku ścianek nieutwardzonych w zakresie długości $L_s = 30 \div 90$ mm, dla przekrojów środkowych (rys. 5.6a) przemieszczenia zmieniają się od $\Delta y = 0,432$ do $\Delta y = 0,666$ mm (ponad 50% wzrost), natomiast dla przekrojów skrajnych od $\Delta y = 1,05$ do $\Delta y = 1,08$ mm (czyli ok. 3%). Można więc przyjąć, że w tym przypadku przemieszczenia w przekrojach skrajnych (na końcach ścianek) są stałe niezależnie od ich długości. Są one ponadto znacznie większe niż w przekrojach środkowych (np. dla najkrótszej ścianki $L_s = 30$ mm ponad 2-krotnie). Na rys. 5.6a można zaobserwować, że przemieszczenia Δy dla ścianek o $L_s = 30 \div 50$ mm, rozchodzą się na całej ich długościach a dla ścianek $L_s = 70 \div 90$ mm i dłuższych obejmują tylko ich środkową strefę. Przemieszczenia wzdłuż ścianek, w rozpatrywanym przypadku, obejmują swoim zasięgiem ok. 35 mm. Wartość przemieszczeń oraz ich zasięg wzdłuż długości ścianek maleje wraz ze wzrostem ich grubości.

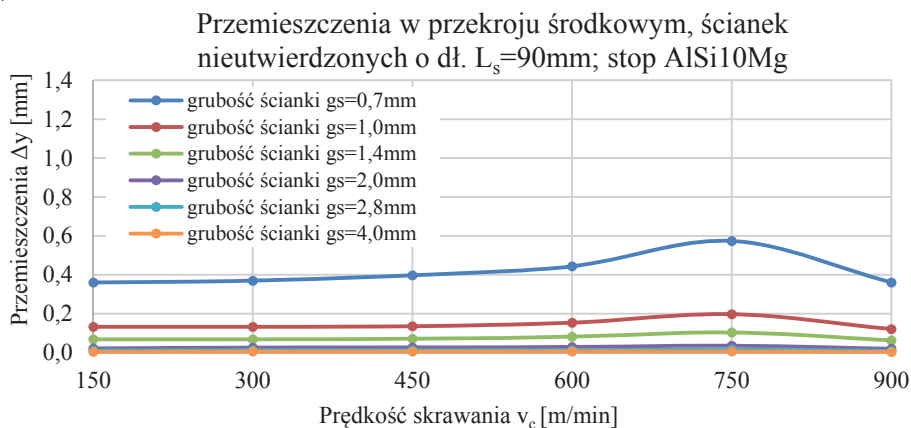


Rys. 5.7. Przemieszczenie wyliczone z zastosowaniem MES dla ścianek utwardzonych o różnych długościach i grubości $g_s = 0,7$ mm, dla stopu AW-7075 i obciążenia, odpowiadającego sile skrawania przy prędkości $v_c = 600$ m/min, przyłożonego w przekrojach środkowych

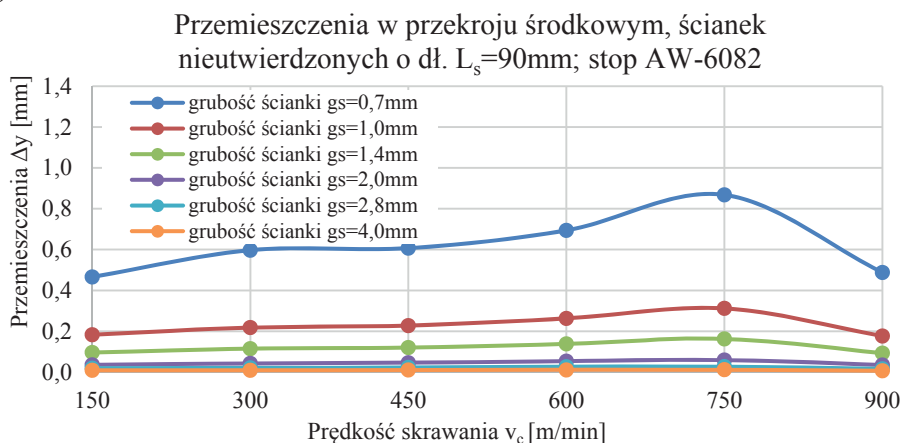
Wykresy rozkładu przemieszczeń z rys. 5.6 i 5.7 bardzo dobrze obrazują odkształcenia ścianek obciążonych siłami skrawania, jednak ze względu na znaczną ilość przeprowadzonych obliczeń nie było możliwe zobrazowanie wszystkich wyników w ten sposób. Pozostałe wyniki symulacji MES przedstawiono w postaci wykresów wartości przemieszczeń ścianek utwierdzonych i nieutwierdzonych o różnych grubościach i długościach, obciążonych w przekrojach skrajnych i środkowych siłami różnymi w zależności od prędkości skrawania.

Wykresy na rys. 5.8 i 5.9 przedstawiają wartości przemieszczeń ścianek nieutwierdzonych o długości $L_s = 90$ mm, odpowiednio w przekrojach środkowych skrajnych w funkcji prędkości skrawania, dla różnych grubości ścianek i trzech wybranych materiałów. Można zaobserwować, że wyliczone przemieszczenia dla ścianek o grubościach w zakresie $g_s = 2\div 4$ mm są pomijalnie małe. Wyraźny wzrost wartości przemieszczeń widoczny jest wraz ze zmniejszaniem grubości ścianek poniżej $g_s = 1,4$ mm. Największe wartości przemieszczeń otrzymano dla ścianek o najmniejszej grubości, tj. $g_s = 0,7$ mm. Wartości przemieszczeń zależą również od prędkości skrawania. Wynika to ze zmian wartości sił skrawania w zależności od prędkości skrawania. Największa wartość przemieszczeń odpowiada prędkości skrawania, dla której uzyskano najwyższe wartości sił skrawania. Jest to graniczna wartość prędkości skrawania między obróbką konwencjonalną a obróbką HSC. Siły skrawania osiągają maksimum dla różnych prędkości skrawania w zależności od badanego materiału (rys. 5.1), dlatego maksymalne przemieszczenia dla stopów AlSi10Mg i AW-6082 uzyskano przy prędkości skrawania $v_c = 750$ m/min, a dla stopu AW-7075 przy $v_c = 600$ m/min. Najwyższą wartość wyliczonych przemieszczeń uzyskano dla stopu AW-6082 przy prędkości skrawania $v_c = 750$ m/min i wyniosła ona $\Delta y = 1,4$ mm.

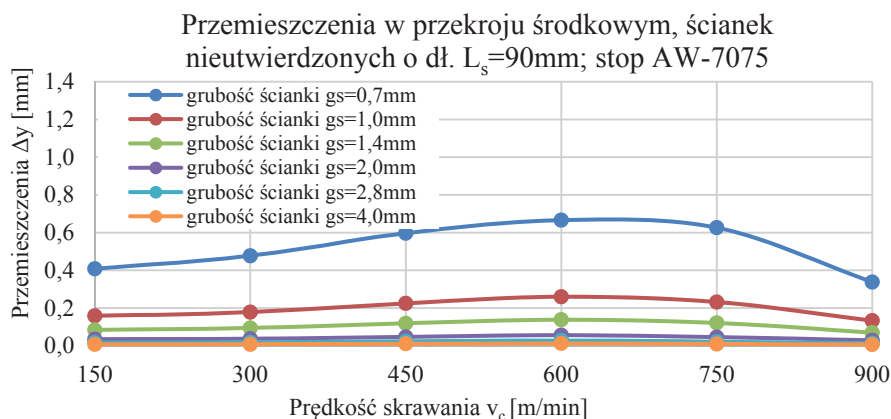
a)



b)

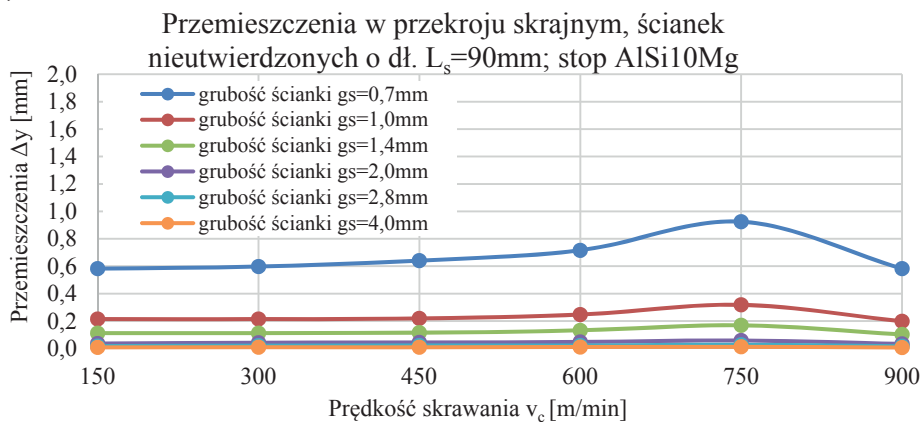


c)

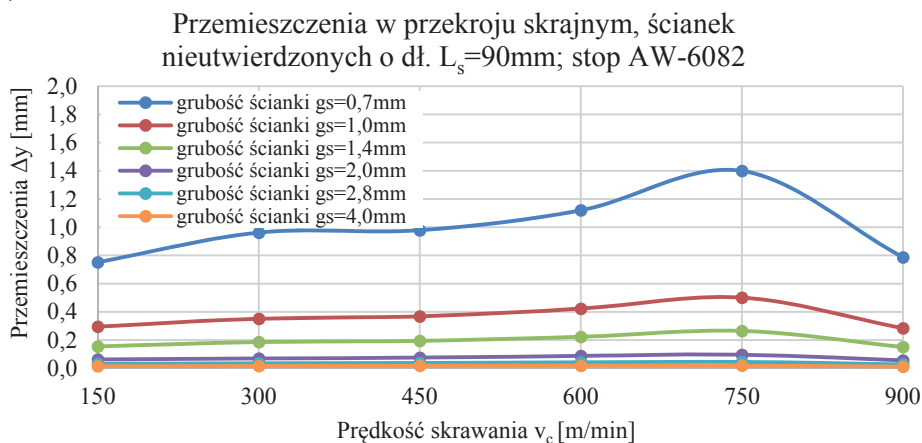


Rys. 5.8. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych o różnych długościach i grubościach dla stopów: a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075

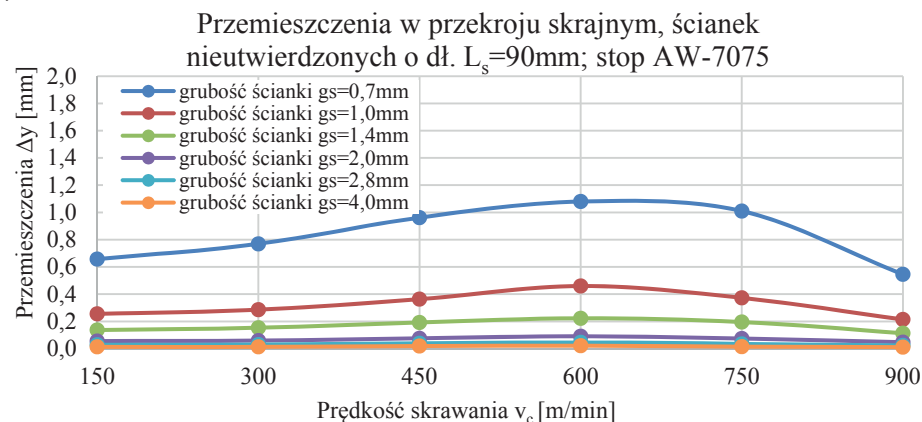
a)



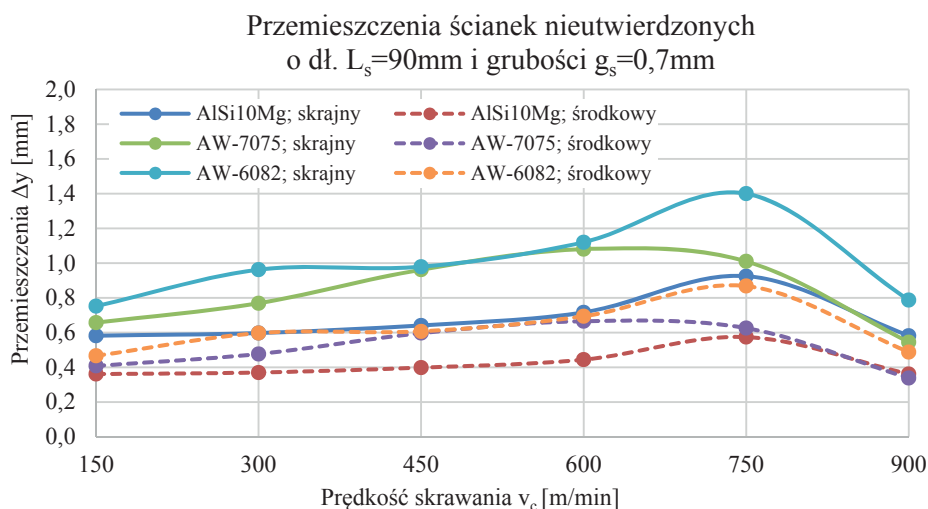
b)



c)



Rys. 5.9. Przemieszczenie w przekrojach skrajnych ścianek nieutwardzonych o różnych długościach i grubościach dla stopów: a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075



Rys. 5.10. Przemieszczenie w przekrojach środkowych i skrajnych ścianek nieutwardzonych

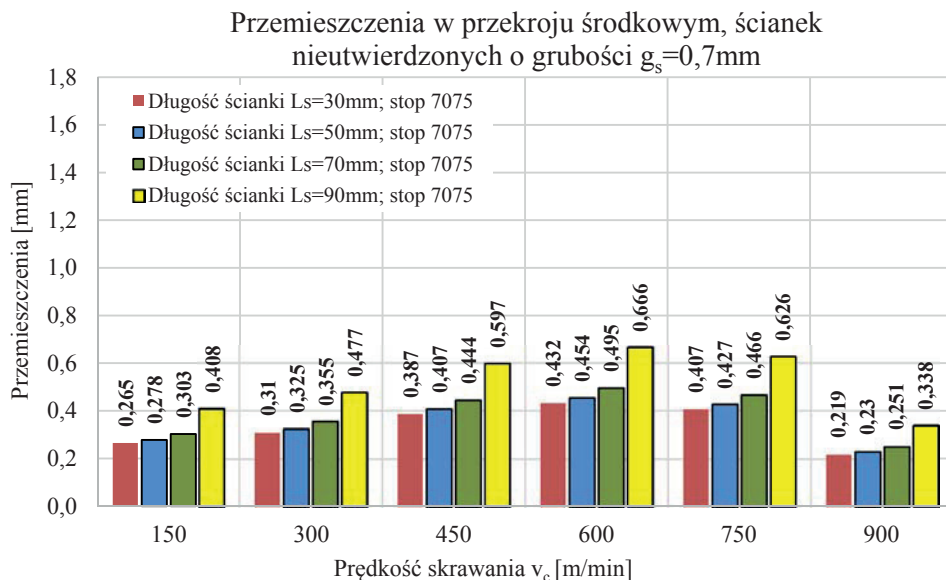
Jak wspomniano wcześniej wyliczone wartości przemieszczeń są różne dla przekrojów skrajnych i środkowych. Na wykresach z rys. 5.10 przedstawiono porównanie wartości przemieszczeń ścianek nieutwardzonych o największej długości $L_s = 90$ mm i najmniejszej grubości $g_s = 0,7$ mm, w przekrojach skrajnych i środkowych, dla trzech przebadanych stopów.

Wartości przemieszczeń w przekrojach skrajnych, w zależności o wartości prędkości skrawania oraz gatunku stopu, są ok. 30÷50 % większe niż w przekrojach środkowych. Największe różnice otrzymano dla prędkości skrawania odpowiadających największym wartościom sił skrawania. W zależności od gatunku stopu wahały się one w zakresie ok. 0,4÷0,5 mm. Na wykresach z rys. 5.10 dobrze widoczna jest różnica wartości wyliczonych przemieszczeń dla poszczególnych gatunków materiałów. Największe wartości przemieszczeń otrzymano dla stopu AW-6082, ponieważ przy siłach skrawania na poziomie zbliżonym dla stopu AlSi10Mg, posiada on mniejszy moduł Younga (tabela 5.3). Stop AlSi10Mg posiada moduł Younga zbliżony do stopu AW-7075, jednak siły skrawania uzyskane przy jego obróbce są znacznie niższe, dlatego przemieszczenia wyliczone dla tego stopu są najmniejsze.

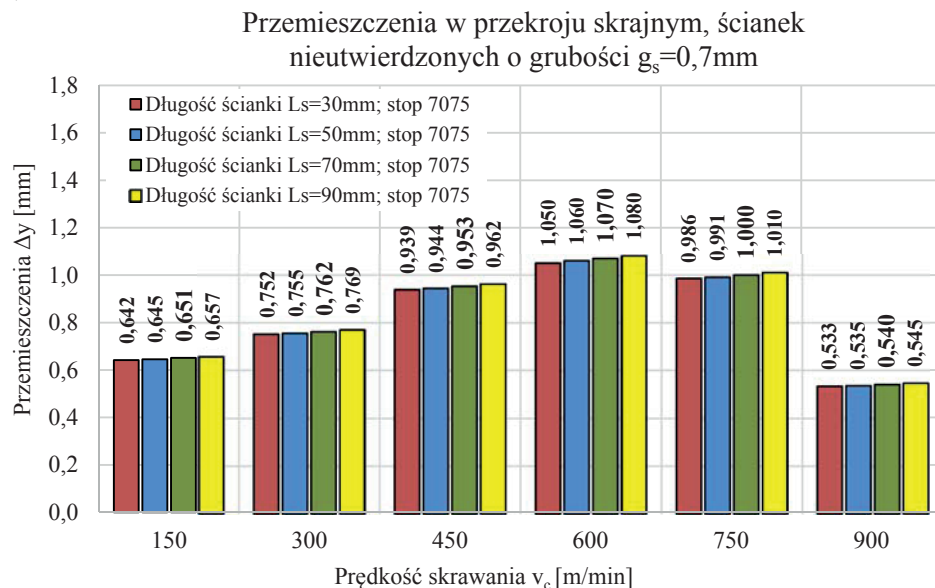
Wartość wyliczonych przemieszczeń zmienia się również w zależności od długości ścianki. Na rys. 5.11 przedstawiono przykładowo zmiany wartości przemieszczeń w funkcji prędkości skrawania dla różnych długości ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s = 0,7$ mm wykonanych ze stopu AW-7075, dla przekrojów środkowych (rys. 5.11a) i skrajnych (rys. 5.11b). Różnice wartości przemieszczeń dla przekrojów skrajnych są nieznaczne (poniżej 3%). Dla przekrojów środkowych znaczący wzrost przemieszczeń występuje dla ścianek o największej długości $L_s = 90$ mm (rys. 5.11a). Największą różnicę wartości przemieszczeń pomiędzy

najkrótszą i najdłuższą ścianką można zaobserwować dla prędkości skrawania odpowiadającej największej sile skrawania dla danego stopu. W rozpatrywanym przypadku dla stopu AW-7075 przy $v_c = 600$ m/min.

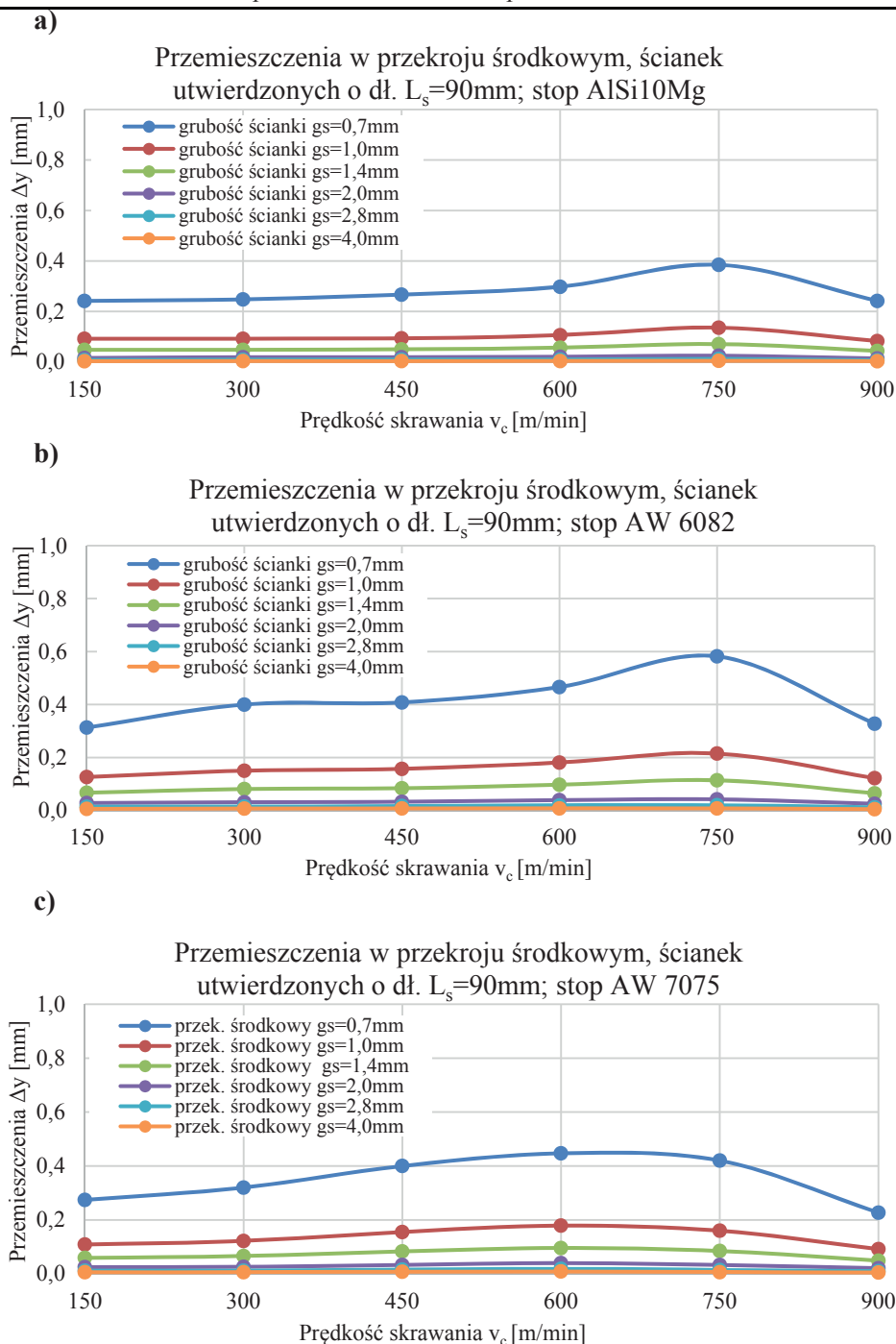
a)



b)



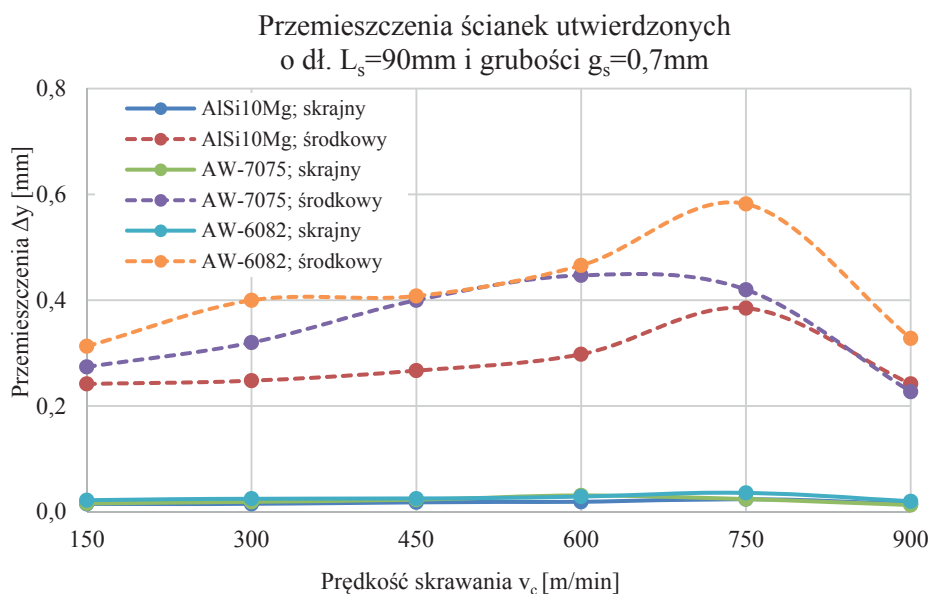
Rys. 5.11. Przemieszczenie ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s = 0,7$ mm i różnych długościach L_s wykonanych ze stopu AW-7075, w przekrojach: a) środkowych, b) skrajnych



Rys. 5.12. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek utwardzonych o różnych długościach i grubości dla stopów: a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075

Na rys. 5.12 przedstawiono zmiany wartości przemieszczeń ścianek utwardzonych o długości $L_s = 90$ mm, dla różnych grubości ścianek i trzech przebadanych materiałów, w zależności od prędkości skrawania. Podobnie jak dla ścianek nieutwardzonych przemieszczenia osiągają maksymalne wartości dla prędkości skrawania, przy których dla poszczególnych materiałów uzyskano największe wartości sił skrawania. Dla grubości ścianek utwardzonych $g_s = 1,0 \div 4,0$ mm wartości ich przemieszczeń w przekrojach środkowych zmieniają się w niewielkim zakresie, a ich maksymalna wartość dla wszystkich przebadanych stopów nie przekracza $\Delta y = 0,2$ mm. Wyraźny wzrost wartości przemieszczeń widoczny jest dla najcieńszej ścianki o grubości $g_s = 0,7$ mm. Maksymalną wartość przemieszczeń uzyskano dla najcieńszej ścianki ze stopu AW- 6082 i wyniosła ona ok. $\Delta y = 0,6$ mm przy prędkości skrawania $v_c = 750$ m/min (rys. 5.12b).

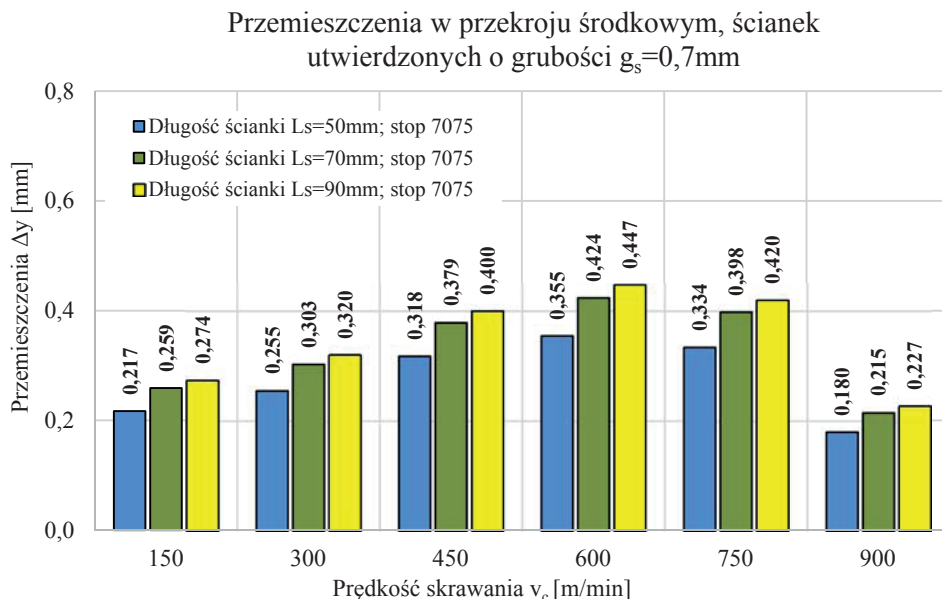
Przemieszczenia w przekrojach skrajnych ścianek utwardzonych w praktyce można przyjąć za bliskie zeru, co jest widoczne na rys. 5.13. Jest to spowodowane usztywnieniem końców ścianek na skutek ich utwardzenia (rys. 3.2 c i d).



Rys. 5.13. Przemieszczenie w przekrojach środkowych i skrajnych ścianek utwardzonych

Podobnie jak dla ścianek nieutwardzonych wartości przemieszczeń ścianek utwardzonych rosną wraz z wzrostem ich długości. Jednak wzrost ten nie jest tak duży jak dla ścianek nieutwardzonych. W zakresie długości ścianek utwardzonych $L_s = 50 \div 90$ mm wynosi on maksymalnie ok. 25%, gdy dla ścianek nieutwardzonych, w tym zakresie ich długości, osiąga ok. 50%.

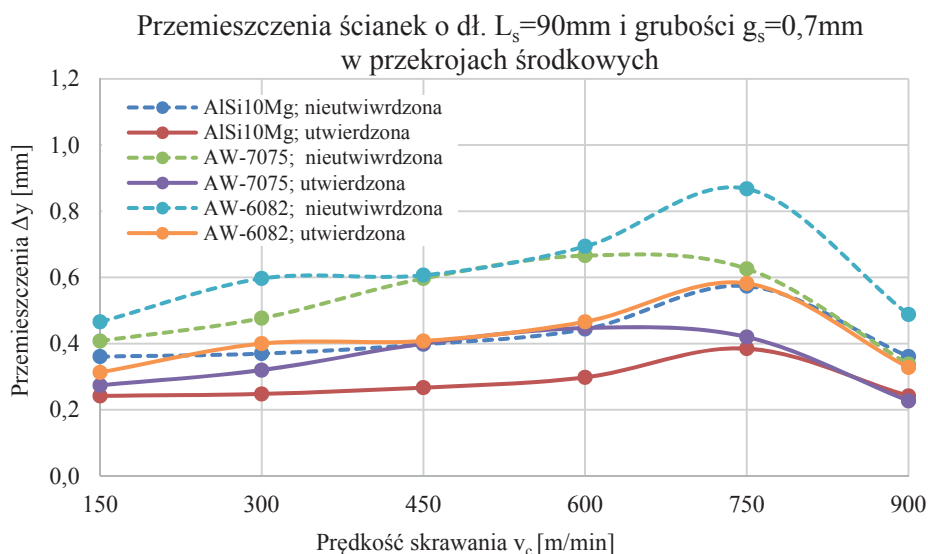
Na rys. 5.14 przedstawiono zmiany wartości przemieszczeń przekrojów środkowych ścianek nieutwardzonych o różnych długościach w zależności od prędkości skrawania.



Rys. 5.14. Przemieszczenie ścianek utwardzonych o grubości $g_s = 0,7\text{ mm}$ i różnych długościach L_s wykonanych ze stopu AW-7075, w przekrojach środkowych

Różnice wartości przemieszczeń w przekrojach środkowych pomiędzy ściankami utwardzonymi i nieutwardzonymi o długościach $L_s = 90\text{ mm}$ i grubościach $g_s = 0,7\text{ mm}$ w zależności od prędkości skrawania przedstawiono na rys. 5.15. Można zaobserwować, że przemieszczenia w przekrojach środkowych ścianek utwardzonych, w porównaniu do ścianek nieutwardzonych o takich samych parametrach geometrycznych, są w zależności od długości ścianki ok. 15÷30% mniejsze.

Dodatkowo w załącznikach 5 i 6 przedstawiono mapy 3D obrazujące w sposób poglądowy zmiany wartości przemieszczeń odpowiednio ścianek nieutwardzonych i utwardzonych o długości $L_s = 90\text{ mm}$ i grubości $g_s = 0,7\text{ mm}$ w przekrojach skrajnych i środkowych dla trzech badanych materiałów.



Rys. 5.15. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych i utwardzonych o długości $L_s = 90$ mm i grubości $g_s = 0,7$ mm

Analizując powyższe wykresy możemy stwierdzić, że zarówno dla ścianek utwardzonych jak i nieutwardzonych, wartości przemieszczeń rosną wraz z prędkością skrawania do momentu osiągnięcia tzw. granicznej prędkości skrawania, powyżej której możemy mówić o obróbce szybkościowej HSC. Zastosowanie prędkości skrawania w zakresie HSC obniża wartości sił skrawania, co wpływa na obniżenie wartości przemieszczeń. Przemieszczenia wyliczone dla największej zastosowanej prędkości $v_c = 900$ m/min, osiągają wartości zbliżone do uzyskanych dla najmniejszej prędkości $v_c = 150$ m/min, a dla stopu AW-7075 są nawet mniejsze. Praktyczne potwierdzenie wyników obliczeń byłoby bardzo korzystne, gdyż dla większych prędkości skrawania, zapewniających lepszą wydajność, uzyskano by podobne efekty jak dla prędkości skrawania z zakresu obróbki konwencjonalnej.

Warto zwrócić uwagę, że zarówno dla ścianek utwardzonych i nieutwardzonych, porównując różnice w odkształceniach w środkowej części ścianki, można zauważyć tendencje do zmniejszania tych różnic wraz ze wzrostem długości ścianki. W badaniach MES można zauważyć charakterystyczną „falę odkształcenia” o określonej długości, zależnej od grubości ścianki i przyłożonego obciążenia. Określenie długości tych fal dla konkretnych warunków obróbki może być ważną informacją dla projektujących cienkościenne konstrukcje kieszeniowe.

6. Analiza dokładności geometrycznej obrobionych elementów w świetle badań eksperymentalnych

Ze względu na znaczną ilość danych doświadczalnych w pracy szczegółowo przeanalizowano wyniki dla stopu EN AW-7075. Stop ten spośród wybranych materiałów jest najczęściej stosowany w przemyśle, zwłaszcza lotniczym. Dla pozostałych materiałów przeprowadzono analizę porównawczą wyników obróbki w zależności od zmian wybranych parametrów wejściowych. Podobnie jak przy obliczeniach MES oddzielnie omówiono, a następnie porównano wyniki dla ścianek nieutwierdzonych i utwierdzonych.

6.1. Analiza błędów kształtu obrobionych elementów

Pomiary w punktach przedstawionych na rys. 3.12 pozwoliły na wyznaczenie odchyłek kształtu oraz zarysu powierzchni bocznych wykonanych ścianek. Na rys. odwzorowujących kształty ścianek (rys. 6.1, 6.3, 6.5, 6.8, 6.11, 6.14, 6.16, 6.18, 6.21, 6.24), przedstawiono zarysy tylko jednej z ich powierzchni bocznych, które na rys. 3.13 oznaczone są kolorem zielonym. Wynika to z symetryczności konstrukcji. Kształty dwu powierzchni bocznych poszczególnych ścianek są odbiciem lustrzanym względem płaszczyzny przechodzącej przez ich środek zgodnie z kierunkiem osi Y (rys. 3.13).

Wyniki badań przedstawiono w aspekcie weryfikacji hipotezy badawczej. Kolejno omówiono wpływ na dokładność wykonanych ścianek następujących czynników:

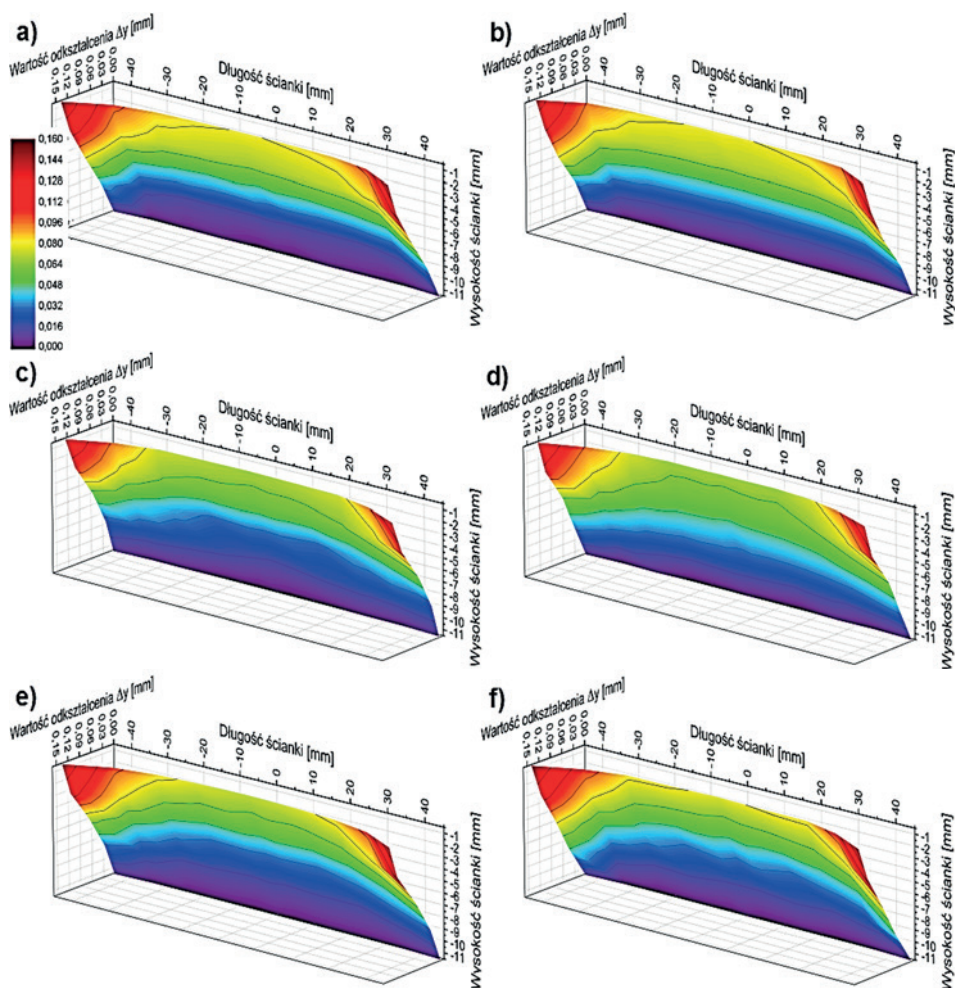
- prędkości skrawania v_c ,
- sztywności narzędzi j ,
- gatunku stopu Al.

Omówiono także wpływ geometrii wykonanych ścianek (grubość g_s i długość L_s ścianek oraz ich utwierdzenia lub jego braku).

Ścianki nieutwierdzone

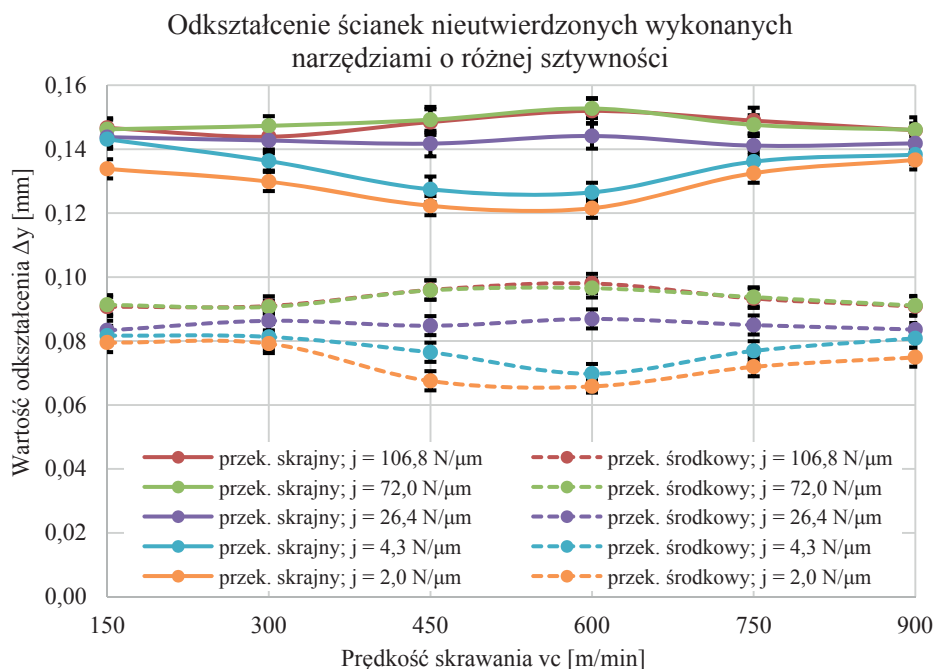
Na rys. 6.1 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych ścianek nieutwierdzonych, o największych długościach $L_s = 90$ mm i najmniejszych grubościach $g_s = 0,7$ mm, obrobionych z różnymi prędkościami skrawania, narzędziem o najmniejszej sztywności $j = 2,0$ N/ μ m. Są to krytyczne wymiary ścianek, dla których uzyskano największe dodatnie odkształcenia. Na rysunkach widoczne jest charakterystyczne odchylenie na zewnątrz ścianek przy górnej ich krawędzi (zgodnie z rys. 3.12 dodatnia wartość odchyłki). Jest ono wynikiem sprężystych odkształceń ścianek, podczas ich obróbki, w wyniku oddziaływania sił skrawania. Ścianki, głównie pod wpływem prostopadłej do nich składowej F_y siły skrawania (rys. 3.9b), są odpychane przez frez, a po jego przejściu odchylają się w kierunku przeciwnym. Powoduje

to powstanie w przekroju poprzecznym trapezowego zarysu ścianek (rys. 1.25b), z szerszą podstawą (większa grubość ścianki) przy ich górnej krawędzi (rys. 3.12b). Takie ukształtowanie charakterystyczne jest dla ścianek o małych grubościach w zakresie $g_s = 1,4 \div 0,7$ mm. Ze względu na zmniejszoną sztywność końcowych części ścianek nieutwardzonych ich odkształcenia w przekrojach skrajnych są znacznie większe niż w środkowych. Różnica wartości odchyłań dla najcieńszych ścianek, w zależności od prędkości skrawania, gatunku materiału i sztywności narzędzia wynosi ok. $20 \div 40\%$. Szczególnie dużym odkształceniom ulegają końcowe naroża ścianek.



Rys. 6.1. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm; materiał EN AW-7075; sztywność narzędzia $j=2,0$ N/ μ m; prędkości skrawania v_c : a) 150 m/min, b) 300 m/min, c) 450 m/min, d) 600 m/min, e) 750 m/min, f) 900 m/min

W rozpatrywanym przypadku (rys. 6.1) odchylenie ścianek w przekrojach skrajnych, w zależności od prędkości skrawania wynosi ok. $0,12 \pm 0,13$ mm, a w środkowych o $0,06 \pm 0,08$ mm. Wartości odchylen w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o długościach $L_s=90$ mm i grubościach $g_s=0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności, w zależności od zastosowanej prędkości skrawania przedstawiono na wykresach rys. 6.2.



Rys. 6.2. Wartości odkształceń w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o długościach $L_s=90$ mm i grubościach $g_s=0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 z różnymi prędkościami skrawania

Na wykresach tych można zaobserwować, że odchylenia dla najmniejszych prędkości skrawania $v_c = 150$ i $v_c = 300$ m/min oraz największej prędkości $v_c = 900$ m/min mają zbliżoną wartość, niezależnie od sztywności zastosowanego narzędzia. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania w zakresie $v_c = 450$ – 600 m/min, powiększa się różnica między wartościami odchylen dla najbardziej i najmniej sztywnych narzędzi. Jest ona największa dla prędkości skrawania $v_c = 600$ m/min (ok. 0,04 mm), przy której uzyskano największe siły skrawania. Dalsze zwiększenie prędkości skrawania powoduje jej obniżenie, co wynika ze spadku sił skrawania. Na wartości odkształcenia ścianek wpływają dwa zjawiska, tzn. ich ugięcie podczas obróbki oraz ugięcie narzędzi (rys. 1.25a). Ponieważ ugięcie frezów o największej sztywności $j = 72,0$ i $106,8$ N/ μ m jest praktycznie zerowe to na dokładność obróbki tymi narzędziami

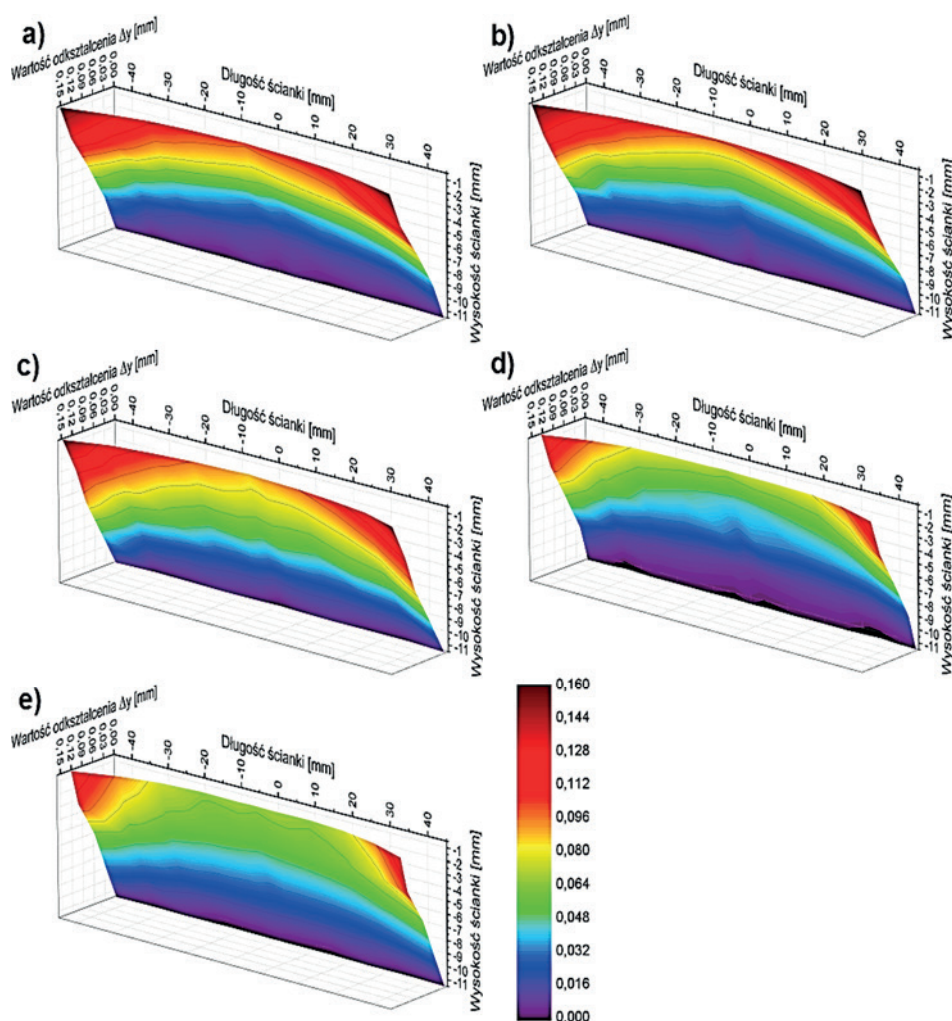
dziami wpływa jedynie ugięcie ścianek. Dlatego dla tych frezów odkształcenia ścianek rosną wraz ze zwiększeniem wartości sił skrawania, które zależą od prędkości skrawania. Dla narzędzi o małej sztywności wartość odkształcenia jest wypadkową ugięcia ścianek i narzędzi. Wzrost sił skrawania w zakresie prędkości skrawania $v_c = 150\div 600$ m/min, zwiększa ugięcie tych narzędzi, a w konsekwencji sumaryczne odkształcenie ścianek maleje. Przedstawione na rys. 6.2 wykresy odnoszą się do stopu EN AW-7075. Podobne zależności można zaobserwować dla stopów EN AW-6082 i AlSi10Mg. Jednak dla tych stopów maksymalne różnice wartości odkształceń ścianek wykonanych narzędziami o skrajnych sztywnościach występują przy prędkości skrawania $v_c = 750$ m/min. Na rys. 6.2 możemy zaobserwować, że dla narzędzia o największej sztywności $j = 72,0$ i $106,8$ N/ μ m odkształcenia ścianek mają zbliżoną wartość. Dla tych dwu narzędzi przeprowadzono weryfikację statystyczną istotności różnic, której wyniki przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształceń ścianek wykonanych narzędziami o sztywnościach $j = 72,0$ i $j = 106,8$ N/ μ m; $\alpha = 0,05$

Sztywność j [N/ μ m]	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
$j=72,0$ - $j=106,8$	0,0608	$(0,0526; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-1,050	$(-4,303; 4,303)$	$\mu_1 = \mu_2$

Na podstawie weryfikacji statystycznej, należy przyjąć hipotezę o równości średnich H_0 za bardziej prawdopodobną od hipotezy alternatywnej. Oznacza to, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wartości odkształceń ścianek obrobionych narzędziami o sztywnościach $j = 72,0$ i $j = 106,8$ N/ μ m można uznać za równe. Przeprowadzona weryfikacja statystyczna dotyczy wyników pomiarów dla jednego, wybranego zespołu danych wejściowych, jednak analizując pozostałe wyniki badań można potwierdzić równość wyników dla dwóch rozpatrywanych narzędzi.

W dalszej kolejności omówiono wpływ sztywności narzędzi na dokładności wykonania ścianek. Na rys. 6.3 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych ścianek nieutwierdzonych, o największych długościach $L_s = 90$ mm i najmniejszych grubościach $g_s = 0,7$ mm, obrobionych z prędkością skrawania $v_c = 600$ m/min, narzędziami o różnej sztywności. Wybrano ścianki obrabiane z prędkością $v_c = 600$ m/min ponieważ dla stopu EN AW-7075 jest to krytyczna wartość prędkości skrawania, przy której występują największe siły skrawania. Analizując kształty powierzchni bocznych ścianek przedstawionych na rys. 6.3 można zaobserwować, że największe odkształcenia otrzymano w przekrojach skrajnych ścianek obrobionych narzędziami o największej sztywności $j = 72,0$ i $j = 106,8$ N/ μ m (rys. 6.3 a i b). Jest to zgodne z wcześniej omówionymi wynikami. Ugięcie narzędzi zwiększa się wraz ze spadkiem ich sztywności co przekłada się na obniżenie wartości odkształceń ścianek.



Rys. 6.3. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90\text{ mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{ mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{ m/min}$; sztywność narzędzi j: a) $106,8\text{ N}/\mu\text{m}$, b) $72\text{ N}/\mu\text{m}$, c) $26,4\text{ N}/\mu\text{m}$, d) $4,3\text{ N}/\mu\text{m}$, e) $2,0\text{ N}/\mu\text{m}$

Badania przeprowadzono ze stałym względnym nadadkiem (tabela 3.3). Przekrój warstwy skrawanej zmniejszał się wraz z grubością obrabianej ścianki, co przekładało się na obniżenie sił skrawania. Dla ścianek o grubości $g_s = 0,7\text{ mm}$, w zależności od prędkości skrawania v_c , wartość składowej siły skrawania zmienia się w zakresie $F_y = 34\div 67,4\text{ N}$. Są to niewielkie wartości, dlatego różnica odkształcenia ścianek o tej grubości, w zależności od sztywności narzędzi, jest również mała. Dla przekrojów skrajnych między frezem o największej i najmniejszej sztywności wynosi ona ok. $0,03\text{ mm}$. Ugięcie frezów jest znacznie większe dla najgrubszych obrabianych ścianek, co będzie pokazane w dalszej części pracy.

Wartość ugięcia frezów w zależności od ich sztywności (rys. 4.2) oraz obciążających je sił skrawania (rys. 5.1) możemy wyliczyć przekształcając zależność 1.3:

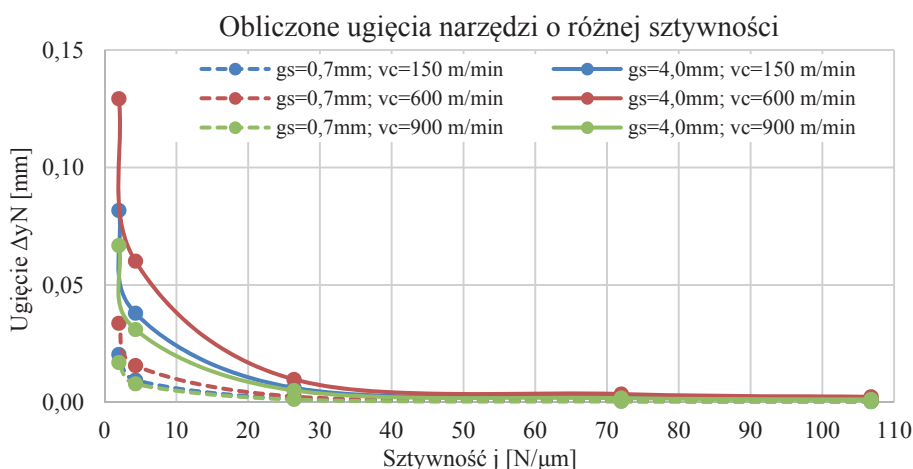
$$j_y = \frac{F_y}{\Delta y} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \implies \Delta y = \frac{F_y}{j_y} [\mu m]$$

Wyniki obliczeń ugięć narzędzi w zależności od ich sztywności i obciążenia siłami odpowiadającymi obróbce ścianek o grubości $g_s = 4,0$ i $0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 z trzema różnymi prędkościami skrawania przedstawiono w tabeli 6.2 i na rys. 6.4.

Tabela 6.2. Wyniki obliczeń ugięcia narzędzi o różnych sztywnościach

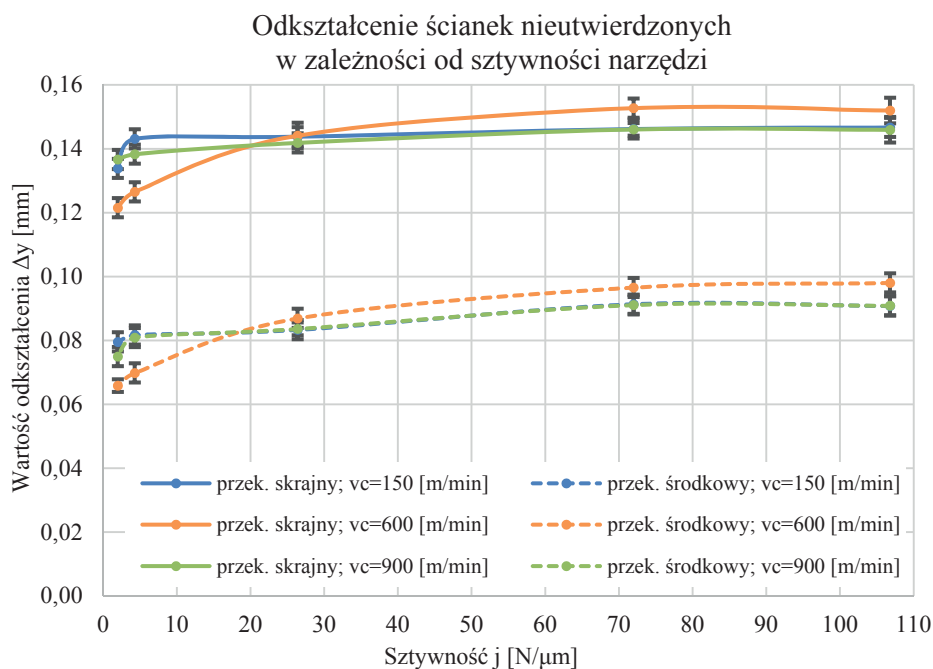
Sztywność j [N/ μ m]	Ugięcie narzędzia Δy_N [mm]					
	$g_s=0,7$ mm; $v_c=150$ m/min	$g_s=0,7$ mm; $v_c=600$ m/min	$g_s=0,7$ mm; $v_c=900$ m/min	$g_s=4,0$ mm; $v_c=150$ m/min	$g_s=4,0$ mm; $v_c=600$ m/min	$g_s=4,0$ mm; $v_c=900$ m/min
106,8	0,0004	0,0006	0,0003	0,0015	0,0024	0,0013
72,0	0,0006	0,0009	0,0005	0,0023	0,0036	0,0019
26,4	0,0015	0,0026	0,0013	0,0062	0,0098	0,0051
4,3	0,0095	0,0157	0,0079	0,0380	0,0601	0,0311
2,0	0,0204	0,0337	0,0170	0,0817	0,1293	0,0668

Na rys. 6.4 można zaobserwować, że obliczone ugięcie narzędzi o sztywnościach z zakresu $j = 106,4 \div 26,4$ N/ μ m zmienia się w niewielkim stopniu. Wyraźny wzrost ugięcia występuje dla narzędzi o najmniejszych sztywnościach, tzn. $j = 4,3$ N/ μ m i $j = 2,0$ N/ μ m.



Rys. 6.4. Wartości ugięcia narzędzi o różnej sztywności dla wybranych grubości ścianek g_s i prędkości skrawania v_c

Otrzymane wyniki obliczeń nie mogą być jednak przyjęte jako rzeczywiste wartości ugięcia narzędzia podczas obróbki, gdyż nie uwzględniają złożoności procesu skrawania (m.in. dynamiki procesu). Przedstawiają jedynie wartość odkształcenia narzędzia pod wpływem statycznej siły będącej estymatą rzeczywistej siły skrawania. Dają jednak pogląd o możliwej wartości ugięcia narzędzia, które może wynosić nawet powyżej $\Delta y_N = 0,13$ mm. Wyliczone ugięcie nie może również być równoznaczne ze zmniejszeniem wartości odkształcenia ścianki. Widoczne jest to na wykresach z rys. 6.5. Z obliczeń wynika, że wyraźny wzrost ugięcia występuje dla narzędzi o sztywności poniżej $j = 26,4$ N/ μ m. Powinno to skutkować znacznym obniżeniem odkształcenia ścianki. Zjawisko to występuje jednak tylko dla prędkości skrawania, dla których uzyskano największe siły skrawania. W pozostałych przypadkach spadek wartości odkształcenia występuje dla narzędzia o najmniejszej sztywności $j = 2,0$ N/ μ m. Możemy zaobserwować, że dla narzędzi o dużej sztywności zwiększenie sił skrawania dla prędkości skrawania $v_c = 600$ m/min powoduje zwiększone odkształcenia ścianek. Poniżej sztywności $j = 26,4$ N/ μ m ugięcie narzędzi wpływa na zmniejszenie odkształcenia ścianek. Przeprowadzone rozważania dotyczą ścianek o najmniejszej grubości $g_s = 0,7$ mm. Ze względu na zmianę sztywności, w zależności od grubości i długości ścianek, ich odkształcenia jak i ugięcia narzędzi mają inny charakter.



Rys. 6.5. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwierdzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności

Na rys. 6.5 można zaobserwować zbieżność wartości odkształcenia ścianek wykonanych z prędkościami skrawania $v_c = 150$ m/min i $v_c = 900$ m/min. W celu zweryfikowania tej zbieżności przeprowadzono analizę statystyczną, której wyniki przedstawiono w tabeli 6.3.

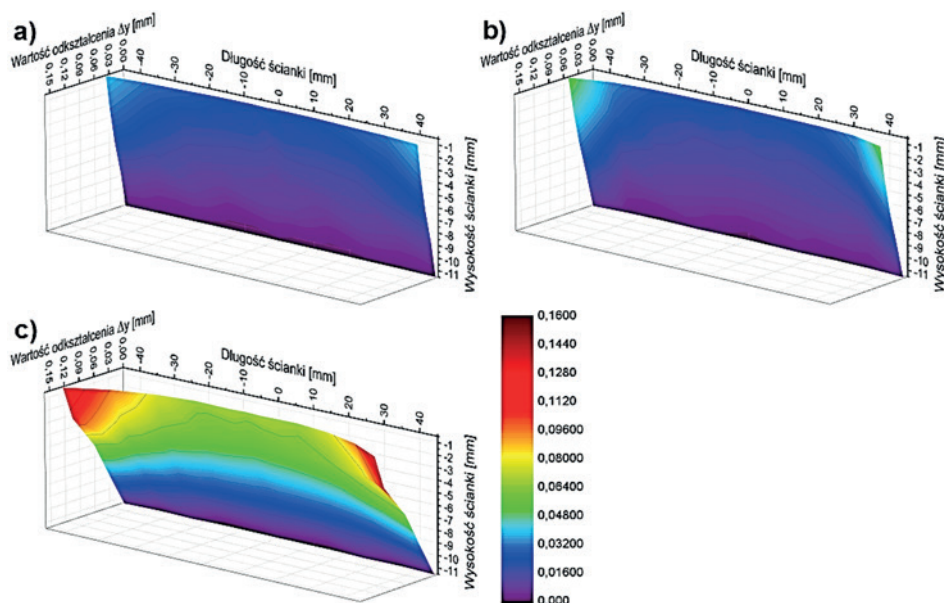
Tabela 6.3. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształcenia ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z prędkościami skrawania $v_c = 150$ m/min i $v_c = 900$ m/min; $\alpha = 0,05$

Sztywność j [N/ μ m]	Prędkości skrawania v_c [m/min]	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
$j = 26,4$	$v_c = 150 - v_c = 900$	1	$\langle 19; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,8165	$\langle -2,776; 2,776 \rangle$	$\mu_1 = \mu_2$
Sztywność j [N/ μ m]	Prędkości skrawania v_c [m/min]	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
$j = 106,8$	$v_c = 150 - v_c = 900$	1	$\langle 0,053; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	0,4083	$\langle -2,776; 2,776 \rangle$	$\mu_1 = \mu_2$
$j = 2,0$	$v_c = 150 - v_c = 900$	24,764	$\langle 19; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-0,9685	$\langle -4,303; 4,303 \rangle$	$\mu_1 = \mu_2$

Na podstawie statystycznej weryfikacji różnic należy przyjąć za bardziej prawdopodobną hipotezę zerową H_0 o równości średnich co oznacza, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wartości odkształcenia ścianek wykonanych z prędkościami skrawania $v_c = 150$ m/min i $v_c = 900$ m/min można uznać za równe. Powyższa analiza dotyczy ścianek o najmniejszej grubości wykonanych ze stopu EN AW-7075, jednak podobne rezultaty otrzymano przy obróbce dwu pozostałych stopów, co można zaobserwować na rys. 6.7 i 6.8. Otrzymane w tym zakresie wyniki badań doświadczalnych potwierdzają wyniki obliczeń z zastosowaniem MES. Przemawia to na korzyść stosowania zwiększonych prędkości skrawania, jednak poza odkształceniem ścianek należy uwzględnić jakość wykonania ich powierzchni. Będzie to zweryfikowane w dalszej części pracy poprzez analizę chropowatości obrobionych ścianek.

W celu weryfikacji części hipotezy badawczej, dotyczącej wpływu rodzaju stopu aluminium na dokładność wykonywanych elementów, w dalszej części rozprawy omówiono efekty obróbki ścianek wykonanych z trzech wybranych stopów aluminium, tzn.: AlSi10Mg, EN AW-6082 i EN AW-7075. Na rys. 6.6 przedstawiono kształty powierzchni bocznych ścianek o grubości $g_s = 0,7$ mm i długości $L_s = 90$ mm, wykonanych z tych stopów narzędziem o sztywności $j = 2,0$ N/ μ m. Porównując te kształty można stwierdzić, że największym odkształceniom w trakcie obróbki ulegają ścianki wykonane ze stopu EN AW-7075. Jest to materiał o dużej sprężystości i wytrzymałości. Ze względu na dużą sprężystość ścianki wykonane z tego materiału ulegają w trakcie obróbki znacznie większym odkształceniom sprężystym niż wykonane z pozostałych dwóch materiałów.

Po przejściu narzędzia następuje ich „sprężysty powrót” i uzyskiwane jest pogrubienie ścianki przy jej górnej krawędzi (rys.3.12b). Najmniejszym odkształceniom sprężystym ulegają ścianki wykonane z odlewniczego stopu $AlSi10Mg$. Stop ten posiada podobny moduł Younga jak stop $EN AW-7075$, charakteryzuje się jednak znacznie większą „kruchością”, mniejszymi oporami skrawania, co jest charakterystyczne dla stopów odlewniczych i przekłada się na obniżenie sił skrawania. Czynniki te powodują, że odkształcenia sprężyste ścianek wykonanych z tego stopu, w trakcie ich obróbki, są małe. Przekłada się to na obniżenie uzyskanych błędów kształtu.



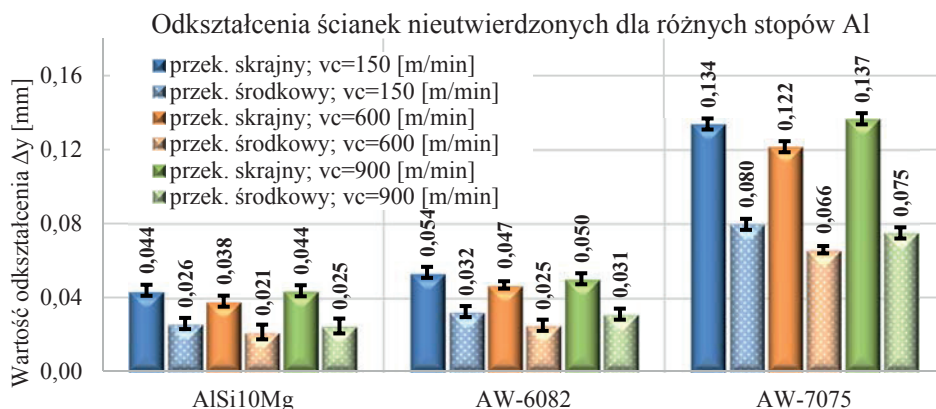
Rys. 6.6. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N}/\mu\text{m}$; materiał: a) $AlSi10Mg$, b) $EN AW-6082$, c) $EN AW-7075$

Odształcenia ścianek wykonanych ze stopu $EN AW-6082$ mają zbliżone wartości do otrzymanych dla stopu $AlSi10Mg$ (rys. 6.6, 6.7 i 6.8). W tabeli 6.4 przedstawiono wyniki weryfikacji statystycznej istotności różnic dla tych dwóch stopów. Po odrzuceniu hipotezy zerowej H_0 o równości średnich możemy przyjąć, że na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, odkształcenia ścianek wykonanych ze stopów $AlSi10Mg$ i $EN AW-6082$ są różne. Stop $EN AW-6082$, ze względu na małą zawartość składników stopowych, charakteryzuje się największą plastycznością spośród trzech badanych materiałów. Mała sprężystość tego materiału (najniższy moduł Younga z badanych stopów) powoduje, że ulega on nieznacznym odkształceniom sprężystym w trakcie obróbki, co przekłada się na niewielkie odkształcenia wykonanych z niego ścianek.

Tabela 6.4. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształcenia ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z prędkościami skrawania $v_c = 150$ m/min i $v_c = 900$ m/min; $\alpha = 0,05$

Prędkości skrawania v_c [m/min]	Gatunek stopu Al	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
$v_c=600$ m/min	AlSi10Mg – AW-6082	2,259	$\langle 19; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	-14,284	$(-2,776; 2,776)$	$\mu_1 \neq \mu_2$
Prędkości skrawania v_c [m/min]	Gatunek stopu Al	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
$v_c=150$ m/min	AlSi10Mg – AW-6082	0,9943	$\langle 0,0526; +\infty \rangle$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-4,0323	$(-2,776; 2,776)$	$\mu_1 \neq \mu_2$

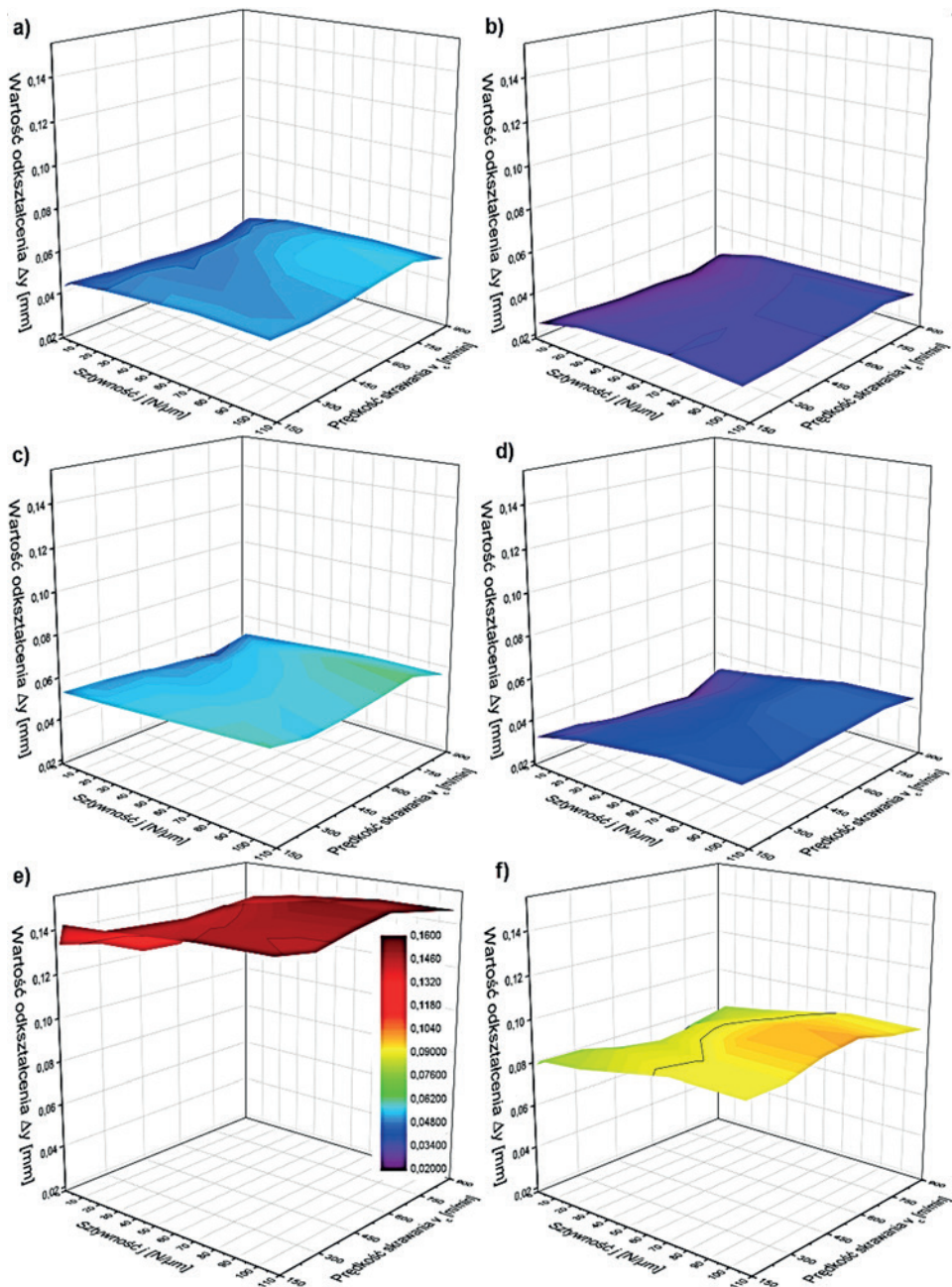
Należy zauważyć, że dla małych szerokości frezowania $a_e = 0,15 \div 0,3$ mm, a więc dla obróbki najcieńszych ścianek w zakresie grubości $g_s = 0,7 \div 1,4$ mm, przy obróbce tego stopu występują najwyższe siły skrawania (rys. 5.1c). W połączeniu z małym współczynnikiem sprężystości podłużnej, daje to w obliczeniach MES najwyższe wartości przemieszczenia (patrz podrozdział 5.4). Jest to niezgodne z wynikami badań doświadczalnych. Przyczyną tego jest prawdopodobnie zastosowany w programie MES algorytm obliczeń, stosujący uproszczony model materiałowy nieuwzględniający wszystkich czynników, np. plastyczności materiału. Zwiększone siły skrawania dla tego materiału, w stosunku do dwóch pozostałych, są wywołane utrudnioną dekohezją stopów aluminium grupy I (patrz podrozdział 1.3). Przy małych szerokościach frezowania proces „rozrywania” materiału może chwilowo przechodzić w jego nagniatanie, co w połączeniu z dużą ciągliwością, adhezją do materiału narzędziowego oraz podatnością do umacniania zgniotem stopów tej grupy, jest przyczyną zwiększonych sił skrawania.



Rys. 6.7. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych z różnych stopów Al narzędziem o sztywności $j=2,0$ N/ μ m

Na rys. 6.7 porównano wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek o długościach $L_s = 90$ mm i grubościach $g_s = 0,7$ mm wykonanych z trzech różnych materiałów. Przedstawiono wartości odkształcenia ścianek nieutwardzonych obrobionych z trzema prędkościami skrawania: $v_c = 150$, i 900 m/min, dla których uzyskano najmniejsze siły skrawania oraz $v_c = 600$ m/min odpowiadającej największej sile skrawania. Można zaobserwować, że odkształcenia ścianek dla prędkości skrawania $v_c = 150$ i 900 m/min mają bardzo podobne wartości, co zostało potwierdzone statystycznie (tabela 6.3). Jak stwierdzono wcześniej największe odkształcenia uzyskano dla ścianek wykonanych ze stopu EN AW-7075. Są one prawie trzykrotnie większe od odkształceń ścianek wykonanych z dwóch pozostałych materiałów.

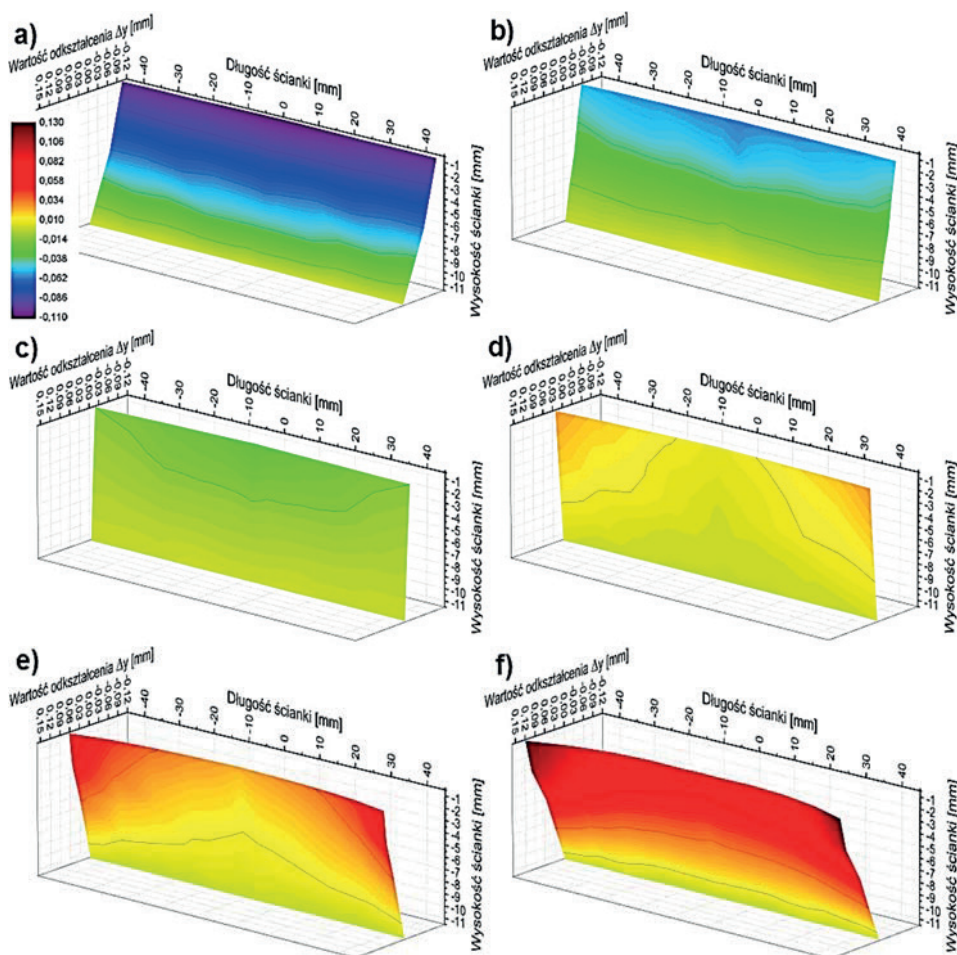
Omówione wcześniej zmiany wartości odkształcenia ścianek (rys. 6.1÷6.7) w zależności od prędkości skrawania v_c , sztywności narzędzi j oraz rodzaju materiału, dotyczyły wybranych charakterystycznych przypadków. Skoncentrowano się głównie na analizie wyników obróbki najcieńszych i najdłuższych ścianek wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o najmniejszej sztywności $j = 2,0$ N/ μ m, z prędkością skrawania $v_c = 600$ m/min. Na rys. 6.8 zaprezentowano wpływ wszystkich czynników ujętych w hipotezie badawczej, na dokładność wykonania nieutwardzonych ścianek. Wykresy te mają postać map 3D, na których w funkcji dwóch zmiennych, tzn. sztywności narzędzi j oraz prędkości skrawania v_c , przedstawiono wartości odkształcenia ścianek nieutwardzonych o długościach $L_s = 90$ mm i grubości $g_s = 0,7$ mm (wpływ grubości i długości ścianek na wartość ich odkształcenia omówiono w dalszej części rozprawy) wykonanych z trzech wybranych materiałów. Na wykresach tych widoczna jest różnica wartości odkształcenia ścianek wykonanych z różnych materiałów. Maksymalną wartość odkształcenia ścianek dla stopów AlSi10Mg i EN AW-6082 uzyskano przy obróbce z prędkością skrawania $v_c = 750$ m/min frezem o największej sztywności. Przy tej prędkości skrawania uzyskano największe siły skrawania. Dla stopu EN AW-7075 najwyższe wartości sił skrawania i największe odkształcenie uzyskano dla prędkości $v_c = 600$ m/min. Obniżenie lub zwiększenie prędkości skrawania poza tę wartość powoduje obniżenie sił skrawania, a w konsekwencji zmniejszenie wartości odkształcenia. Najmniejsze wartości odkształcenia uzyskano dla największej i najmniejszej prędkości skrawania ($v_c = 150$ m/min i $v_c = 900$ m/min). Dla sztywności narzędzi w zakresie $j = 106,8 \div 26,4$ N/ μ m zmiany wartości odkształcenia ścianek są nieznaczne. Poniżej sztywności $j = 26,4$ N/ μ m widoczny jest wyraźny spadek wartości odkształcenia ścianek, przy czym jest on największy dla prędkości skrawania odpowiadających największym siłom skrawania. Jest to związane ze zwiększaniem ugięcia narzędzi podczas obróbki w miarę wzrostu sił skrawania.



Rys. 6.8. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$ wykonanych z różnych stopów Al :

a) przekrój skrajny stop AlSi10Mg; b) przekrój środkowy stop AlSi10Mg;
c) przekrój skrajny stop EN AW-6082; d) przekrój środkowy stop EN AW-6082;
e) przekrój skrajny stop EN AW-7075; f) przekrój środkowy stop EN AW-7075

Na wartość i postać odkształcenia ścianek decydujący wpływ ma ich grubość g_s . Na rys. 6.9 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych ścianek o różnych grubościach wykonanych ze stopu EN AW-7075 frezem o najmniejszej sztywności. Ścianki o grubości w zakresie $g_s = 2 \div 4$ mm wykonane narzędziami o małej sztywności mają w przekrojach poprzecznych trapezowy zarys, a ich odkształcenie ma wartości ujemne (rys. 3.12c). W miarę zmniejszania grubości ścianek ujemne nachylenie ścianek maleje. Dla ścianek o grubości $g_s = 1,4$ mm i mniejszych odkształcenia przyjmują dodatnie wartości, a ich przekroje poprzeczne mają kształt odwróconego trapezu (rys. 3.12b). Dalsze zmniejszanie grubości ścianek zwiększa wartość ich dodatniego odkształcenia.

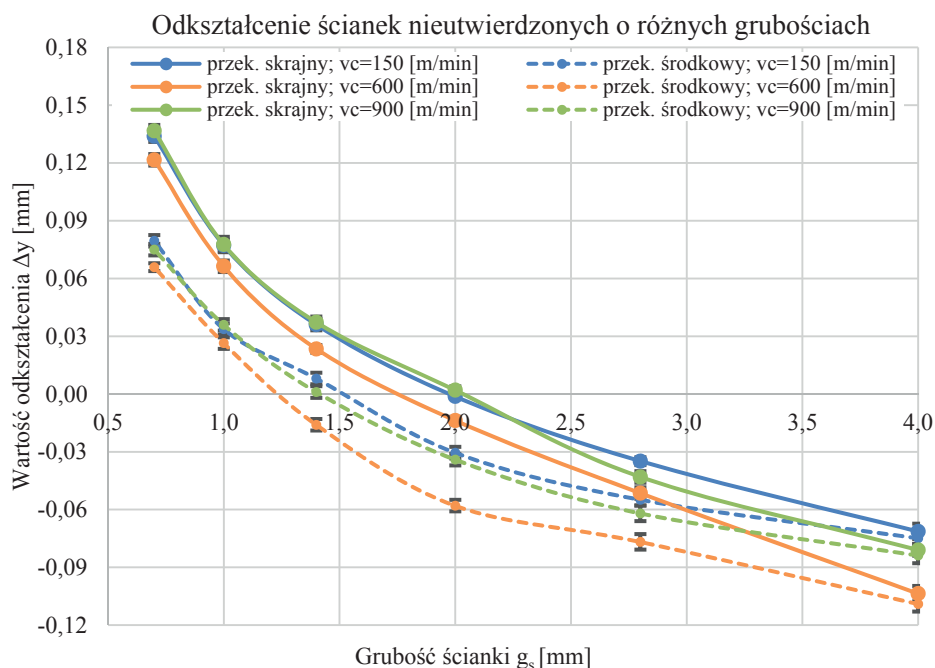


Rys. 6.9. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90$ mm; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600$ m/min; sztywność narzędzia $j=2,0$ N/ μ m; grubość ścianek g_s : a) 4,0 mm, b) 2,8 mm, c) 2,0 mm, d) 1,4 mm, e) 1,0 mm, f) 0,7 mm

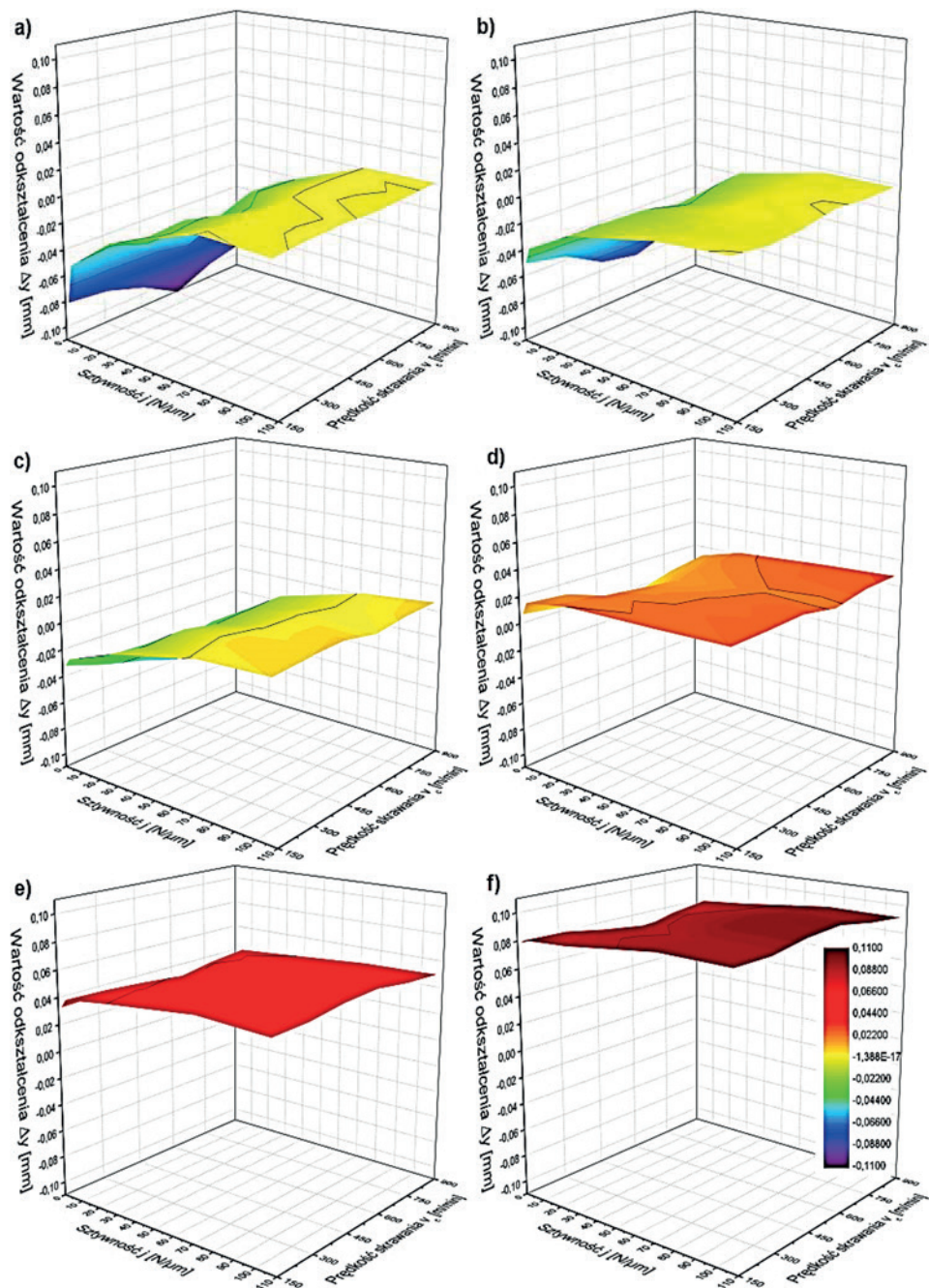
Opisany przebieg zmian wartości odkształcenia wraz z spadkiem grubości ścianek ma dwie przyczyny:

- zmniejszenie grubości ścianek powoduje spadek ich sztywności, co prowadzi do zwiększenia ich odkształcenia sprężystego w trakcie obróbki,
- ponieważ zastosowano stały względny naddatek obróbkowy (tabela 3.3), to przekroje warstwy skrawanej i wartości sił maleją wraz ze spadkiem grubości ścianek, co zmniejsza ugięcie narzędzia.

Sztywność ścianek o największej grubości jest na tyle duża, że nie ulegają one odkształceniom w trakcie obróbki, a kształt ich powierzchni bocznych wynika tylko z ugięcia narzędzia. Można to wnioskować na podstawie rys. 6.10 i 6.11. Na rys. 6.10 odkształcenie ścianki o grubości $g_s = 4$ mm, zarówno w przekrojach skrajnych jak i środkowych ma taką samą wartość. Można więc przyjąć, że jeśli odkształcenie w mniej sztywnych przekrojach skrajnych jest takie samo jak w przekrojach środkowych to ścianka nie ulega w trakcie obróbki odkształceniom sprężystym. Dla ścianek o mniejszej grubości widoczna jest różnica między wartościami odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych. Różnica ta rośnie wraz ze spadkiem grubości ścianek. Jest to efektem wzrostu różnicy między sztywnością środkowych i końcowych części ścianek wraz ze zmniejszeniem ich grubości.



Rys. 6.10. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o różnych grubościach i długości $L_s=90$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0$ N/ μ m



Rys. 6.11. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N}/\mu\text{m}$; grubości ścianek g: a) 4,0 mm, b) 2,8 mm, c) 2,0 mm, d) 1,4 mm, e) 1,0 mm, f) 0,7 mm

Dla ścianki o grubości $g_s = 2,8$ mm różnica wartości odkształceń, w przekrojach skrajnych i środkowych, jest mała ok. 0,02 mm. Można przyjąć, że odkształceniom sprężystym podczas obróbki ulegają jedynie przekroje skrajne tych ścianek. Środkowa część ścianki o większej sztywności nie odkształca się, a jej kształt podobnie jak dla ścianki o grubości $g_s = 4$ mm jest efektem ugięcia narzędzia.

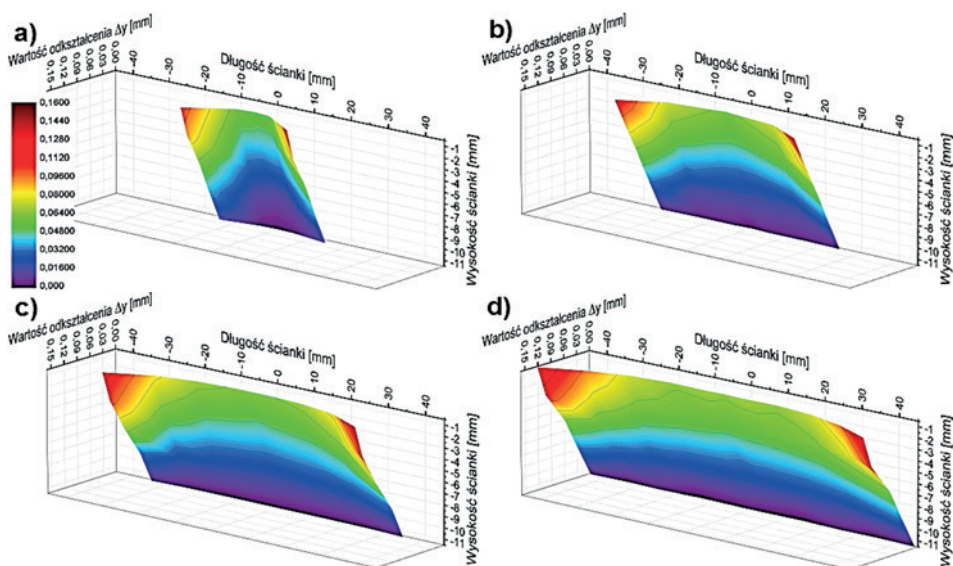
Na rys. 6.10 można zaobserwować wyraźną różnicę wartości odkształcenia dla prędkości skrawania, przy których uzyskano najmniejsze ($v_c = 150$ i 900 m/min) i największe ($v_c = 600$ m/min) siły skrawania. Różnica ta rośnie wraz ze wzrostem grubości ścianek i największą wartość osiąga dla ścianki o grubości $g_s = 4$ mm. Wynika to ze zmian różnic między wartościami sił skrawania dla poszczególnych prędkości skrawania, wraz ze zmianami grubości ścianek (szerokości frezowania). Zjawisko to można również zaobserwować na rys. 6.11, na którym przedstawiono (w funkcji sztywności narzędzi j oraz prędkości skrawania v_c) wartości odkształcenia przekrojów środkowych ścianek nieutwardzonych, w zależności od ich grubości. Dla ścianek o grubościach $g_s = 4 \div 2$ mm (rys. 6.11 a÷c), wykonanych narzędziami o sztywności $j = 106,8$ i 72 N/ μ m, wartości odkształcenia są zbliżone do zera, co odpowiada prostoliniowym zarysom powierzchni bocznych. Można zatem przyjąć, że ścianki o tych grubościach nie ulegają podczas obróbki odkształceniom w przekrojach środkowych. Ugięciu nie ulegają również narzędzia o powyższych sztywnościach. Odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek o grubości $g_s = 1,4$ mm i mniejszych, wykonanych tymi narzędziami, są zatem tylko wynikiem ugięcia ścianek. Przekroje skrajne, o mniejszej sztywności, ulegają odkształcaniu już dla ścianek o grubościach $g_s = 2,8$ mm i mniejszych (rys. 6.10). Jak udowodniono wcześniej przekroje środkowe ścianek o grubości $g_s = 4 \div 2$ mm nie uginają się podczas obróbki, dlatego odkształcenie, którego wartości przedstawiono na rys. 6.11 a÷c jest efektem ugięcia narzędzi o sztywności mniejszej od $j = 72$ N/ μ m. Należy przyjąć, że dla ścianek o grubości poniżej $g_s = 2$ mm obrabianych narzędziami o sztywności mniejszej od $j = 72$ N/ μ m wartość odkształcenia przekrojów środkowych jest wypadkową ugięcia narzędzi i ścianek. Dla przekrojów skrajnych wpływ ugięcia ścianek jest widoczny od grubości $g_s = 2,8$ mm. Można również stwierdzić, że wpływ ugięcia narzędzi na wartość odkształcenia maleje wraz ze spadkiem grubości ścianek.

Kolejnym parametrem decydującym o sztywności ścianek, który wpływa na wartość odkształcenia, jest ich długość. Na rys. 6.12 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych ścianek o różnych długościach i grubości $g_s = 0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 z prędkością skrawania $v_c = 600$ m/min. Można zaobserwować, że odkształcenie w przekrojach środkowych tych ścianek mają podobną wartość niezależnie od ich długości (rys. 6.12 i 6.13). Jedynie dla ścianki o najmniejszej długości $L_s = 30$ mm (rys. 6.12a) są nieco mniejsze. Wartości odkształcenia rosną dla przekrojów oddalających się od środka ścianek. Zmiany odkształcenia nie są jednak proporcjonalne do odległości przekroju od środka ścianki. W części środkowej ścianek można zaobserwować pewną

strefę, dla której odkształcenia nie zmieniają się. Zasięg tej strefy rośnie wraz z długością ścianek i dla poszczególnych długości ścianek wynosi ok.:

- $L_s = 30$ mm – zasięg strefy stałych odkształceń od środka ścianki: ± 5 mm,
- $L_s = 50$ mm – zasięg strefy stałych odkształceń od środka ścianki: ± 10 mm,
- $L_s = 70$ mm – zasięg strefy stałych odkształceń od środka ścianki: ± 15 mm,
- $L_s = 90$ mm – zasięg strefy stałych odkształceń od środka ścianki: ± 20 mm.

Wyniki te są zbieżne z analizowaną w symulacjach MES długością fali odkształcenia.



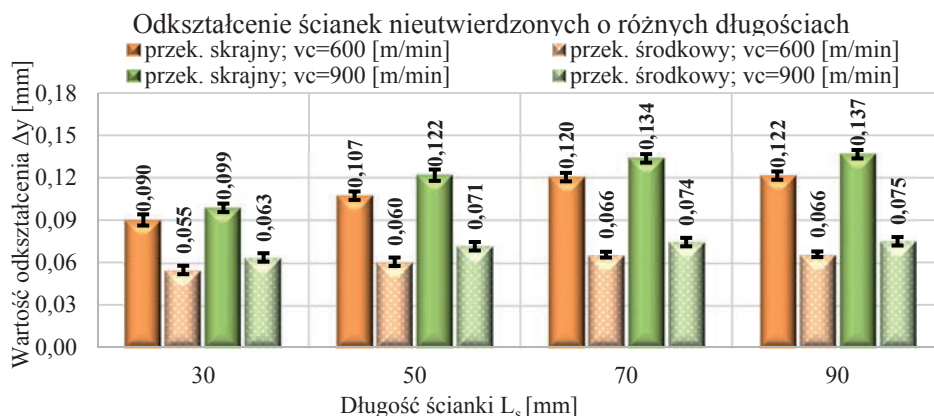
Rys. 6.12. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s=0,7$ mm; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600$ m/min; sztywność narzędzia $j=2,0$ N/ μ m; długości ścianek L_s : a) 30 mm, b) 50 mm, c) 70 mm, d) 90 mm

Jak wspomniano wcześniej, największym odkształceniom ulegają końcowe naroża ścianek nieutwardzonych. Z powyższych wartości wynika, że wraz ze wzrostem długości ścianek rośnie zasięg zwiększonych odkształceń końcowych części ścianek. Zmienia się on w zakresie od 10 mm dla najkrótszej ścianki do 25 mm dla najdłuższej. W zakresie długości ścianek $L_s = 30 \div 70$ mm zmianom tym towarzyszy również zwiększenie wartości odkształceń skrajnych przekrojów ścianek. Natomiast porównując wartości odkształceń dla ścianek o długościach $L_s = 70$ i $L_s = 90$ mm, (rys. 6.13) można stwierdzić ich równość. W celu potwierdzenia takiego założenia przeprowadzono weryfikację statystyczną istotności różnic dla tych długości ścianek. Wyniki statystycznej analizy porównawczej przedstawione w tabeli 6.5. potwierdzają hipotezę zerową H_0 o równości średnich co oznacza, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wartości odkształcenia ścianek o długościach $L_s = 70$ i $L_s = 90$ mm można uznać za równe.

Tabela 6.5. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształceń ścianek o długościach $L_s = 70$ i $L_s = 90$ mm; $\alpha = 0,05$

Przekrój	Dł. ścianki L_s [mm]	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
środkowy	$L_s = 70 - L_s = 90$	4,7169	$(9,277; +\infty)$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	-0,1139	$(-2,447; 2,447)$	$\mu_1 = \mu_2$
Przekrój	Gatunek stopu Al	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
skrajny	$L_s = 70 - L_s = 90$	13,3214	$(9,277; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-1,4679	$(-3,182; 3,182)$	$\mu_1 = \mu_2$

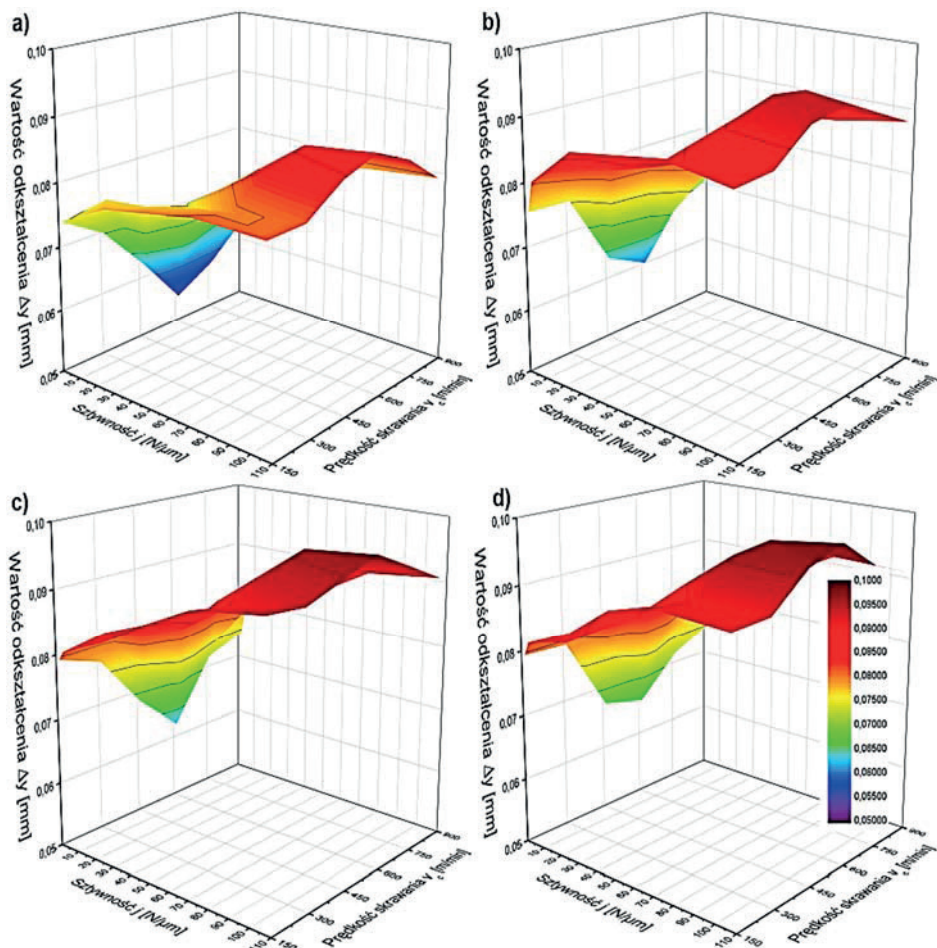
Porównując na rys. 6.13 wartości odkształcenia ścianek nieutwierdzonych o długościach $L_s = 70$ i $L_s = 90$ mm, można założyć, że dla ścianek o długościach większych od $L_s = 70$ mm wartości odkształcenia zarówno w przekrojach skrajnych jak i środkowych nie ulegają zmianą. Zwiększeniu ulegać może jedynie zasięg „dużego” odkształcenia końców ścianek. Potwierdzenie tego wymaga jednak przeprowadzania dodatkowych prób dla ścianek o długościach większych od $L_s = 90$ mm.



Rys. 6.13. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwierdzonych o różnych długościach i grubości $g_s = 0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności 2,0 N/mm

Przeprowadzone analizy wpływu długości ścianek na wartości odkształcenia, dotyczyły tylko ścianek o grubości $g_s = 0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o najmniejszej sztywności, przy wybranych prędkościach skrawania. Wartości odkształcenia ścianek o różnej długości, w zależności od tych parametrów będą się zmieniały, co omówiono wcześniej. W celu opisanego wpływu sztywności narzędzi oraz prędkości skrawania na wartości odkształcenia ścianek o różnej długości, na rys. 6.14 przedstawiono wykresy

w formie map 3D. Na wykresach tych widoczny jest spadek odkształcenia ścianek wraz ze zmniejszeniem sztywności narzędzia oraz długości ścianek.

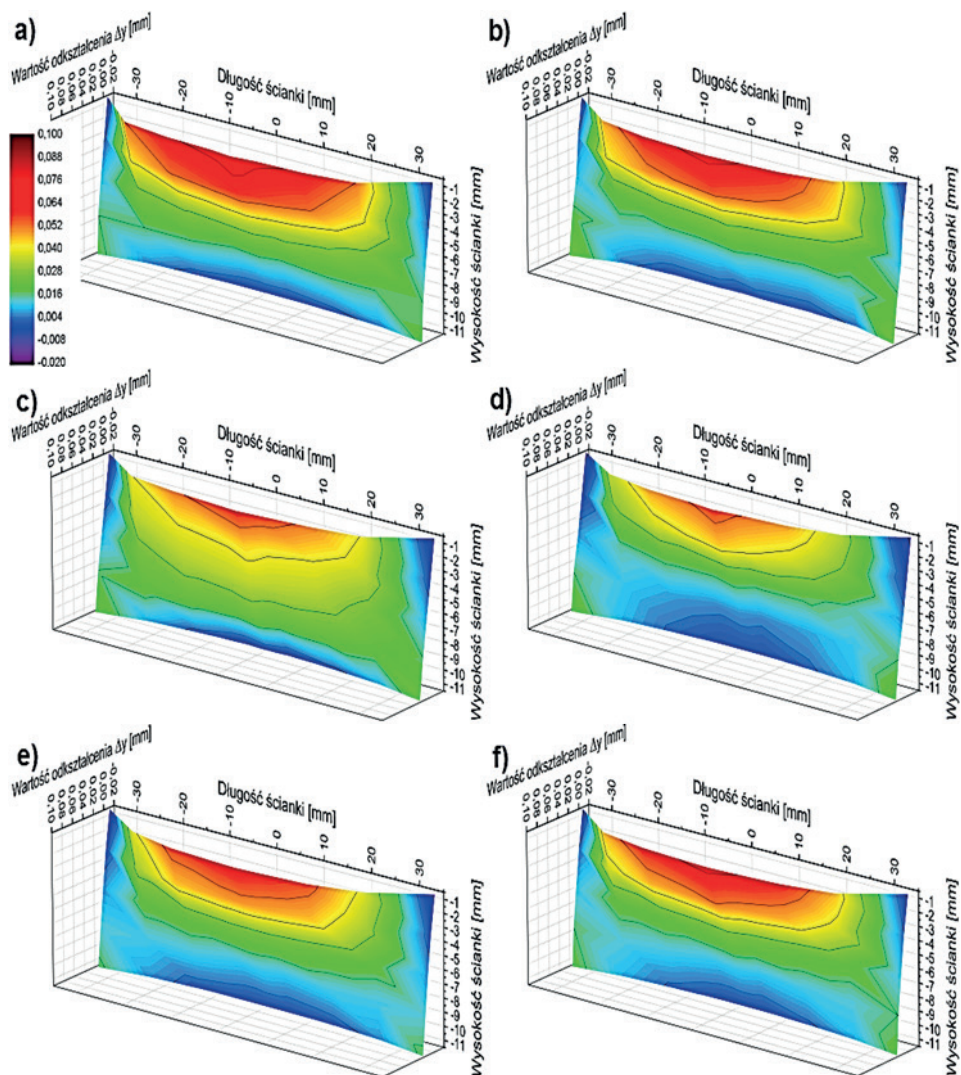


Rys. 6.14. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{ mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N}/\mu\text{m}$; długość ścianek: a) 30 mm, b) 50 mm, c) 70 mm, d) 90 mm

Podsumowując analizę wyników badań odkształcenia ścianek nieutwardzonych można stwierdzić, że niewrażliwym obszarem dla tych ścianek, ulegającym największym odkształceniom, są ich końce. Zastosowanie dodatkowego wzmocnienia końców powinno usztywnić konstrukcję ścianek, co zmniejszy ich odkształcenie. Takie założenie było podstawą do przeprowadzenia badań dla ścianek utwardzonych na końcach (rys.3.2 c, d), których wyniki omówione będą w dalszej części rozprawy.

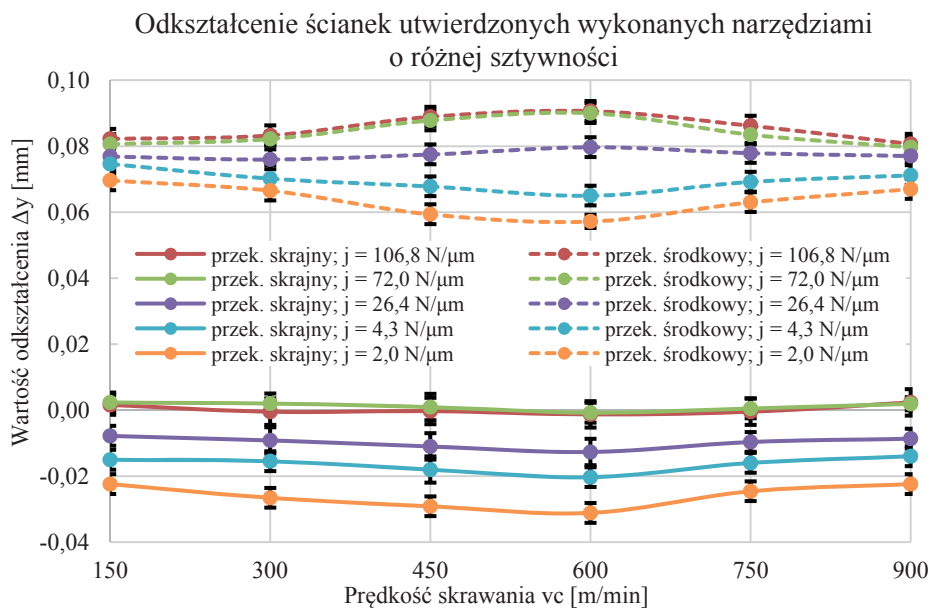
Ścianki utwardzone

Większość zależności omówionych dla ścianek nieutwardzonych (wpływ prędkości skrawania, sztywność narzędzi czy gatunek stopu) ma podobny charakter również dla ścianek utwardzonych. Przy analizie odkształcenia ścianek utwardzonych skoncentrowano się więc głównie na różnicach charakteru oraz wartości odkształcenia dla tych dwóch typów ścianek.



Rys. 6.15. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$; materiał EN AW-7075; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N}/\mu\text{m}$; prędkości skrawania v_c : a) 150 m/min, b) 300 m/min, c) 450 m/min, d) 600 m/min, e) 750 m/min, f) 900 m/min

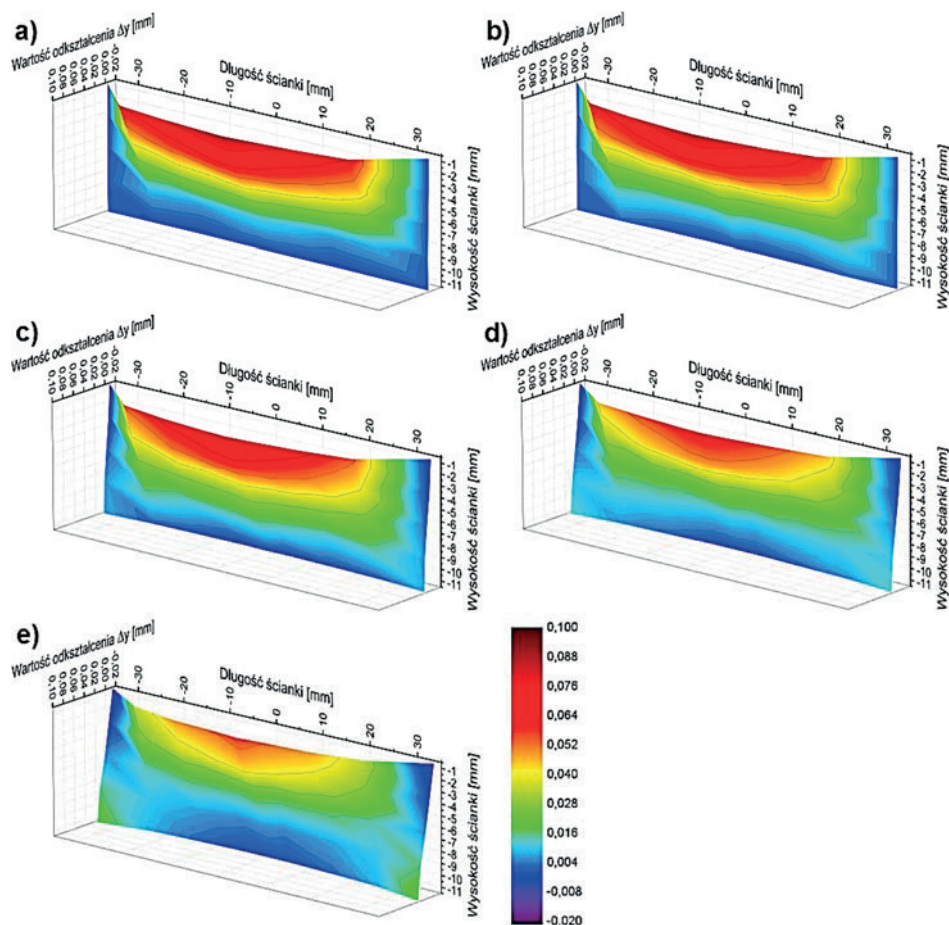
Na rys. 6.15 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych utwardzonych ścianek o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o sztywności $2,0\text{ N}/\mu\text{m}$ z różnymi prędkościami skrawania. Podobnie jak dla ścianek nieutwardzonych dodatnie wartości odchylenia ścianek maleją wraz ze wzrostem sił skrawania, których wartości zależą od zastosowanych prędkości skrawania. Utwardzone końce ścianek ze względu na dużą sztywność nie ulegają odkształceniom podczas obróbki. Dla sztywności narzędzi $j = 26,4\text{ N}/\mu\text{m}$ i mniejszych, skutkuje to ujemnymi wartościami odkształcenia skrajnych przekrojów ścianek, co jest widoczne na rys. 6.16. Na rysunkach tych przedstawiono wartości odkształcenia analizowanych ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności, w zależności od prędkości skrawania v_c . Odmienne niż dla przekrojów skrajnych, zmiany wartości odkształcenia przekrojów środkowych ścianek nieutwardzonych (rys. 6.2) i utwardzonych (rys. 6.16) mają podobny charakter. Wartości odkształcenia ścianek utwardzonych w tych przekrojach są nieco mniejsze niż nieutwardzonych. Różnice te wynoszą ok. $0,01\text{ mm}$ i wynikają ze zwiększonej sztywności ścianek utwardzonych.



Rys. 6.16. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 z różnymi prędkościami skrawania

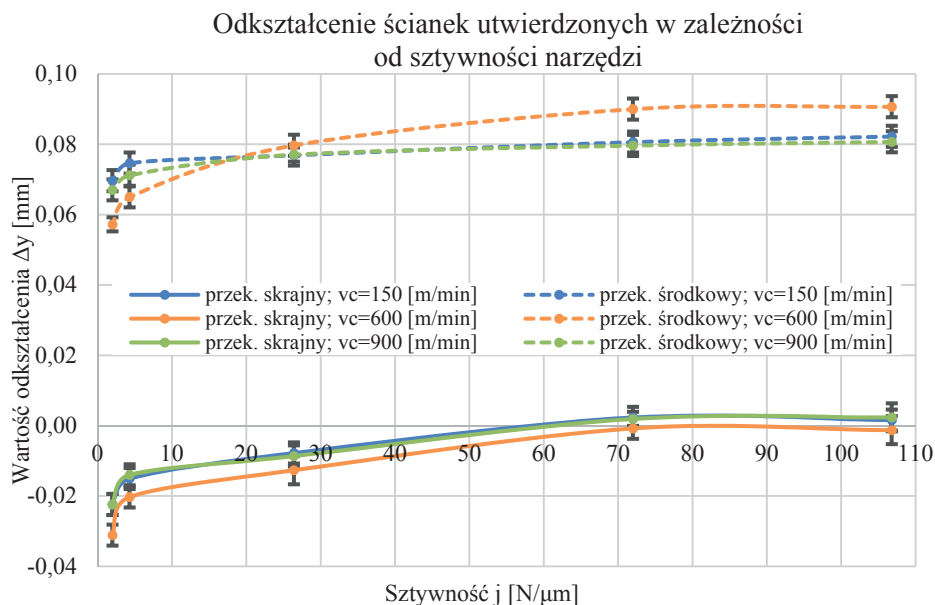
Porównując zarysy powierzchni bocznych ścianek nieutwardzonych (rys. 6.3) i utwardzonych (rys. 6.17), wykonanych narzędziami o różnej sztywności, można

zaobserwować wyraźną różnicę ich kształtów. Odształcenie ścianek nieutwierdzonych na całej ich długości ma dodatnią wartość. Jest ono największe dla przekrojów skrajnych i maleje w kierunku środka tych ścianek. Dla przekrojów skrajnych ścianek utwierdzonych, wykonanych narzędziami o sztywności $j = 106,8$ i $j = 72 \text{ N}/\mu\text{m}$, wartości odształcenia są bliskie zeru (zarysy ścianek w tych przekrojach są prostoliniowe). Dla narzędzi o sztywności $j = 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$ i mniejszych, odształcenie w tych przekrojach przyjmuje wartości ujemne, co możemy zaobserwować na rys. 6.18. Jest to związane z ugięciem narzędzi w trakcie obróbki, które rośnie wraz ze zwiększeniem sił skrawania (zależnych od prędkości skrawania rys. 6.16) oraz spadkiem sztywności narzędzi. Spadek sztywności narzędzi, przyczyniający się do zwiększenia ich ugięcia, jest również przyczyną zmniejszonego odształcenia ścianek w przekrojach środkowych.



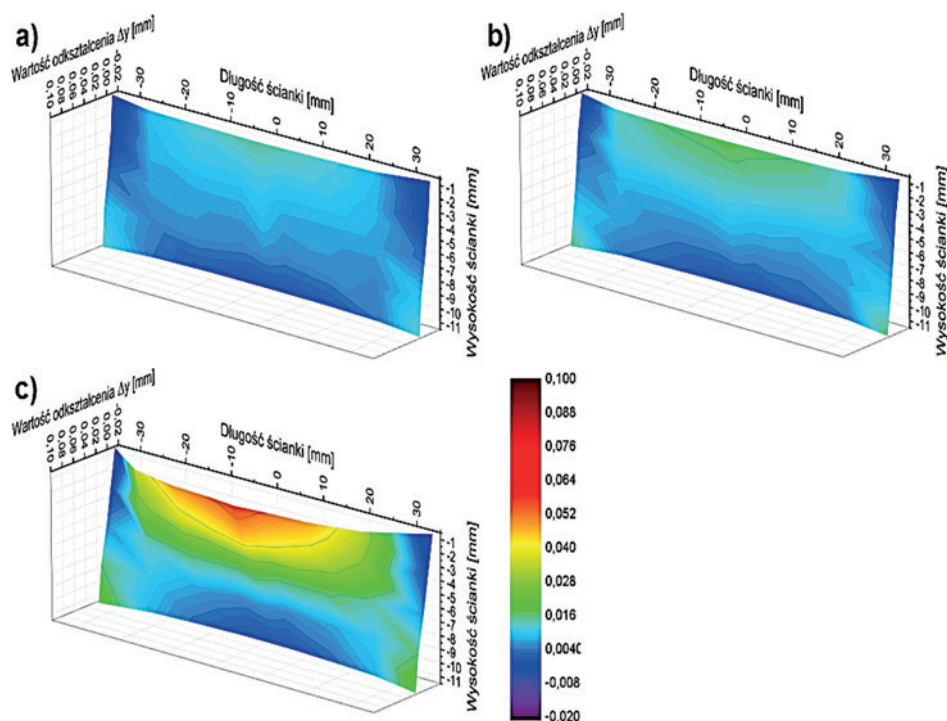
Rys. 6.17. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwierdzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzi j : a) $106,8 \text{ N}/\mu\text{m}$, b) $72 \text{ N}/\mu\text{m}$, c) $26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$, d) $4,3 \text{ N}/\mu\text{m}$, e) $2,0 \text{ N}/\mu\text{m}$

Zarówno dla ścianek nieutwardzonych (rys. 6.5) jak i utwardzonych (rys. 6.18) wartości odkształcenia rosną wraz ze zwiększeniem sztywności narzędzi. Zmiany wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych i utwardzonych, w zależności od sztywności narzędzi, mają podobny charakter. Odkształcenie ścianek utwardzonych jest nieco mniejsze. Podobnie jak dla ścianek nieutwardzonych wartości odkształcenia ścianek utwardzonych obrabianych narzędziami o sztywności $j = 106,8$ i $j = 72 \text{ N}/\mu\text{m}$ można uznać za równe (rys. 6.2 i 6.16). Również dla prędkości skrawania $v_c = 150$ i $v_c = 900 \text{ m/min}$ wartości odkształcenia można przyjąć za równe (rys. 6.5 i 6.18).



Rys. 6.18. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s = 90 \text{ mm}$ i grubości $g_s = 0,7 \text{ mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności

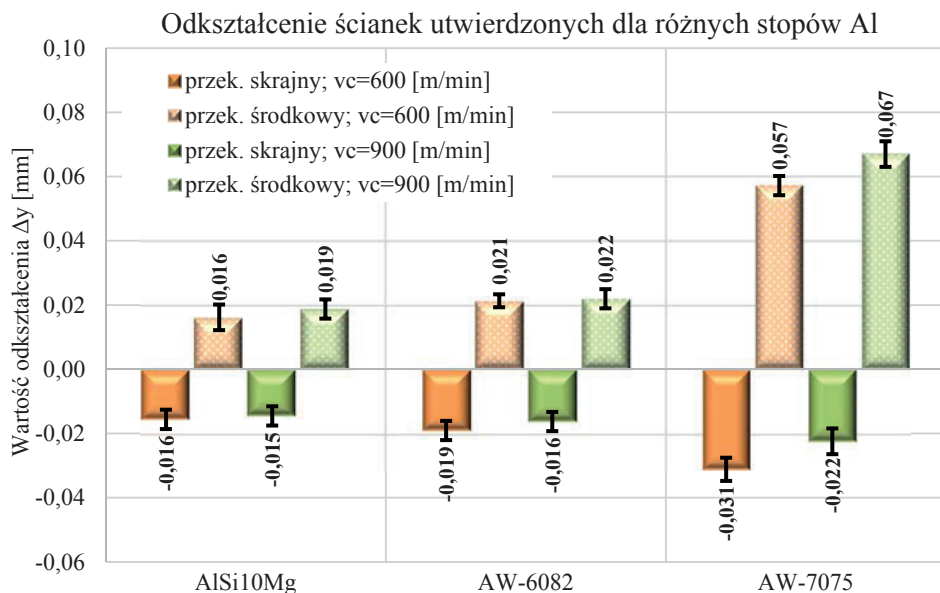
Zastosowanie różnych materiałów wpływa na zmianę kształtu powierzchni bocznych oraz wartości odkształcenia wykonanych z nich ścianek. Rys. 6.19 przedstawiają zarysy ścianek utwardzonych o długości $L_s = 90 \text{ mm}$ i grubości $g_s = 0,7 \text{ mm}$ wykonanych z trzech wybranych gatunków stopów aluminium, narzędziem o najmniejszej sztywności, z prędkością skrawania $v_c = 600 \text{ m/min}$, dla której uzyskano największe siły skrawania. Najwyższe wartości odkształcenia uzyskano dla stopu EN AW-7075. Jak wspomniano przy omawianiu odkształcenia ścianek nieutwardzonych, jest to wywołane dużą sprężystością tego materiału oraz dużymi oporami skrawania, które wpływają na wartości sił skrawania. W zależności od tych sił podczas obróbki zmieniają się wartości ugięcia narzędzia oraz ścianki, których wypadkowa stanowi o wartości odkształcenia.



Rys. 6.19. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; materiał: a) AlSi10Mg, b) EN AW-6082, c) EN AW-7075

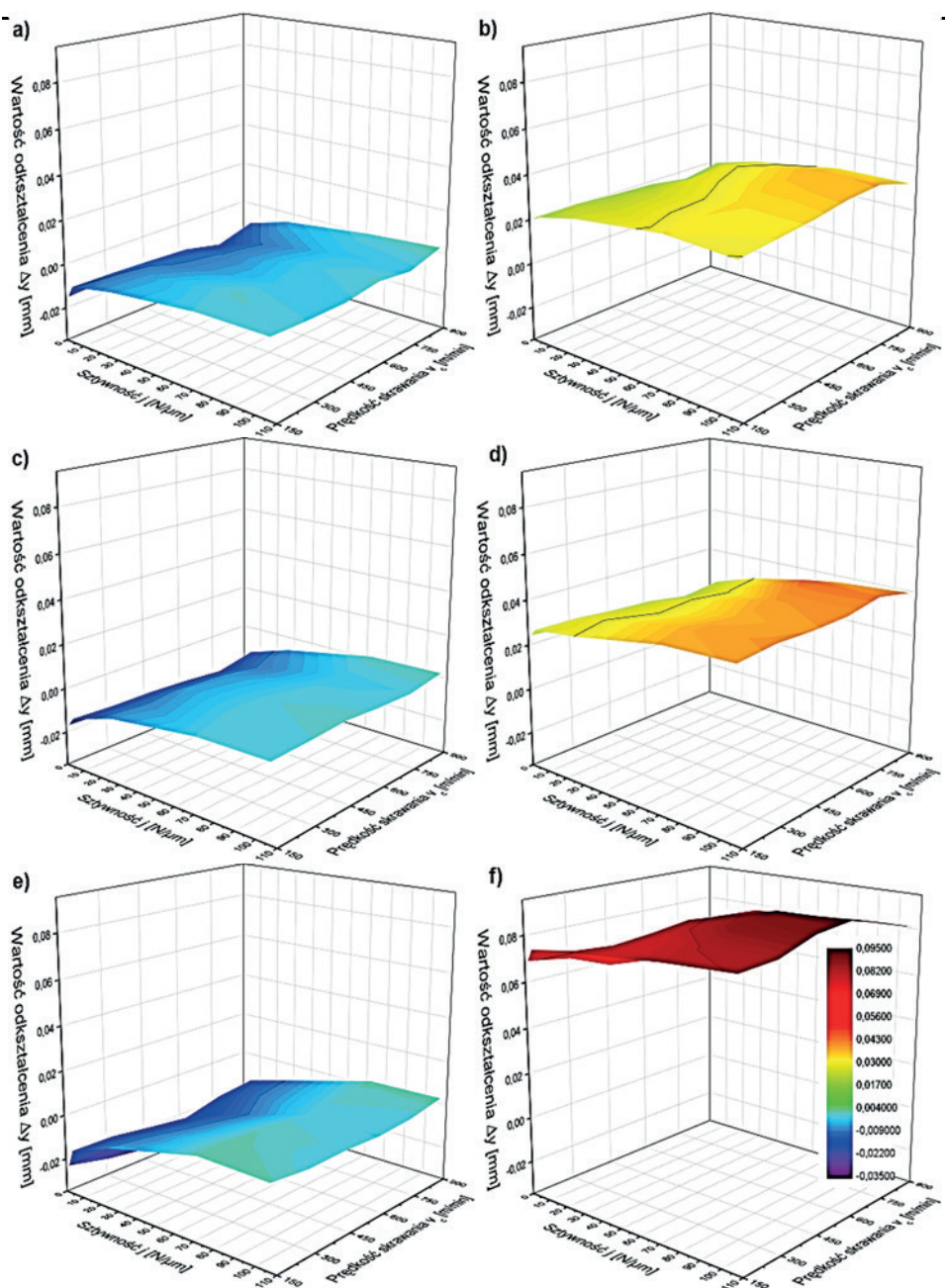
W przypadku ścianek utwardzonych, w zależności od sztywności narzędzia (rys. 6.17, 6.18 i 6.21) odkształcenie w przekrojach skrajnych ma wartość zerową lub ujemną. W przekrojach środkowych, dla ścianek o grubości $g_s = 0,7\text{ mm}$, których kształty powierzchni bocznych przedstawiono na rys. 6.19, odkształcenie ma wartość dodatnią. Oznacza to, że kształt przekrojów poprzecznych ścianek zmienia się: zarysy przekrojów środkowych mają kształt odwróconego trapezu (dodatnia wartość odkształcenia – rys. 3.12b), a przekrojów skrajnych mają kształt prostokątny (ścianki i narzędzie nie odkształcają się – powierzchnie boczne są płaskie) lub trapezowe (ujemna wartość odkształcenia – rys. 3.12c). Charakter zmian kształtu przekrojów poprzecznych jest uzależniony od sztywności narzędzia, grubości i długości ścianek oraz od właściwości zastosowanego materiału. Wpływ właściwości materiału na zmiany kształtu zarysów poprzecznych ścianek utwardzonych (zmiany wartości odkształcenia) jest widoczny na rys. 6.20. Dla stopów AlSi10Mg i EN AW-6082 dodatnie odchylenia w przekrojach środkowych są ok. trzykrotnie mniejsze, niż dla stopu EN AW-7075. Natomiast w przekrojach skrajnych ujemne odchylenia ścianek wykonanych z tych dwóch stopów są prawie dwukrotnie większe niż dla stopu EN AW-7075. Różnice

wartości odkształcenia pomiędzy przekrojami skrajnymi i środkowymi dla ścianek wykonanych ze stopu EN AW-7075 są więc ok. pięciokrotnie większe niż dla dwóch pozostałych stopów. W związku z tym ścianki z nich wykonane, w przekrojach równoległych do podstawy, mają bardziej prostoliniowy zarys niż ścianki wykonane ze stopu EN AW-7075.



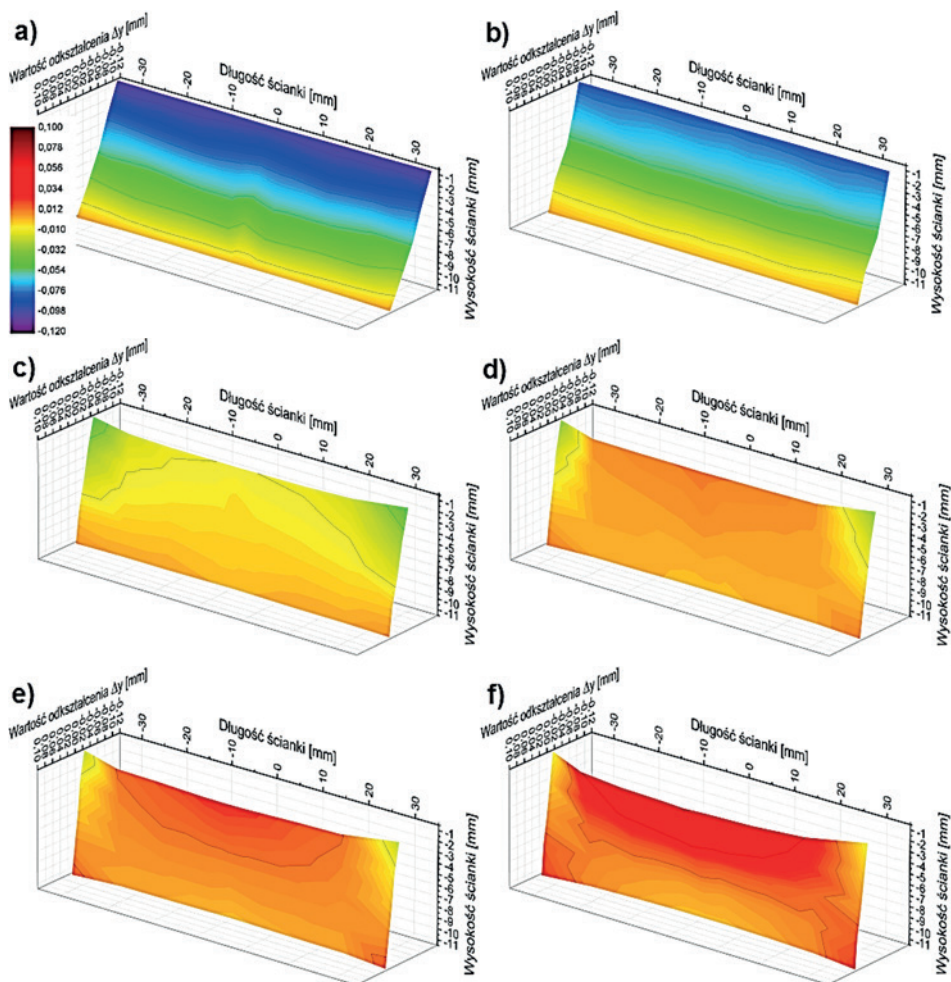
Rys. 6.20. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych z różnych stopów Al narzędziem o sztywności $j=2,0$ N/ μ m

Na rys. 6.21, w formie map 3D, pokazano wartości odkształcenia ścianek utwardzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych z trzech wybranych stopów aluminium, dla pełnego zakresu sztywności narzędzi i prędkości skrawania. Na rysunkach tych przedstawiono wartości odkształcenia ścianek utwardzonych w przekrojach skrajnych i środkowych. Dla przekrojów skrajnych odkształcenia przyjmują wartości zbliżone do zerowych lub niewielkie wartości ujemne. Minimalne wartości (ok. -0,03 mm) uzyskano dla ścianki wykonanej ze stopu EN AW-7075, przy $v_c = 750$ m/min. W przypadku stopów AlSi10Mg i EN AW-6082 minimum uzyskano dla prędkości skrawania $v_c = 600$ m/min. Są to prędkości skrawania przy których dla poszczególnych stopów uzyskano największe wartości sił skrawania. Dodatnie odkształcenie ścianek w przekrojach środkowych jest największe dla sztywności narzędzi $j = 106,8$ N/ μ m oraz najmniejsze dla sztywności narzędzi $j = 2$ N/ μ m, również dla tych prędkości skrawania. Przyczyny tego zjawiska są takie same jak dla ścianek nieutwardzonych i były omówione wcześniej



Rys. 6.21. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$ wykonanych z różnych stopów Al:

- a) przekrój skrajny stop AlSi10Mg; b) przekrój środkowy stop AlSi10Mg;
 - c) przekrój skrajny stop EN AW-6082; d) przekrój środkowy stop EN AW-6082;
 - e) przekrój skrajny stop EN AW-7075; f) przekrój środkowy stop EN AW-7075;
- szywność narzędzia $2,0\text{ N}/\mu\text{m}$



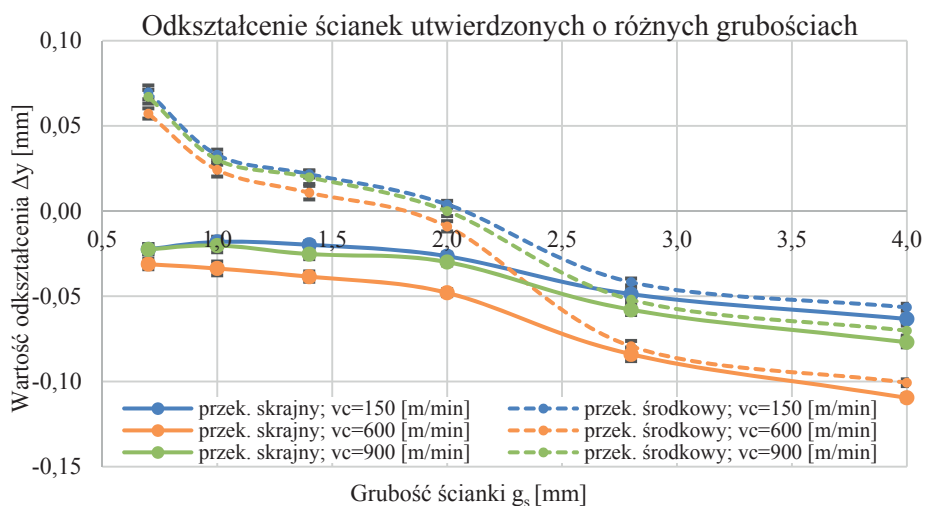
Rys. 6.22. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; grubości ścianek g_s : a) 4,0 mm, b) 2,8 mm, c) 2,0 mm, d) 1,4 mm, e) 1,0 mm, f) 0,7 mm

Wartości odkształcenia ścianek, oprócz wcześniej omówionych czynników, zależą również od ich grubości. Przykładowe kształty powierzchni bocznych ścianek utwardzonych o różnej grubości wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o najmniejszej sztywności przedstawiono na rys. 6. 22. Dla grubości ścianek $g_s = 4\div 2,8\text{ mm}$, można uznać, że kształt zarysu powierzchni bocznej nie zmienia się na całej ich długości. Odkształcenie zarówno nieutwardzonych (rys. 6.9 i 6.10) jak utwardzonych ścianek (rys. 6.22 i 6.23) o tej grubości są praktycznie równe i ich wartość jest stała na całej długości ścianek. Jak wspomniano wcześniej ścianki o tej grubości są na tyle sztywne, że nie ulegają ugięciu w trakcie obróbki, a ich kształt

wynika tylko z ugięcia narzędzi. Nie jest więc konieczne stosowanie, dla tych ścianek, dodatkowych usztywnień w postaci utwardzenia ich końców.

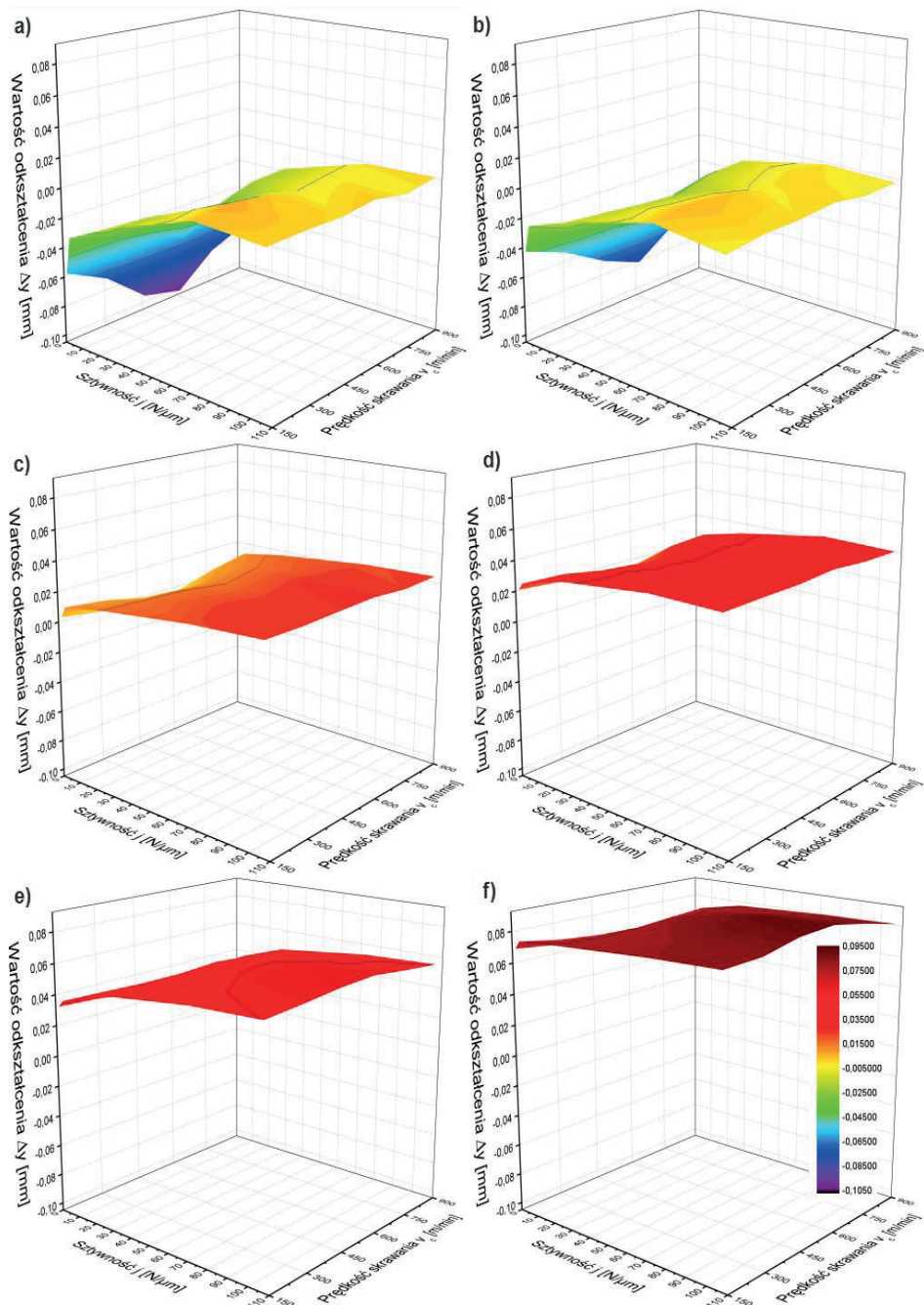
Ponieważ odkształcenia ścianek wykonanych z dwu pozostałych materiałów są znacznie mniejsze (rys. 6.7 i 6.20), to różnice ugięcia ścianek (zarówno nieutwardzonych jak i utwardzonych) w przekrojach skrajnych i środkowych występują dla mniejszych grubości ścianek, tzn. dla $g_s = 2$ mm i mniejszych. Jest to oczywiście uzależnione nie tylko od grubości ścianki ale również od jej wysokości (stosunku h_s/g_s). W rozprawie nie jest to analizowane (zastosowano stałą wysokość ścianki $h_s = 15$ mm) i będzie przedmiotem dalszych badań.

Dla ścianek utwardzonych charakterystyczne jest ujemne odchylenie ich przekrojów skrajnych, które maleje wraz z grubością ścianek. Wynika to ze zmniejszenia przekroju warstwy skrawanej (szerokości frezowania a_e – tabela 3.3). Ścianki o mniejszych grubościach mają w przekrojach skrajnych bardziej prostopadłościenny zarys, co można stwierdzić na podstawie wartości odkształceń przedstawionych na wykresach rys. 6.23.



Rys. 6.23. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o różnych grubościach i długości $L_s=90$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0$ N/ μ m

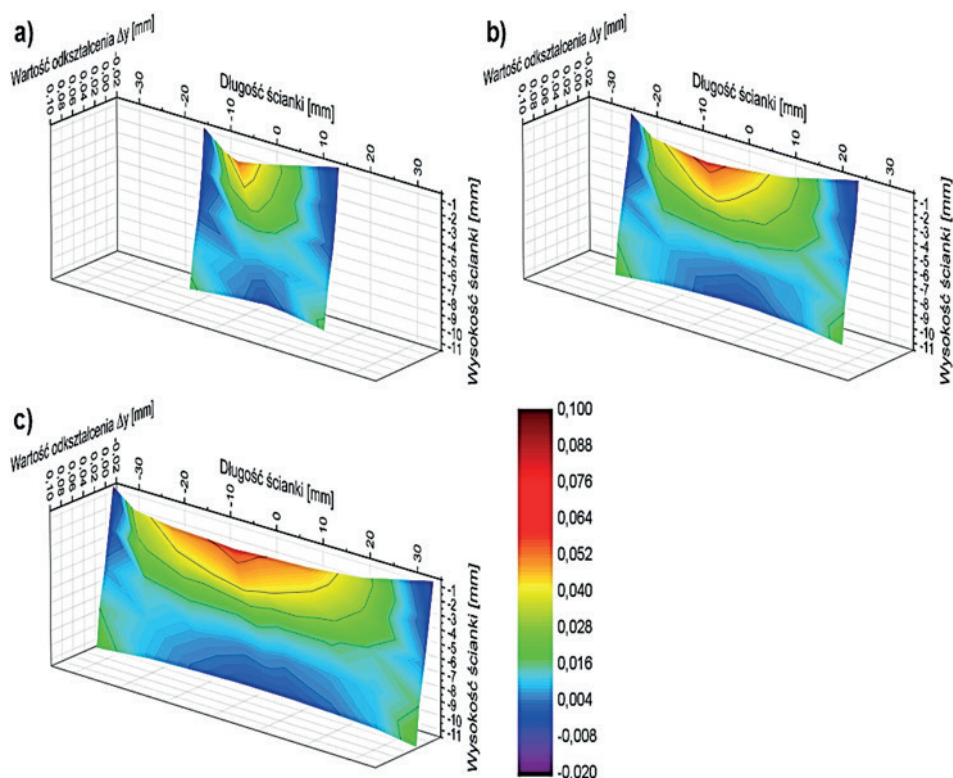
Odształcenia przekrojów środkowych ścianek nieutwardzonych (rys. 6.10) i utwardzonych (rys. 6.23) mają podobny charakter i wartość. Dla najcieńszych ścianek występują niewielkie różnice – odkształcenia ścianek nieutwardzonych są ok. 0,01 mm większe niż utwardzonych, co wynika ze zwiększonej sztywności tych ostatnich. Jest to również widoczne na wykresach z rys. 6.24 przedstawiających wartości odkształcenia ścianek utwardzonych o różnych grubościach i długościach $L_s=90$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o sztywności 2,0 N/ μ m, w zależności od sztywności j i prędkości skrawania v_c .



Rys. 6.24. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N}/\mu\text{m}$; grubości ścianek: a) 4,0 mm, b) 2,8 mm, c) 2,0 mm, d) 1,4 mm, e) 1,0 mm, f) 0,7 mm

Odształcenia przekrojów środkowych ścianek utwardzonych, podobnie jak nieutwardzonych, maleją wraz ze spadkiem długości ścianek, co jest widoczne na rys. 6.25, 6.26 i 6.27. Na rys. 6.25 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych ścianek utwardzonych o różnej długości, grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o sztywności $2,0\text{ N}/\mu\text{m}$, z prędkością skrawania $v_c=600\text{ m/min}$. Analizując kształty powierzchni bocznych ścianek utwardzonych można zauważyć, że wpływ usztywnienia dodatkową ścianką jest największy na ich końcach, a jego zasięg jest nieznaczny i niezależny od długości ścianek. Można również zauważyć występowanie, w kolejnych przekrojach wzdłuż ścianki, stref o zmiennym charakterze odształcenia. Zaczynając od utwardzonych końców ścianek jest to:

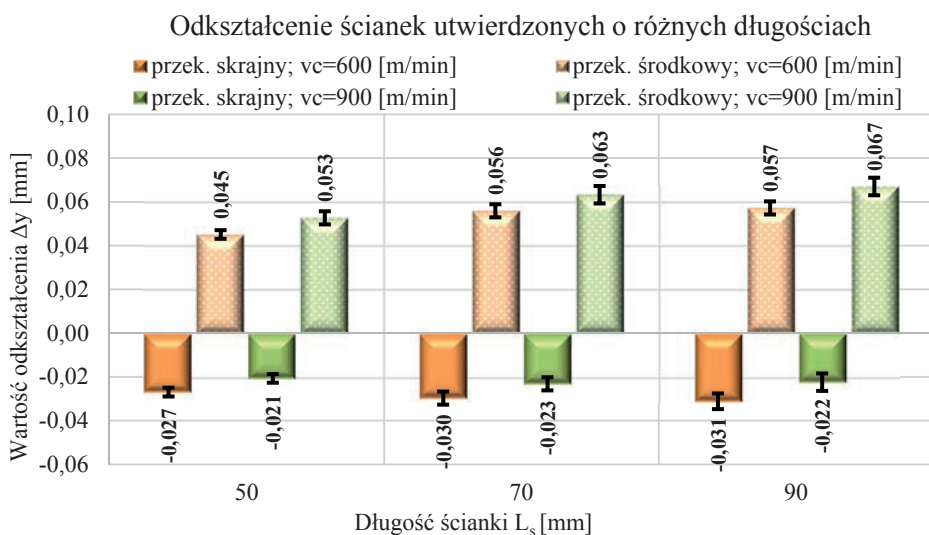
- omówiona wcześniej strefa największego wpływu usztywnienia dodatkową ścianką, w której odształcenie ma wartość ujemną, jej długość wynosi ok. 5 mm,
- strefa przejściowa o długości ok. 10mm,
- strefa największego odształcenia dodatniego, której długość rośnie wraz z długością ścianek.



Rys. 6.25. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N}/\mu\text{m}$; długości ścianek L_s : a) 50 mm, b) 70 mm, c) 90 mm

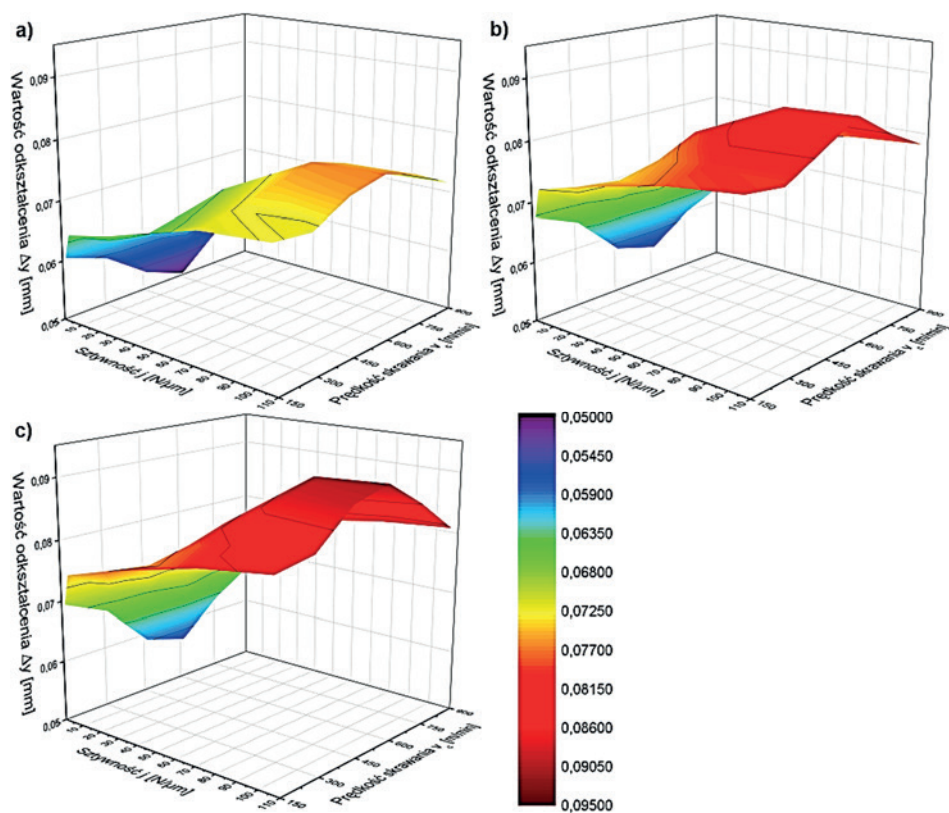
Dla ścianek utwardzonych o najmniejszej rozpatrywanej długości $L_s = 50$ mm trzecia z tych stref praktycznie nie występuje, dlatego odkształcenia w strefie środkowej tych ścianek są mniejsze niż dla pozostałych dwóch ścianek o większej długości (rys. 6.26 i 6.27).

Na rys. 6.26 przedstawiono wartości odkształcenia przekrojów skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych wykonanych z dwiema charakterystycznymi prędkościami skrawania $v_c = 600$ i $v_c = 900$ m/min (dla prędkości tych uzyskano odpowiednio największe i najmniejsze sił skrawania).



Rys. 6.26. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o różnej długości i grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0$ N/ μ m

Analizując wartości odkształcenia oraz kształty powierzchni bocznych ścianek utwardzonych o różnej długości, można przyjąć, że zastosowanie utwardzenia ścianek o długości mniejszej od $L_s = 50$ mm będzie skutkowało znacznym zwiększeniem ich sztywności. Przełoży się to na obniżenie wartości odkształceń przekrojów środkowych. Na rys. 6.26 i 6.27 możemy zaobserwować, że wartości odkształcenia przekrojów środkowych ścianek utwardzonych (podobnie jak nieutwardzonych) o długościach $L_s = 70$ i 90 mm, są praktycznie takie same. Można zatem wnioskować, że dalsze zwiększenie długości ścianek nie będzie przekładać się na zwiększenie wartości odkształcenia w strefie środkowej ścianek, a jedynie wpłynie na zwiększenie długości tej strefy, co można zaobserwować porównując rys. 6.25b i c. Z powyższego wynika, że zakres długości $L_s = 50 \div 70$ mm można traktować jako graniczny. Poniżej tej długości ścianek sensowne wydaje się być stosowanie ich utwardzenia, gdyż zapewnia ono usztywnienie ścianek obejmujące swym zasięgiem również ich strefy środkowe.



Rys. 6.27. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek utwardzonych o grubości $g_s=0,7$ mm wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0$ N/ μ m; długości ścianek: a) 50 mm, b) 70 mm, c) 90 mm

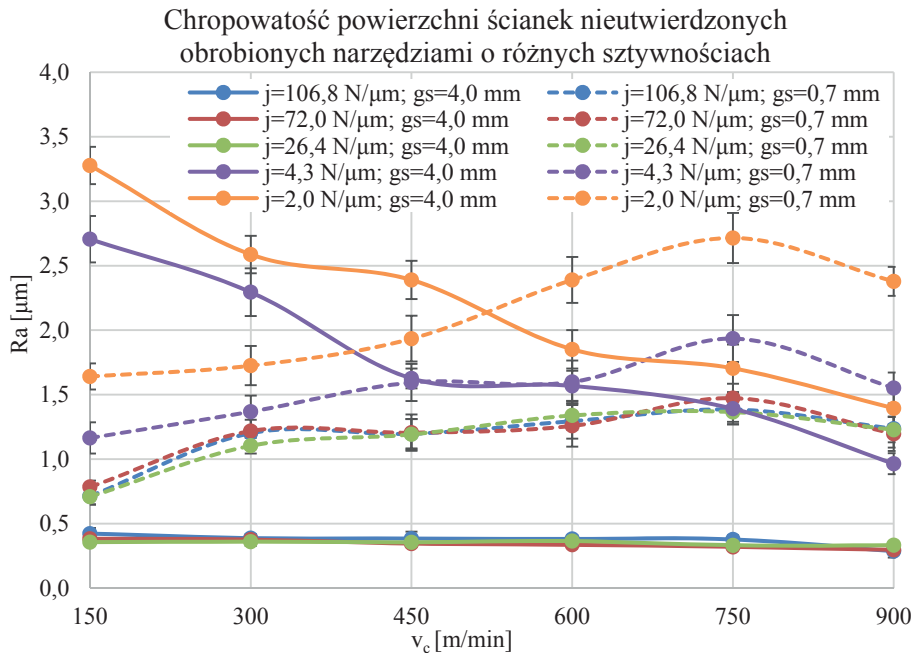
Omówione wyniki dotyczą ścianek o najmniejszej grubości $g_s = 0,7$ mm. Dla grubszych ścianek, o większej sztywności, powyższy zakres długości będzie się wydłużał. Będzie on również zależał od wysokości ścianek. Dla ścianek o grubości $g_s = 2,8$ mm i większych, długość ścianek, zastosowanie lub brak utwardzenia nie będzie miało wpływu na zmiany wartości odkształcenia ścianek wzdłuż ich długości, gdyż ścianki o takiej grubości nie ulegają ugięciu w trakcie obróbki, co było wcześniej udowodnione.

6.2. Analiza chropowatości powierzchni obrobionych elementów

Poza dokładnością geometryczną (odkształceniami ścianek) głównym kryterium oceny jakości wykonania obrobionych elementów cienkościennych była uzyskana chropowatość powierzchni. Jakość warstwy wierzchniej wpływa nie tylko na walory estetyczne czy użytkowe wykonywanych elementów ale jest

jednym z czynników decydujących o ich wytrzymałości, zwłaszcza zmęczeniowej. Jest to obszar powstawania mikropęknięć, które inicjują proces dalszego zniszczenia. Źródłem takich mikropęknięć mogą być wady powstające podczas obróbki, powodujące pogorszenie jakości powierzchni. W celu sprawdzenia jakości powierzchni wykonano pomiary chropowatości, których wyniki omówiono w tej części rozprawy. Podobnie jak w przypadku analizy odkształceń skoncentrowano się na omówieniu chropowatości powierzchni ścianek nieutwardzonych, wykonanych z różnymi parametrami geometrycznymi i technologicznymi, ze stopu EN AW- 7075. Następnie na zasadzie porównania omówiono wyniki dla ścianek wykonanych z różnych gatunków stopów aluminium oraz dla ścianek utwardzonych i nieutwardzonych.

Na rys. 6.28 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości ścianek o dwóch skrajnych wartościach grubości ($g_s = 4,0$ mm i $g_s = 0,7$ mm), wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności.



Rys. 6.28. Chropowatość powierzchni ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s=4,0$ mm i $g_s=0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności

Dla ścianek o największej grubości, wykonanych narzędziami o różnej sztywności można zaobserwować spadek chropowatości powierzchni wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Dla narzędzi o dużej sztywności w zakresie $j = 106,8 \div 26,4$ N/μm, spadek ten ma łagodny przebieg, a uzyskana chropowatość ma najniższe wartości. W przypadku narzędzi o małej sztywności $j = 4,3 \div 2$ N/μm, przy obróbce ścianek

o grubości $g_s = 4,0$ mm, uzyskano najwyższe wartości chropowatości, co jest efektem braku stabilności narzędzi. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania chropowatość powierzchni wykonanych tymi narzędziami maleje. Świadczy to o korzystnym wpływie zwiększenia prędkości skrawania na stabilność pracy narzędzi. Jest to częściowo zgodne z wynikami analizy modalnej. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że powierzchnie obszarów stabilnych, znajdujące się poniżej krzywych workowych, zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości skrawania (rys. 4.3). Powiększa to zakres parametrów technologicznych, dla których praca narzędzia może być stabilna. Jednak wyniki analizy modalnej (rys. 4.3c) wskazują, że uzyskanie stabilnej pracy narzędzi, w rozpatrywanym zakresie prędkości skrawania, dla obróbki ścianki o grubości $g_s = 4,0$ mm, narzędziem o sztywności $j = 106,8$ N/ μ m, nie jest możliwe. Biorąc pod uwagę spadek chropowatości powierzchni wraz ze wzrostem prędkości skrawania, możemy stwierdzić, że wyniki analizy modalnej nie są do końca zgodne z wynikami badań doświadczalnych.

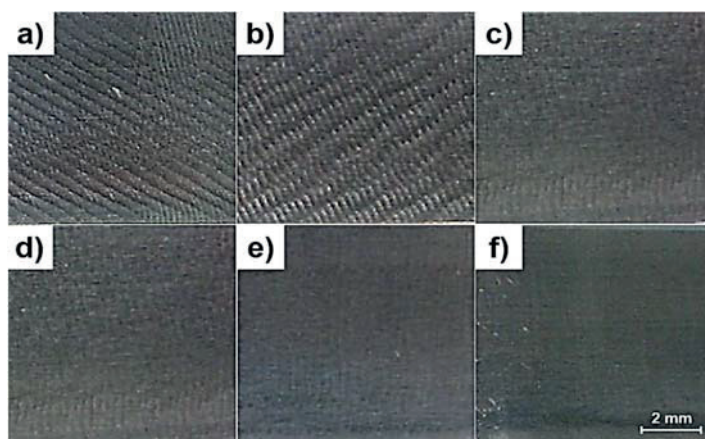
Tabela 6.6. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości chropowatości powierzchni ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z różnymi prędkościami skrawania; $\alpha = 0,05$

Grubość ścianki i prędkość skrawania	Sztywność narzędzi j [N/ μ m]	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
$g_s=0,7$ mm $v_c=750$ m/min	$j = 106,4 - j = 26,4$	1,4699	$(2,818; +\infty)$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,4494	$(-2,074; -2,074)$	$\mu_1 = \mu_2$
Grubość ścianki i prędkość skrawania	Sztywność narzędzi j [N/ μ m]	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
$g_s=4,0$ mm $v_c=750$ m/min	$j = 106,4 - j = 26,4$	7,3699	$(2,818; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	4,8612	$(-2,145; 2,145)$	$\mu_1 \neq \mu_2$
$g_s=4,0$ mm $v_c=900$ m/min	$j = 106,4 - j = 26,4$	14,4573	$(2,818; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-3,0976	$(-2,160; 2,160)$	$\mu_1 \neq \mu_2$
$g_s=4,0$ mm $v_c=900$ m/min	$j = 106,4 - j = 72$	41,5729	$(2,818; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	-0,6799	$(-2,179; 2,179)$	$\mu_1 = \mu_2$
Grubość ścianki i sztywność narzędzia	Prędkość skrawania v_c [m/min]	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
$g_s=4,0$ mm $j=106,8$ N/ μ m	$v_c=150 - v_c=900$	0,7568	$(0,355; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	7,1361	$(-2,074; 2,074)$	$\mu_1 \neq \mu_2$

Chropowatości powierzchni ścianek wykonanych narzędziami o sztywności $j = 106,8 \div 26,4$ N/ μ m mają bardzo zbliżone wartości. Dla narzędzi o tej sztywności i ścianek o grubości $g_s = 4,0$ mm z przebiegu wykresów na rys. 6.28 trudno jest

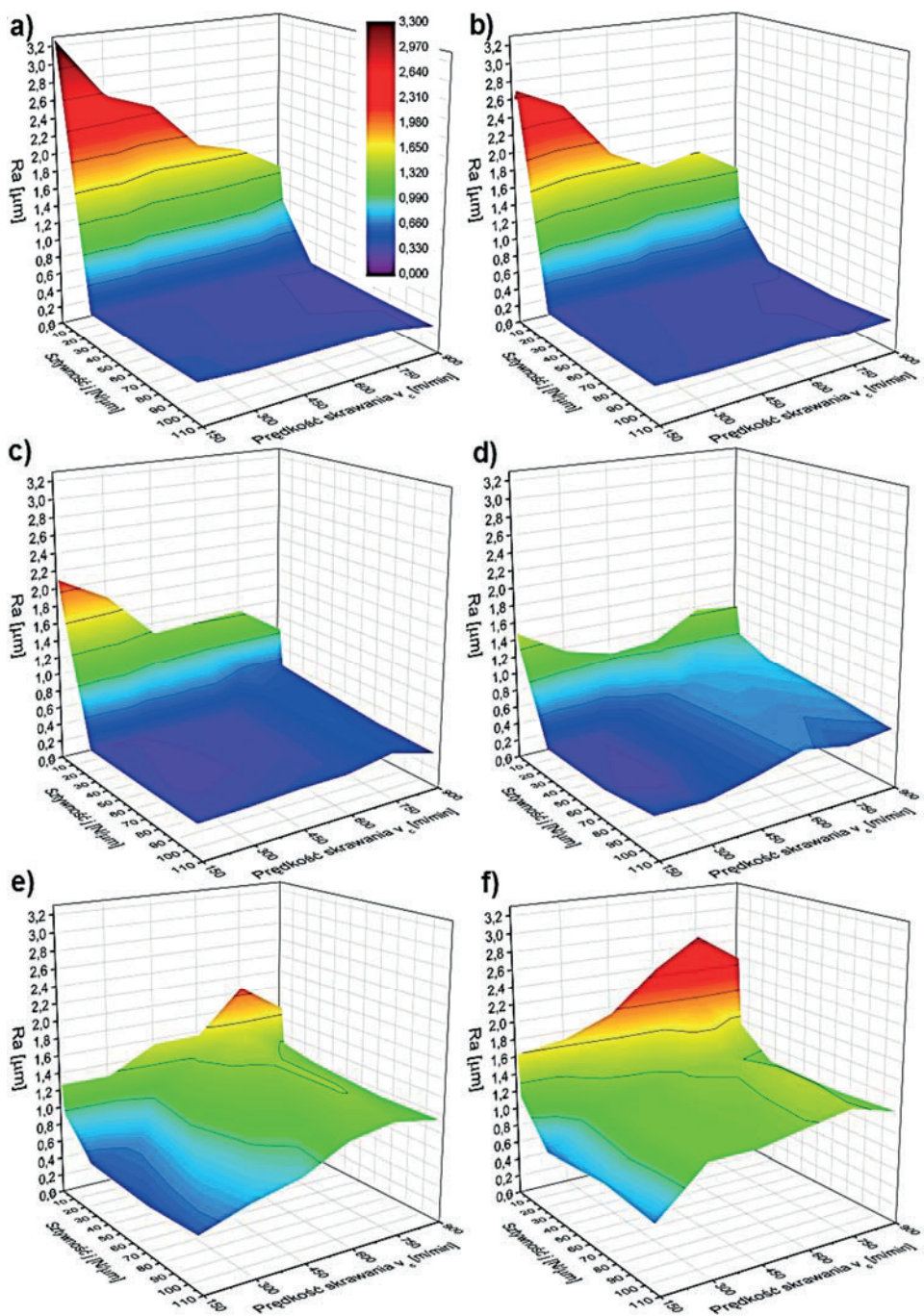
ocenić czy występuje spadek chropowatości wraz ze wzrostem prędkości skrawania. W celu sprawdzenia czy istnieje różnica wartości chropowatości dla tych parametrów, przeprowadzono statystyczną analizę porównawczą, której wyniki przedstawiono w tabeli 6.6.

Na podstawie statystycznej weryfikacji różnic można przyjąć, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$, wartości uzyskanych chropowatości powierzchni dla danej grubości ścianek, wykonanych narzędziami o sztywności $j = 106,8$ i $j = 72 \text{ N}/\mu\text{m}$ są równe. W przypadku narzędzi o sztywności $j = 106,8$ i $j = 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$, należy odrzucić hipotezę zerową H_0 o równości średnich. Oznacza to, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$, wartości chropowatości uzyskane przy obróbce tymi narzędziami są różne. Dla narzędzi o sztywności mniejszej od $j = 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$ różnica wartości chropowatości (rys. 6.28 i 6.30) jest na tyle znacząca, że nie wymaga weryfikacji statystycznej. Statystyczne porównanie wyników dla prędkości skrawania $v_c = 150$ i $v_c = 900 \text{ m/min}$ wskazuje, że wartości chropowatości uzyskane dla tych prędkości są różne. Można zatem przyjąć, że chropowatość powierzchni wykonanych narzędziami o sztywności $j = 106,8 \div 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$ maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Jako przykład zmian chropowatości w zależności od prędkości skrawania, na rys. 6.29 przedstawiono widok powierzchni ścianek o grubości $g_s = 4 \text{ mm}$ obrobionych narzędziem o sztywności $j = 72 \text{ N}/\mu\text{m}$.



Rys. 6.29. Widok powierzchni ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s = 4 \text{ mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o sztywności $j = 72 \text{ N}/\mu\text{m}$ z różnymi prędkościami skrawania v_c : a) 150 m/min; b) 300 m/min; c) 450 m/min; d) 600 m/min; e) 750 m/min; f) 900 m/min

Pełen zakres wyników pomiarów chropowatości powierzchni ścianek nieutwardzonych o różnej grubości wykonanych ze stopu EN AW-7075, w zależności od sztywności narzędzi oraz prędkości skrawania, zaprezentowano na rys. 6.30 w postaci mapy 3D (dla stopów EN AW-6082 i AlSi10Mg podobne wykresy zawarto w załącznikach 7 i 8).



Rys. 6.30. Chropowość powierzchni ścianek nieutwardzonych wykonanych ze stopu EN AW-7075; grubości ścianek g_s : a) 4,0mm; b) 2,8mm; c) 2,0mm; d) 1,4mm; e) 1,0mm; f) 0,7mm

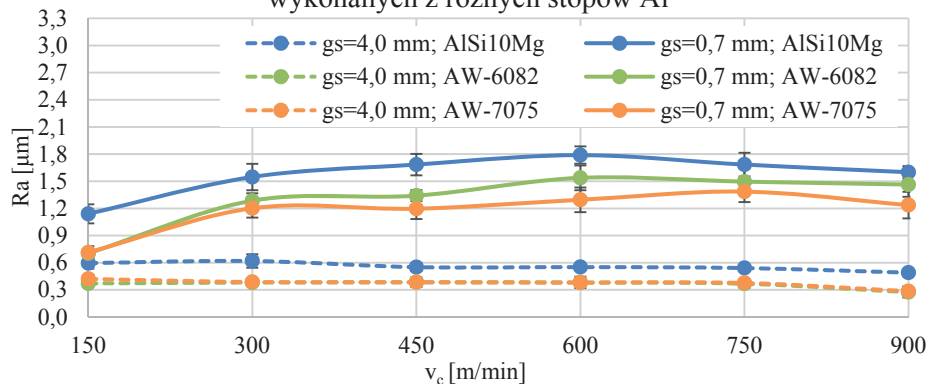
Możemy zaobserwować, że dla poszczególnych grubości ścianek zmiany chropowatości, w zależności od prędkości skrawania, w zakresie sztywności narzędzi $j = 106,8 \div 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$ mają podobny charakter. Dla grubości ścianek $g_s = 4 \div 2,8 \text{ mm}$, w tym zakresie sztywności narzędzi, uzyskano niskie i zbliżone wartości chropowatości. Maleją one lekko wraz ze wzrostem prędkości skrawania i lekko rosną ze spadkiem sztywności narzędzi. Wraz ze spadkiem grubości ścianek w zakresie $g_s = 2 \div 0,7 \text{ mm}$, chropowatość zwiększa się, co jest związane ze spadkiem ich sztywności. Jednak jej wartości w obrębie poszczególnych grubości ścianek, dla sztywności narzędzi $j = 106,8 \div 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$ i dla tych samych prędkości skrawania są zbliżone. Wyraźnie odmienny charakter mają zmiany chropowatości dla ścianek wykonanych narzędziami o sztywności $j = 4,3 \div 2,0 \text{ N}/\mu\text{m}$. Występuje znaczący wzrost chropowatości, wraz z spadkiem sztywności narzędzi, dla wszystkich grubości ścianek. Zmiany wartości chropowatości mają nieco inny przebieg w zależności od grubości ścianek. Jak omówiono wcześniej, dla największych grubości ścianek $g_s = 4 \div 2 \text{ mm}$ i najmniejszych prędkości, w wyniku utraty stabilności narzędzi, uzyskano najwyższą chropowatość. Dla tych grubości ścianek maleje ona wraz ze wzrostem prędkości skrawania (rys. 30 a÷c). Dla grubości ścianek $g_s = 1,0 \div 0,7 \text{ mm}$, wraz ze wzrostem prędkości skrawania w zakresie $v_c = 150 \div 750 \text{ m/min}$ występuje wzrost chropowatości. Zwiększenie prędkości skrawania, powoduje zwiększenie częstotliwości zmian siły skrawania, czego efektem jest zwiększenie częstotliwości drgań cienkich ścianek i pogorszenie jakości ich powierzchni. Na zjawisko to nakładają się również zmiany stabilności pracy narzędzia, co może być przyczyną okresowego zwiększenia lub zmniejszenia chropowatości. Zgodnie z wynikami analizy modalnej (rys. 4.4), przy obróbce najcieńszych ścianek narzędziami o najmniejszej sztywności, zakres prędkości skrawania ok. $v_c = 450 \div 750 \text{ m/min}$, jest obszarem braku stabilności. Może to być przyczyną wzrostu chropowatości w tym zakresie prędkości skrawania, który jest widoczny na wykresach rys. 6.30b÷f. Lokalne ekstremum tego zjawiska, w zależności od gatunku stopu aluminium, odpowiada następującym prędkościom skrawania:

- EN AW-7075 – ok. $v_c = 750 \text{ m/min}$ (rys. 6.30),
- AlSi10Mg – ok. $v_c = 600 \text{ m/min}$ (załącznik 8),
- EN AW-6082 – dla tego stopu zjawisko to nie występuje, co może być związane ze specyfiką obróbki stopów aluminium o dużej plastyczności.

Ze względu na odmienne właściwości wybranych stopów, chropowatość powierzchni wykonanych z nich ścianek różni się, co omówiono we wstępie pracy. Na wartość chropowatości będą wpływać omówione wcześniej czynniki, tj. sztywność narzędzi, prędkość skrawania i grubość ścianki. Jednak wpływ ten może być odmienny dla poszczególnych gatunków stopów. Na rys. 6.31 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości, w zależności od prędkości skrawania, ścianek nieutwierdzonych o grubości $g_s = 4$ i $g_s = 0,7 \text{ mm}$ wykonanych z trzech różnych gatunków stopów Al.

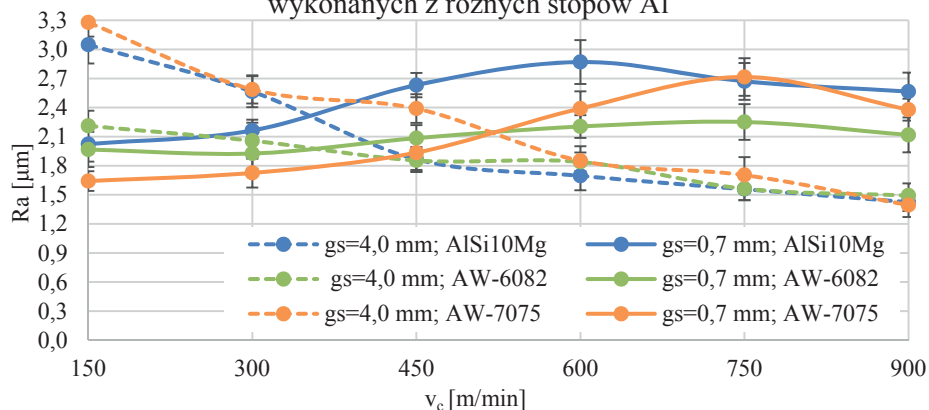
a)

Chropowość powierzchni ścianek nieutwardzonych
obrobionych narzędziem o sztywności $j=106,8 \text{ N}/\mu\text{m}$,
wykonanych z różnych stopów Al



b)

Chropowość powierzchni ścianek nieutwardzonych
obrobionych narzędziem o sztywności $j=2,0 \text{ N}/\mu\text{m}$,
wykonanych z różnych stopów Al



Rys. 6.31. Chropowość powierzchni ścianek nieutwardzonych o grubościach $g_s=4,0 \text{ mm}$ i $g_s=0,7 \text{ mm}$, wykonanych z różnych stopów Al narzędziami o sztywnościach j : a) $106,8 \text{ N}/\mu\text{m}$; b) $2,0 \text{ N}/\mu\text{m}$

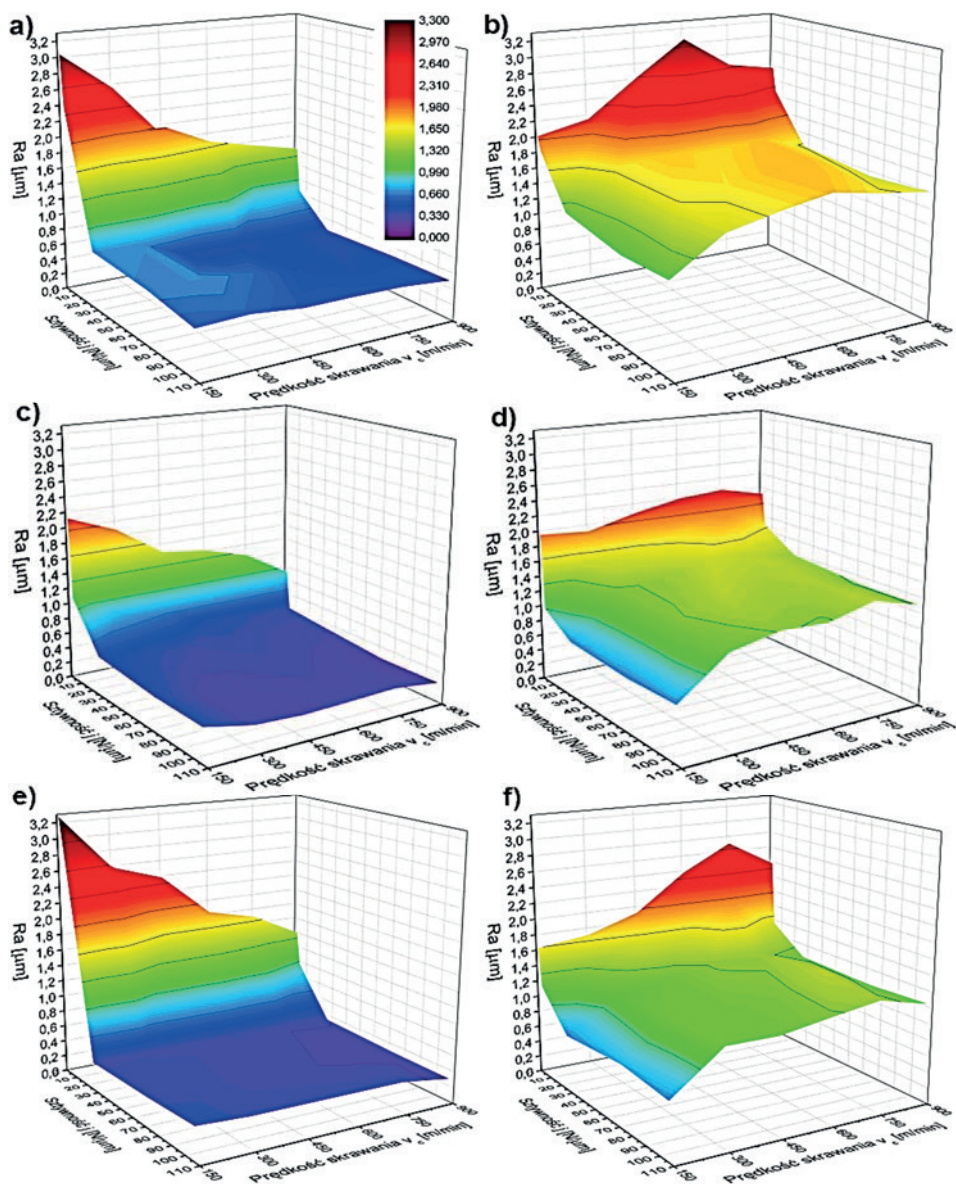
Wyniki przedstawione na rys. 6.31a dla ścianek o grubości $g_s=4 \text{ mm}$ najlepiej obrazują wpływ gatunku stopu na wartość chropowatości wykonanych z niego ścianek. Duża sztywność ścianek oraz narzędzi zastosowanych do ich wykonania, eliminuje z pomiaru wpływ utraty stabilności tych elementów. Zmierzone wartości chropowatości będą więc zależały jedynie od zastosowanych parametrów technologicznych (prędkości skrawania) oraz właściwości poszczególnych materiałów. Możemy w tym przypadku stwierdzić, że wartości chropowatości ścianek

wykonanych za stopów EN AW-6082 i EN AW-7075 w całym zakresie prędkości skrawania są równe (rys. 6.31a). Zostało to potwierdzone statystyczną weryfikacją różnic, której wyniki przedstawiono w tabeli 6.7. Wartości chropowatości ścianek wykonanych ze stopu AlSi10Mg są wyższe. Jest to efektem zjawisk jakie towarzyszą obróbce odlewniczych stopów aluminium z dużą zawartością krzemu. Cząstki wydzieleń krzemu oraz innych zanieczyszczeń są wyrwane ze stosunkowo miękkiej osnowy i trą o powierzchnię materiału, która po obróbce ma charakterystyczny matowy wygląd. Podobne wyniki uzyskano dla ścianek o grubości $g_s = 0,7$ mm. Najwyższą chropowatość uzyskano dla stopu AlSi10Mg, jednak wartości chropowatości ścianek wykonanych za stopów EN AW-6082 i EN AW-7075 nieco się różnią.

Tabela 6.7. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości chropowatości powierzchni ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z różnymi prędkościami skrawania; $\alpha = 0,05$

Grubość ścianki, prędkość skrawania, sztywność narzędzia	Gatunek stopu	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki t	Przedział krytyczny t	Hipoteza
$g_s = 4,0$ mm $v_c = 900$ m/min $j = 106,8$ N/ μ m	AW-6082 – AW-7075	1,4076	$(2,818; +\infty)$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	-0,5067	$(-2,074; -2,074)$	$\mu_1 = \mu_2$
Grubość ścianki, prędkość skrawania, sztywność narzędzia	Gatunek stopu	Wartość statystyki F	Przedział krytyczny F	Hipoteza	Wartość statystyki C	Przedział krytyczny C	Hipoteza
$g_s = 4,0$ mm $v_c = 600$ m/min $j = 2,0$ N/ μ m	AlSi10Mg – AW-7075	0,5163	$(0,355; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1,2417	$(-2,086; 2,086)$	$\mu_1 = \mu_2$
$g_s = 4,0$ mm $v_c = 900$ m/min $j = 2,0$ N/ μ m	AW-6082 – AW-7075	1,0058	$(2,818; +\infty)$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	1,9413	$(-2,074; -2,074)$	$\mu_1 = \mu_2$

Obliczenia statystyczne potwierdziły również równość chropowatości ścianek o grubości $g_s = 4$ mm, wykonanych narzędziem o najmniejszej sztywności $j = 2$ N/ μ m, w zakresie prędkości skrawania $v_c = 600 \div 750$ m/min dla wszystkich trzech stopów (rys. 6.31b). Dla prędkości skrawania niższych od $v_c = 600$ m/min chropowatości dla stopów AlSi10Mg i EN AW-7075 mają zbliżone wartości (z wyjątkiem prędkości skrawania $v_c = 450$ m/min) a dla stopu EN AW-6082 są mniejsze. Różnica ta zwiększa się wraz ze spadkiem prędkości skrawania. Jak stwierdzono wcześniej wartości chropowatości ścianek, o grubości $g_s = 4 \div 2,8$ mm, obrabianych narzędziami o małej sztywności $j = 4,3 \div 2,0$ N/ μ m, zależą głównie od zachowania się tych narzędzi w trakcie obróbki. Można zatem przypuszczać, że powyższa różnica wynika z charakteru zmian stabilności narzędzi podczas obróbki poszczególnych stopów.

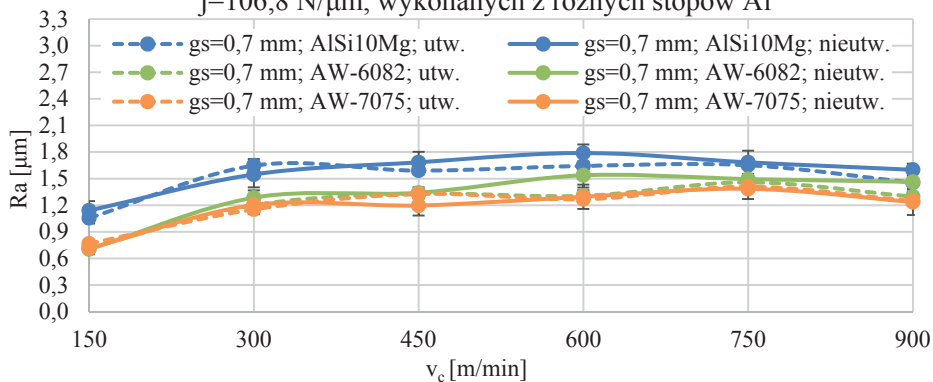


Rys. 6.32. Chropowość powierzchni ścianek nieutwardzonych wykonanych z różnych stopów Al: a) AlSi10Mg, $g_s=4,0\text{mm}$; b) AlSi10Mg, $g_s=0,7\text{mm}$; c) AW-6082, $g_s=4,0\text{mm}$; d) AW-6082, $g_s=0,7\text{mm}$; e) AW-7075, $g_s=4,0\text{mm}$; f) AW-7075, $g_s=0,7\text{mm}$

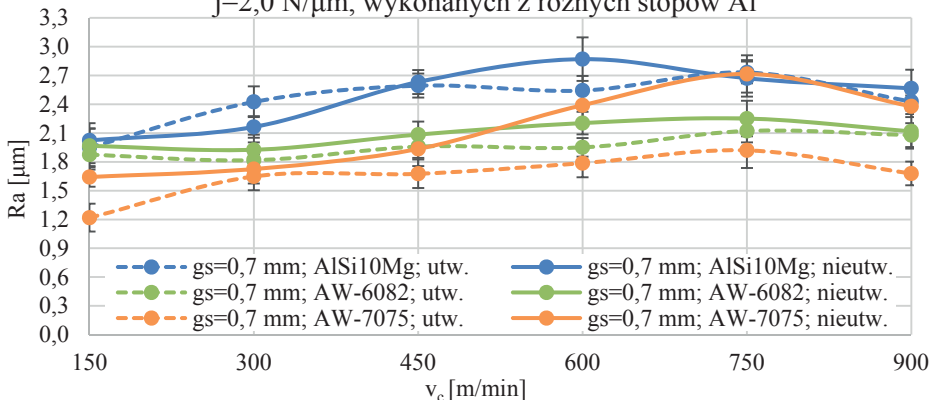
Na rys. 6.32 można zaobserwować, że przebiegi zmian chropowości dla stopów AlSi10Mg (rys. 6.32a, b) i EN AW-7075 (rys. 6.32 e, f) są bardzo podobne. Jednak wartości chropowości dla stopu AlSi10Mg są większe (dla pewnych zakresów parametrów dla obydwu stopów są zbliżone, np. dla $g_s = 0,7 \text{ mm}$

i $v_c = 750$ m/min rys. 6.31b). Ponadto maksymalne wartości chropowatości, dla ścianek o małej grubości $g_s = 1,0 \div 0,7$ mm, występują dla tych stopów przy innych prędkościach skrawania, o czym wspomniano wcześniej. Między tymi stopami a stopem EN AW-6082, w zakresie małych sztywności narzędzi $j = 4,3 \div 2,0$ N/ μ m istnieją wyraźne różnice. W zakresie prędkości skrawania $v_c = 150 \div 600$ m/min, dla grubości $g_s = 4 \div 2$ mm uzyskano najniższą chropowatość, natomiast dla ścianek o grubości $g_s = 1,4 \div 0,7$ mm jej wartości wahają się pomiędzy uzyskanymi dla stopów AlSi10Mg i EN AW-7075. Powyżej $v_c = 600$ m/min dla ścianek o grubości $g_s = 1,4 \div 0,7$ mm chropowatość dla stopu EN AW-6082 jest niższa.

a) Chropowatość powierzchni ścianek utwardzonych i nieutwardzonych obrobionych narzędziem o sztywności $j=106,8$ N/ μ m, wykonanych z różnych stopów Al

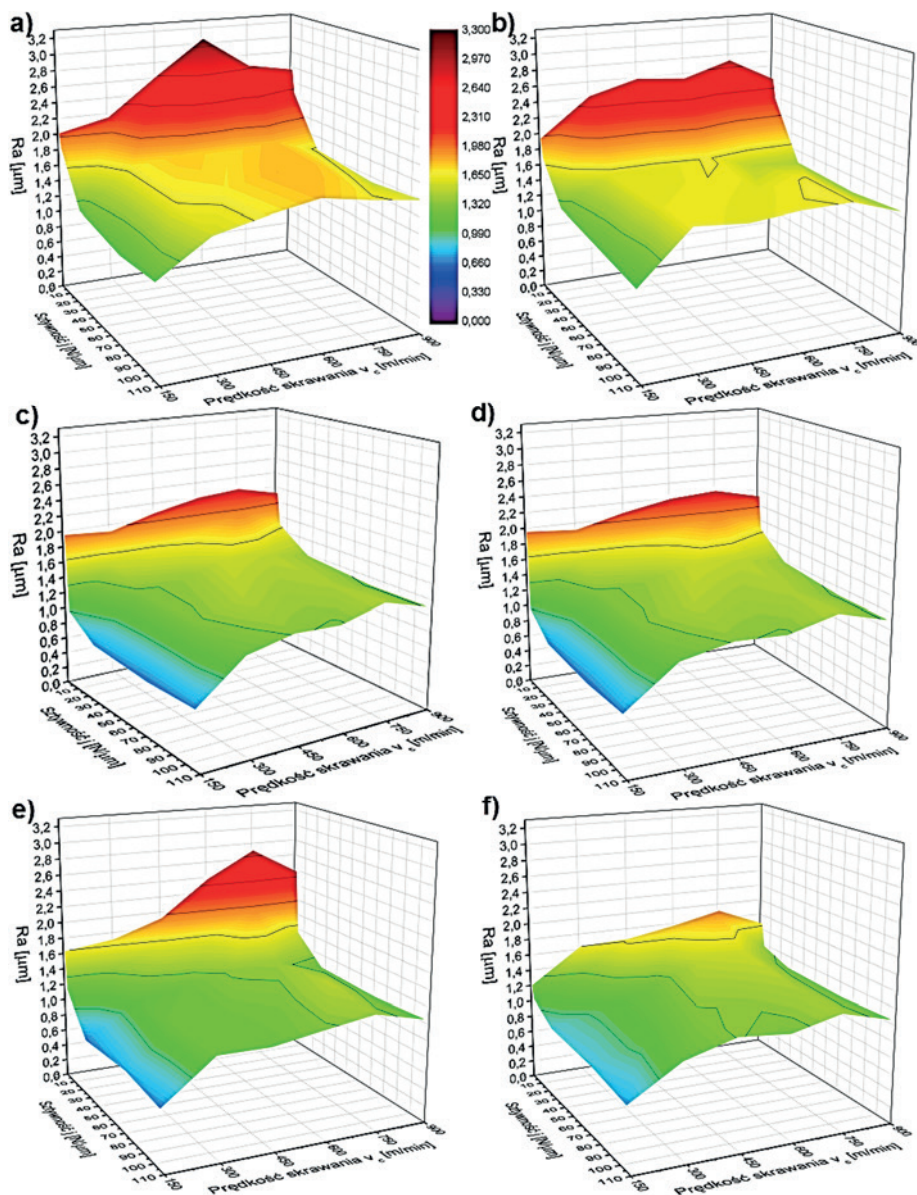


b) Chropowatość powierzchni ścianek utwardzonych i nieutwardzonych obrobionych narzędziem o sztywności $j=2,0$ N/ μ m, wykonanych z różnych stopów Al



Rys. 6.33. Chropowatość powierzchni ścianek utwardzonych i nieutwardzonych o grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych z różnych stopów Al narzędziami o sztywności j : a) $106,8$ N/ μ m; b) $2,0$ N/ μ m

Na rys. 6.33 i 6.34 przedstawiono porównanie wartości chropowatości dla ścianek nieutwardzonych i utwardzonych o grubości $g_s = 0,7$ mm wykonanych z różnych stopów aluminium.



Rys. 6.34. Chropowość powierzchni ścianek nieutwardzonych i utwardzonych o grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych z różnych stopów Al: a) AlSi10Mg, nieutw.; b) AlSi10Mg, utw.; c) AW-6082, nieutw.; d) AW-6082, utw.; e) AW-7075, nieutw.; f) AW-7075, utw.

W przypadku obróbki narzędziami o sztywności $j = 106,8 \div 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$ różnica wartości chropowatości między ściankami nieutwardzonymi i utwardzonymi dla poszczególnych materiałów jest trudna do wychwycenia (rys. 6.34). Można jedynie stwierdzić, że chropowatość dla stopu odlewniczego AlSi10Mg, dla całego zakresu sztywności narzędzi i prędkości skrawania, jest większa niż dla dwóch stopów do obróbki plastycznej. Dla narzędzi o sztywności mniejszej od $j = 26,4 \text{ N}/\mu\text{m}$, przy obróbce stopów do obróbki plastycznej, chropowatość ścianek nieutwardzonych jest wyższa niż utwardzonych. Jest to prawdopodobnie efekt zwiększonej sztywności ścianek utwardzonych. Natomiast dla stopu AlSi10Mg ocena różnic chropowatości pomiędzy ściankami utwardzonymi i nieutwardzonymi jest utrudniona.

Jak wspomniano, w części wstępnej chropowatość powierzchni zależy od stopnia zużycia narzędzia. Należy podkreślić, że do badań zastosowano nowe narzędzia, a ich zużycie po wykonaniu wszystkich prób było niezauważalne.

7. Dyskusja wyników i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz ich analiz stwierdzono, że zrealizowany na potrzeby rozprawy zakres badań w pełni pozwolił na pozytywną weryfikację sformułowanej hipotezy badawczej. Przedstawione w rozprawie wyniki badań jednoznacznie potwierdzają, że:

- Sztywność statyczna frezów trzpieniowych ma różny wpływ na dokładność geometryczną wykonywanych przedmiotów w warunkach obróbki konwencjonalnej i HSC – obniżenie sztywności narzędzia poniżej pewnej wartości jest przyczyną utraty jego stabilności w trakcie obróbki, co prowadzi do pogorszenia dokładności wykonywanych elementów oraz chropowatości ich powierzchni.
- Dokładność geometryczna przedmiotów wykonywanych narzędziami o różnej sztywności zmienia się wraz z prędkością skrawania – można zaobserwować pogorszenie dokładności geometrycznej wykonanych elementów wraz ze wzrostem prędkości skrawania, do zakresu prędkości granicznych pomiędzy obróbką konwencjonalną i HSC. Dla prędkości granicznych uzyskano najwyższe siły skrawania. Zwiększenie prędkości skrawania powyżej wartości granicznej skutkuje zmniejszeniem chropowatości powierzchni oraz zmniejszeniem wartości odkształcenia przedmiotu obrabianego i narzędzia. Wynika to z dwu zjawisk:
 - ✓ obniżenia sił skrawania wraz ze wzrostem prędkości skrawania powyżej prędkości granicznej, której wartość jest różna w zależności od gatunku obrabianego stopu aluminium.
 - ✓ zwiększenia stabilności pracy narzędzia w pewnych zakresach prędkości skrawania, co jest potwierdzeniem wyników analizy modalnej.
- Dokładność geometryczna przedmiotów zależy również od właściwości mechanicznych obrabianych materiałów – dla stopów do obróbki plastycznej uzyskano znacznie niższą chropowatość powierzchni niż dla stopu odlewniczego. Z drugiej jednak strony przy obróbce tego stopu występowały najniższe opory skrawania co przełożyło się na zmniejszone wartości sił skrawania, a w konsekwencji na obniżenie odkształcenia. Dla poszczególnych stopów odmienny charakter mają również zmiany sił skrawania w zależności od prędkości skrawania. Stopy posiadają różne wartości granicznej prędkości skrawania. Oznacza to, że maksimum sił, a tym samym maksimum odkształcenia przedmiotu obrabianego i narzędzi uzyskano dla innych wartości prędkości skrawania.

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz symulacje numeryczne pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków praktycznych:

- Dokładność wyników badań stabilności narzędzi z zastosowaniem analizy modalnej, ze względu na złożoność procesu skrawania, jest zbyt mała aby jednoznacznie wyznaczyć wartości parametrów technologicznych, dla których

uzyskamy stabilną obróbkę. Wyniki tych obliczeń dają jednak ogólny pogląd o zakresach korzystnych wartości parametrów technologicznych i mogą być punktem wyjścia do dalszych badań.

- Rezultaty obliczeń MES dobrze korelują z wynikami badań doświadczalnych jedynie dla ścianek o grubości $g_s = 4,0 \div 1,4$ mm i narzędzi o sztywności $j = 106,8 \div 26,4$ N/ μ m, wynika to z następujących powodów:
 - ✓ zastosowano uproszczony model, w którym oddziaływanie narzędzia na przedmiot obrabiany sprowadza się do statycznej siły, której wartość zmienia się tylko nieznacznie ze zmianą długości narzędzia,
 - ✓ dla ścianek o grubości mniejszej od $g_s = 1,4$ mm, różnice między obliczeniami MES i wynikami badań rosną wraz ze zmniejszeniem ich grubości ścianek. Dla ścianki $g_s = 0,7$ mm wartości obliczonego z zastosowaniem MES przemieszczenia są o rząd wielkości większe od wyników pomiarów rzeczywistego odkształcenia. Przyczyną tego są prawdopodobnie błędy siatki oraz zastosowany algorytm obliczeń.
- Obniżenie sztywności narzędzi w zakresie $j = 106,8 \div 26,4$ N/ μ m powoduje tylko nieznaczne pogorszenie jakości wykonanych ścianek. Znaczące zwiększenie chropowatości powierzchni oraz odkształcenie przedmiotu obrabianego lub narzędzia (co zależy od grubości ścianek g_s) występuje dla narzędzi o sztywności mniejszej od $j = 26,4$ N/ μ m.
- Można przyjąć, że dla grubości ścianek $g_s = 2,8$ mm i większych nie występuje ich odkształcenie podczas obróbki, a kształt zarysu ich powierzchni bocznych zależy od ugięcia narzędzi, które rośnie wraz ze spadkiem sztywności.
- Najbardziej narażonym na odkształcenie fragmentem ścianek nieutwierdzonych są ich końce. Strefa zwiększonego odkształcenia końców ścianek rośnie wraz z ich długością, jednak wartości tego odkształcenia dla poszczególnych długości ścianek różnią się w nieznacznym stopniu. Podobne zjawisko możemy zaobserwować w strefach środkowych zarówno ścianek utwierdzonych jak i nieutwierdzonych. Dla tych ścianek o długościach $L_s = 70$ mm i dłuższych, wartości odkształcenia w strefie środkowej praktycznie nie zwiększają się w miarę zwiększania ich długości. Dotyczy to ścianek o określonej wysokości (w rozpatrywanym przypadku $h_s = 15$ mm). Zastosowanie innego stosunku h_s/g_s , dla określonej grubości ścianki, może skutkować otrzymaniem odmiennych wyników, co wymaga potwierdzenia dalszymi badaniami.
- Dodatkowe usztywnienia ścianek o grubościach $g_s = 1,0 \div 0,7$ mm, w celu zwiększenia ich sztywności, ma sens dla długości ścianek mniejszych niż $L_s = 50$ mm. Będzie to prawdopodobnie również zależało od stosunku h_s/g_s .

Przeprowadzone badania wskazują na celowość pełniejszej analizy skrawalności stopów aluminium, zwłaszcza w kontekście doskonalenia cech geometrycznych narzędzi dedykowanych do obróbki stopów Al. Producenci narzędzi z reguły nie uwzględniają faktu, że w tej grupie stopów znajdują się materiały o diametralnie różnych właściwościach technologicznych. Interesujące są także wyniki

uzyskane dla obróbki tzw. konwencjonalnej i obróbki z podwyższonymi prędkościami, charakterystycznymi dla HSC. Potwierdzenie znalazło przypuszczenie, że po przekroczeniu pewnej prędkości skrawania, nieco odmiennej w zależności od gatunku stopu, obserwuje się spadek siły skrawania, a tym samym wiele korzystnych zjawisk dla przebiegu i efektów skrawania.

Spis rysunków

Rys. 1.1. Przykłady złożonych konstrukcji wykonywanych frezowaniem [13, 102].....	11
Rys. 1.2. Rodzaje frezowania [28].....	12
Rys. 1.3. Typy operacji frezarskich [90].....	13
Rys. 1.4. Usprawnienie procesu produkcyjnego - redukcja czasu produkcji w procesie C) w stosunku do procesu A) na poziomie 30 - 50% [74, 87]	14
Rys. 1.5. Przebieg sił skrawania w funkcji prędkości [1, 2]	15
Rys. 1.6. Zależność składowych siły skrawania od prędkości skrawania przy toczeniu stopu Al6ZnMg1,5Cu [69].....	15
Rys. 1.7. Czynniki determinujące HSM [28].....	16
Rys. 1.8. Porównanie zakresów prędkości skrawania v_c dla obróbki konwencjonalnej i HSC, w zależności od: a) rodzaju materiału obrabianego, b) sposobu skrawania [16, 28].....	17
Rys. 1.9. Wpływ wzrostu prędkości skrawania na zmiany zjawisk towarzyszących procesowi obróbki [28, 71].....	18
Rys. 1.10. Ukształtowanie krawędzi skrawającej narzędzia [13]	19
Rys. 1.11. Porównanie obróbki konwencjonalnej z obróbkami HSC i HPC [16, 67, 69].....	20
Rys. 1.12. Warunki styku ostrzy narzędzi z przedmiotem obrabianym [67, 69]	21
Rys. 1.13. Wybór obróbki HSC lub HPC w zależności od stopnia złożoności [68].....	21
Rys. 1.14. Zależność parametru R_a od prędkości skrawania v_c [41, 69]	25
Rys. 1.15. Powstawanie narostu na krawędzi skrawającej: a) ostrze bez powłoki, b) powłoka TiAlCrYN, c) powłoka diamentowa DLC, d) powłoka TiAlN/VN [36].....	26
Rys. 1.16. Kolejne fazy zużycia ostrzy narzędzi: a) frez HSS, b) fraz składany z płytą powlekaną TiN, c) frez węglkowy H10F [48]	27
Rys. 1.17. Fragment wykresu równowagi stopów Al do obróbki plastycznej, umacnianych przez zgniot i utwardzanych wydzieleniowo oraz stopów odlewniczych [20].....	30
Rys. 1.18. Podział stopów aluminium do obróbki plastycznej [60, 69].....	31
Rys. 1.19. Podział odlewniczych stopów aluminium [69].....	33
Rys. 1.20. Efekt niestabilnej pracy narzędzia - karbowanie (chatter) [12]	35
Rys. 1.21. Schemat powstawania drgań karbujących [13].....	35
Rys. 1.22. Przykładowy wykres stabilności – krzywa workowa [13, 85].....	36
Rys. 1.23. Odkształcenia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono [86]	38
Rys. 1.24. Przykładowa odpowiedź układu narzędzie-oprawka-wrzeciono na wymuszenie a) część rzeczywista, b) część urojona [76].....	39
Rys. 1.25. Zjawiska towarzyszące obróbce elementów cienkościennych a) odkształcenie ścianki i narzędzia [10], b) przykładowy zarys ścianki po obróbce.....	40
Rys. 1.26. Strategie obróbki cienkich ścianek [90, 103].....	41
Rys. 1.27. Frezy o różnym kącie pochylenia linii śrubowej [52].....	41

Rys. 3.1. Model obiektu badań	48
Rys. 3.2. Modele i widoki obrobionych próbek: a), b) próbki ze ściankami nieutwardzonymi; c), d) próbki ze ściankami utwardzonymi	52
Rys. 3.3. Widoki i geometria frezów zastosowanych do badań; frezy o długościach: a) 60 mm, b) 80mm, c) 100 mm, d) 120 mm, e) 140mm	53
Rys. 3.4. Widoki narzędzi o różnej długości wysięgów zamocowanych we wrzecionie obrabiarki	54
Rys. 3.5. Przykład ścieżek obróbkowych wygenerowanych w NX 8.0	54
Rys. 3.6. Centrum frezarskie VMC 800HS: a) widok ogólny, b) charakterystyka elektrowrzeciona [8]	56
Rys. 3.7. Zestaw do analizy modalnej.....	57
Rys. 3.8. Statyczna próba rozciągania: a) maszyna wytrzymałościowa Zwick/Roell Z150, b) kształt i wymiary próbek wg. PN-EN 10002-1:2004 [64]	58
Rys. 3.9. Pomiar sił skrawania: a) zestaw do pomiaru sił z siłomierzem 9257B, b) rozkład siły skrawania na mierzone składowe F_x , F_y , F_z [43]	59
Rys. 3.10. Profilometr T1000.....	59
Rys. 3.11. Sonda przedmiotowa TS640 [34]	59
Rys. 3.12. Pomiary dokładności ścianek: a) rozmieszczenie punktów pomiarowych, b) kształt ścianki – odchyłka dodatnia, c) kształt ścianki – odchyłka ujemna	61
Rys. 3.13. Położenie układu współrzędnych względem, którego wykonano pomiary ścianek: a) nieutwardzonych, b) utwardzonych.....	62
Rys. 3.14. Schemat wyboru odpowiednich testów do oceny istotności różnic [100]	64
Rys. 4.1. Zmiana sztywności „modalnej” układu narzędzie-oprawka-wrzeciono w zależności od długości wysięgu narzędzia dla dwu kierunków pomiaru: X i Y	66
Rys. 4.2. Zmiana uśrednionej sztywności układu narzędzie-oprawka-wrzeciono w zależności od długości wysięgu narzędzia	67
Rys. 4.3. Przykładowe wykresy stabilności dla głębokości skrawania $a_p = 15\text{mm}$ i szerokości frezowania $a_e = 0,85\text{mm}$ oraz różnych wysięgów narzędzia: a) $L_w = 25\text{mm}$, b) $L_w = 65\text{mm}$, c) $L_w = 105\text{mm}$	69
Rys. 4.4. Przykładowe wykresy stabilności dla głębokości skrawania $a_p = 15\text{mm}$ i szerokości frezowania $a_e = 0,15\text{mm}$ oraz różnych wysięgów narzędzia: a) $L_w = 25\text{mm}$, b) $L_w = 65\text{mm}$, c) $L_w = 105\text{mm}$	70
Rys. 4.5 Max. głębokość skrawania zapewniająca stabilną pracę w zależności od szerokości frezowania i wysięgu narzędzia dla stopu: a) AlSi10Mg, b) AW 6082, c) AW 7075...	71
Rys. 5.1. Siły skrawania w zależności od prędkości skrawania v_c dla stopu: a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075	75
Rys. 5.2. Wyniki badań wytrzymałościowych wg PN EN 10002-1[64] dla stopów: a) AlSi10Mg, b) AW 6082, c) AW 7075	77
Rys. 5.3. Moduł Younga oraz wytrzymałość na rozciąganie wybranych stopów aluminium	78
Rys. 5.4. Modele obciążenia oraz utwardzenia przyjęte w analizie MES: a) nieutwardzonych, b) utwardzonych.....	80

Rys. 5.5. Przykłady wygenerowanych siatek elementów skończonych dla ścianek: a) nieutwardzonych, b) utwardzonych	80
Rys. 5.6. Przemieszczenie wyliczone z zastosowaniem MES dla ścianek nieutwardzonych o różnych długościach i grubości $g_s = 0,7$ mm, dla stopu AW-7075 i obciążenia odpowiadającego sile skrawania przy prędkości $v_c = 600$ m/min, przyłożonego w przekrojach: a) środkowych, b) skrajnych.....	82
Rys. 5.7. Przemieszczenie wyliczone z zastosowaniem MES dla ścianek utwardzonych o różnych długościach i grubości $g_s = 0,7$ mm, dla stopu AW-7075 i obciążenia, odpowiadającego sile skrawania przy prędkości $v_c = 600$ m/min, przyłożonego w przekrojach środkowych	83
Rys. 5.8. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych o różnych długościach i grubościach dla stopów: a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075 ..	85
Rys. 5.9. Przemieszczenie w przekrojach skrajnych ścianek nieutwardzonych o różnych długościach i grubościach dla stopów: a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075 ..	86
Rys. 5.10. Przemieszczenie w przekrojach środkowych i skrajnych ścianek nieutwardzonych ...	87
Rys. 5.11. Przemieszczenie ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s = 0,7$ mm i różnych długościach L_s wykonanych ze stopu AW-7075, w przekrojach: a) środkowych, b) skrajnych.....	88
Rys. 5.12. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek utwardzonych o różnych długościach i grubości dla stopów: a) AlSi10Mg, b) AW-6082, c) AW-7075	89
Rys. 5.13. Przemieszczenie w przekrojach środkowych i skrajnych ścianek utwardzonych.....	90
Rys. 5.14. Przemieszczenie ścianek utwardzonych o grubości $g_s = 0,7$ mm i różnych długościach L_s wykonanych ze stopu AW-7075, w przekrojach środkowych	91
Rys. 5.15. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych i utwardzonych o długości $L_s = 90$ mm i grubości $g_s = 0,7$ mm	92
Rys. 6.1. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm; materiał EN AW-7075; sztywność narzędzia $j=2,0$ N/ μ m; prędkości skrawania v_c : a) 150 m/min, b) 300 m/min, c) 450 m/min, d) 600 m/min, e) 750 m/min, f) 900 m/min	94
Rys. 6.2. Wartości odkształceń w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o długościach $L_s=90$ mm i grubościach $g_s=0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 z różnymi prędkościami skrawania	95
Rys. 6.3. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600$ m/min; sztywność narzędzi j : a) 106,8 N/ μ m, b) 72 N/ μ m, c) 26,4 N/ μ m, d) 4,3 N/ μ m, e) 2,0 N/ μ m.....	97
Rys. 6.4. Wartości ugięcia narzędzi o różnej sztywności dla wybranych grubości ścianek g_s i prędkości skrawania v_c	98
Rys. 6.5. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności.....	99
Rys. 6.6. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90$ mm i grubości $g_s=0,7$ mm; prędkość skrawania $v_c=600$ m/min; sztywność narzędzia $j=2,0$ N/ μ m; materiał: a) AlSi10Mg, b) EN AW-6082, c) EN AW-7075	101

Rys. 6.7. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych z różnych stopów Al narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	102
Rys. 6.8. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$ wykonanych z różnych stopów Al : a) przekrój skrajny stop AlSi10Mg; b) przekrój środkowy stop AlSi10Mg; c) przekrój skrajny stop EN AW-6082; d) przekrój środkowy stop EN AW-6082; e) przekrój skrajny stop EN AW-7075; f) przekrój środkowy stop EN AW-7075	104
Rys. 6.9. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; grubość ścianek g_s : a) 4,0 mm, b) 2,8 mm, c) 2,0 mm, d) 1,4 mm, e) 1,0 mm, f) 0,7 mm	105
Rys. 6.10. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o różnych grubościach i długości $L_s=90\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	106
Rys. 6.11. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; grubości ścianek g_s : a) 4,0 mm, b) 2,8 mm, c) 2,0 mm, d) 1,4 mm, e) 1,0 mm, f) 0,7 mm	107
Rys. 6.12. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; długości ścianek L_s : a) 30 mm, b) 50 mm, c) 70 mm, d) 90 mm.....	109
Rys. 6.13. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek nieutwardzonych o różnych długościach i grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	110
Rys. 6.14. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; długość ścianek: a) 30 mm, b) 50 mm, c) 70 mm, d) 90 mm	111
Rys. 6.15. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$; materiał EN AW-7075; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; prędkości skrawania v_c : a) 150 m/min, b) 300 m/min, c) 450 m/min, d) 600 m/min, e) 750 m/min, f) 900 m/min	112
Rys. 6.16. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 z różnymi prędkościami skrawania.....	113
Rys. 6.17. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzi j : a) 106,8 $\text{N/}\mu\text{m}$, b) 72 $\text{N/}\mu\text{m}$, c) 26,4 $\text{N/}\mu\text{m}$, d) 4,3 $\text{N/}\mu\text{m}$, e) 2,0 $\text{N/}\mu\text{m}$	114
Rys. 6.18. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności	115

Rys. 6.19. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; materiał: a) AlSi10Mg, b) EN AW-6082, c) EN AW-7075	116
Rys. 6.20. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych z różnych stopów Al narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	117
Rys. 6.21. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ i grubości $g_s=0,7\text{mm}$ wykonanych z różnych stopów Al: a) przekrój skrajny stop AlSi10Mg; b) przekrój środkowy stop AlSi10Mg; c) przekrój skrajny stop EN AW-6082; d) przekrój środkowy stop EN AW-6082; e) przekrój skrajny stop EN AW-7075; d) przekrój środkowy stop EN AW-7075; sztywność narzędzia $2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	118
Rys. 6.22. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; grubości ścianek g_s : a) $4,0\text{ mm}$, b) $2,8\text{ mm}$, c) $2,0\text{ mm}$, d) $1,4\text{ mm}$, e) $1,0\text{ mm}$, f) $0,7\text{ mm}$	119
Rys. 6.23. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o różnych grubościach i długości $L_s=90\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	120
Rys. 6.24. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek utwardzonych o długości $L_s=90\text{mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; grubości ścianek: a) $4,0\text{ mm}$, b) $2,8\text{ mm}$, c) $2,0\text{ mm}$, d) $1,4\text{ mm}$, e) $1,0\text{ mm}$, f) $0,7\text{ mm}$	121
Rys. 6.25. Zarys powierzchni bocznej ścianek utwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{mm}$; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600\text{m/min}$; sztywność narzędzia $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; długości ścianek L_s : a) 50 mm , b) 70 mm , c) 90 mm	122
Rys. 6.26. Wartości odkształcenia w przekrojach skrajnych i środkowych ścianek utwardzonych o różnej długości i grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	123
Rys. 6.27. Wartości odkształcenia w przekrojach środkowych ścianek utwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{mm}$ wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziem o sztywności $j=2,0\text{ N/}\mu\text{m}$; długości ścianek: a) 50 mm , b) 70 mm , c) 90 mm	124
Rys. 6.28. Chropowatość powierzchni ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s=4,0\text{mm}$ i $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075 narzędziami o różnej sztywności	125
Rys. 6.29. Widok powierzchni ścianek nieutwardzonych o grubości $g_s=4\text{ mm}$, wykonanych ze stopu EN AW-7075, narzędziem o sztywności $j=72\text{ N/}\mu\text{m}$ z różnymi prędkościami skrawania v_c : a) 150 m/min ; b) 300 m/min ; c) 450 m/min ; d) 600 m/min ; e) 750 m/min ; f) 900 m/min	127
Rys. 6.30. Chropowatość powierzchni ścianek nieutwardzonych wykonanych ze stopu EN AW-7075; grubości ścianek g_s : a) $4,0\text{mm}$; b) $2,8\text{mm}$; c) $2,0\text{mm}$; d) $1,4\text{mm}$; e) $1,0\text{mm}$; f) $0,7\text{mm}$	128
Rys. 6.31. Chropowatość powierzchni ścianek nieutwardzonych o grubościach $g_s=4,0\text{mm}$ i $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych z różnych stopów Al narzędziami o sztywnościach j : a) $106,8\text{ N/}\mu\text{m}$; b) $2,0\text{ N/}\mu\text{m}$	130

-
- Rys. 6.32. Chropowatość powierzchni ścianek nieutwardzonych wykonanych z różnych stopów Al: a) AlSi10Mg, $g_s=4,0\text{mm}$; b) AlSi10Mg, $g_s=0,7\text{mm}$; c) AW-6082, $g_s=4,0\text{mm}$; d) AW-6082, $g_s=0,7\text{mm}$; e) AW-7075, $g_s=4,0\text{mm}$; f) AW-7075, $g_s=0,7\text{mm}$ 132
- Rys. 6.33. Chropowatość powierzchni ścianek utwardzonych i nieutwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych z różnych stopów Al narzędziami o sztywności j: a) $106,8\text{ N}/\mu\text{m}$; b) $2,0\text{ N}/\mu\text{m}$ 133
- Rys. 6.34. Chropowatość powierzchni ścianek nieutwardzonych i utwardzonych o grubości $g_s=0,7\text{mm}$, wykonanych z różnych stopów Al: a) AlSi10Mg, nieutw.; b) AlSi10Mg, utw.; c) AW-6082, nieutw.; d) AW-6082, utw.; e) AW-7075, nieutw.; f) AW-7075, utw. 134

Spis tabel

Tabela 1.1. System oznaczania stanu stopów aluminium [58, 69].....	32
Tabela 3.1. Oznaczenie i skład chemiczny wybranych stopów aluminium [59-63, 72].....	49
Tabela 3.2. Właściwości i zastosowanie wybranych stopów aluminium [25, 72, 91]	50
Tabela 3.3. Zestawienie wymiarów ścianek oraz wartości naddatków obróbkowych	51
Tabela 3.4. Zestawienie wysięgów oraz parametrów geometrycznych narzędzi zastosowanych do badań	53
Tabela 3.5. Zestawienie parametrów obróbki zgrubnej i wykończeniowej	55
Tabela 3.6. Specyfikacja techniczna sondy TS640 [34]	60
Tabela 4.1. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań sztywności frezów, z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	67
Tabela 5.1. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów pomiarów sił skrawania, z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	76
Tabela 5.2. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów pomiarów sił skrawania, z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$	76
Tabela 5.3. Wybrane właściwości mechaniczne badanych stopów aluminium	78
Tabela 5.4. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań modułu Younga, z wykorzystaniem modelu statystycznego t-Studenta; $\alpha = 0,05$	79
Tabela 5.5. Wyniki weryfikacji statystycznej rezultatów badań modułu Younga, z wykorzystaniem modelu statystycznego Cochran-Coxa; $\alpha = 0,05$	79
Tabela 6.1. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształceń ścianek wykonanych narzędziami o sztywnościach $j = 72,0$ i $j = 106,8 \text{ N}/\mu\text{m}$; $\alpha = 0,05$	96
Tabela 6.2. Wyniki obliczeń ugięcia narzędzi o różnych sztywnościach	98
Tabela 6.3. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształcenia ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z prędkościami skrawania $v_c = 150 \text{ m/min}$ i $v_c = 900 \text{ m/min}$; $\alpha = 0,05$	100
Tabela 6.4. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształcenia ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z prędkościami skrawania $v_c = 150 \text{ m/min}$ i $v_c = 900 \text{ m/min}$; $\alpha = 0,05$	102
Tabela 6.5. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości odkształceń ścianek o długościach $L_s = 70$ i $L_s = 90 \text{ mm}$; $\alpha = 0,05$	110
Tabela 6.6. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości chropowatości powierzchni ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z różnymi prędkościami skrawania; $\alpha = 0,05$	126
Tabela 6.7. Wyniki weryfikacji statystycznej wartości chropowatości powierzchni ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności z różnymi prędkościami skrawania; $\alpha = 0,05$	131

Literatura

1. Adamski W.: *Manufacturing development strategies in aviation industry*. „Advances in Manufacturing Science and Technology” 34/2010, s. 73-84.
2. Adamski W.: *Wybrane kierunki zwiększania wydajności procesów skrawania*. „Mechanik” 5-6/2009, s. 540-546.
3. Ahmadi K., Ismail F.: *Investigation of Finite Amplitude Stability Due to Process Damping in Milling*. „Procedia CIRP” 1/2012, s. 60-65.
4. Altintas Y., Ko J.H.: *Chatter Stability of Plunge Milling*. „CIRP Annals - Manufacturing Technology” 55(1)/2006, s. 361-364.
5. Amor R.B.: *Thermomechanische Wirkmechanismen und Spanbildung bei der Hochgeschwindigkeitsspannung*. Universita Hanower, 2002.
6. Andrae P.: *Hochleistungszerspannung von Aluminiumknetlegierungen*. Universitat Hannover, 2002.
7. Arumugam P.U., Malshe A.P., Batzer S.A.: *Dry machining of aluminum-silicon alloy using polished CVD diamond-coated cutting tools inserts*. „Surface and Coatings Technology” 200(11)/2006, s. 3399-3403.
8. AVIA: *Materiały informacyjne firmy AVIA*. /2010.
9. Bartosiewicz J.: *Obróbka skrawaniem oraz elementy obrabiarek*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk, 1997.
10. Barwinek M.: *Doskonałe technicznie narzędzia skrawające firmy Fraisa (ITA)*. „Mechanik” 2/2013, s. 102.
11. Boeing, *High Speed Machining Aluminum*, 2008, Boeing Technology.
12. Bravo U., Altuzarra O., López de Lacalle L.N., Sánchez J.A., Campa F.J.: *Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine*. „International Journal of Machine Tools and Manufacture” 45(15)/2005, s. 1669-1680.
13. Burek J., Płodzień M.: *Wysoko wydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach*. „Mechanik” 7/2012, s. 542-549.
14. Calatoru V.D., Balazinski M., Mayer J.R.R., Paris H., L'Espérance G.: *Diffusion wear mechanism during high-speed machining of 7475-T7351 aluminum alloy with carbide end mills*. „Wear” 265(11-12)/2008, s. 1793-1800.
15. Campa F.J., Lopez de Lacalle L.N., Celaya A.: *Chatter avoidance in the milling of thin floors with bull-nose end mills: Model and stability diagrams*. „International Journal of Machine Tools and Manufacture” 51(1)/2011, s. 43-53.
16. Cichosz P.: *Obróbka skrawaniem - wysoka produktywność*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 2007.
17. Committee A.S.M.I.H.: *ASM Handbook, Volume 02 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. „ASM International”, 2010.
18. Committee A.S.M.I.H.: *ASM Handbook, Volume 16 - Machining*. „ASM International”, 2010.
19. Czechwski Z., Jaworski Z., Jezierski J., Jurczak E., Kowalczyk T., Koć A., Kowalczyk T., *Encyklopedia technik wytwarzania*, Jerzy Erbel, Editor 2001, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa.
20. Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Wydawnictwa naukowo techniczne. Warszawa, 2007.

21. Dul-Korzyńska B.: *Obróbka skrawaniem i narzędzia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów, 2005.
22. Durante S., Rutellib G., Rabezzana F.: *Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools*. „Surface and Coatings Technology” 94-95/1997, s. 632-640.
23. Dwivedi D.K., Sharma A., Rajan T.V.: *Machining of LM13 and LM28 cast aluminium alloys: Part I*. „Journal of Materials Processing Technology” 196(1-3)/2008, s. 197-204.
24. Ewins D.J.: *Modal Testing: Theory and Practice*. Research Studies Press. Letchworth, England, 1984.
25. Feld M.: *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1984.
26. Fukui H., Okida J., Omori N., Moriguchi H., Tsuda K.: *Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys*. „Surface and Coatings Technology” 187(1)/2004, s. 70-76.
27. Gang L.: *Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process*. „Journal of Materials Processing Technology” 209(6)/2009, s. 2788-2793.
28. Garant: *Poradnik obróbka skrawaniem*. Garant, 2010.
29. Górski E.: *Poradnik frezera*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1999.
30. Górski E.: *Poradnik inżyniera-Obróbka skrawaniem tom II*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1993.
31. Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. Wydawnictwa Naukowo - Techniczne. Warszawa, 1998.
32. Gsanger D.: *Chancen und Grenzen des High Performance Cutting*. „Werkzeug Technik” 72/2002, s. 35-37.
33. Guhring: *Wysokowydajne frezy ze zmiennym kątem spirali*. http://www.guehring.pl/cms/gallery/Image/n_przeglad_typow.pdf.
34. Heidenhain: *Materiały informacyjne firmy Heidenhain*. /2013.
35. Houming Z., Chengyong W., Zhenyu Z.: *Dynamic characteristics of conjunction of lengthened shrink-fit holder and cutting tool in high-speed milling*. „Journal of Materials Processing Technology” 207(1-3)/2008, s. 154-162.
36. Hovsepian P.E., Luo Q., Robinson G., Pittman M., Howarth M., Doerwald D., . . . Zeus T.: *TiAlN/VN superlattice structured PVD coatings: A new alternative in machining of aluminium alloys for aerospace and automotive components*. „Surface and Coatings Technology” 201(1-2)/2006, s. 265-272.
37. Humienny Z., Blunt L., Jakubiec W., Osanna P.H., Tamre M., Weckemann A.: *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Podręcznik europejski*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2009.
38. Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2004.
39. Jemielniak K.: *Nowe trendy w obróbce wysoko wydajnej (HPC)*. „Stal Metale & Nowe Technologie” 9-10/2012, s. 120-128.
40. Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1998.
41. John P.: *Machining of products*. European aluminium association, 1994.
42. Kecelj B., Kopač J., Kampuš Z., Kuzman K.: *Speciality of HSC in manufacturing of forging dies*. „Journal of Materials Processing Technology” 157-158/2004, s. 536-542.
43. Kistler: *Materiały informacyjne firmy Kistler*. /2013.

44. Ko J.H., Altintas Y.: *Time domain model of plunge milling operation*. „International Journal of Machine Tools and Manufacture” 47(9)/2007, s. 1351-1361.
45. Kopelovich D.: *Wrought aluminium alloys*. www.substech.com /2009.
46. Kryszicki W., Bartos J., Dyczka W.: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach*. Wydawnictwa Naukowe PWN. Warszawa, 1999.
47. Kuczmazewski J.: *Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu*. Komputerowo zintegrowane zarządzanie, Tom 2. Red. Konsola Ryszard. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją. Opole, 2011. s. 7-18.
48. Kuczmazewski J., Pieško P.: *Badania zużycia frezów trzpieniowych przy obróbce konwencjonalnej, HSC i HPC wysokokrzemowego stopu AlSi21CuNi (AK20)*. Raport z badań w ramach projektu: „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” /2011.
49. Kuczmazewski J., Pieško P.: *Wear of milling cutters resulting from high silicon aluminium alloy cast AlSi21CuNi machining* „ Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability” 16/2014, s. 37-41.
50. Kuczmazewski J., Pieško P.: *Wpływ rodzaju powłok frezów węglkowych na siły skrawania oraz chropowatość powierzchni przy frezowaniu stopu aluminium EN AW-6082*. „Mechanik” 10/2013, s. 846-854.
51. Lahres M., Muller-Hummel P., Doerfel: *Applicability of different hard coatings in dry milling aluminium alloys*. „Surface and Coatings Technology 91/1997, s. 161-121.
52. LMTFette: *DHC siła tkwi w spokoju*. Materiały informacyjne firmy LMT Fette.
53. Lopez de Lacalle L.N., Lamikiza A., Sanchez J.A., Arana J.L.: *Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies*. „Journal of Materials Processing Technology” 123/2002, s. 292-302.
54. Morey B.: *High-speed machining for aerospace*. „Manufacturing Engineering” 3/2008, s. 133-143.
55. Ng E.G., Szablewski D., Dumitrescu M., Elbestawi M.A., Sokolowski J.H.: *High Speed Face Milling of a Aluminium Silicon Alloy Casting*. „CIRP Annals - Manufacturing Technology” 1/2004, s. 69-72.
56. Normy, ISO 1940:2003 - *Drgania mechaniczne - Wyważanie wirników sztywnych. Wyznaczenie dopuszczalnego niewyważenia resztkowego*, 2003.
57. Normy, Polska Norma: PN-EN ISO 9513:2013 - *Metale -Wzorcowanie ekstensometrów stosowanych w próbie jednoosiowego rozciągania*, 2013.
58. Normy, Polskie Normy: PN-EN 515-1:1996 - *Aluminium i stopy aluminium - Wyroby przerobione plastycznie - Oznaczenia stanów 1996*.
59. Normy, Polskie Normy: PN-EN 573-1:2006 - *Aluminium i stopy aluminium - Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie - Część 1: System oznaczeń numerycznych*, 2006.
60. Normy, Polskie Normy: PN-EN 573-3:2010 - *Aluminium i stopy aluminium - Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie - Część 3: Skład chemiczny*, 2005.
61. Normy, Polskie Normy: PN-EN 1706:2011 - *Aluminium i stopy aluminium - Odlewy - Skład chemiczny i własności mechaniczne 2001*.
62. Normy, Polskie Normy: PN-EN 1780-1:2004 - *Aluminium i stopy aluminium - Oznaczenia gąsek do przetopienia z aluminium stopowego, stopów wstępnych i odlewów - Część 1: System oznaczeń numerycznych*, 2004.

63. Normy, *Polskie Normy: PN-EN 1780-2:2004 - Aluminium i stopy aluminium - Oznaczenia gąsek do przetopienia z aluminium stopowego, stopów wstępnych i odlewów - Część 2: System oznaczeń na podstawie symboli chemicznych*, 2004.
64. Normy, *Polskie Normy: PN-EN 10002-1:2004 - Badania wytrzymałościowe*, 2004.
65. Oczoś K.E.: *Dobór technik kształtowania ubytkowego wyrobów*. „Mechanik” 5-6/2008, s. 361-379.
66. Oczoś K.E.: *Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium cz.I*. „Mechanik” 3/2009.
67. Oczoś K.E.: *Kierunki zwiększania produktywności procesów skrawania*. „Mechanik” 5-6/2007, s. 325-348.
68. Oczoś K.E.: *Obróbka wysokowydajna-HPC (High Performance Cutting)*. „Mechanik” 11/2004, s. 701-709.
69. Oczoś K.E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 2012.
70. Oerlikon: *Balzars Coating: Diamantschicht für die Aluminiumbearbeitung*. 2008; <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/zerspanungstechnik/articles/157268/>.
71. Olszak W.: *Obróbka skrawaniem*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2009.
72. *Metale kolorowe*. 2013.
73. Parlińska M., Parliński J.: *Statystyczna analiza danych z Excelem*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa, 2011.
74. Pasko R., Przybylski L., Słodki B., *High speed machining (HSM) – the effective way of modern cutting*, in *International Workshop CA Systems And Technologies* 2002.
75. Piekarski R.: *Obróbka szybkościowa stopów aluminium (MITSUBISHI MATERIALS)*. „Mechanik” 3/2008, s. 184.
76. Pieśko P.: *Opracowanie zaleceń w zakresie doboru technologicznych parametrów obróbki „ciągłych” stopów Al dla różnych l/d frezów trzpieniowych*. Raport z badań w ramach projektu: „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” /2010.
77. Pieśko P., Kłonica M.: *Parametry technologiczne obróbki stopów Al i Mg na podstawie analizy literatury i doświadczeń przemysłowych*. Workshop – project AERONET: Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym. Politechnika Warszawska, listopad 2009.
78. Pieśko P., Zagórski I.: *Analiza porównawcza metod frezowania HSM, HPC oraz frezowania konwencjonalnego wysokokrzemowych stopów aluminium*. „Postępy Nauki i Techniki” 7/2011, s. 219-226.
79. Polmear I.J.: *Light alloys. From traditional alloys to nanocrystals*. Wydanie czwarte. Elsevier. Amsterdam, 2005.
80. Ratchev S., Govender E., Nikov S., Phuah K., Tsiklos G.: *Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts*. „Journal of Materials Processing Technology” 143-144/2003, s. 796-801.
81. Ratchev S., Huang W., Liu S., Becker A.A.: *Modelling and simulation environment for machining of low-rigidity components*. „Journal of Materials Processing Technology” 153-154/2004, s. 67-73.
82. Ratchev S., Liu S., Becker A.A.: *Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts*. „Journal of Materials Processing Technology” 162-163/2005, s. 673-681.

83. Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A.A.: *Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts*. „International Journal of Machine Tools and Manufacture” 44(15)/2004, s. 1629-1641.
84. Rivero A., López de Lacalle L.N., Penalva M.L.: *Tool wear detection in dry high-speed milling based upon the analysis of machine internal signals*. „Mechatronics” 18(10)/2008, s. 627-633.
85. Robertson E.: *Defining new directions in virtual machining*. Shop Metalworking Technology. [http://www.shopmetaltech.com/component/articledetail/name=Defining new directions in virtual machining](http://www.shopmetaltech.com/component/articledetail/name=Defining_new_directions_in_virtual_machining).
86. Salgado M.A., López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Muñoa J., Sánchez J.A.: *Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting forces*. „International Journal of Machine Tools and Manufacture” 45(6)/2005, s. 727-739.
87. Sandvik: *Die and mould making application guide*. Sandvik Coromant /1999.
88. Sandvik: *Frezowanie. Poradnik Obróbki Skrawaniem*. Sandvik. Szwecja, 2010.
89. Sandvik: *Narzędzia obrotowe – frezowanie – Sandvik Coromant* Sandvik Coromant /2012.
90. Sandvik: *Poradnik obróbki skrawaniem*. Sandvik. Szwecja, 2007.
91. *Strona internetowa*.
92. Semotiuk L.: *Analiza cech eksploatacyjnych innowacyjnych konstrukcji narzędzi wykorzystywanych w procesach frezowania zgrubnego z wykorzystaniem technologii HSM*. „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 1(46-53)/2009.
93. Skrawające narzędzia F.S.A.F.n.: *Narzędzia do metalu Fenes - Katalog Narzędzi*. 2013.
94. Sobczyk M.: *Statystyka*. Wytawnictwa Naukowe PWN. Warszawa, 2007.
95. Sobczyk M., *Statystyka. Aspekty praktyczne i teoretyczne*, 2005, Wydawnictwa UMCS: Lublin.
96. Songmene V., Khettabi R., Zaghbani I., Kouam J., A. D.: *Machining and machinability of aluminum alloys*. Aluminium Alloys, Theory and Applications. Red. Kvackaj Tibor. Canada, 2011.
97. Sreejith P.S.: *Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions*. „Materials Letters” 62(2)/2008, s. 276-278.
98. *Podstawy Obróbki Skrawaniem*. www.zmp.wm.tu.koszalin.pl.
99. Tools S.S.C.: *Materiały informacyjne firmy SGS*. /2013.
100. Wątroba J.: *Eksploracja danych, testowanie hipotez badawczych i modelowanie zależności – przykłady w Statistica 9*. 2009.
101. Xu A.P., Qu Y.X., Zhang D.W., Huang T.: *Simulation and experimental investigation of the end milling process considering the cutter flexibility*. „International Journal of Machine Tools and Manufacture” 43(3)/2003, s. 283-292.
102. Zalewski A.: *Efektywne wytwarzanie dzięki optymalnej strategii obróbki HSM*. „Projektowanie i konstrukcje inżynierskie” 3/grudzień 2007, s. 23-26.
103. Zębała W.: *Minimalizacja błędów obróbki przedmiotów cienkościennych*. „Inżynieria Maszyn” 3/2010, s. 45-54.
104. Zwick: *Materiały informacyjne firmy Zwick/Roell*. /2010.

Załączniki

Załącznik 1



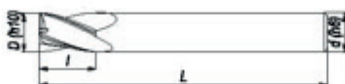
DIN 6527 L



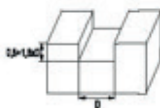
Frezy do obróbki metali lekkich i tworzyw sztucznych

End mills for machining of light metals and plastics

Фрезы для обработки легких металлов и пластмасс



Zastosowanie / Application / Назначение



♦ DIN 6527 L

D	d	l	2-odstawy / 2 fluty / с 2 отставками		3-odstawy / 3 fluty / с 3 отставками		4-odstawy / 4 fluty / с 4 отставками	
			Index 0941-512-	Index IAN 0941-512-	Index 0941-512-	Index IAN 0941-512-	Index 0941-512-	Index IAN 0941-512-
3	6	37	10	-901-530	10	-901-630	13	-901-730
4	6	37	10	-901-535	10	-901-635	13	-901-735
7	8	63	13	-901-540	13	-901-640	16	-901-740
8	8	63	16	-901-545	16	-901-645	19	-901-745
9	10	72	16	-901-550	16	-901-650	19	-901-750
10	10	72	19	-901-555	19	-901-655	22	-901-755
12	12	83	22	-901-560	22	-901-660	26	-901-760
14	14	83	22	-901-565	22	-901-665	26	-901-765
16	16	92	26	-901-570	26	-901-670	32	-901-770
18	18	92	26	-901-575	26	-901-675	32	-901-775
20	20	104	32	-901-580	32	-901-680	38	-901-780

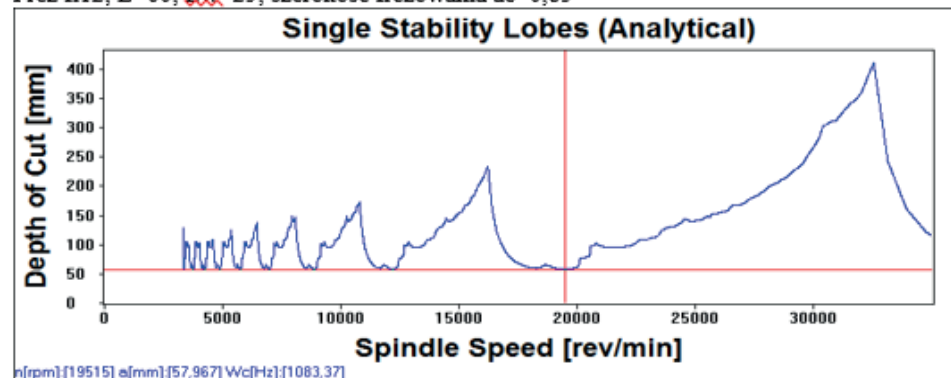
① Na specjalne zamówienie wykonujemy narzędzia o wymiarach innych niż zawarte w tabeli. / For the special order we make tools of other dimensions than contained in table. / По заказу, изготавливаем инструменты с размерами другими, чем указаны в таблице.

Załącznik 2

MATERIAL: 7075

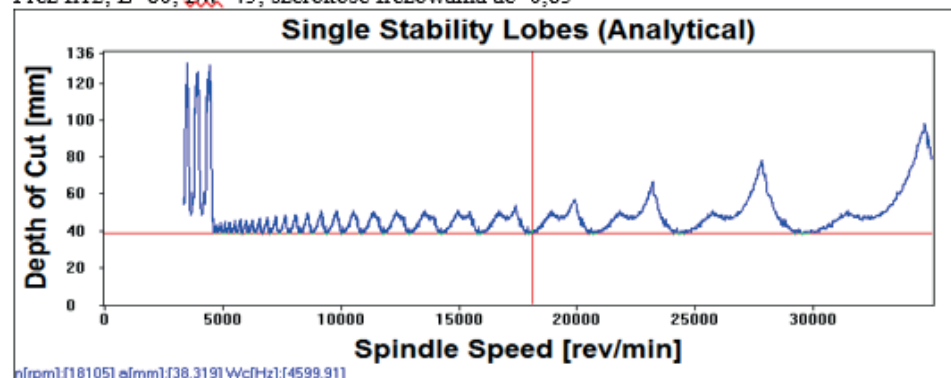
FREZ 1 L60

Frez fi12; L=60; $L_w=25$; szerokość frezowania $a_e=0,85$



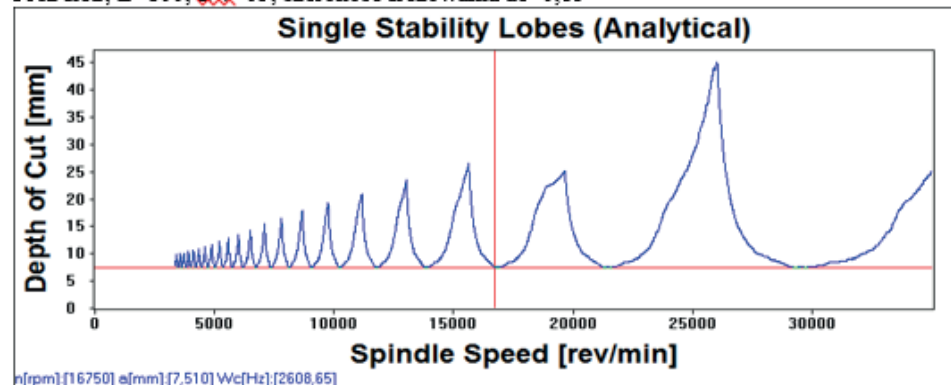
FREZ 2 L80

Frez fi12; L=80; $L_w=45$; szerokość frezowania $a_e=0,85$



FREZ 3 L100

Frez fi12; L=100; $L_w=65$; szerokość frezowania $a_e=0,85$



Protokół badania

Firma : Politechnika Lubelska, KPIP Typ próby :
 Nr zamówienia : Obróbka wstępna :
 Norma badawcza : DIN EN 10002-1 Badający : Paweł Pieśko
 Typ i oznaczenie : Uwaga :
 Materiał : AW 6082 Dane maszyny :
 Odbiór próby :

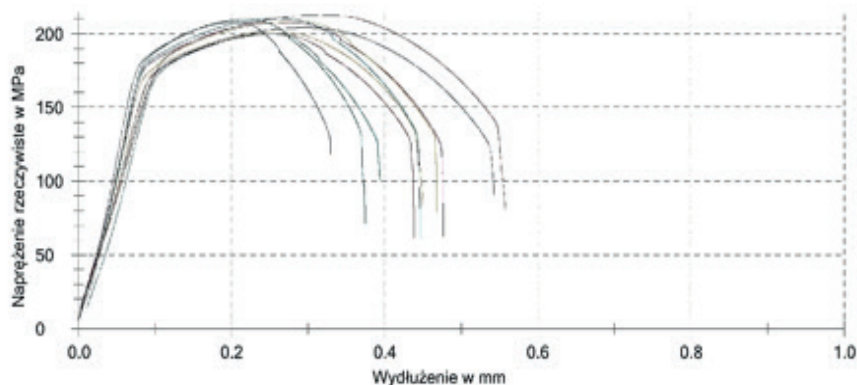
Sila wstępna : 2 MPa Prędkość w zakresie płynięcia : 0,00025 1/s
 Prędkość modułu E : 60 mm/min Prędkość badania : 0,008 1/s
 Prędkość Granica plastyczności : 60 MPa/s

Wyniki badania:

Nr	E GPa	R _{p0.1} MPa	R _{p0.2} MPa	R _{p0.5} MPa	R _{p0.5} MPa	R _{p0.2} /R _m %	R _{eh} MPa	R _{eh} /R _m %	R _{eL} MPa	A _e %	R _m MPa	F _m kN	A _g (kon.) %
1	64	187	195	190	195	98,10	199	100,00	-	-	199	9,93	0,64
2	59	192	197	177	196	99,32	199	100,00	-	-	199	9,93	0,62
3	71	186	195	202	196	96,04	-	-	-	-	203	10,13	0,74
4	66	189	196	194	197	97,94	200	100,00	-	-	200	10,00	0,66
5	70	194	202	203	203	97,67	206	100,00	-	-	206	10,32	0,67
6	69	197	205	203	205	97,92	209	100,00	-	-	209	10,45	0,66
7	72	191	200	205	201	96,59	207	100,00	-	-	207	10,35	0,71
8	67	194	202	211	203	95,92	-	-	-	-	211	10,54	0,79
9	58	206	209	176	208	99,99	209	100,00	-	-	209	10,44	0,55
10	64	203	207	164	207	99,99	207	100,00	-	-	207	10,35	0,53

Nr	A ₀ %	R _s MPa	A _k (kon.) %	A _{5,65} %	A _{11,3} %	A _{5,65} %	L ₀ mm	L _c mm	a ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
1	0,33	61	1,1	1,0	0,8	1,0	39,95	50,00	5	10	50,00
2	0,28	99	1,0	0,8	0,6	0,8	39,95	50,00	5	10	50,00
3	0,45	89	1,4	1,2	0,9	1,2	39,95	50,00	5	10	50,00
4	0,35	84	1,1	1,0	0,8	1,0	39,95	50,00	5	10	50,00
5	0,37	62	1,2	1,1	0,8	1,1	39,95	50,00	5	10	50,00
6	0,35	61	1,1	1,0	0,8	1,0	39,95	50,00	5	10	50,00
7	0,42	78	1,2	1,1	0,8	1,1	39,95	50,00	5	10	50,00
8	0,47	80	1,4	1,3	1,0	1,3	39,95	50,00	5	10	50,00
9	0,19	71	0,9	0,8	0,6	0,8	39,95	50,00	5	10	50,00
10	0,21	117	0,8	0,7	0,5	0,7	39,95	50,00	5	10	50,00

Wykres serii:



Statystyka:

Seria	E	R _{p0.1}	R _{p0.2}	R _{p0.5}	R _{0.5}	R _{p0.2} /R _m	R _{eH}	R _{eH} /R _m	R _{eL}	A _g	R _m	F _m	A _{g1} (kon.)
n = 10	GPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	kN	%
x	66	194	201	193	201	97,95	204	100,00	-	-	205	10,24	0,66
s	5	6	5	16	5	1,49	5	0,00	-	-	5	0,23	0,08
v	7,34	3,34	2,51	8,07	2,41	1,52	2,21	0,00	-	-	2,22	2,22	11,93

Seria	A _g	R _s	A _k (kon.)	A _{5,65}	A _{11,3}	A _{5,65}	L ₀	L _c	a ₀	b ₀	S ₀
n = 10	%	MPa	%	%	%	%	mm	mm	mm	mm	mm ²
x	0,34	80	1,1	1,0	0,8	1,0	39,95	50,00	5	10	50,00
s	0,10	18	0,2	0,2	0,1	0,2	0,00	0,00	0,000	0,000	0,00
v	27,71	22,79	15,54	19,32	19,32	19,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Załącznik 4

Utwierdzona_srodek_7075_
gs4,0_Ls90_vc600

Firma

Politechnika Lubelska

Autor

Paweł Pieśko

Data

15.11.2013

Użyte oprogramowanie

Solid Edge ST(106.00.00.100 x64)

Femao (11.01)

Użyty solver

NX Nastran (8.5)

Spis treści

1. Informacje o modelach
2. Właściwości analityczne
3. Geometria analityczna
4. Parametry materiałowe
5. Obciążenia
6. Wieży
7. Informacje o siatce
8. Wyniki
9. Zrzeczenie się odpowiedzialności

1. Informacje o modelach

Dokument	C:\Users\Paweł\Documents\Doktorat\Badania\deformacjeber_Solid MES\polotwarte\ścianka utwierdzona_L90_gs4,0.par
----------	---

2. Właściwości analityczne

Właściwość analityczna	Wartość
Nazwa analizy	Analiza statyczna 1
Typ analizy	Statyka liniowa
Typ siatki	Czworościenna
Solver iteracyjny	Włącz
Sprawdzanie geometrii NX Nastran	Włącz
Wiersz poleceń NX Nastran	
Opcje analizy NX Nastran	
Opcje wygenerowane w NX Nastran	
Opcje domyślne NX Nastran	
Opcja Tylko wyniki na powierzchni	Włącz

3. Geometria analityczna

3.1 Bryły

Nazwa bryły	Materiał	Masa	Objętość	Ciężar
ścianka	Aluminium, 7075-	0,019	6636,013	181,767
utwierdzona_L90_gs4,0.par	T6	kg	mm ³	mN

4. Parametry materiałowe

4.1 Aluminium, 7075-T6

Właściwość	Wartość
Gęstość	2795,000 kg/m ³
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	0,0000 /C
Przewodność cieplna	0,121 kW/m-C
Ciepło właściwe	920,000 J/kg-C
Moduł sprężystości	71705472,800 kPa
Współczynnik Poissona	0,330
Granica plastyczności	503317,261 kPa
Napężenie niszczące	572264,831 kPa
Wydłużenie %	0,000

5. Obciążenia

Nazwa obciążenia	Typ obciążenia	Wartość obciążenia	Rozkład obciążenia	Kierunek obciążenia	Opcja	Kierunek obciążenia
Siła 1	Siła	Ex: 0 mN, Ey: - 2,59e+005 mN, Fz: 0 mN	Na element			Komponenty

6. Wieży

Nazwa wieży	Typ wieży	Stopnie swobody
-------------	-----------	-----------------

Utwierdzenie 1 Utwierdzenie NIEODEBRANE STOPNIE SWOBODY: Brak

7. Informacje o siatce

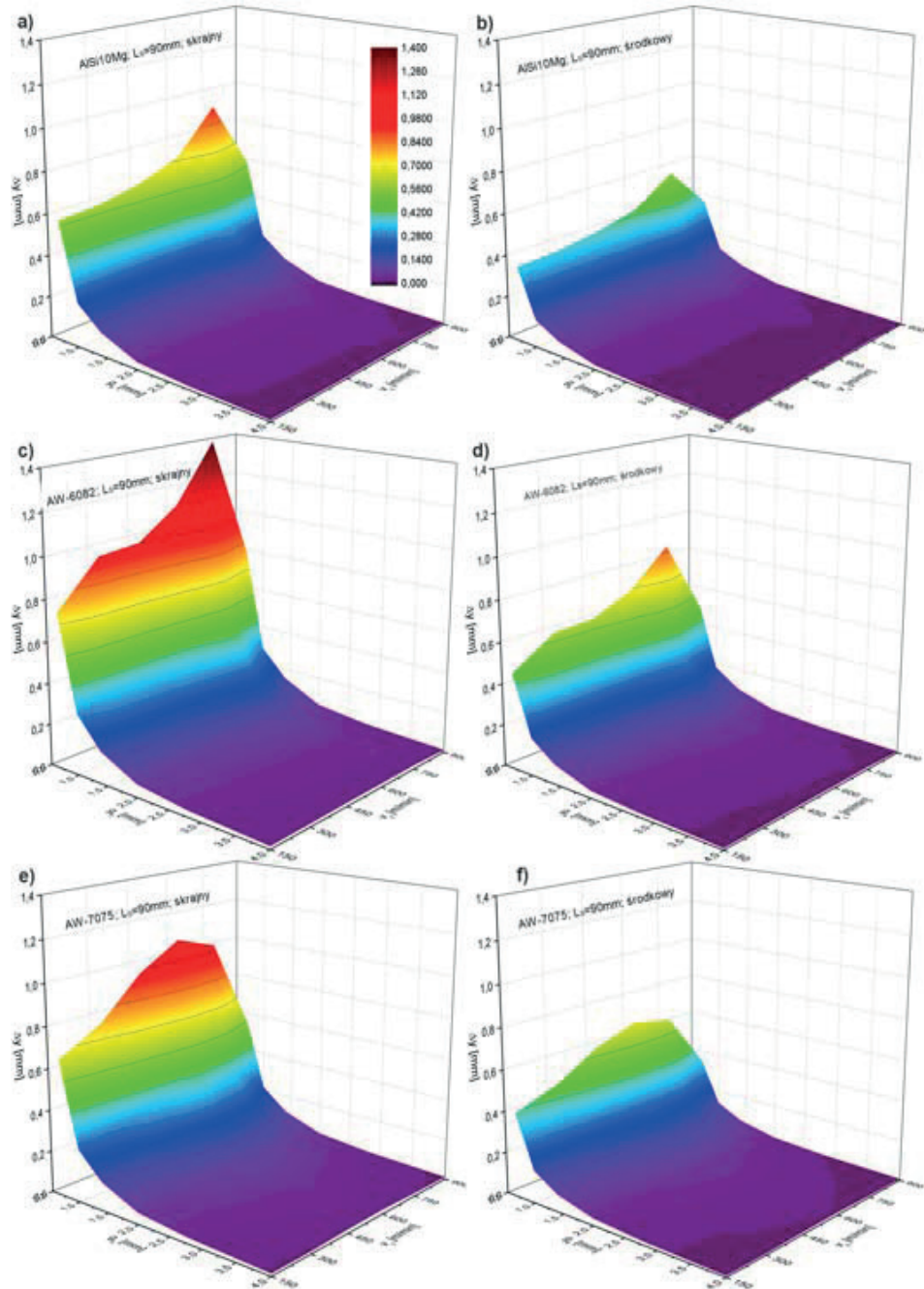
Typ siatki	Czworościenna
Łączna liczba obiektów z nałożoną siatką	1
Łączna liczba elementów	43 407
Łączna liczba węzłów	67 122
Subiektywny rozmiar siatki (1-10)	9

8. Wyniki

8.1 Wyniki przemieszczenia

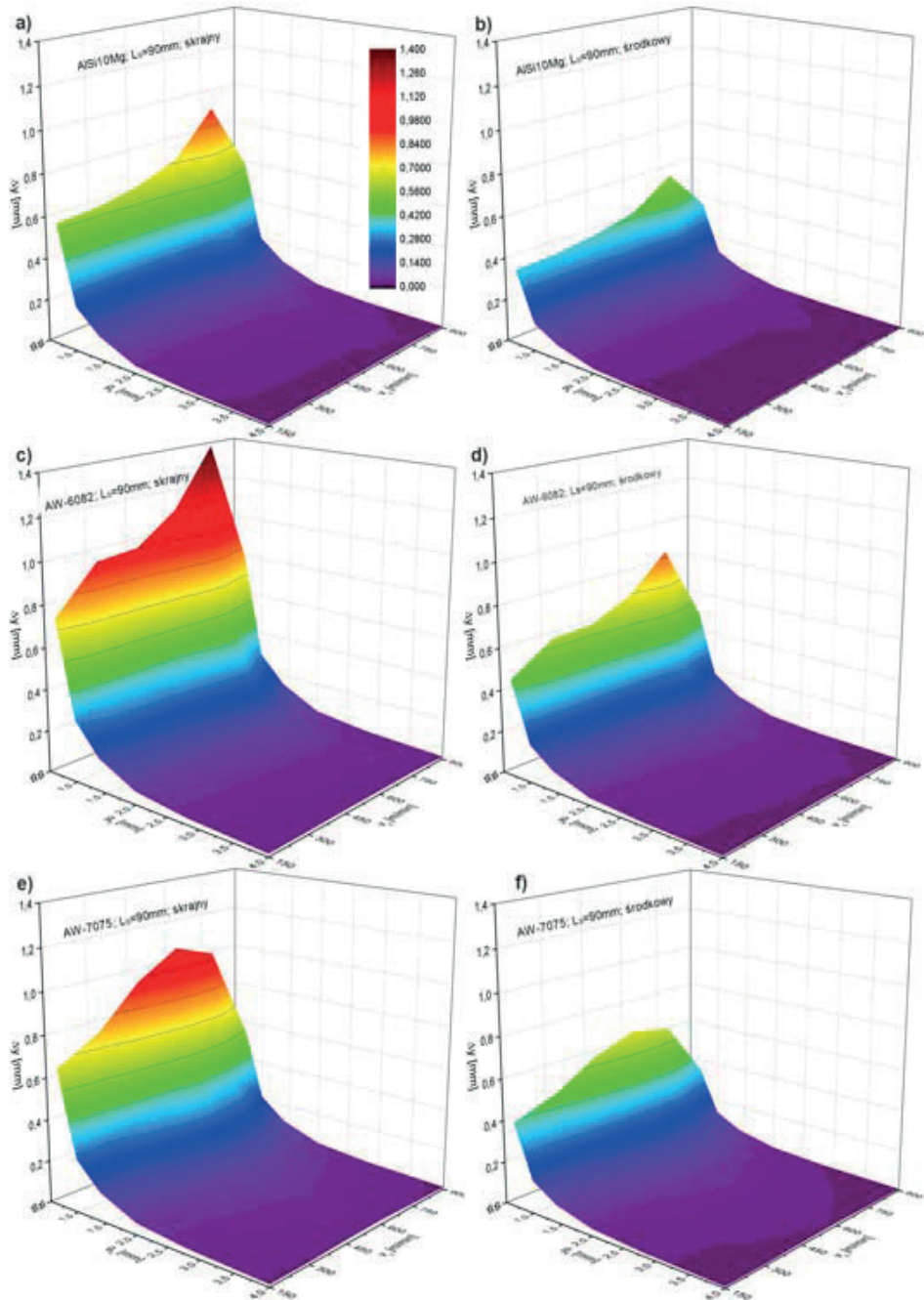
Składnik wyniku: Przesunięcie całkowite				
Rozciąganie	Wartość	X	Y	Z
Minimum	0 mm	-26,474 mm	-0,067 mm	0,000 mm
Maksimum	0,00937 mm	3,921 mm	-0,011 mm	15,000 mm

Załącznik 5



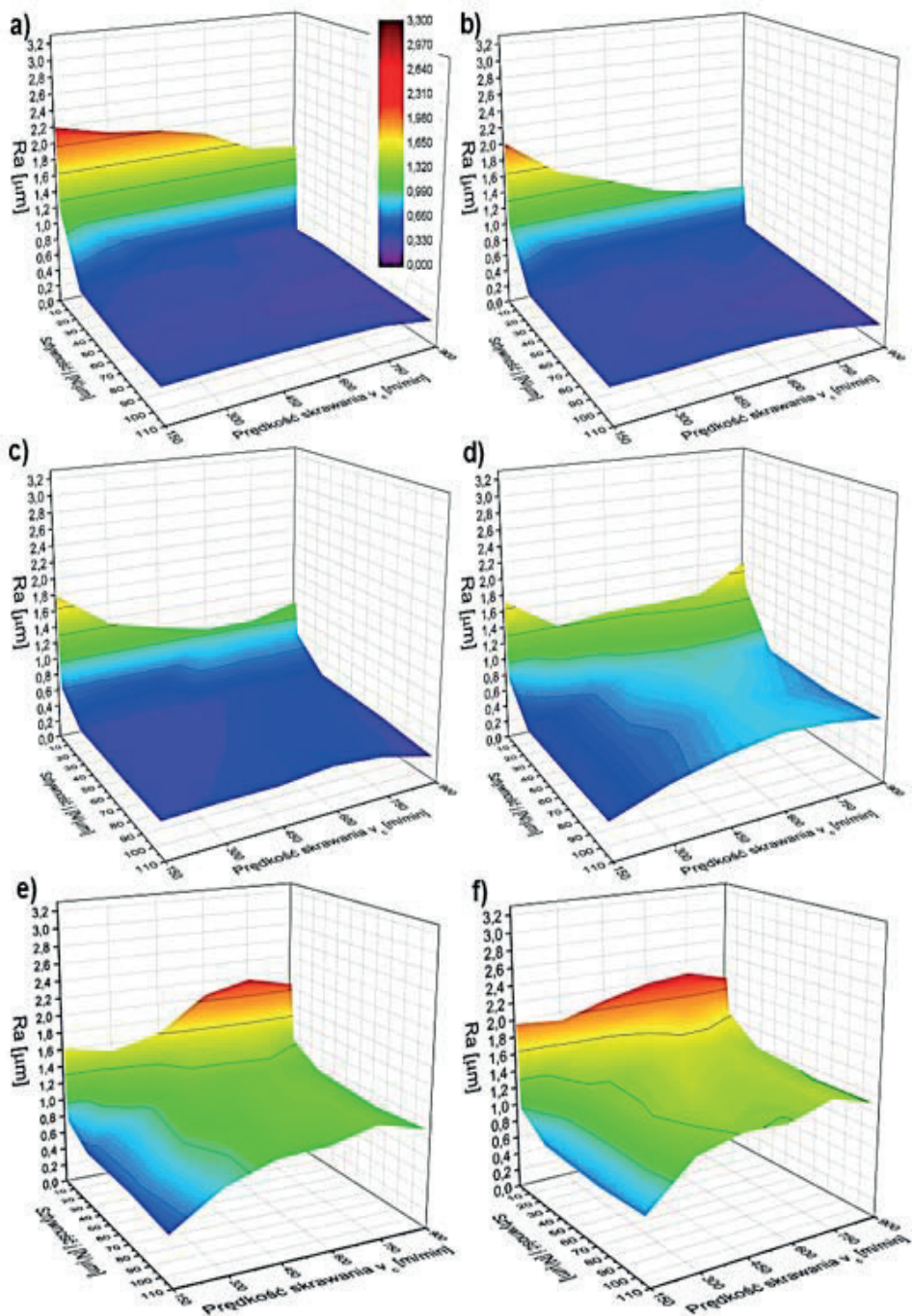
Przesunięcia ścianek nienastępnionych o długości $L_s = 90\text{ mm}$ i grubości $g_s = 0,7\text{ mm}$ dla: a) stop AlSi10Mg, przekrój skrajny; b) stop AlSi10Mg, przekrój środkowy; c) stop AW-6082, przekrój skrajny; d) stop AW-6082, przekrój środkowy; e) stop AW-7075, przekrój skrajny; f) stop AW-7075, przekrój środkowy (obliczenia MES)

Załącznik 6



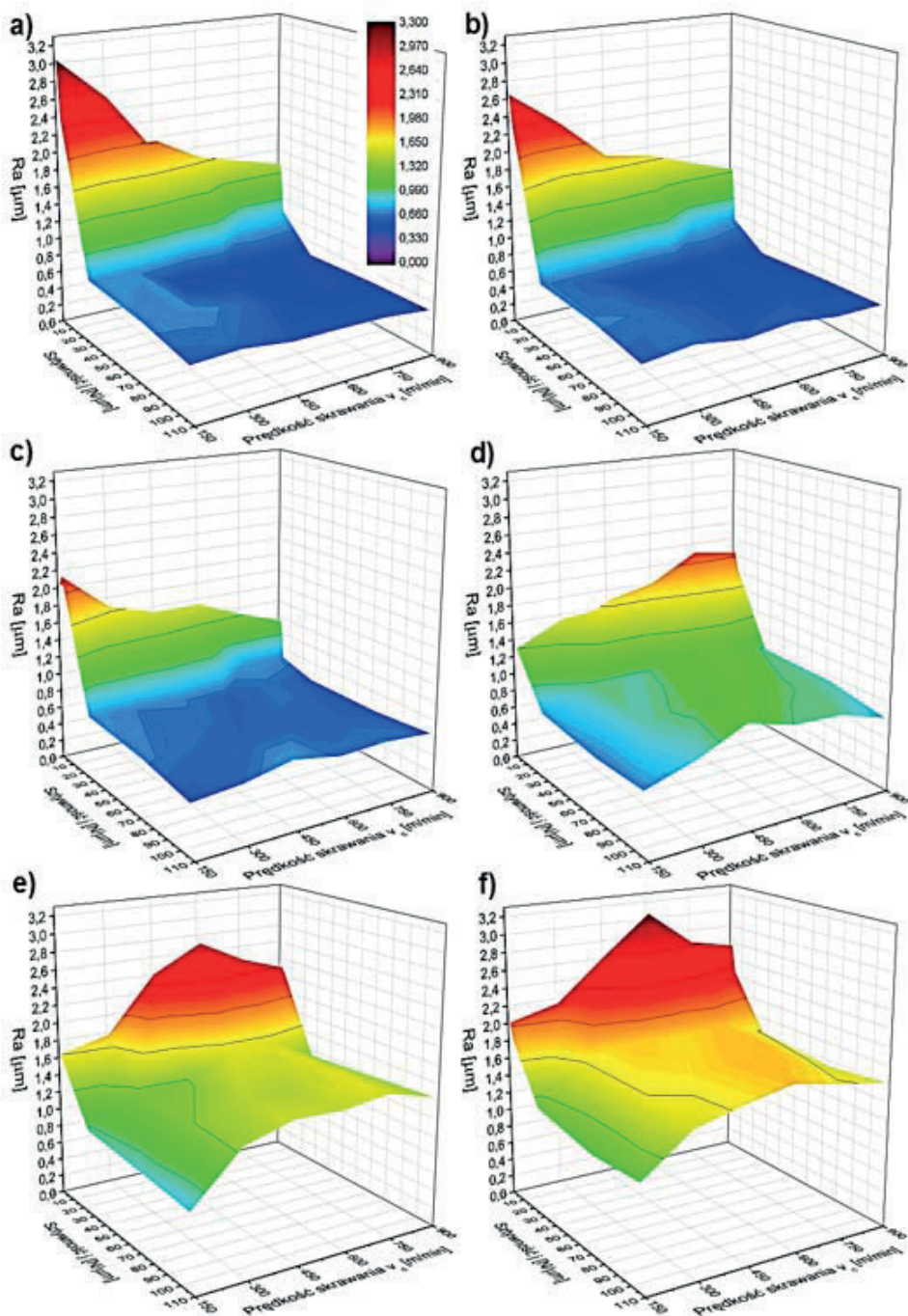
Premieszczenia ścianek nientwierdzonych o długości $L_s = 90$ mm i grubości $g_s = 0,7$ mm dla: a) stop AlSi10Mg, przekrój skrajny; b) stop AlSi10Mg, przekrój środkowy; c) stop AW-6082, przekrój skrajny; d) stop AW-6082, przekrój środkowy; e) stop AW-7075, przekrój skrajny; f) stop AW-7075, przekrój środkowy (obliczenia MES)

Załącznik 7



Chropowość powierzchni ścianek nientwierdzonych wykonanych ze stopu EN AW-6082;
grubości ścianek: a) $g=4,0\text{mm}$; b) $g=2,8\text{mm}$; c) $g=2,0\text{mm}$; d) $g=1,4\text{mm}$; e) $g=1,0\text{mm}$; f) $g=0,7\text{mm}$

Załącznik 8



Chropowość powierzchni ścianek nieutwardzonych wykonanych ze stopu AlSi10Mg ;
grubości ścianek: a) $g=4.0\text{mm}$; b) $g=2.8\text{mm}$; c) $g=2.0\text{mm}$; d) $g=1.4\text{mm}$; e) $g=1.0\text{mm}$; f) $g=0.7\text{mm}$